

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD Y FLUJO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN
CALIENTE FABRICADAS CON AGREGADOS DE BOYACÁ Y ASFALTO
MODIFICADO CON GRANO DE CAUCHO RECICLADO POR VIA SECA

ERIKA VIVIANA FLECHAS GARZÓN
VALERIA CAMILA PÉREZ HOLGUÍN

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS - SECCIONAL TUNJA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
TUNJA
2023

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD Y FLUJO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN
CALIENTE FABRICADAS CON AGREGADOS DE BOYACÁ Y ASFALTO
MODIFICADO CON GRANO DE CAUCHO RECICLADO POR VIA SECA

ERIKA VIVIANA FLECHAS GARZÓN
VALERIA CAMILA PÉREZ HOLGUÍN

Tesis de grado para obtener el título de Ingeniero Civil

Director: Héctor Mauricio Sánchez Abril
Magister en Ingeniería con énfasis en Transporte

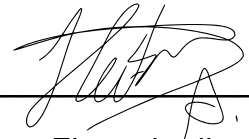
UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS - SECCIONAL TUNJA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
TUNJA
2023

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, dar gracias a Dios por permitirnos realizar este trabajo de grado para aportar a una nueva alternativa de cambio para nuestra sociedad. También dar gracias a nuestros tutores el ingeniero Héctor Mauricio Sánchez Abril y al ingeniero Miguel Ángel Toledo Castellanos por el acompañamiento en el transcurso del desarrollo de la tesis. También dar gracias a la ingeniera Sandra Elodia Ospina por sus oportunas correcciones, para una mejor formulación del trabajo. Además, dar gracias a los laboratoristas Jhon Fredy Hernández y Fredy Javier Gonzalo Rojas por su supervisión, consejos y sugerencias para realizar de manera correcta y oportuna cada uno de los ensayos correspondientes a la investigación; A nuestros compañeros Nicolas Alejandro Avella Pesca y Karol Vanessa Nocua Rojas agradecerles su apoyo y compromiso con el desarrollo y elaboración de los ensayos propuestos para el desarrollo de la tesis; Un agradecimiento especial a la Universidad Santo Tomás seccional Tunja por brindarnos los espacios y equipos pertinentes para el desarrollo de este trabajo.

Por último y no menos importante dar gracias a nuestras familias por brindarnos un apoyo incondicional en el transcurso de nuestra carrera, fomentando el compromiso con cada objetivo propuesto, e incursionar en nosotros valores para nuestros perfiles profesionales y personales.

Nota de aceptación:



Firma de director

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Tunja, 29 de marzo, 2023

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	2
1.1. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA	2
1.2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	2
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	3
2. OBJETIVOS	4
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	4
2.2. OBJETIVO ESPECIFICO.....	4
3. ESTADO DEL ARTE	5
4. MATERIALES Y MÉTODOS	16
4.1. MATERIALES.....	16
4.1.1. Agregado grueso	16
4.1.2. Agregado fino	16
4.1.3. Llenante mineral	17
4.1.4. Grano de caucho (GCR).....	18
4.1.5. Material de carácter bituminoso	18
4.1.6. Tamices.....	19
4.1.7. Platón.....	19
4.1.8. Termómetro	20
4.1.9. Gato Hidráulico	21
4.1.10. Calibrador Pie de Rey Metálico digital	21
4.1.11. Balanzas de carácter digital.....	22
4.1.12. Baño Termostático.....	22

4.1.13.	Equipo manual de compactación	23
4.1.14.	Moldes de compactación de Briquetas de asfalto	24
4.1.15.	Cabezote de estabilidad	24
4.1.16.	Cocineta	25
4.1.17.	Espátulas	25
4.1.18.	Horno	25
4.1.19.	Costales de lona y fibra	25
4.2.	METODOS	26
4.2.1.	Caracterización del material pétreo	26
5.	RESULTADOS	32
5.1.	CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL PÉTREO	32
5.1.1.	Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino (INV E-213-13) (Anexo 10)	32
5.1.2.	Índices de Aplanamiento y de Alargamiento de los Agregados para Carreteras (INV E 230-13) (Anexo 11)	34
5.1.3.	Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso (INV E 227-13) (Anexo 12)	35
5.1.4.	Determinación de la Resistencia del Agregado Grueso a la Degradación por Abrasión, utilizando el aparato de Micro-deval (INV E 238-13) (Anexo 13)	36
5.1.5.	Densidad, Densidad Relativa (Gravedad específica) y Absorción del agregado fino y grueso (INV E 222-13 e INV E-223-13) (Anexo 14)	38
5.1.6.	Determinación del valor de 10% de finos (INV E 224-13) (Anexo 15)	38
5.1.7.	Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1½") por medio de la máquina de los ángeles (INV E 218-13) (Anexo 16)	39

5.1.8. Equivalente de arena de suelos y agregados finos (INV E 133-13) (Anexo 17)	39
5.2. PORCENTAJE IDEAL DE ASFALTO PARA LA ELABORACIÓN DE MEZCLA CONVENCIONAL.....	40
5.2.1. Cantidades determinadas de los agregados	40
5.2.2. Geometría de las briquetas	42
5.2.3. Resistencia de las diferentes mezclas convencionales	44
5.3. ELABORACIÓN DE MEZCLA MODIFICADA CON GCR.....	45
5.3.1. Geometría Mezclas modificadas con GCR	45
5.3.2. Resistencia de las diferentes mezclas modificadas con GCR	47
6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	48
6.1. CUMPLIMIENTO DE LA NORMA INVIAS 2022	48
6.1.1. Agregado grueso	48
7. CONCLUSIONES.....	52
8. RECOMENDACIONES	54
9. GLOSARIO	55
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
ANEXOS	60

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Cantidad de neumáticos desechados por año de países con un alto flujo vehicular	9
Tabla 2. Conformación de las llantas	10
Tabla 3. Empresas nacionales dedicadas al reciclaje de GCR	10
Tabla 4. Descripción de cada uno de los materiales en el reconocimiento macroscópico	13
Tabla 5. Datos porcentajes para el ensayo de alargamiento	34
Tabla 6. Resultados de índice de alargamiento	34
Tabla 7. Datos porcentajes para el ensayo de aplanamiento	35
Tabla 8. Resultados de índice de aplanamiento	35
Tabla 9. Datos porcentajes para el ensayo de caras fracturadas	35
Tabla 10. Cálculos Micro-deval de arena	36
Tabla 11. Cálculos Micro-deval de arenilla	37
Tabla 12. Cálculos Micro-deval de grava	37
Tabla 13. Gravedad específica correspondiente a la grava	38
Tabla 14. Gravedad específica correspondiente a la arena	38
Tabla 15. Gravedad específica correspondiente a la arenilla	38
Tabla 16. Resultados de equivalente de arena en el agregado fino: Arena	39
Tabla 17. Resultados de equivalente de arena en el agregado fino: Arenilla	40
Tabla 18. Porcentaje de agregados en mezclas convencionales	40
Tabla 19. Masa de agregados para mezcla convencional	41
Tabla 20. Altura de las briquetas en mezcla convencional	42
Tabla 21. Diámetro de las briquetas en mezcla convencional	43
Tabla 22. Resultados estabilidad y flujo mezcla convencional	44
Tabla 23. Altura de briquetas de mezcla modificada	45
Tabla 24. Diámetro de briquetas de mezcla modificada	46
Tabla 25. Resultados del ensayo estabilidad y flujo, mezcla modificada ..	47
Tabla 26. Verificación norma caras fracturadas	48
Tabla 27. Comprobación norma microdeval	49
Tabla 28. Comprobación norma máquina de los ángeles	49
Tabla 29. Verificación norma 10% finos	50
Tabla 30. Comprobación norma equivalente de arena (Arena)	51
Tabla 31. Comprobación norma equivalente de arena (Arenilla)	51
Tabla 32. Masa mínima de la muestra de ensayo una vez obtenido el rechazo de partículas grandes y pequeñas	61
Tabla 33 Penetración según la naturaleza del agregado	66
Tabla 34. Granulometría de las muestras del ensayo máquina de los angeles	67

Tabla 35. Porcentajes obtenidos de Granulometría de Grava	70
Tabla 36. Porcentajes obtenidos de Granulometría de Arena	70
Tabla 37. Porcentajes obtenidos de Granulometría de Arenilla	71
Tabla 38. Alargamiento tamices 3/4 - 1/2	71
Tabla 39. Alargamiento tamices 1/2 - 3/8	72
Tabla 40. Alargamiento tamices 3/8 - 1/4	72
Tabla 41. Aplanamiento tamices 3/4 - 1/2	72
Tabla 42. Aplanamiento tamices 1/2 - 3/8	72
Tabla 43. Aplanamiento tamices 3/8 - 1/4	73
Tabla 44. Caras fracturadas tamices 3/4 - 1/2	73
Tabla 45. Caras fracturadas tamices 1/2 - 3/8	73
Tabla 46. Caras fracturadas tamices 3/8 - 1/4	74
Tabla 47. Datos iniciales de ensayo Micro-deval de arena	74
Tabla 48. Datos iniciales de ensayo MicroDeval de arenilla	75
Tabla 49. Datos iniciales de ensayo Micro-deval de grava	75
Tabla 50. Datos iniciales gravedad específica de grava	76
Tabla 51. Datos iniciales gravedad específica de arena	76
Tabla 52. Datos iniciales gravedad específica de arenilla	76
Tabla 53. Datos laboratorio 10% de finos	77
Tabla 54. Datos iniciales ensayo máquina de los ángeles	77
Tabla 55. Datos de equivalente de arena (Arena)	78
Tabla 56. Datos de equivalente de arena (Arenilla)	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Agregados gruesos	16
Figura 2. Agregado fino: Arena	17
Figura 3 Agregado fino: Arenilla	17
Figura 4. Cemento hidráulico	17
Figura 5. GCR	18
Figura 6. Material de carácter bituminoso	19
Figura 7. Tamices	19
Figura 8. Platos	20
Figura 9. Termómetro	20
Figura 10. Gato Hidráulico	21
Figura 11. Calibrador Pie de Rey Metálico digital	21
Figura 12. Balanzas de carácter digital	22
Figura 13. Baño Termostático	23
Figura 14. Equipo manual de compactación	23
Figura 15. Moldes de compactación de Briquetas de asfalto	24
Figura 16. Cabezote de estabilidad	24
Figura 17 Ficha técnica cemento hidráulico (llenante mineral)	60

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Curva de granulometría correspondiente a la Grava	32
Gráfica 2. Curva de granulometría correspondiente a la Arena	33
Gráfica 3. Curva de granulometría correspondiente a la Arenilla	33

RESUMEN

Las mezclas asfálticas consumen materiales pétreos no renovables en elevadas proporciones los cuales dan origen a consecuencias inalterables para el medio ambiente. Con base en investigaciones previas se abarca una alternativa de cambio que consiste en el uso del Grano de Caucho Reciclado (GCR), ya que presenta reducción en los mantenimientos y aumenta la durabilidad de las vías. Asimismo, brinda la opción de minimizar residuos provenientes de industrias nacionales e internacionales provenientes de las llantas en desuso.

Se da inicio a la investigación, realizando una revisión de antecedentes sobre la implementación del GCR, reconociendo las dosificaciones proyectadas para las mezclas densas en caliente tipo MDC-19 según las especificaciones INVIAS 2022 y así evaluar su óptima implementación con detalladas combinaciones de agregados pétreos procedentes de algunas canteras de Boyacá, resaltando en esta investigación la procedencia de los materiales y los beneficios en las propiedades adquiridas por las briquetas. Para ello se realizaron diferentes pruebas de caracterización de los materiales y de diseño de mezcla asfáltica en caliente como lo son estabilidad y flujo por medio de la metodología de Marshall, con el fin de analizar su desempeño contrastándolo con una mezcla asfáltica tradicional.

Además del análisis comparativo, se busca conocer si esta mezcla asfáltica modificada cumple con las condiciones mínimas dispuestas en las especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS 2022 y también brindarle al medio ambiente y al sector de infraestructura vial un impacto positivo.

Para ejecutar esta investigación, se diseñó una mezcla asfáltica modificada tipo MDC-19, sustituyendo porcentajes del 8, 12 y 16% del cemento asfáltico por GCR (granulometría de 2.00 mm). Posteriormente se evaluaron las mejoras mecánicas en cada briketa, estableciendo que el porcentaje ideal para trabajar es del 8%. Resaltando que se trabajó con la metodología Marshall, por fabricación en vía seca.

Palabras clave: Grano de caucho reciclado, MDC-19, pavimento, mezcla asfáltica, dosificación

ABSTRACT

Asphalt mixtures consume non-renewable stone materials in high proportions, which give rise to unalterable consequences for the environment. Based on previous research, an alternative for change is the use of recycled rubber granules (RCR), since it reduces maintenance and increases the durability of the roads. It also offers the option of minimizing waste from national and international industries coming from disused tires.

The research begins with a background review on the implementation of GCR, recognizing the projected dosages for hot dense mixes type MDC-19 according to INVIAS 2022 specifications and thus evaluating its optimal implementation with detailed combinations of stone aggregates from some quarries in Boyacá, highlighting in this research the origin of the materials and the benefits in the properties acquired by the briquettes. For this purpose, different material characterization and hot asphalt mix design tests were carried out, such as stability and flow by means of Marshall's methodology, in order to analyze its performance in comparison with a traditional asphalt mix.

In addition to the comparative analysis, the objective is to know if this modified asphalt mix complies with the minimum conditions set forth in the INVIAS 2022 general specifications for road construction and also to provide the environment and the road infrastructure sector with a positive impact.

To carry out this research, a modified asphalt mix type MDC-19 was designed, substituting 8, 12 and 16% percentages of asphalt cement with GCR (2.00 mm granulometry). Subsequently, the mechanical improvements in each briquette were evaluated, establishing that the ideal percentage to work with is 8%. It should be noted that we worked with the Marshall methodology, by dry manufacturing.

