

ANÁLISIS DEL DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE
ADICIONADA CON GRANO CAUCHO RECICLADO (GCR) Y RAP (RECLAIMED
ASPHALT PAVEMENT)

Autores

Esteban Amorocho, Juan Camilo Moreno Soler, Juan Harley Moreno Basto



Facultad de Ingeniería

Universidad Gran Colombia

Bogotá, Marzo de 2024

Análisis del diseño de una mezcla asfáltica en caliente adicionada con grano caucho reciclado (GRC) y RAP (Reclaimed Asphalt Pavement)

Autores

Esteban Amorocho, Juan Camilo Moreno Soler, Juan Harley Moreno Basto

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Civil**

Harol León Zambrano

Director de Tesis



UNIVERSIDAD
La Gran Colombia

Vigilada MINEDUCACIÓN

Facultad de Ingeniería

Universidad Gran Colombia

Bogotá, marzo 2024

Tabla de Contenido

ANÁLISIS DEL DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE ADICIONADA CON GRANO CAUCHO RECICLADO (GCR) Y RAP (RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT)		2
Dedicatoria		11
Agradecimientos		12
Resumen.....		13
Abstract		15
Introducción		17
Planteamiento del Problema		19
Justificación		21
1. Antecedentes		22
2. Objetivos.....		27
2.1. Objetivo General		27
2.2. Objetivos Específicos		27
3. Marco teórico.....		28
Mezclas asfálticas		28
Clasificación de mezclas asfálticas		29
Mezcla densa en caliente (MDC).....		29

Mezclas semi densas en caliente (MSC).....	29
Mezclas densas en caliente (MDC).....	29
Mezclas de alto modulo (MAM).....	30
Agregados pétreos.....	30
Cemento Asfáltico	31
Propiedades de las mezclas asfálticas	31
Unión de capas de materiales distintos	32
Materiales usados en carreteras	33
Diseño de mezcla asfáltica en caliente.....	34
Impermeabilidad	34
Flexibilidad	35
Resistencia a la fatiga.....	36
Resistencia al deslizamiento	36
RAP37	
Reciclado en planta.....	38
Método Marshall.....	39
4. Metodología	40
Enfoque.....	40
Tipo de investigación.....	40
Objetivo propuesto.....	40

Investigación	41
El método tradicional	41
Enfoque de Investigación.....	42
Los aspectos clave a investigar pueden incluir	42
Tipo de Investigación.....	42
5. Cronograma y Presupuesto	43
6. Procedimiento	44
6.1. Materiales y método Marshall para Mezclas de asfalto en caliente	44
7. Análisis de Resultados	47
7.1. Extracción cuantitativa asfalto caliente para pavimentos INVE-732/13método A.....	47
7.2. Formula de trabajo y dosificación	52
7.3. Estabilidad y flujo modificado	54
7.4. Diseño de mezcla bituminosa método Marshall modificada.....	57
7.5. Discusión de resultados	67
8. Conclusiones y Recomendaciones	73
Bibliografía	75

Lista de Figuras

Figura 1 Cantera materiales de rio y ATS.	78
Figura 2 Material de Cantera RAP.....	78
Figura 3 Secado de tres muestras de RAP	79
Figura 4 Detalle de las tres muestras ya secadas	79
Figura 5 Aceléranos el proceso de secado del rap de tres muestras a 110 grados	80
Figura 6 Horneado del RAP.....	80
Figura 7 recipiente para calcular los pesos de la extracción del RAP	81
Figura 8 Se prepara equipo de extracción del rap trabaja 3600 revoluciones x minuto ..	81
Figura 9 Se cierra el recipiente y aplicamos 500 ml de cloruro para la extracción y la separación del asfalto	82
Figura 10 Se realizan 4 lavadas de cloruro por muestra para que quede separado el asfalto y poder determinar el % óptimo de asfalto	82
Figura 11 Se realiza proceso de secado al horno o estufa 110 grados después de lavar el rap.....	83
Figura 12 Después de secar al horno lo dejamos que se baje la temperatura y procedemos a tamizar el rap cada una de las tres muestras.....	83
Figura 13 Grano de caucho se revisa que este triturado de la manera correcta sin dejar residuos de alambre.....	84
Figura 14 Se guardan las muestras de los materiales y se dejan como testigos para hacer correcciones en caso que no nos cumpla el diseño de mezcla.	84

Figura 15 Se mezclan todos los materiales según nuestro diseño de mezcla obtenido para realizar el rise	85
Figura 16 Toma de temperaturas a nuestras briquetas antes de compactar a 75 golpes por cada cara.....	85
Figura 17 Temperatura 148 grados	85
Figura 18 Proceso de adición del 1% de grano de caucho.....	86
Figura 19 La mezcla tiene que ser homogénea con el bitumen	86
Figura 20 se le adiciona el peso exacto de mezcla asfáltica bitumen 60/70 convencional a nuestros materiales con una temperatura de 148 grados.....	87
Figura 21 Se continua con la mezcla recalentando	87
Figura 22 Material calentado para mezclar el asfalto según diseño de mezcla	88
Figura 23 Materiales granulométricos pesados de acuerdo al diseño de mezcla obtenido del análisis granulométrico	88
Figura 24 Secado de material ya mezclado homogéneo gravas y arenas	89
Figura 25 Proceso de compactación de briquetas 75 golpes por cada cara	89
Figura 26 Se desencofran las muestras de cada una de las briquetas marcadas con los porcentajes de asfalto x cada porcentaje se realizan 3 muestras	90
Figura 27 Temperatura de agua para determinar, Seca en aire, Sss en aire, Peso agua....	90
Figura 28 Muestras listas para baño de agua María.....	91
Figura 29 Muestras en baño de agua María 30 minutos aproximadamente	91
Figura 30 determinamos el rise.....	92
Figura 31 Procedemos a fallar con el anillo para determinar estabilidad y flujo que nos da directamente los valores	92

Figura 32 Fallo de las briquetas	93
Figura 33 Se lava muy bien cada una de las tres muestras y pesamos al final	93
Figura 34 Después de lavar las muestras las tamizamos pasa 200	94
Figura 35 Extracción cuantitativa del asfalto en caliente para pavimentos INVE	47
Figura 36 Análisis granulométrico de agregado grueso y fino INV E-231/13	48
Figura 37 Análisis granulométrico de agregado grueso y fino	48
Figura 38 Análisis granulométrico de agregado grueso y fino	49
Figura 39 Granulometría de agregados ref. 9317	50
Figura 40 Análisis granulométrico de agregado grueso y fino Arena Lavada	51
Figura 41 Análisis granulométrico de agregados extraídos de mezclas asfálticas INV E-782/13.....	51
Figura 42 Dosificación de materiales	52
Figura 43 gráfico que corresponde a los límites mínimos y máximos para el diseño de mezcla modifica MDC-25+RAP+GCR	53
Figura 44 gráfico correspondiente al diseño de mezcla modifica MDC-25+RAP+GCR. 53	
Figura 45 Mezcla ASF en caliente tipo MDC-25+RAP+GCR.....	53
Figura 46 Diseño Marshall MDC25+RAP+GCR modificado.....	54
Figura 47 Dosificación de materiales del diseño Mezcla convencional	55
Figura 48 gráfico que corresponde a los límites mínimos y máximos para el diseño de mezcla convencional MDC25	55
Figura 49 Diseño Marshall MDC25 convencional	56
Figura 50 Gráfico T3	57
Figura 51 tráfico T2 y cumpliendo con el T3	58

Figura 52 Diseño de mezcla bituminosa método Marshall modificada.....	59
Figura 54 Gravedad máxima teórica y porcentaje de asfalto convencional	60
Figura 59 Evaluación de la susceptibilidad al agua de mezclas asfálticas compactadas utilizando la prueba de tracción indirecta inv-e-725 mezcla modificada.	65

Dedicatoria

A nuestros padres, amigos y estimados docentes de la Universidad La Gran Colombia. Quienes han sido nuestro apoyo incondicional, nuestra red de contención emocional y nuestra fuente constante de inspiración a lo largo de este viaje académico, les dedicamos con profundo cariño y gratitud este logro.

Sus palabras de aliento, comprensión y orientación han sido pilares fundamentales en nuestra formación y desarrollo. Gracias por creer en nosotros, por sostenernos en momentos difíciles y por celebrar con nosotros cada pequeño paso hacia adelante. Este logro no solo es mío y de mis compañeros, sino también de ustedes, porque cada uno de ustedes ha dejado una huella indeleble en este camino hacia el conocimiento y el crecimiento personal.

Con amor y profunda gratitud

Agradecimientos

Agradecemos profundamente el apoyo incondicional de nuestra familia durante este proceso, su paciencia y aliento fueron fundamentales en cada etapa de esta investigación. Su amor y comprensión fueron nuestro motor para alcanzar este logro.

Queremos expresar nuestra gratitud a los profesores por su invaluable orientación y conocimientos compartidos. Su guía experta y consejos fueron fundamentales para el desarrollo y éxito de este trabajo.

De igual forma, agradecemos sinceramente a la compañía de trabajos urbanos por brindarnos la oportunidad de utilizar sus laboratorios y recursos para llevar a cabo este estudio. Su colaboración fue esencial para la realización del proyecto.

A la Universidad La Gran Colombia: Queremos expresar un profundo agradecimiento a la Universidad La Gran Colombia por proporcionarme el espacio, los recursos y el ambiente propicio para llevar a cabo esta investigación. Su compromiso con la excelencia académica ha sido inspirador y fundamental en nuestra formación profesional.

Resumen

Las mezclas asfálticas en caliente se han convertido en una opción preferida para la pavimentación de vías debido a su durabilidad y resistencia al desgaste. Sin embargo, a medida que aumenta la conciencia ambiental y se busca reducir el consumo de recursos naturales, surgen nuevas alternativas que promueven la sostenibilidad y la reutilización de materiales.

La investigación se enfocó en el diseño de una mezcla asfáltica en caliente utilizando grano de caucho (caucho reciclado de neumáticos fuera de uso) y RAP (Recycled Asphalt Pavement, por sus siglas en inglés). El objetivo principal consistió en la obtención de una nueva mezcla realizada con asfalto adicionado con Grano Caucho Reciclado (GCR) y RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) con diferente granulometría por el método MARSHALL; con el propósito de minimizar costos en la fabricación de asfalto y mitigar el impacto ambiental que el uso y manipulación de este material genera,

La metodología utilizada se enfoca un diseño para la mezcla asfáltica en caliente con grano de caucho y RAP bajo una investigación experimental, permitiendo pruebas y análisis de laboratorio para evaluar las propiedades y el rendimiento de la mezcla. (Garnica P; Delgado H, et al , 2004). Es una investigación aplicada de índole cuantitativo.

Los resultados obtenidos muestran que la mezcla asfáltica modificada cumple con los criterios establecidos en varios aspectos clave y, en muchos casos, supera esos estándares, lo que indica un producto de alta calidad con mejoras significativas en resistencia, durabilidad,

resistencia a la fatiga y el trabajo. En general se puede apreciar que la mezcla asfáltica modificada cumple por encima los parámetros de la norma INVE-748. La inclusión de RAP (asfalto reciclado) en nuestra mezcla modificada presenta un cambio positivo, puesto que al utilizar un 20% de RAP, que cabe anotar ya contiene asfalto, se logran reducir los costos en comparación con la mezcla convencional. Toda vez que los demás componentes del asfalto reducen su porcentaje de inclusión en la mezcla tradicional.

Palabras claves: Asfalto, RAP, Pavimento, grano fino, grueso, caucho, medio ambiente

Abstract

Hot mix asphalt has become a preferred option for road paving due to its durability and wear resistance. However, as environmental awareness increases and efforts seek to reduce the consumption of natural resources, new alternatives emerge that promote sustainability and the reuse of materials. The research focuses on the design of a hot mix asphalt using rubber grain (recycled rubber from out-of-use tires) and RAP (Recycled Asphalt Pavement). The main objective is to evaluate the design of a hot asphalt mix made with asphalt added with Rubber Grain (GCR) and RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) with different granulometry by the MARSHALL method.

The methodology used focuses on a design for hot mix asphalt with rubber grain and RAP under an experimental investigation, allowing laboratory tests and analyzes to evaluate the properties and performance of the mixture. (Garnica P; Delgado H, et al, 2004). It is an applied research of a quantitative nature.

The results show that the modified asphalt mixture meets established criteria in several key aspects and, in many cases, exceeds those standards, indicating a high-quality product with significant improvements in strength, durability, and fatigue and work resistance. In general, we see that the modified asphalt mixture meets the parameters of the INVE-748 standard above.

The inclusion of RAP (recycled asphalt) in our modified mix presents a positive change, since by using 20% of RAP, which it should be noted already contains asphalt, costs are reduced compared to conventional mixing. Since the other components of the asphalt reduce their percentage of inclusion in the traditional mixture.

Introducción

El desarrollo y mejora de tecnologías en la industria de la construcción de carreteras ha sido una constante en las últimas décadas. En este sentido, las mezclas asfálticas en caliente se han convertido en una opción más adecuada para la pavimentación de vías debido a su durabilidad y resistencia al desgaste. Sin embargo, a medida que aumenta la conciencia ambiental y se busca reducir el consumo de recursos naturales, surgen nuevas alternativas que promueven la sostenibilidad y la reutilización de materiales. Siendo este el punto de partida de esta investigación.

En este contexto, el presente trabajo se enfoca en el diseño de una mezcla asfáltica en caliente utilizando grano de caucho (caucho reciclado de neumáticos fuera de uso) y RAP (Recycled Asphalt Pavement, por sus siglas en inglés), con el objetivo de aprovechar las propiedades beneficiosas de estos materiales reciclados.

Para el desarrollo de esta investigación y la implementación de este proyecto, se recurrió a textos especializados en mezclas asfálticas y procesos de reciclaje entre otros, así como a la consulta de fuentes electrónicas que brindan amplia, importante y trascendental información relacionada con el tema central de este proyecto. De igual manera, es importante resaltar los aportes realizados por parte de los investigadores y ejecutores del proyecto dada la experiencia y el conocimiento de cada uno de ellos.

Se espera que con la culminación exitosa de este proyecto, se tenga un punto de partida interesante para aquellas personas u organizaciones que decidan implementar esta nueva mezcla asfáltica e incluso desarrollar y reformular otro tipo de productos en beneficio de igual forma de las organizaciones y del medio ambiente así como de la sociedad en general. Por el adecuado manejo de residuos

Planteamiento del Problema

Actualmente, en Bogotá se realizan continuamente intervenciones en la malla vial de la ciudad. Una de las consecuencias de esta actividad, está generando grandes volúmenes de RAP, el cual se está convirtiendo en un problema ambiental ya que no se cuentan con planes de contingencia claros que permitan darle un segundo uso aprovechable antes de la disposición final a este material.

Por otro lado, el creciente y desmedido número de vehículos de la ciudad, generan una gran cantidad de llantas usadas que se suman a la producción de desechos y son otro material que contribuye al deterioro ambiental; ya que no es fácil su almacenamiento y sus periodos de descomposición son muy largos, lo que ocasiona toneladas de desechos, que al momento de mezclarse con otros desperdicios, se convierte en un gran foco de contaminación para el entorno y los suelos generando un impacto ambiental negativo.

Para este material lo que se han realizado son varios estudios con el fin de obtener utilidad de sus componentes que principalmente son caucho y acero, así que de la molienda de las llantas se genera hoy día, grano de caucho que se vienen usando en Colombia desde mediados del 2014 como adición al asfalto.

De estos dos materiales residuales que actualmente por separado se les da cierta utilidad, al grupo de investigación que desarrolla este proyecto les surge la idea de realizar una mezcla de ellos y evaluar la incidencia al producir en laboratorio una, mezcla asfáltica con Grano de caucho y RAP, así entonces formulamos nuestra pregunta a la cual buscamos darle respuesta. ¿Cuál es el mejor diseño de mezcla asfáltica combinando RAP y Asfalto con Grano de Caucho que cumpla

las especificaciones técnicas para ser usado en la capa de bases estabilizadas de las vías urbanas, teniendo en cuenta que dichos componentes permiten una reducción de costos en la fabricación de asfalto, y de qué manera dicha mezcla contribuye a la mitigación de contaminación ambiental?

Justificación

La utilización de grano caucho reciclado y RAP en las mezclas asfálticas puede contribuir significativamente a la reducción de residuos, la reutilización de materiales y la disminución de la explotación de recursos naturales. Esta investigación permitirá avanzar en el conocimiento y la implementación de estas alternativas, promoviendo un enfoque más ecoeficiente y sostenible en la pavimentación de vías. Además, la investigación en este campo es necesaria para mejorar la durabilidad y la resistencia de los pavimentos. El grano caucho, por ejemplo, posee propiedades que pueden aumentar la flexibilidad y la resistencia a la fatiga de la mezcla asfáltica, lo que se traduce en una vida útil más prolongada del pavimento y una reducción de los costos de mantenimiento a largo plazo. Mediante la investigación, se podrán determinar las mejores prácticas de diseño y producción para obtener el máximo rendimiento de estas mezclas, garantizando la seguridad y la calidad de las carreteras. Así mismo, contribuirá al avance de las normativas y regulaciones relacionadas con el uso de grano caucho y RAP en las mezclas asfálticas. Actualmente, existe una falta de directrices claras y estandarizadas en cuanto a las proporciones óptimas de estos materiales, los métodos de procesamiento y los requisitos de calidad. La investigación permitirá generar datos y evidencias científicas que respalden la toma de decisiones técnicas y regulatorias, promoviendo la adopción generalizada de estas tecnologías y su aplicación segura y eficiente.

