

**ANÁLISIS DE ADITIVOS DE ADHERENCIA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS CON
AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO**

ANDERSON STEVEN MOYANO RODRÍGUEZ
JOSÉ NICOLÁS PINZÓN ACUÑA
SEBASTIÁN ECHEVERRÍA COCK

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D.C

2022

**ANÁLISIS DE ADITIVOS DE ADHERENCIA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS CON
AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO**

ANDERSON STEVEN MOYANO RODRÍGUEZ
JOSÉ NICOLÁS PINZÓN ACUÑA
SEBASTIÁN ECHEVERRÍA COCK

Trabajo de grado presentado para optar el título de Ingeniero Civil

Director:

IC - JUAN GABRIEL BASTIDAS MARTÍNEZ

UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D.C

2022

Nota de aceptación.

Firma del jurado.

AGRADECIMIENTOS

Nuestros agradecimientos están dirigidos a Dios por guiarnos en cada uno de los pasos que nos permitieron alcanzar este logro, uno de los hitos más importantes en nuestra vida.

Agradecemos a nuestros padres, quienes nos han apoyado y contribuido en gran manera para alcanzar este logro, así mismo, agradecemos a nuestros hermanos y/o hermanas por sus consejos y palabras de aliento que nos ayudaron a no desistir en nuestro proceso de formación.

Al Ingeniero Juan Gabriel Bastidas por compartirnos toda su experiencia, tiempo y dedicación que contribuyeron al desarrollo de esta investigación.

A la Universidad Piloto De Colombia, por formarnos como profesionales íntegros, con la ayuda de sus excelentes docentes e ingenieros.

Finalmente, agradecemos a Elkin Serrano y Jerson Díaz, técnicos de laboratorio de pavimentos de la Universidad Piloto de Colombia, quien nos acompañaron en todo el proceso, nos compartieron sus conocimientos y experiencia para los ensayos de laboratorio.

DEDICATORIA

Dedicamos este proyecto primeramente a Dios, por darnos la sabiduría, perseverancia y persistencia por culminar satisfactoriamente este trabajo de investigación.

Seguidamente, a nuestras familias, por brindarnos un apoyo incondicional en todas nuestras etapas de aprendizaje, del mismo modo, a todos nuestros amigos y compañeros que nos ayudaron con su experiencia, conocimientos y consejos a lo largo de nuestra formación como Ingenieros Civiles.

CONTENIDO

1.	RESUMEN	7
2.	INTRODUCCIÓN	8
3.	OBJETIVOS	9
3.1	Objetivo general	9
3.2	Objetivos específicos	9
4.	PROBLEMÁTICA	10
4.1.	Descripción del problema.	10
5.	JUSTIFICACIÓN.....	12
6.	ANTECEDENTES	14
7.	MARCO TEÓRICO.....	17
7.1	Materiales de construcción.....	17
7.2	Clasificación de los asfaltos	18
7.3	Caracterización de material granular según su procedencia.	18
7.4	Caracterización de material granular por su tamaño	19
8.	MARCO CONCEPTUAL	21
8.1	Generalidades	21
8.2	Clasificación de las mezclas asfálticas	22
8.3	Características de las mezclas.	23
8.4	Determinación RCA	24
8.5	Cal Hidratada en pavimentos asfálticos	25
9.	METODOLOGÍA.....	26
9.1	Acoplo de información	26
9.2	Metodología de diseño Marshall	27
9.2.1	Caracterización del material.....	27
9.2.2	Granulometría de briquetas.....	27
9.2.3	Caracterización del agregado fino.....	28
9.2.4	Caracterización de agregados gruesos.....	29
9.2.5	Caracterización física del asfalto	30
9.2.5	Granulometría MDC 19	32
9.3	Ensayos de laboratorio.....	33
9.3.1	Ensayo de tracción indirecta en estado seco y húmedo (INV E-725-13).....	33
10.	ANÁLISIS DE DATOS.....	39
10.1	Ecuaciones para el cálculo de la resistencia a la tensión	39
11.	CONCLUSIONES	44
12.	RECOMENDACIONES	45
13.	BIBLIOGRAFÍAS	46

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Granulometría Marshall	28
Tabla 2. Ensayos para caracterización del material – Agregado fino (AN).....	29
Tabla 3. Cumplimiento agregado fino requerido por la norma	29
Tabla 4. Ensayos para caracterización del material – Agregado grueso (AN vs RCA).....	30
Tabla 5. Cumplimiento agregado grueso requerido por la norma.....	30
Tabla 6. Película delgada rotatoria por norma (INV E 720-13).....	31
Tabla 7. Cumplimiento asfalto requerido por la norma	31
Tabla 8. Caracterización del asfalto	31
Tabla 9. Granulometría para mezcla MDC-19	32
Tabla 10. Granulometría para ensayo Marshall	33
Tabla 11. Clasificación de asfalto en cada briqueta	34
Tabla 12. Granulometría para ensayo de RTI	35
Tabla 13. Verificación del diseño Marshall	40
Tabla 14. Resistencia a la tensión en estado seco	41
Tabla 15. Resistencia a la tensión en estado húmedo.....	41
Tabla 16. Relación de la tensión retenida.....	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Identificación briquetas.....	35
Figura 2. Briquetas Sumergidas.....	37
Figura 3. Numeración Briquetas	36
Figura 4. Ensayo RTI.....	37
Figura 5. Probeta N°7.....	37
Figura 6. Probeta N°7 fallada por carga máxima	38
Figura 7. Grafica comparativa ensayo RTI	42
Figura 8. Grafica comparativa RRT	43

1. RESUMEN

La generación y manejo de residuos sólidos industriales es considerada un problema ambiental a nivel mundial. Por esta razón, varios estudios se han enfocado en la implementación de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) para las capas de pavimento, con énfasis en el uso de Agregados de Concreto Reciclado (RCA). El objetivo de este trabajo es establecer el impacto de algunas de sus propiedades mecánicas al realizar mezclas bituminosas con RCA y la adición porcentual de Cal Hidratada, en donde se diseñó la Mezcla Densa en Caliente (MDC 19), de acuerdo a las especificaciones del Instituto Nacional de Vías – Artículo 450 del 2013. Se realizaron 4 tipos de concreto asfáltico; de control, con RCA, con RCA y 1% de Cal y finalmente, RCA y 2% de Cal.

Se determinó el porcentaje óptimo de asfalto para el compuesto por medio del diseño por metodología Marshall (INV-E 748 -13) y la capacidad de carga a través del laboratorio de Tracción Indirecta (RTI) (INV-E 725-13). Al sustituir el rugoso, se respetan los criterios de diseño de asfalto de referencia y se aumenta la carga en el RTI, requiriendo así un ligero aumento del contenido de betún. De igual forma, al reemplazar el 100% del CA que pasa por los tamices 3/4" (19mm) y 1/2" (37.5mm) por agregados de RCA, se logró un comportamiento satisfactorio bajo carga mono tónica.

Por último, se obtienen valores porcentuales de la resistencia retenida por el ensayo de tracción indirecta para diferentes tipos de agregados reciclados de concreto, junto con estos valores porcentuales relativos al mínimo exigido por el INVIAS, en el artículo de especificación general requerido para la aprobación de diseño de mezclas bituminosas, la información obtenida sugiere que con estos resultados, es posible superar el alcance del proyecto mostrando altos valores de adherencia y porcentaje de resistividad superiores a las normativas del Instituto Nacional de Vías.

2. INTRODUCCIÓN

En el área de la construcción se genera una gran cantidad de residuos debido a las actividades de demolición, RCD, los cuales ocasionan serios impactos ambientales si no se manejan adecuadamente de acuerdo a las disposiciones legales vigentes en el territorio de Colombia. Según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, en Colombia los residuos de construcción y demolición (C&D) representan en promedio el 40% de los residuos sólidos, y la producción promedio de C&D es de 22.270.338 toneladas, de las cuales se retiran el 60% y el 90% en lugares autorizados; y el resto se desecha en vertederos a cielo abierto. En 2013 se produjeron en Bogotá alrededor de 15 millones de toneladas de RCD/año, lo que equivale a unos 2.000 kg/persona/año.

Con la intención de ayudar a la gran problemática ambiental que se produce por la generación y gestión final de sólidos industriales, se pretende potencializar el uso de agregados reciclados de concreto (RCA) derivados de los residuos de obras de construcción y demolición (RCD), por esto nos enfocaremos en el uso de estos agregados en mezclas asfálticas específicamente en las mezclas densas en caliente 19 (MDC – 19), este procedimiento posee bases técnicas y de investigación ya probadas en el cual se descubrió que usando un porcentaje común de entre el 5% y el 5.5% estos agregados no tenían la adherencia necesaria y que para poder funcionar con gran efectividad se debía usar hasta un 7% de asfalto, lo cual no solo hace que esta mezcla sea poco viable económicamente, si no que nos desvía del objetivo de este proyecto el cual es ayudar la protección del medio ambiente, por eso hemos decidido usar un aditivo que pueda mejorar esta adherencia y así poder ayudar a solucionar esta problemática ambiental ofreciendo una buenas prácticas para proyectos de construcción civil..

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Analizar el comportamiento de las mezclas asfálticas con agregados reciclados de concreto, con respecto a la adherencia de los diferentes aditivos en este caso cal hidratada.

3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar los materiales por medio de granulometría el diseño en mezcla densa en caliente con tamaño máximo nominal de 19 mm, de igual forma encontrar el óptimo porcentaje de asfalto y aditivos para adherencia.
- Evaluar el comportamiento mecánico que puede experimentar una mezcla MDC-19 cuando se sustituyen la fracción gruesa por agregados reciclados de concreto (RCA).
- Diseñar las mezclas asfálticas óptimas para los ensayos de resistencia a tracción indirecta y analizar los resultados con respecto a la variable de la adherencia de los agregados.