Keywords: recycled rubber grain, MDC-19, road surface, asphalt mixture, dosage.

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la evolución del hombre se hace más notoria y representativa la infraestructura vial, ya que gracias a esta se ha logrado promover el desarrollo de todo el país a nivel nacional e internacional en ámbitos socioeconómicos y progresivos de la misma.

Aunque en la actualidad se han presentado retrasos en la construcción, restauración y mejoramiento de la infraestructura vial; esto no sólo se debe al aspecto monetario, sino también a la elevada extracción de materiales no renovables, principalmente hallados en canteras y ríos. Por ende, se presentan afectaciones al ambiente (fauna y flora) y a la salubridad de la población.

Teniendo en cuenta la situación planteada anteriormente, se decidió buscar alternativas que brinden una mitigación a la afectación provocada, como es el caso de aquellos materiales que sus respectivos estudios brindaron la acción de impulsar y promover la reutilización de aquellos residuos manufacturados desechados debido a la finalización de su vida útil y los cuales presentan una degradación a largo plazo.

Por esto se planteó la fabricación de una nueva opción de mezcla asfáltica modificada con GCR, el cual presenta propiedades y características físicas y químicas óptimas para altos niveles de estabilidad, resistencia al ahuellamiento, densidad, entre otros. Para llevar a cabo la determinación de dosificación óptima se realizaron ensayos de laboratorio, definiendo las variaciones entre materiales y verificando que el nuevo diseño de mezcla asfáltica de cumplimiento con lo estipulado en las normas colombianas establecido por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS 2022).

Para lograr obtener la mezcla asfáltica modificada con GCR que dé cumplimiento a todos los parámetros establecidos por norma, se empezó con la determinación de dosificaciones por medio del estado del arte para tener una visión más precisa de la metodología y ensayos respectivos a trabajar. Definiendo los porcentajes de agregados óptimos para adicionar en cada briqueta y teniendo presente que se desarrolló la investigación con la metodología Marshall y por fabricación en vía seca.

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

La mezcla asfáltica para su fabricación implementa agregados pétreos en altas proporciones y material cementante de origen natural no reutilizables con consecuencias negativas para el ambiente como lo es el desequilibrio hídrico y estabilidad del suelo debido a los numerosos niveles de extracción que esta demanda. (Díaz & Castro, 2017)

Para este caso se va a trabajar con un material de desecho, concretamente con caucho adquirido de una empresa llamada Incoasfaltos ubicada en Cundinamarca, que posee una granulometría de 2.00 mm (tamiz No. 10), que puede ser reutilizado como agregado para mejorar la elaboración de asfalto y así reducir los altos niveles de acumulación de llantas en desuso. Estas son conocidas por ser una problemática a nivel mundial por sus aportes negativos al impacto ambiental que se genera a partir de su quema y puede llegar a tener una duración de meses e incluso años en su degradación. (Cruz Roja, 2021)

En Colombia, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial realizó un estudio, con el cual se encontró que alrededor de 190.500 toneladas de residuos anualmente se producen a partir del reciclaje de neumáticos, donde solo el 10% de este material se reutiliza y se presentan casos donde el 50% va a vertederos o el 40% se incineran y por ende generan serias afectaciones al ecosistema. (Díaz & Castro, 2017)

Como es mencionado anteriormente se quiere emplear el GCR para brindarles un segundo uso y así disminuir la cantidad de desechos acumulados, aportando de esta forma al progreso de la producción de este tipo de mezcla a partir de la valoración de las dosis óptimas a implementar en la elaboración de la mezcla, brindando la certeza de cumplir con los parámetros dados en las especificaciones generales de construcción de carreteras del INVIAS del año 2022.

1.2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuál es la dosificación óptima de GCR que se le puede añadir a los asfaltos, permitiendo la obtención de mezclas asfálticas con mejores condiciones de estabilidad y flujo según lo establecido por las especificaciones de construcción de vías?

1.3. JUSTIFICACIÓN

La fabricación de mezclas asfálticas permite modificarse parcialmente con elastómeros como el caucho, para este caso se trabajó con granulometría de 2mm (tamiz No. 10) procedente de Cundinamarca, el cual presenta cambios favorables a nivel de propiedades mecánicas, ciclo de vida productivo, oposición a la fatiga y reducción de grosores de las capas al igual que la formación de surcos en el pavimento. Uno de los mayores generadores de este es la industria automotriz, por no presentar un apropiado reciclaje. (Díaz & Castro, 2017)

Su ciclo de vida productivo se concentra en el uso vehicular, pero al culminar este, las llantas poseen distintos destinos como lo es el aprovechamiento energético, control y estabilización de taludes, plantación de árboles, en áreas deportivas, barreras en pistas de karts, etc. Pero como es de conocimiento general esta variedad de usos no mitigan ni el 50% de afectación al medio ambiente. Es por lo anterior que se ha empezado a profundizar en la reestructuración de las mezclas asfálticas con la integración de GCR.

Como se vino mencionando, las llantas aportan a la problemática ambiental ya que, más específicamente, se conocen como lugares de proliferación de mosquitos en época invernal, generan contaminación visual y están propensas a incendios por ser la alternativa más usada para deshacer estos objetos estimulando las emisiones de gases que impactan negativamente el sistema respiratorio. Con ayuda del libro de Botero, Valentín, Suárez, Santos, Acosta, Cáceres & Pando, (2005), se conocieron estimaciones de cifras de consumo que pasan los 1553 neumáticos por km/carril correspondiente a una capa de 5,08 cm de grosor de mezcla alterada con asfalto-caucho.

La Universidad de los Andes, (2002) menciona que el costo/eje (beneficio/costo) puede reducirse en un 20 y 57%, una vez se altera la mezcla por fabricación vía seca utilizando 1 y 2% de GCR respectivamente con relación al peso total de la mezcla. Además de presentar mayor duración y menor necesidad de mantenimiento Lee, Akisetty, & Amirkhanian, (2008).

Un aspecto a resaltar es que para esta investigación se implementaron materiales provenientes de canteras de Boyacá, para analizar por medio de los respectivos laboratorios si dan cumplimiento a los parámetros establecidos por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) y con esto tener el precedente de que los materiales encontrados brindan óptimas características para su implementación en carreteras. Para llevar a cabo este aspecto se realizará con la metodología de Marshall y fabricación por vía seca.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Establecer las dosificaciones óptimas de una Mezcla Densa en Caliente tipo MDC 19 fabricada con asfalto modificado con GCR con granulometría de 2 mm por vía seca y agregados pétreos de Boyacá para analizar su estabilidad y flujo frente a una mezcla convencional.

2.2. OBJETIVO ESPECIFICO

- Caracterizar los materiales constitutivos de una mezcla asfáltica en caliente tipo MDC 19 para determinar sus propiedades mecánicas.
- Determinar las propiedades de los materiales constitutivos de una mezcla asfáltica en caliente tipo MDC 19 con GCR para establecer su dosificación óptima.
- Realizar el análisis comparativo en función de la estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente tipo MDC 19 y las mezclas asfálticas con GCR para su implementación en los diferentes proyectos viales.

3. ESTADO DEL ARTE

En Colombia se producen grandes cantidades de desechos de llantas que culminaron su ciclo de vida y no poseen un correcto uso y en consecuencia de ello se incrementan los problemas ambientales, por tal razón se han tenido que adoptar alternativas que incentiven la reutilización para promoverlos en el ciclo productivo. Con relación a lo anterior, analizaron los efectos del GCR adicionado por vía seca por el método de Marshall MDC-12 de INVIAS 2013¹. Además, que con estas prácticas se busca mejorar aspectos como lo son el desarrollo de una región, garantizando la seguridad, comodidad y economía a los usuarios.

El ministerio de Transporte en el año 2017 dio a conocer que Colombia cuenta con, 205937 km de red vial, de la cual solo 15432, 4 km están pavimentados y el 47,3% de la red de carreteras se encuentra en estado de deterioro lo cual ocasiona menos tiempo en la vida útil.

Es por ello que las investigaciones han brindado la oportunidad de permitir mejoras en las propiedades mecánicas, ciclo de vida productivo y disminución en costos de reparaciones en las mezclas asfálticas con la adición de fibras sintéticas y otros. De esta manera se abre paso a nuevas especificaciones guía, que permitan establecer el uso del GCR. Con base en lo anterior y según los resultados obtenidos, presentan condiciones favorables a nivel del ahuellamiento con una adición del 0,5% de GCR, mientras que con un aumento de este las condiciones van desmejorando. (Higuera, Olarte & Soler, 2019)

Además de los estudios previos, existen otros que buscan implementan estos materiales de desecho, como un reemplazo del betún para la elaboración de un aglutinante modificado para la construcción de una mezcla de concreto bituminoso y con la ayuda del método de Marshall realizar pruebas de optimización con desechos plásticos y caucho triturado. Estas soluciones

¹ Se trabajó con la transición de normas ya que esta investigación se aprobó con especificaciones de construcción INVIAS 2013, pero a nivel de análisis y resultados se contrastó con las especificaciones de construcción INVIAS 2022 que fue expedida el 6 de mayo del año 2022.

empezaron a tener trascendencia debido a las exponenciales tasas de crecimiento que se están presentando en los últimos años, acompañado de un gran impacto a bienes y recursos ambientales, no solo de sustento sino también infraestructura para movilidad, lo que incrementan residuos no biodegradables. (Bansal, Kumar & Bajpai., 2017)

En consecuencia, al no tener previstos estos crecimientos, la infraestructura vial esa dando visibilidad a grietas transversales y longitudinales, baches y deformaciones en la sub rasante en el pavimento flexible. En los estudios realizados se observó que al mezclar el GCR con betún, se obtiene una mejor resistencia, durabilidad e impermeabilización. Como resultado de las pruebas establecidas contribuyen a mejorar resistencia, además de aumentar la densidad, lo que contribuye a la construcción de las carreteras y optimización de costos. (Bansal, Kumar & Bajpai., 2017)

Así como en las anteriores investigaciones presentadas, en Bogotá, Colombia, se está planteando implementar esta estrategia del GCR para el mejoramiento de la malla vial, debido a que la obtención del caucho es viable y económica, contando que previamente deben ser molidas para obtener los tamaños que brinden aspectos de calidad óptima. Además, que según estadísticas del ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial (2010), para el año de 1999 se obtuvieron 1.981.375 de llantas en desuso solo para Bogotá, mientras que para el año 2010 se estimaron 2.642.938 de llantas desechadas. Esto de la mano con la producción de las mismas, cada llanta consume en promedio medio barril de petróleo crudo y por ende en su fin de la vida útil producen elevadas emisiones de CO₂.

Botero (2005), estima un consumo de 1153 neumáticos por km/carril correspondiente a una capa de 5,08 cm de espesor de mezcla asfáltica alterada con GCR. Sumándole que según el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) y la Universidad de Los Andes (2002), menciona que el costo/eje se disminuiría sus cifras en un 20 y 57% si se altera por vía seca al 1 y 2% de GCR con relación al peso de la mezcla. Según los datos recolectados se considera más confiable realizar el proceso vía húmeda y no seca, pero en ambas condiciones el comportamiento mecánico de los pavimentos mejora, además que la implementación disminuye costos y presenta más vida útil. (Díaz & Castro, 2017)

Como se puede evidenciar existe una diversa búsqueda de estrategias que implementen el GCR, pero en algunas oportunidades las investigaciones optan por realizar combinaciones para optimizar resultados como es el caso de una

investigación que se realizó en la USTA TUNJA donde se implementó la Escoria negra de horno de arco eléctrico (EAF) y el GCR debido a que se presentan grandes cantidades al ser desechados. Para esta, implementaron la metodología de Marshall para analizar el funcionamiento mecánico de una mezcla asfáltica convencional a una modificada. (Guerra & Peña, 2021)

Para este caso realizaron variaciones donde en algunas era 90% betún y 10% GCR, a nivel de agregados gruesos las variaciones que trabajaron fueron 25%, 50%, 75% y 100% de EAF; y de esta manera evaluar el impacto al medio ambiente, a la infraestructura y cumplimiento con las especificaciones. Para el caso específico del GCR este se conoce como elastómero y puede modificar en las mezclas asfálticas de manera parcial el asfalto, lo cual permite evidenciar mejoras a nivel de propiedades mecánicas, ciclo de vida, oposición a la fatiga, descenso de espesores de las capas. (Guerra & Peña, 2021)

Con los resultados obtenidos dio un favorable resultado al incorporar la EAF (como agregado grueso) y el GCR (alternativa de cambio del cemento asfáltico), en las mezclas densas en caliente tipo MDC 19, presentando mejoras frente a la mezcla convencional y modificadas con porcentajes de 25, 50, 75 y 100 de EAF. (Guerra & Peña, 2021)

En Colombia, aunque no se presenta de manera solida la implementación del GCR, a nivel nacional se evidencian estudios que aportan beneficios para implementarlo. Es por eso que en Manizales Caldas se realizó una investigación por parte de la universidad Nacional a ciertos segmentos de pavimento flexible donde las mezclas asfálticas son fabricadas con ligantes convencionales y alteradas con GCR de neumáticos, para ello analizaron un índice de condición del pavimento y la apreciación de afectación por tráfico pesado. Además, tuvieron en cuenta que el GCR posee virtud de modificar el reestructurar el ligante asfáltico debido a que altera las propiedades del concreto asfáltico. Según Papagiannakis & Loughheed (1995), la respuesta de partículas de caucho y ligante no es de rasgos químico, sino que se debe a una propagación que integra la atracción de los aceites aromáticos del cemento asfáltico y las cadenas poliméricas del caucho.