Antecedentes

Díaz y Castro (2017), en su investigación sobre “Implementación del grano de caucho reciclado (GCR) proveniente de llantas usadas para mejorar las mezclas asfálticas y garantizar pavimentos sostenibles en Bogotá” de la Universidad Santo Tomás de Bogotá, se enfoca en estudios sobre la implementación del GCR en las construcciones de carreteras buscando soluciones técnicas con el objetivo de reducir el impacto ambiental en la reducción de cauchos contaminantes. Adicionando la mezcla de GCR en los aditivos asfálticos, generan buenos beneficios a través de investigaciones de avanzada en aspectos económicos y tecnológicos que demuestra mayor durabilidad además de contribuir en la reducción del impacto contaminante, incluyendo la quema de CO₂ como el mayor contaminante ambiental.

El principal objetivo consiste en la revisión de antecedentes y marco teórico, sobre la implementación del Grano de caucho reciclado (GCR), para las mezclas asfálticas. En cuanto a la metodología utilizada, se basa en una documentación cuantitativa, pero con base en documentación bibliográfica consultada. Los resultados determinaron ventajas y desventajas en el uso del GCR, generando ciertas recomendaciones, entre ellas, la limpieza especial periódica, ya que se acumulan residuos que se pueden pegar. (Díaz C, Castro L. , 2017)

Lo Presti y Giunta (2013), “Reclaimed Asphalt Pavement and Recycled Asphalt Shingles in Asphalt Mixtures: State of the Practice. Journal of Materials in Civil Engineering,”, investigan sobre el grano de caucho RAP con mezclas de asfalto para la minimización de residuos reutilizando materiales y así, disminuir el abuso en recursos naturales, lo que permite avanzar en conocimientos tecnológicos, tales como el conocimiento sobre el grano de caucho, el cual, posee

propiedades en flexibilidad y beneficio en la resistencia a la fatiga, traduciéndose en mayor duración de vida y minimización de costos de mantenimiento. Esta investigación ha contribuido al mejoramiento de las normativas y regulaciones respecto al uso del grano de caucho y del RAP en las mezclas de asfalto. Sin embargo, existe inconsistencia y estándares en las proporciones más adecuadas, metodología en procesos y lineamientos de calidad. (Lo Presti, D., Giunta, M., 2013).

Para Silva, Iskender y Bueno (2015), en su obra “Evaluation of the Effects of Rubber Aggregate on the Performance of Asphalt Mixtures. Construction and Building Materials”, menciona que el caucho granulado de reciclaje usado en mezclas asfálticas ha generado especial importancia por los beneficios en mejoramiento ambiental y las ventajas en los pavimentos, tales como, resistencia al agrietamiento y desgaste entre otros. Pero el rendimiento en altas temperaturas no tiene mayor beneficio. Para mejorar el rendimiento se estudiaron los efectos de las adicciones para mejorar el rendimiento, hecho en laboratorios de cauchos asfáltico según la norma Stone Matrix Asphalt (AR-SMA) con agregados. Se han incluido tres elementos de AR-SMA, mencionando, sin aditivos, con aditivo Estireno-butadieno-Estireno (SBS), y el tercero, Aditivo de larga duración de polímero granular (GPDa).

Se investigaron con tres contenidos de cauchos tipo ARC (6.4%, 6.9% y 7.4%) según las propiedades de fatiga y las altas temperaturas. Los resultados demostraron que la resistencia con la mezcla ARC, el rendimiento respecto a las altas temperaturas sin aditivos, disminuye, pero aumenta el rendimiento frente a las altas temperaturas, pero luego disminuye la misma para SBS y GPDa. En cambio, la resistencia a la rodadura (con 6.9% de ARC) funciona mejor. En estas condiciones, la mezcla con ARC, AR-SMA con GPDa, posee más vida útil pero mayor fatiga y

agrietamiento, que el grupo de control sin aditivos. Sin embargo, el agrietamiento no es relevante siendo una buena opción en la mezcla. (Silva H, Iskender M, Bueno M, 2015).

Cristian, Giulio, Lorenzi y Bevilacqua (2020) en su artículo “Una evaluación de laboratorio de la influencia del caucho granulado en una mezcla de asfalto en caliente con escoria de acero reciclado” Departamento de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Trieste, vía Alfonso Valerio 6/2, 34127 Trieste, Italia, investigaron sobre la sensibilidad térmica y el mejoramiento a la resistencia a las grietas y fatiga, utilizando más aditivos y materiales fuera de lo convencional en las mezclas de asfalto para carreteras. Entre los materiales no convencionales principalmente incluyen materiales reciclados, reduciendo costos de procesos productivos para generar beneficios sobre el ambiente que se relacionan con la reutilización.

El objetivo principal consiste en evaluar la incidencia del caucho de neumáticos reciclados para producir concreto asfáltico para carreteras que se procesan con desechos de acero para evaluar el efecto de mejoras en el desempeño estructural en las operaciones como la fatiga y ahuellamiento. Con la gravedad específica de la escoria de acero, se puede identificar que ésta, posee una superficie muy porosa por encima de los agregados naturales, permitiendo una interacción distinta con betún agregado al caucho granulado comparativamente con aditivos tradicionales.

Se compararon dos mezclas de hormigón asfáltico, con un pequeño porcentaje en caucho granulado bajo la técnica “Seca”, mientras que la otra mezcla no tenía cauchos agregado. Los ensayos practicados de tracción y compresión de carga cíclica buscan determinar el comportamiento mecanizado con diferentes temperaturas con diferentes frecuencias de carga. Como resultado se determinó el mejor desempeño de la mezcla modificada con el caucho en grano, concordando con otras pruebas según la literatura evidenciada sobre agregados naturales.

Se encontraron evidencias de aumento importante en la rigidez cuando se somete a altas temperaturas máximo 30%, con una leve reducción máximo de 8% a bajas temperaturas, reduciendo las cargas cíclicas. (Crisman B, Giulio O, De Lorenzi L ,Bevilacqua P, 2020).

Por su parte, Liu, Chen y Zen (2023), en su investigación “Modificación del diseño de mezcla volumétrica y análisis de atenuación de vibraciones de vías de asfalto epoxi recubierto de caucho para ferrocarril”, argumentan en su investigación, que las mezclas asfálticas en base de caucho reducen con eficiencia las vibraciones en las vías ferroviarias generado por la elasticidad del caucho granulado y la viscosidad del aglutinante asfáltico. El objetivo de la investigación consiste en el diseño de mezclas volumétricas modificadas que dominan la estructura que soporta el multipunto del asfalto (método VS). Se evaluó la viabilidad y soporte de las vibraciones dentro de la vía prefabricada de asfalto epoxi simulando tridimensionalmente (3D) y los fluidos finitos con una velocidad de 350Kms por hora. Con la combinación del método VS con el principio de reemplazo de volumen equivalente entre CR y gradación gruesa, se diseñaron cuatro tipos de mezclas asfálticas epóxicas a base de caucho que se utilizan en el método seco. Los resultados de las pruebas interiormente confirmaron que las mezclas han cumplido con los estándares esperados.

Mientras que los resultados del modelado FE mostraron que la pista de asfalto epoxi construida está cumpliendo con la normativa de diseño incluyendo la tensión de tracción en la parte inferior de la capa asfáltica y a tensión de compresión vertical en la superficie subrasante. (Liu X; Chen D; Liu J; Zen W, 2023)

Entre tanto, Figueroa y Fonseca (2020), en su trabajo “Desempeño del pavimento con mezcla reciclada-RAP y grano de caucho reciclado-GCR”, muestra los resultados del desempeño sobre el pavimento con flexibilidad estudiando el ahuellamiento y fatiga, aplicando el uso de

pavimentos asfálticos de reciclaje RAP junto al grano de caucho reciclado GCR. Los tipos de materiales son residuales provenientes de distintos procesos, que provienen del reciclaje del pavimento Asfáltico, mientras que el otro proceso, relacionado a las llantas desechadas recuperadas en el reciclaje.

Estos estudios incluyeron el estudio de los materiales bajo la condición original con una propuesta mejorada aplicado a la disminución de la producción de gases CO₂ o gases efecto invernadero. El proyecto se utilizaría en la red vial secundaria y terciaria de Colombia para optimizar las conexiones entre zonas de producción agrícola conectados a los centros urbanos a fin de contribuir con mejoras y desarrollo de competitividad de las zonas. (Figuroa A; Fonseca E, 2020).

Es importante destacar que los antecedentes existentes no abarcan todas las variables y condiciones específicas de cada proyecto, por lo que aún existe la necesidad de investigar y desarrollar un diseño de mezcla asfáltica en caliente con grano caucho y RAP adaptado a las condiciones locales y los requisitos específicos de calidad y rendimiento de la infraestructura vial. El anteproyecto propuesto busca complementar los antecedentes existentes, brindando información adicional y específica sobre la utilización de grano caucho y RAP en mezclas asfálticas en caliente, con el objetivo de mejorar la comprensión de su comportamiento y optimizar su diseño y producción.

Objetivos

Objetivo General

Determinar cuál es la mezcla asfáltica en caliente realizada con asfalto adicionado con Grano Caucho (GCR) y RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) con diferente granulometría por el método MARSHALL, que cumpla con las especificaciones técnicas requeridas.

Objetivos Específicos

Diseñar una mezcla asfáltica en caliente adicionada del 1% al 3% con Grano Caucho Reciclado (GCR) y RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) variando el tamaño granulométrico de las partículas del RAP por el método MARSHALL.

Comparar los parámetros de la mezcla asfáltica convencional con la modificada de acuerdo con las normas NTC2 Y NTC3 del INVIAS.

Analizar los costos de los dos tipos de mezcla asfáltica (convencional Vs Adicionada con GCR y RAP).

Marco teórico

Se considera pavimento a la unión de diferentes capas de materiales, las cuales reciben cargas de tránsito de forma directa, estas además las transmiten a los estratos de las capas inferiores en magnitudes inferiores debido a que estas se logran disipar, y con esto proporcionar una superficie de rodamiento. El pavimento está condicionado por diferentes aspectos como su diseño, el tránsito uso y la resistencia que debe tener con el fin de soportar y disipar los esfuerzos ocasionados por el tránsito de vehículos y condiciones climáticas. (Aldana Perdomo & Acosta Velásquez, 2014)

Mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas consisten en la adición de materiales pétreos que se encuentran recubiertos de alguna liga asfáltica o aditivo que, combinados en una temperatura mayor a 120 grados centígrados, se muestran propiedades aptas para las vías o carreteras. La compactación se relaciona a la cantidad de carga de tránsito. Las mezclas en caliente para uso específicos son muy usadas a nivel mundial, ya que sus propiedades en flexibilidad, durabilidad, uniformidad y resistencia permiten abrir nuevas investigaciones con efecto de mejoramiento de las propiedades mecánicas. (Instituto Nacional de Vías, 2013)

Clasificación de mezclas asfálticas

Mezcla densa en caliente (MDC)

Las cuales se combinan con adición de agregados pétreos con mineral de polvo adicionando un ligante asfáltico, llevados a un calentamiento antes de la mezcla, de manera que todos los elementos queden cubiertos del ligante. Las características principales se basan en la presentación porcentual de vacíos con burbujas de aire menor al 6%. (Instituto Nacional de Vías, 2013)

Mezclas semi densas en caliente (MSC)

Es parecida a las mezclas densas en caliente, donde los componentes varían muy poco debido al uso de agregados y cemento asfáltico. La característica que hace la diferencia es que el tipo de mezcla presenta porcentajes de vacío mayor al 6%, entre 6% y 12%. (Instituto Nacional de Vías, 2013)

Mezclas densas en caliente (MDC)

Son fabricados con asfalto con modificaciones proporcionales con una variación entre 4.5 y 5% de la masa agregante de pétreos, respecto a los asfaltos normales aplicados en las vías. Este tipo de mezcla posee un granulado mayor, lo que ocasiona vacíos de aire superiores al 20%, por eso su uso se imita a carpetas asfálticas y bacheos. (Instituto Nacional de Vías, 2013).

Mezclas de alto modulo (MAM)

Donde este tipo de mezclas es elaborado se ejecuta en caliente elaborado con asfalto modificado con adiciones aproximadas al 6% de la masa agregante de pétreos. Esta clase de mezclas contiene un alto modulo elástico y una resistencia a la fatiga con relatividad alta.

(Instituto Nacional de Vias, 2013)

Agregados pétreos

Consisten en todos los agregados para realizar la mezcla con elementos naturales triturados que se procesan. Estos elementos naturales son extraídos de fuentes fluviales o glaciares y se usan sin procesos previos para elaborar la mezcla asfáltica. Son explotados en canteras reduciéndolos a los tamaños necesarios por trituración mecánica. En cambio, el agregado sintético como subproducto industrial se caracteriza como una escoria de alto horno. Indistintamente del origen de la fuente, en los métodos de procesos de minerales, es busca que el agregado suministre una fuerte estructura esquelética para que resista aplicaciones de carga repetitiva. (Olarte B, Soler R. , 2018)

El componente de la mezcla asfáltica representa un aporte muy importante en la resistencia en especial los agregados disminuyendo el roce interno debido al empaado compactado que origina un mejor contacto entre los elementos agregados. En Colombia la normatividad en el control de calidad son empleados en la mezcla regulado por el Instituto INVIAS y el IDU según al artículo 210-11. (Anguas A, Flores M, Gómez J et al , 2005).

Cemento Asfáltico

Es un producto bituminoso con cierta solidez en temperatura ambiente que se elabora partiendo de los hidrocarburos naturales a través de un procesamiento de destilación de bajos contenidos de elementos volátiles, con propiedades aglutinantes.

El cemento asfáltico es considerado un material importante en la mezcla asfáltica debido a sus componentes químicos, físicos y mecánicos permitiendo la adherencia y agrupamiento de los agregados de granos. Con la realización de proceso de mezclado con agregados, el aglutinante asfáltico se debe calentar previamente en temperaturas altas, permitiendo caracterizar el líquido realizando el mezclado obtenido el cual genera una disminución de vacíos de aire y mayor compactación. El aglutinante asfáltico corresponde a un material muy impermeable donde su propiedad de adherencia le aumenta la capacidad para resistir altos esfuerzos y fatigas. (Desarrollo de Bogotá, 2019).

Propiedades de las mezclas asfálticas

Es importante destacar el cumplimiento satisfactorio de diferentes lineamientos para el óptimo funcionamiento. Estas propiedades que deben tener estas mezclas son las siguientes.

Durabilidad

Definida como la propiedad de la mezcla que le da al pavimento una durabilidad permitiendo que la resistencia al daño y desintegración producto de la carga vial y el abuso del clima. El clima es considerado un factor que afecta sobre todo la capa superficial.

Estabilidad

Es la capacidad de la mezcla para la resistencia de cargas de tránsito disminuyendo deformaciones de exceso, dependiendo básicamente de la cohesión de la mezcla y fricción interna. La disminución de la estabilidad equivale al ahuellamiento y ondulaciones, mientras que la fricción interna esta originada por el material pétreo dependiendo del tamaño del agregado y su rugosidad. (Desarrollo de Bogotá, 2019).

Unión de capas de materiales distintos

Se considera pavimento a la unión de diferentes capas de materiales, las cuales reciben cargas de tránsito de forma directa, estas además las transmiten a los estratos de las capas inferiores en magnitudes inferiores debido a que estas se logran disipar, y con esto proporcionar una superficie de rodamiento. El pavimento está condicionado por diferentes aspectos como su diseño, el tránsito uso y la resistencia que debe tener con el fin de soportar y disipar los esfuerzos ocasionados por el tránsito de vehículos y condiciones climáticas. En Colombia, en la actualidad existen diferentes aplicaciones en cuanto a la investigación y el desarrollo como tal de mezclas asfálticas pues estas son extensas, sin embargo, con menores a las realmente construidas con dicha tecnología. De acuerdo a lo anterior, la monografía busca en la definición de las diferentes características de los asfaltos modificados, las ventajas que estos contienen y los diferentes proyectos donde se han empleado este tipo de asfaltos. (Aldana J; Acosta L. , 2014)

Materiales usados en carreteras

La ingeniería civil, la construcción de carreteras de calzadas modernas comenzó con los romanos, pero después del siglo XVIII con los hermanos Gautier y Tresaguter y se comienza a introducir variaciones de estas, con procedimientos más tecnológicos en calzadas. La carretera más larga en distancia y más antigua fue la carretera real persa, esta fue usada en los años 3000 hasta los 300 antes de cristo. después comienzan las carreteras más modernas, aunque más cortas en los años 700 antes de cristo, que comunican palacios y ciudades, es importante tener esto presente ya que aquí hablaremos de la evolución de los materiales usados en estas grandes obras, los primeros que se usaron en estas obras fueron ladrillo cocido y piedra unidos por morteros bituminosos, aunque no servían para caravanas grandes, fueron precursores en el uso de materiales para carreteras. (eadic, 2016).