4. PROBLEMÁTICA

4.1. Descripción del problema.

La industria de la construcción ha tenido una gran influencia en el desarrollo de los países, tanto en términos de estructura económica como de bienestar de la comunidad. Sin embargo, inherente a sus acciones y actividades económicas, esta industria interactúa constantemente con el medio ambiente, haciendo de la conservación una prioridad. Según Archila Acelas y Aparicio Jurado (2018) los principales impactos ambientales en la construcción de vías de transporte terrestre relacionados con la pavimentación de vías son:

a. Impacto sobre el medio atmosférico. En esta etapa se incrementa las emisiones a la atmosfera debido a la utilización de maquinarias, transporte de material, explotación de canteras y operación de planta (Vega, 2002).

b. Impacto sobre el clima. El impacto que se produce en el clima es el cambio micro climático debido a la destrucción de la vegetación y la retractación del asfalto (Vega, 2002).

c. Impacto sobre la geología y la geomorfología. Actividades como el movimiento de tierras, la minería de arroyos y la ocupación del espacio crean impactos tales como el riesgo de inestabilidad de laderas, aumento de la erosión y pérdida de recursos hídricos. Si estos impactos no se controlan desde la etapa de construcción, pueden persistir durante la operación y afectar componentes ambientales como los organismos y la sociedad. (Vega, 2002).

d. Impacto en la hidrología superficial y subterránea. Actividades como movimiento de tierras, desvío de caudales, aplicación de aditivos, derrames accidentales. Crean impactos en el desarrollo de la calidad del agua y el flujo de tráfico. Los impactos no se producen donde ocurren, pero pueden generarse en áreas remotas e incluso en áreas bastante grandes, por lo que el área en consideración debe ser mucho más grande que el área inmediata. (Vega, 2002).

e. Impacto sobre los suelos. Las actividades como el movimiento de tierra, explotación de material, generan impactos sobre los suelos (Vega, 2002).

f. Impacto sobre la vegetación. El impacto que se genera depende de la superficie ocupada por el proyecto. Las actividades como la realización de cortes y zanjas, deforestación puede ocasionar la desaparición de especies endémicas, cambios climáticos, cambios del paisaje (Vega, 2002).

g. Impacto sobre la fauna. La fauna se ve afectada por las actividades como el movimiento de materiales, cortes de terraplenes, esto genera un impacto en el cambio de hábitat, la erradicación de zonas de reproducción y alimentación (Vega, 2002).

h. Impacto sobre el paisaje. Las actividades que afectan al paisaje principalmente es la etapa de construcción pues produce un cambio en la vegetación y morfología del lugar (Vega, 2002). (p 34-35).

De igual manera las afectaciones que tienen su proceso de construcción, donde podemos observar que al usar pavimentos asfálticos o flexibles, podemos generar varias incidencias ambientales en los cuales se pueden encontrar: la disminución de la humedad relativa, la velocidad del viento y el aumento de la temperatura.

5. JUSTIFICACIÓN

Anualmente en el mundo se producen 1 billón de toneladas de residuos de demolición, de las cuales 510 millones son producidas en Europa. En promedio solo el 8% de estos residuos se reciclan, aunque en países como Alemania, Holanda y Reino Unido cerca del 20% de agregados reciclados se reutilizan.

La obtención de agregados de concreto reciclado se da como fruto de la trituración del concreto proveniente de la demolición de estructuras o del concreto sobrante de algunos procesos en que muchas veces se solidifica y se dispone como escombros. (ARGOS,2020)

Según la revista semana (2021), “En Colombia se generan cerca de 12 millones de toneladas de basura al año, de las cuales se recicla en promedio un 16,5%. Cada día en el país se producen residuos por el orden de las 32.000 toneladas” (p. 1) En 2019, según datos de la Superintendencia de Servicios Públicos, la cifra total fue de 11,8 millones de toneladas.

En consecuencia, se encuentran que los residuos de construcción y demolición forman en su mayoría estos residuos, para el caso de la ciudad de Bogotá esta tiene la mayor cantidad de residuos RCD, generados debido a la alta demanda de las obras civiles que tiene cada año, sin embargo, hay muchos actores involucrados como empresas constructoras públicas o privadas ejecutando obras civiles y estatales. Los institutos de desarrollo, entre otros, optan por el método más sencillo: disponer los residuos generados en vertederos legalmente dispuestos en donde funcionen con las condiciones mínimas requeridas para esta actividad, de acuerdo con lo reglamentado por el gobierno distrital. Sin embargo, hay muchos vertederos que también funcionan ilegalmente sin planes de manejo que permitan controlar este tipo de residuos, por lo tanto son responsables de la contaminación del medio ambiente. Entre los desechos de construcción se encuentran los agregados reciclados de concreto (RCA) en los cuales enfocaremos nuestra investigación.

Por otra parte el comportamiento mecánico que tienen los agregados gruesos es similar al de los agregados RCA en una mezcla asfáltica MDC-19; un estudio encontró que es

viable el uso de estos agregados como sustituto del agregado convencional, pero descubrieron que el porcentaje de asfalto usado para conseguir esta resistencia a la tracción fue de un 7%, lo cual indica un alto uso de asfalto, procedimiento no viable para la conservación del medio ambiente y el coste de este tipo de mezclas. (Bastidas, Rondón, Contreras, Forero, y Rojas, 2021, p 10).

Por lo tanto, nuestra investigación buscara aditivos que ayuden en la adherencia de los agregados con el fin de disminuir el porcentaje de asfalto utilizado en mezclas con agregados RCA.

6. ANTECEDENTES

Trabajos como los relacionados al comportamiento mecánico de mezclas asfálticas MDC con RCA a través del modelo de Witzack pueden contribuir a la determinación de mejores prácticas de pavimentación que disminuyan el impacto medioambiental en las zonas de influencia de ejecución de este tipo de obras civiles. En este trabajo de investigación los autores consultados calculan los módulos dinámicos en mezclas asfálticas en donde se usaron varios porcentajes de agregado RCA (0%, 25%, 35%, 50% y 75%) por medio del modelo de Witzack. Es importante mencionar que la ecuación de Witzack se utiliza para obtener el módulo dinámico de la mezcla asfáltica para un rango de temperatura variable entre (-17,7 y 54,4 °C) y la frecuencia de carga de la herramienta rango dinámico (0.125 Hz) considerando situaciones de envejecimiento con disponibilidad de información sobre las especificaciones del material o las características volumétricas de la mezcla. De este proyecto podemos deducir que en cuanto al uso de RCA para la elaboración de mezclas bituminosas, se puede recomendar su utilización con un porcentaje de reposición cercano al 35%, debido a que su influencia en el comportamiento mecánico no es tan grande como en mezclas con porcentajes elevados, este porcentaje de reposición es del 25 %,%. Por otro lado, dado que el módulo dinámico es muy reducido, se recomienda usarlo en carreteras con poco tráfico o en capas de roca triturada, donde se deben realizar las pruebas necesarias para asegurar su uso. (Félix-Rodríguez, A. A., & Torres-Chacón, E. A, (2021).

El estudio de mezclas asfálticas densas con adición de agregados reciclados de concreto (RCA) (Doctoral dissertation) utilizado en este trabajo de investigación determinaron estos autores que el contenido de asfalto más óptimo mediante el uso de los agregados RCA como resultado de las pruebas de Marshall y cántabro donde demostraron que el porcentaje más óptimo con agregados RCA es del 7 %, debido a que la adherencia de los agregados no fue tan óptima, con un porcentaje de asfalto común (5% -5.5%), de este proyecto podemos comparar los ensayos de cántabro demostrados por ellos y compararlos con

el nuestro y así mismo poder ver o demostrar el cómo la cal viva influye en estas mezclas asfálticas. Infante Rodríguez, N., & Torres Daza, H. D. (2018). En ese proyecto estos autores realizaron el diseño de mezclas asfálticas drenantes (MD) con el uso de agregados RCA y lo compararon con el agregado convencional AC. Para tal fin determinaron el porcentaje óptimo de asfalto, concluyendo que las MD con RCA presenta un mayor contenido de asfalto en referencia a la mezcla de control. Adicionalmente se observa similitud en la resistencia a la tracción y de aumento de adherencia en la MAD con RCA, con respecto a la muestra de control. Por lo tanto, se puede concluir que la aplicación de RCA en MD de la forma propuesta es viable desde el punto de vista técnico y ambiental, por permitir una forma de disposición del RCA ambientalmente correcta Contreras Zartha, L., Forero Castaño, S. O., & Rojas Rozo, L. D. (2019).

Aplicación de agregados reciclados de concreto para mezclas asfálticas de pavimentos: un aporte para la construcción del desarrollo sostenible. En ese trabajo se evaluaron los agregados reciclados de concreto en mezclas asfálticas MCD -19 por medio de la metodología Marshall donde se sustituyó la fracción gruesa de estos agregados y se compararon con el agregado común, por pruebas fallidas en el laboratorio debido a la resistencia por la tracción indirecta en estado húmedo y seco y la resistencia a la fricción por medio del ensayo cántabro, se tiene este gran resultado, se puede concluir que la aplicación de los agregados RCA es viable desde el punto de vista técnico, lo cual contribuye a la preservación y conservación en términos de la sostenibilidad. Sánchez Losada, J. M., Bastidas Martínez, J. G., & Martínez Rojas, E. (2019).

Tratamiento superficial de agregados reciclados de concreto para su utilización en mezclas asfálticas. Los autores de dicho trabajo decidieron demostrar utilizando agregados reciclados en concreto en mezclas asfálticas con la implementación del uso de sulfato de magnesio, encontrando que el agregado RCA expuesto al desgaste por la acción de sulfato de

magnesio, presentó una disminución a la absorción de asfalto, al someterlo a tres ciclos en la mezcla. d. Barbosa Macías, J. F., Jarava Jaramillo, A. G., & López Albornoz, J. D. (2020).