Con base en lo que respecta a las pruebas realizadas se pueden observar incrementos a nivel de viscosidad, reciclaje, reducciones en ahuellamiento, agrietamiento, endurecimiento, entre otras. Pero, así como se evidencian ventajas también se encuentran algunas desventajas a nivel de incremento de costos del ligante, dificultades de manejo, reducción de estabilidad entre otros;

ya que un incremento en viscosidad representa más flexibilidad con menores temperaturas y menos plasticidad con mayores temperaturas. Esto otorga menores espesores de capas asfálticas, mejores resistencias al fisuramiento provocado por fatiga y previene el ahuellamiento a altas temperaturas. (Arbeláez, 2015)

Existen en Colombia dos plantas de fabricación de asfalto modificado con GCR, una es Incoasfaltos (Mosquera, Cundinamarca) y Manufacturas y Procesos Industriales Ltda. -MPI- (Barrancabermeja, Santander). Se obtuvieron resultados donde se hace explícito los incrementos hasta el 46,26% en costos. (Arbeláez, 2015)

Así como hay investigaciones también hay algunas especificaciones técnicas propuestas por el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) para los años 2011 y 2018, las cuales tenían contempladas aplicarlas para el 2020, estas las desarrollaron a nivel de prefactibilidad y los proyectos para conservar una infraestructura vial óptima y espacios públicos seguros en Bogotá. Además, tiene presente el nombramiento de los cementos asfálticos en las ET-2011 para expedir el certificado y fechas de elaboración, agregando los ensayos de calidad y el ordenamiento por penetración. (SUBDIRECCION GENERAL DE DESARROLLO URBANO, 2015)

Otro aspecto que se tiene en cuenta es el tema de agregados gruesos y finos para mezclas asfálticas, teniendo presente que en Especificaciones Técnicas ET-2018 eliminaron el análisis petrográfico y el de solidez de sulfatos, los ensayos de dureza de ET-2011 permanecen en el ET-2018, a nivel de agregados gruesos en el ET-2018 se anexo un ensayo para medir limpieza del agregado, aplicando la norma INV-E.237-13.

Se hace claro que en Colombia ya se ha puesto en práctica la implementación del GCR para poner fin a los problemas mecánicos presentes en los pavimentos y el impacto ambiental. Así como en los beneficios previamente mencionados, estos forman las bases para incrementar el conocimiento de este e incentivar que más academias propongan opciones para la implementación del GCR. Esta búsqueda de información se sintetiza en brindar aspectos llamativos al tema de reciclaje como lo es la segunda oportunidad de vida del caucho de las llantas y neumáticos.

Tabla 1. Cantidad de neumáticos desechados por año de países con un alto flujo vehicular

PAIS	CANTIDAD DE NEUMATICOS DESECHADOS POR AÑO
EE. UU	300'000.000
Puerto Rico	Un neumático por Hab/año
Brasil	30'000.000
México	25'000.000
China	80'000.000

Fuente: Quintana & Fredy Alberto Reyes Lizcano, (2015) Asfaltos Modificados con Caucho, Estudio de su Aplicación en Colombia

A partir de las investigaciones mencionadas, se aprecia que el impacto que generan las llantas y neumáticos en desuso es negativo para el ambiente ya que son almacenadas e incineradas a cielo abierto sin tecnología adecuada y sin sistemas de filtrado para disminuir gases que llegan a la atmosfera. Teniendo presente el mejoramiento de cualidades como rigidez y resistencia bajo carga, para fines de disminución de fatiga, ahuellamiento, envejecimiento y susceptibilidad térmica.

El cemento asfáltico se conoce como un material visco-elasto-plástico que esto hace referencia a su dependencia en cuanto a temperatura y frecuencia de exposición a cargas de tránsito, con deformaciones retornables (elástica) y no retornables (plásticas).

El GCR al presentar sus beneficios en la infraestructura vial, está disminuyendo la necesidad de explotar nuevas canteras. Los cauchos de origen natural brindan propiedades elásticas, entre tanto los sintéticos brindan buena estabilidad térmica. El IDU en la resolución 6981 de 2011, lo precisa como un producto obtenido de un proceso de desintegración de llantas y neumáticos en desuso, que no poseen materiales ferromagnéticos, textiles y/o elementos peligrosos para el medio ambiente. (SUBDIRECCION GENERAL DE DESARROLLO URBANO, 2015)

Para el año 2018 la composición de sus llantas va dependiendo del tipo de uso que se les vaya a dar, ya que varía a nivel de resistencia de carga, a la alta

presión, adherencia y demás: Algunos ejemplos de composición se evidencian en la siguiente tabla:

Tabla 2. Conformación de las llantas

CONFORMACIÓN TÍPICA DE LAS LLANTAS RADIALES		
Material	Conformación %	
	Automóviles	Camiones
Caucho Natural	14	27
Caucho Sintético	27	14
Negro de Humo	28	28
Acero	14	15
Antioxidantes y rellenos	17	16

Fuente: (Oscar Mauricio Vargas Bayona, 2013)

Para llevar a cabo la implementación del GCR, se encontraron empresas colombianas consagradas al reciclaje de llantas y mercantilización del GCR, que se pueden encontrar a continuación:

Tabla 3. Empresas nacionales dedicadas al reciclaje de GCR

Nombre de la empresa	Logo	Responsabilidades que poseen a cargo
BLUE DROP		Contribuye a proteger el medio ambiente brindando productos ecológicos, su producción es de pavimentos drenantes ecológicos que son base del GCR. Se encuentra ubicada en Bogotá.

CORPAUL		Se encarga de trasladar y triturar llantas en desuso, separando el caucho, acero y fibra. Posteriormente se comercializa y se reincorpora a un sistema productivo. Se encuentra ubicada en Yumbo-Valle.
MUNDO LIMPIO		Se encarga de investigar, transformar, producir y comercializar con ayuda de tecnología cuya finalidad es la readaptación de residuos contaminantes. Triturando llantas para extraer materia prima. Se encuentra en Medellín, Antioquia.
GCR SOLUCIONES		Se ocupa de la separación de componentes esenciales de los neumáticos como acero, nylon y GCR, de este modo suministrar y comercializar. Su ubicación está en el km 23 vía Madrid Cundinamarca.
REACECOL GREEN		Se dedica a reciclar toda clase de plástico, especialmente de llantas en desuso. Se encuentra ubicada en Valle del Cauca.
OCCIDENTAL DE CAUCHOS		Se encarga de triturar llantas y neumáticos y además comercializa GCR. Está ubicada en Yumbo-Valle.
GERCONS COLOMBIA		Es una de las empresas más conocidas en Colombia, por su producción de GCR, ya que recicla y también fabrica maquinaria para el procesamiento de llantas. Se encuentra ubicada en Bogotá.

Fuente: Osorio, 2018

El IDU que dio paso a la implementación de material reciclado en carreteras de Colombia, a partir del 2003 cuando se realizaron los estudios piloto y gracias a esto en las normativas se precisa la aplicación de un mínimo del 5% de la muestra en la totalidad de la vía. Aunque es un material beneficioso para la alteración de mezclas asfálticas por las mejoras mecánicas que otorga, aún no se encuentra en total viabilidad, debido a la carencia de sostenibilidad de provecho del material. (Osorio, 2018)

Entrado un poco más en enfoque a nivel de conformación de los agregados pétreos, están formados por materiales granulares sólidos naturales o que son obtenidos por medio de un previo proceso de trituración de diversas rocas en granulometrías adecuadas, que se emplean con o sin adición de elementos activos. Los agregados son factores importantes de las obras civiles, y debido a eso es de manera muy importante hacerles estudios de sus propiedades a nivel físico-mecánicas como mineralógicas con el fin de obtener una aplicación eficiente.

Una de las características a tener en cuenta es la durabilidad que es conocida como la capacidad de las partículas individuales de conservar su integridad y no sufrir cambios que puedan alterar de manera negativa sus propiedades. Los agregados trazan un papel primordial en la economía, durabilidad y estabilidad, un ejemplo de esto es que en el caso específico de pavimentos ocupan un volumen entre el 75% y el 90%. Además, se tiene presente las características de las partículas en orden de forma, textura superficial, tamaño, porosidad y mineralógica, ya que de esta manera se podrá hacer un comparativo entre las canteras que proporcionan dichos agregados.

Esta investigación tuvo como objetivo estudiar características mineralógicas y físico- mecánicas de los agregados pétreos tomados de canteras ubicadas en Boyacá como son la de San Vicente, Pie Blanco y Santa Lucia, para de esta manera garantizar una excelente calidad y resistencia de los materiales. También brinda herramientas que ayudaran a reconocer con mayor facilidad la composición mineralógica, textura y estructuras para su control y diagnóstico, previniendo patologías que alteren el comportamiento ya sea de estructuras o pavimentos convencionales construidas en Boyacá. Algunos de los elementos seleccionados para estudiar fueron arena de peña y arena lavada adquiridas de la mina San Vicente (vía Tunja- Villa Pinzón), el triturado de $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{4}$ " de la cantera Santa Lucia (suroccidente de Cucaita) y la cantera Pie Blanco (Vereda la Bolsa, vía Paipa a Tunja). (Cubides, Molano, Becerra, & Bernal, 2020)

Boyacá contiene 6 grupos lito estratigráficos, 69 formaciones constituidas por rocas sedimentarias, de las cuales 4 son rocas sedimentarias y 4 rocas metamórficas. 1 macizo ígneo y 3 pequeños intrusivos. En donde se puede evidenciar que los agregados finos pertenecen a la Formación Labor y Tierna, los agregados gruesos de la cantera Santa Lucía pertenece a la Formación Conejo y el Pie Blanco pertenece a la formación Tilatá.

Las canteras de donde se obtuvieron los materiales se desenvuelven en las áreas de extracción, beneficio y comercialización de agregados pétreos, como lo son gravillas, bases y sub –bases granulares, filtros-afirmados y recebos. Uno de los análisis realizados fue en análisis macroscópico con el cual apreciaron agregados provenientes de roca arenisca con alto contenido de cuarzo presentando una dureza de 7 (muy duro) según la escala de Mohs.

Tabla 4. Descripción de cada uno de los materiales en el reconocimiento macroscópico

MATERIAL	COMPOSICIÓN MINERALÓGICA	SELECCIÓN	COLOR	FORMA	TAMAÑO
Arena Lavada	Compuestos de cuarzo como mineral esencial	Bien seleccionada	Van de colores blancos y amarillento, sin restos de oxidación.	Granos subredondeados	No existe variedad de tamaños
Arena de peña	Compuestos de cuarzo y fragmentos líticos	No se encuentran bien seleccionadas	Los granos de cuarzo no presentan oxidación y son traslucidos, amarillentos y marrones.	Granos subredondeados	Los sedimentos presentan dispersión de tamaños
Triturado de ½" y ¾" Cantera Santa Lucía (CSL)	Restos de rocas detríticas (areniscas) y químicas (calizas)	No se encuentran bien seleccionadas	Van de blanco a gris y algunos negros, con presencia de óxido de hierro	Granos redondeados entre subanguloso ha redondeado	Al encontrar diversidad de tamaños y se definió que para ½" estaban entre 1,6 cm a 2,3 cm y para ¾"

Triturado de ½" y ¾"	Compuesta por cristales de cuarzo, restos de mosco villa y fragmentos líticos.	No se encuentran bien seleccionadas	Van de blanco a gris y de amarillo a verde y algunos con presencia de óxido de hierro	Visibilidad de diversos grados de redondez, de angulares a subred ondeados	entre 2,6 cm a 3,4 cm Los fragmentos de ½" estaban entre 1,5 y 2,2 cm y de ¾" estaban entre 2,5 y 3,1 cm
----------------------	--	-------------------------------------	---	--	---

Fuente: Cubides, Molano, Becerra & Bernal, 2020

Una vez realizada la caracterización geotécnica y mineralógica de los materiales finos (arena lavada y arena de peña) de la mina San Vicente y los agregados gruesos (gravas) triturados de ½" y ¾" de Cantera Santa Lucia y cantera Pie Blanco, recomiendan implementar la arena de peña (AP) en pañetes, baldosines, morteros de pega y acabados interiores, así como estructuras convencionales tipo viviendas y edificios. A nivel de arena lavada (AL) recomiendan implementarlas en concretos como en pavimentos, además proporciona mejor manejabilidad y en pavimentos convenciones a nivel de afirmados, bases y subbases, lo cual representa una composición homogénea, una selección adecuada y un alto contenido de cuarzo que ofrece óptimas resistencias y comportamientos de las capas de pavimento. (Cubides, Molano, Becerra, & Bernal, 2020)

A nivel de gravas de CSL y CPB cumplen los parámetros de calidad para utilizarlas en la construcción de concreto y pavimentos convencionales en función de la base y subbase granular mas no en capas de afirmado debido a que su granulometría no da cumplimiento con los parámetros permitidos estipulados por el INVIAS, dado que al tener partículas muy grandes al momento de compactarse generan mayor relación de vacío, provocando que las características de resistencia y deformabilidad no se logren de manera óptima. La CPB presenta granos de medio fractura miento intergranular y la CSL presenta bajo fractura miento intergranular, por ende, la CPB presenta mayor pérdida de resistencia y demuestra un comportamiento menos favorable ocasionando disgregación en las partículas de los agregados. (Cubides, Molano, Becerra, & Bernal, 2020)

Aunque no se obtuvo un comportamiento óptimo, encontraron minerales favorables como lo es el caso de la CPB (minerales de cuarzo, moscovita, fragmentos líticos y carbonatos de calcio) y CSL (minerales de cuarzo, calcita, óxidos de hierro y fragmentos líticos), demostrando que a nivel físico-mecánicos y mineralógico para la construcción satisfacen los estándares de calidad y obtener buenos niveles de compactación, resistencia y durabilidad. (Cubides, Molano, Becerra, & Bernal, 2020)

En el caso de la arena lavada al estar constituida por cuarzo brinda un óptimo uso a nivel de mezclas de concreto y carpetas de pavimentos convencionales de afirmado, subbases y granular, pero teniendo muy presente el control de agua del agregado y de la mezcla para prevenir una reacción álcali- sílice. (Cubides, Molano, Becerra, & Bernal, 2020)

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. MATERIALES

4.1.1. Agregado grueso

El agregado grueso estará conformado por trituración de roca de tamaño grava y gravilla. Este debe estar completamente libre de polvo, tierra, arcilla y/o demás sustancias que lleguen a dificultar la adherencia al asfalto (ver fig. 1).