Después en china con las carreteras imperiales se veía como se usaban los materiales de piedra también pero su construcción y reserva no fue la adecuada, ya que servían por 7 años, pero 4000 años estaban en mal estado. en india también podemos ver que los materiales de las carreteras eran con ladrillo cocido y betún en los años 3250 A.C, estos tenían una manutención más adecuada, ya que se tenía un cuidado especial en evacuación de agua, ya en el año 75 A.C se comenzaron a tener mejores materiales y técnicas de construcción, con ladrillo enlosado de piedra, algo así como un hormigón como la primera capa y en la parte superficial se ponía hendiduras con yeso, cal o mortero bituminoso se ve como las técnicas de construcción en Europa también se utilizaron en los años 1900 antes de cristo con filas de troncos en el sentido de la marcha sobre ramas finas y gruesas al ancho cubierto por troncos transversales. así es como podemos ver en el comienzo de la historia los materiales que se han usado para la construcción de carreteras, unos que fracasaron pero otros que pueden perdurar aun, con esta introducción a la

construcción de las carreteras podemos ver que se pueden usar distintos materiales y que la mezcla de estos es importante para poder hacer un diseño que permita tener mejores resistencias y dure una carretera por más tiempo, hablando de los materiales que se han usado, se comenzará contacto sobre los que se usarán para esta mezcla asfáltica, el cual comenzaremos hablando del RAP y del procedimiento de una mezcla asfáltica en caliente. (eadic, 2016)

Diseño de mezcla asfáltica en caliente

Esta mezcla asfáltica tiene diferentes formas de darse, ya sea en caliente o fría, las mezclas en caliente proporcionan que los materiales se mezclen de una manera homogénea con el asfalto, el RAP y el grano caucho. estos componentes se llevarán a cabo para mezclarse a una temperatura de 100°C así para que la mezcla de una buena manipulación. para que esta mezcla pueda darse debe tenerse en cuenta varios factores antes de comenzar la mezcla, los cuales serán., impermeabilidad, durabilidad, flexibilidad, facilidad para el trabajo, resistencia al deslizamiento, y resistencia a la fatiga. en la mezcla asfáltica debemos garantizar que cada una de las propiedades mencionadas anteriormente deben arrojar un buen resultado y deben estar incluidas en toda la mezcla, para esto se van a explicar de la siguiente manera (Rismawansyah I; Ihsan M, 2015)

Impermeabilidad

Esto quiere decir que el pavimento debe tener una resistencia al paso de agua y aire, ya sea en su interior o a través del, esto puede ocurrir porque quedan vacíos en la mezcla de materiales, estos vacíos son los que ocasionan que pueda entrar aire o agua, y la idea de esta mezcla es reducirlo al máximo, estos vacíos es muy importante tenerlos en cuenta, que se debe

ver tanto el tamaño como la cantidad de vacíos que exista en estos. Esta impermeabilidad se mide por el tamaño de vacíos que exista en la mezcla, no importa si está o no está conectados unos entre otros, aunque es importante la permeabilidad ya que puede darle propiedades a la mezcla, este debe tener unos límites específicos lo cual está dado dentro de la norma. durabilidad la durabilidad de un asfalto, se puede medir por la acción que este tiene para evitar desintegrarse en el agregado, que tenga cambios en la propiedad y la separación de las partículas que tenga este asfalto, esto puede darse por varias razones externas o errores en los procesos de preparación, las razones externas contienen el clima, tránsito, entre otros. existen varios métodos para que la durabilidad de un asfalto mejore, una de ellas puede ser tener más asfalto en la mezcla o que esta sea sumamente más densa para que el agregado sea más resistente a la separación, o también al momento de hacer la mezcla, realizando la compactación de la mejor manera posible, así se evitan vacíos, que generen una permeabilidad y por consiguiente desintegración de partículas del asfalto. (Rismawansyah I; Ihsan M, 2015)

Flexibilidad

La flexibilidad hace referencia a cómo el pavimento puede acomodarse sin necesidad que se agriete el asfalto o se separen las partículas, esto es muy deseable y necesario en los pavimentos, ya que por expansión del suelo o las cargas que se someta este pavimento, puede ir desplazándose o acomodándose una mezcla que tenga más densidad en el asfalto tiene la posibilidad de que tenga menos flexibilidad, para que las propiedades de flexibilidad y durabilidad estén, estas deben ser equilibradas, ya que el tener una mezcla muy densa puede quitarle flexibilidad al cemento o si es al contrario puede quitarle durabilidad a este. (Rismawansyah I; Ihsan M, 2015)

Resistencia a la fatiga

La resistencia a la fatiga de un pavimento implica su capacidad para soportar flexiones repetidas cuando se somete a cargas de tránsito. La investigación ha demostrado que tanto los huecos (relacionados con la cantidad de asfalto) como la viscosidad del asfalto influyen de manera significativa en esta resistencia a la fatiga. A medida que los huecos en el pavimento aumentan, ya sea debido a decisiones de diseño o a una compactación insuficiente, la capacidad del pavimento para resistir la fatiga disminuye. Además, el periodo en el cual el pavimento mantiene una resistencia adecuada a la fatiga también disminuye (Institute, Asphalt, 1986, p. 80). Del mismo modo, un pavimento que contiene asfalto que ha experimentado un envejecimiento significativo y se ha vuelto más rígido, muestra una menor resistencia a la fatiga. Las propiedades de resistencia, el espesor del pavimento y la capacidad de la subrasante para proporcionar soporte, desempeñan un papel crucial en la durabilidad del pavimento y en la prevención de fisuras asociadas con las cargas de tránsito. (Rismawansyah I; Ihsan M, 2015)

Resistencia al deslizamiento

La resistencia al deslizamiento se refiere a la capacidad de una superficie de pavimento para reducir al mínimo el deslizamiento de las ruedas de los vehículos, especialmente cuando la superficie está mojada. Para lograr una buena resistencia al deslizamiento, es esencial que los neumáticos mantengan contacto con las partículas de agregado en lugar de desplazarse sobre una capa de agua en la superficie del pavimento, lo que se conoce como hidropelaje. Esta resistencia se evalúa utilizando una rueda estandarizada en condiciones controladas de humedad en la superficie del pavimento y a una velocidad de 65 km/h (40 mi/h).

Una superficie de pavimento con textura áspera y rugosa exhibirá mayor capacidad de resistencia al deslizamiento en comparación con una superficie lisa. La máxima resistencia al deslizamiento se logra cuando se utiliza un agregado con una textura áspera. (Rismawansyah I; Ihsan M, 2015)

RAP

Después de explicar la importancia de las propiedades que se deben mantener a la hora de realizar la mezcla asfáltica en caliente del grano caucho y RAP, se hablara de estos 2 materiales y su importancia para el campo de la ingeniería para la rehabilitación y uso de RAP, en las carreteras ha venido creciendo bastante durante años, ya que esto hace que se potencialice ya materiales existentes y sea de un gran beneficio como se mencionó anteriormente, hay diferentes tipos de formas para utilizar este material y como extraerlo y que técnicas de reciclado puede tener Reciclaje in situ en caliente: Implica la reutilización de los componentes de la estructura envejecida a través de un proceso de calentamiento a altas temperaturas en el lugar de la construcción. Mediante el uso de quemadores, se eleva la temperatura de estos materiales, los cuales luego se combinan con agentes rejuvenecedores y una nueva mezcla. Esta amalgama final se esparce y compacta de acuerdo con el espesor requerido. Reciclaje in situ en frío con cemento Este método se basa en el fresado en frío de una capa determinada del pavimento envejecido, seguido de la mezcla de este material con un aglomerante hidráulico, típicamente cemento. El nuevo material resultante se distribuye y compacta, estableciendo una base sólida para futuros refuerzos. Reciclaje 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. (Rismawansyah I; Ihsan M, 2015)

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. Estas son técnicas que ya se tienen para el reciclado de RAP, en mejorar la capa del pavimento asfáltico en las vías, ahora hablaremos del grano caucho GRANO CAUCHO reciclado. Se estima que al año en Colombia más de 61.000 toneladas de neumáticos se generan en residuos en Colombia, esta problemática aumenta cuando solo el 10% de estas son reutilizadas en procesos que no impliquen un deterioro al medio ambiente, otro 40% son usadas en sacar combustible derivado de los neumáticos esta reutilización genera un impacto ambiental severo, ocasionando degradación en la capa de ozono, con el aumento de compra de vehículos esta situación se agrava. (Rismawansyah I; Ihsan M, 2015)

Se han realizado anteriormente procesos de mezcla asfáltica con neumáticos, estos procesos son con semi seco y húmedo y comparan el comportamiento del material que se mezcla en el asfalto con el grano caucho, se percató que para estos procesos los costos se elevarían, y esto sería por los costos en maquinaria, para el proceso húmedo y para el proceso semi seco, se requiere un largo tiempo para así poder ver resultados favorables en la mezcla. También se investigó que agregar grano caucho en forma de migas podrá dar una vida larga en los sistemas especiales del pavimento y con esto se evitará también hacer mantenimientos de forma muy

seguida. se concluye que se han realizados varias mezclas asfálticas con diferentes procesos, materiales y resultados, con esta investigación se pretende dar los antecedentes de diferentes mezclas y conocer también los materiales que se van a usar para esta. (Rismawansyah I; Ihsan M, 2015)

Método Marshall

El método Marshall se aplica bajo especificaciones y elementos de pruebas estándar de 64mm (2.5) de alto y 102 mm (4”) de diámetro. Están preparadas a través de un proceso de calentamiento bajo etapas de combinación y compactación de mezclas según los agregados de mezclas bajo las normas ASTM-d1559.se opera con una comparación de volumetría con el método Marshall y Superpave, descritos con procedimientos y normativas de cada metodología con criterios para seleccionar el diseño último. Evaluando la variación presentados en parámetros entre ellos el volumen de vacíos y los vacíos de agregado mineral, además de vacíos llenos de asfalto con elementos óptimos de asfalto generados por el uso de dos métodos de mezclas distintas. (Garnica P; Delgado H, et al , 2004)

Metodología

Enfoque

Para llevar a cabo el anteproyecto sobre el diseño de una mezcla asfáltica en caliente con grano caucho y RAP, se puede seguir un enfoque de investigación experimental, así como de tipo cualitativo dado el tipo de materiales a utilizar, y la naturaleza de las pruebas y análisis que se deben realizar. Este enfoque permitió realizar pruebas y análisis de laboratorio para la evaluación de propiedades y el rendimiento de las mezclas asfálticas modificadas con grano caucho y RAP. (Garnica P; Delgado H, et al , 2004)

Tipo de Investigación

La investigación se clasificó como una investigación aplicada. El objetivo principal fue generar conocimiento científico y técnico que pueda ser aplicado directamente en la industria de la construcción de carreteras para mejorar las mezclas asfálticas y promover su sostenibilidad.

Técnicas e instrumentos: Las técnicas utilizadas incluyeron la recolección de datos, la preparación y ensayo de muestras de mezclas asfálticas, así como el análisis de resultados. Se emplearon instrumentos y equipos de laboratorio adecuados para realizar pruebas mecánicas, de resistencia y de durabilidad de las mezclas asfálticas modificadas. (Garnica P; Delgado H, et al , 2004)

Objetivo propuesto

Esta norma describe el procedimiento para determinar la resistencia a la deformación plástica de especímenes de mezclas asfálticas para pavimentación. Los especímenes, de forma cilíndrica y de 102 mm (4") de diámetro, son sometidos a carga en dirección perpendicular a su

eje cilíndrico empleando el aparato Marshall. El procedimiento se puede emplear tanto para el proyecto de mezclas en el laboratorio como para el control en obra de estas. El método descrito en esta norma es aplicable solamente a mezclas elaboradas con cemento asfáltico y agregados pétreos con tamaño máximo menor o igual a 25.4 mm (1"). (Garnica P; Delgado H, et al , 2004)

Investigación

El procedimiento consiste en la fabricación de probetas cilíndricas de mezcla asfáltica, de 102 mm (4") de diámetro y una altura nominal de 63.5 mm (2½"), las cuales se someten a curado en un baño de agua o en un horno, y luego a carga en la prensa Marshall bajo condiciones normalizadas, determinándose su estabilidad y su deformación (flujo) (Garnica P; Delgado H, et al , 2004)

El Método Tradicional

Se emplea un marco de carga con un anillo de carga y un dial para medir la deformación (flujo) de las probetas. Importancia y uso Las probetas elaboradas de acuerdo con el procedimiento descrito en esta norma se utilizan tanto para determinar la estabilidad y el flujo, como para realizar análisis de densidad y de vacíos, los cuales se aplican tanto en el diseño de las mezclas asfálticas como en la evaluación de la compactación en el campo. Así mismo, con estas probetas se pueden realizar otros ensayos físicos, como los de resistencia a la tensión indirecta (que se usa para determinar la susceptibilidad al agua de las mezclas compactadas), fatiga, creep y módulo resiliente.

Enfoque de Investigación

El enfoque de investigación en este caso estaría en la caracterización y evaluación de las propiedades mecánicas y de flujo de las mezclas asfálticas en caliente utilizando el método Marshall. Esto implica la realización de pruebas y experimentos para determinar cómo se comporta una mezcla asfáltica bajo carga y temperaturas elevadas.

Los aspectos clave a investigar pueden incluir

- La resistencia a la deformación de la mezcla.
- La capacidad de carga que puede soportar la mezcla antes de deformarse.
- El flujo de la mezcla a altas temperaturas.
- La relación entre la composición de la mezcla y su comportamiento bajo carga.

Tipo de Investigación

Este tipo de investigación es típicamente experimental y de laboratorio. Implica la preparación de muestras de mezcla asfáltica de acuerdo con ciertas especificaciones, la realización de pruebas de compactación en el equipo Marshall y la aplicación de cargas para evaluar la resistencia a la deformación. Además, la investigación relacionada con el equipo Marshall también puede tener un componente de diseño. Los resultados de las pruebas pueden utilizarse para optimizar la formulación de mezclas asfálticas utilizadas en la construcción de carreteras con el objetivo de garantizar la seguridad y la durabilidad de las carreteras. En resumen, la investigación relacionada con la estabilidad y el flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall se centra en la caracterización y evaluación de estas mezclas bajo condiciones específicas de carga y temperatura, y se basa en experimentos de laboratorio y pruebas de campo para garantizar la calidad y durabilidad de las carreteras.

Cronograma y Presupuesto

#	Evento	Plazo en días																	
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
1	Diseño mezcla de asfalto	9	■																
2	Estudio preliminar	9	■																
3	Investigación de canteras	1	■																
	Investigación materiales			■															
4	triturados	1		■															
5	Investigación RAP del diseño	1			■														
6	Investigación trituración de grano	1				■													
7	Diseño mezcla de laboratorio	0					■												
8	Extracción de RAP % asfalto	1						■											
9	Gradación de RAP	1							■										
10	Gradación de granulares cantera	1								■									
11	Toma de muestras grano caucho	1									■								
12	Tamizaje de materiales y pesaje	1										■							
13	Briquetas con diferente % asfalto	1											■						
14	Ensayo de bulk	1												■					
15	Rice gmm	1													■				
16	Fallo briquetas a compresión	1														■			
17	Resultados de estabilidad y flujo	1															■		
18	Revisión bibliográfica	3																■	
19	Redacción	4																■	
20	Revisión APA	2																■	

El periodo de tiempo se encuentra parametrizado entre el 31 de Octubre y el 15 de Noviembre de 2023

Los ítems 18,19 y 20 aún se encuentran en proceso de ejecución

Procedimiento

Materiales y Método Marshall para Mezclas de Asfalto en Caliente

A continuación, se presenta un resumen sobre el procedimiento Marshall para la Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el método INV-E 748-13. dicho resumen ha sido soportado con las evidencias en fotos de laboratorio realizadas para anteproyecto. La norma aplicada tiene como objetivo, determinar la resistencia de la deformación plástica de las muestras de mezclas asfálticas. Se construyeron muestras de formas cilíndricas de 4" de diámetro, sometidos a cargas perpendiculares usando el equipo Marshall.

Se emplea un marco de carga con un anillo de carga y un dial para medir la deformación (flujo) de las probetas. Importancia y uso Las probetas elaboradas de acuerdo con el procedimiento descrito en esta norma se utilizan tanto para determinar la estabilidad y el flujo, como para realizar análisis de densidad y de vacíos, los cuales se aplican tanto en el diseño de las mezclas asfálticas como en la evaluación de la compactación en el campo. Así mismo, con estas probetas se pueden realizar otros ensayos físicos, como los de resistencia a la tensión indirecta (que se usa para determinar la susceptibilidad al agua de las mezclas compactadas), fatiga, creep y módulo resiliente.

A continuación, mediante la recolección fotográfica se realizó un procedimiento paso a paso, sobre la forma de funcionamiento en laboratorio en la elaboración de las probetas o muestras. En la exposición de las 34 imágenes se puede detallar el paso a paso en la elaboración de las muestras.

Fases investigación a realizar

Selección de muestra

En esta fase, se seleccionan muestras representativas de las mezclas asfálticas que se investigarán. Estas muestras deben reflejar las condiciones y los materiales utilizados en situaciones reales de construcción de carreteras.

Preparación de muestras

Las muestras seleccionadas deben ser preparadas de acuerdo con las normas y procedimientos estandarizados para la mezcla y compactación de asfalto. Esto incluye la determinación de la composición de las mezclas, la gradación de los agregados y la cantidad de asfalto utilizado.

