

DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFALTICA CONVENCIONAL Y
RECICLADO CON 100% DE RAP

CHRISTIAN STEVEN GAITÁN RICO
DIEGO ALEJANDRO TORRES LARA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
BOGOTÁ D.C.
2019

DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFALTICA CONVENCIONAL Y
RECICLADO CON 100% DE RAP

CHRISTIAN STEVEN GAITÁN RICO
DIEGO ALEJANDRO TORRES LARA

Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniero Civil

Director
Laura María Espinosa Hermida
Ingeniera Civil

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
BOGOTÁ D.C.
2019



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Nota de Aceptación

Firma del Presidente del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C., 28 de Octubre de 2019

1. CONTENIDO

Pág.

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN.	3
3. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.	6
4. OBJETIVOS.....	7
4.1 Objetivo General.....	7
4.2 Objetivo Específicos	7
5. ALCANCES Y LIMITACIONES.....	8
6. MARCO DE REFERENCIA	9
6.1 Marco Teórico.....	9
6.2 Estado del Arte.	11
6.3 Marco Conceptual.....	13
6.4 Marco Legal	14
7. METODOLOGÍA.....	19
8. RESULTADOS Y ANÁLISIS	22
9. CONCLUSIONES	28
10. REFERENTES BIBLIOGRÁFICOS.....	29

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Marco Legal.....	15
Tabla 2. Granulometría	19
Tabla 4. Granulometría	20
Tabla 5. Briquetas de Control MDC-19.....	22
Tabla 6. Briquetas con Material Grueso Sustituido por RAP	23
Tabla 7. Briquetas con Material 100% RAP.....	24

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1 Diagrama de la Metodología de la Investigación.....	21
FIGURA 2 Carga vs Elasticidad	24
FIGURA 3 Carga Máxima	25
FIGURA 4. Tenacidad.....	26
FIGURA 5. Rigidez	26
FIGURA 6 Volumen de vacíos en la mezcla.....	27

ANEXOS

	Pág.
Anexo 1 (Tamizado y almacenamiento de Asfalto reciclado)	32
Anexo 2 (Fracción gruesa de RAP mas fraccion fina de material convencional en recipientes listo para ser calentados en el horno).....	32
Anexo 3 (Vertimiento del asfalto en la muestra, para su posterior mezcla) ...	33
Anexo 4 (Compactación de las probetas en la maquina compactadora).....	33
Anexo 5 (Probetas luego de ser compactadas y debidamente marcadas).....	34
Anexo 6 (Resultados del Ensayo RTI, Briqueta con material grueso sustituido por RAP)	35
Anexo 7 (Resultados del Ensayo RTI, Briqueta con material grueso sustituido por RAP)	36
Anexo 8 (Resultados del Ensayo RTI, Briqueta con material grueso sustituido por RAP)	36
Anexo 9 (Resultados del Ensayo RTI, Briqueta con material grueso sustituido por RAP)	37
Anexo 10 (Resultados del Ensayo RTI, Briqueta con material grueso sustituido por RAP)	37
Anexo 11 (Resultados del Ensayo RTI, Briqueta con material grueso sustituido por RAP)	38

Anexo 12 (Resultados del Ensayo RTI, Briqueta con material grueso sustituido por RAP)	38
Anexo 13 (Resultados del Ensayo RTI, Briqueta con material grueso sustituido por RAP)	39
Anexo 14 (Resultados del Ensayo RTI, Briqueta con material grueso sustituido por RAP)	39
Anexo 15 (Resultados del Ensayo RTI, Briqueta con material grueso sustituido por RAP)	40
Anexo 16 (Resultados del Ensayo RTI, Briqueta con material 100% por RAP)	40
Anexo 17 (Resultados del Ensayo RTI, Briqueta con material 100% por RAP)	41
Anexo 18 (Resultados del Ensayo RTI, Briqueta con material 100% por RAP)	42
Anexo 19 (Resultados del Ensayo RTI, Briqueta con material 100% por RAP)	43
Anexo 20 (Resultados del Ensayo RTI, Briqueta con material 100% por RAP)	43
Anexo 21 (Resultados del Ensayo RTI, Briqueta con material 100% por RAP)	44
Anexo 22 (Resultados del Ensayo RTI, Briqueta con material 100% por RAP)	45
Anexo 23 (Resultados del Ensayo RTI, Briqueta con material 100% por RAP)	47
Anexo 24 (Resultados del ensayo de Desgaste para material RAP)	48
Anexo 25 (Resultados del ensayo de Micro-Deval para material RAP)	49
Anexo 26 (Resultados del ensayo de 100% de finos para material RAP)	50
Anexo 27 (Resultados del ensayo de Equivalente de arena para material RAP)	51
Anexo 28 (Resultados del ensayo de CBR para material RAP)	51
Anexo 29 Formato Estimación de consumo de laboratorio para proyectos	52

1. INTRODUCCIÓN

El reciclado de pavimentos constituye una alternativa de reconstrucción o rehabilitación más competitiva y sostenible que la actuación convencional de refuerzo, ya que permite minimizar la utilización de recursos no renovables, áridos naturales y ligantes hidrocarbonados de origen petrolífero. Además, esta alternativa previene la creación de residuos, la ocupación de vertederos, y disminuye por consiguiente la necesidad de transportar estos materiales desde y hacia la obra como lo establece¹

En la actualidad, el tratamiento más frecuente de los residuos se hace por medio de su aprovechamiento a manera de reciclado; esto, con el fin de generar un ahorro en los costos de producción de las estructuras (entre estas las viales), disminuir el uso de materias primas naturales y a la vez disminuir la contaminación que la explotación de estas materias primas genera. Se puede afirmar que, el reciclado en obras viales trae entonces grandes beneficios, ya que contribuye a la rehabilitación de las diversas vías y carreteras de todo el territorio nacional. La rehabilitación de las vías por medio del reciclado del pavimento asfáltico permite reutilizar los materiales que provienen de las diversas capas de la estructura, que han perdido sus propiedades iniciales, pero que conservan componentes que permiten su reutilización en el diseño y construcción de una nueva estructura.

Dentro de esta investigación se quiere mostrar que por medio del mantenimiento de las vías con el reciclado de pavimento asfáltico se puede ahorrar en procesos de construcción y se puede generar además un gran aporte a la disminución de la contaminación que este tipo de material genera en el ambiente. En la fabricación del pavimento como en su colocación, al aplicarse en caliente, genera reacciones químicas las cuales ayudan a incrementar los niveles de "smog", contaminando los suelos, los ríos y la atmosfera. Los agentes contaminantes presentes en la elaboración del asfalto en caliente son partículas suspendidas totales (PST) y dióxido de azufre (SO₂) que se derivan del petróleo y en las personas que entran en contacto con este material presentan enfermedades respiratorias agudas que dificulta el desarrollo de los menores de edad que se encuentran en contacto que estos contaminantes. A pesar de que diversas investigaciones a nivel internacional y nacional se han realizado sobre esta temática, es importante destacar que en este trabajo se evalúa el 100 % de los agregados; Con el fin de tener un mayor aprovechamiento de este tipo de material y disminuir el impacto ambiental al momento de utilizar los agregados naturales. Por otra parte es importante destacar que en este trabajo se usan materiales locales de la ciudad de Bogotá, lo cual implica una solución desde el punto de vista de procesos constructivos, costos de operación y mantenimiento de las vías en la capital.

¹ PEREZ Félix, MIRO Rodrigo, MARTINEZ Clara. Investigación sobre reciclado de pavimentos. En: Artículo. Enero, 2003.

2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN.

Un primer trabajo de investigación que se realizó con base en el material que se empleara en el presente proyecto, es la investigación “Comportamiento a fatiga de mezclas asfálticas colombianas con adición de pavimento reciclado al 100%”; la cual tiene como objetivo general establecer el comportamiento a fatiga de mezclas asfálticas con granulometrías MD20 del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) y MDC 2 del Instituto Nacional de Vías (Invias), con adición de granular reciclado de pavimento flexible (RAP) y asfaltos de penetración 60/70 y 80/100 como lo establecen².

Este trabajo de grado tiene como antecedente un estudio realizado en el 2015 por Patiño y otros³, en donde se caracteriza la fatiga de mezclas MD20 y MDC2 con material reciclado de pavimento (RAP) y ante diferentes porcentajes de asfalto (2, 3,4 y 5%). En este estudio, se concluyó que la granulometría MDC-2 con contenido de asfalto 80/100 obtuvo un mejor comportamiento a fatiga en comparación con las demás mezclas estudiadas, esto se debe a que tienen mayor contenido de finos en su granulometría y que cuando se mezcló con asfaltos blando proporciono una mayor trabajabilidad, lo cual genera en la mezcla mayores ciclos de vida.

También se pudo concluir que es posible utilizar pavimento reciclado al 100% para mezclas asfálticas. Sin embargo, se deben realizar investigaciones adicionales con otras granulometrías y asfaltos modificados como lo señala.⁴

Un segundo documento hace referencia a una investigación que habla sobre el RAP se presenta como “Evaluation of RAP Impact on Hot-Mix Asphalt Design and Performance” (Evaluación del impacto de RAP en el diseño y el rendimiento del asfalto de mezcla en caliente)⁵.

El objetivo de este trabajo es investigar el efecto del pavimento asfáltico recuperado (RAP) sobre las propiedades volumétricas y mecánicas del asfalto de una mezcla en caliente (HMA). Se llevó a cabo un programa experimental, que incluía pruebas para medir los módulos de complejos de mezcla y la energía de fractura. Se prepararon seis diseños de mezclas diferentes con porcentajes variables de material

² PATIÑO Neidy, ORTIZ Oscar, CAMACHO, Javier. Investigación sobre el Comportamiento a fatiga de mezclas asfálticas colombianas con adición de pavimento reciclado al 100 %. En: Artículo. Mayo, 2014.

³ PATIÑO Neidy, ORTIZ Oscar, CAMACHO, Javier. Investigación sobre el Comportamiento a fatiga de mezclas asfálticas colombianas con adición de pavimento reciclado al 100 %. En: Artículo. Mayo, 2014.

⁴ PATIÑO Boyacá. Investigación sobre el Comportamiento de mezclas asfálticas con adición de pavimento reciclado. En: Tesis 2015.

⁵ HASAN Ozer. Investigación sobre Evaluation of RAP Impact on Hot-Mix Asphalt Design and Performance. En: Artículo. Mayo, 2009.

RAP (0, 20 y 40%) y dos fuentes de materiales diferentes de Illinois. Debido a que se cree que el RAP es el único factor que contribuye a los cambios de rigidez en las mezclas, es esencial determinar la contribución del RAP, que afecta la rigidez de HMA y el proceso de mezcla y compactación.

Las muestras de control y las muestras de práctica real también se prepararon para servir como mezclas de referencia. Las muestras de control incluyeron material RAP (reciclado de pavimento y agregado) los cuales fueron recuperados utilizando el método de vapor rotador. El efecto de la absorción sobre los materiales vírgenes y RAP, se evidenció en los resultados de las pruebas de módulo complejo. Adicionalmente, Se realizaron pruebas de energía de fractura para investigar el impacto de los materiales de RAP en la susceptibilidad de HMA al craqueo a baja temperatura según⁶.

La presente investigación busca dar alcance a la necesidad básica del hombre por buscar el aprovechamiento máximo de algún recurso y la optimización que se le puede hacer a algún proceso constructivo para el ahorro de costos y de tiempos; por esta razón el reciclaje de pavimentos representa una oportunidad importante para fabricar nuevas mezclas asfálticas además de aprovechar este material se consigue una técnica económica y medioambiental en cuestiones de minería, uso de materiales vírgenes y asimismo ahorro de energía. Los materiales reciclados de interés para la construcción de pavimentos se obtienen de la demolición de las estructuras de ingeniería civil y de los materiales de diseño de la industria. Los cuales pueden ser clasificados como: subproductos industriales, subproductos viales y subproductos de demolición. Además, Los materiales se perciben como una oportunidad para ahorrar recursos y evitar los impactos asociados. Con su extracción y transporte. El uso de subproductos en la construcción de carreteras es importante para el transporte público como lo plantea⁷

Según esto, se desea realizar diseño de una mezcla asfáltica convencional y reciclado con 100% de RAP y asimismo determinar cuál es el diseño óptimo que cumpla los estándares normativos de calidad y funcionalidad que el INVIAS ha reglamentado a través de los años, del mismo modo buscar el mayor aprovechamiento del material reciclado, para generar el menor desperdicio de este mismo. Para el material RAP se harán unos ensayos de resistencia con los cuales se estudiara las algunas propiedades tanto de resistencia y desgaste. Sus resultados estarán publicados en los ANEXOS.

⁶ HASAN Ozer. Investigación sobre Evaluation of RAP Impact on Hot-Mix Asphalt Design and Performance. En: Artículo. Mayo, 2009.

⁷ Horvath Arpad, Investigación sobre Life-Cycle Environmental and Economic Assessment of Using Recycled Materials for Asphalt Pavements. En: Artículo, 2003

Tipos de ensayo

- Ensayo relación humedad- peso unitario seco en los suelos (ensayo modificado de compactación (norma inv e-142-13)
- Ensayo cbr (inv e 148-13)
- Ensayo de equivalente de arena inv e - 133-13
- Resistencia mecánica de los agregados gruesos por el método de 10% de finos
- Resistencia de agregados a la degradación por abrasión en el micro-deval
- Ensayo de límites y humedades
- Ensayo de desgaste (norma inv e -218-13, norma inv e-219-13)
- Ensayo de Resistencia a la tracción indirecta RTI

3. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.

A partir del crecimiento en el sector económico del país, se ve la obligación de mejorar la infraestructura vial, por lo que existen programas de gobierno como la construcción de las vías 4G, lo que asegura la competitividad del país en la región construyendo más vías y mejorando las ya existentes.

En ciudades como Bogotá hay una gran incertidumbre con respecto a la calidad de la malla vial ya que en muchas partes de la ciudad se presentan deterioros considerables en vías. Detrimentos generados por el alto flujo vehicular, las condiciones climatológicas, el paso del tiempo y los malos procesos constructivos.

Así mismo, la alcaldía de Bogotá y la unidad de mantenimiento vial pone en marcha la rehabilitación de vías en la ciudad para mitigar los problemas de malla vial deteriorada, esta rehabilitación genera escombros producto del fresado; dichos residuos son llevados a centros de acopio y escombreras donde se crea una contaminación ambiental por la acumulación del material e impidiendo la posibilidad de ser reutilizados para nuevas mezclas asfálticas.

Bajo este contexto, se plantea el siguiente problema:

¿Con la reutilización del pavimento asfáltico reciclado, se puede obtener propiedades mecánicas similares, como las que posee un pavimento asfáltico convencional MDC-19, para su aprovechamiento en la construcción de vías?

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo General

En este proyecto se tratará el tema del diseño de una mezcla asfáltica convencional y reciclado con 100% de RAP. Con esto en mente, se quiere investigar si con la reutilización del pavimento asfáltico, existe la posibilidad de tener las mismas propiedades mecánicas de un pavimento asfáltico convencional MDC-19 para su aprovechamiento en la construcción de vías.

4.2 Objetivo Específicos

- Obtener la carga máxima de cada grupo de probetas con porcentajes (2,5%, 3%, 3,5%,4%) de cemento asfáltico (60-70) y sus respectivas densidades.
- Identificar que fracciones del material se pueden reutilizar como materia prima para la elaboración de nuevo pavimento asfáltico.
- Obtener la caracterización del material del reciclado de pavimento asfáltico y del material convencional, por medio de los ensayos requeridos por la norma INVIAS (INV. E-786-13)
- Comparar el diseño más óptimo que se obtuvo con el material de reciclado de pavimento asfáltico (RAP) con diseños convencionales y poder analizar estos dos diseños en cuanto a su comportamiento y características. Los cuales nos darán una idea más clara y precisa de cómo se comportaría el diseño con RAP en la construcción de una vía.