Figura 1. Agregados gruesos



Fuente: elaboración propia

4.1.2. Agregado fino

Está conformado por arena de grano duro, limpio y de superficie angular y rugosa. Al igual que con el agregado grueso, este debe estar limpio de cualquier elemento que dificulte la adhesión con el asfalto (ver fig. 2). También se tiene otro agregado que es conocido como arenilla que posee una granulometría menor a los 4,76 mm correspondientes al tamiz No.4, se integra a nivel de material llenante de mezclas asfálticas y brinda buen comportamiento en el acabado final (ver fig. 3).

Figura 2. Agregado fino: Arena



Fuente: elaboración propia

Figura 3 Agregado fino: Arenilla



Fuente: elaboración propia

4.1.3. Llenante mineral

A nivel de llenante mineral, o filler, se utilizó cemento hidráulico Oriente, este material presenta partículas de tamaños inferiores a $75\ \mu\text{m}$ y no contiene sustancias que impidan la adherencia del asfalto. (ANEXO 1)

Figura 4. Cemento hidráulico



Fuente: Arqhys.com y autores

4.1.4. Grano de caucho (GCR)

El GCR está conformado por partículas de caucho, las cuales son extraídas de llantas o neumáticos reciclados por medio del proceso de vulcanización. Para este caso se trabajó con GCR adquirido de una empresa llamada Incoasfaltos ubicada en Cundinamarca, que posee una granulometría de 2.00 mm (retiene tamiz No. 10).

Figura 5. GCR



Fuente: elaboración propia

4.1.5. Material de carácter bituminoso

Se estableció trabajar para esta investigación el cemento asfáltico tipo CA 60-70, el cual fue adquirido de la empresa Tecniafaltos.

Figura 6. Material de carácter bituminoso



Fuente: elaboración propia

4.1.6. Tamices

Las mallas o tamices son objetos metálicos utilizados para separar los granos en porciones según el tamaño y de esta manera establecer las distribuciones de tamaño de partícula. Las mallas o tamices generalmente se emplean en tamaños que pueden desde pulgada y media que son los materiales más gruesos hasta número 200 siendo estas partículas muy finas.

Figura 7. Tamices



Fuente: elaboración propia

4.1.7. Platón

Plato grande, hondo o plano que se usa para colocar los materiales a trabajar en los diversos ensayos de laboratorio, en su mayoría son elaborados con metal para de esta manera ser más resistentes.

Figura 8. Platones



Fuente: elaboración propia

4.1.8. Termómetro

Es un objeto que mide por medio de la perforación y con ayuda del sensor de temperatura (acero inoxidable) en el asfalto. Beneficia al proceso para controlar la temperatura cuando se coloca el cemento asfáltico

Figura 9. Termómetro



Fuente: elaboración propia

4.1.9. Gato Hidráulico

Este trabaja con aceite y se trabaja por medio de una palanca, lo que posibilita que una persona puede levantar 300 veces más del esfuerzo que se hace, lo inmediatamente anterior varía dependiendo del modelo. Para este caso se implementó un BIG RED T92007A Torin, que fue elaborado con aleación de acero y posee una capacidad de carga de 20 Ton.

Figura 10. Gato Hidráulico



Fuente: elaboración propia

4.1.10. Calibrador Pie de Rey Metálico digital

Este calibrados permite por medio de piezas especiales medir dimensiones internas y profundidades, tanto en la parte superior como en su extremo. Además, brinda dos escalas, la inferior en milímetros y la superior en pulgadas.

Figura 11. Calibrador Pie de Rey Metálico digital



Fuente: elaboración propia

4.1.11. Balanzas de carácter digital

Son herramientas de pesaje que emplean la gravedad para de manera más precisa establecer la masa del objeto. Conformada por un solo receptor de carga (plato) en el cual se posiciona el objeto a pesar.

Figura 12. Balanzas de carácter digital



Fuente: elaboración propia

4.1.12. Baño Termostático

Se utilizan para realizarle el correspondiente Baño María a las briquetas de asfalto en el ensayo Marshall.

Figura 13. Baño Termostático



Fuente: elaboración propia

4.1.13. Equipo manual de compactación

Este equipo brinda la certeza de una buena compactación de los agregados para la correcta elaboración de las briquetas, ya que aporta a una mejor resistencia mecánica, cabe resaltar que este no posee un sujetador para el martillo. Este equipo es conformado por un martillo compactador, una base metálica para el molde y un pedestal de madera.

Figura 14. Equipo manual de compactación



Fuente: elaboración propia

4.1.14. Moldes de compactación de Briquetas de asfalto

Molde metálico para compactar briquetas de asfalto Marshall. Posee un diámetro de 4", incluye collar y base estacionaria.

Figura 15. Moldes de compactación de Briquetas de asfalto



Fuente: elaboración propia

4.1.15. Cabezote de estabilidad

El cabezote de estabilidad brinda la oportunidad de establecer la estabilidad Marshall y el flujo en las mezclas asfálticas, en briquetas con diámetro de 4".

Figura 16. Cabezote de estabilidad



Fuente: elaboración propia

4.1.16. Cocineta

Funciona con gas y aporta a la elaboración de las briquetas, brindando el calor suficiente para lograr una correcta integración de los agregados con el cemento asfáltico.

4.1.17. Espátulas

Son herramientas portátiles de laboratorio, que brindan distintos tamaños y formas. Son diseñadas para quebrar, raspar, reunir y transferir productos químicos sólidos ya sean en polvo, granulares u otra presentación, de los frascos de almacenamiento a otros contenedores, como pueden ser platos de pesaje.

4.1.18. Horno

El horno se emplea para el secado de muestras y para el calentamiento de estas, además ayuda a un eficiente secado de los instrumentos.

4.1.19. Costales de lona y fibra

Son envases que poseen forma de bolsa rectangular con abertura en un extremo, tejido con cintas de polipropileno virgen, se pueden adquirir en diferentes tamaños y gramajes. Ayudan a empacar diversos productos y son muy adquiridos por su alta resistencia y fácil manejo.

4.2. METODOS

4.2.1. Caracterización del material pétreo

4.2.1.1. Análisis Granulométrico de los agregados grueso y fino (INV E-213-13)

Permite conocer la distribución y cantidad proporcionada por el material, de acuerdo a los distintos tamaños de granos correspondientes a los sedimentos y partículas que conforman la muestra.

Además, reduce una porción de la muestra por cuarteo a un tamaño pertinente para el ensayo. Al ya haber realizado el cuarteo, la muestra se lava y se seca a una temperatura de 110°C hasta obtener masa constante. Posteriormente al secado se debe obtener una masa de 2000 gramos de partículas de ½" (agregado grueso) y se procede a tamizar. (Anexo 2)

4.2.1.2. Índices de Aplanamiento y de Alargamiento de los Agregados para Carreteras (INV E 230-13)

Es fundamental ya que la influencia que poseen las partículas del material en las propiedades del concreto posee efectos notables a nivel de acabado, calidad, trabajabilidad, consistencia. Puesto que si el material no cumple y quedan partículas planas en superficie impiden la exudación del agua del mortero provocando deterioro de la superficie y reducción de durabilidad.

Se reparte la muestra en fracciones cernidas en un calibrador de espesores, la que pase se considera plana, mientras que a nivel de índice de alargamiento se emplea un calibrador de longitudes y aquellas partículas que se retenga se catalogan como alargadas. (Anexo 3)

$$\text{Alargamiento } IL_i = \frac{W_{largas}}{W_{total}}$$

$$\text{Aplanamiento } IA_i = \frac{W_{plana}}{W_{total}}$$

4.2.1.3. Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso (INV E 227-13)

Se implementa para caracterizar materiales ya que al presentarse un alto porcentaje de caras fracturadas indica una mayor fricción, por ende, dicho rugosidad entre partículas genera mayor resistencia incrementando la fricción entre partículas mientras que si es redondeado y liso se clasifica como malo.

Para la elaboración del ensayo el agregado debe estar seco y tamizado por el tamiz No.4 para así separar el material fino del grueso, y se realiza la pertinente separación realizando conteo del número de partículas por medio de inspección visual en los rangos dados en la especificación. (Anexo 4)

$$P = \frac{F}{F + N} * 100$$

Donde:

P: Porcentaje de partículas con la cantidad detallada de caras Fracturadas;

F: Masa de partículas fracturadas con la respectiva cantidad de caras fracturadas establecidos.

N: Masa partículas de origen no fracturado, que no cumplen con los parámetros de partículas de carácter fracturado.

4.2.1.4. Determinación de la Resistencia del Agregado Grueso a la Degradación por Abrasión, utilizando el aparato de Micro-deval (INV E 238-13)

Tiene como finalidad determinar la pérdida por abrasión de los agregados gruesos en presencia de agua y de una carga abrasiva. Cabe resaltar que varios agregados son más débiles en estado húmedo que seco, y al incorporar agua se reduce la resistencia. Brinda el resultado necesario para estimar la resistencia (tenacidad/abrasión).

Se basa en sumergir una muestra con granulometría normalizada y una carga abrasiva de 5000 g en un recipiente de acero, el cual posee una rotación de 100 rpm por un periodo máximo de 2 horas (dependiendo del tamaño de partículas).

Para catalogar la pérdida esta es correspondiente a la cantidad de material que pase el tamiz No. 16. (Anexo 5)

$$\%perdidas = \frac{A - B}{A} * 100$$

Donde:

A = muestra total.

B = muestra secada en el horno al final.

4.2.1.5. Densidad, Densidad Relativa (Gravedad específica) y Absorción del agregado fino y grueso (INV E 222-13 e INV E-223-13)

Se emplea para calcular el volumen ocupado por el agregado en mezclas como las de concreto asfáltico y otras que se analizan sobre la base de un volumen absoluto. Además, establece la densidad objetivo para las operaciones de compactación, así como la cantidad de betún absorbido por medio de la porosidad de las partículas agregadas a nivel individual.

Si el porcentaje de huecos de aire es demasiado bajo, se originan surcos en el pavimento en uso. Si por el contrario el porcentaje es muy alto, el pavimento estará propenso a daños por humedad, disminuyendo fuerza y vida útil.

Consta en saturar la muestra durante 24 horas para de esta manera llenar sus poros. Luego las partículas se secan de manera superficial para obtener el volumen de la muestra. Posteriormente con los resultados adquiridos se calcula la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado. (Anexo 6)

$$Gs \text{ Secado al horno } (SH) = \frac{A}{B - C}$$

$$Gs \text{ saturada y superficialmente seca } (SSS) = \frac{B}{B - C}$$

$$Gs \text{ Aparente} = \frac{A}{A - C}$$

Donde:

A: Masa de la muestra secada en el horno, g;

B: Masa de la muestra saturada y superficialmente seca, g;

C: Masa aparente de la muestra saturada en agua, g.

4.2.1.6. Determinación del valor de 10% de finos (INV E 224-13)

Los materiales granulares que conforman los pavimentos asfálticos constantemente son sometidos a esfuerzos interparticulares a causa de la acción de las cargas del tránsito. Cada capa de pavimento cumple la función de soportar los esfuerzos recibidos y disiparlos para transmitirlos en magnitudes apropiadas a las capas subyacentes.

Por lo tanto, los materiales de cada capa deben soportar los esfuerzos recibidos sin desintegrarse. Además, contribuye a evaluar el comportamiento de un agregado pétreo al ser sometido a degradación mecánica.

El procedimiento comienza con la compactación de una muestra de agregado, la cual es sometida a golpes con una varilla. Una vez compactada se empieza a someter a esfuerzo de compresión lo cual da paso a una fragmentación (resistencia al aplastamiento) del agregado, posteriormente se tamiza por el tamiz No.8 y se determina la compresión. Esto con el objetivo de definir la carga a la cual se genera en el agregado un 10% finos. (Anexo 7)

$$F = \frac{14f}{m + 4}$$

Donde:

f: Fuerza máxima, kN;

m: Porcentaje de material pasante del tamiz de 2.36 mm a la fuerza máxima

4.2.1.7. Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1½") por medio de la máquina de los ángeles (INV E 218-13)

Es un indicador de calidad relativa de diversas fuentes de agregados pétreos de parecidas composiciones mineralógicas. Cabe resaltar que no brinda un resultado directamente válido y los límites se deben asignarse con prevención, teniendo presentes los agregados a incorporar y su comportamiento a través del tiempo en aplicaciones específicas.

La muestra a implementar se reduce por cuarteo, se lava y seca a una temperatura de 110°C hasta obtener masa constante para obtener masa constante y posteriormente introducirla en un tambor rotatorio a 500 rpm por 16 minutos, este ensayo integra acciones como abrasión, impacto, y molienda en el interior de un tambor de acero rotatorio que incluye un número determinado de esferas metálicas (depende de la granulometría de la muestra de ensayo). Una vez culminado el tiempo se tamiza la muestra por el tamiz No. 12 y nuevamente se lava y seca a una temperatura de 110°C para obtener masa constante y medir la degradación y establecer el porcentaje de pérdida. (Anexo 8)

$$\%perdidas = \frac{P_1 - P_2}{P_1} * 100$$

Donde:

P1: Masa de la muestra seca previa al ensayo, g;

P2: Masa de la muestra seca posterior al ensayo, g. Con previo lavado sobre el tamiz de 1.70 mm (No. 12).

4.2.1.8. Equivalente de arena de suelos y agregados finos (INV E 133-13)

Se encarga de asignar un valor empírico a la cantidad relativa, finura y carácter del material arcilloso, presente en una muestra de suelo. El cual especifica un valor mínimo de equivalente de arena para limitar la cantidad de finos nocivos en el agregado.