Pruebas de compactación

Utilizando el equipo Marshall, se realizan pruebas de compactación para evaluar cómo se comporta la mezcla asfáltica bajo carga. Estas pruebas incluyen la compactación de muestras en moldes Marshall, seguida de la medición de la densidad y la resistencia de las muestras compactadas.

Determinación de la estabilidad

Se aplica una carga vertical al centro de las muestras compactadas para evaluar su estabilidad. La estabilidad de la mezcla se calcula a partir de la carga máxima que puede soportar antes de la deformación.

Medición del flujo

Se mide la deformación lateral de las muestras bajo carga para evaluar el flujo de la mezcla asfáltica. Esto se hace utilizando el equipo Marshall y se expresa como la deformación vertical total.

Análisis de datos

Una vez que se han recopilado los datos de las pruebas de estabilidad y flujo, se realiza un análisis estadístico y de datos para interpretar los resultados. Esto puede incluir la identificación de tendencias, correlaciones entre variables y la evaluación de la influencia de diferentes factores en la estabilidad y el flujo de las mezclas.

Conclusiones y recomendaciones

En esta fase, se resumen los hallazgos de la investigación y se proporcionan conclusiones basadas en los resultados. También se pueden hacer recomendaciones para la mejora de las mezclas asfálticas y la toma de decisiones en la construcción de carreteras. Informe final: Se presenta un informe final que documenta todo el proceso de investigación, desde la revisión de la literatura hasta las conclusiones y recomendaciones. Este informe es importante para compartir los resultados con otros investigadores y profesionales en el campo. Cada una de estas fases es esencial para llevar a cabo una investigación completa y significativa sobre la estabilidad y el flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall. Las pruebas, los análisis y la interpretación de datos son críticos para comprender y mejorar las propiedades de estas mezclas utilizadas en la construcción de carreteras.

Análisis de Resultados

Tal como se muestra en las imágenes (Ver anexo de gráficos 1-35), se pudo constatar la evidencia del desarrollo del proyecto. Para tal efecto, se lograron ciertos resultados relacionados con la extracción cuantitativa del asfalto en caliente para pavimentos I.N.V.E 732-13, método A.

Extracción cuantitativa del asfalto en caliente para pavimentos INVE-732/13 método A.

Durante este ensayo se logra determinar el porcentaje de asfalto optimo que posee la muestra de RAP seleccionada, llevándose a cabo un análisis que permite establecer con precisión la cantidad de asfalto contenida en la muestra, tomando en cuenta que el RAP ya contiene determinada cantidad de asfalto. Los resultados obtenidos se presentaron en la siguiente tabla,

Figura 1 Extracción cuantitativa del asfalto en caliente para pavimentos INVE

% OPTIMO DE ASFALTO	5,4
EXTRACCIÓN CUANTITATIVA DEL ASFALTO EN CALIENTE PARA PAVIMENTOS (I.N.V. E-732/13) METODO A	
Masa Inicial muestra	2168,1 g
Masa inicial filtro	29,5 g
Masa final muestra	2050,7 g
Masa final filtro	30,0 g
Contenido de asfalto	5,4

Fuente: Elaboración propia

Figura 2 Análisis granulométrico de agregado grueso y fino INV E-231/13

							DATOS DE MUESTREO		
PROYECTO		PLANTA DE ASFALTO					FECHA DE MUESTREO:		
DESCRIPCIÓN		ARENA TRITURADA					DIA MES AÑO 6/03/2023		
ESPECIFICACIÓN		CTU					FECHA DE ENSAYO:		
SOLICITADA POR		UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA					6/03/2023		
							CANTERA:		
							GUAYURIBA		
							LUGAR-UBICACIÓN		
							LABORATORIO		
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADO GRUESO Y FINO I.N.V. E-213/13							LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE SUELOS I.N.V. E-126/13		
Masa 1=	2.280,2	Masa 2=	2.199,6		ESPECIFICACIÓN			Límite Líquido (%)	HL
Tamiz	Masa retenida	% Retenida	% Retenida acumulada	% Pasa	CTU			Límite Plástico (%)	NP
					Límite superior	Límite inferior		Índice de plasticidad (%)	NP
1 1/2"	0,0	0,0	0,0	100,0	100	100			
1"	0,0	0,0	0,0	100,0	100	100			
3/4"	0,0	0,0	0,0	100,0	100	100			
1/2"	0,0	0,0	0,0	100,0	100	100			
3/8"	0,0	0,0	0,0	100,0	95	100			
No 4	126,6	5,6	5,6	94,4	82	94			
No 10	658,8	28,9	34,4	65,6	58	73			
No 40	939,2	41,2	75,6	24,4	22	35			
No 80	361,3	15,8	91,5	8,5	8	18			
No 200	113,7	5,0	96,5	3,5	0	3			
FONDO	80,6	3,5	100,0	0					
	2.280,2								
							PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS I.N.V. E-227/13		
DISTRIBUCIÓN DE LOS AGREGADOS									
							Grava (%)	5,6	
							Arene (%)	90,9	
							Finar (%)	3,5	
								100	

Elaboración propia de arena triturada

Figura 3 Análisis granulométrico de agregado grueso y fino

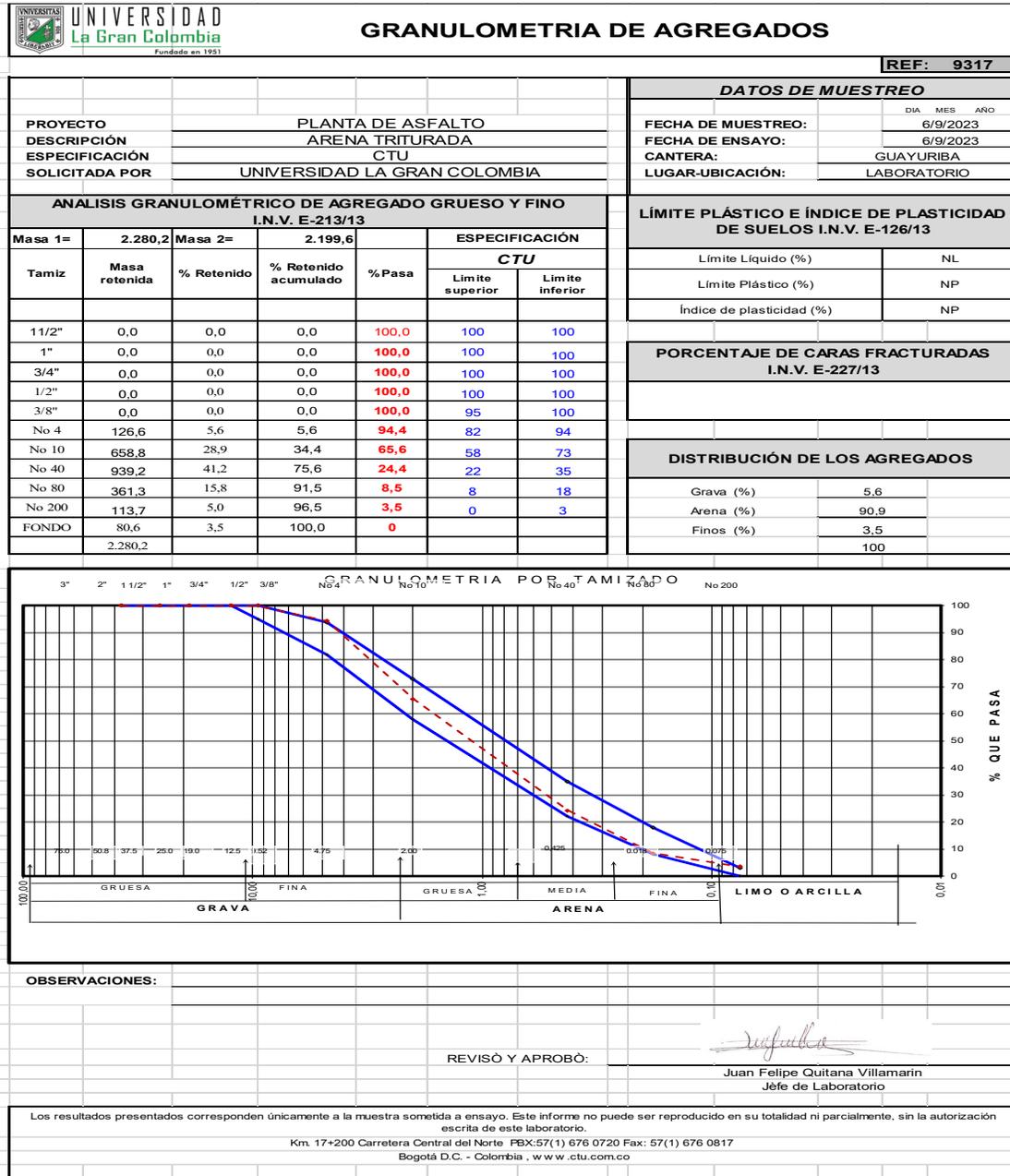
							DATOS DE MUESTREO		
PROYECTO		PLANTA DE ASFALTO					FECHA DE MUESTREO:		
DESCRIPCIÓN		GRAVA TRITURADA DE 1/2"					DIA MES AÑO 06--03--2023		
ESPECIFICACIÓN		CTU					FECHA DE ENSAYO:		
SOLICITADA POR		UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA					06--03--2023		
							CANTERA:		
							GUAYURIBA		
							LUGAR-UBICACIÓN		
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADO GRUESO Y FINO I.N.V. E-213/13							LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE SUELOS I.N.V. E-126/13		
Masa 1=	2.038,0	Masa 2=	2.035,6		ESPECIFICACIÓN			Límite Líquido (%)	NL
Tamiz	Masa retenida	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa	CTU			Límite Plástico (%)	NP
					Límite superior	Límite inferior		Índice de plasticidad (%)	NP
1 1/2"	0,0	0,0	0,0	100,0	100	100			
1"	0,0	0,0	0,0	100,0	100	100			
3/4"	0,0	0,0	0,0	100,0	100	100			
1/2"	85,5	4,2	4,2	95,8	100	95			
3/8"	675,0	33,1	37,3	62,7	55	70			
No 4	1.203,9	59,1	96,4	3,6	0	10			
No 10	65,5	3,2	99,6	0,4	0	5			
No 40	1,5	0,1	99,7	0,3	0	3			
No 80	2,0	0,1	99,8	0,2	0	2			
No 200	2,2	0,1	99,9	0,1	0	2			
FONDO	2,4	0,1	100,0	0					
	2.038,0								
							PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS I.N.V. E-227/13		
							100%		
DISTRIBUCIÓN DE LOS AGREGADOS									
							Grava (%)	96,4	
							Arene (%)	3,5	
							Finar (%)	0,1	
								100	

Figura 4 Análisis granulométrico de agregado grueso y fino

UNIVERSIDAD La Gran Colombia <small>Fundada en 1951</small>		GRANULOMETRIA DE AGREGADOS					REF: 9315	
PROYECTO PLANTA DE ASFALTO							DATOS DE MUESTREO	
DESCRIPCIÓN GRAVA TRITURADA DE 1"							FECHA DE MUESTREO: DIA MES AÑO 06--03---2023	
ESPECIFICACIÓN CTU							FECHA DE ENSAYO: 06--03---2023	
SOLICITADA POR UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA							CANTERA: GUAYURIBA	
							LUGAR-UBICACIÓN PATIO DE MANIOBRAS	
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADO GRUESO Y FINO I.N.V. E-213/13							LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE SUELOS I.N.V. E-126/13	
Masa 1=	2.067,0	Masa 2=	2.060,5	ESPECIFICACIÓN				
Tamiz	Masa retenida	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa	CTU			
					Límite superior	Límite inferior		
1 1/2"	0,0	0,0	0,0	100,0	100	100	Límite Líquido (%) NL	
1"	20,6	1,0	1,0	99,0	100	100	Límite Plástico (%) NP	
3/4"	335,2	45,2	46,2	53,8	100	100	Índice de plasticidad (%) NP	
1/2"	361,2	46,5	32,7	7,3	100	35		
3/8"	128,8	6,2	39,0	1,0	55	70		
No 4	4,4	0,2	39,2	0,8	0	10		
No 10	0,0	0,0	39,2	0,8	0	5		
No 40	0,8	0,0	39,2	0,8	0	3		
No 80	2,0	0,1	39,3	0,7	0	2		
No 200	7,5	0,4	39,7	0,3	0	2		
FONDO	3,1	0,4	100,1	0				
	2.069,6							
							PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS I.N.V. E-227/12	
							100%	
							DISTRIBUCIÓN DE LOS AGREGADOS	
							Grava (%)	99,2
							Arena (%)	0,5
							Finer (%)	0,4
								100

Elaboración propia de Grava triturada

Figura 5 Granulometría de agregados ref. 9317



Elaboración propia de Arena triturada

Figura 6 Análisis granulométrico de agregado grueso y fino Arena Lavada

UNIVERSIDAD La Gran Colombia		GRANULOMETRIA DE AGREGADOS					REF 9255	
PROYECTO PLANTA DE ASFALTO							DATOS DE MUESTREO	
DESCRIPCIÓN ARENA LAVADA							DIA MES AÑO	
ESPECIFICACIÓN CTU							FECHA DE MUESTREO: 22/03/2023	
SOLICITADA PO UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA							FECHA DE ENSAYO: 22/03/2023	
							CANTERA: ATS	
							LUGAR-UBICACIÓN: LABORATORIO	
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADO GRUESO Y FINO							LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE SUELOS I.N.V. E-126/13	
Masa 1=	2.176,6	Masa 2=	1.762,7	ESPECIFICACIÓN				
Tamiz	Masa retenida	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa	CTU			
					Limite superior	Limite inferior		
1 1/2"	0,0	0,0	0,0	100,0	100	100	Límite Líquido (%): NL	
1"	0,0	0,0	0,0	100,0	100	100	Límite Plástico (%): NP	
3/4"	0,0	0,0	0,0	100,0	100	100	Índice de plasticidad (%): NP	
1/2"	0,0	0,0	0,0	100,0	100	100	PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS I.N.V. E-227/12	
3/8"	4,7	0,2	0,2	99,8	100	100		
No 4	79,8	3,7	3,9	96,1	82	94	DISTRIBUCIÓN DE LOS AGREGADOS	
No 10	631,9	29,0	32,9	67,1	50	70	Grava (%): 3,9	
No 40	641,4	29,5	62,4	37,6	30	48	Arena (%): 77,1	
No 80	173,8	8,0	70,4	29,6	20	35	Finer (%): 19,0	
No 200	231,1	10,6	81,0	19,0	15	25	100	
FONDO	413,9	19,0	100,0	0				
	2.176,6							

Elaboración propia de Arena Lavada

Figura 7 Análisis granulométrico de agregados extraídos de mezclas asfálticas INV E-782/13

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS AGREGADOS EXTRAIDOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS (I.N.V. E-782/13)							
Masa 1(g)=	2.050,7		Masa 2(g)=	1.802,6		ESPECIFICACIÓN	
Tamiz	(mm)	Masa retenida (g)	% Retenido	% Ret. Acumulado	% Pasa	MDC-19/2013	
						Limite superior	Limite inferior
1 1/2"							
1"	25,0	0,0	0,0	0,0	100	100	100
3/4"	19,0	39,3	1,9	1,9	98	100	100
1/2"	12,5	182,6	8,9	10,8	89,2	95	80
3/8"	9,5	128,9	6,3	17,1	82,9	87	70
No 4	4,8	334,5	16,3	33,4	66,6	65	49
No 10	2,0	335,8	16,4	49,8	50,2	45	29
No 40	0,4	426,6	20,8	70,6	29,4	25	14
No 80	0,2	221,3	10,8	81,4	18,6	17	8
No 200	0,1	133,6	6,5	87,9	12,1	8	4
FONDO		248,1	12,1	100,0			
SUMATORIA		2.050,7					

Elaboración propia de Análisis granulométrico de los agregados

Fórmula de trabajo y dosificación

La formulación del trabajo y la dosificación de materiales para este proyecto se han elaborado considerando los parámetros establecidos en la norma (INV- E 450). Esta normativa prescribe una granulometría específica según el tipo de material a emplear, así como límites tanto máximos como mínimos al combinar las 3 tolvas para el diseño de mezcla con adición del RAP + GCR. En la tabla adjunta se detalla la dosificación utilizada tanto para los diseños convencionales como para aquellos con la adición del RAP+GCR