Evaluación de una mezcla de concreto asfáltico con incorporación de agregados reciclados de concreto. *Revista UIS Ingenierías*, 20(2), 75-84. en este artículo los autores realizaron tres ensayos donde se sustituyó la fracción de agregado grueso y fino y se comparó con la mezcla asfáltica con el agregado convencional, en donde se determinó que el reemplazo de una pequeña parte de CA con RCA reduce en gran medida la resistencia bajo carga monótona de la mezcla de referencia. Al sustituir el rugoso se respetan los criterios de diseño del asfalto de referencia y se aumenta el RTI, pero se requiere un ligero aumento del contenido de betún. Al sustituir todos los agregados por RCA, se obtienen los resultados requeridos bajo carga monofónica, pero también se debe aumentar notablemente el contenido de betún. Bastidas-Martínez, J. G., Rondón-Quintana, H. A., Contreras-Zartha, L., Forero-Castaño, S., & Rojas-Rozo, L. (2021).

7. MARCO TEÓRICO

7.1 Materiales de construcción

La creciente demanda de vivienda en la década de 1990, debido al aumento de la población que vive en suelo urbano, produjo un incremento en el volumen de materiales necesarios para la construcción. Esta dinámica está directamente relacionada con el fuerte crecimiento de la industria de la construcción durante este período, mostrando que la participación del sector en el PIB en 2008 fue de 5,2%, en comparación con 3,7% en 2000. La construcción sostenible incluye criterios de la selección de materiales y procesos de construcción, incluido el entorno urbano y su desarrollo, para gestionar los residuos generados. Este tipo de estructura está buscando la gestión completa de los recursos naturales, como la economía terrestre, el agua y la energía, cuando hablamos de obras sostenibles, hablando sobre las obras para crear un impacto de pimienta extremadamente más negativo para el medio ambiente. El concepto de sostenibilidad en la construcción se basa en el desarrollo de un modelo que permite la construcción de la construcción civil y proponer soluciones a las cuestiones ambientales de hoy, sin retirarse en la tecnología de progreso público ha facilitado el proceso de construcción y no se rinde la creación de estructuras de participación. Según las necesidades del usuario. El Consejo de Construcción Sostenible de Colombia (CCCS) estima más factores al referirse a las mejores prácticas a lo largo del ciclo de vida de las estructuras (diseño, construcción de construcción y operación), contribuye efectivamente al impacto mínimo en este campo en el clima. Cambio, consumo de recursos y pérdida de biodiversidad, algunos significan incluyen: gestión del ciclo de vida, energía limpia, materias primas originarias de la producción a largo plazo y creando una cultura de las personas que piensan en el medio ambiente.

7.2 Clasificación de los asfaltos

- **Cementos asfáltico (AC)** Son los más utilizados en pavimentos rígidos. Se pueden clasificar en tres sistemas diferentes: viscosidad antes y después del envejecimiento y penetración. Se preparan comercialmente en grados o rangos de consistencia, basados en pruebas de penetración, por ejemplo: AC 40-50, AC 60-70, AC 80-100. Los números indican la penetración en décimas de milímetro. El ensayo de penetración es una de las pruebas de clasificación más usadas en la caracterización del asfalto. (Larson, 1977)
- **Asfaltos líquidos.** Se producen diluyendo cemento asfáltico en disolventes derivados del petróleo. Se agrupan en 3 clases, dependiendo de la velocidad de evaporación del solvente. (curado del asfalto).
 - o SC: Asfaltos de curado lento.
 - o MC: Asfaltos de curado medio.
 - o RC: Asfaltos de curado rápido.
- **Materiales pétreos.** El agregado de roca es un material mineral duro e inerte que se utiliza en forma de partículas calibradas o escamas como parte de un pavimento dúctil. Los áridos se utilizan tanto en sustratos granulares como para la preparación de mezclas asfálticas. (USON, 2005)

7.3 Caracterización de material granular según su procedencia.

- **Agregados naturales:** Formados por procesos geológicos.
- **Agregados artificiales:** Son el resultado de una transformación de áridos naturales, que son áridos artificiales como productos secundarios. Algunos de estos agregados son los que forman las escorias siderúrgicas, la arcilla cocida, el hormigón reciclado y la piedra triturada.

- **Piedra triturada:** Producto resultante de la trituración artificial de rocas, cantos rodados o grandes bloques, todos ellos con bordes limpios, como resultado de operaciones de trituración.
- **Escoria siderúrgica:** Residuos de minerales no metálicos, constituidos principalmente por silicatos y aluminosilicatos de calcio y otras bases, y producidos simultáneamente con la producción de hierro.

7.4 Caracterización de material granular por su tamaño

- **Agregado grueso:** Los agregados son retenidos principalmente por el tamiz número 4 (de 4.75mm); o bien, aquella proporción de un agregado que es retenida por el tamiz No. 4 (de 4.75 mm). Este agregado debe provenir de la descomposición de roca, grava o una combinación de ambos; Debe contener residuos limpios, resistentes y duraderos, evitando la presencia de partículas planas, alargadas y blandas. de mezclas de compactación. El árido grueso utilizado en nuestro medio se conoce como “Grava”, que es el resultado de la rotura y desgaste natural de la roca o del proceso de trituración de la roca.
- **Agregado fino:** Agregado que pasa por el tamiz de 3/4 in (9.5 mm) y casi pasa por completo por el tamiz No. 4 (de 4.75 mm). Y es principalmente retenido por el tamiz No. 200 (75 μ m); o la fracción que pasa por el tamiz número No. 200 (de 75 μ m); o bien, aquella porción de un agregado que pasa por el tamiz No. 4 (de 4.75 mm) y es retenida de modo predominante por el No. 200 (de 75 μ m). El agregado fino debe provenir en su totalidad de la trituración de piedra triturada o grava natural.
(INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, 2007)
- **Llenante mineral:** Es la fracción de agregado que pasa por un tamiz de 75 μ m (n° 200), será polvo de caliza, ceniza de carbón o roca reconstituida “El relleno mineral puede provenir de rocas agregadas, separado de ellos por ciclones de plantas dosificadoras, o agregado a la mezcla por separado de ellos como producto comercial

o preparado especialmente para este propósito están excluidas las proporciones que probablemente queden adheridas al árido.

- **Método Marshall:** Para realizar el diseño de mezclas asfálticas en Colombia se suele utilizar el método Marshall, el cual se encarga de determinar el contenido óptimo de asfalto para un determinado agregado, además brinda información sobre las propiedades de las mezclas asfálticas en caliente para el ajuste óptimo de la densidad. y el contenido en blanco debe ser considerado durante la construcción. Este método es aplicable únicamente a mezclas en caliente con cemento asfáltico clasificadas por viscosidad, penetración y contenido de agregados hasta 25 mm. Marshall es ampliamente utilizado en el diseño de laboratorio, se utiliza para pruebas de campo de mezclas asfálticas. (Instituto Nacional de Vialidad, 2007)

8. MARCO CONCEPTUAL

8.1 Generalidades

- **Mezclas asfálticas.** Es un compuesto hecho por la combinación de un aglutinante asfáltico y agregado de roca en proporciones precisas, que consta de aproximadamente 90% de agregado de roca gruesa y fina, 5% de polvo mineral (relleno) y otro aglutinante asfáltico de 5%, estos son ingredientes muy importantes. Generalmente se producen en plantas de asfalto, pero en algunos casos se pueden producir en el sitio. Las proporciones de los minerales determinan las propiedades físicas exactas de la mezcla y el desempeño para un uso dado. (IDU, 2010)

Las mezclas asfálticas es el material más utilizado en la ejecución de carreteras, aeropuertos, aparcamientos y también se usa en el núcleo de ciertas presas como impermeabilizante. Toda mezcla asfáltica es diseñada para cumplir con lo siguiente:
 - La película de asfalto debe ser duradera y resistente al desprendimiento debido al impacto del agua, la abrasión debido al tráfico.
 - Debe estar sellado para que los componentes no estén sujetos a los agentes atmosféricos.
 - Impermeabilización de la estructura del pavimento, haciéndolo menos sensible a la humedad y resistente a la entrada de agua de lluvia.
- **Densidad.** Es el peso de un volumen específico de la mezcla. Las densidades obtenidas en laboratorio son las densidades estándar y las obtenidas in situ se expresan en porcentaje de esta densidad. La alta densidad en el pavimento terminado conduce a una mayor durabilidad.
- **Vacíos de aire.** Estos son los pequeños espacios de aire, o bolsas, que están presentes entre los agregados cubiertos en la mezcla final compactada. Es esencial que todas las mezclas bien graduadas contengan algún porcentaje de vacíos para permitir una mayor

compactación en presencia de tráfico y proporcionar espacio para que el betún fluya durante la compactación adicional.

- **Contenido de asfalto.** El contenido total de betún es la cantidad que debe agregarse a una mezcla para lograr la calidad, trabajabilidad y resistencia deseadas. La finura del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo de asfalto, lo que significa que cuanto más fina sea la mezcla, mayor será el área de superficie total y mayor será la cantidad de asfalto necesaria para recubrir todo uniformemente.

8.2 Clasificación de las mezclas asfálticas

Existen parámetros de clasificación para establecer las diferencias entre las distintas mezclas y las clasificaciones pueden ser: gruesas (agregados más grandes) exigen menos asfalto debido a que poseen menos área superficial total.

El pavimento contiene una capa superior que facilita al proporcionar la superficie para una rodadura segura, confortable y estética. Existen diferentes tipos de clasificación para poder establecer las diferencias entre las distintas mezclas.

Por fracciones de agregado pétreo empleado.

- Masilla asfáltica: Polvo mineral más ligante.
- Mortero asfáltico: Agregado fino más masilla.
- Concreto asfáltico: Agregado grueso más mortero.
- Macadam asfáltico: Agregado grueso más ligante asfáltico.

Por la temperatura de puesta en obra.

- Mezclas asfálticas en Caliente: Se fabrican con asfaltos a unas temperaturas elevadas, se calientan también los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos.

- Mezclas asfálticas en Frío: El ligante suele ser una emulsión asfáltica (debido a que se sigue utilizando en algunos lugares los asfaltos fluidificados), y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.

8.3 Características de las mezclas.

Siempre se debe lograr un óptimo desempeño de las mezclas asfálticas en caliente, se debe realizar un buen diseño de esta mezcla, es así como varias características contribuyen a la buena calidad de los pavimentos.