Se basa en añadir una pequeña cantidad de solución floculante al agregado fino vertiendo esto en un cilindro graduado para ser agitado y así forzar al material arcilloso a quedar suspendido sobre la arena. Posterior al periodo de sedimentación se establecen las alturas del material arcilloso y arena. (Anexo 9)

$$EA = \frac{Arena}{Arcilla}$$

5. RESULTADOS

La investigación que se planteó para la formulación de este trabajo fue investigación aplicada ya que, se basa en fomentar bases sólidas de conocimiento por medio de la ejecución directa a problemas que abarcan la sociedad y sectores productivos. Teniendo de apoyo el análisis de los datos cuantitativos administrados por la parte experimental que relaciona todas aquellas pruebas de laboratorio elaboradas en el transcurso del trabajo.

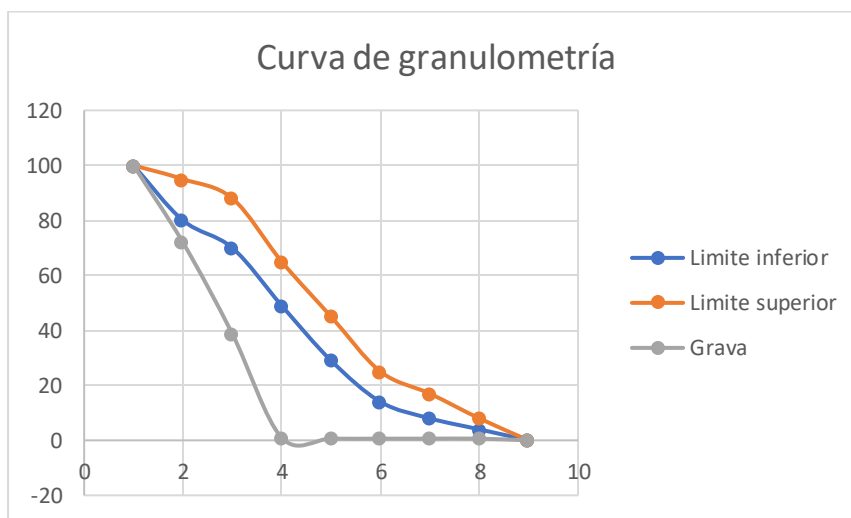
5.1. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL PÉTREO

5.1.1. Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino (INV E-213-13) (Anexo 10)

Los límites inferiores y superiores presentes en las siguientes gráficas son los establecidos por las especificaciones del INVIAS 2022.

5.1.1.1. Granulometría Grava

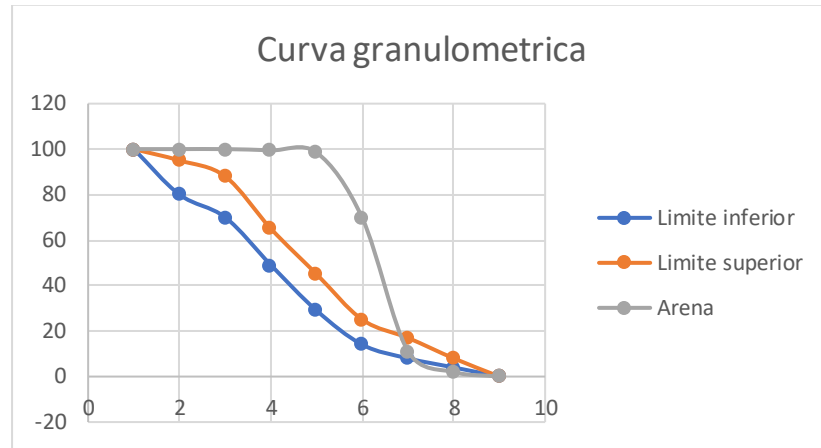
Gráfica 1. Curva de granulometría correspondiente a la Grava



Fuente: elaboración propia

5.1.1.2. Granulometría Arena

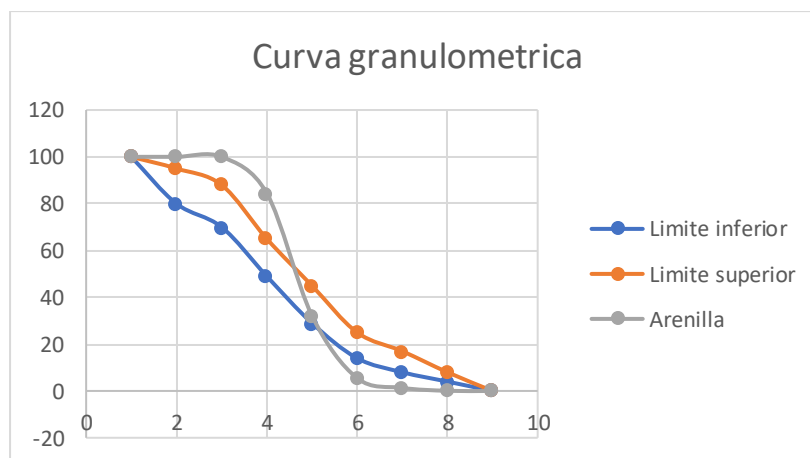
Gráfica 2. Curva de granulometría correspondiente a la Arena



Fuente: elaboración propia

5.1.1.3. Granulometría Arenilla

Gráfica 3. Curva de granulometría correspondiente a la Arenilla



Fuente: elaboración propia

5.1.2. Índices de Aplanamiento y de Alargamiento de los Agregados para Carreteras (INV E 230-13) (Anexo 11)

5.1.2.1. Alargamiento

Tabla 5. Datos porcentajes para el ensayo de alargamiento

Tamiz pasa	Tamiz retiene	Wmuestra (g)
3/4	1/2	349,9
1/2	3/8	383,5
3/8	1/4	304
		1037,4

Fuente: elaboración propia

Tabla 6. Resultados de índice de alargamiento

Tamiz	ILi	IL
3/4-1/2	18%	37%
1/2-3/8	36%	
3/8-1/4	56%	

Fuente: elaboración propia

5.1.2.2. Aplanamiento

Tabla 7. Datos porcentajes para el ensayo de aplanamiento

Tamiz pasa	Tamiz retiene	Wmuestra (g)
3/4	1/2	349,9
1/2	3/8	383,5
3/8	1/4	304
		1037,4

Tabla 8. Resultados de índice de aplanamiento

Tamiz	IAi	IA
3/4-1/2	27%	19%
1/2-3/8	16%	
3/8-1/4	14%	

Fuente: elaboración propia

5.1.3. Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso (INV E 227-13) (Anexo 12)

Tabla 9. Datos porcentajes para el ensayo de caras fracturadas

Tamiz pasa	Tamiz retiene	Wmuestra (g)
3/4	1/2	132,5
1/2	3/8	195,2
3/8	No.4	266
		593,7

Fuente: elaboración propia

$$F = 51.8 + 52.7 + 85 = 189.5 \text{ g}$$

$$N = 61.7$$

$$P = \frac{185.9}{185.9 + 61.7} = 75 \%$$

5.1.4. Determinación de la Resistencia del Agregado Grueso a la Degradación por Abrasión, utilizando el aparato de Micro-deval (INV E 238-13) (Anexo 13)

5.1.4.1. Micro-deval arena

Tabla 10. Cálculos Micro-deval de arena

Tamiz que pasa	Tamiz que retiene	Wmuestra seca (g)
No	No	g
4	8	40
8	16	115
16	30	180
30	50	120
50	100	38
100	200	7

Fuente: elaboración propia

$$\%perdidas = \frac{500 - 451.9}{500} * 100 = 10\%$$

5.1.4.2. Micro-deval arenilla

Tabla 11. Cálculos Micro-deval de arenilla

Tamiz que pasa	Tamiz que retiene	Wmuestra (g)	Wmuestra seca (g)
No	No	g	g
4	8	168.5	40
8	16	373.7	115
16	30	540	180
30	50	366.5	120
50	100	123.8	38
100	200	25.6	7

Fuente: elaboración propia

$$\%perdidas = \frac{500 - 421.9}{500} * 100 = 16\%$$

5.1.4.3. Micro-deval grava

Tabla 12. Cálculos Micro-deval de grava

Wmuestra	Wmuestra seca (g)
g	g
1524.8	750
813.4	375
431.3	375

Fuente: elaboración propia

$$\%perdidas = \frac{1500 - 1236.3}{1500} * 100 = 18\%$$

5.1.5. Densidad, Densidad Relativa (Gravedad específica) y Absorción del agregado fino y grueso (INV E 222-13 e INV E-223-13) (Anexo 14)

5.1.5.1. Gravedad específica grava

Tabla 13. Gravedad específica correspondiente a la grava

Gravedad específica	
SH	2,55
SSS	2,59
Aparente	2,65

Fuente: elaboración propia

Tabla 14. Gravedad específica correspondiente a la arena

Gravedad específica	
SH	2,66

Fuente: elaboración propia

Tabla 15. Gravedad específica correspondiente a la arenilla

Gravedad específica	
SH	2,63

Fuente: elaboración propia

5.1.6. Determinación del valor de 10% de finos (INV E 224-13) (Anexo 15)

Este ensayo se realiza solo al agregado grueso para este caso grava.

5.1.6.1. Muestra seca y penetración de 15 mm

$$F = \frac{14 * 142.6}{(7.74 + 4)} = 170.11$$

Puesto que m se encuentra entre el 7.5% y el 12.5% cumple con la calificación de agregado triturado normal.

5.1.7. Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm ($1\frac{1}{2}$ ") por medio de la máquina de los ángeles (INV E 218-13) (Anexo 16)

Este ensayo se realiza solo al agregado grueso para este caso grava.

$$\%perdidas = \frac{5000 - 3862.4}{5000} * 100 = 22.752\%$$

5.1.8. Equivalente de arena de suelos y agregados finos (INV E 133-13) (Anexo 17)

Este ensayo se realiza solo al agregado fino para este caso arena y arenilla.

5.1.8.1. Equivalente de arena en el agregado fino: Arena

Tabla 16. Resultados de equivalente de arena en el agregado fino: Arena

Muestra	EA	EA prom
1	68%	
3	67%	67%
4	66%	

Fuente: elaboración propia

5.1.8.2. Equivalente de arena en el agregado fino: Arenilla

Tabla 17. Resultados de equivalente de arena en el agregado fino: Arenilla

Muestra	Arcilla	Arena	EA	EA prom
1	4.8	3.6	75%	76%
2	4.8	3.6	75%	
3	4.6	3.6	79%	

Fuente: elaboración propia

5.2. PORCENTAJE IDEAL DE ASFALTO PARA LA ELABORACIÓN DE MEZCLA CONVENCIONAL

5.2.1. Cantidades determinadas de los agregados

Para la dosificación de agregados en las diferentes mezclas convencionales con su respectivo porcentaje de asfalto se utilizaron los siguientes porcentajes.

Tabla 18. Porcentaje de agregados en mezclas convencionales

Tamiz	% retenido
3/4"	0
1/2"	6.48%
3/8"	12.13%
N°4	32.88%
N°10	14.40%
N°40	12.98%
N°80	10.80%
N°200	4.69%
filler	5.64%

Fuente: elaboración propia

Teniendo en cuenta la Tabla 18 y que la masa de los agregados es de 1200 g, obtenemos la siguiente masa para cada granulometría de los materiales.

Tabla 19. Masa de agregados para mezcla convencional

%ASFALTO	4	5	6	7
Masa agregados	1152	1140	1128	1116
3/4"	0	0	0	0
1/2"	74.65	73.87	73.09	72.32
3/8"	139.74	138.28	136.83	135.37
N°4	378.78	374.83	370.89	366.94
N°10	165.89	164.16	162.43	160.70
N°40	149.53	147.97	146.41	144.86
N°80	124.42	123.12	121.82	120.53
N°200	54.03	53.47	52.90	52.34
Filler	64.97	64.30	63.62	62.94

Fuente: elaboración propia

5.2.2. Geometría de las briquetas

Tabla 20. Altura de las briquetas en mezcla convencional

% asfalto	No. briqueta	Altura 1 (mm)	Altura 2 (mm)	Altura 3 (mm)	Altura prom (mm)
4	4B	66.57	62.67	62.39	63.88
	3B	62.4	62.91	64.3	63.20
	2B	59.62	64.17	65.18	62.99
	1B	59.81	61.96	63.09	61.62
5	4B	63.05	60.1	61.68	61.61
	3B	58.6	61.46	61.39	60.48
	2B	61.35	60.04	60.8	60.73
	1B	61.44	61.48	60.53	61.15
6	4B	61.16	62.56	62.11	61.94
	3B	59.82	57.54	60.18	59.18
	2B	60.06	60.51	58.77	59.78
	1B	62.24	60.16	59.23	60.54
7	4B	60.86	60.9	61.75	61.17
	3B	59.48	61.33	61.42	60.74
	2B	61.12	58.99	61.77	60.63
	1B	59.94	61.44	59.16	60.18

Fuente: elaboración propia

Tabla 21. Diámetro de las briquetas en mezcla convencional

% asfalto	No. briqueta	Calibre 1 (mm)	Calibre 2 (mm)	Calibre 3 (mm)	Calibre prom (mm)
4	4B	101.56	101.36	101.44	101.45
	3B	101.54	99.97	101.04	100.85
	2B	100.12	99.54	101.71	100.46
	1B	101.18	101.07	101.4	101.22
5	4B	100.88	100.61	101.87	101.12
	3B	99.91	101.02	100.84	100.59
	2B	101.49	99.95	101.38	100.94
	1B	100.74	101.56	100.38	100.89
6	4B	101.68	101.63	101.38	101.56
	3B	101.66	101.37	101.63	101.55
	2B	101.65	101.67	101.59	101.64
	1B	101.53	99.79	100.13	100.48
7	4B	101.64	101.61	101.65	101.63
	3B	101.92	99.74	100.99	100.88
	2B	101.71	101.23	101.49	101.48
	1B	101.4	101.25	101.38	101.34

Fuente: elaboración propia

5.2.3. Resistencia de las diferentes mezclas convencionales

Tabla 22. Resultados estabilidad y flujo mezcla convencional

% asfalto	Fuerza máxima (KN)	Promedio F. máxima (KN)	Flujo máximo (mm)	Promedio Flujo. Máximo (mm)
4	23.47	22.910	4.171	4.889
	23.22		4.696	
	Testigo		Testigo	
	22.04		5.799	
5	18.01	18.120	6.126	5.837
	Testigo		Testigo	
	19.74		6.833	
	16.61		4.553	
6	14.31	12.403	8.224	9.096
	14.48		9.611	
	Testigo		Testigo	
	8.418		9.452	
7	8.814	9.363	9.122	9.805
	9.686		10.81	
	9.59		9.483	
	Testigo		Testigo	

Fuente: elaboración propia

5.3. ELABORACIÓN DE MEZCLA MODIFICADA CON GCR

El porcentaje de asfalto con mejor comportamiento presentado fue de 4%. Se determinó este porcentaje para las mezclas modificadas.