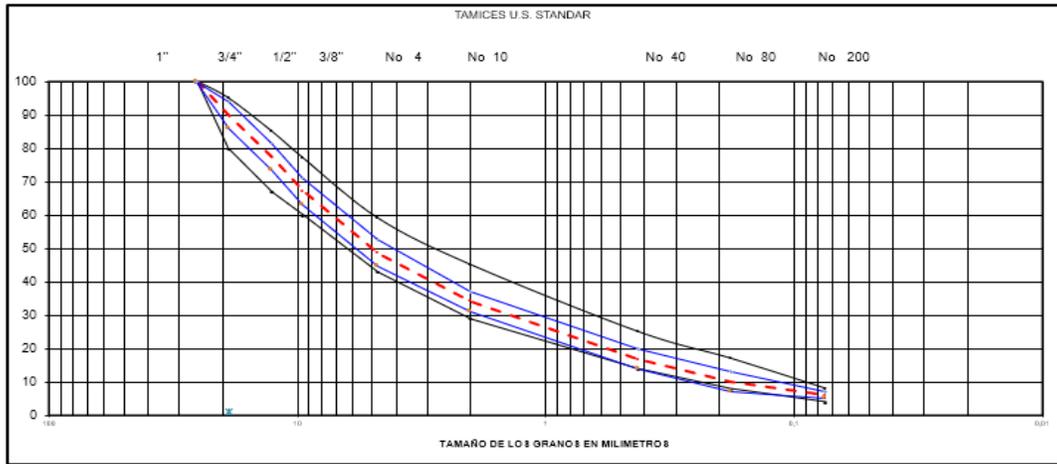
Figura 8 Dosificación de materiales

DOSIFICACION DE LOS MATERIALES														
REF	DESCRIPCION	%	% OPTIMO DE CADA MATERIAL	CANTERA	Tamaño Tamiz % retenido									
					1"	3/4"	1/2"	3/8"	No 4	No 10	No 40	No 80	No 200	P. 200
9315	TRITURADO 1"		21%	GUAYURIBA	0,0	46,2	46,5	6,2	0,2	0,0	0,0	0,1	0,4	0,4
9316	TRITURADO DE 1/2"		23%	GUAYURIBA	0,0	0,0	4,2	33,1	59,1	3,2	0,1	0,1	0,1	0,1
9317	ARENA TRIT. LAVADA		22%	GUAYURIBA	0,0	0,0	0,0	0,0	5,6	28,9	41,2	15,8	5,0	3,5
9255	ARENA TRITURADA		14%	ATS	0,0	0,0	0,0	0,2	3,7	29,0	29,5	8,0	10,6	19,0
9314	RAP		20,0%	ACCENORTE	0,0	1,9	8,9	6,3	16,3	16,4	20,8	10,8	6,5	12,1
TOTAL			100%											
% RET. MEZCLA					0,0	10,1	12,5	10,2	18,6	14,4	17,4	6,8	4,0	6,0
%PASA					100,0	90	77	67	49	34	17	10	6,0	
ESPECIFICACION					100	95	85	77	59	45	25	17	8	
MDC -25					100	80	67	60	43	29	14	8	4	
Tamiz mm					25,4	19	12,7	9,5	4,75	2	0,425	0,18	0,075	

Fuente: Elaboración propia

La dosificación para el diseño de Marshall con adición de RAP + GCR se contribuyó en un veintiuno por ciento para la para la tolva de 1", un veintitrés por ciento para la tolva de 1/2", un treinta y seis por ciento para tolva de finos y un veinte por ciento restante para la tolva del rap, teniendo así un cien por ciento de materiales y cumpliendo con los límites máximos y mínimos que la norma (INV E-450) exige.

Figura 9 gráfico que corresponde a los límites mínimos y máximos para el diseño de mezcla modifica MDC-25+RAP+GCR



Fuente: Elaboración propia

Figura 10 gráfico correspondiente al diseño de mezcla modifica MDC-25+RAP+GCR

ASF-RAP	ASF ADICIONAR	GCR		1"	3/4"	1/2"	3/8"	No 4	No 10	No 40	No 80	No 200	Pasa 200	% ASF	GCR	PESO TOTAL	
4,00	1	3,00	1,00	97	0	113,6	140,8	114,9	209,6	162,4	195,5	76,6	44,9	67,3	34,8	11,6	1171,9
4,50	1	3,50	1,00	96,5	0	113,0	140,1	114,3	208,5	161,6	194,5	76,2	44,6	66,9	40,6	11,6	1171,9
5,00	1	4,00	1,00	96	0	112,4	139,3	113,7	207,4	160,7	193,5	75,8	44,4	66,6	46,4	11,6	1171,9
5,50	1	4,50	1,00	95,5	0	111,8	138,6	113,1	206,4	159,9	192,5	75,4	44,2	66,2	52,2	11,6	1171,9
6,00	1	5,00	1,00	95	0	111,2	137,9	112,6	205,3	159,1	191,4	75,0	43,9	65,9	58,0	11,6	1171,9

Fuente: Elaboración propia

Figura 11 Mezcla ASF en caliente tipo MDC-25+RAP+GCR

MEZCLA ASF. EN CALIENTE TIPO MDC-25+RAP+GCR

TOTAL MUE **25000** GRAMOS

TRITURADO 1"	GUA	21%		5250
TRITURADO DE 1/2"	GUA	23%		5750
ARENA TRIT. LAVADA	GUA	22%		5500
ARENA TRITURADA	ATS	14%		3500
RAP		20%		5000

PESOS ACUMULADOS 25000

ASF	AGRE	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No 4	No 10	PASA 10	% ASF	TOTAL	1% GCR
3	97	0	113,6	254,4	369,3	578,9	741,3	1125,5	34,8	1160	11,6
3,5	96,5	0	113,0	253,0	367,4	575,9	737,5	1119,7	40,6	1160	11,6
4	96	0	112,4	251,7	365,5	572,9	733,7	1113,9	46,4	1160	11,6
4,5	95,5	0	111,8	250,4	363,6	569,9	729,9	1108,1	52,2	1160	11,6
5	95	0	111,2	249,1	361,7	567,0	726,0	1102,3	58,0	1160	11,6

Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta la fórmula de trabajo, dosificación de diseño se pudo llevar a cabo la elaboración de las briquetas con un peso inicial de 1160 gr por cada briketa sin incluir el 1% de GCR. Se realizaron 3 briquetas por cada porcentaje de asfalto. Iniciando para el diseño Marshall modificado desde el 3.5% realizando incrementos de 0.5% y llegando hasta a 5% de asfalto para determinar el porcentaje óptimo de asfalto del diseño de asfalto que se realizó en este proyecto.

Estabilidad y flujo modificado

Las briquetas utilizadas en el ensayo de estabilidad y flujo fueron 12, tres por cada punto mínimo requerido por la norma INVE 450-13. Se realizó la toma de diámetros y alturas para cada una de las briquetas a utilizar, después se realizó la toma de densidad de bulk para cada una de las briquetas. Los datos obtenidos por este ensayo fueron vitales para la toma de decisión del porcentaje optimo, para el diseño Marshall MDC25+RAP+GCR modificado los resultados se muestran a continuación:

Figura 12 Diseño Marshall MDC25+RAP+GCR modificado

MEZCLA No.	ASFALTO	AGREGADOS		PESO EN GRAMOS			PESO ESPECIFICO			VOLUMEN PORCENTAJE TOTAL				CONTENIDO DE ASFALTO			PESO UNITARIO	ESTABILIDAD		FLUJO				
		EN MEZCLA TOTAL	H ESPESOR PROBETA	SECA EN AIRE	S.S.S. EN AIRE	EN AGUA	BULK TEÓRICO	MÍNIMO MEDIDO	GRAVEDAD ESPECIFICA EFECTIVA	ASFALTO ABSORBIDOS	AGREGADOS CON AIRE	VACÍOS EN ASFALTO EFECTIVO	DE ASFALTO EFECTIVO	VACÍOS EN MINERALES	VFA LLENOS DE ASFALTO	Relación Hueso /Briketa efectiva		g/cm3	Kg	Kg	0,01"	mm		
	%	%	cm	cm	cm	cm	Gmb	Gm	Gse	Pba	(100-Va) G Agr.	Va	100-V-I	Pbc	VAM	VFA	LLI	g"0.3310"	MEDIDA	CORREGIDA				
1	4,7	95,3	6,70	1191,2	1194,5	670,5	2,273																	
2	4,7	95,3	6,47	1172,7	1174,4	652,4	2,247																	
3	4,7	95,3	6,57	1184,7	1187,0	660,5	2,250																	
4	5,2	94,8	6,38	1157,6	1160,5	657,1	2,300	2,371	2,382	2,551	0,19	84,7	5,2	10,1	4,5	15,3	65,7	1,3	2,250	1932	1861	13,4	3,41	
5	5,2	94,8	6,40	1153,8	1157,4	651,2	2,279																	
6	5,2	94,8	6,28	1149,7	1152,5	657,5	2,323																	
7	5,7	94,3	6,25	1146,2	1148,4	648,9	2,295	2,301	2,355	2,366	2,552	0,21	85,9	2,8	11,3	5,0	14,1	80,5	1,2	2,294	2075	2110	15,9	4,05
8	5,7	94,3	6,28	1165,1	1168,1	662,9	2,306																	
9	5,7	94,3	6,30	1148,1	1150,2	655,9	2,323																	
10	6,2	93,8	6,60	1140,8	1142,2	648,3	2,310	2,308	2,339	2,346	2,549	0,15	85,7	1,6	12,6	5,6	14,3	88,6	1,1	2,301	2015	2086	15,1	3,85
11	6,2	93,8	6,50	1155,0	1165,3	661,1	2,291																	
12	6,2	93,8	6,28	1160,1	1163,2	661,0	2,310																	
							2,304	2,322	2,342	2,564	0,39	85,1	1,6	13,3	5,8	14,9	88,9	1,0	2,297	1806	1788	15,2	4,0	

Fuente: Elaboración propia de Diseño Marshall

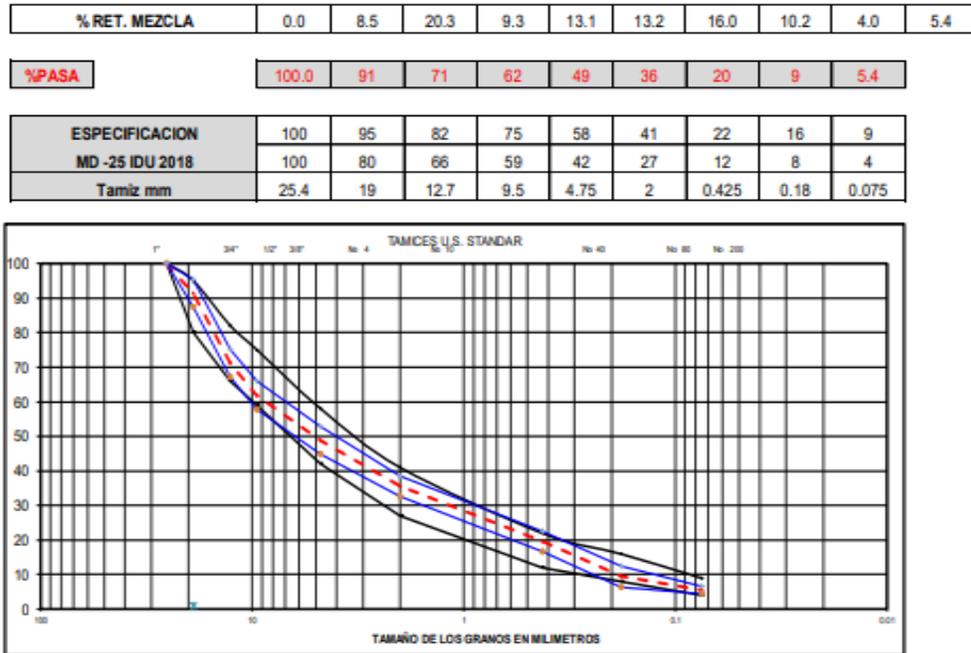
Figura 13 Dosificación de materiales del diseño Mezcla convencional

DOSIFICACION DE LOS MATERIALES													
REF	DESCRIPCION	% OPTIMO DE CADA MATERIAL	CANTERA	Tamaño Tamiz % retenido									
				1"	3/4"	1/2"	3/8"	No 4	No 10	No 40	No 80	No 200	P. 200
9269	TRITURADO 1"	30%	GUAYURIBA	0.0	27.4	61.0	8.9	1.6	0.3	0.3	0.1	0.1	0.3
9268	TRITURADO DE 1/2"	20%	GUAYURIBA	0.0	1.6	10.1	32.9	50.8	3.8	0.1	0.3	0.3	0.1
9267	ARENA TRIT. LAVADA	30%	GUAYURIBA	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	26.2	43.1	18.4	5.9	5.4
9266	ARENA TRITURADA	20%	ATS	0.0	0.0	0.0	0.0	11.0	22.6	14.6	22.8	10.5	18.5
TOTAL		100%											

Fuente: Elaboración propia

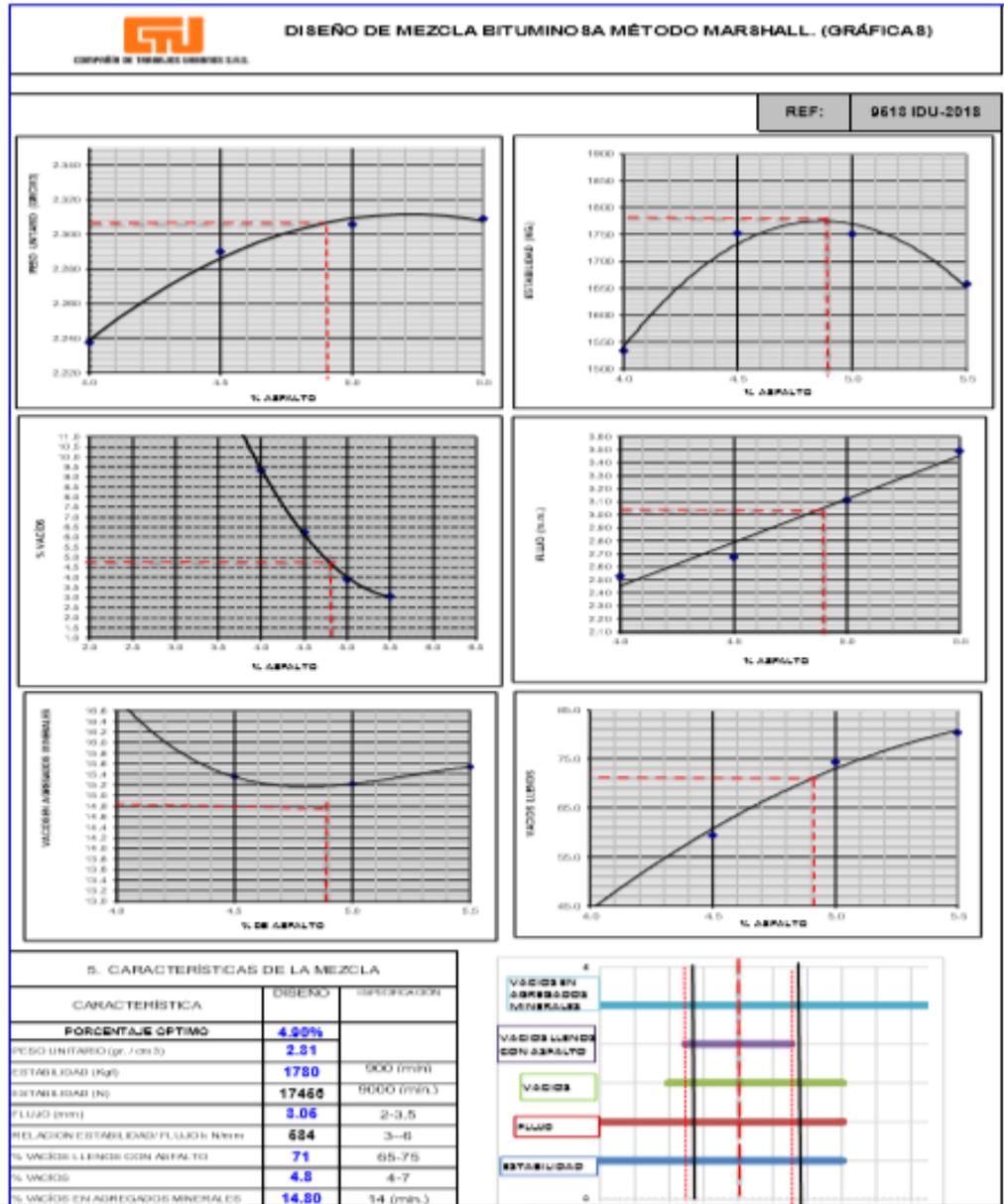
Figura 14 gráfico que corresponde a los limites mínimos y máximos para el diseño de mezcla convencional

MDC25



Fuente: Elaboración propia

Figura 16 Gráfico T3



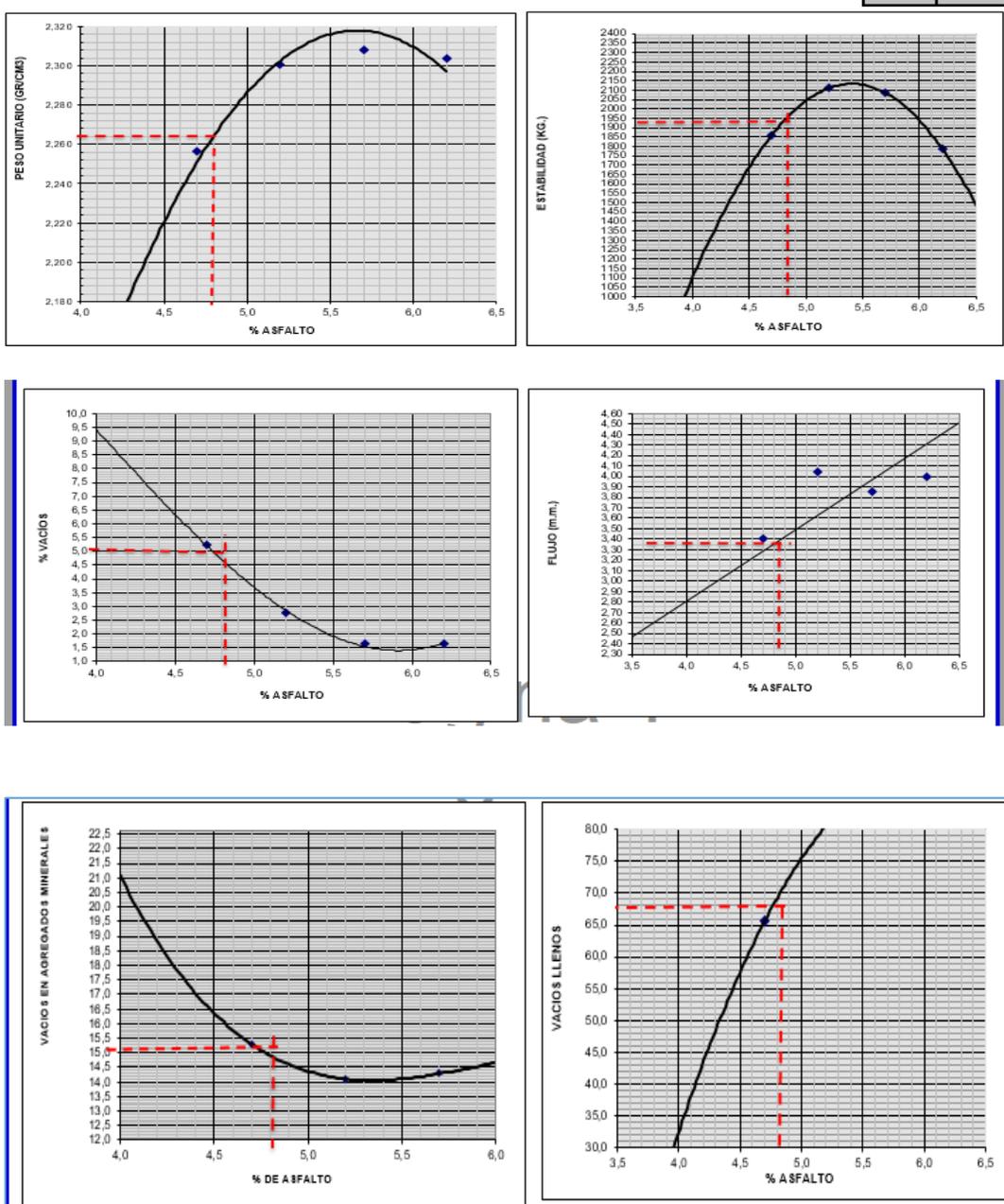
Fuente: Elaboración Compañía de trabajos urbanos.