Generalmente, la mezcla es el resultado de la combinación de cemento bituminoso y agregado de roca en una proporción predeterminada y precisa; Se pueden servir fríos o calientes, siendo más comunes las mezclas calientes.

“La mezcla densa en caliente tiene la particularidad de ofrecer a la estructura la resistencia y elasticidad que necesita para soportar y absorber las cargas que circulan.”

(INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO, 2008)

- **Resistencia a la fatiga.** Es la resistencia a la flexión constante bajo las cargas vivas del tránsito. Mide la capacidad de la mezcla a deformarse repetidamente sin fracturarse.
- **Resistencia al deslizamiento.** Capaz de proporcionar suficiente fricción para minimizar el deslizamiento o patinaje de las ruedas, especialmente cuando la superficie está mojada.
- **Estabilidad.** La estabilidad del asfalto es su capacidad para resistir el cambio y la deformación bajo cargas de tráfico. El pavimento estable puede mantener su forma y suavidad bajo cargas repetidas, el pavimento inestable producirá abolladuras, ondulaciones y desplazamiento mixto, lo que afecta directamente la función de la calle.

- **Flujo.** El flujo está formado por la deformación máxima obtenida en la muestra de asfalto en el momento de la fractura debido a la aplicación de la carga. El caudal se expresa en porcentaje de pulgadas.

8.4 Determinación RCA

Para realizar un cumplimiento apropiado a las diferentes Normas Técnicas Colombianas para la ejecución y construcción de diferentes obras de infraestructura debemos tener en cuenta el origen, transporte y manejo de los diferentes RCA, en donde, consecuentemente se generarán fases de procesamiento para este agregado. Entre las cuales se encuentran:

Fase 1: La correcta demolición “in situ”: Para esta fase se debe tener en cuenta la separación de los diferentes escombros encontrados en la demolición, como lo son, carpintería en madera, carpintería metálica, mampostería y elementos en concreto, siendo este último, el que más relevancia debe tener, para así reducir el contenido de materiales no deseados, encontrados en las diferentes demoliciones.

Fase 2: Transformación a áridos: Se deben llevar los RCA a una planta de producción de árido reciclado, en donde se requieran electroimanes para la separación del acero de refuerzo.

Fase 3: Métodos de eliminación: Para realizar una correcta eliminación de impurezas se deben retirar cantidades de contaminantes y residuos orgánicos mediante tres tipos de eliminación, como lo son, tamizados, eliminación manual y separación magnética.

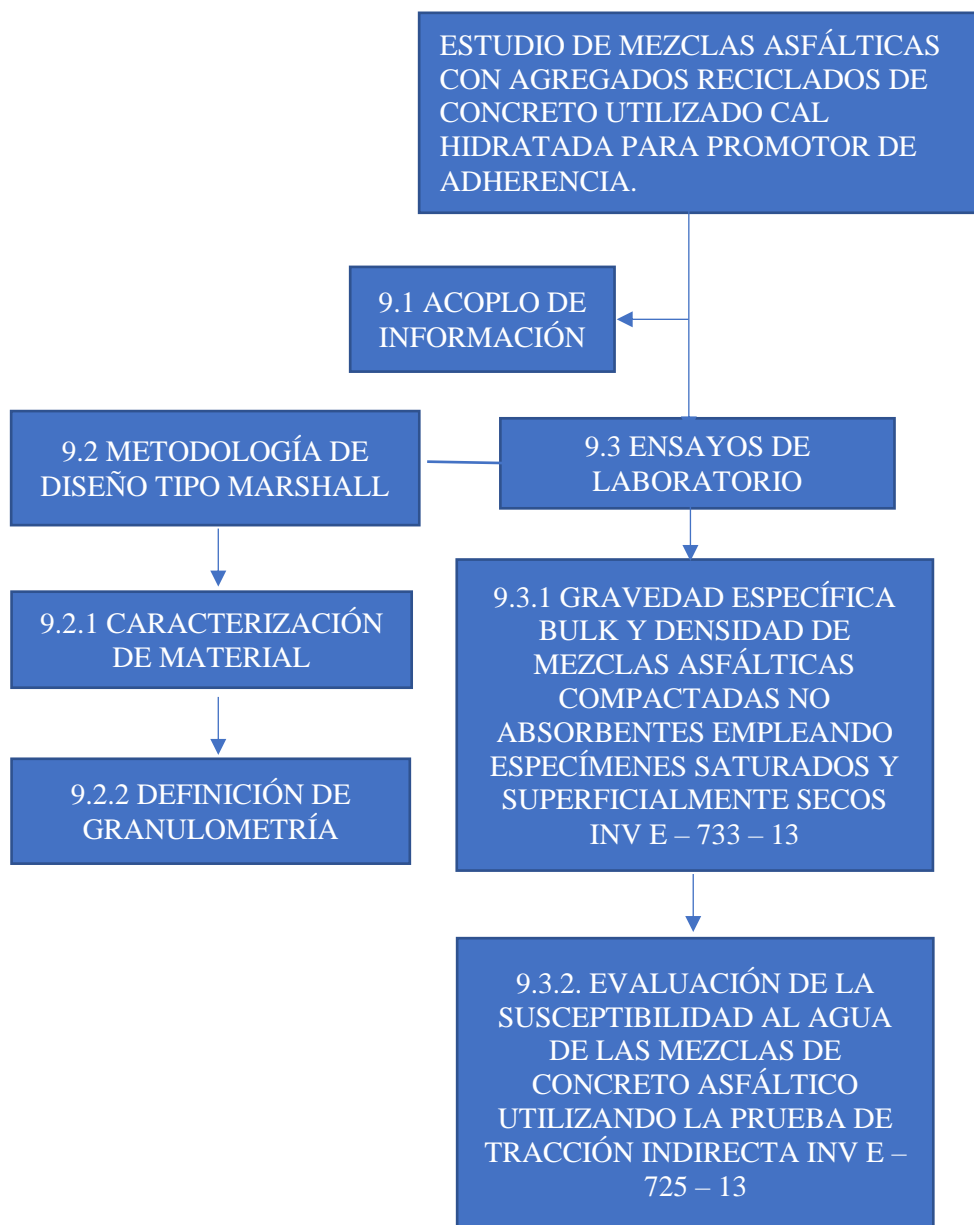
8.5 Cal Hidratada en pavimentos asfálticos

Durante más de 50 años, se ha demostrado que la cal hidratada es la referencia mundial de los modificadores de asfalto para mitigar el daño de la humedad. Sin embargo, como el uso de la cal ha crecido, se han identificado y cuantificado otras ventajas en laboratorio y por parte de las autoridades relacionadas con el transporte. Como resultado de esto, ahora la cal se considera un modificador multifuncional del asfalto.

Cuando se agrega cal hidratada al asfalto, reacciona con el árido, consolidando el enlace entre el betún y la roca. además, la cal hidratada reacciona con las moléculas altamente polares del betún, bloqueando la formación de jabones solubles en el agua. Estos jabones dan lugar a una fuerza en enlace más débil, y contribuyen así al daño por humedad. En vez de esto, la cal promueve la formación de sales basadas en el calcio insolubles que no atraen el agua al sistema. La cal hidratada reduce el índice de envejecimiento del pavimento del asfalto retardando la oxidación de muchos tipos de betún. Esto es debido a que la cal reacciona con las moléculas altamente polares del betún, retardando el índice de cambio de la química del betún. Por lo tanto, el pavimento sigue siendo más flexible a lo largo del tiempo, y se protege del agrietamiento frágil durante más años que sin la contribución de la cal. ANCADE (asociación Nacional de Cales y derivados de España)

9. METODOLOGÍA

Esta metodología se divide en 3 fases, las cuales permiten dar respuesta a la pregunta de la investigación.



9.1 Acoplo de información

Este es el primer paso para darle solución a nuestra problemática, se buscaron opciones viables promotoras de adherencia, analizando proyectos de grado para la obtención de los mismos, teniendo en cuenta los ensayos realizados y de cómo se demostró la característica de la adherencia.

Gracias a ello se usará la cal hidratada por sus resultados como adherente en distintos procesos. Para esto debemos iniciar por la metodología Marshall determinando las propiedades y características del asfalto y agregados. Así mismo, se debe realizar una verificación en la granulometría para el uso del RCA, ya que este remplazaría el 21% en los agregados gruesos.

9.2 Metodología de diseño Marshall

9.2.1 Caracterización del material

Es necesario realizar los ensayos correspondientes a la caracterización de los agregados, pues de esta manera se garantiza que las pruebas realizadas sean más seguras y nos lleven a resultados más concretos.

9.2.2 Granulometría de briquetas

La granulometría que se usará para esta investigación será la del nivel de tráfico 3 (**NT 3**), definiendo así, el tipo de mezcla en caliente la cual dependerá del tipo y espesor de la capa asfáltica, optando por una mezcla densa en caliente 19 (**MDC-19**).

Para determinar el porcentaje óptimo de asfalto en el ensayo Marshall se usó una gradación granulométrica para este tipo de mezcla, en donde se realizaron muestras con el 4.50%, 5.00%, 5.50%, y 6.00% de asfalto. Para ello se utilizaron 3 briquetas para cada muestra. Definiendo su composición en la siguiente tabla:

Tabla 1. Granulometría Marshall

CP	Asfalto (%)	Materiales	% Pasa	Correccion %
451	4,5	Agregado grueso	43	43,0
452	4,5	Agregado fino	51	51,0
453	4,5	Llenante	6	6,0
		Asfalto	4,5	4,5
501	5,0	Agregado grueso	43	43,0
502	5,0	Agregado fino	51	51,0
503	5,0	Llenante	6	6,0
		Asfalto	5	5
551	5,5	Agregado grueso	43	43,0
552	5,5	Agregado fino	51	51,0
553	5,5	Llenante	6	6,0
		Asfalto	5,5	5,5
601	6,0	Agregado grueso	43	43,0
602	6,0	Agregado fino	51	51,0
603	6,0	Llenante	6	6,0
		Asfalto	6	6

Fuente: Elaboración Propia

9.2.3 Caracterización del agregado fino

Para asegurarnos que los agregados cumplen con las exigencias del Artículo 450 - 13 del INVIAS, se realizaron los ensayos necesarios como lo son, la determinación de vacíos, el equivalente de arena, valor de azul de metileno, 10% de finos, gravedad específica y absorción.