5.3.1. Geometría Mezclas modificadas con GCR

Tabla 23. Altura de briquetas de mezcla modificada

%GCR	No. biqueta	Altura 1 (mm)	Altura 2 (mm)	Altura 3 (mm)	Altura prom (mm)
8	4B	63.21	61.91	61.94	62.35
	3B	62.69	60.98	62.77	62.15
	2B	60.78	62.26	60.86	61.30
	1B	62.71	60.93	62.19	61.94
12	4B	61.31	68.84	68.13	66.09
	3B	62.73	63.04	62.02	62.60
	2B	63.08	63.2	62.31	62.86
	1B	62.22	62.54	62.35	62.37
16	4B	65.74	64.87	64.13	64.91
	3B	65.05	64.81	63.34	64.40
	2B	64.05	63.24	64.87	64.05
	1B	63.47	64.28	63.84	63.86

Fuente: elaboración propia

Tabla 24. Diámetro de briquetas de mezcla modificada

%GCR	Calibre 1 (mm)	Calibre 2 (mm)	Calibre 3 (mm)	calibre prom (mm)
8	101.86	101.66	101.86	101.79
	101.4	101.67	101.9	101.66
	102.17	101.51	100.95	101.54
	101.77	101.45	100.43	101.22
12	101.2	100.97	101.25	101.14
	101.7	101.91	101.66	101.76
	101.64	101.37	101.52	101.51
	101.26	101.48	101.34	101.36
16	101.25	101.01	101.14	101.13
	101.52	101.24	101.43	101.40
	101.22	101.15	101.54	101.30
	101.32	101.23	101.24	101.26

Fuente: elaboración propia

5.3.2. Resistencia de las diferentes mezclas modificadas con GCR

Tabla 25. Resultados del ensayo estabilidad y flujo, mezcla modificada

%GCR	Fuerza máxima (KN)	Promedio Fuerza máxima (KN)	Flujo máximo (mm)	Promedio Flujo máximo (mm)
8	Testigo	30.580	Testigo	4.213
	37.65		4.352	
	35.3		4.359	
	25.86		3.927	
12	Testigo	34.460	Testigo	5.085
	38.91		5.695	
	26.92		5.128	
	37.55		4.433	
16	29.37	25.627	5.584	5.312
	25.36		4.767	
	22.15		5.584	
	Testigo		Testigo	

Fuente: elaboración propia

6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

6.1. CUMPLIMIENTO DE LA NORMA INVIAS 2022

6.1.1. Agregado grueso

6.1.1.1. Caras fracturadas

Los resultados adquiridos con relación al ensayo enunciado demuestran que el material grueso ejecutado para elaborar la mezcla asfáltica convencional da cumplimiento a la comprobación establecida para la respectiva capa de rodadura en la clasificación de dos caras fracturadas o más. Sin embargo, para la clasificación de una cara fracturada, este material solo cumple las especificaciones para nivel de tránsito 1 y 2.

Tabla 26. Verificación norma caras fracturadas

Caras fracturadas % mínimo	NT1	NT2	NT3	%caras	Verificación
Una cara	75	75	85	75	No al 100 %cumple
Dos caras	0	60	70	85	Cumple

Fuente: elaboración propia

6.1.1.2. Micro-deval

Los resultados adquiridos con relación al ensayo enunciado demuestran que el material grueso ejecutado para elaborar la mezcla asfáltica convencional da cumplimiento a la comprobación establecida para la respectiva capa de rodadura de distintos niveles de tránsito, debido a que dio como resultado un coeficiente de desgaste del 18%.

Tabla 27. Comprobación norma microdeval

Desgaste %máximo capa de rodadura	NT1	NT2	NT3	%desgaste	Verificación
	-	25	20	18	Cumple

Fuente: elaboración propia

6.1.1.3. Máquina de los ángeles

Los resultados adquiridos con relación al ensayo enunciado demuestran que el material grueso ejecutado para elaborar la mezcla asfáltica convencional da cumplimiento a la comprobación establecida para la respectiva capa de rodadura de distintos niveles de tránsito, debido a que se obtuvo un coeficiente de desgaste de 23%.

Tabla 28. Comprobación norma máquina de los ángeles

Desgaste %máximo capa de rodadura 500 rpm	NT1	NT2	NT3	%desgaste	Verificación
	25	25	25	23	Cumple

Fuente: elaboración propia

6.1.1.4. 10% finos

Los resultados adquiridos con relación al ensayo enunciado demuestran que el material ejecutado para elaborar la mezcla asfáltica convencional da cumplimiento a la comprobación estipulada para la respectiva capa de rodadura de distintos niveles de tránsito, ya que la fuerza mínima necesaria para generar un desgaste es superior a 170 kN y su relación húmeda/seca es del 80%.

Tabla 29. Verificación norma 10% finos

Resistencia mecánica hallada por el ensayo de 10% de finos, respecto a capa de: rodadura	NT1	NT2	NT3	Valor comprobación	Verificación
Valor en seco, mínimo (kN)			110	170,11	Cumple
Relación húmeda/seca, mínimo (%)			75	80	Cumple

Fuente: elaboración propia

6.1.1.5. Granulometría

Revisar la Gráfica 1. Curva de granulometría correspondiente a la Grava. Agregado fino

6.1.1.6. Arena

6.1.1.6.1. Granulometría

Revisar la Gráfica 2. Curva de granulometría correspondiente a la Arena.

6.1.1.6.2. Equivalente de arena

Los resultados adquiridos con relación al ensayo enunciado demuestran que el agregado fino llevado a cabo para elaborar la mezcla asfáltica convencional da cumplimiento a la comprobación estipulada, debido a que el porcentaje obtenido de equivalente de arena corresponde al 67%.

Tabla 30. Comprobación norma equivalente de arena (Arena)

Equivalente de arena mínimo	NT1	NT2	NT3	EA examen	Verificación
	50	50	50	67	Cumple

Fuente: elaboración propia

6.1.1.7. Arenilla

6.1.1.7.1. Granulometría

Revisar la Gráfica 3. Curva de granulometría correspondiente a la Arenilla.

6.1.1.7.2. Equivalente de arena

Los resultados adquiridos con relación al ensayo enunciado demuestran que el agregado fino llevado a cabo para elaborar la mezcla asfáltica convencional da cumplimiento a la comprobación estipulada, debido a que el porcentaje obtenido de equivalente de arena corresponde al 76%.

Tabla 31. Comprobación norma equivalente de arena (Arenilla)

Equivalente de arena mínimo	NT1	NT2	NT3	EA examen	Verificación
	50	50	50	76	Cumple

Fuente: elaboración propia

- Teniendo como referente los análisis realizados a los ensayos de clasificación de los agregados, se obtuvo que el ensayo correspondiente a caras fracturadas no cumple con las especificaciones del INVIAS 2022, debido a que se existen menor número de caras fracturadas que el especificado por norma.

7. CONCLUSIONES

Con el respectivo fallo de las briquetas del 8, 12 y 16%, se obtuvo como resultado que la mezcla alterada con GCR al 8% presento mejores resultados a nivel de flujo (aptitud de la mezcla asfáltica para soportar el asentamiento gradual y la alteración sin agrietarse). Sin embargo, la mezcla alterada con 12% de GCR se presentó un mejor resultado con respecto la estabilidad (aptitud de la mezcla asfáltica para soportar empujones y surcos). (Tabla 25)

Con los resultados obtenidos en relación a estabilidad se pudo observar que la mezcla convencional presentó resultados inferiores a la mezcla modificada con el 12% de GCR.

Al hacer un comparativo entre los porcentajes de GCR que se les adicionaron a las mezclas, se dedujo que el GCR ofrece optimización en las propiedades mecánicas, no obstante, se tiene que tener en cuenta que los porcentajes de adición no deben ser muy elevados ni muy bajos, ya que como se presenta en este caso la fuerza máxima la obtuvo el 12%, siendo este punto de equilibrio para brindar mejores resultados y demostrando que al adicionar más porcentaje, se modifican ciertas propiedades (estabilidad, resistencia al ahuellamiento, densidad).

El hecho de implementar el GCR en mezclas asfálticas, ha venido incrementando con la finalidad de optimizar su comportamiento mecánico, aunque aún requiere de profundizar más a nivel de proyección de obra, puesto que en su mayoría solo está basado por investigaciones y muy pocas han realizado tramos de análisis para evaluar desde otro aspecto. Como base de esta apreciación se cita la siguiente investigación (Díaz & Castro, 2017).

Una vez llevados a cabo la mayoría de ensayos establecidos por norma para cada uno de los agregados, establecido en el artículo 450-9 del INVIAS 2022, que proporciona los criterios para el diseño preliminar de Mezcla Asfáltica en Caliente tipo MDC 19 de gradación continua por el método de Marshall. Además, con respecto a inestabilidad, durabilidad y resistencia al deslizamiento, esto se estableció basándose en los resultados de estabilidad y flujo. (Tabla 25)

La investigación se realizó con agregados obtenidos de canteras provenientes de Boyacá, se sustenta un comportamiento favorable para la elaboración de mezclas asfálticas a razón de los ensayos ejecutados a los agregados pétreos.

Las dosificaciones óptimas establecidas para el diseño de una mezcla densa en caliente tipo MDC 19 fabricada con asfalto modificado con GCR fue la correspondiente a 8% ya que teniendo en cuenta los criterios de estabilidad y flujo se encuentran posicionadas para vías con alto nivel de tránsito (NT3) que corresponde a vías en las que el tránsito de diseño de las obras por construir es superior a 5.0×10^6 ejes equivalentes de 80 kN en el carril de diseño.

Al realizar un análisis comparativo de una mezcla densa en caliente tipo MDC 19 convencional y modificada con GCR se obtuvo que las mezclas modificadas se establecen en NT3 mientras que las mezclas convencionales se establecieron para un NT1 que corresponde a vías en las que el tránsito de diseño de las obras por construir es inferior a 0.5×10^6 ejes equivalentes de 80 kN en el carril de diseño

8. RECOMENDACIONES

La investigación se realizó con porcentajes de 8%, 12% y 16% de modificación con GCR, para analizar con que valor se obtenían mejores resultados, obteniendo que, a nivel de estabilidad y flujo, el comportamiento optimo se presentó en 12% y 8% respectivamente. Por tal razón, se recomienda hacer ensayos en porcentajes dentro de este rango, con el fin de establecer de manera más acertada cual presenta mejor comportamiento y brindar una dosificación que permita ponderar una optimización de los resultados.

Con base a las investigaciones consultadas para obtener una mejor percepción de la investigación que se realizó, se recomienda realizar las próximas pruebas también por vía seca, solo que esta vez realizando la respectiva evaluación de todas las propiedades no solo estabilidad y flujo como en este caso, para poder contrastar de manera más acertada los resultados obtenidos con lo establecido en especificaciones generales de construcción INVIAS 2022.

9. GLOSARIO

Abrasivo: Corresponde cuando algún tipo de roca y mineral que presente alta dureza, tenacidad y consistencia, se preste para moler, afilar, cortar o demás usos.

Abrasión: Es presentado por el agotamiento al roce de agregados y rocas.

Aditivo: Producto químico o mineral que se encarga de modificar las propiedades de un material.

Ahuellamiento: Se les conoce así, a los surcos presentes en la superficie de rodadura ya sea carretera pavimentada o no pavimentada y se deben al movimiento lateral de los materiales por efectos del tránsito.

Base: Material seleccionado y fabricado, ubicado sobre la subbase o subrasante y la capa de rodadura. Además, dicha capa también podría conformarse por mezcla asfáltica.

Cemento Asfáltico Modificado con GCR: Conocido por ser un ligante hidrocarbonado, correspondiente al resultado obtenido de la mezcla de cemento asfáltico, GCR, y demás agregados necesarios en la implementación del ligante en obras de pavimentado.

Densidad: Relación masa/volumen.

Durabilidad: Es aquella propiedad que se conoce como la resistencia a la disociación de efectos a nivel mecánico, ambiental o de tráfico.

EAF: Escoria de horno de arco eléctrico

Ensayo Marshall: Es un método empleado para adquirir el contenido de asfalto y diversos criterios de calidad propios de la mezcla bituminosa.

Erosión: Se conoce como el desgaste ocasionado por el agua ya sea a nivel de la superficie de rodadura o de elementos de carretera.

Estabilidad: Es aquella propiedad correspondiente a mezclas asfálticas de pavimento, resistente a la deformación bajo el sometimiento de las cargas impuestas. Esta propiedad está en función de la cohesión y la fricción interna que posee un material.

Fatiga: Restricción progresiva a la oposición que posee un material con respecto a repetidas sollicitaciones.

Filler: Son sustancias degradadas que son insolubles en los betunes, pero que pueden dispersarse en ellos para cambiar sus propiedades mecánicas y su consistencia. Suelen ser minerales; Rara vez se utilizan materiales orgánicos como la madera o el corcho.