Diseño de mezcla bituminosa método Marshall modificada

En este informe, se analizarán las mezclas en caliente utilizando el Método Marshall, siguiendo los protocolos establecidos por las normas de ensayo INV-748-13 e INV-799-13, además de aplicar los criterios de diseño pertinentes. Se consideraron cuidadosamente los

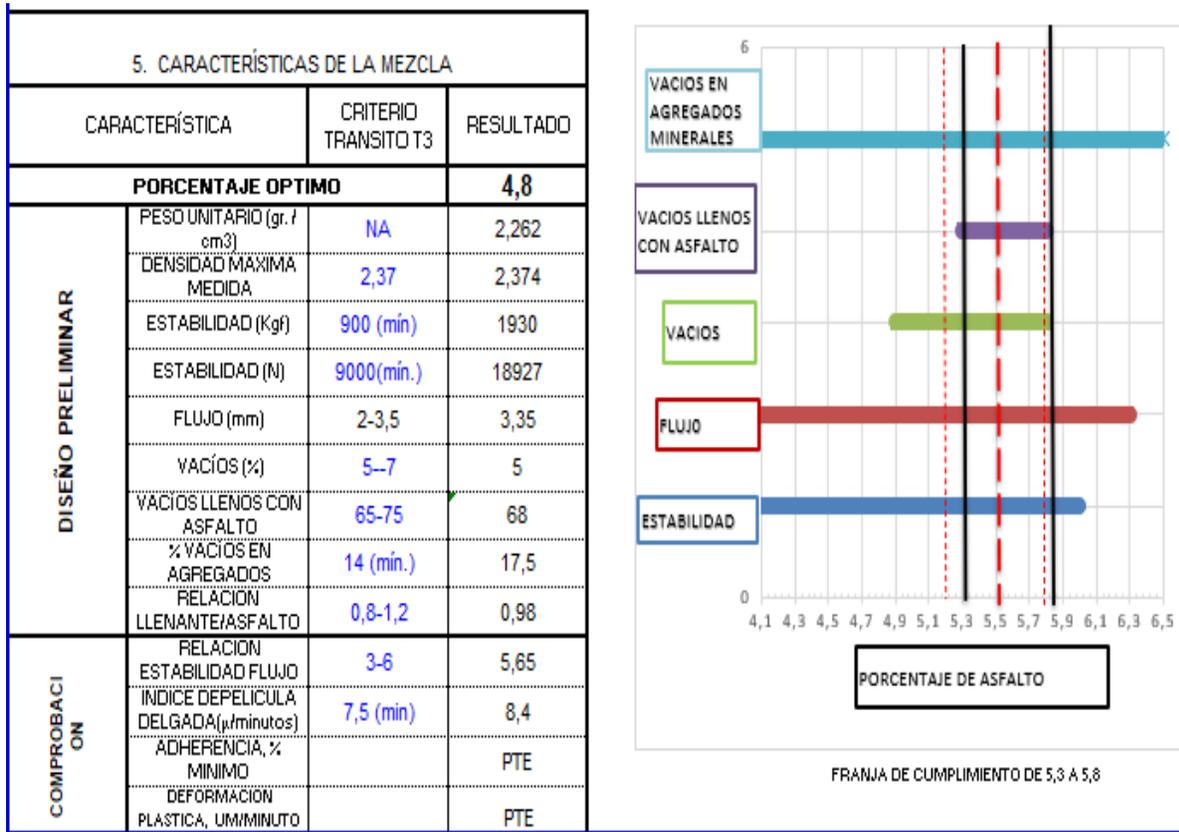
criterios especificados para lograr el contenido óptimo de asfalto, adaptándolo al tráfico T2 y cumpliendo con el T3. Como resultado de este análisis, se obtuvieron los siguientes datos:

Figura 17 tráfico T2 y cumpliendo con el T3



Fuente: Elaboración propia.

Figura 18 Diseño de mezcla bituminosa método Marshall modificada



Fuente: Elaboración propia.

Figura 53 Gravedad máxima teórica medida en la mezcla modificada

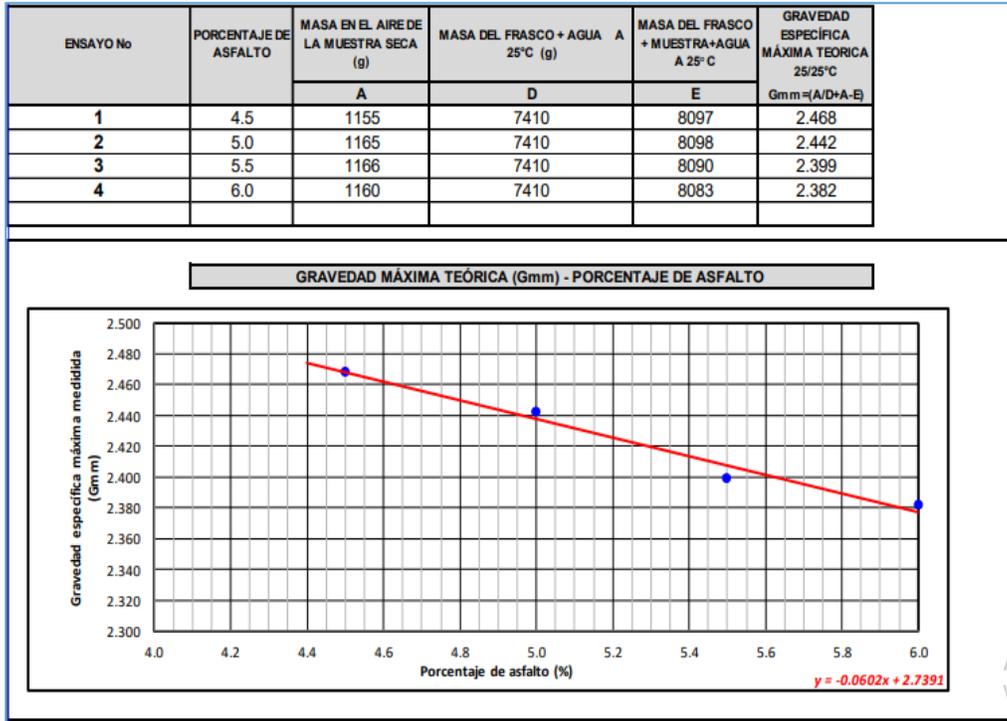


Figura 194 Gravedad máxima teórica y porcentaje de asfalto convencional

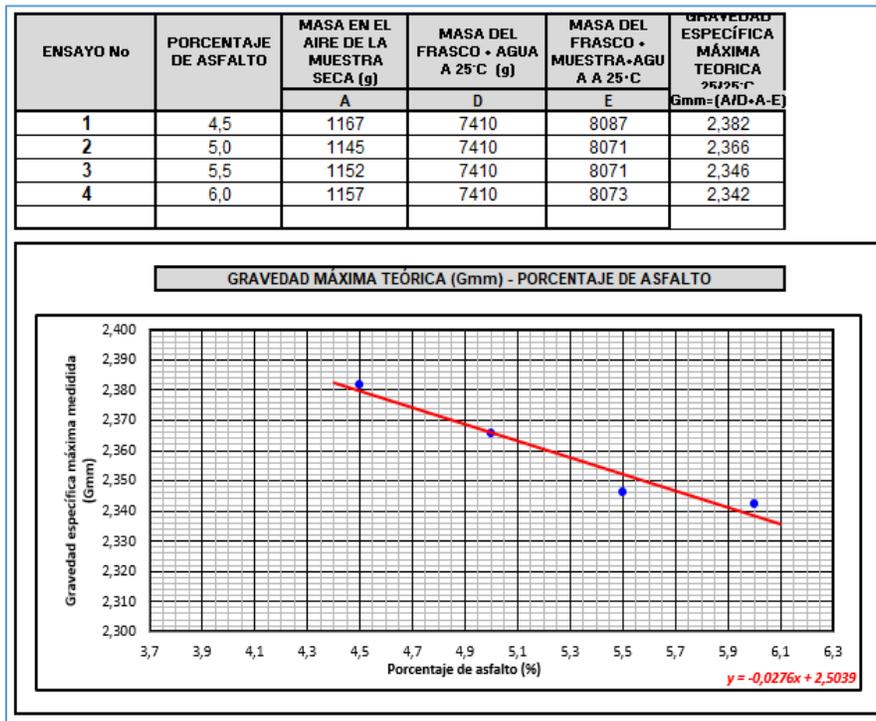
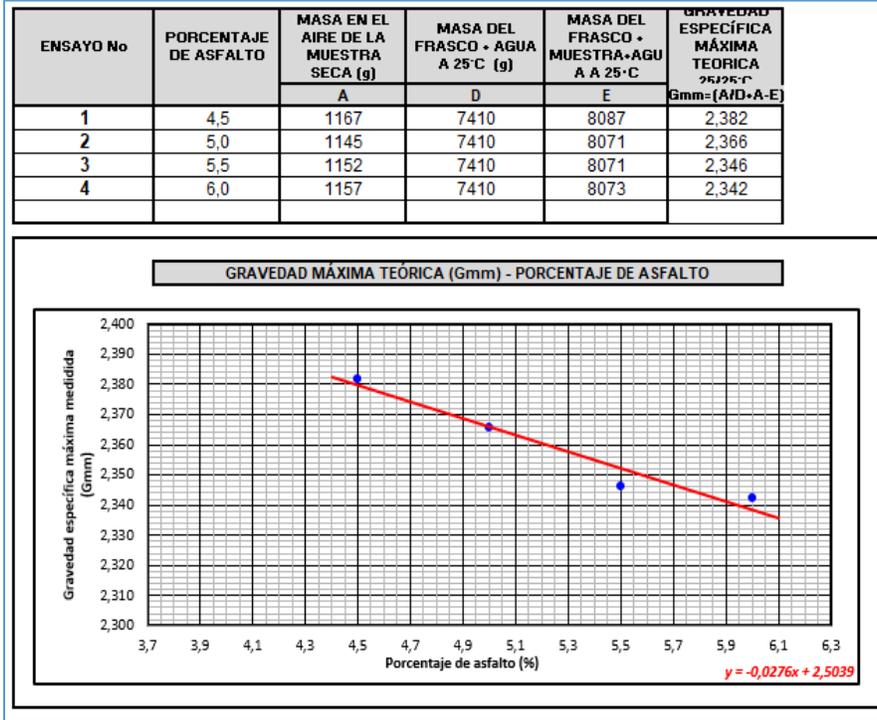


Figura 55 Gravedad específica y absorción de agregados finos en mezcla convencional



 UNIVERSIDAD La Gran Colombia <small>Fundada en 1951</small>		GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION DE AGREGADOS FINOS	
		REF:	9327
PROYECTO: PLANTA DE ASFATO FUSCA DESCRIPCION: AGREGADO FINO MEZCLA MDC-25+20% RAP+GCR SOLICITADO POR: UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA MÉTODO: Norma INVIASE-222-13		DATOS DE MUESTREO FECHA DE MUESTREO: 01/11/2023 FECHA DE ENSAYO: 01/11/2023 CANTERA: GUAYURIBA GUAYURIBA - ATS PATIO DE MANIOBRAS	
PRUEBA No.	1	2	3
TEMPERATURA	25	25	25
FRASCO No.	1	2	3
MASA DEL PICNOMETRO AFORADO LLENO DE AGUA,	667,8	656,0	655,8
MASA MUESTRA SATURADA Y SUPERFICIALMENTE SECA,	513,3	514,8	514,4
MASA TOTAL PICNOMETRO AFORADO CON MUESTRA Y AGUA	978,2	966,1	967,1
MASA DE LA MUESTRA SECA AL HORNO,	503,3	505,0	504,6
GRAVEDAD ESPECÍFICA (BULK) 23/23 °C = $G_{sb} = A / (B - C)$	2,481	2,467	2,484
GRAVEDAD ESPECÍFICA (BULK \$\$\$) 23/23 °C = $G_{sb} = S / (B - C)$	2,530	2,515	2,533
GRAVEDAD ESPECÍFICA APARENTE 13/23 °C = $G_{sa} = A / (B - C)$	2,609	2,591	2,610
ABSORCIÓN = $(S - A) / A * 100\%$	2,0	1,9	1,9
PRECISION: Para gravedad específica no diferir en su valor medio en $\pm 0,032$ y para la absorción $\pm 0,31$			
PESO ESPECIFICO BULK	2,604	PROMEDIO ABSORCIÓN (%)	2,0
	2,628		2,1
	2,602		1,8
	197,90		
OBSERVACIONES:			

Fuente: Elaboración propia.

Figura 56 Peso específico y absorción para agregados gruesos de mezcla modificada

 UNIVERSIDAD La Gran Colombia <small>Fundada en 1951</small>		PESO ESPECIFICO Y ABSORCIÓN PARA AGREGADOS		
		REF	9327	
PROYECTO: PLANTA DE ASFALTO DESCRIPCIÓN: AGREGADO GRUESOS PARA MDC-25+20% RAP SOLICITADA POR: UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA MÉTODO: Norma INVIAS E-223 - 2013		DATOS DE MUESTREO		
		FECHA DE MUESTREO: 1/11/2023		
		FECHA DE ENSAYO: 1/11/2023		
		CANERA: GUAYURIBA		
		UBICACIÓN: PATIO MANIOBRAS		
PRUEBA No		1	2	3
MASA MUESTRA SATURADA, SUPERFICIE SECA, AL AIRE, B, g		808,6	860,4	772,9
MASA MUESTRA SATURADA, SUMERGIDA EN AGUA, C, g		485,4	516,2	461,0
MASA DE LA MUESTRA SECA AL HORNO, A, g		796,2	848,4	761,2
GRAVEDAD ESPECÍFICO BULK, 23° C/23 °C Gsb = A / (B-C)		2,463	2,465	2,441
GRAVEDAD ESPECÍFICO BULK sss, 23° C/23 ° C Gsb_{sss} = B / (B-C)		2,502	2,500	2,478
GRAVEDAD ESPECÍFICO APARENTE, 23° C/23 ° C Gsa= B / (B-C)		2,562	2,554	2,536
ABSORCIÓN = (B - A) / A * 100%		1,56	1,41	1,54
Página 1				
PRECISION: Para pesos específicos no diferir en su valor medio en + ó - 0,01 y para la absorción + ó - : 0,09				
PESO ESPECIFICO BULK 2,550		PROMEDIO ABSORCIÓN (%) 1,50		
OBSERVACIONES: _____				

Fuente: Elaboración propia.