Tabla 2. Ensayos para caracterización del material – Agregado fino (AN).

ENSAYOS PARA CARACTERIZACION DEL MATERIAL - AGREGADO FINO		
TIPO DE MATERIAL IMPLEMENTADO	RCA	P 3/4 - R3/8
	AN	P3/8 - FONDO
ENSAYO	RESULTADO	
DETERMINACION DEL CONTENIDO DE VACIOS EN AGREGADOS FINOS NO COMPACTADOS CON ANGULARIDAD (INVE 239 -13)	GRAVEDAD ESPECIFICA DE LA MUESTRA (g/cm ³)	2,6
	ANGULARIDAD DEL AGREGADO FINO (%)	48,05
EQUIVALENTE DE ARENA DE SUELOS Y AGREGADOS FINOS (INVE 133 -13) METODO MANUAL	LECTURA ARCILLA (mm)	163,33
	LECTURA INCLUIDA DEL INDICADOR	348,67
	LECTURA ARENA (mm)	94,67
	LONGITUD DE ARENA (mm)	254
	EQUIVALENTE DE ARENA (%)	58
VALOR DE AZUL DE METILENO EN AGREGADOS FINOS (INVE 235-13)	SOLUCION DE AZUL DE METILENO TOTAL UTILIZADA (ml)	11
	MASA DE LA MUESTRA SECA (g)	30
	VALOR DE AZUL DE METILENO (%)	3,7
DETERMINACION DEL VALOR DE 10% DE FINOS (INV E 224 -13)	PORCENTAJE DE FINOS (%)	9,2
	VALOR EN SECO OBTENIDO (KN)	230,14
	VALOR EN SECO CALCULADO AL 10 % DE FINOS (KN)	243,32
	PORCENTAJE DE FINOS (%)	9,5
	VALOR EN HUMEDO OBTENIDO (KN)	210,56
	VALOR EN HUMEDO CALCULADO AL 10 % DE FINOS (KN)	218,09
	RELACION HUMEDO/SECO AL 10 % FINOS (%)	89,63
GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCION DE AGREGADOS FINOS (INV E 222 -13)	GRAVEDAD ESPECIFICA BULK	2,6
	GRAVEDAD ESPECIFICA BULK SSS	2,62
	GRAVEDAD ESPECIFICA APARENTE	2,66
	ABSORCION (%)	1,03

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Cumplimiento agregado fino requerido por la norma

Ensayo	Norma	Unidad	AC	RCA	Requerido
Determinación del contenido de vacíos	(INV E -239-13)	%	48,05	-	-
Equivalente de arena	(INVE - 133-13)	%	58	-	60-90
Valor de azul de metileno	(INVE - 235 -13)	%	3,7	-	Max 10
Relación húmedo/seco al 10%	(INVE - 224-13)	%	89,63	-	Max 172
Gravedad específica y absorción	(INVE - 222-13)	%	1,03	-	-

Fuente: Elaboración propia.

9.2.4 Caracterización de agregados gruesos.

Pese que los ensayos realizados en este proyecto se usaran con los mismos agregados. para los agregados gruesos las exigencias son las mismas, pues estos agregados deben cumplir las mismas exigencias, la diferencia es que en la fracción gruesa de los agregados que se va usar será del 21% en agregado reciclado de concreto (RCA) en donde pasa de ¾” y retiene en ½”, por eso decidimos hacer los distintos ensayos tanto al agregado natural (AN) como al agregado (RCA) y poder determinar que cumplen con estas exigencias.

Tabla 4. Ensayos para caracterización del material – Agregado grueso (AN vs RCA).

ENSAYOS PARA CARACTERIZACION DEL MATERIAL - AGREGADO GRUESO		
TIPO DE MATERIAL IMPLEMENTADO	RCA	P 3/4 - R3/8
	AN	P3/8 - FONDO
ENSAYO	RESULTADO	
PORCENTAJE DE PARTICULAS FRACTURADAS EN UN AGREGADO GRUESO (INV E -227-13)	CARAS FRACTURADAS POR MASA A PARTIR DE UNA CARA	
	PASA 3/4 RETIENE 3/8 (RCA)	93,3
	PASA 3/4 RETIENE No 4 (AN)	92,1
	CARAS FRACTURADAS POR MASA A PARTIR DE DOS CARAS	
	PASA 3/4 RETIENE 3/8 (RCA)	89,2
	PASA 3/4 RETIENE No 4 (AN)	88,4
	MASA TOTAL PORCION DE ENSAYO	1378
	% DE CARAS FRACTURADAS POR MASA A PARTIR DE UNA CARA	93
	% DE CARAS FRACTURADAS POR MASA A PARTIR DE DOS CARAS	89
INDICE DE APLANAMIENTO Y ALARGAMIENTO DE LOS AGREGADOS PARA CARRETERAS (INV E – 230 -13)	INDICE APLANAMIENTO (%) (RCA)	13,03
	INDICE APLANAMIENTO (%) (AN)	18
	INDICE ALARGAMIENTO (%) (RCA)	19,89
	INDICE ALARGAMIENTO (%) (AN)	26
RESISTENCIA AL DESGASTE DE MAQUINA DE LOS ANGELES (I.N.V. E-218 Y 219)	PORCENTAJE DESGASTE (%) 500 R (RCA)	54,36
	PORCENTAJE DESGASTE (%) 500 R (AN)	20
DETERMINACION DE LA RESISTENCIA POR MICRO-DEVAL (INV - E 238-13)	PERDIDA MICRO DEVAL PROMEDIO (%) (RCA)	30,16
	PERDIDA MICRO DEVAL PROMEDIO (%) (AN)	9,2
GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION DE AGREGADOS GRUESOS (INV – E 223-13)	GRAVEDAD ESPECIFICA BULK (AN)	2630,33
	GRAVEDAD ESPECIFICA BULK SSS (AN)	2688,33
	GRAVEDAD ESPECIFICA APARENTE (AN)	2791,67
	ABSORCION (%) (AN)	2,17
	GRAVEDAD ESPECIFICA BULK (RCA)	2247,471
	GRAVEDAD ESPECIFICA BULK SSS (RCA)	2354,4
	GRAVEDAD ESPECIFICA APARENTE (RCA)	2588,14
	ABSORCION (%) (RCA)	4,99

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Cumplimiento agregado grueso requerido por la norma

Ensayo	Norma	Unidad	AC	RCA	Requerido
Porcentaje de partículas fracturadas por una cara	(INV E - 227-13)	%	92,1	93,3	Mín 85%
Porcentaje de partículas fracturadas por dos caras	(INV E - 227-13)	%	88,4	89,2	Mín 85%
Índice de aplanamiento	(INV E - 230 - 13)	%	18	13,03	-
Índice de alargamiento	(INV E - 230 - 13)	%	26	19,89	-
Resistencia al desgaste de máquina de los ángeles	(INV E -218 Y 219)	%	20	34,36	Max 25 - 55
Determinación de la resistencia por micro-deval	(INV E - 238-13)	%	9,2	25,16	max 20 - 25
Gravedad específica y absorción de agregados gruesos	(INV E - 223 -13)	%	2,17	4,99	-

Fuente: Elaboración propia

9.2.5 Caracterización física del asfalto

La caracterización del cemento asfáltico se determina según la normativa que rige el instituto nacional de vías (INVIAS), en su artículo 400 donde hace referencia específicamente a los cementos asfálticos.

Tabla 6. Película delgada rotatoria por norma (INV E 720-13)

ASFALTO RESIDUAL LUEGO DE LA PRUEBA DE ACONDICIONAMIENTO EN PELICULA DELGADA ROTATORIA NORMA (INV E 720 -13)					
ENSAYO	UNIDAD	NORMA INVIAS	ESPECIFICACION		RESULTADO
			MIN	MAX	
PERDIDA DE MASA POR CALENTAMIENTO EN PELICULA DELGADA EN MOVIMIENTO (163 C° 85 MIN)	%	E720		0,8	0,1
PENETRACION DEL RESIDUO LUEGO DE LA PERDIDA DE MASA POR CALENTAMIENTO (E 720) EN % DE LA PENETRACION ORIGINAL	%	E 706	54	9	61,2
INCREMENTO EN EL PUNTO DE ABLANDAMIENTO LUEGO DE LA PERDIDA DE MASA POR CALENTAMIENTO EN PELICULA DELGADA EN MOVIMIENTO (INVE 720)	°C	E 712		10000	6,1
VISCOSIDAD ABSOLUTA DEL RESIDUO (60 C°)	P	E - 716-717	50		6460
DUCTIBILIDAD (25 C° 5cm/min)	cm	E - 704		3	50
CONTENIDO DE PARAFIRMAS	%	E - 718			0,3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7. Cumplimiento asfalto requerido por la norma

ENSAYO	UNIDAD	NORMA INVIAS	ESPECIFICACION		RESULTADO
			MIN	MAX	
VISCOSIDAD ABSOLUTA (60C°)	P	E 716-717	1400	2400	2110
VISCOSIDAD ABSOLUTA (135C°)	P	E 716-717	300		349
PENETRACION (25 C° 100g Ss)	0,1mm	E 706	60		70
PUNTO DE ABLANDAMIENTO	°C	E 712	46	54	48,1
SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO	%	E 713	99		99,7
PUNTO DE INFLAMACION MEDIANTE LA COPA ABIERTA CLEVELAND	°C	E 709	232		335
GRAVEDAD ESPECIFICA		E 707	REPORTAR		1,027

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Caracterización del asfalto

Ensayo	Norma	Unidad	60-70	Requerido
Viscosidad absoluta (60c°)	INV E 716-717	P	2110	1400-2400
Viscosidad absoluta (135c°)	INV E 716-717	P	349	Min 300
Penetracion (25 c° 100g ss)	INV E 706	0,1mm	70	Min 60
Punto de ablandamiento	INV E 712	°C	48,1	46-54
Solubilidad en tricloroetileno	INV E 713	%	99,7	min 99
Punto de inflamacion mediante la copa abierta cleveland	INV E 709	°C	335	min 232
gravedad especifica	INV E 707		1,027	Reportar
Perdida de masa por calentamiento en película delgada en movimiento (163 c° 85 min)	INV E 720	%	0,1	max 0,8
Penetración del residuo luego de la pérdida de masa por calentamiento (E 720) en % de la penetración original	INV E 706	%	61,2	54-90
Incremento en el punto de ablandamiento luego de la pérdida de masa por calentamiento en película delgada en movimiento (inv e	INV E 712	°C	6,1	max 10
Viscosidad absoluta del residuo (60 c°)	INV E - 716-717	P	64,6	min 50
Ductilidad (25 c° 5cm/min)	INV E - 704	cm	50	max 3
Contenido de parafirmas	INV E - 718	%	0,3	-

Fuente: Elaboración propia

9.2.5 Granulometría MDC 19

Para determinar la granulometría pese a que vamos a hacer una mezcla densa en caliente MDC-19 nos regimos por el artículo 450 de las especificaciones técnicas del instituto nacional de vías INVIAS, la cual se ve evidenciada en la tabla 450-6 del artículo 450.