Flujo: Este parámetro consiste en mostrar la aptitud de resistencia de la mezcla asfáltica con respecto al asentamiento gradual y sus alteraciones sin presencia de grietas.

Granulometría continua: En este tipo de granulometrías se puede observar presencia de diversos tamaños de agregado, de tal manera que fomenta una curva granulométrica uniforme.

Grano de caucho reciclado (GCR): Se obtiene del resultado de un proceso de fracturación de llantas vehiculares, una vez estas terminen su vida útil y proceden a convertirse en deshechos.

Mezcla asfáltica en caliente: Es aquella mezcla de que integra agregados pétreos y cemento asfáltico, se elabora en caliente con una planta especial, donde se coloca y compacta mientras mantenga la temperatura elevada.

Pavimento: Agrupación de capas sobrepuestas, de referencia horizontal, debidamente diseñadas y construidas con material adecuado y bien compactado. Las estructuras tipo sándwich yacen sobre la calzada y deben resistir las fuerzas de las cargas de tráfico repetidas que actúan sobre

ellas durante el tiempo para el que se diseñó la estructura y los efectos dañinos de los factores climáticos.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arbeláez, M. (2015). *Estudio en tramos de prueba del comportamiento de mezclas de gradación densa, elaboradas en caliente con ligante asfáltico modificado con grano de caucho reciclado de llantas usadas* [Universidad Nacional de Colombia].
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/55892/30318649.2015.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Bansal, S., Kumar Misra, A., & Bajpai, P. (2017). Evaluation of modified bituminous concrete mix developed using rubber and plastic waste materials. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6(2), 442–448. <https://doi.org/10.1016/J.IJSBE.2017.07.009>
- Botero, J., Valentín, M., Suárez, M., Santos, J., Acosta, F., Cáceres, A., & Pando, M. (2005). Gomas trituradas: Estado del arte, situación actual y posibles usos como materia prima en Puerto Rico. *Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 5(1).
https://www.scipedia.com/public/Boero_et_al__2005a
- Comercializadora, M. (s. f.). ORIENTE “Construimos Progreso”.
<https://www.cementosdelorient.com/cemento-gris>
- Cubides, D., Molano, E., Becerra, J., & Bernal, A. (2020). Caracterización Mineralógica y Físico Mecánica de los Agregados Pétreos de las Canteras Santa Lucía, Pie Blanco y Mina San Vicente, Usados como Materiales de Construcción. *L'esprit Ingénieux*, 25.
- Cruz Roja. (28 de 06 de 2021). *Cruz Roja*. Obtenido de <https://www2.cruzroja.es/web/ahora/-/cuanto-tardan-en-descomponerse-residuos-mas-comunesNo.~:text=Un%20neum%C3%A1tico%20puede%20tardar%20hasta,los%20500%20y%201.000%20a%C3%B1os>.
- 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* [Universidad Santo Tomás].
<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2633/Diazcesar2017.pdf>

- Guerra, M., & Peña, L. (2021). *Evaluación del desempeño mecánico de mezclas asfálticas tipo MDC-19 modificadas con grano de caucho reciclado y escoria negra de horno de arco eléctrico* [Universidad Santo Tomás]. <http://hdl.handle.net/11634/37665>
- Higuera, C., Olarte, B., & Soler, R. (2019). Effect of the recycled rubber grain in the rutting of an asphalt mixture type MD-12. *Respuestas*, 24(1). <https://doi.org/10.22463/0122820X.1810>
- Lee, S.-J., Akisetty, C. K., & Amirkhanian, S. N. (2008). The effect of crumb rubber modifier (CRM) on the performance properties of rubberized binders in HMA pavements. *Construction and Building Materials*, 22(7), 1368–1376. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.04.010>
- Osorio, J. (2018). *Estado del conocimiento de las mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho reciclado (GCR) en Colombia*.
- Cubides, D., Molano, E., Becerra, J., & Bernal, A. (2020). Caracterización Mineralógica y Físico Mecánica de los Agregados Pétreos de las Canteras Santa Lucía, Pie Blanco y Mina San Vicente, Usados como Materiales de Construcción. *L'esprit Ingénieux*, 25.
- Subgerencia de Control de Calidad CTU. (2021, July 6). *Comparativo Especificaciones Técnicas IDU 2011 vs 2018 - Compañía de Trabajos Urbanos S.A.S.* Instituto de Desarrollo Urbano. <https://ctu.com.co/comparativo-especificaciones-tecnicas-idu-2011-vs-2018/>
- Universidad de los andes. (2002). *Estudio de las mejoras mecánicas de las mezclas asfálticas con desechos de llantas*.

ANEXOS

ANEXO 1

Ficha técnica correspondiente al cemento hidráulico (llenante mineral).

Figura 17 Ficha técnica cemento hidráulico (llenante mineral)

PROPIEDADES	MÉTODO DE ENSAYO	ESPECIFICACIÓN NTC 121:2014	CEMENTOS DEL ORIENTE
Superficie Específica (m ² /kg)	NTC 33	A	Min. 380
Expansión en Barras de Mortero (%)	NTC 4927	Máx. 0,02	Máx. 0,02
Expansión en Autoclave	NTC 107	Máx. 0,80	Máx. 0,06
Densidad (g/cm ³)	NTC 221	---	2,80 - 3,00
Fraguado Vicat			
Inicial (minutos)	NTC 118	Min. 45	Min. 120
Final (minutos)	NTC 118	Máx. 420	Máx. 260
Resistencia a la Compresión (Mpa)			
1 día	NTC 220	---	Min. 3,5
3 días	NTC 220	Min. 8,0	Min. 12,0
7 días	NTC 220	Min. 15,0	Min. 18,0
28 días	NTC 220	Min. 24,0	Min. 26,0

(Comercializadora, s. f.)

ANEXO 2

Análisis Granulométrico de los agregados grueso y fino (INV E-213-13)

- Se seca la muestra a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ($230 \pm 9^{\circ}\text{F}$), hasta obtener masa constante.

El tamizado manual se realiza mediante movimientos laterales y circulares, de esta manera se preserva el contenido de la muestra sobre

las mallas. Al desarmar los tamices se comprueba que la operación se dé por terminada; esto se rectifica cuándo lo que pasa no es superior al 1 % de la parte retenida durante el lapso de un minuto, resaltando el trabajo independiente de los tamices empleados. Luego se procede a determinar la masa correspondiente a cada fracción en una balanza con sensibilidad de 0.1 %. Dando como resultado que la suma total de las masas de todas las fracciones y la masa inicial de la muestra no deben variar en más del 1 %.

ANEXO 3

Índices de Aplanamiento y de Alargamiento de los Agregados para Carreteras (INV E 230-13)

➤ Preparación de la muestra

La muestra se seca de manera suficiente que permita obtener una correcta separación por tamizado tanto a nivel de agregados gruesos como de finos. Se criba por el tamiz 4.75 mm (No. 4), u otro tamiz especificando para el ensayo, de acuerdo con la norma INV E 230-13 y, se procede a disminuir la cantidad de muestra retenida por dicho tamiz.

Tabla 32. Masa mínima de la muestra de ensayo una vez obtenido el rechazo de partículas grandes y pequeñas

TAMAÑO MAXIMO NOMINAL DEL AGREGADO (mm)	MASA MINIMA DE LA MUESTRA PARA EL ENSAYO DEL INDICE DE APLANAMIENTO DE ALARGAMIENTO (kg)
50 mm (2 in)	35
37,5 mm (1,5 in)	15
25 mm (1 in)	5
19 mm (0,75 in)	2
12,5 mm (0,5 in)	1
9,5 mm (0,375 in)	0,5

Fuente: Normas de Ensayo de materiales para carreteras, INV E 230-13

Empleando el tamiz de barras apropiado para cada fracción, se procede a tamizar la fracción respectiva por él. El cribado se realizará de manera manual y se dará por finalizado una vez, que el rechazo no varíe en más de 1 % durante un minuto de tamizado. Entonces, se procederá a intentar pasar manualmente por el tamiz las partículas retenidas, teniendo de precedente el no forzarlas ni romperlas.

ANEXO 4

Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso (INV E 227-13)

El material es lavado dentro el tamiz designado para determinar las partículas de carácter fracturado, con el objetivo de quitar el material fino restante, dejando cercar a masa constante. Se continúa esparciendo la muestra seca sobre una superficie libre de impurezas y lisa que permita la detallada inspección de cada partícula. Para que la verificación de cada partícula de cumplimiento al parámetro de fracturamiento, se sujeta de manera que la cara se pueda observar directamente, en llegado caso que la cara constituya por lo menos un cuarto de la mayor sección transversal de partícula se deberá establecer como una cara de carácter fracturado.

Se procede a determinar la masa o realizar el conteo de número de partículas categorizadas como fracturadas, como lo son la masa o el conteo de las partículas que no dan cumplimiento a lo clasificado como fracturadas. Para calcular el porcentaje de partículas de carácter fracturado se debe usar la masa, a excepción que el cálculo especifique dicho porcentaje con base en el conteo de partículas.

ANEXO 5

Determinación de la Resistencia del Agregado Grueso a la Degradación por Abrasión, utilizando el aparato de Micro-deval (INV E 238-13)

➤ Micro-deval gruesos

Se prepara una muestra seca que corresponda a los 1500 ± 5 g. Luego se establece la masa de la muestra con una aproximación de 1.0 g y se registra esta masa como A. Luego la muestra es sometida a inmersión en 2.0 ± 0.05 litros de agua del grifo, a $20 \pm 5^\circ$ C, en el transcurso mínimo de una 1 h, puede ser implementando el respectivo recipiente del Micro– Deval u otro recipiente que brinde buenas propiedades de uso.

Se dispone la muestra y una cantidad de 5000 ± 5 g de esferas de acero dentro del cilindro de abrasión de Micro–Deval con la respectiva agua empleada para la saturación de la muestra. Se sella el cilindro y se posiciona sobre la máquina Micro– Deval. Se da paso a la respectiva rotación de la máquina a una velocidad de $100 \text{ rpm} \pm 5 \text{ rpm}$ durante $2 \text{ h} \pm 1$.

Finalizado el tiempo requerido de rotación, se deberá ser cuidadoso al vaciar la totalidad del contenido del recipiente cilíndrico. El material retenido debe ser lavado y manejado con agua limpia hasta que tome tonalidades claras o transparentes, para garantizar que se ha despojado de la totalidad del material menor a 1.18 mm. Se procede a pesar la muestra con 1.0 g de aproximación, y se nombra esta masa como B.

➤ Micro-deval finos

Se prepara una muestra seca que corresponda a los 500 ± 5 g. Se procede a establecer la masa correspondiente a la muestra con 0.1 g de aproximación y se procede a registrar esta masa como A.

La muestra es sometida a inmersión en 0.75 ± 0.05 litros de agua del grifo, a $20 \pm 5^\circ$ C, durante un periodo mínimo de una hora, ya sea dentro del recipiente establecido para el ensayo Micro–Deval u otro recipiente que cumpla con lo establecido.

Si la inmersión se realizó en el recipiente del ensayo Micro–Deval, se incorpora a la muestra preparada y al agua usada para su inmersión, una cantidad de 1250 ± 5 g de esferas de acero. Se da paso a la respectiva rotación de la máquina a una velocidad de $100 \text{ rpm} \pm 5 \text{ rpm}$ en el transcurso de $15 \text{ min} \pm 5 \text{ s}$.

Una vez finalizado el respectivo periodo de rotación, se incorpora de manera cuidadosa la respectiva muestra y esferas dentro del tamiz de 6.7 o 6.3 mm

(0.265" o ¼") que fue previamente puesto dentro de un recipiente adecuado. Luego se tendrá precaución al instante de vaciar todo el contenido del cilíndrico. Se procede al lavado de las esferas detenidas en el tamiz, de tal manera que no se encuentren partículas adheridas de agregado.

Seguidamente, se retiró las esferas de acero del tamiz. Se realiza el lavado el agregado fino restante depositado en el recipiente dispuesto en la parte inferior del tamiz de 6.7 o 6.3 mm (0.265" o ¼"), el lavado se continua hasta el punto que el agua de lavado tome tonalidades claras o transparentes y todas las partículas menores de 75 µm pasen el respectivo tamiz (No. 200). Después de dejarla secar en el horno eléctrico, se procede a pesar la muestra con 0.1 g de aproximación, y se nombra esta masa como B.

ANEXO 6

Densidad, Densidad Relativa (Gravedad específica) y Absorción del agregado fino y grueso (INV E 222-13 e INV E-223-13)

➤ Masa del material en agua

Se sumerge el material en un baño con agua a temperatura de $25 \pm 1^\circ \text{C}$ durante 4 ± 1 minutos, posteriormente se establece la masa en el agua, previniendo la aparición de burbujas de aire contenidas bajo el material. Se registra esta masa como C. Cada material se debe sumergir y pesar individualmente.

➤ Masa del material saturado y con superficie seca (SSS) en el aire

Se saca el material del agua, de manera rápida se realiza el secado de su superficie con una toalla húmeda y luego se determina su masa pesando en el aire. Se registra esta masa como B.

➤ Masa del material secado al horno

Después de determinar las masas en el agua y en condición saturada y superficialmente seca (SSS), para el secado del material se implementa la ayuda de un horno a $110 \pm 5^\circ \text{C}$ hasta masa constante y se deja enfriar dicho material

para posteriormente determinar su masa en el aire. Se registra esta masa como A.

ANEXO 7

Determinación del valor de 10% de finos (INV E 224-13)

➤ Especímenes de ensayo en condición seca:

La muestra se deja secar al aire libre y se tamiza por las mallas de $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{8}$ ". Las partículas mayores y menores son descartadas, puesto que se empleará únicamente el contenido obtenido entre los dos tamices previamente mencionados. Una vez se selecciona el material será separado en tres especímenes, donde cada uno poseerá una masa que emplee una altura aproximadamente de 100 mm dentro del cilindro de ensayo, posterior a su compactación con la varilla.