5. ALCANCES Y LIMITACIONES.

En el laboratorio se obtendrá la Carga máxima que puede soportar, rigidez, tenacidad y el volumen de vacíos de las probetas construidas con diferentes dosificaciones tanto de porcentaje de agregado grueso como de cemento asfáltico. A partir de esto, se podrá realizar un análisis comparativo y poder realizar las conclusiones en las cuales se publicarán los porcentajes de cemento asfáltico requerido que cumplan con las normas respectivas en cuanto a las especificaciones del INVIAS. Estos análisis se podrán lograr a través de la elaboración de dos tipos de probetas.

- ✓ Tipo 1: Material grueso de RAP + material fino convencional
- ✓ Tipo 2 Material grueso convencional y material fino de 100% RAP

Estos tipos de probetas tendrán un proceso para llegar a los resultados que se quieren analizar y que se describe en la FIGURA 1 (Diagrama de la Metodología de la Investigación).

Las limitaciones de nuestra investigación, basada en el diseño de mezclas asfálticas flexibles con RAP, son no poder determinar la durabilidad del diseño de la mezcla que se obtiene a partir del análisis de los diferentes porcentajes de cemento asfáltico, puesto que la investigación a realizar solo permite por el tiempo obtener la rigidez, Tenacidad y el volumen de vacíos cada grupo probetas.

Con los resultados obtenidos no se podrá lograr modelar las distintas capas (base, sub-base, sub-rasante) que componen el diseño de una vía. Sin embargo, con los datos obtenidos en esta investigación se suministraran datos importantes para seguir con investigaciones ligadas a la nuestra y poder realizar las limitaciones que se presentaron en este trabajo de investigación.

6. MARCO DE REFERENCIA

6.1 Marco Teórico

El pavimento es una estructura con varios tipos de capas con espesores distintos, los cuales se construyen sobre una superficie terraplenada la cual tiene como objetivo final el ser económica y resistir los esfuerzos provenientes del flujo de múltiples vehículos, y también de los distintos factores climáticos que se presentan de acuerdo a cada zona en donde se construya un tramo de vía. El pavimento tiene como objetivo brindar a los usuarios las mejores condiciones de rodamiento, comodidad, economía y seguridad cuando se transite sobre esta.⁸

El pavimento se puede clasificar de manera muy general en dos tipos: rígidos y flexibles. Pero han surgido otros tipos de pavimentos basados en probar nuevos materiales para la elaboración y resistencia de este mismos; estos son: pavimentos de hormigón de cemento portland y pavimentos asfálticos. (Bernucci-Ceratti-Soares, 2008).⁹ Para que un pavimento pueda cumplir adecuadamente con las funciones para las cual fue diseñado debe cumplir unos requisitos básico⁹

- ✓ Debe ser durable
- ✓ Debe ser económico
- ✓ Debe tener el color adecuado para evitar reflejos y destellos para garantizar una adecuada seguridad vial.
- ✓ Debe tener un buen drenaje.
- ✓ Debe ser resistente al intemperismo y cargas impuestas por el tránsito.

La mezcla asfáltica es una combinación de un ligantes y agregados minerales pétreos. Las cantidades relativas de estos minerales determinan las propiedades físicas de la mezcla, así como el rendimiento de la misma para un determinado uso¹⁰.

Las mezclas asfálticas están conformadas por agregados (95%) y asfalto (5%) y se pueden clasificar según la distribución de sus agregados en: continua, discontinua y densa. O por el contrario se pueden clasificar según su temperatura en Mezcla

⁸ BERNUCCI Liedi, MOTTA Laura, CERATTI Jorge, SOARES JB. Libro de Investigación Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros, 2008

⁹BERNUCCI Liedi, MOTTA Laura, CERATTI Jorge, SOARES JB. Libro de Investigación Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros, 2008.

⁹ FONSECA Alfonso. Libro de Investigación Ingeniería de Pavimentos para Carreteras. En: Libro, 1998

¹⁰ PIQUERAS Víctor. Libro de Investigación Ingeniería de Pavimentos. En: Libro. 2014¹⁰

caliente (150°-180°), Mezcla tibia (110°-140°), Mezcla semi-templada (50°-100°) y Mezcla en frío (0°-20°).¹¹

En nuestro territorio nacional se encuentra algunos tipos de mezclas asfáltica como las mezclas drenantes, SMA y MCD; esta última es la más utilizada en Colombia y se clasifica en: Mezcla densa en caliente (MCD), Mezcla semi-densa en caliente (MSG) y Mezcla gruesa en caliente (MGC).¹¹

En otras partes del mundo la mezcla en caliente se conoce como hot mix asphalt (HMA). Esta mezcla tradicional también se encuentra de forma densa, en matriz de piedra (stone matrix asphalt-SMA) y en varias HMA de medidas abiertas; también se pueden considerar otros tipos de superficies para los pavimentos a base de asfaltos como fog seals (sellos de niebla), slurry seals (sellos de lodos) y BST (tratamientos para el mantenimiento del asfalto). El pavimento asfáltico reciclado o recuperado (Reclaimed asphalt pavement- RAP) es considerado un material del tipo HMA.¹¹

Para el diseño de la mezcla asfáltica el INVIAS dentro de su normativa propone unas etapas para la realización del ensayo Marshall (INV-E 748-13), dicho ensayo nos permite determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico y conocer parámetros volumétricos (acomodo de partículas) y de resistencia (carga que soporta).

Hay ensayos de laboratorio que nos pueden ayudar a entender mejor el comportamiento de los distintos materiales encontrados en las capas que componen el diseño de un pavimento, en Colombia las normas y especificaciones del INVIAS, orientan la ejecución de dichos ensayos para los distintos materiales y los resultados que podemos obtener a través de ellos; dentro de este manual de normas y especificaciones se destacan *la sección 200- Agregados pétreos*, en la cual se dan las pautas para evaluar parámetros de resistencia de los agregados y la forma de las partículas que vayamos a utilizar para las mezclas asfálticas.

Los ensayos más representativos son:

- Resistencia a la tensión indirecta (RTI) (INV. E-786-13).
- Desgaste en máquina de los ángeles (INV-E 218)
- Desgaste- micro deval (INV-E 238)
- 10% de finos (INV-E 224)
- Azul de metileno (INV-E 235)
- Forma de las partículas- alargadas y aplanadas (INV-E 240)
- Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso (1 y 2 caras) (INV E-227-13).

¹¹Thin Hot Mix Asphalt Surfacing. Libro de Investigación : National Asphalt Pavement Association (NAPA). 2007.

Las etapas para la elaboración del ensayo son:

Caracterización de materiales: en esta etapa se hacen ensayos a los agregados y asfaltos que se vayan a utilizar con el fin de saber cuál es su comportamiento y características principales.

Determinación del porcentaje de asfalto óptimo inicial: se determina la temperatura del asfalto, agregados y compactación para cumplir con los parámetros indicados por el INVIAS.

Cantidad inicial de asfalto: esta cantidad puede ser obtenida de manera matemática por medio del área superficial de los agregados o se puede a través de la experiencia que se tenga en campo.

Fabricación de briquetas: con las anteriores etapas realizadas se procede a la elaboración de los cuerpos de prueba para el ensayo final y recolección de datos.

6.2 Estado del Arte.

En este proyecto se tratará el tema del diseño de una mezcla asfáltica convencional y reciclado con 100% de RAP. Es decir, se quiere lograr por medio de ensayos de laboratorio el diseño más óptimo y rendimiento de los materiales que componen el pavimento asfáltico reciclado, para lograr una mezcla asfáltica con los requerimientos mínimos exigidos por la norma INVIAS

Se han realizado distintas investigaciones con respecto a la elaboración de mezclas con RAP, en las que se analizan sus propiedades mecánicas dando como resultado artículos y trabajos de grado, un primer trabajo consultado fue un manual que se realizó con base en el diseño de las mezclas SuperPave, este manual se basó en las características mecánicas que posee el RAP, determinando que este material se puede reutilizar en nuevas mezclas de asfalto porque los componentes de la mezcla, el aglomerante de asfalto y el agregado, todavía tienen un valor. La conclusión de este trabajo fue que de acuerdo a la experiencia pasada con RAP en mezclas de Marshall y Hveem ha demostrado que las mezclas de RAP diseñadas y construidas adecuadamente pueden funcionar tan bien o incluso mejor que las mezclas hechas con todos los materiales nuevos. Lo mismo debería ser cierto para las mezclas Superpave hechas con RAP.¹²

Una segunda investigación realizada de acuerdo al tema que se está tratando se titula “variabilidad de las propiedades mecánicas del pavimento de asfalto recuperado (RAP) obtenido de diferentes fuentes”, este trabajo habla de cómo las

¹²Counci. Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method: Technician's Manual Libro de Investigación : NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. 2001.

características del material dependen del tipo y las propiedades de la mezcla de asfalto original, la tecnología utilizada para recuperar el material, la vida útil del pavimento y las características de los agregados y el aglutinante utilizado. El objetivo de este trabajo fue caracterizar y analizar la variabilidad de la distribución original del tamaño de la partícula, el contenido de asfalto y las propiedades reológicas del asfalto recuperado obtenidos de seis proyectos de carreteras diferentes. A partir de la medición de estos parámetros los resultados de este estudio confirman la importancia de usar RAP de una sola fuente o promover procesos de homogeneización entre diferentes fuentes de RAP en la fabricación de nuevas mezclas de HMA, particularmente en aquellas con alto contenido de RAP.¹³

Por último, se encontró una investigación la cual se titula “Reciclaje de asfalto 100% de mezcla en caliente: desafíos y beneficios”, cuyo objetivo es determinar el comportamiento mecánico de las mezclas de RAP, a partir del análisis de los especímenes, agregándole un porcentaje de aglutinante en una cantidad muy mínima al nuevo asfalto de la mezcla en caliente. El análisis a partir de los datos obtenidos muestra que la metodología de diseño de mezcla tradicional, especialmente con respecto al diseño de contenido óptimo de aglutinante, tiene que ser modificado para mezclas RAP. El diseñador de la mezcla tendrá que hacer compromisos al elegir cómo procesar el asfalto recuperado y qué tamaño de fracciones satisfacen mejor la gradación de la mezcla, el contenido de aglutinante, mezclar requisitos de propiedades volumétricas y de rendimiento mientras se utiliza eficientemente el material disponible. Para ser visto como una alternativa al asfalto convencional, cualquier mezcla de alto RAP (incluido el 100% reciclado) tiene que proporcionar el rendimiento esperado y la longevidad del pavimento de la carretera. Los principales obstáculos para el uso de mezclas de asfalto recuperado son: Agrietamiento, Ruptura y Envejecimiento¹⁴

Con base a los trabajos encontrados, es posible establecer dentro del estudio de este tema es importante tener presente que lograr un buen proceso de reciclado, requiere aprovechar al máximo cada recurso que se encuentre dentro de este proceso antes de ser eliminado o desechado por completo. Además, que es importante dar un enfoque en el ámbito ecológico, y en los costos de este tipo de proyectos para poder optimizar los tiempos de ejecución y recursos en la construcción de nuevas vías.

¹³ Calvo. Variability of the mechanical properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) obtained from different sources. Libro de Investigación : Construction and Building Materials, 2019.

¹⁴Zaumanis. 100% Hot Mix Asphalt Recycling: Challenges and Benefits .Libro de Investigación : Transportation Research Procedia. 2016

6.3 Marco Conceptual

Pavimentos asfálticos: son aquellos en los que el revestimiento está compuesto por una mezcla constituida básicamente de agregados y ligantes Asfálticos. Está formado por cuatro capas principales:

1-capas de rodadura

2-base

3-sub-base

4-subrasante. (Bernucci-Ceratti-Soares, 2008).¹⁵

Capa de rodadura: Capa superior del pavimento formado por mezclas bituminosas. A su vez, el pavimento es la capa superior del firme que, colocada sobre la base, soporta directamente las solicitaciones del tráfico. Las cualidades superficiales de la calzada dependen de la adecuada selección y ejecución del pavimento.¹⁶

Base: Es la capa subyacente a la capa de rodadura comúnmente colocada en un pavimento flexible en donde este material puede ser triturado; debe ser libre de arcillas y debe cumplir con unos requisitos que se medirán por medio de ensayos de laboratorio.¹⁶

Sub- Base: Materiales que pueden provenir del reciclaje en construcción o de materiales naturales, que son adecuados según un número de ensayos que miden las características mecánicas.¹⁶

Subrasante: es una capa en la que se apoya la estructura del pavimento y la característica especial que define la propiedad de los materiales que la compone la sub rasante, se conocen como módulo de resiliencia (Mr).⁶

Pavimentos flexibles: Es una estructura que se compone de capas subyacentes (base, sub-base, subrasante), que según a la temperatura a la que se fabriquen se pueden clasificar en mezcla asfáltica en frío o en mezcla asfáltica en caliente. La transmisión de cargas se da por la combinación de capas que se puede representar con diferentes espesores según la carga a la que esté sometida.¹⁷

¹⁵BERNUCCI Liedi, MOTTA Laura, CERATTI Jorge, SOARES JB. Libro de Investigación Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. En: Libro, 2007.

¹⁶Reverence. Australian Asphalt Pavement Association. Libro de Investigación: FLEXIBLE PAVEMENT. 2010

¹⁷Jamal, FLEXIBLE Pavement. Libro de PAVEMENT RECYCLING EXECUTIVE SUMMARY. En: Libro, 1996.

RAP: Hace referencia a los materiales de pavimento que son removidos por medio del fresado los cuales contienen asfalto y agregados. Generados durante la reconstrucción de una vía.¹⁸

Agregados Ligados: son estabilizados con aditivos, los cuales son hidráulicos (CAL-CEMENTO).¹⁹

Agregados no ligados: son agregados granulares y se caracterizan por ser mezclas de suelo, sub- suelo y agregados.¹⁹

Agregados marginales: son sub-productos industriales, naturales o desechos.¹⁹

6.4 Marco Legal

En la actualidad el diseño de vías y de pavimentos asfálticos, están regidos por la Normas y manuales estipulados por Instituto Nacional De Vías (INVIAS) con el apoyo del Ministerio De Transporte.

En dicha norma se proporcionan los requisitos mínimos para la correcta selección de pavimentos que se ajuste al tipo de vía que se vaya a construir; teniendo en cuenta que en el país se tienen varios tipos de vías de acuerdo al uso o localización que se les vaya a dar. También, dentro de estas normas se indican los ensayos de laboratorio que se deben realizar para llevar un control de la calidad del pavimento que se está empleando, acorde a las prácticas actuales de diseño de estructuras en la mayoría de los países del mundo.

¹⁸Sullivan, FLEXIBLE Pavement. Libro de PAVEMENT RECYCLING EXECUTIVE SUMMARY. En: Libro, 1996.

¹⁹Thin Hot Mix Asphalt Surfacing. Libro de Investigación National Asphalt Pavement Association (NAPA). 2007.

Tabla 1. Marco Legal

Norma	Título Norma	Descripción
INV.E -133-13	Equivalente de arena de suelos y agregados finos	Este ensayo tiene por objeto determinar, bajo las condiciones normalizadas, las proporciones relativas del polvo y material de apariencia arcillosa o finos plásticos presentes en suelos o agregados finos de tamaño inferior a 4,75 mm
INV.E -218-13	Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37,5 mm	Ese método se refiere al procedimiento a seguir para medir la resistencia a la degradación de los agregados gruesos de tamaño menos a 37,5 mm por medio de la máquina de los ángeles.
INV.E -223-13	Densidad, densidad relativa y absorción del agregado grueso	Se describe el procedimiento que se debe seguir para determinar la densidad promedio de una cantidad de partículas de agregado grueso, la densidad relativa y la absorción del agregado grueso.
INV.E- 233-13	Determinación del contenido de azufre en los agregados pétreos	Este método de ensayo brinda un procedimiento para la determinación cuantitativa del azufre presente en los agregados para concretos.