Figura 57 Peso específico y absorción para agregados de mezclas

	PESO ESPECIFICO Y ABSORCIÓN PARA AGREGADOS
REF	9327
DATOS DE MUESTREO	
PROYECTO: PLANTA DE ASFALTO DESCRIPCIÓN: AGREGADO GRUESOS PARA MDC-25+20% RAP SOLICITADA POR: UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA MÉTODO: Norma INVIAS E-223 - 2013	FECHA DE MUESTREO: 11/11/2023 FECHA DE ENSAYO: 11/11/2023 CANTERA: GUAYURIBA UBICACIÓN: PATIO MANIOBRAS
PRUEBA No	1 2 3
MASA MUESTRA SATURADA, SUPERFICIE SECA, AL AIRE, B, g	808,6 860,4 772,9
MASA MUESTRA SATURADA, SUMERGIDA EN AGUA, C, g	485,4 516,2 461,0
MASA DE LA MUESTRA SECA AL HORNO, A, g	796,2 848,4 761,2
GRAVEDAD ESPECÍFICO BULK, 23° C/23 ° C $G_{sb} = A / (B - C)$	2,463 2,465 2,441
GRAVEDAD ESPECÍFICO BULK $G_{sb_{sss}} = B / (B - C)$	2,502 2,500 2,478
GRAVEDAD ESPECÍFICO APARENTE, 23° C/23 ° C $G_{sa} = B / (B - C)$	2,562 2,554 2,536
ABSORCIÓN = $(B - A) / A * 100\%$	1,56 1,41 1,54
PRECISION: Para pesos específicos no diferir en su valor medio en + ó - 0,01 y para la absorción + ó - : 0,03	
PESO ESPECIFICO BULK 2,550	PROMEDIO ABSORCIÓN (%) 1,50
OBSERVACIONES:	

Fuente: Elaboración propia.

Figura 58 Evaluación de la susceptibilidad al agua de mezclas asfálticas compactadas utilizando la prueba de tracción indirecta inv-e-725 mezcla convencional.

Briqueta N°		GRUPO HUMEDO			PROMEDIO	GRUPO SECO			PROMEDIO
		1	2	3		4	5	6	
D	Diámetro	mm	101.8	101.4	101.6	2.263	100.3	102.4	101.6
t	Espesor.	mm	68.3	67.7	66.3		67.8	66.7	65.4
A	Masa seca al aire	g	1187.5	1190.2	1168.4		1185.2	1156.8	1231.6
B	Masa SSS	g	1190.2	1195.4	1171.7		1214.8	1146.5	1242.8
C	Masa en el agua	g	664.5	672.8	652.9		689.8	634.6	696.2
E	Volumen, (B-C)	cm ³	525.7	522.6	518.8		525.0	511.9	546.6
F	Gravedad específica Bulk, (A/E).	g/cm ³	2.259	2.277	2.252		2.258	2.260	2.253
G	Gravedad específica Máxima.	g/cm ³	2.442	2.442	2.442		2.442	2.442	2.442
H	Vacios con aire, [1-(F/G)]*100	%	7.5	6.7	7.8		7.3	7.6	7.5
I	Volumen de vacíos con aire, H*E/100	cm ³	39.4	35.2	40.3		38.3	39.7	38.2
P	Carga	N				13985	15225	15902	15037
Saturación mediante vacío									
B'	Masa SSS	g	1215.2	1215.8	1197.9				
C'	Masa en el agua	g	668.6	676.3	657.3				
E'	Volumen, (B'-C')	cm ³	546.6	539.5	540.6				
J'	Volumen absoluto de agua (B'-A)	cm ³	27.7	25.6	29.5				
Acondicionamiento 24 horas en agua a 60 °C									
t'	Espesor.	mm	68.9	68.2	66.0	88.1			
B''	Masa SSS	g	1220.1	1221.8	1205.4				
C''	Masa en agua	g	669.5	680.7	660.4				
E''	Volumen (B''-C'')	cm ³	550.6	541.1	545.0				
J''	Volumen absoluto de agua (B''-A)	cm ³	32.6	31.6	37.0				
-	Saturación, (100*J'')/I	%	82.7	89.7	91.7				
-	Hinchamiento, (E''-E'')*100/E	%	0.8	0.3	0.8				
P''	Carga	N	13685	12605	13566				
-	Daño por humedad visual estimado	%	0.00%	0.00%	0.00%				
-	Agregado fracturado o triturado	%	1.00%	0.00%	0.50%				
R _s	Resistencia seca	kPa				1309	1419	1524	1417
R _h	Resistencia húmeda	kPa	1242	1160	1288	1230			
R _c	Resistencia conservada	%	86.8%						

Fuente: Elaboración propia.

Figura 59 Evaluación de la susceptibilidad al agua de mezclas asfálticas compactadas utilizando la prueba de tracción indirecta inv-e-725 mezcla modificada.

Briqueta N°		GRUPO HUMEDO			PROMEDIO	GRUPO SECO			PROMEDIO
		1	2	3		4	5	6	
D	Diámetro	mm	102,1	102,3	100,7	2.210	100,1	101,4	101,6
t	Espesor.	mm	60,5	61,4	61,4		62,8	59,2	64,7
A	Masa seca al aire	g	1172,7	1159,6	1141,1		1181,3	1106,4	1231,7
B	Masa SSS	g	1175,0	1163,5	1146,1		1184,8	1200,7	1235,3
C	Masa en el agua	g	645,1	637,9	623,9		649,7	639,7	675,2
E	Volumen, (B-C)	cm ³	529,9	525,6	516,2		535,1	501,0	560,1
F	Gravedad específica Bulk, (A/E).	g/cm ³	2,213	2,206	2,211		2,208	2,208	2,199
G	Gravedad específica Máxima.	g/cm ³	2,379	2,379	2,379		2,379	2,379	2,379
H	Vacios con aire, [1-(F/G)]*100	%	7,0	7,3	7,1		7,1	7,2	7,6
I	Volumen de vacíos con aire, H*E/100	cm ³	37,0	38,2	36,5		37,2	38,5	42,4
P	Carga	N				8965	8856	8754	8958
Saturación mediante vacío									
B'	Masa SSS	g	1195,2	1182,2	1163,3				
C'	Masa en el agua	g	657,1	650,3	640,3				
E'	Volumen, (B'-C')	cm ³	538,1	531,9	523,0				
J'	Volumen absoluto de agua (B'-A)	cm ³	22,5	22,6	22,2				
-	Saturación, (100*J')/I	%	60,9	59,2	60,7	60,3			
-	Hinchamiento, (E'-E')*100/E	%	1,5	1,2	1,3	1,4			

Acondicionamiento 24 horas en agua a 60 °C											
I"	Espesor.	mm	61	63,2	61,9						
B"	Masa SSS	g	1202,3	1190,3	1170,3						
C"	Masa en agua	g	662,3	657,4	645,3						
E"	Volumen (B"-C")	cm ³	540,0	532,9	525,0						
J"	Volumen absoluto de agua (B"-A)	cm ³	29,6	30,7	29,2						
-	Saturación, (100*J")/I	%	80,1	80,4	79,9					80,1	
-	Hinchamiento, (E"-E")*100/E	%	0,4	0,2	0,4					0,3	
P"	Carga	N	7452	7896	7412					7586,7	
	Daño por humedad visual estimado	%	0,00%	0,00%	0,00%					0,00%	
	Agregado fracturado o triturado	%	1,00%	0,00%	0,50%					0,50%	
R _s	Resistencia seca	kPa					908	939	848	898	
R _h	Resistencia húmeda	kPa	762	777	757					765	
R _c	Resistencia conservada	%					85,2%				

Fuente: Elaboración propia.

Figura 60 Diferencia de costos en CPU de modificada y convencional

MATERIALES (INCLUIDO SUMINISTRO Y TRANSPORTE)			VALOR UN por M3	% OPTIMO	convencional	precios modificada	precios convencional	DIFERENCIA POR MATERIAL
B0093321	m3	Arena de Trituración	77.000,00	0,14	0,20	10.780,00	15.400,00	4.620,00
B0093350	m3	Arena lavada	116.000,00	0,22	0,30	25.520,00	34.800,00	9.280,00
B0015350	m3	Triturado tamaño 1/2"	88.120,00	0,23	0,20	20.267,60	17.624,00	-2.643,60
B0015350	m3	Triturado tamaño 1"	83.300,00	0,21	0,30	17.493,00	24.990,00	7.497,00
B0015350	m3	rap	60.000,00	0,20		12.000,00	0,00	-12.000,00
TOTAL						86.060,60	92.814,00	1,00
REDUCCION EN GASTOS						7%		6.754,40

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar nuestra mezcla modificada al incluirle RAP en los agregados, tenemos una reducción en gastos comparada con la mezcla convencional, vista en la gráfica anterior, quiere decir que al reducir los % en cada uno de los materiales y agregarle un 20% de RAP, que ya en si tiene contenido de asfalto se puede reducir los costos en un 7%/m³ de la mezcla.

Figura 61 Especificaciones preliminares para mezclados asfálticos - Marshall

CARACTERÍSTICA	NORMA ENSAYO INV	MEZCLAS DENSAS, SEMIDENSAS Y GRUESAS			MEZCLA DE ALTO MÓDULO	
		CATEGORÍA DE TRÁNSITO				
		NT1	NT2	NT3		
Compactación (golpes/cara)	E-748 (E-800) (Nota 1)	50	75 (112)	75 (112)	75	
Estabilidad mínima (N)		5,000	7,500 (16,875)	9,000 (33,750)	15,000	
Flujo(mm) (Nota 2)		2.0 a 4.0	2.0 a 4.0 (3.0 a 5.0)	2.0 a 3.5 (3.0 a 5.3)	2.0 a 3.0	
Relación Estabilidad / Flujo (kN/mm)		2.0 a 4.0	3.0 a 5.0 (4.5 a 7.5)	3.0 a 6.0 (4.5 a 9.0)	-	
Vacíos con aire (V _a), % (Nota 3)	Rodadura	E-736	3.0 a 5.0	3.0 a 5.0	4.0 a 6.0	NA
	Intermedia	o	4.0 a 8.0	4.0 a 7.0	4.0 a 7.0	4.0 a 6.0
	Base	E-799	NA	5.0 a 8.0	5.0 a 8.0	4.0 a 6.0
Vacíos en los agregados minerales (VAM), % mínimo	T. Máx. 38 mm	E-799	13.0			-
	T. Máx. 25 mm		14.0			14.0
	T. Máx. 19 mm		15.0			-
	T. Máx. 10 mm		16.0			-
Vacíos llenos de asfalto (VFA), %	E-799	65 a 80	65 a 78	65 a 75	63 a 75	
Relación Llenante / Ligante efectivo, en peso	E-799	0.8 a 1.2			1.2 a 1.4	
Concentración de llenante, valor máximo	E-745	Valor crítico				
Evaluación de propiedades de empaquetamiento por el método Bailey	-	Reportar				
Espesor promedio de película de asfalto, mínimo μm	E-741	7.5				

Tomado de Instituto Nacional de Vías (2012), artículo 450.

Discusión de resultados

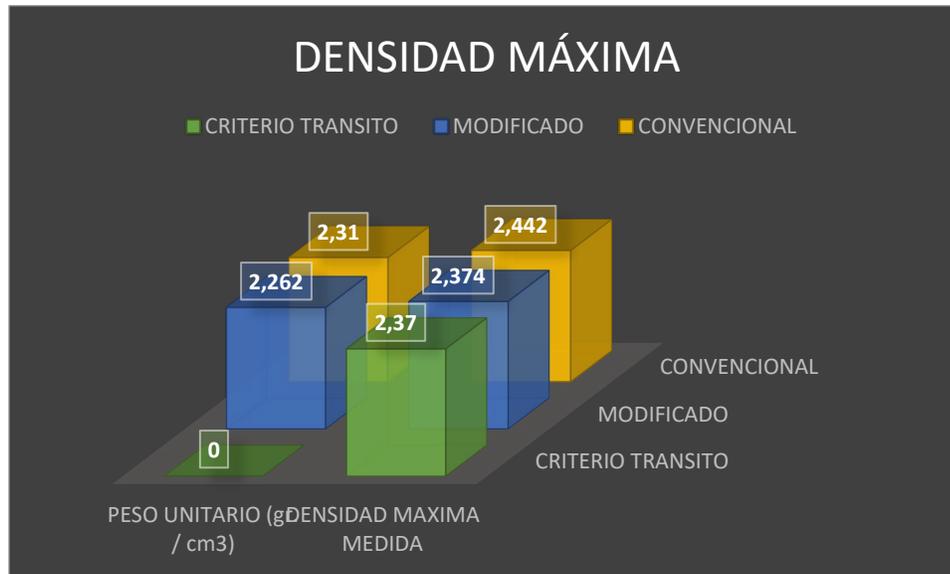
Como análisis general del procedimiento desarrollado en laboratorio, los resultados mostrados en la figura 61. diseño de mezcla bituminosa método Marshall modificada, obtiene la caracterización de los agregados, muestra que cumple los requisitos de la normatividad INV E-748.

Figura 62. Caracterización de agregados.

CARACTERISTICA	CRITERIO TRANSITO	MODIFICADO	CONVENCIONAL
PESO UNITARIO (gr. / cm3)	0	2,262	2,31
DENSIDAD MAXIMA MEDIDA	2,37	2,374	2,442
ESTABILIDAD (Kgf)	900	1930	1780
ESTABILIDAD (N)	9000	18926,8345	17455,837
FLUJO (mm)	3,5	3,35	3,025
VACÍOS (%)	7	5	4,8
% VACÍOS EN AGREGADOS MINERALES (%)	14	17,5	14,8
RELACION LLENANTE/ASFALTO EFECTIVO	1,2	0,98	1,1
RELACION ESTABILIDAD FLUJO	6	5,649801343	5,84
INDICE DEPELICULA DELGADA(μ/minutos)	7,5	8,41	8,1
ADHERENCIA, % MINIMO	80	84	86,8
DEFORMACION PLASTICA, UM/MINUTO MAXIMO	15	3,7	2,94

Fuente: Elaboración propia.

Figura 63. Valores de densidad Máxima. – Unidades en gramos



Fuente: Elaboración propia.

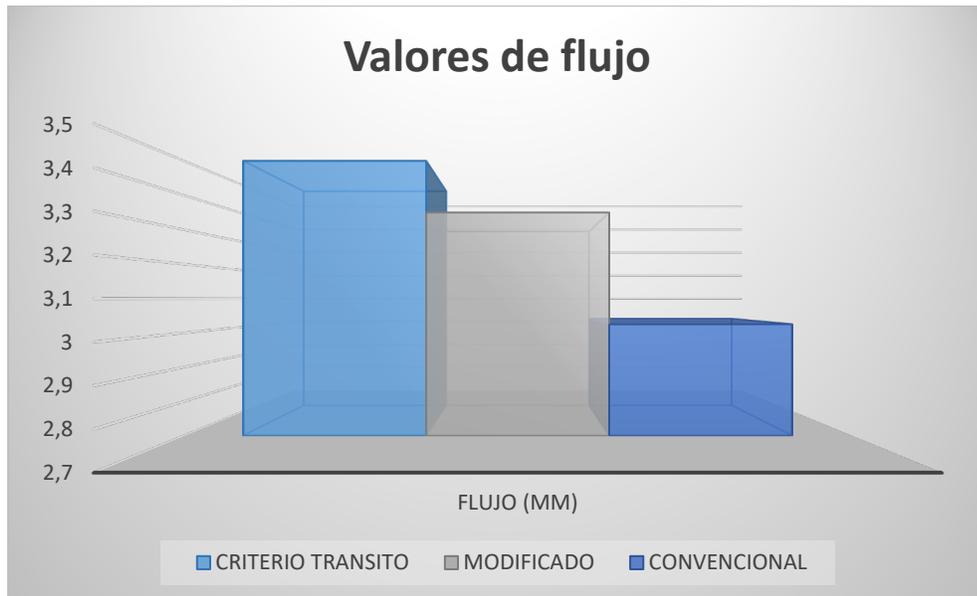
Densidad Máxima (2.374): Superamos el criterio T3, lo que señala una excelente compactación y una mayor resistencia ante cargas.

Figura 64. Valores de estabilidad. – Unidades en Kgf



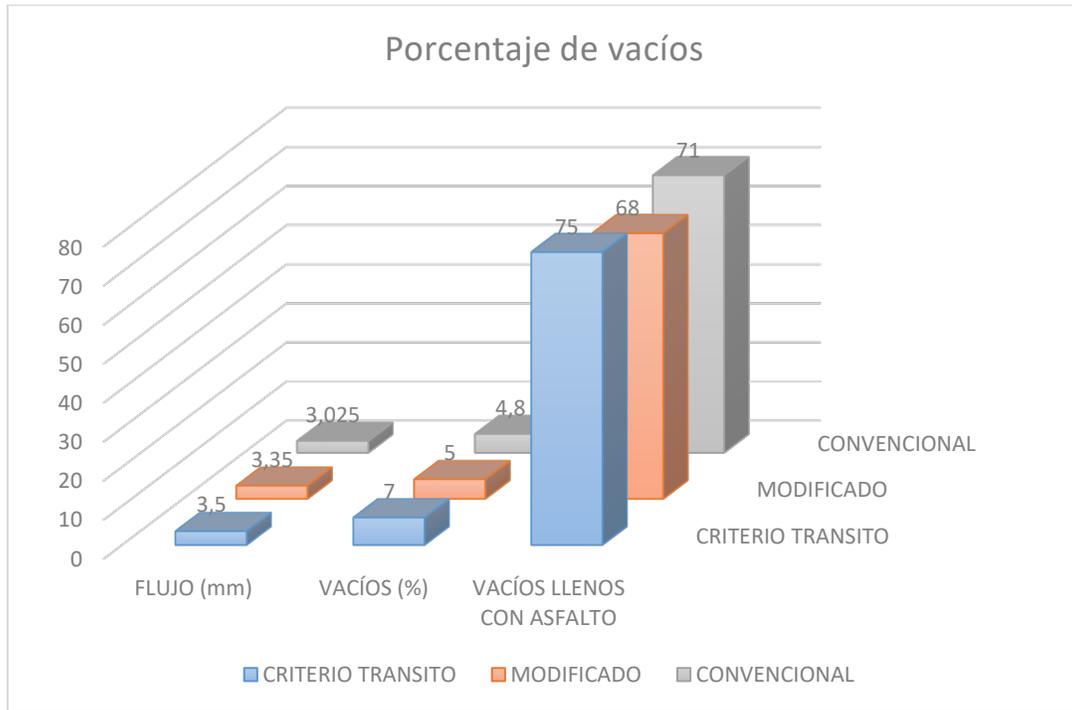
Estabilidad (1930 kg): La mezcla muestra una estabilidad significativamente superior al criterio establecido (900 kg), indicando una mayor capacidad para resistir deformaciones bajo carga.