Los especímenes se dejan secar en el horno a $110 \pm 5^\circ \text{C}$ en un transcurso de tiempo no superior de 4 h. Para la muestra es permitido enfriarse a temperatura ambiente, previamente al desarrollo del ensayo. Luego se procede a pesar los especímenes y realizar la correspondiente anotación de sus masas.

➤ Especímenes de ensayo en condición saturada:

La preparación es similar a como se describió anteriormente, con la excepción que el secado en horno no es requerido para la muestra de ensayo. Se coloca los respectivos especímenes de ensayo uno a uno en la canasta de alambres y se sumergen en agua con ayuda del recipiente empleado para ello, para así lograr la existencia de una lámina de agua de 50 mm sobre el borde superior de la canasta durante 24 ± 2 h.

Una vez efectuado el correspondiente tiempo de saturar el espécimen, se extrae el espécimen de la canasta, luego con ayuda de una toalla absorbente se procede a secar el agua libre de la superficie de del espécimen. Una vez finalizada dicha operación, el paso a seguir del ensayo se llevará a cabo inmediatamente.

➤ Procedimiento

Se comienza posicionando el cilindro respectivo al ensayo sobre su placa base y se comienza a verter la muestra en tres capas consecutivas de igual altura todas, y se procede a aplicar 25 golpes con la varilla a cada capa. Dichos golpes se deberán distribuir de manera uniforme en la superficie de la capa, con una altura de caída de 25 mm. Cabe resaltar que, en presencia de excesos de material al término de compactación de la tercera capa, deberá ser eliminado igualando la muestra con la varilla o con una regla metálica.

Al encontrarse nivelada la superficie del agregado, se procede a insertar el pistón de manera horizontal para que repose sobre ella. Se deberá ser cuidadoso para prevenir que el pistón se atranque en el cilindro. Una vez colocado el conjunto en la máquina de compresión entre las platinas, se coloca carga a velocidad uniforme, de tal manera que el pistón consiga una específica penetración. Esta penetración depende del origen del agregado que se ejerce, como se especifica en la siguiente tabla.

Tabla 33 Penetración según la naturaleza del agregado

TIPO DE AGREGADO	PENETRACION (mm)
Redondeado o parcialmente redondeado; por ejemplo, grava natural	15
Agregados triturados normales	20
Agregados vesiculares; por ejemplo, escoria	24

Fuente: Normativas de Ensayo de materiales para carreteras, INVIAS 2013

ANEXO 8

Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1½") por medio de la máquina de los ángeles (INV E 218-13)

➤ Preparación de la muestra

Con ayuda de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se selecciona que granulometría es más similar a la del agregado que se va a implementar en obra. Se prepara la muestra previamente reducida en las fracciones estipuladas, de acuerdo con la granulometría seleccionada. Se procede a variar las porciones de material para fabricar la muestra de ensayo con la conformación establecida. Se procede a pesar dicha muestra de ensayo tomando como referente 1 g de aproximación y se consigna el valor obtenido.

Tabla 34. Granulometría de las muestras del ensayo máquina de los angeles

TAMAÑOS DE TAMIZ		MASAS DE LAS DIFERENTES FRACCIONES (g)			
PASA TAMIZ	RETENIDO EN TAMIZ	GRANULOMETRIAS			
		A	B	C	D
37.5 (1 ½")	25.0 (1")				
25.0 (1")	19.0 (¾")	1250 ± 25			
19.0 (¾")	12.5 (½")	1250 ± 25			
12.5 (½")	9.5 (⅜")	1250 ± 10	2500 ± 10		
9.5 (⅜")	6.3 (¼")	1250 ± 10	2500 ± 10	2500 ± 10	
6.3 (¼")	4.75 (No.4)			2500 ± 10	
4.75 (No.4)	2.36 (No.8)				2500 ± 10

Fuente: Normativas de Ensayos de materiales para carreteras, INVIAS 2013

➤ Procedimiento

Se comprueba que el tambor este aseado de manera correcta, luego la respectiva muestra y la carga abrasiva se depositan en la máquina de Los Ángeles y se

procede a la rotación del tambor a una velocidad establecida entre los 188 y 208 rad/minuto (30 y 33 rpm) hasta concluir las 5000 revoluciones.

Una vez dado cumplimiento al número de vueltas establecido, se descarga el material depositado en el tambor y se da paso a preliminar separación de la muestra ensayada, empleando un tamiz No.8 para la separar la parte final. Al material grueso se le hace un respectivo lavado, se deja secar en el horno, a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante y luego se establece su masa con una precisión de 1 g.

ANEXO 9

Equivalente de arena de suelos y agregados finos (INV E 133-13)

➤ Procedimiento

Se obtiene mínimo 1500 g de material que pase el tamiz No.4. Se mantiene la condición de flujo libre, por lo cual dicho material se humedece de manera suficiente previniendo segregaciones o pérdidas de finos y se realiza la verificación de la condición de humedad del material, esto se determina apretando una mínima porción de la muestra combinada en su totalidad sobre la palma de la mano; si se forma una masilla que puede ser moldeada con cuidado, sin romperse, se obtuvo correctamente el grado de humedad. Una vez realizado el procedimiento anterior se mide en una especie de capsula la cantidad apropiada para realizar el ensayo.

➤ Preparación del equipo

Con un embudo, se vacía la totalidad de la muestra medida de ensayo en el cilindro graduado. Se procede a dar ligeros golpes por la inferior del cilindro con la palma de la mano, logrando liberar todas las burbujas de aire en el contenidas y luego se remoja la muestra de manera completa y se deja en reposo el cilindro durante 10 ± 1 minutos.

Una vez culminado el periodo de humedecimiento, se sella el cilindro con su respectivo tapón y se ablanda el material asentado con un movimiento

parcialmente invertido del cilindro y se sacude de manera simultánea. Luego de esto, se agita el cilindro con el método del agitador mecánico durante 45 ± 1 seg.

➤ Procedimiento correspondiente a irrigación

En la elaboración de dicho procedimiento se deberá mantener el cilindro en disposición vertical y su base deberá estar en roce directo con la superficie de trabajo. De esta manera se introduce el tubo irrigador adentro del cilindro, se suelta la pinza de presión de la manguera y se realiza el respectivo lavado al material adherido en las paredes del cilindro a medida que va descendiendo el irrigador. Esto impulsa de manera ascendente todo el material fino acentuado en el fondo y lo coloca en suspensión sobre las partículas gruesas correspondiente a la arena.

Se realiza el mismo proceso con las tres muestras y se deja en quietud los cilindros con su respectivo contenido durante 20 minutos $\pm$ 15 segundos. El tiempo comienza a ser contabilizado de manera inmediata una vez retirado el tubo irrigador.

➤ Determinación de lectura correspondiente a la arcilla

Una vez finalizados los 20 minutos del periodo establecido para sedimentar, se toma lectura y apunte del nivel de la parte superior de la suspensión arcillosa (lectura de arcilla). A continuación, se procede a introducir dentro del cilindro el dispositivo de toma de lecturas, y se desciende de manera suave hasta que llegue a la parte superior de la arena procurando que el instrumento no toque el orificio del cilindro.

Cuando el disco de asentamiento repose en la parte superior de la arena se restan 10" al nivel demarcado por el borde superior del indicador y se procede a registrar dicha cuantía como "lectura de arena".

ANEXO 10

Análisis Granulométrico de los agregados grueso y fino (INV E-213-22)

➤ Granulometría Grava

Tabla 35. Porcentajes obtenidos de Granulometría de Grava

Tamiz	Retiene (g)	Pasa (g)	Pasa %
3/4	0	2947.8	100
1/2	826	2121.8	72
3/8	980.1	1141.7	39
No. 4	1113.2	28.5	1
No. 10	10.3	18.2	1
Fondo	18.2	0.00	0

Fuente: elaboración propia

➤ Granulometría Arena

Tabla 36. Porcentajes obtenidos de Granulometría de Arena

Tamiz	Retiene (g)	Pasa (g)	Pasa %
No. 4	5.2	945.7	99
No. 10	9.6	936.1	98
No.40	273.7	662.4	70
No. 80	556.7	105.7	11
No. 200	86.7	19	2
Fondo	19	0.00	0

Fuente: elaboración propia

➤ **Granulometría Arenilla**

Tabla 37. Porcentajes obtenidos de Granulometría de Arenilla

Tamiz	Retiene (g)	Pasa (g)	Pasa %
No. 4	146.5	798.6	84
No. 10	494	304.6	32
No.40	252.4	52.2	6
No. 80	39.7	12.5	1
No. 200	11.9	0.6	0
Fondo	0.6	0.00	0

Fuente: elaboración propia

ANEXO 11

Índices de Aplanamiento y de Alargamiento de los Agregados para Carreteras
(INV E 230-13)

➤ **Alargamiento**

Tabla 38. Alargamiento tamices 3/4 - 1/2

Tipo	Wmuestra (g)
Larga	63,7
No larga	286,2

Fuente: elaboración propia

Tabla 39. Alargamiento tamices 1/2 - 3/8

Tipo	Wmuestra (g)
Larga	137,1
No larga	246,4

Fuente: elaboración propia

Tabla 40. Alargamiento tamices 3/8 - 1/4

Tipo	Wmuestra (g)
Larga	169,8
No larga	134,2

Fuente: elaboración propia

➤ Aplanamiento

Tabla 41. Aplanamiento tamices 3/4 - 1/2

Tipo	Wmuestra (g)
Plana	93,1
No Plana	256,8

Fuente: elaboración propia

Tabla 42. Aplanamiento tamices 1/2 – 3/8

Tipo	Wmuestra (g)
Plana	61,7
No Plana	321,8

Fuente: elaboración propia

Tabla 43. Aplanamiento tamices 3/8 - 1/4

Tipo	Wmuestra (g)
Plana	41,6
No Plana	262,4

Fuente: elaboración propia

ANEXO 12

Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso (INV E 227-13)

Tabla 44. Caras fracturadas tamices 3/4 - 1/2

Caras	Wmuestra (g)
1	51,8
+2	120,1

Fuente: elaboración propia

Tabla 45. Caras fracturadas tamices 1/2 - 3/8

Caras	Wmuestra (g)
1	52,7
+2	181,9

Fuente: elaboración propia

Tabla 46. Caras fracturadas tamices 3/8 - 1/4

Caras	Wmuestra (g)
1	85
+2	222,4

Fuente: elaboración propia

ANEXO 13

Determinación de la Resistencia del Agregado Grueso a la Degradación por Abrasión, utilizando el aparato de Micro-deval (INV E 238-13)

➤ Micro-deval arena

Tabla 47. Datos iniciales de ensayo Micro-deval de arena

Tamiz que pasa	Tamiz que retiene	Wmuestra seca (g)
No	No	g
4	8	40
8	16	115
16	30	180
30	50	120
50	100	38
100	200	7

Fuente: elaboración propia

➤ **Micro-deval arenilla**

Tabla 48. Datos iniciales de ensayo MicroDeval de arenilla

Tamiz que pasa	Tamiz que retiene	Wmuestra seca (g)
No	No	g
4	8	40
8	16	115
16	30	180
30	50	120
50	100	38
100	200	7

Fuente: elaboración propia

➤ **Micro-deval grava**

Tabla 49. Datos iniciales de ensayo Micro-deval de grava

Tamiz que pasa	Tamiz que retiene	Wmuestra seca (g)
No	No	g
0.5	0.375	750
0.375	0.25	375
0.25	4	375

Fuente: elaboración propia

ANEXO 14

Densidad, Densidad Relativa (Gravedad específica) y Absorción del agregado fino y grueso (INV E 222-13 e INV E-223-13)

Tabla 50. Datos iniciales gravedad específica de grava

GRAVA		
W_{inicial}	2500	g
$W_{\text{superficialmente seco}}$	2456,4	g
$W_{\text{sumergido}}$	1506,9	g
W_{seco}	2418,7	g

Fuente: elaboración propia

Tabla 51. Datos iniciales gravedad específica de arena

ARENA		
$W_{\text{muestra seca}}$	610.2	g
$W_{\text{superficialmente seco}}$	693	g
$W_{\text{sumergido}}$	1001.4	g
W_{seco}	538.2	g

Fuente: elaboración propia

Tabla 52. Datos iniciales gravedad específica de arenilla

ARENILLA		
$W_{\text{muestra seca}}$	566.8	g
$W_{\text{superficialmente seco}}$	692.8	g
$W_{\text{sumergido}}$	100.9	g
W_{seco}	523.4	g

Fuente: elaboración propia

ANEXO 15

Determinación del valor de 10% de finos (INV E 224-13)

➤ Muestra seca y penetración de 15 mm

Tabla 53 Datos laboratorio 10% de finos

Tipo de masa	Peso (g)
Usada	2734
Pasa	211,5
Retiene	2522,1

Fuente: elaboración propia

ANEXO 16

Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1½") por medio de la máquina de los ángeles (INV E 218-13)

Tabla 54. Datos iniciales ensayo máquina de los ángeles

Tamiz que pasa	Tamiz que retiene	W _{muestra}	W _{muestra ensayo}	W _{muestra seca}
No	No	g	g	g
3/4	1/2	2500	5000	3862.4
1/2	3/8	2500		

Fuente: elaboración propia

ANEXO 17

Equivalente de arena de suelos y agregados finos (INV E 133-13)

➤ **Equivalente de arena (Arena)**

Tabla 55. Datos de equivalente de arena (Arena)

Muestra	Arcilla (pulg)	Arena (pulg)
1	4.6	3.1
3	4.8	3.2
4	5	3.3

Fuente: elaboración propia

➤ **Equivalente de arena (Arenilla)**

Tabla 56. Datos de equivalente de arena (Arenilla)

Muestra	Arcilla (pulg)	Arena (pulg)
1	4.8	3.6
2	4.8	3.6
3	4.6	3.6

Fuente: elaboración propia