Continuación Tabla 1. Marco Legal

INV.E -706-13	Penetración de los materiales bituminosos	Esta norma se refiere a la determinación de la consistencia de los materiales bituminosos sólidos o semisólidos en los cuales el único o el principal componente es un asfalto.
INV.E -702-13	Ductilidad de los materiales asfálticos	Describe el procedimiento para determinar la ductilidad de los materiales asfálticos de consistencia sólida y semisólida, midiendo la distancia hasta la cual se elonga una probeta de las dimensiones descritas en la sección 4 hasta alcanzar la rotura.
INV.E -712-13	Punto de ablandamiento de materiales bituminosos	Se refiere a la determinación del punto de ablandamiento de productos bituminosos en el intervalo de 30 a 157°C, utilizando el aparato de anillo y bola sumergido en agua destilada o en glicerina.
INV.E -716-13	Determinación de la viscosidad del asfalto empleando viscosímetros capilares de vacío	Describe el procedimiento para determinar la viscosidad de un ligante asfáltico, empleando viscosímetros capilares a 60°C.
INV.E -709-13	Puntos de inflamación y de combustión mediante la copa abierta Cleveland	Describe el procedimiento para determinar los puntos de inflamación y de combustión de productos de petróleo, empleando una copa abierta de Cleveland de manejo manual o automático
INV.E -786-13	Determinación de la deformabilidad al flujo plástico y las resistencias de mezclas asfálticas en caliente usando el ensayo de tracción indirecta.	Describe dos procedimientos. En el primero de ellos, la deformación por flujo plástico (creep) y la resistencia a la tracción en el espécimen son determinadas mediante un análisis de figuración térmica.
INV.E -732-13	Extracción cuantitativa del asfalto en mezclas para pavimentos	Describe métodos para la determinación cuantitativa del asfalto en mezclas asfálticas en caliente y en muestras tomadas

Continuación Tabla 1. Marco Legal

Resolución 0472 de 2017	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Por el cual se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición – RCD y se dictan otras disposiciones.
Resolución 26700 de 2017	Instituto de Desarrollo urbano, IDU	Por la cual se adopta el manual para la supervisión, control, manejo y operación de los sitios de almacenamiento transitorio de pavimento asfáltico fresado.

<u>INV-E</u> <u>218-13</u>	<u>Desgaste en máquina de los ángeles</u>	Determina la variación de desgaste de un material, a un menor desgaste es mejor la calidad del material.
<u>INV-E</u> <u>786-13</u>	Resistencia a la tensión indirecta (RTI)	Este ensayo evalúa principalmente la resistencia a tracción que experimenta una briqueta a 25 °C cuando esta se falla bajo una carga monotónica en compresión. Con el fin de que la muestra en compresión falle por tracción.
<u>INV-E</u> <u>238-13</u>	<u>Desgaste- micro deval</u>	Determina la resistencia a la desfragmentación por la fricción entre las partículas, se puede hacer de manera saturada o no saturada.
		Este ensayo permite determinar la cantidad de arcilla nociva presente en un agregado. Y consiste en añadir de manera sucesiva dosis

Continuación Tabla 1. Marco Legal

<p><u>INV-E</u> <u>235-13</u></p>	<p><u>Azul de metileno</u></p>	<p>pequeñas de una solución de azul de metileno a una muestra de ensayo en presencia de agua. Luego de cada dosis se comprueba la absorción de la solución de colorante sobre un papel de filtro para detectar la presencia de colorante libre. Luego se calcula el valor de metileno.</p>
<p><u>INV-E</u> <u>240-13</u></p>	<p><u>Forma de las partículas- alargadas</u></p>	<p>El ensayo de índice de aplanamiento consiste en primer lugar en el uso de tamices, con la muestra dividida en fracciones, cada una de estas fracciones se criba en los tamices de barras paralelas colocadas a separaciones $\frac{3}{5}[(d_r+D_r)/2]$. Las partículas que pasan con consideradas planas. El ensayo de índice de alargamiento consiste en dividir la muestra en dos fracciones, luego estas dos fracciones son analizadas con un calibrador de longitudes el cual tiene barras verticales separadas a distancias de $\frac{9}{5}[(d_r+D_r)/2]$. Las partículas retenidas por las barras son alargadas.</p>

Fuente: Autores

7. METODOLOGÍA

El trabajo de investigación se desarrollará con un material proveniente de una obra de rehabilitación vial ubicada en el barrio Bosa en la ciudad de Bogotá. Después de recibir dicho material se pasa a clasificar por tamices (1/2", 3/8", N°4, N°10, N°40, N°80, N°200 y fondo), de igual manera que se tamiza el material convencional que es suministrado por la empresa Concescol S.A. En cuanto al material ligante, se utiliza un cemento asfáltico (60-70) para el desarrollo de esta investigación. Acto siguiente se realiza una granulometría para la elaboración de las probetas con distintos porcentajes de asfalto. Dicha granulometría está especificada en la Tabla 2 y Tabla 3.

Tabla 2. Granulometría

MUESTRA	TAMIZ	mm	PORCENTAJE DE PESO	PESO (g)
1200	3/4	19	0,0%	0
	1/2	12,5	12,5%	147,0
	3/8	9,5	8,5%	99,96
	#4	4,75	22,0%	258,72
	#10	2	20,0%	235,2
PORCENTAJE DE ASFALTO	#40	0,425	17,5%	205,8
2,0%	#80	0,18	7,0%	82,32
	#200	0,075	6,5%	76,44
TOTAL AGREGADOS (g)	FONDO		6,0%	70,56
1176,00	C.A		2,0%	24

MUESTRA	TAMIZ	mm	PORCENTAJE DE PESO	PESO (g)
1200	3/4	19	0,0%	0
	1/2	12,5	12,5%	146,25
	3/8	9,5	8,5%	99,45
	#4	4,75	22,0%	257,4
	#10	2	20,0%	234
PORCENTAJE DE ASFALTO	#40	0,425	17,5%	204,75
2,5%	#80	0,18	7,0%	81,9
	#200	0,075	6,5%	76,05
TOTAL AGREGADOS (g)	FONDO		6,0%	70,2
1170,00	C.A		2,5%	30

Fuente: Autores

Tabla 3. Granulometría

MUESTRA	TAMIZ	mm	PORCENTAJE DE PESO	PESO (g)
1200	3/4	19	0,00%	0
	1/2	12,5	12,50%	144,75
	3/8	9,5	8,50%	98,43
	#4	4,75	22,00%	254,76
	#10	2	20,00%	231,6
PORCENTAJE DE ASFALTO	#40	0,425	17,50%	202,65
3,5%	#80	0,18	7,00%	81,06
	#200	0,075	6,50%	75,27
TOTAL AGREGADOS (g)	FONDO		6,00%	69,48
1158,00	C.A		3,50%	42

MUESTRA	TAMIZ	mm	PORCENTAJE DE PESO	PESO (g)
1200	3/4	19	0,00%	0
	1/2	12,5	12,50%	144
	3/8	9,5	8,50%	97,92
	#4	4,75	22,00%	253,44
	#10	2	20,00%	230,4
PORCENTAJE DE ASFALTO	#40	0,425	17,50%	201,6
4,0%	#80	0,18	7,00%	80,64
	#200	0,075	6,50%	74,88
TOTAL AGREGADOS (g)	FONDO		6,00%	69,12
1152,00	C.A		4,00%	46,08

Fuente: Autores

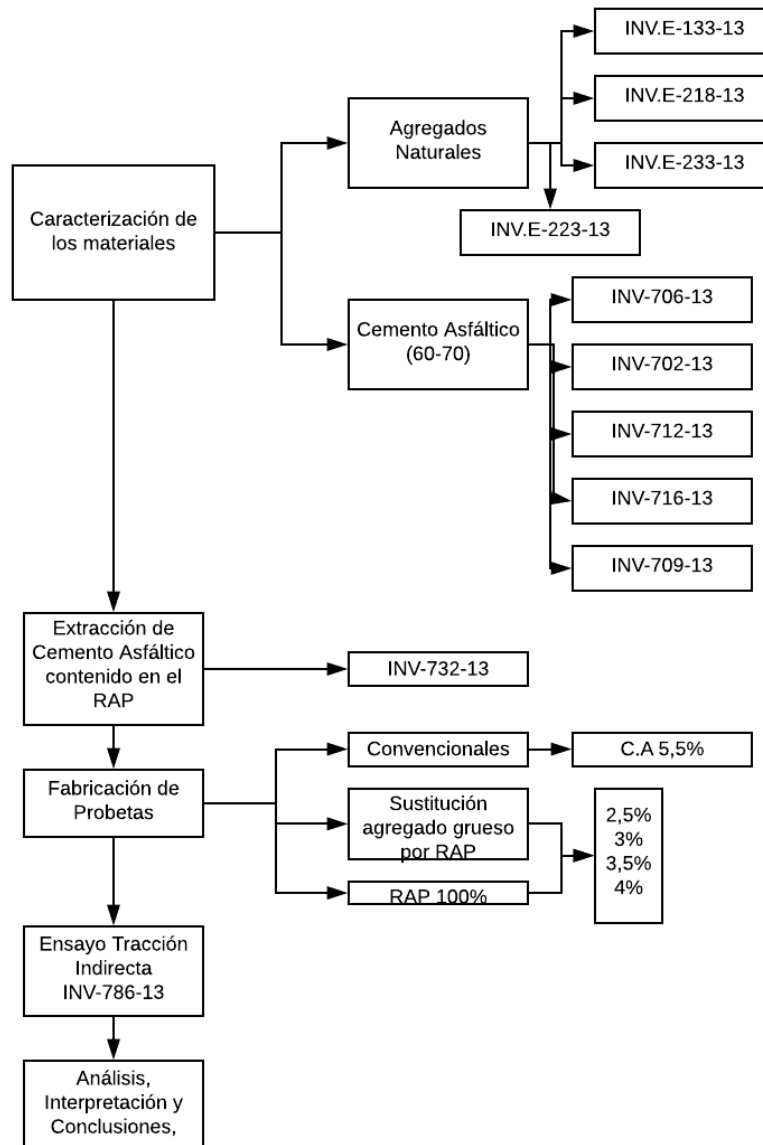
Siguiendo con la metodología que se presenta en la FIGURA 1, se realiza una caracterización de los agregados (vírgenes y RAP) bajo diferentes ensayos, con el fin de determinar su pertinencia para la fabricación de una mezcla asfáltica.

Posteriormente se hará el ensayo de extracción de cantidad de asfalto con respecto a la norma (I.N.V. E – 732 –13). A partir de este se obtiene el porcentaje de asfalto necesario de diseño y se procede a la fabricación de probetas (masa total 1200gr por probeta) bajo diferentes porcentajes (2.5%, 3%, 3.5%,4%) de cemento asfáltico (60-70). En total se fabrican 36 probetas, 6 de materiales convencionales (agregado natural) y usando un porcentaje de cemento asfáltico de 5,5%; 15 probetas tendrán material RAP sustituyendo la fracción gruesa de la granulometría, y las restantes se fabricaran con 100% RAP. Es válido aclarar que se le realizaran diferentes laboratorios los cuales se encuentran en el apéndice del MARCO LEGAL, los cuales están regulados y normalizados por INVIAS y que nos ayudaran a obtener resultados con los cuales se analizara el comportamiento que tienen de las distintas probetas que se conforman de los materiales tanto RAP como convencional. En los ANEXOS se encuentra el formato con la estimación

aproximada de consumo horario que se va a tener por cada proceso y ensayo que se realizara en el laboratorio de pavimentos.

Finalmente, se calcularán y analizarán los parámetros, con el objeto de establecer el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas estudiadas y establecer la viabilidad de su aplicación.

FIGURA 1 Diagrama de la Metodología de la Investigación



Fuente: Autores

8. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Ya realizadas las pruebas de laboratorio, se procede al análisis sobre el diseño de las mezclas con inclusión de RAP. Se busca determinar el porcentaje de asfalto y el porcentaje de RAP ideal, haciendo una comparación de los resultados con las mezclas de MDC-19 convencionales.

Del ensayo de Resistencia a Tracción Indirecta (RTI) realizado a cada grupo de briquetas se pudo obtener diferentes datos (Fuerza, Rigidez, Tenacidad) como se muestran en la **Tabla 5. Briquetas con Material Grueso Sustituido por RAP** y la **Tabla 6. Briquetas con Material 100% RAP**, estos datos obtenidos fueron promediados a partir de los resultados de cada ensayo de acuerdo al contenido de cemento asfáltico añadido, para así obtener un margen de error mínimo en el análisis de estos. La comparación de los datos se hace a partir de las muestras de control presentadas en la **Tabla 4. Briquetas de Control MDC-19**. Los resultados de cada tipo de muestra se puede observar en Anexo 1. Resultado RTI Briqueta.

En la **Tabla 4. Briquetas de Control MDC-19** se presentan diferentes parámetros de fractura de una mezcla asfáltica MDC-19 con adición de C.A (60-70) con contenido de 5,5%. Los parámetros obtenidos a partir del ensayo RTI son: 1. Carga máxima, que representa la resistencia de la mezcla, 2. Rigidez que se calcula a partir de la pendiente que se obtiene de la gráfica realizada de acuerdo a el ensayo, 3. Flujo que representa la deformación máxima de la briketa antes de la falla, 4. Tenacidad que se obtiene a partir del área bajo la curva que se crea a partir de la Carga vs. Desplazamiento.

Tabla 4. Briquetas de Control MDC-19

Resumen								
BRIQUETAS DE CONTROL MDC-19								
Contenido Asfalto	Muestra	Carga (kPa)	Promedio (kPa)	Desviación σ	Cof variación	rigidez	flujo	tenacidad
5,5%	1	673,25	753,29	248,59	0,00	104,73	7,11	42,27
	2	808,60						
	3	778,01						

Fuente: Autores

En la **Tabla 5. Briquetas con Material Grueso Sustituido por RAP** se presentan parámetros de fractura, ante diferentes contenidos de asfalto de acuerdo a lo planteado en el objetivo de la investigación. Los datos obtenidos a partir del ensayo RTI son: 1. Carga máxima, que representa la resistencia de la mezcla, 2. Rigidez que se calcula a partir de la pendiente que se obtiene de la gráfica realizada de acuerdo a el ensayo, 3. Flujo que representa la deformación máxima de la briketa

antes de la falla, 4. Tenacidad que se obtiene a partir del área bajo la curva que se crea a partir de la Carga vs. Desplazamiento.

Por otra parte, de los datos registrados de cada muestra, se realizó un promedio y a estos, se obtuvo la desviación estándar de acuerdo a la carga registrada para observar que tan diversos se encuentran los datos en cuanto a la carga de cada tipo de muestra.

Tabla 5. Briquetas con Material Grueso Sustituido por RAP

Resumen								
BRIQUETAS CON MATERIAL GRUESO SUSTITUIDO POR RAP								
Contenido Asfalto	Muestra	Carga (kPa) Carga Max	Promedio (kPa)	Desviación σ	Cof variación	rigidez	flujo	tenacidad
2,5%	1	611,90	566,84	188,35	0,01	202,79	2,58	17,11
	2	458,22						
	3	630,41						
3,0%	1	811,13	618,32	186,07	0,01	196,27	2,50	16,33
	2	419,05						
	3	624,77						
3,5%	1	723,40	665,39	261,90	0,00	381,13	1,67	22,83
	2	633,05						
	3	639,71						
4,0%	1	711,23	729,69	278,37	0,00	274,31	2,50	23,83
	2	748,14						
	3	729,69						

Fuente: Autores

En la **Tabla 6. Briquetas con Material 100% RAP** se presentan diferentes parámetros de fractura, ante diferentes contenidos de asfalto. Los parámetros obtenidos a partir del ensayo RTI son: 1. Carga máxima, que representa la resistencia de la mezcla, 2. Rigidez que se calcula a partir de la pendiente que se obtiene de la gráfica realizada de acuerdo a el ensayo, 3. Flujo que representa la deformación máxima de la briqueta antes de la falla, 4. Tenacidad que se obtiene a partir del área bajo la curva que se crea a partir de la Carga vs. Desplazamiento.