Tabla 9. Granulometría para mezcla MDC-19

TIPO DE MEZCLA		TAMIZ (mm / U.S. Standard)									
		37.5	25.0	19.0	12.5	9.5	4.75	2.00	0.425	0.180	0.075
		1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 80	No. 200
		% PASA									
DENSE	MDC-25		100	80-95	67-85	60-77	43-59	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-19			100	80-95	70-88	49-65	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-10					100	65-87	43-61	16-29	9-19	5-10
SEMIDENSE	MSC-25		100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
	MSC-19			100	80-95	65-80	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
GRUESA	MGC-38	100	75-95	65-85	47-67	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11	2-6
	MGC-25		100	75-95	55-75	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11	2-6
ALTO MÓDULO	MAM -25		100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	10-20	8-14	6-9
TOLERANCIAS EN PRODUCCIÓN SOBRE LA FÓRMULA DE TRABAJO (±)		4 %					3 %			2 %	

Fuente: Tabla 450-6; Artículo 450-6; Norma INVIAS 2013

Basados en esta tabla se obtiene la cantidad de agregado necesario por porcentaje de asfalto. En esta metodología vamos a usar los porcentajes de 4.50%, 5.00%, 5.50% y 6.00% de asfalto, con los siguientes porcentajes de agregados.

Tabla 10. Granulometría para ensayo Marshall

Briquetas	Asfalto (%)	Materiales	% Pasa	% Correccion
1,0	4,5	Agregado grueso	43	41,1
2,0	4,5	Agregado fino	51	48,7
3,0	4,5	Llenante	6	5,7
		Asfalto	4,5	4,5
4,0	5,0	Agregado grueso	43	40,9
5,0	5,0	Agregado fino	51	48,5
6,0	5,0	Llenante	6	5,7
		Asfalto	5	5
7,0	5,5	Agregado grueso	43	40,6
8,0	5,5	Agregado fino	51	48,2
9,0	5,5	Llenante	6	5,7
		Asfalto	5,5	5,5
10,0	6,0	Agregado grueso	43	40,4
11,0	6,0	Agregado fino	51	47,9
12,0	6,0	Llenante	6	5,6
		Asfalto	6	6

Fuente: Elaboración propia

Se infiere que el porcentaje óptimo 5.4% de asfalto 60-70 se alcanzaría a un buen comportamiento de la mezcla en general si hablamos de cumplir con todos los parámetros.

9.3 Ensayos de laboratorio

Para lograr un desarrollo adecuado de la metodología, se requiere realizar el ensayo de tracción indirecta en estado seco y húmedo con el fin de conocer el porcentaje de adherencia de las briquetas modificadas y determinar si el RCA es un buen remplazo para el agregado grueso convencional. Cumpliendo con dichas exigencias se realizaron los ensayos Tracción Indirecta (INV – E 725-13) para cumplir con la especificación de verificación del diseño Marshall, como ensayo evaluador de adherencia.

9.3.1 Ensayo de tracción indirecta en estado seco y húmedo (INV E-725-13)

Este ensayo determina el porcentaje de adherencia de las muestras las cuales están divididas en 4 subgrupos una convencional sin agregado RCA y sin aditivo (AN-SC), otro con únicamente agregado grueso con RCA (RCA-SC), otro con únicamente agregado grueso con RCA y con 1% de aditivo (RCA-1%) y el ultimo con únicamente agregado grueso con

RCA y con 2% de aditivo (RCA-2%). Esta distribución podremos observarla en la siguiente tabla:

Tabla 11. Clasificación de asfalto en cada briqueta

Clasificación	Briquetas	Asfalto (%)
2% DE CAL HIDRATADA CON RCA	1,0	5,4
	2,0	5,4
	3,0	5,4
	4,0	5,4
	5,0	5,4
	6,0	5,4
	7,0	5,4
	8,0	5,4
1% DE CAL HIDRATADA CON RCA	9,0	5,4
	10,0	5,4
	11,0	5,4
	12,0	5,4
	13,0	5,4
	14,0	5,4
	15,0	5,4
	16,0	5,4
MEZCLA DE CONTROL CON AN	17,0	5,4
	18,0	5,4
	19,0	5,4
	20,0	5,4
	21,0	5,4
	22,0	5,4
	23,0	5,4
	24,0	5,4
RCA AGREGADO GRUESO	25,0	5,4
	26,0	5,4
	27,0	5,4
	28,0	5,4
	29,0	5,4
	30,0	5,4
	31,0	5,4
	32,0	5,4

Fuente; Elaboración propia

Para un total de 32 briquetas correspondientes a 8 por cada grupo (AN-SC, RCA-SC, RCA-1%, RCA-2%) todas con el mismo porcentaje y tipo de asfalto, de las 8 por cada grupo se seleccionan 4 para condición en húmedo, las cuales serán sumergidas en baño maría a 60°C

a 24 horas y luego a 25°C por 1 hora, las otras 4 serán puestas en un horno a 25°C por un mínimo de 2 horas y luego sumergidas en baño maría a 25°C por 30 minutos para el ensayo en condición de seco. Definiendo el porcentaje optimo se procede a hacer las correcciones en base a los porcentajes de retenido y que pasa y se define una granulometría, en nuestro caso la granulometría que usamos fue el siguiente:

Tabla 12. Granulometría para ensayo de RTI

FRACCION		CONTROL	RCA	RCA -1% CAL	RCA - 2% CAL
PASA	RETIENE	MASA (g)	MASA (g)	MASA (g)	MASA (g)
3/4	1/2	142	142	142	142
1/2	3/8	96,5	96,5	96,5	96,5
3/8	No4	250	250	250	250
No4	No 10	227	227	227	227
No 10	No 40	199	199	199	199
No 40	No 80	77,5	77,5	77,5	77,5
No 80	No 200	73,8	73,8	73,8	73,8
FONDO		68	68	68	68
ASFALTO (g)		64,8	64,8	64,8	64,8
CAL HIDRATADA (g)		0	0	11,3	22,6
BRIQUETAS (g) = 1200 g					
ASFALTO (%) = 5,4%					

Fuente: Elaboración propia.

Figura 1. Identificación briquetas



Fuente: Elaboración propia

Figura 2. Briquetas Sumergidas



Fuente: Elaboración propia

Figura 3. Numeración Briquetas



Fuente: Elaboración propia

Se acondicionan las briquetas para antes de realizar el ensayo RTI, obtener la gravedad específica bulk, registrando sus masas en estado seco, saturado y masa SSS. Luego de obtener esta gravedad, se dejan las briquetas que van a estar en condición en húmedo en baño maría a 60°C a 24 horas y luego a 25°C por 1 hora. Mientras tanto para las briquetas en condición de seco se dejan en el horno en condiciones a 25°C por un lapso de 2 horas y luego se dejan en baño maría 25°C durante 20 minutos.

Se coloca una probeta de carga con las franjas de carga centrada y paralela sobre el plano diametral. Se alista una carga a una deformación de 50mm/min hasta que alcance la carga máxima y se continua el proceso hasta fallar los 4 subgrupos.

Figura 4. Ensayo RTI



Fuente: Elaboración propia

Figura 5. Probeta N°7



Fuente: Elaboración propia

Figura 6. Probeta N°7 fallada por carga máxima



Fuente: Elaboración propia

Por último, se desmonta el aparato y se libera la briqueta, estimando visualmente el comportamiento del agregado con la capa asfáltica, se inspeccionan todas las superficies determinando si la briqueta fue rota o resquebrajada.

10. ANÁLISIS DE DATOS

10.1 Ecuaciones para el cálculo de la resistencia a la tensión

Para el cálculo de la resistencia a la tensión primero se debe tomar una altura y un diámetro inicial en (mm), además se toma el registro de la carga máxima (KN). esta resistencia se debe hacer para los 4 subgrupos y en las dos condiciones

Ecuación 1 resistencia a la tensión.

$$R_T = \frac{2000 \times P}{\pi \times t \times D}$$

T = altura de briqueta (mm)

D= diámetro de briqueta (mm)

P = carga máxima (KN)

Por último, se calculó el porcentaje de resistencia conservada a la tracción indirecta de todas las probetas tanto del subgrupo sometidas tanto en condición húmedo como en seco, como lo indica la ecuación 2

Ecuación 2. Relación de resistencias a la tensión

$$RRT = \left[\frac{R_{TH}}{R_{TS}} \right] \times 100$$

RTH = resistencia promedio a la tensión, del subgrupo en condición húmedo

RTS= Resistencia promedio a la tensión, del subgrupo en condición seco

Este porcentaje debe ser igual o mayor al mínimo exigido por el instituto nacional de vías INVIAS, para la verificación del diseño preliminar en cuanto a la adherencia este porcentaje es el punto de referencia que adoptamos para evaluar la adherencia, si el porcentaje obtenido es menor al 80% el material no cumple con esta propiedad y debe ser modificado con un aditivo mejorador de adherencia. Como así lo indica el Artículo 450.