Figura 65. Valores de flujo – Unidades en MM



Flujo (3.35): El valor obtenido está dentro del rango esperado, mostrando una fluidez adecuada que facilita la colocación y compactación de la mezcla.

Figura 66. Valores de porcentaje de vacíos. – Unidades en puntos porcentuales



% de Vacíos (5%): Cumplimos con el rango establecido (entre 5% y 7%), asegurando una adecuada cantidad de vacíos para evitar la saturación y permitir la evacuación del agua.

Vacíos Llenos con Asfalto (68%): Estamos dentro del margen óptimo, garantizando una buena proporción de asfalto en los vacíos para mejorar la resistencia y durabilidad.

Figura 67. % Vacíos en Agregados Minerales - VAM. – Unidades en puntos porcentuales



% de Vacíos en Agregados Minerales (17.5%): superamos ligeramente el valor mínimo, seguimos manteniéndonos dentro de un rango aceptable para garantizar la estabilidad de la mezcla.

Relación de Llenante/Asfalto (0.98): Nuestra proporción está cerca del límite superior del criterio establecido, lo que indica una adecuada cantidad de llenante para mejorar las propiedades de la mezcla.

Figura 68. Relación Estabilidad-flujo.

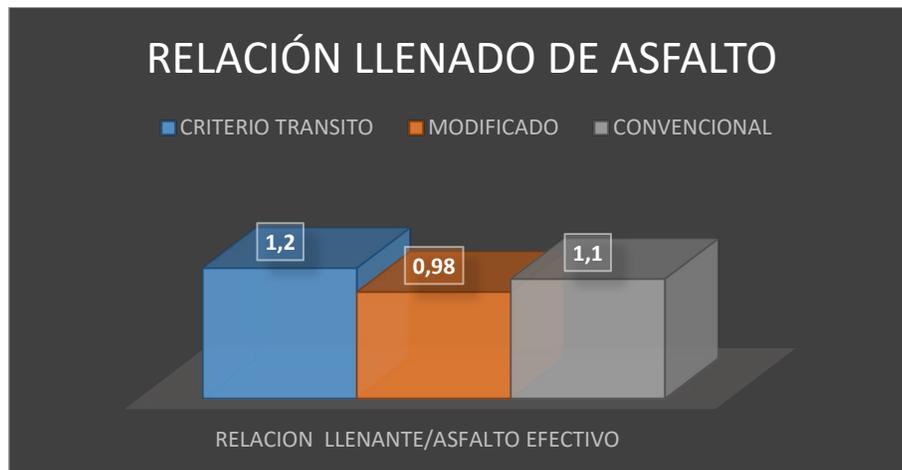
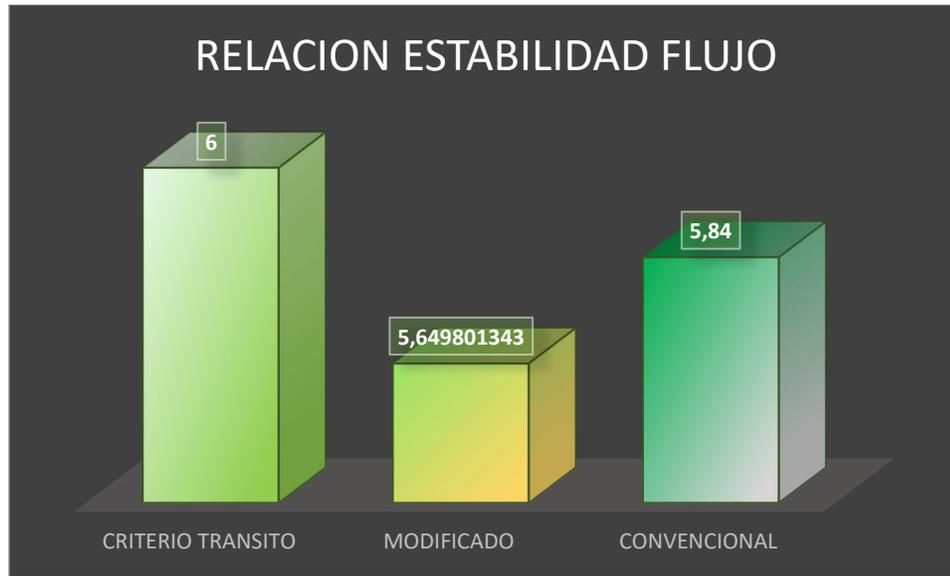
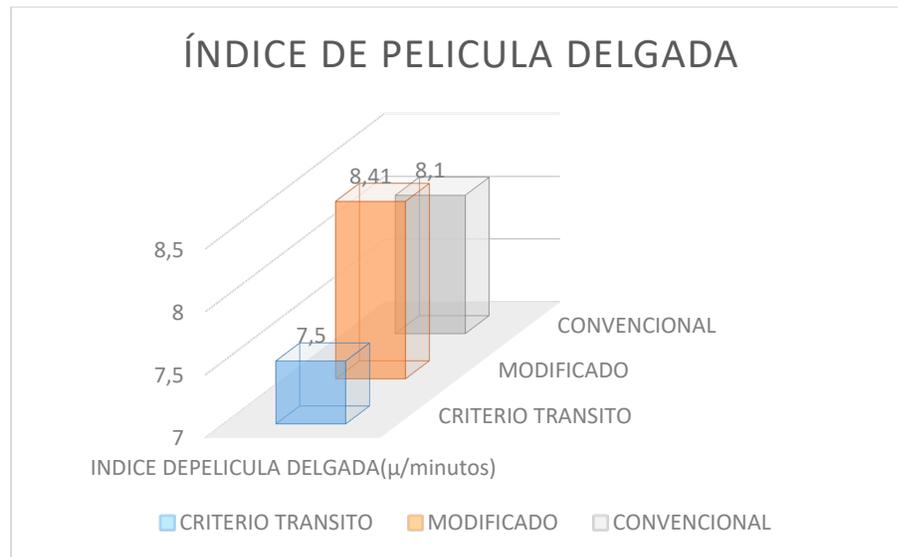


Figura 69. Relación de estabilidad de flujo



Relación de Estabilidad/Flujo (5.65): Este valor se encuentra dentro del rango esperado, indicando un equilibrio favorable entre estabilidad y fluidez.

Figura 70. Índice de película delgada. – Unidades en μ /minutos

Índice de Película Delgada (8.4): Superamos el mínimo requerido, lo que sugiere una buena adherencia y recubrimiento de los agregados por el asfalto.

Conclusiones y Recomendaciones

Los resultados a nivel de laboratorio muestran que la mezcla asfáltica modificada cumple con los parámetros establecidos de la norma INVE-748 en varios aspectos claves como la estabilidad y el flujo los cuales superan los estándares actuales. Por tal motivo, es viable concluir que con la propuesta que se desarrolló es posible obtener un producto de alta calidad con mejoras significativas en resistencia, durabilidad y resistencia a la fatiga. Que permite reutilizar materiales que en principio son desechados como el RAP, obteniendo beneficios ambientales y optimización de recursos económicos.

La inclusión de RAP (asfalto reciclado) en la mezcla modificada, tal como se planteó en apartes previos, permite evidenciar buenos resultados, toda vez que al utilizar un 20% de este material en la mezcla original, admite una reducción de costos en comparación con la mezcla convencional. Dichas reducciones pueden llegar a ser hasta de un 7% disminuyendo por cada metro cúbico de la mezcla final. Esto aporta un beneficio económico significativo sin comprometer la calidad y las propiedades deseadas de la mezcla asfáltica modificada, demostrando una alternativa rentable y sostenible en términos de recursos económicos y de preservación del medio ambiente

Se recomienda seguir desarrollando implementaciones de este tipo e incluso reformulaciones de la mezcla para estandarizar el proceso y continuar con la ejecución de un tramo de prueba que permita colocar en comportamiento real la mezcla asfáltica.

Por otra parte, es importante resaltar que la adición del grano de caucho reciclado, se realizó de manera independiente. Por tal razón y con base en la experiencia de los investigadores de este proyecto, se recomienda experimentar con asfalto modificado con grano de caucho que se comercializa en Colombia y analizar y establecer parámetros de cumplimiento.

Lista de Referencias

- Aldana J; Acosta L. (2014). Análisis del comportamiento de las mezclas gruesa en caliente MGC-1, Utilizando asfaltos modificados con polímeros (SBS).
<https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/f3ab7878-26c0-49d8-b620-dae198b139be>.
- Anguas A, Flores M, Gómez J et al. (2005). Generalidades sobre mezclas asfálticas. Geomecánicas de mezclas asfálticas. Safandial
<http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt267.pdf>.
- Crisman B, Giulio O, De Lorenzi L, Bevilacqua P. (2020). Una evaluación de laboratorio de la influencia del caucho granulado en una mezcla de asfalto en caliente con escoria de acero reciclado. *MDPI Departamento de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Trieste, via Alfonso Valerio 6/2, 34127 Trieste, Italia, 12 (19)*. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su12198045>
- Desarrollo de Bogotá. (2019). RECICLAJE DE PAVIMENTO ASFÁLTICO EN EL SITIO CON CEMENTO PÓRTLAND. En E. t. 454-11.
https://www.umv.gov.co/sisgestion2019/Documentos/APOYO/GLAB/GLAB-DE-012_V1_Especificaciones_IDU_Seccion_450-11.pdf.

Díaz C, Castro L. (2017). Implementación del grano de caucho reciclado (GCR) proveniente de llantas usadas para mejorar las mezclas asfálticas y garantizar pavimentos sostenibles en Bogotá. *Craiusta, Centro de recursos para el aprendizaje y la investigación*, 82.

<https://doi.org/https://hdl.handle.net/11634/2633>

eadic. (9 de sept de 2016). *Historia dl uso de asfalto*. Obtenido de

<https://eadic.com/blog/entrada/historia-del-uso-de-asfalto/>

Figueroa A; Fonseca E. (2020). Desempeño del pavimento con mezcla reciclada-RAP y grano de caucho reciclado-GCR. *Infraestructura Vial*, 22(39).

<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.15517/iv.v22i39.41205>

Garnica P; Delgado H, et al. (2004). Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas.

Método Marshall, publicación técnica 246, 67.

Instituto Nacional de Vías. (2013). Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras

INVIAS. Capítulo 4. Pavimentos. En *MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE DE GRADACIÓN CONTINUA (CONCRETO ASFÁLTICO) Art 450* (pág. 47).

<https://gerconcesion.co/invias2013/450%20MEZCLAS%20ASFALTICAS%20EN%20CALIENTE%20DE%20GRADACION%20CONTINUA.pdf>

- Liu X; Chen D; Liu J; Zen W. (2023). Modificación del diseño de mezcla volumétrica y análisis de atenuación de vibraciones de vías de asfalto epoxi recubierto de caucho para ferrocarril. *SSRN*, 39. <https://doi.org/Shi, Chenguang y Wu, You y Fuentes, Raul y Fan, Yulou y Fu, Chaoliang y Yang, Jun, Modificación del diseño de mezcla volumétrica y análisis de atenuación de ht>
- Lo Presti, D., Giunta, M. (2013). Reclaimed Asphalt Pavement and Recycled Asphalt Shingles in Asphalt Mixtures. En D. G. Lo Presti, *State of the Practice. Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(9), 1216-1227.
- Olarte B, Soler R. (2018). EFECTO DEL GRANO DE CAUCHO EN EL AHUELLAMIENTO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA TIPO MD-12. En *Trabajo de grado para optar al título de ingeniería de vías*.
https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/handle/001/3094/TGT_1659.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Rismawansyah I; Ihsan M. (ago de 2015). *SIMULACIÓN DE ENVEJECIMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE UTILIZANDO PAVIMENTO ASFÁLTICO RECUPERADO*. Obtenido de DOI: 10.13140/RG.2.2.20120.42249
- Silva H, Iskender M, Bueno M. (2015). Evaluation of the Effects of Rubber Aggregate on the Performance of Asphalt Mixtures. *Construction and Building Materials*,.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6515297/>.

Anexos

Figura 20 Cantera materiales de río y ATS.



Fuente: Elaboración propia. Los ATS son los amarillos y están triturados. Las canteras consisten en zonas con potencial para ser explotados extrayendo rocas y minerales bajo procedimientos diferentes, utilizados en la construcción, metalurgia, asfaltos, orfebrería, entre otros.

Figura 21 Material de Cantera RAP



Fuente: Elaboración propia. El RAP es el granizo negro. El pavimento reciclado RAP se recupera de la carpeta asfáltica desde un pavimento removido como producto de la rehabilitación.

Figura 22 Secado de tres muestras de RAP



Fuente: Elaboración propia.

Figura 23 Detalle de las tres muestras ya secadas



Fuente: Elaboración propia.

Figura 24 Aceleramos el proceso de secado del rap de tres muestras a 110 grados



Fuente: Elaboración propia.

Figura 25 Horneado del RAP



Fuente: Elaboración propia.

Figura 26 recipiente para calcular los pesos de la extracción del RAP



Fuente: Elaboración propia.

Figura 27 Se prepara el equipo de extracción del rap este trabaja 3600 revoluciones x minuto



Fuente: Elaboración propia.

Figura 28 Se cierra el recipiente y aplicamos 500 ml de cloruro para la extracción y la separación del asfalto



Fuente: Elaboración propia.

Figura 29 Se realizan 4 lavadas de cloruro por muestra para que quede separado el asfalto y poder determinar el % óptimo de asfalto



Fuente: Elaboración propia.

Figura 30 Se realiza proceso de secado al horno o estufa 110 grados después de lavar el rap



Fuente: Elaboración propia.

Figura 31 Después de secar al horno lo dejamos que se baje la temperatura y procedemos a tamizar el rap cada una de las tres muestras



Fuente: Elaboración propia.

Figura 32 Grano de caucho se revisa que este triturado de la manera correcta sin dejar residuos de alambre.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 33 Se guardan las muestras de los materiales y se dejan como testigos para hacer correcciones en caso que no nos cumpla el diseño de mezcla.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 34 Se mezclan todos los materiales según nuestro diseño de mezcla obtenido para realizar el rice.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 35 Toma de temperaturas a nuestras briquetas antes de compactar a 75 goles por cada cara



Fuente: Elaboración propia.

Figura 36 Temperatura 148 grados



Fuente: Elaboración propia.

Figura 37 Proceso de adición del 1% de grano de caucho.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 38 La mezcla tiene que ser homogénea con el bitumen



Fuente: Elaboración propia.

Figura 39 se le adiciona el peso exacto de mezcla asfáltica bitumen 60/70 convencional a nuestros materiales con una temperatura de 148 grados



Fuente: Elaboración propia.

Figura 40 Se continua con la mezcla recalentando



Fuente: Elaboración propia.

Figura 41 Material calentado para mezclar el asfalto según diseño de mezcla



Fuente: Elaboración propia.

Figura 42 Materiales granulométricos pesados de acuerdo al diseño de mezcla obtenido del análisis granulométrico.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 43 Secado de material ya mezclado homogéneo gravas y arenas



Fuente: Elaboración propia.

Figura 44 Proceso de compactación de briquetas 75 golpes por cada cara



Fuente: Elaboración propia.

Figura 45 Se desencofran las muestras de cada una de las briquetas marcadas con los porcentajes de asfalto x cada porcentaje se realizan 3 muestras



Fuente: Elaboración propia.

Figura 46 Temperatura de agua para determinar, Seca en aire, Sss en aire, Peso en agua



Fuente: Elaboración propia.

Figura 47 Muestras listas para baño de agua María



Fuente: Elaboración propia.

Figura 48 Muestras en baño de agua María 30 minutos aproximadamente



Fuente: Elaboración propia.

Figura 49 Se determina el rise



Fuente: Elaboración propia.

Figura 50 Procedemos a fallar con el anillo para determinar estabilidad y flujo que nos da directamente los valores



Fuente: Elaboración propia.

Figura 51 Fallo de las briquetas



Fuente: Elaboración propia.

Figura 52 Se lava muy bien cada una de las tres muestras y pesamos al final



Fuente: Elaboración propia.

Figura 53 Después de lavar las muestras las tamizamos pasa 200



Fuente: Elaboración propia.