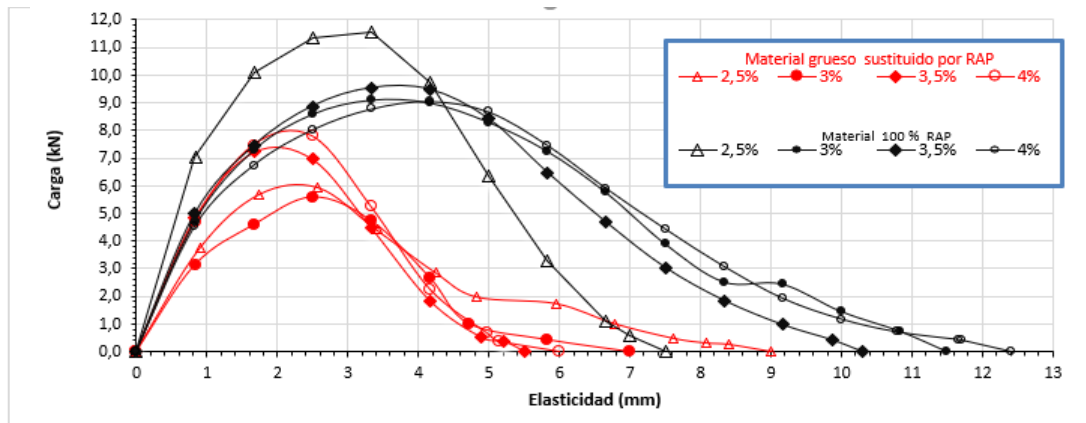
Tabla 6. Briquetas con Material 100% RAP

Resumen								
BRIQUETAS CON MATERIAL 100% RAP								
Contenido Asfalto	Muestra	Carga (kPa) Carga Max	Promedio (kPa)	Desviación σ	Cof variación	rigidez	flujo	tenacidad
2,5%	1	1063,65	1021,41	402,06	0,00	304,47	3,33	51,33
	2	1049,67						
	3	950,92						
3,0%	1	744,12	819,58	285,56	0,00	240,09	3,33	70,51
	2	921,37						
	3	793,26						
3,5%	1	840,00	841,45	312,15	0,00	251,55	3,33	55,12
	2	854,70						
	3	829,64						
4,0%	1	795,52	796,19	298,05	0,00	191,10	4,17	84,07
	2	849,46						
	3	743,60						

Fuente: Autores

De los datos obtenidos se realizó una serie de gráficas comparativas de acuerdo al tipo de muestra cómo se observa en FIGURA 2 Carga vs Elasticidad

FIGURA 2 Carga vs Elasticidad



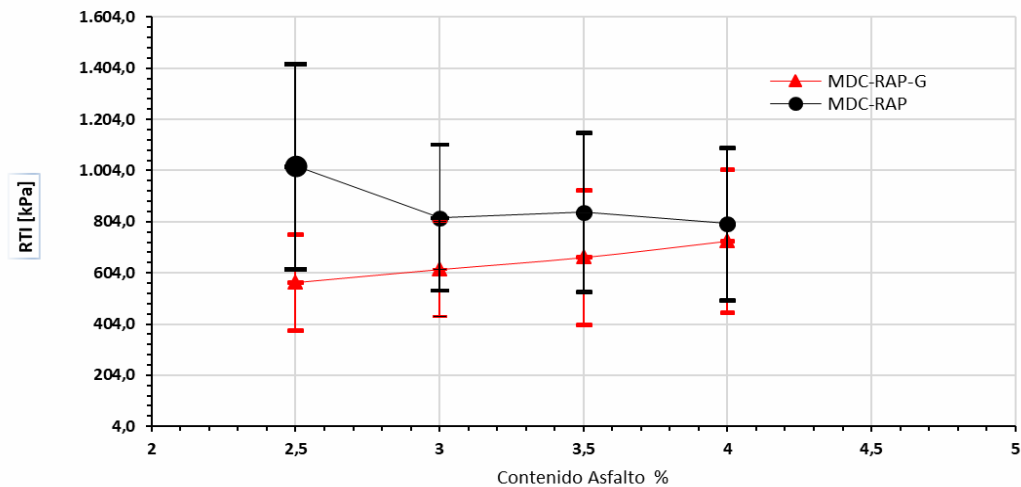
Fuente: Autores

En la FIGURA 2 Carga vs Elasticidad, las muestras en donde se reemplazó el material grueso por RAP, al añadirles una cantidad de cemento asfáltico en cantidades distintas, la carga que resisten las probetas son mayor a medida en que se aumenta la cantidad de aglutinante presente y va haber un mejor comportamiento frente a una carga externa.

Por otra parte, el comportamiento de las briquetas que fueron fabricadas con material 100% RAP, revelan un comportamiento variable en su comportamiento frente a una carga aplicada. Esto puede deberse a que, al agregar un porcentaje mayor cemento asfáltico a la mezcla, la carga máxima soportada se vuelve menor, debido a que el material (RAP) ya poseía cemento asfáltico, y al añadirle más de esta sustancia, las partículas presentan una disgregación porque no se presenta cohesión entre estas.

A partir de cada gráfica y la información obtenida para cada tipo de muestra, se logró obtener datos tales como: la desviación estándar y el coeficiente de variación, que al observar el comportamiento de la gráfica creada FIGURA 3. Carga Máxima, en el análisis de estos, el error que se presenta entre las dos muestras representadas (MDC-RAP-G, MDC-RAP); se ve que, a mayor contenido de asfalto, se presentan menos datos atípicos en cuanto a la medición de la rigidez en el momento de realizar las briquetas.

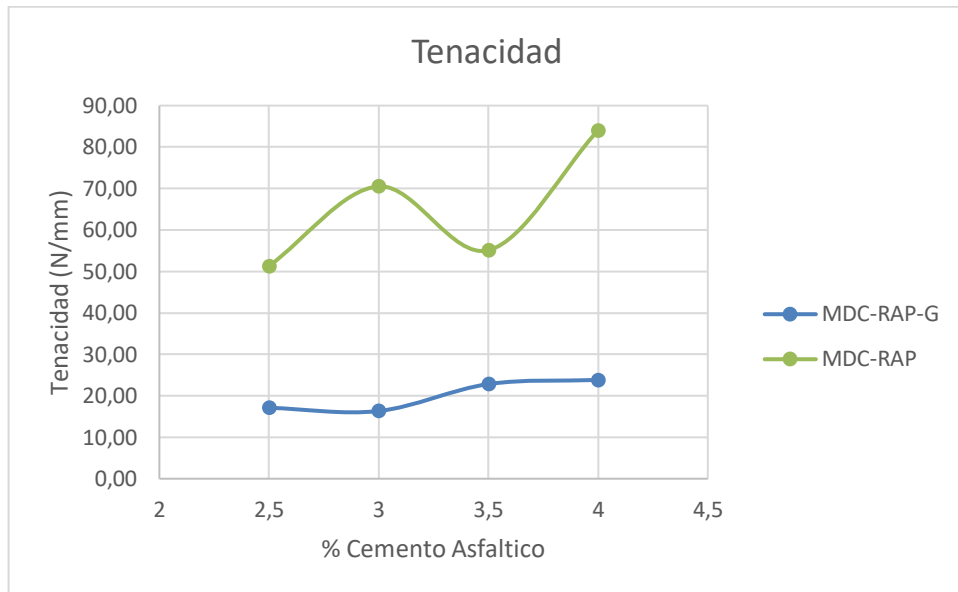
FIGURA 3 Carga Máxima



Fuente: Autores

En la FIGURA 4. Tenacidad. La tenacidad en las mezclas en donde se sustituyó el material grueso por RAP, se evidencia que, a mayor cantidad de asfalto, está se va incrementando siendo proporcional a la carga máxima recibida al ver las dos muestras en que se les adiciona un porcentaje de aglutinante de 4%, la tenacidad del material que contiene 100% RAP aumenta en un 71,65% con respecto a la muestra en donde se sustituyó la fracción gruesa observándose que la energía de disipación en el material de contenido 100% RAP es mayor

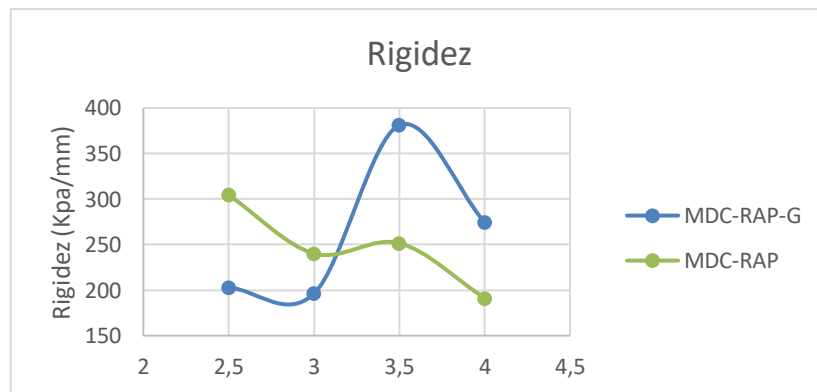
FIGURA 4. Tenacidad



Fuente: Autores

En la FIGURA 5. Rigidez. La rigidez en las muestras que contenían material en su totalidad de Pavimento asfáltico Reciclado, a medida que se aumentó el porcentaje de cemento asfáltico en su dosificación, fue disminuyendo, esto debido a la cantidad de ligante que había entre las partículas haciendo que, con una carga externa, las partículas no tengan cohesión, produciendo la separación entre estas de forma fácil, también se debe a las propiedades que ya posee el RAP, este material ya fue envejecido y sus propiedades fisicoquímicas y la durabilidad del pavimentó van disminuyendo.

FIGURA 5. Rigidez

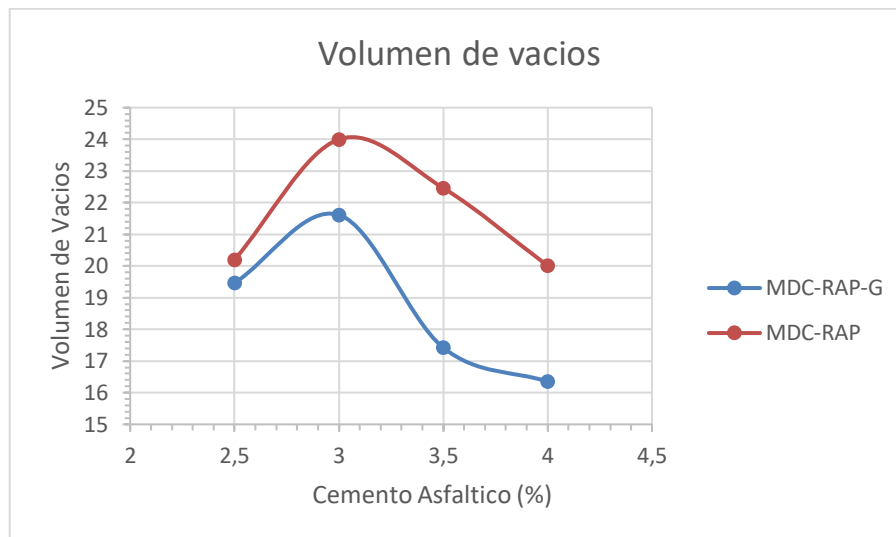


Fuente: Autores

Al observar la FIGURA 6 Volumen de vacíos en la mezcla, las muestras en donde el material es 100% Pavimento asfáltico reciclado, no muestra un comportamiento

predecible frente a la cantidad de vacíos que posee los especímenes, al adicionarle cantidades distintas de aglutinante aparentemente reduce los vacíos, llenándose de cemento asfáltico, lo que a su vez puede ser un factor influyente para la resistencia que puede soportar estas muestras, puesto que los especímenes de este tipo a mayor cantidad de aglutinante menor muestra resistencia a una carga externa, al observar los dos tipos de muestras, en la que se sustituyó el material grueso (MDC-RAP-G) frente a la que posee en su totalidad 100% RAP, en las que poseen un porcentaje de cemento asfáltico de 4% hay una diferencia de 3,66% en la relación de los vacíos pero la carga que pueden resistir las probetas es mayor en las que se sustituyó el material grueso, mostrando como ya al poseer las mezclas aglutinante la carga a la que pueden resistir es menor dando como variable importante los vacíos presentes en la mezcla.

FIGURA 6 Volumen de vacíos en la mezcla



Fuente: Autores

9. CONCLUSIONES

- Con base en los resultados obtenidos, se puede concluir que a mayor cantidad de asfalto en una mezcla con agregados 100% RAP, la resistencia disminuirá, debido a que se presenta una menor estabilidad a causa de la que los vacíos en la mezcla disminuyen, y su rigidez es menor.
- En las probetas en donde se sustituyó el material grueso por RAP, la que obtuvo un comportamiento más favorable de acuerdo a la comparación de los resultados con respecto a las probetas de control, fue a la que se añadió un 4% de cemento asfáltico viendo que la tenacidad y la rigidez fueron mayores para estos datos.
- Al fallar las muestras en donde se utilizó una dosificación de 100% RAP, la dosificación de asfalto que presentó un mejor comportamiento, comparado con las pruebas de control fue la del porcentaje de 2,5%.
- Se observa que la tenacidad aumenta en los dos tipos de muestras propuestos (dosificación 100% RAP, dosificación sustitución material grueso por RAP) con respecto a la cantidad de cemento asfáltico agregado, dándonos a entender que, a mayor contenido de cemento asfáltico, la energía de disipación es mayor para las muestras en donde se sustituyó en material grueso por RAP, teniendo observándose como los componentes dentro de las mezclas poseen una mayor adherencia entre sí.
- La rigidez en las muestras en donde se utilizó material 100 % RAP, a mayor contenido de cemento asfáltico, disminuye, observándose que el asfalto en gran cantidad en estas muestras afecta la adherencia entre el aglutinante y las partículas que conforman la mezcla.

10. REFERENTES BIBLIOGRÁFICOS

ABC.net. 2014. Belo Horizonte overpass collapse: At least one dead, 19 injured, in World Cup. 3 de Julio de 2014, págs. <http://www.abc.net.au/news/2014-07-04/at-least-one-dead-in-overpass-collapse-in-world-cup-host-city/5570734>.

al., VICENTE EDILSON LEAL MORENO et. 2015. IDU (Instituto de Desarrollo Urbano). [En línea] 2015.

https://www.idu.gov.co/web/content/7477/boletin_puentes_2015_.pdf.

ALCALDÍA DE MEDELLÍN. 2018. ALCALDÍA DE MEDELLÍN. [En línea] 2018.

<https://www.medellin.gov.co/irj/portal/medellin?NavigationTarget=navurl://bc6e3c6301ca52ef7f58249ae85bfde9>.

ARIAS, JOSE ALBERTO BERNAL. 2009. ELCONCRETO. [En línea] 5 de Mayo de 2009. <http://elconcreto.blogspot.com/2009/05/el-concreto-reforzado.html> .

ASCENCIO, Jeame Liliana Ostos, SANMIGUEL, Juan Mauricio Duarte y REYES-ORTIZ, Óscar Javier. 2011. *Comportamiento de mezclas asfálticas de Instituto de Desarrollo Urbano con adición de pavimento reciclado.(RAP)*. bogota : SCIVI Jornadas de Pavimentos y Mantenimiento Vial Bogotá DC Colombia, 2011.

Bernucci-Ceratti-Soares. 2008. Pavimentação asfáltica-Formação básica para engenheiros. [aut. libro] Laura Maria Goretti da Motta, Jorge Augusto Pereira Ceratti, Jorge Barbosa Soares Liedi Bariani Bernucci. *Pavimentação asfáltica-Formação básica para engenheiros*. Brazil-Rio de Janeiro : Abeda – Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos, 2008, págs. 9-11.