Tabla 13. Verificación del diseño Marshall

PROPIEDAD	NORMA DE ENSAYO INV	VALOR	APLICABILIDAD
Adherencia: Resistencia retenida, % mínimo	E-725	80	Todas las mezclas
Resistencia a la deformación plástica: velocidad máxima de deformación en el intervalo de 105 a 120 minutos, $\mu\text{m}/\text{min}$. - Temperatura media anual del aire $> 24^{\circ}\text{C}$ - Temperatura media anual del aire $\leq 24^{\circ}\text{C}$	E-756	15 20	- Tránsito NT3: para capas de rodadura e intermedia - Mezclas de alto módulo
Módulo resiliente, MPa - Mezclas de alto módulo compactadas con 75 golpes por cara, valor mínimo a 20°C - Otras mezclas	E-749	10,000 (Nota 1)	- Mezclas de alto módulo - Opcional para otras mezclas, según documentos del proyecto
Leyes de fatiga - Mezclas de alto módulo: ensayo a 20°C y 30 Hz, ϵ_6 mínimo ($\mu\text{m}/\text{m}$) - Otras mezclas	E-808 E-784 E-808	100 (Nota 1)	- Obligatorio para mezclas de alto módulo - Opcional para otras mezclas, según documentos del proyecto

Fuente: Tabla 450 -11 INVIAS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el ensayo de tracción indirecta en estado seco y estado húmedo, con los diferentes subgrupos (AN-SC, RCA-SC, RCA-1% y RCA-2%) propuestos en el presente trabajo de investigación.

Estos resultados se mostrarán por medio de unas tablas resumen con los valores obtenidos de la resistencia a la tensión, adicionalmente se presentarán graficas correspondientes a dichas resistencias junto con la resistencia conservada.

Tabla 14. Resistencia a la tensión en estado seco

ENSAYO DE RTI (INV E -725-13)							
RESISTENCIA A LA TENSION EN SECO							
Clasificación	# Briquetas	Diametro (mm)	Altura (mm)	P (KN)	P (N)	RTS (Kpa)	Promedio RTS (Kpa)
AN	17	100,2	67,7	10,6	10560	991,0	1017,3
	18	100,0	66,2	10,9	10900	1048,2	
	19	100,4	67,2	10,6	10610	1001,1	
	20	100,1	66,2	10,7	10710	1028,9	
RCA	25	100,5	66,3	11,0	11010	1051,9	1069,3
	26	100,0	65,1	10,4	10370	1014,6	
	27	100,4	66,3	11,6	11620	1110,9	
	28	100,4	66,3	11,5	11500	1099,8	
RCA - 1%	9	100,2	65,3	12,1	12090	1176,3	1202,4
	10	100,3	67,0	12,9	12910	1223,0	
	11	101,1	66,1	12,3	12290	1170,8	
	12	99,9	65,6	12,8	12760	1239,5	
RCA - 2%	1	99,2	65,0	13,7	13720	1354,6	1290,0
	2	98,7	65,7	13,2	13150	1291,0	
	3	100,0	66,5	12,9	12910	1235,9	
	4	99,2	65,3	13,0	13010	1278,6	

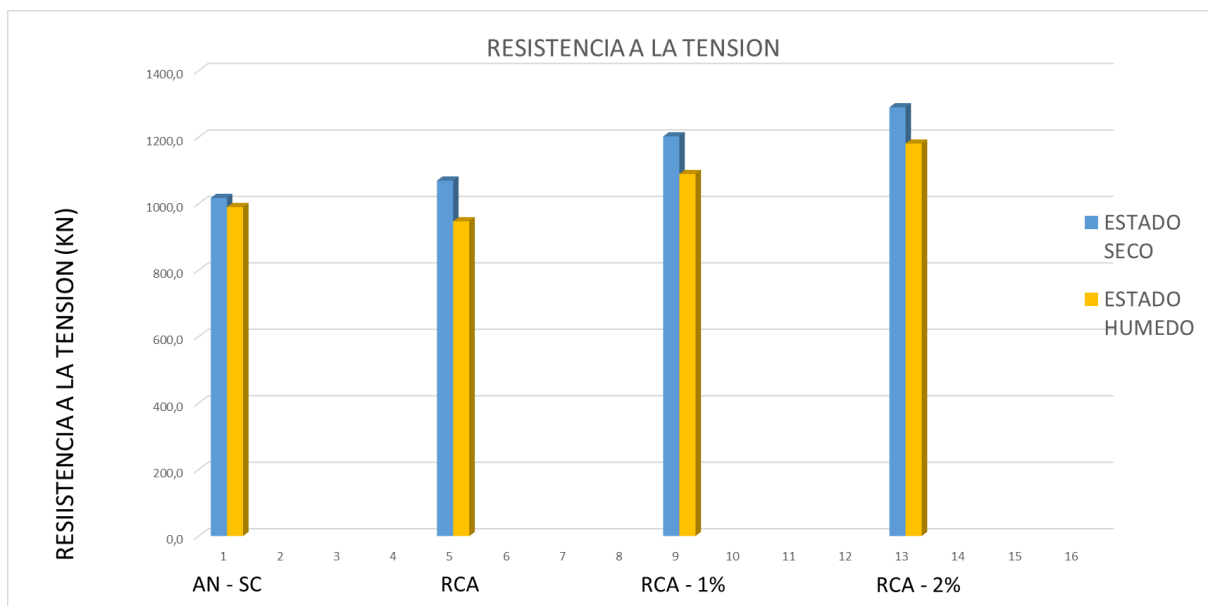
Fuente: Elaboración propia

Tabla 15. Resistencia a la tensión en estado húmedo

ENSAYO DE RTI (INV E -725-13)								
RESISTENCIA A LA TENSION EN HUMEDO								
Clasificación	# Briquetas	Diametro (mm)	Altura (mm)	P (KN)	P (N)	RTH (Kpa)	Promedio RTH (Kpa)	RRT (%)
AN	21	100,1	67,7	10,62	10620	997,7	989,9	97,3
	22	100,2	66,9	10,76	10760	1022,4		
	23	100,2	67,2	9,53	9530	900,8		
	24	99,5	67,9	11,02	11020	1038,8		
RCA	29	99,9	67,8	10,45	10450	982,2	947,0	88,6
	30	99,4	66,4	9,83	9830	948,2		
	31	100,5	65,8	10,01	10010	964,7		
	32	100,8	67,7	9,57	9570	892,8		
RCA - 1%	13	100,0	66,0	10,59	10590	1021,5	1089,2	90,6
	14	100,3	66,8	11,71	11710	1113,2		
	15	100,5	65,2	11,77	11770	1143,1		
	16	98,9	67,0	11,23	11230	1078,9		
RCA - 2%	5	100,2	66,8	13,47	13470	1281,2	1180,9	91,5
	6	99,8	67,1	12,39	12390	1177,9		
	7	100,4	67,2	11,9	11900	1122,9		
	8	100,6	65,9	11,89	11890	1141,5		

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7. Grafica comparativa ensayo RTI



Fuente: Elaboración propia.

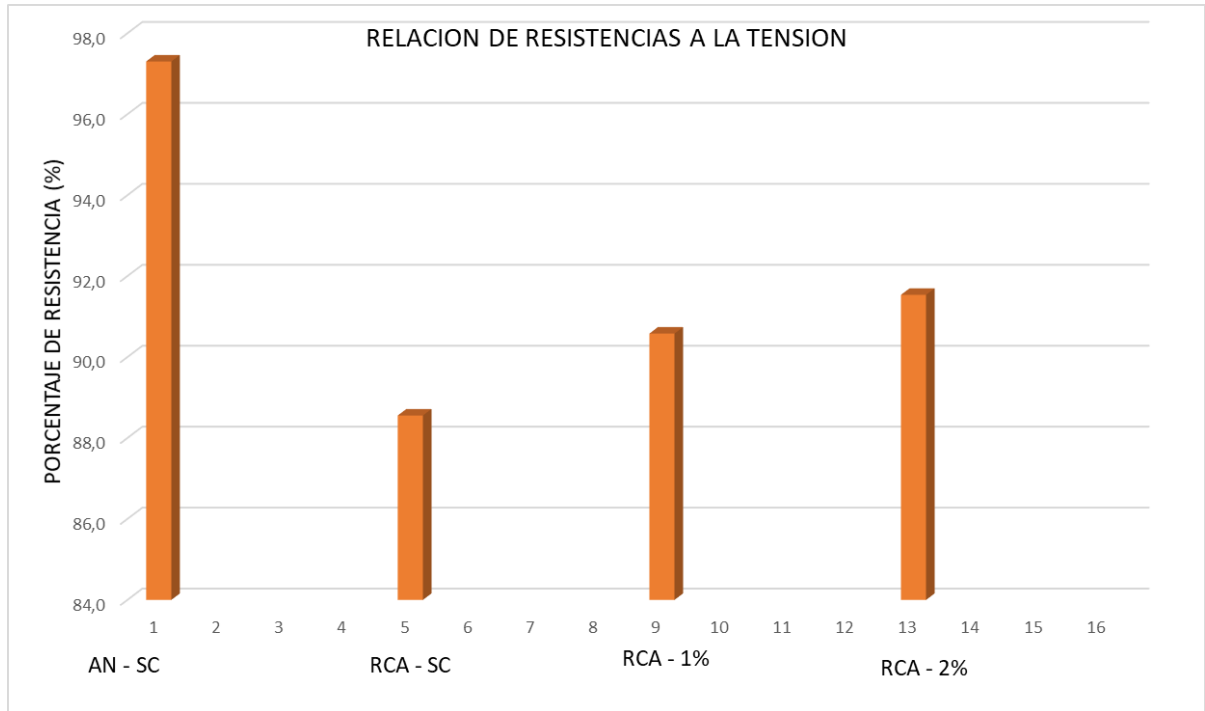
En la tabla anterior podemos observar que evidentemente el uso del agregado RCA en la fracción gruesa genera mayor resistencia en todos los subgrupos comparado con el uso de agregado natural AN. También se observa que en el uso de cal hidratada hace que la tensión en estado seco sea considerable que, con el estado húmedo, y que por el contrario si no se usara la cal hidratada la tensión en estado húmedo sería más eficiente. También podemos observar el subgrupo con mayor resistencia a la tensión en estado seco es el RCA – 2% pero en estado húmedo el subgrupo que obtuvo mejor resistencia fue el RCA – SC, demostrando que la cal tiene una afectación considerable en la implementación en un ambiente húmedo.