BRITZ, C., PACHECO, J y HELENE, S. LEVY & P. 2015. SCIELO. [En línea] ABRIL de 2015.

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-68352015000100007&lang=pt.

CANO, JENNIFER GARCIA. 2012. *Fatiga en estructuras de hormigón con deterioro de las armaduras*. 2012.

Chandra. NBM Media Pvt. Limitado. Delhi : CSIR-Central Road Research Institute, Delhi.

Chandra, Prof. Satish. 2019. Flexible Pavement versus Rigid Pavement. [En línea] 2019. <https://www.nbmcw.com/tech-articles/roads-and-pavements/36977-flexible-pavement-versus-rigid-pavement.html>.

CONSTRUBLOG. 2014. DEMOLICIÓN EN ESTRUCTURAS. [En línea] 12 de Mayo de 2014. <https://construblogspain.wordpress.com/2014/05/12/demolicion-de-estructuras/comment-page-1/> .

DEFINICIONDE. 2018. DEFINICION DE. [En línea] 2018. <https://definicion.de/>.

—. 2018. DEFINICIÓN DE CORROSIÓN. [En línea] 2018.

<http://conceptodefinicion.de/corrosion/>.

DIARIO EYIPANTALA MILENIO. 2018. Cierran permanentemente paso vehicular en puente de Río Grande. 22 de Junio de 2018, págs.

<https://www.diarioeyipantla.com/cierran-permanentemente-paso-vehicular-en-puente-de-rio-grande/>.

DÍAS, EDGAR E MUÑOZ. 2003. *Estudio de las causas de Colapsos de algunos puentes eb.* Bogotá : Pontificia Universidad Javeriana, 2003.

DÍAZ, EDGAR E. MUÑOZ. 2017. *ESTUDIO DE LAS CAUSAS DEL COLAPSO DE ALGUNOS PUENTES EN.* 2017. pág. 20.

DICCIONARIO DE ARQUITECTURA Y CONSTRUCCIÓN. 2018. DICCIONARIO DE ARQUITECTURA Y CONSTRUCCIÓN. [En línea] 2018.

<http://www.parro.com.ar/definicion-de-carga+din%E1mica>.

EDISCOV. 2018. SCRIB. [En línea] 2018. <https://es.scribd.com/doc/73617073/LA-SUPERESTRUCTURA-DE-UN-PUENTE>.

Eldiario. 2018. Eldiario. [En línea] 13 de 03 de 2018.

<http://www.eldiario.com.co/seccion/RISARALDA/este-mi-rcoles-se-habilita-paso-en-puente-de-irra1803.html>.

FAJARDO, JOSÉ BERNARDO. 2015. BOGOTÁ, COLOMBIA : s.n., 1 de FEBRERO de 2015.

FONSECA, ING. ALFONSO MONTEJO. 1998. Ingeniería de Pavimentos para Carreteras. [aut. libro] ALFONSO MONTEJO FONSECA. *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras.* Bogotá- Colombia : Agora-editores, 1998, págs. 2-13.

García, Isabel Galán. 2011. *Carbonatación del hormigón: combinación de CO2.* Madrid : s.n., 2011.

Hasan Ozer1, Imad L. Al-Qadi2, Samuel H. Carpenter3, Qazi Aurangzeb1, Geoffrey L. 2009. *Evaluation of RAP Impact on Hot-Mix Asphalt Design and Performance.* Tampa, FL : Association of Asphalt Paving Technologists., 2009.

HORVATH, Arpad. 2003. *Life-cycle environmental and economic assessment of using recycled materials for asphalt pavements.* Illinois : UC Berkeley: University of California Transportation Center, 2003.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. 2013. *Normas de ensayo de materiales para carreteras - seccion 200 - agregados petreos.* Bogota : INVIAS, 2013.

J. Santos, C. Nunes, C. Fernandes & H. Varum. 2007. *Common pathologies in RC bridge structures: a statistical analysis.* 2007. pág. 26.

Jamal, Haseeb. 2017. *Flexible Pavement Definition and Explanation.* 2017.

JOHNSON, KIRK. 2013. Washington State Bridge Collapse Could Echo Far Beyond Interstate. *New York Times.* 24 de Mayo de 2013.

MINISTERIO DE AMBIENTE. 1997. MINISTERIO DE AMBIENTE. [En línea] 19 de AGOSTO de 1997.

http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/leyes/1997/ley_0400_1997.pdf .

MINISTERIO DE JUSTICIA. 1999. MINISTERIO DE JUSTICIA. [En línea] 14 de ENERO de 1999. <http://www.suin-juriscal.gov.co/viewDocument.asp?id=1008107>.

MODJESKI & MASTERS. 2018. SEMANA. [En línea] 2018.

<https://www.semana.com/nacion/articulo/por-que-colapso-y-se-cayo-el-puente-de-chirajara/564972>.

National Asphalt Pavement Association (NAPA). 1995. *Thin Hot Mix Asphalt Surfacing.* Lanham, Maryland : Forbes Boulevard, 1995. series 123.

Neme Ardila, L.M. Reyes Ortiz, O.J & Camacho Tauta. 2013. *Comportamiento de Mezclas Asfálticas Cerradas Mediante la Aplicación de Ensayo FENIX.* 2013.

NIETO, ANDRES. 2018. UNIVERSIDAD CENTRAL. *PUENTES EN LOS CUALES MÁS ROBAN EN BOGOTÁ.* BOGOTÁ : s.n., 2018.

Patiño Boyacá, N., Reyes Ortiz, O., & Camacho Tauta, J. 2015. *Comportamiento a fatiga de mezclas asfálticas colombianas con adición de pavimento reciclado al 100%.* s.l. : Tecnura, 2015.

Piqueras, ING.Víctor Yepes. 2014. Universidad Politécnica de Valencia. *Universidad Politécnica de Valencia.* [En línea] UPV, 2 de septiembre de 2014. [Citado el: 10 de marzo de 2019.] <https://victoryepes.blogs.upv.es/tag/mezcla-asfaltica/>.

PLATA, HERVER CAMACHO. 2014. “ESTUDIO SOBRE PAVIMENTOS RECICLADOS COMO POSIBLE ALTERNATIVA ECONÓMICA Y AMBIENTAL EN LAS FUTURAS OBRAS DEL PAÍS”. UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA, BOGOTÁ : 2014.

Proyecto Paramix : investigación sobre reciclado de pavimentos. **Perez, F., Miro, R. y Martínez, C. 2003.** 130, catalunya : s.n., 2003.

PUBLISHER, KLUWER ACADEMIC. 2000. *Composite Materials in Bridge Repair.* Holanda : s.n., 2000.

Publishers, Kluwer Academic. 2000. *Composite Materials in Bridge Repair.* Holanda : s.n., 2000.

RCN RADIO. 2018. Colapsa antiguo puente vehicular en la ciudad de Cali. *RCN Radio.* 26 de Marzo de 2018.

Reverence, Australian Asphalt Pavement Association. 2010. *FLEXIBLE PAVEMENT.* s.l. : Standard Specification for Urban Infrastructure Works, 2010.

SALDAÑA, MARIA MERCEDEZ FLORENTÍN. 2009. *Patologías Constructivas en los Edificios.* ASUNCIÓN : UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN, 2009.

SARTORTI, NILSON TADEU MASCIA y ARTUR LENZ. 2011. *IDENTIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE PATOLOGÍAS EN PUENTES DE CARRETERAS URBANAS Y RURALES.* 2011. págs. 05-24.

Semana. 2018. Revista Semana. [En línea] 16 de 01 de 2018. <http://www.semana.com/nacion/articulo/colapso-del-puente-de-chirajara-en-la-via-bogota-villavicencio/553710> .

SULLIVAN, JOHN. 1996. *PAVEMENT RECYCLING EXECUTIVE SUMMARY AND.* s.l. : U.S. Department, 1996.

TRANSPORTATION, U.S DEPARTMENT OF. 2016. Federal Highway Administration Research and Technology. [En línea] User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction, 03 de 08 de 2016. <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/rap131.cfm>.

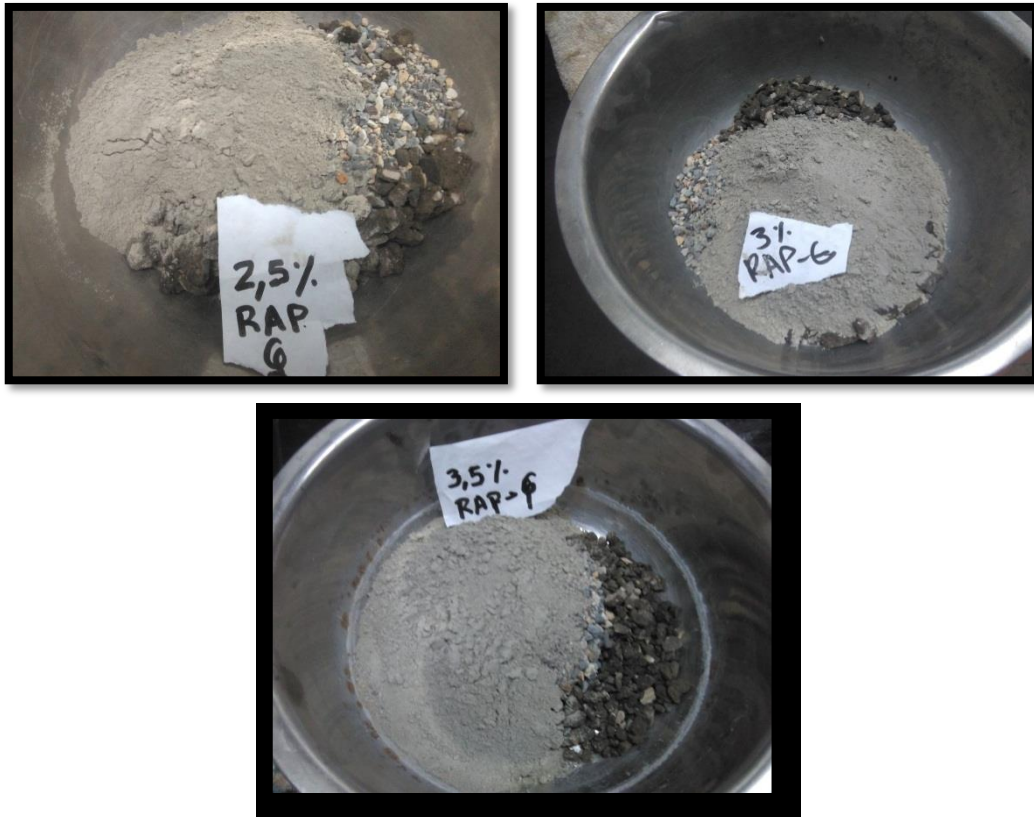
ANEXOS

Anexo 1 (Tamizado y almacenamiento de Asfalto reciclado)



Fuente: el autor

Anexo 2 (Fracción gruesa de RAP mas fraccion fina de material convencional en recipientes listo para ser calentados en el horno)



Fuente: el autor

Anexo 3 (Vertimiento del asfalto en la muestra, para su posterior mezcla)



Fuente: el autor

Anexo 4 (Compactación de las probetas en la maquina compactadora)



Fuente: el autor

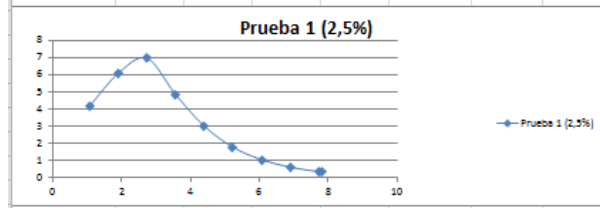
Anexo 5 (Probetas luego de ser compactadas y debidamente marcadas)



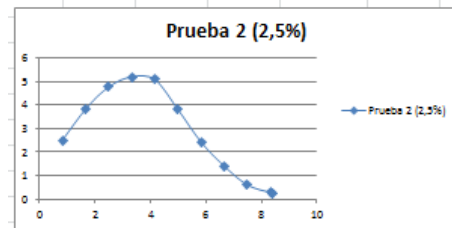
Fuente: el autor

Anexo 6 (Resultados del Ensayo RTI, Briqueta con material grueso sustituido por RAP)

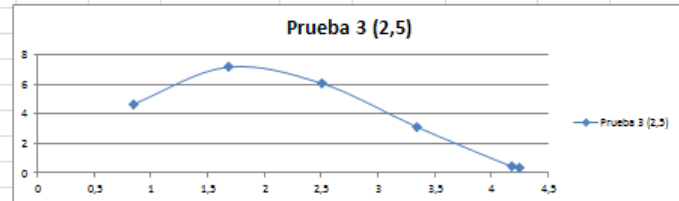
Briqueta 1 porcentaje grueso RAP			
cruceta	Carga	Tiempo	% asfalto
mm	kN	seg	2,5
0	0		
1,0663	4,1585	1,31	V.Ruptura
1,9005	6,0682	2,31	6,95404
2,7343	6,954	3,31	
3,5677	4,8433	4,31	
4,4009	3,0056	5,31	
5,2342	1,779	6,31	
6,0678	1,0511	7,31	
6,9012	0,6186	8,31	
7,7343	0,3558	9,31	
7,8254	0,3402	9,42	



Briqueta 10 porcentaje grueso RAP			
cruceta	Carga	Tiempo	% asfalto
mm	kN	seg	2,5
0	0		
0,832	2,5091	1,01	V.Ruptura
1,6662	3,8304	2,01	5,20753
2,5	4,7776	3,01	
3,3335	5,2075	4,01	
4,1667	5,0828	5,01	
5	3,8047	6,01	
5,8336	2,4216	7,01	
6,6669	1,3928	8,01	
7,5003	0,5986	9,01	
8,3335	0,2789	10,01	
8,3993	0,2569	10,09	

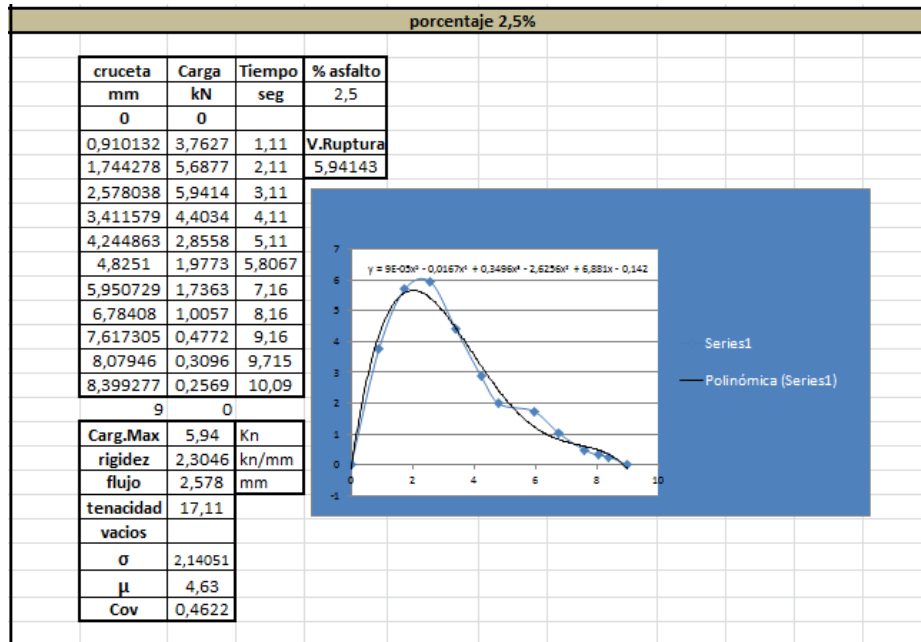


Briqueta 11 porcentaje grueso RAP			
cruceta	Carga	Tiempo	% asfalto
mm	kN	seg	2,5
0	0		
0,8321	4,62050879	1,01	V.Ruptura
1,6662	7,16438818	2,01	7,164388
2,4999	6,09262793	3,01	
3,3335	3,15934497	4,01	
4,167	0,47901987	5,01	
4,2411	0,34824429	5,1	



Fuente: el autor

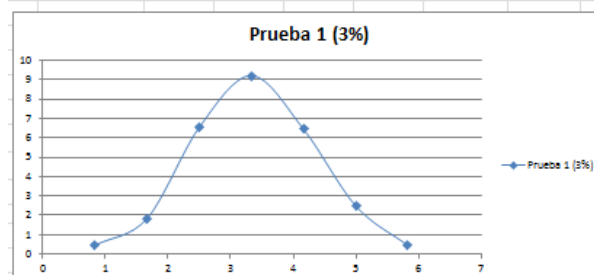
Anexo 7 (Resultados del Ensayo RTI, Briqueta con material grueso sustituido por RAP)



Fuente: el autor

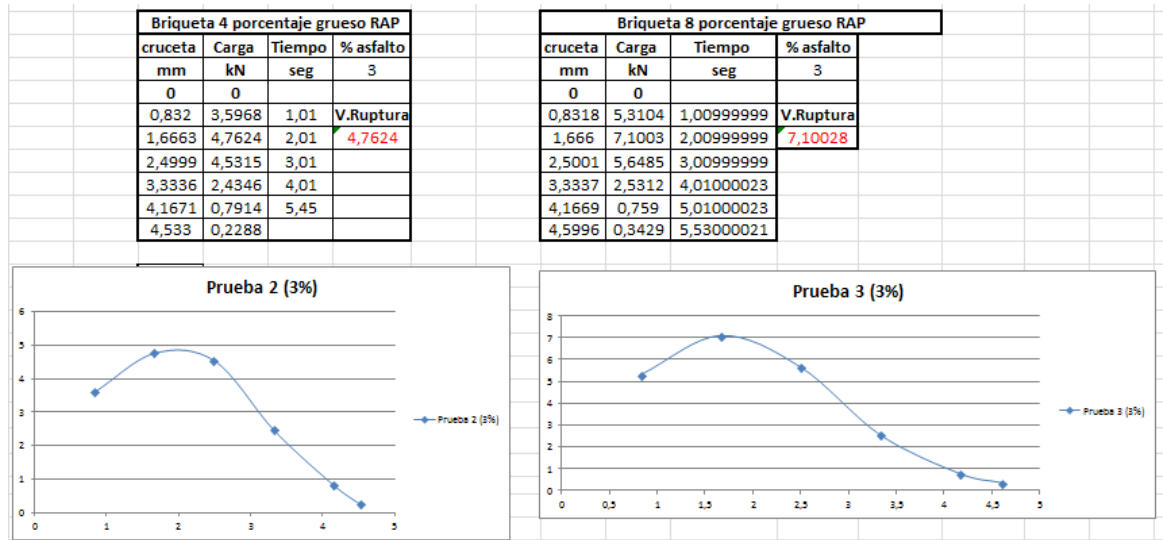
Anexo 8 (Resultados del Ensayo RTI, Briqueta con material grueso sustituido por RAP)

Briqueta 2 porcentaje grueso RAP			% asfalto
cruceta	Carga	Tiempo	3
mm	kN	seg	V.Ruptura
0	0		
0,8321	0,4504	1,01	9,21825
1,6665	1,8431	2,01	
2,5	6,5486	3,01	
3,3331	9,2183	4,01	
4,1669	6,4423	5,01	
5,0004	2,4785	6,01	
5,8332	0,4298	7,01	



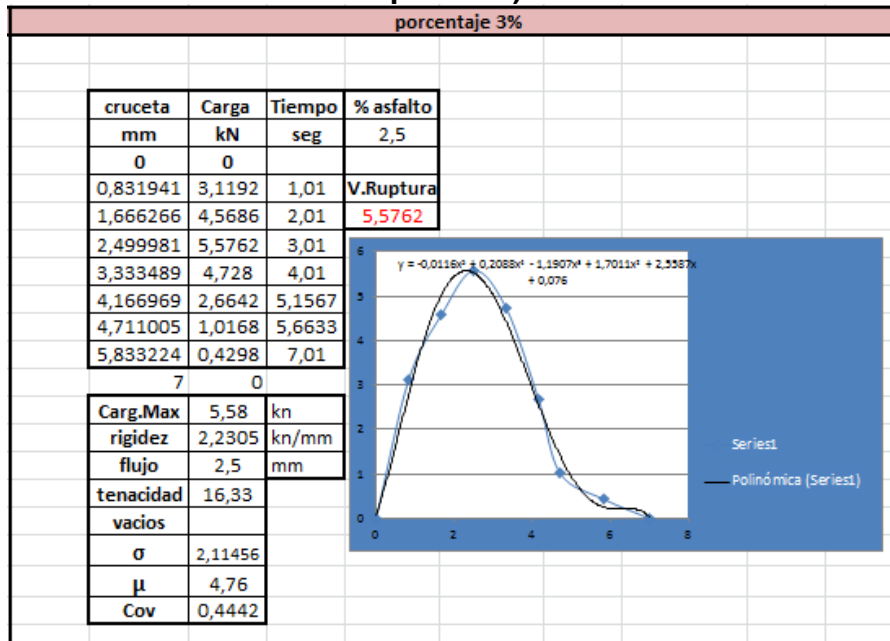
Fuente: el autor

Anexo 9 (Resultados del Ensayo RTI, Briqueta con material grueso sustituido por RAP)



Fuente: el autor

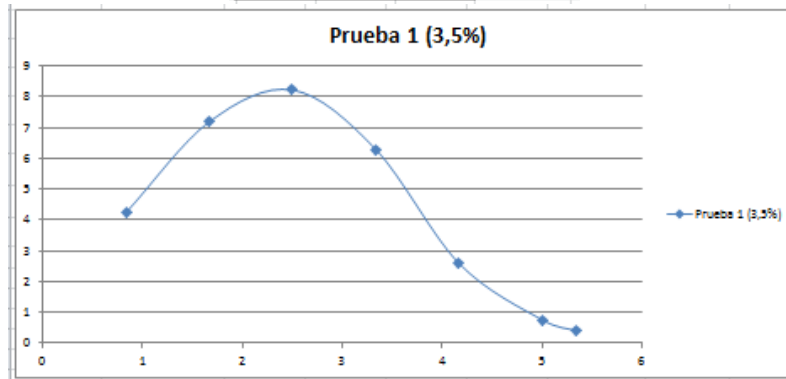
Anexo 10 (Resultados del Ensayo RTI, Briqueta con material grueso sustituido por RAP)



Fuente: el autor

Anexo 11 (Resultados del Ensayo RTI, Briqueta con material grueso sustituido por RAP)

Briqueta 5 porcentaje grueso RAP			
cruceta	Carga	Tiempo	% asfalto
mm	kN	seg	3,5
0	0		
0,8318	4,2397	1,01	V.Ruptura
1,6661	7,1854	2,01	8,2212
2,5001	8,2212	3,01	
3,3336	6,2898	4,01	
4,167	2,5838	5,01	
5,0001	0,7506	6,01	
5,3412	0,3934	6,42	

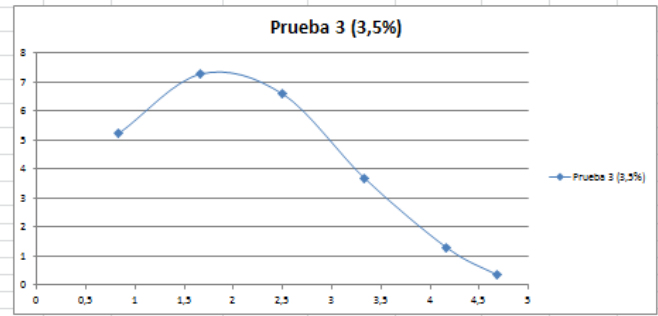
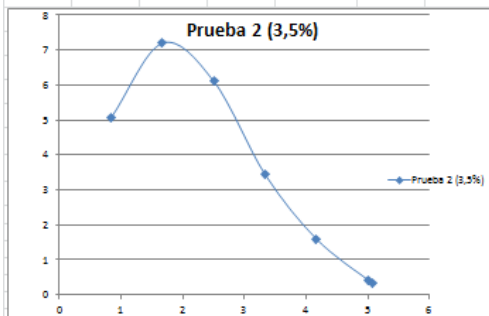


Fuente: el autor

Anexo 12 (Resultados del Ensayo RTI, Briqueta con material grueso sustituido por RAP)

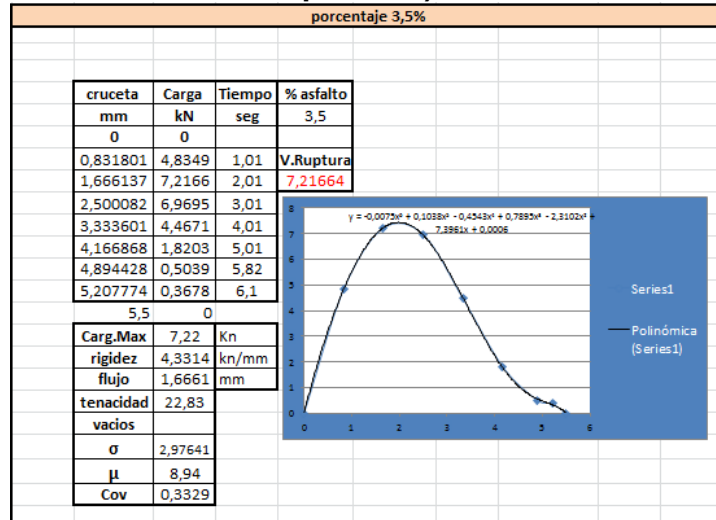
Briqueta 3 porcentaje grueso RAP			
cruceta	Carga	Tiempo	% asfalto
mm	kN	seg	3,5
0	0		
0,8317	5,0496	1,01	V.Ruptura
1,6663	7,1944	2,01	7,19437
2,5002	6,1046	3,01	
3,3335	3,4384	4,01	
4,1667	1,5915	5,01	
5,0003	0,4259	6,01	
5,0743	0,3421	6,1	

Briqueta 12 porcentaje grueso RAP					
cruceta	Carga			Tiempo	% asfalto
mm	kN			seg	3,5
0	0				
0,8319	0	5,2152749	0	1,01	V.Ruptura
1,666	0,8341	7,27012939	2,05485	2,01	7,270129
2,5	1,6681	6,58274219	1,36747	3,01	
3,3337	2,5018	3,67322607	-1,54205	4,01	
4,1669	3,335	1,28552625	-3,92975	5,01	
4,683	3,8511	0,3352052	-4,88007	5,63	



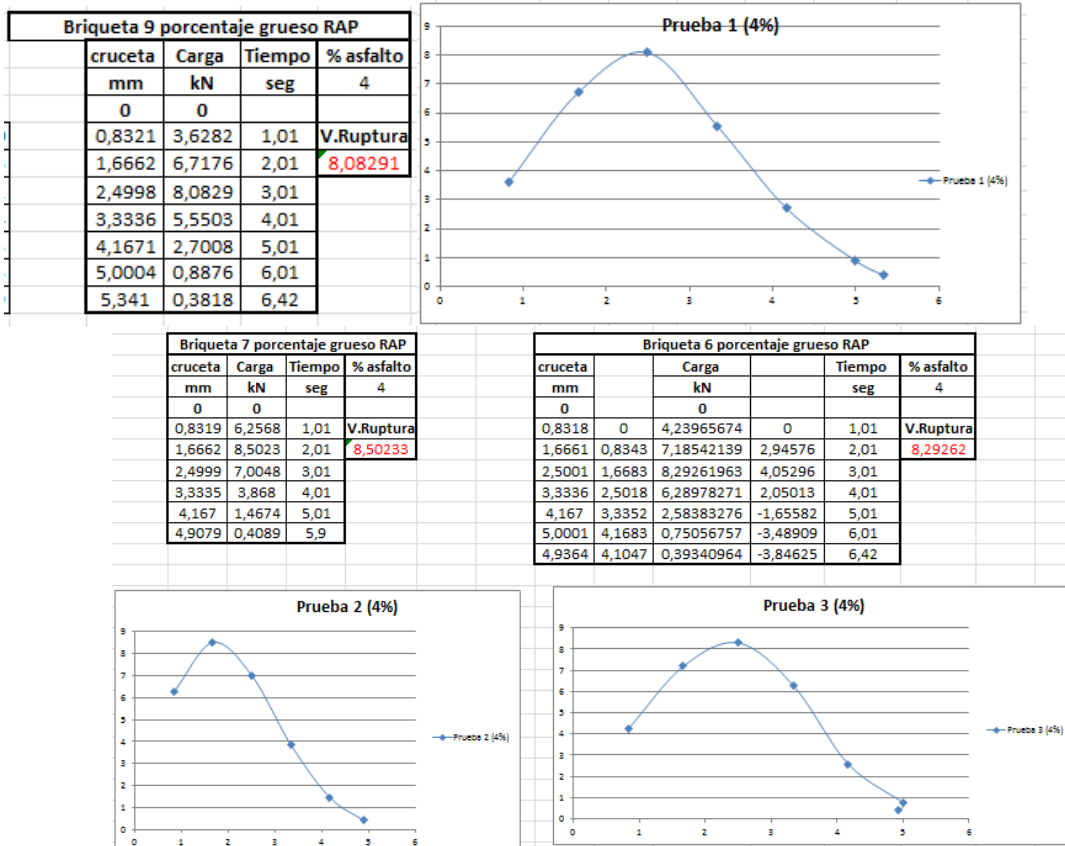
Fuente: el autor

Anexo 13 (Resultados del Ensayo RTI, Briqueta con material grueso sustituido por RAP)



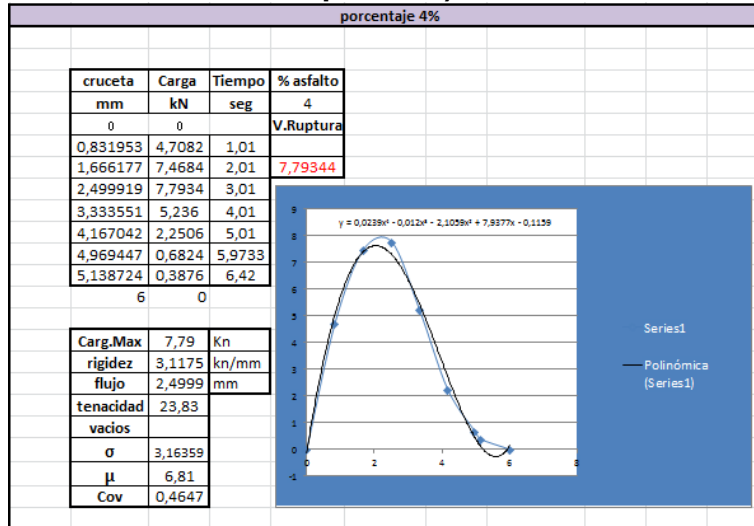
Fuente: el autor

Anexo 14 (Resultados del Ensayo RTI, Briqueta con material grueso sustituido por RAP)