Tabla 16. Relación de la tensión retenida

ENSAYO DE RTI (INV E - 725 - 13)			
RESISTENCIA A LA TENSION RETENIDA			
Clasificación	Promedio RTS (Kpa)	Promedio RTH (Kpa)	RRT (%)
AN - SC	946,05	1019,71	107,79
RCA - SC	1094,14	1160,50	106,07
RCA - 1%	1189,71	1146,75	96,39
RCA - 2%	1306,65	1121,91	85,86

Fuente: Elaboración propia.

Figura 8. Grafica comparativa RRT



Fuente: Elaboración propia

11. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta el objetivo de este proyecto el cual es determinar las afectaciones mecánicas que tiene un diseño de mezcla densa caliente (MDC – 19) con agregado RCA usando como aditivo la cal hidratada en distintos porcentajes en, podemos determinar qué:

- a. Guiándonos del porcentaje de resistencia retenida RRT con respecto a la muestra en RCA - SC y los RCA - 1% y RCA – 2% se infiere que la adherencia de los agregados reciclados de concreto mejoro hasta un 3%, es decir, efectivamente la cal hidratada es un aditivo optimo y funcional para obtener una mejor adherencia de los RCA con el ligante y el agregado fino.
- b. Se verificó visualmente que el agregado convencional tiene buena adherencia al ligante, ya que al romperse por fuerzas de tracción indirecta se puede observar que efectivamente la grava se fractura por la carga aplicada a las rocas, pero no hay desprendimiento con el adhesivo y el material se mantiene adjunto.
- c. En la caracterización del agregado, los RCA cuenta con mejor forma gracias al tratamiento de trituración que se les realiza, su gravedad especifica nos indica que son más livianos que el agregado convencional pero su resistencia al desgaste no es favorable.
- d. La sustitución de algunos de los materiales de construcción disminuye el impacto ambiental; en este caso asociándolo a las técnicas de manejo de los RCA, así desarrollando alternativas viables que promueven soluciones no solo siguiendo las tendencias de construcción sostenible a nivel mundial, si no a su vez generando buenas prácticas con alternativas como racionalización en el uso de los materiales.

12.RECOMENDACIONES

Es necesario implementar nueva normatividad que regule la reutilización de materiales de obra con metas claras y definiciones pertinentes para que toda la ciudadanía tenga conciencia sobre el aprovechamiento, manejo y disposición de los Residuos Agregados de Concreto generados en obra.

Se recomienda realizar la debida caracterización de todos los agregados y aditivos a utilizar en las mezclas asfálticas, ya que pueden hacer que la investigación no genere resultados lógicos. De igual manera obtener la relación óptima de asfalto para agregados gruesos y agregados finos, ya que en el desarrollo de este estudio durante la compactación de briquetas se resaltó el porcentaje de asfalto del 5,4 % porque mostró buen comportamiento en los agregados anteriores, en cuanto a adherencia se refiere. Por último, para la realización de ensayos se recomienda el uso de la norma INV 725-13 para la evaluación de resistencia a la tracción retenida de las mezclas, pero realizando tanto el ensayo en húmedo como en seco para más certeza de los resultados.

13. BIBLIOGRAFÍAS

- Tenza-abril, A. J., Álvarez, D. A., & Aenlle, A. A. (2020). ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE CON ÁRIDOS RECICLADOS TIPO HORMIGÓN. *Revista Ciencia y Construcción*, 1(2), 32-42.
<https://rcc.cujae.edu.cu/index.php/rcc/article/view/13/21>
- Archila Acelas, A. V., & Aparicio Jurado, M. F. (2018). Impactos ambientales derivados del proceso de pavimentación de vías de transporte en Colombia.
<https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/18318/1098694697.pdf?sequence=5&isAllowed=y>
- Bastidas-Martínez, J. G., Rondón-Quintana, H. A., Contreras-Zartha, L., Forero-Castaño, S., & Rojas-Rozo, L. (2021). Evaluación de una mezcla de concreto asfáltico con incorporación de agregados reciclados de concreto. *Revista UIS Ingenierías*, 20(2), 75-84.
<https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/10662>
- Chávez More, F. B. (2019). Valoración de residuo de concha de abanico para uso como agregado en mezclas asfálticas en caliente.
https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/4268/ICI_290.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Rubiano Murcia, R., & Lancheros Ovalle, L. M. (2020). Evaluación de la resistencia bajo carga monotónica de una mezcla asfáltica mdc-25 reemplazando parte de la fracción gruesa del agregado por concreto reciclado y estabilizado con cal.
<https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/24581/LancherosOvalleLinamaria2020.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Tenza-Abril, A. J., Álvarez, D. A., & Aenlle, A. A. (2020). ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE CON ÁRIDOS

RECICLADOS TIPO HORMIGÓN. Revista Ciencia y Construcción, 1(2), 32-42.

<https://rcc.cujae.edu.cu/index.php/rcc/article/view/13/21>

- Echeverry, V. (2020). Agregados reciclados: ¿qué y para qué? ARGOS 360 sección sostenibilidad. Recuperado el 15 de abril del 2022 de:
<https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/agregados-reciclados-que-y-para-que>
- Thomas, E. (2022). Carbon and Other Emissions. World Cement. Recuperado el 6 de abril del 2022 de: <https://www.worldcement.com/the-americas/06042022/cemex-increases-lower-carbon-portland-limestone-cement-production>
- World Coal Institute. The Coal Resource: A Comprehensive Overview of Coal. 2005. Recuperado el 11 de marzo del 2022 de:
<https://refman.energytransitionmodel.com/publications/1264>
- Comisión para el desarrollo sostenible en la industria extractiva no energética de la U. E. COM265 (2000). Recuperado el 3 de enero del 2022 de:
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2015), CEPAL. Cepalstat – Badecon. Recuperado el 3 de enero del 2022 de: Chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/38713/S1500733_es.pdf
- INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. 2007. Concreto asfáltico y mezclas de alto modulo. *Mezclas asfálticas en caliente*. 2, 2007, Vols.2 Artículo 450 - 07, 2.
- IDU. 2011. artículo 520. 2011.
- INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO. 2008. Caracterización de Materiales, MDC. [En línea] Bogotá, 04 de 03 de 2008. [Citado el: 04 de 10 de 2016.]
<http://webidu.idu.gov.co:9090/jspui/bitstream/123456789/33549/6/60015779-02.pdf>.
- Larson, Thomas. 1977. *Concretos de Cementos Portland y Asfálticos*. México: Continental S.A., 1977.

- USON. Bogotá: Propiedades y Estudios de los Materiales Asfálticos y Pétreos. [En línea] Bogotá: [Citado el: 04 de 10 de 2016.]
<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/11811/capitulo2.pdf>.
- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. 2013. *Determinación del contenido de vacíos INV E – 239-13. Bogotá.D.C:2013.*
- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. 2013. *Equivalente de arena INV E – 133-13. Bogotá.D.C:2013.*
- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. 2013. *Valor azul de metileno INV E – 235-13. Bogotá.D.C:2013.*
- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. 2013. *Relación húmero/seco al 10% INV E – 224- 13. Bogotá.D.C:2013.*
- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. 2013. *Gravedad específica y absorción INV E – 222-13. Bogotá.D.C:2013.*
- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. 2013. *Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta INV E - 725 13. Bogotá. D.C: 2013.*
- Urrego Aguilera, E., & Ruiz Ramírez, C. C. (2016). Determinación de la adherencia en mezclas asfálticas elaboradas con asfaltos convencionales y materiales de peña y río. Recuperado de:
<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/15108/1/DETERMINACION%20DE%20LA%20ADHERENCIA%20EN%20MEZCLAS%20ASF%20CAS%20ELABORADAS%20CON%20ASFALTOS%20CONVENCIONALES%20Y%20MAT.pdf>
- Sebaaly, P.E., Hitti, E., and Weitzel, D. “Effectiveness of lime in Hot-Mix Asphalt Pavements,” Journal of the Transportation Research Board, N° 1832, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2003, pp. 34-41.

- S.Vansteenkiste, J.De Visscher, F.Vervaecke, A.Vanelstraete and R.Reynaert, 'Validation of the indirect tensile strength ratio (ITSR) as a performance indicator for water sensitivity of asphalt pavements', Proceedings of the 4th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Copenhagen, 21-23 May 2008.
- Schneider, M.; Schellenber, K.; Ritter, H.-J.; Schiffner, H.-M. "Improvement of asphalt properties by addition of Hydrated Lime" – field test/mixing (AiF-No. 12542N), Report-No. 2/02, Research Foundation for Lime and Mortar, Cologne
- P.C. Hopman, A. Vanelstraete, A. Verhasselt "Active filler as asphalt modifier", AIPCR/PIARC, Use of modified bituminous binders, special bitumens and bitumen with additives in road pavements, March 1999, P. 199
- Félix-Rodríguez, A A.& Torres-Chacón, E. A. (2020). Aproximación al comportamiento mecánico de mezclas asfálticas mdc con rca a través del modelo de Witzack. Trabajo de Grado. Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil. Especialización en Ingeniería de Pavimentos. Bogotá, Colombia Recuperado de: Chrome-extension://efaidnbmnnnibpajpcglclefindmkaj/https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/26385/1/Trabajo%204.pdf
- Asociación nacional de cales y aditivos de España (2019). Cal Hidratada un aditivo probado para la durabilidad de pavimentos asfálticos. Recuperado de: chrome-extension://efaidnbmnnnibpajpcglclefindmkaj/https://www.ancade.es/wp-content/uploads/2020/06/calhidratadaenasfaltos.pdf