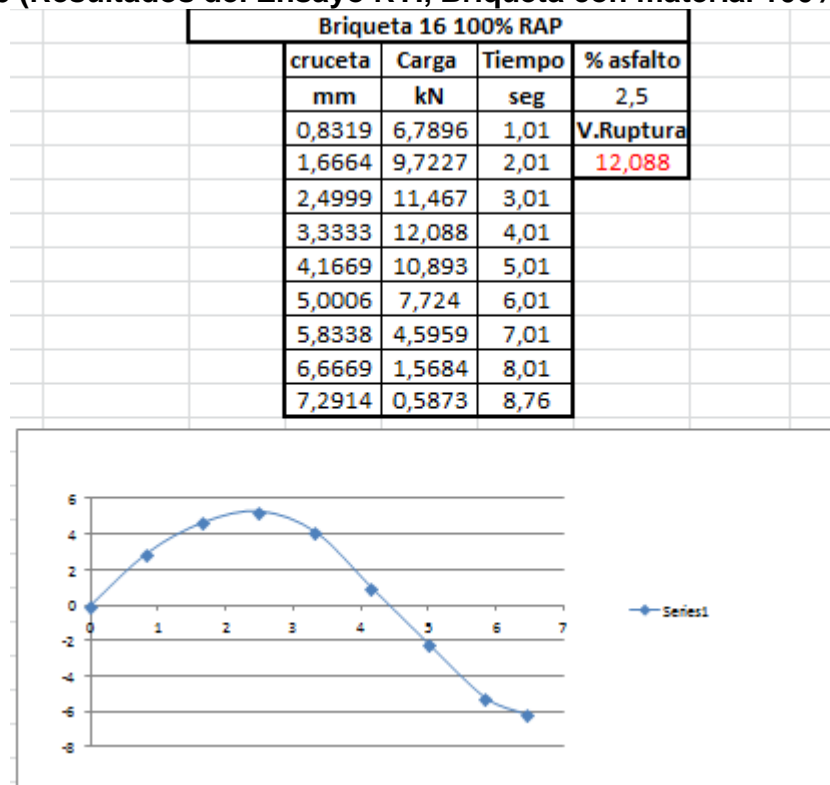
Fuente: el autor

Anexo 15 (Resultados del Ensayo RTI, Briqueta con material grueso sustituido por RAP)



Fuente: el autor

Anexo 16 (Resultados del Ensayo RTI, Briqueta con material 100% por RAP)

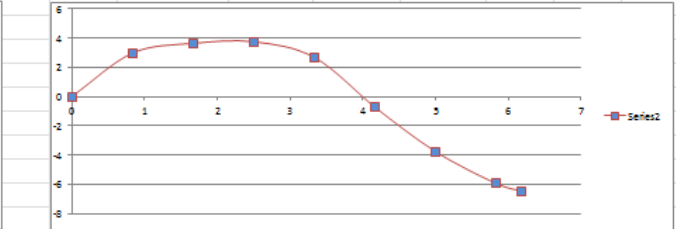
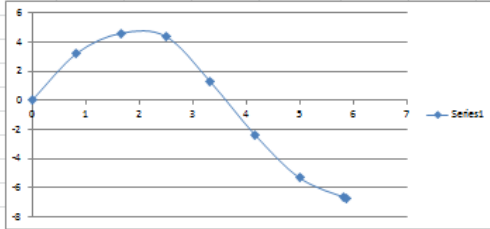


Fuente: el autor

Anexo 17 (Resultados del Ensayo RTI, Briqueta con material 100% por RAP)

Briqueta 17 100% RAP			
cruceta	Carga	Tiempo	% asfalto
mm	kN	seg	2,5
0,832	7,3108	1,01	V.Ruptura
1,6664	10,54	2,01	11,9291
2,4999	11,929	3,01	
3,3333	11,707	4,01	
4,167	8,5771	5,01	
5,0005	4,9291	6,01	
5,8338	1,9713	7,01	
6,6668	0,633	8,01	
6,7244	0,5907	8,08	

Briqueta 21 100% RAP			
cruceta	Carga	Tiempo	% asfalto
mm	kN	seg	2,5
0,8319	7,050	1,010	V.Ruptura
1,6664	10,031	2,010	10,8069
2,4999	10,698	3,010	
3,3333	10,807	4,010	
4,167	9,735	5,010	
5,0006	6,327	6,010	
5,8338	3,284	7,010	
6,6668	1,101	8,010	
7,0079	0,589	8,080	



porcentaje 100 % RAP (2,5%)

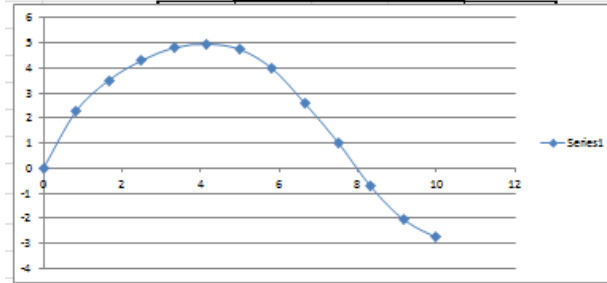
cruceta	Carga	Tiempo	% asfalto
mm	kN	seg	2,5
0	0	0	0
0,83195	7,0502	8,5456	V.Ruptura
1,666392	10,098	8,8412	11,5338
2,499894	11,365	7,7741	
3,333288	11,534	5,7552	
4,166983	9,7353	4,0883	
5,000586	6,3265	3,2479	
5,833803	3,2836	3,3133	
6,666835	1,1007		
7,007919	0,589		
7,5	0		

Carg.Max	11,534	Kn
rigidez	3,4602	kn/mm
flujo	3,3333	mm
tenacidad	51,33	
vacios		
σ	4,56924	
μ	22,182	
Cov	0,206	

Fuente: el autor

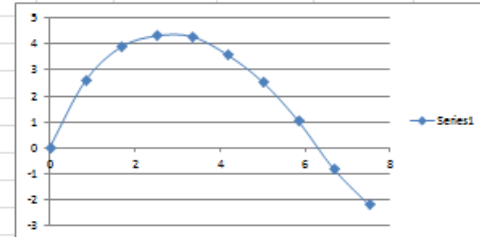
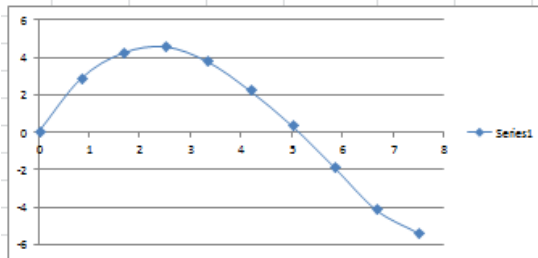
Anexo 18 (Resultados del Ensayo RTI, Briqueta con material 100% por RAP)

Briqueta 18 100% RAP			
cruceta	Carga	Tiempo	% asfalto
mm	kN	seg	3
0,8323	3,4982	1,01	V.Ruptura
1,6668	5,7828	2,01	8,45668
2,5	7,0116	3,01	
3,3332	7,7991	4,01	
4,1668	8,3066	5,01	
5,0003	8,4567	6,01	
5,8335	8,2379	7,01	
6,6667	7,4647	8,01	
7,4998	6,065	9,01	
8,3333	4,5273	10,01	
9,1668	2,7635	11,01	
9,9999	1,4467	12,01	
10,833	0,734	13,01	



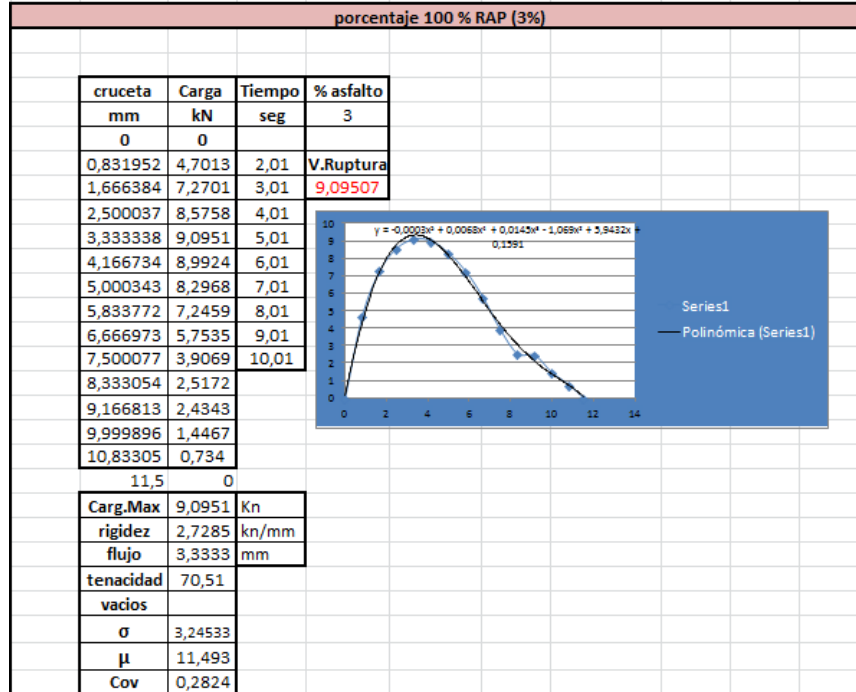
Briqueta 20 100% RAP			
cruceta	Carga	Tiempo	% asfalto
mm	kN	seg	3
0,8318	5,9044	1,01	V.Ruptura
1,6662	8,7574	2,01	10,471
2,5	10,14	3,01	
3,3334	10,471	4,01	
4,1667	9,6781	5,01	
5,0003	8,137	6,01	
5,8339	6,2539	7,01	
6,6671	4,0424	8,01	
7,5002	1,7488	9,01	
8,3329	0,5071	10,01	

Briqueta 22 100% RAP			
cruceta	Carga	Tiempo	% asfalto
mm	kN	seg	3
0,8318	4,7013	1,01	V.Ruptura
1,6662	7,2701	2,01	9,01507
2,5	8,5758	3,01	
3,3334	9,0151	4,01	
4,1667	8,9924	5,01	
5,0003	8,2968	6,01	
5,8339	7,2459	7,01	
6,6671	5,7535	8,01	
7,5002	3,9069	9,01	
8,3329	2,5172	10,01	



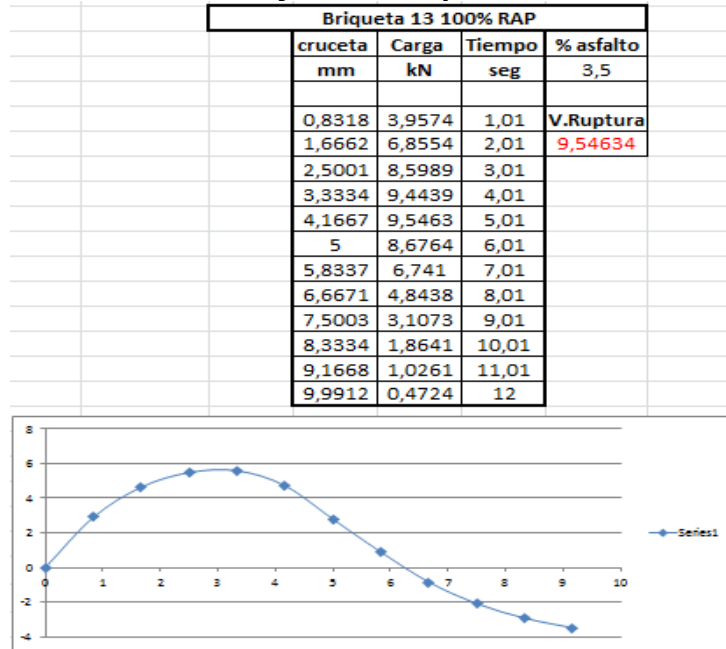
Fuente: el autor

Anexo 19 (Resultados del Ensayo RTI, Briqueta con material 100% por RAP)



Fuente: el autor

Anexo 20 (Resultados del Ensayo RTI, Briqueta con material 100% por RAP)

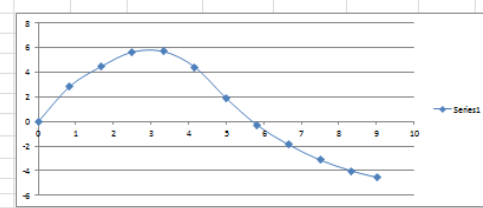
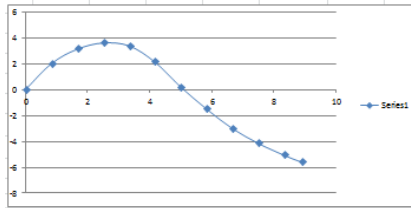


Fuente: el autor

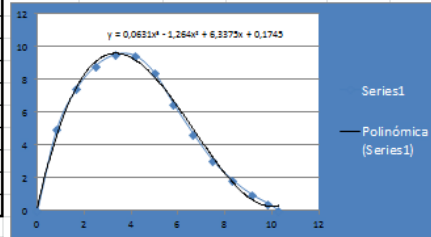
Anexo 21 (Resultados del Ensayo RTI, Briqueta con material 100% por RAP)

Briqueta 19 100% RAP			
cruceta	Carga	Tiempo	% asfalto
mm	kN	seg	3,5
0,8318	6,0958	1,01	V.Ruptura
1,6663	8,1004	2,01	9,71333
2,5001	9,2303	3,01	
3,3335	9,7133	4,01	
4,1666	9,4919	5,01	
5,0001	8,24	6,01	
5,8337	6,2978	7,01	
6,667	4,5934	8,01	
7,5003	3,0808	9,01	
8,3333	1,9404	10,01	
9,1669	1,0177	11,01	
9,7415	0,4736	11,7	

Briqueta 23 100% RAP			
cruceta	Carga	Tiempo	% asfalto
mm	kN	seg	3,5
0,8306	4,8766	1,01	V.Ruptura
1,665	7,3279	2,01	9,4286
2,4989	8,7646	3,01	
3,3322	9,4286	4,01	
4,1654	9,3691	5,01	
4,9988	8,3082	6,01	
5,8325	6,3694	7,01	
6,6658	4,5686	8,01	
7,4991	2,9441	9,01	
8,3322	1,7522	10,01	
9,1656	0,8719	11,01	
9,8652	0,323	11,7	



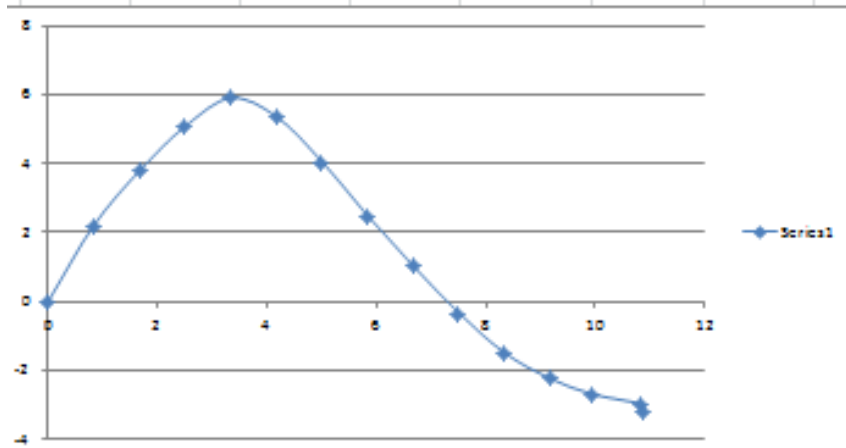
porcentaje 100 % RAP (3,5%)			
cruceta	Carga	Tiempo	% asfalto
mm	kN	seg	3,5
0	0		
0,831441	4,9766	2,01	V.Ruptura
1,665833	7,4279	3,01	9,5286
2,499696	8,8646	4,01	
3,333039	9,5286	5,01	
4,166239	9,4691	6,01	
4,999615	8,4082	7,01	
5,833311	6,4694	8,01	
6,666645	4,6686	9,01	
7,499879	3,0441	10,01	
8,332978	1,8522	11,01	
9,166447	0,9719	11,85	
9,865954	0,423	11,8	
10,3	0		
Carg.Max	9,5286	Kn	
rigidez	2,8588	kn/mm	
flujo	3,333	mm	
tenacidad	55,12		
vacios			
σ	3,54743		
μ	9,2458		
Cov	0,3837		



Fuente: el autor

Anexo 22 (Resultados del Ensayo RTI, Briqueta con material 100% por RAP)

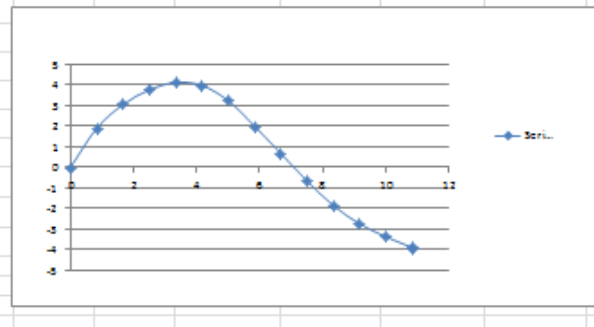
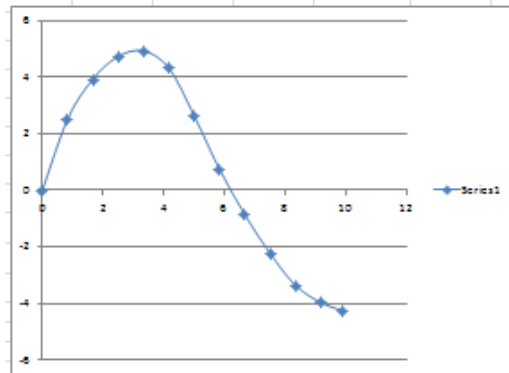
Briqueta 24 100% RAP			
cruceta	Carga	Tiempo	% asfalto
mm	kN	seg	4
0,8308	4,5255	1,01	V.Ruptura
1,6652	6,7316	2,01	9,040787
2,499	8,0132	3,01	
3,3324	8,7675	4,01	
4,1656	9,0408	5,01	
4,999	8,6622	6,01	
5,8326	7,4523	7,01	
6,666	5,8892	8,01	
7,4993	4,4297	9,01	
8,3325	3,071	10,01	
9,1659	1,914	11,01	
9,9994	1,1625	12,01	
10,782	0,7042	13,01	
11,666	0,4246	14,01	
11,707	0,4033	14,06	



Continuación Anexo 23

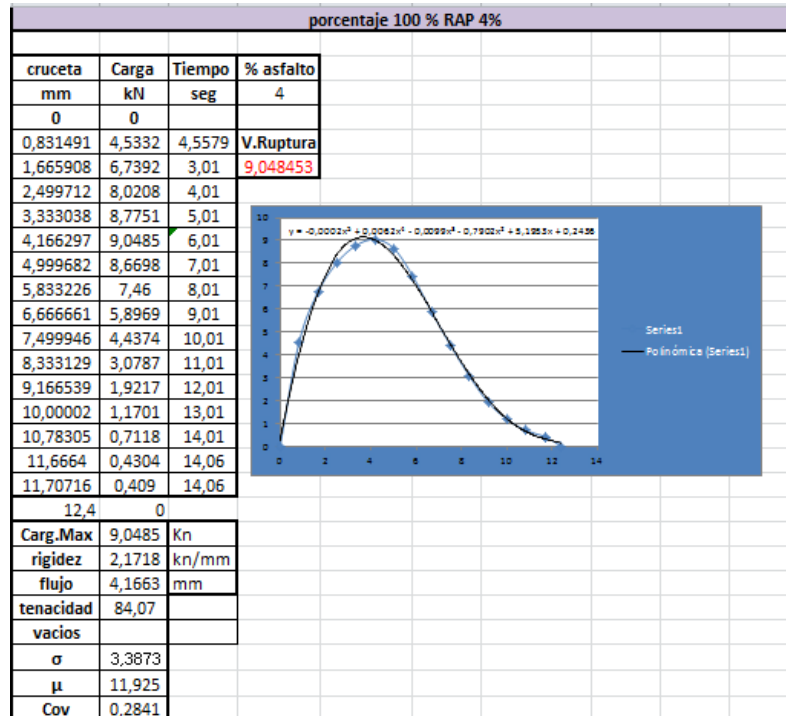
Briqueta 14 100% RAP			
cruceta	Carga	Tiempo	% asfalto
mm	kN	seg	4
0,8318	4,7373	1,01	V.Ruptura
1,6663	7,2529	2,01	9,653789
2,5001	8,6673	3,01	
3,3334	9,4614	4,01	
4,1665	9,6538	5,01	
5,0001	9,0489	6,01	
5,8336	7,365	7,01	
6,667	5,4765	8,01	
7,5002	3,8758	9,01	
8,3334	2,5029	10,01	
9,1669	1,3794	11,01	
10	0,7662	12,01	
10,733	0,4764	12,89	

Briqueta 15 100% RAP			
cruceta	Carga	Tiempo	% asfalto
mm	kN	seg	4
0,8318	4,3367	1,01	V.Ruptura
1,6662	6,2332	2,01	8,450784
2,5	7,3821	3,01	
3,3334	8,0966	4,0100002	
4,1667	8,4508	5,0100002	
5	8,2984	6,0100002	
5,8335	7,5627	7,0100002	
6,667	6,325	8,0100002	
7,5003	5,0066	9,0100002	
8,3335	3,6622	10,01	
9,1668	2,4717	11,01	
10	1,5818	12,01	
10,834	0,9549	13,01	
11,667	0,4361	14,01	
11,708	0,4148	14,06	



Fuente: el autor

Anexo 23 (Resultados del Ensayo RTI, Briqueta con material 100% por RAP)



Fuente: el autor

Anexo 24 (Resultados del ensayo de Desgaste para material RAP)

		INFORME DE ENSAYO DE DESGASTE (NORMA INV E -218-13, NORMA INV E-219-13)			F-043		
					Versión	01	
					Fecha Rev.		
					Pag.		
CLIENTE:				ORDEN DE TRABAJO			
PROYECTO:				MUESTRA No.:			
DESCRIPCIÓN:	RAP			PROFUNDIDAD:			
FECHA DE TOMA:			FECHA DE INGRESO:	FECHA DE ENSAYO: 20/09/2019			
DESGASTE POR ABRASIÓN							
	Determinación	No.	1	2	3		
	Gradación Usada		A	A			
	Numero de esferas		12	12			
	Masa inicial	g	5002	5002			
	Masa final	g	4679	3389			
	Pérdida	g	323	1613			
	Índice de Desgaste	%	6,5%	32,2%			
Convenciones Desgaste							
1 = En seco, 100 revoluciones							
2 = En seco, 500 revoluciones							
3 = Luego de 48 horas de inmersión, 500 revoluciones							
Resultado							
				Índice de Desgaste (%)	32,2%		

Fuente: el autor

Anexo 25 (Resultados del ensayo de Micro-Deval para material RAP)

RESISTENCIA DE AGREGADOS A LA DEGRADACIÓN POR ABRASIÓN EN EL MICRO-DEVAL - ASTM D 6928-03			
AGREGADOS Y RECEBOS			
Orden de Trabajo N 1		Nombre del Cliente:	UNIVERSIDAD CATOLICA
Muestra No:	1	Código de Obra:	
Tipo de Material:	material RAP	Nombre de la Obra:	
Procedencia:	Obra Vial- Suba	Fecha de Recibo:	
		Fecha de Ensayo:	20-Sep-19

PRUEBA No	1
GRADACION USADA	A
PESO ESFERAS (g)	5000
TIEMPO ENSAYO (min)	120
Pa= PESO MUESTRA SECA ANTES DE	1500,2
Pb= PESO MUESTRA SECA DESPUES DE	1182,7
Pa-Pb= PERDIDA (g)	317,5
% DESGASTE (Pa-Pb)/Pa	21,2%
ESPECIFICACION MÁXIMO	25

Tamaño Tamiz (mm) abertura cuadrada		Masa de los tamaños indicados (g)		
Pasa	Retenido en	Gradación		
		A	B	C
19.0 (3/4")	16.0 (5/8")	375		
16.0 (5/8")	12.5 (1/2")	375		
12.5 (1/2")	9.50 (3/8")	750	750	
9.50 (3/8")	6.30 (1/4")		375	750
6.30 (1/4")	4.75 (No. 4)		375	750
Revoluciones		100±5	100±5	100±5
Duración		2 h ± 1 min	105±1 min	95±1 min
Total (g)		1500±5	1500±5	1500±5

Fuente: el autor

Anexo 26 (Resultados del ensayo de 100% de finos para material RAP)

RESISTENCIA MECÁNICA DE LOS AGREGADOS GRUESOS POR EL MÉTODO DE 10% DE FINOS			
BS 812 : PART 111			
Orden de Trabajo No:		Nombre del Cliente:	UNIVERSIDAD CATOLICA
Muestra No:		Código de Obra:	1
Tipo de Agregado:	MATERIAL RAP	Nombre de la Obra:	
Procedencia:	Obra Vial- Suba	Fecha de Recibido:	
		Fecha de Ensayo:	20-Sep-19

Clase de Agregado:	2	FRESADO	
Condición del Agregado:		Seco	Húmedo
Masa del Agregado para Ensayo (g):		2184	2197
Masa del Agregado Usado M1 (g):		2184	2197
Masa Pasa Tamiz 2.36 mm (No. 8) M2 (g):		202	226
Masa Retenida Tamiz 2.36 mm (No. 8) M3 (g):		1982	2266
% Material Pasa Tamiz 2.36 mm (No. 8) m:		9.2	10.3
Fuerza Máxima Aplicada (t):		16,525	16,525
Fuerza Máxima Aplicada f (kN):		162	143

	Seco	171 kN
Fuerza Requerida para Producir un 10 % de Finos:	Húmedo	140 kN

	% Relación	Húmedo / Seco
		81,7%

Fuente: el autor

Anexo 27 (Resultados del ensayo de Equivalente de arena para material RAP)

INFORME DE ENSAYO DE EQUIVALENTE DE ARENA INV E - 133-13		F-028	
		VERSION	01
		Fecha Rev.	
		Pag.	
CLIENTE:		ORDEN DE TRABAJO	
PROYECTO:		MUESTRA No	1
DESCRIPCIÓN:	RAP	FECHA DE ENSAYO:	20-sep
FECHA DE INGRESO:			
PRUEBA	1	2	3
TEMPERATURA DE LA SOLUCIÓN (°C)	22,8		
LECTURA DE ARCILLA mm	92	93	90
LECTURA DE ARENA mm	68	323	325
EQUIVALENTE DE ARENA mm	73,9	69,0	71,0
PROMEDIOmm3	72		
ESPECIFICACIÓN % MINIMO			
OBSERVACIONES: Este ensayo se realiza al material RAP pasante #4			

Fuente: el autor

Anexo 28 (Resultados del ensayo de CBR para material RAP)

INFORME DE ENSAYO CBR (INV E 148-13)				
MOLDE No.		A	B	D
ENERGIA DE COMPACTACIÓN	kg./m ²	143398	68163	33184
Masa del molde	g	4052	4088	3804
Volumen del molde	cm ³	2125	2157	2134
Masa del molde + material húmedo	g	8057	8071	7580
Masa del material húmedo	g	4005	3983	3776
DENSIDAD HUMEDA	g/cm ³	1,885	1,847	1,769
HUMEDAD DE COMPACTACION				
Masa de Cápsula + material húmedo	g	660,0	454,5	649,5
Masa de cápsula + material seco	g	612,9	421,9	603,3
Masa de la cápsula	g	54,9	37,2	54,9
Masa del agua	g	47,1	32,6	46,2
Masa del material seco	g	558,0	384,7	548,4
CONTENIDO DE AGUA	%	8,44	8,47	8,42

PENETRACIÓN						
MOLDE No.	A		B		D	
No. de golpes	56		25		10	
Días de curado	4		4		4	
Expansión %	0		0		0	
Penetración (mm)	Fuerza kN	Esfuerzo MPa	Fuerza kN	Esfuerzo MPa	Fuerza kN	Esfuerzo MPa
0,000						
0,127	1,00					
0,635	1,00	0,517	0,48	0,248	0,37	0,191
1,270	2,46	1,271	1,83	0,946	0,71	0,367
1,905	3,63	1,876	2,15	1,111	1,05	0,543
2,540	4,62	2,388	3,47	1,793	1,33	0,687
3,810	5,54	2,863	4,57	2,362	1,60	0,827
5,080	6,41	3,313	5,13	2,651	1,85	0,956
6,350	8,06	4,165	6,37	3,292	2,30	1,189
7,620	10,87	5,618	7,04	3,638	3,30	1,705
10,160	13,72	7,090	8,29	4,284	4,12	2,129
12,700	16,44	8,496	10,42	5,385	4,88	2,522
CBR corregido a 2,54 mm	34,60		25,99		9,96	
CBR corregido a 5,08 mm	32,01		25,62		9,24	



HUMEDAD DE PENETRACIÓN			
Cápsula + SH*	514,8	454,5	473,2
Cápsula + SS**	478,4	418,3	439,9
Masa de cápsula	100,8	37,2	87,8
Masa de agua	36,4	36,2	33,3
Masa de SS**	377,6	381,1	352,1
Humedad Penetración	9,6	9,5	9,46
SH* : Suelo Húmedo SS** : Suelo seco			

RESULTADO DE DENSIDAD VS. CBR				
DENSIDAD MÁXIMA	gr/cm ³	1866,000		
DENSIDAD SECA	gr/cm ³	1,738	1,702	1,632
CBR CORREGIDO A 2,54 mm	(%)	34,60	25,99	9,96
CBR CORREGIDO A 5,08 mm	(%)	32,01	25,62	9,24

RESULTADOS		
Porcentaje de Compactación	Densidad seca	CBR corregido
%	g/cm ³	%
100	1866,0	0
98	1828,7	0
95	1772,7	0

Fuente: el autor

Anexo 29 Formato Estimación de consumo de laboratorio para proyectos

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERIA LABORATORIOS	Formato Estimación de Consumo de Laboratorio para Proyectos		CÓDIGO: F 053 U 111 Versión 1.0
	PROGRAMA: <u>INGENIERIA CIVIL</u>	LABORATORIO SOLICITADO: <u>PAVIMENTOS</u>	
TÍTULO DEL PROYECTO: <u>DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFALTICA CONVENCIONAL Y RECICLADO CON 100% DE RAP</u>			
NOMBRE ESTUDIANTE: <u>CHRISTIAN STEVEN GAITÁN RICO</u>	CÓDIGO: <u>506027</u>	FIRMA: 	
NOMBRE ESTUDIANTE: <u>DIEGO ALEJANDRO TORRES LARA</u>	CÓDIGO: <u>504842</u>	FIRMA: <u>Diego A. Torres Lara</u>	
NOMBRE ESTUDIANTE: _____	CÓDIGO: _____	FIRMA: _____	
NOMBRE DOCENTE A CARGO: <u>LAURA MARÍA ESPINOSA HERMIDA</u>	FIRMA: _____		

CONSECUTIVO	ACTIVIDAD (O ENSAYO) A REALIZAR	DURACIÓN (HORAS)
1	Dosificación para la elaboración de las probetas de control.	10
2	Calentamiento de la mezcla	1
3	Mezcla y compactación de las probetas de control.	8
4	Extracción de probetas	3
5	Ensayo marshall (24 horas)	6
6	Ensayo traccion indirecta RTI	6
7	limpieza del laboratorio	2
8	Tamizado del matrial RAP y convencional	20
9	Dosificación para la elaboración de las probetas con material grueso de RAP + material convencional fino.	10
10	Calentamiento de la mezcla	1
11	Mezcla y compactación de las probetas con material grueso de RAP + material convencional fino.	8
12	Extracción de probetas	3
13	Ensayo marshall (24 horas)	6
14	Ensayo traccion indirecta RTI	6
15	limpieza del laboratorio	2
16	Tamizado del matrial RAP	10
17	Dosificación para la elaboración de las probetas con material 100% de RAP	10
18	Calentamiento de la mezcla	1
19	Mezcla y compactación de las probetas con material 100% de RAP	8
20	Extracción de probetas	3
21	Ensayo marshall (24 horas)	6
22	Ensayo traccion indirecta RTI	6
23	limpieza del laboratorio	2
TOTAL		138


Nombre y firma del autor

Diego A. Torres Lara
Nombre y firma del estudiante


Nombre y firma del estudiante


Nombre y firma de la Coordinación de laboratorio

Firma, aunque este formato no se requiere para proyectos

Fuente: el autor