

**APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y  
DEMOLICIÓN (RCD) PARA SER UTILIZADOS COMO AGREGADOS EN EL  
DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE**



JORGE ARMANDO MARTÍNEZ MARTÍNEZ  
RAFAEL RICARDO CASTRO VANEGAS

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS  
FACULTAD TECNOLÓGICA  
INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ  
2017

**APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y  
DEMOLICIÓN (RCD) PARA SER UTILIZADOS COMO AGREGADOS EN EL  
DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE**

Trabajo de grado para obtener el título de Ingeniero civil

Directo de Proyecto: ING. VICTOR HUGO DÍAZ

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS  
FACULTAD TECNOLÓGICA  
INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ  
2017

## **DEDICATORIA**

Este título está dedicado en primer lugar a Dios, a nuestros padres y hermanos, por el constante apoyo que nos brindaron desde el principio. Antes de dar el paso todo inicia con la idea de un proyecto de vida en el imaginario de cada uno, aquel mundo de sueños no de fantasías, donde nos proyectamos y procuramos cumplir El Objetivo, un objetivo tan general que le da sentido a nuestro existir, de igual forma, tan específico el cual nos requiere de pequeñas victorias a diario.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, damos las gracias al Ing. Víctor Hugo Díaz por el tiempo que dedicó a este trabajo de grado, por compartir su conocimiento y experiencia para sacar adelante este proyecto y sin duda por sus consejos para cumplir con el objetivo propuesto. Por último, agradecemos a nuestra alma mater por ser el medio para cumplir nuestro sueño y siempre orgullosos de haber pertenecido a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

# CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	8
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	9
1.1 DESCRIPCIÓN .....	9
1.2 FORMULACIÓN .....	9
1.3 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES .....	9
1.3.1 Variables Dependientes .....	9
1.3.2 Variables Independientes .....	9
2. OBJETIVOS .....	10
2.1 OBJETIVO GENERAL .....	10
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	10
3. JUSTIFICACIÓN.....	11
4. MARCO DE REFERENCIA.....	12
4.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	12
4.2 MARCO CONTEXTUAL .....	14
4.3 MARCO LEGAL O NORMATIVO .....	14
4.4 MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL .....	15
4.4.1 Variables De Diseño.....	15
4.4.2 Procedimientos Analíticos.....	16
4.4.3 Hipótesis De Bumister.....	17
4.4.4 Solución Para Sistemas De Dos Capas.....	17
5. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN .....	18
5.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN .....	18
5.1.1 Experimental .....	18
5.2 POBLACIÓN Y MUESTRA .....	18

5.3 FORMA DE RECOLECTAR LA INFORMACIÓN.....	18
5.4 PLAN DE ANÁLISIS DE LOS DATOS.....	19
5.5 DISEÑO METODOLOGICO.....	19
5.5.1. Fase 1.Búsqueda y recolección de materiales.....	19
5.5.1.1 Material petréo.....	19
5.5.1.2 Cemento asfáltico.....	19
5.5.1.3 Llenante mineral.....	19
5.5.2 Fase 2. Caracterización de agregados petreos y de material bituminoso .....	19
5.5.2.1 Material granular.....	19
5.5.2.2 Material bituminoso.....	19
5.5.3 Fase 3. Dosificación de la mezcla asfáltica.....	22
5.5.3.1 Temperatura de mezclado y compactación.....	22
5.5.3.2 Diseño de la mezcla asfáltica.....	22
5.5.4 Fase 4. Ejecución de ensayos y análisis de resultados.....	22
6. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS .....	26
6.1 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES .....	24
6.1.1 Granulometría .....	24
6.1.1.1 Requisitos generales de caracterización .....	24
6.1.1.2 Ajuste de la granulometría .....	27
6.1.2 Trazabilidad de los ensayos aplicados al material granular .....	29
6.1.3 Caracterización del cemento asfáltico .....	32
6.1.3.1 Resultados de viscosidad dinámica y clasificación del asfalto .....	34
6.1.3.2 Cálculo del IP por el método matemático .....	35
6.2 PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE MEZCLA .....	36
6.2.1 Tablas de los resultados obtenidos .....	37

7	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	39	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
7.1	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD.....	39	
7.2	RESULTADOS DE FLUJO .....	40	
7.3	RELACIÓN ESTABILIDAD/FLUJO .....		<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
7.4	PORCENTAJE DE VACÍOS CON AIRE .....	42	
7.5	PORCENTAJE DE VACÍOS EN AGREGADO .....	43	
7.6	VACÍOS LLENOS DE ASFALTO .....	44	
8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	45	
8.1	CONCLUSIONES .....	45	
8.2	RECOMENDACIONES.....	46	
	BIBLIOGRAFÍA .....	47	
	ANEXOS.....	48	

## RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad, analizar el comportamiento de una mezcla asfáltica en caliente de gradación continua, para una capa de rodadura y un nivel de tránsito tres (3); cuyo componente granulométrico principal es residuos de demolición y trituración de placas de obras existentes (RCD). De manera que, en la búsqueda continua de materiales y procesos, que optimicen las actividades de conformación y construcción de infraestructura vial, el análisis de las características aprovechables mediante ensayos de laboratorio con las recomendaciones de la normativa aplicable del Instituto Nacional de Vías, se convierte en la base de esta investigación.

De manera que, con lo dispuesto en el artículo 450-13 del INVIAS, se conocen los valores aceptables de algunas características físicas de agregados para concretos asfálticos, así mismo, respecto al tipo de asfalto a emplear. Los resultados de los ensayos en laboratorio en esencia serian comparados con lo establecido en dicho artículo, generando de esta forma una trazabilidad de sus propiedades físicas antes de realizar el diseño de mezcla. Para el tipo de mezcla en caliente en consideración, se diseñará por el método Marshall, con un porcentaje mínimo de asfalto de 4.5% y el máximo de 6.0%, con la inclusión de un llenante mineral también con aspectos sostenibles, es el caso de la ceniza sobrante de procesos en termoeléctricas a utilizar, y plantear la viabilidad del uso de agregados artificiales en capas de rodadura desde uno de los aspectos más importantes en carreteras, el de la respuesta mecánica bajo la imposición de carga por el método de falla recomendado en la norma.

## INTRODUCCIÓN

Para el diseño de un pavimento se tiene en cuenta una adecuada selección de los materiales de construcción, en efecto, la plena garantía de las propiedades físicas y mecánicas del agregado, es uno de los componentes más importantes en el diseño de mezcla, ya que, se busca conformar una estructura capaz de resistir las solicitudes de cargas durante su vida útil. Al mismo tiempo, el sector de la construcción se lleva el primer lugar de entre todas las industrias en ser la más contaminante, lo anterior, se debe a los recursos que se consumen y por la cantidad de residuos que se generan en la ejecución de una obra civil.

La demanda de agregados en nuestro país es cada vez mayor, en especial con la proyección de mega obras y los proyectos de vías 4G en marcha, un claro ejemplo es la ciudad de Bucaramanga que se ubica en los primeros puestos de entre todas las ciudades con mayor consumo de materias primas. Según la Asociación Colombiana de Productores de Agregados Pétreos (ASOGRAVAS 2015), la mencionada ciudad requirió sólo en 2015 3,5 millones de toneladas de materiales, de igual forma, establece que a nivel nacional para el año 2023 la nación requerirá 59 millones de toneladas de materiales pétreos.

Para tal efecto, se plantea una línea de análisis, la del aprovechamiento de los residuos de demolición para incorporarlos como agregados en la realización de mezclas asfálticas de pavimentos flexibles, en donde se abordan soluciones a tres situaciones importantes, la primera es la desbordante cantidad de residuos producidos, seguido por la inadecuada disposición final que se les da, por último, la afectación de montañas y otros entornos naturales arrasados, al ser usados como sitios de aprovisionamiento de materiales.

En la actualidad, se han adelantado varias investigaciones respecto al uso de los materiales reutilizados, desde el enfoque de sostenibilidad, pero se ha limitado a capas de la estructura del pavimento como bases y sub-bases. Con la presente investigación se pretende trascender al diseño de una capa de rodadura para resistir cierto tipo de solicitudes o cargas relacionadas directamente con el nivel de tránsito.



# 1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

## 1.1 DESCRIPCIÓN

Uno de los mayores problemas en los centros urbanos, es la gran producción de residuos sólidos, así mismo, el crecimiento de la población y la falta de un sistema estructurado para el adecuado manejo de subproductos, han contribuido al aumento progresivo del volumen de residuos. De modo que, la gestión inapropiada de dichos residuos ha sido de gran impacto ambiental, social y económico en la sociedad. Por esta razón el proyecto pretende contribuir a disminuir los volúmenes de materiales que podrían terminar dispuestos en entornos naturales como afluentes o ecosistemas de gran importancia y detener los problemas ambientales generados.

La falta de políticas, investigación y un sistema de tratamiento (aprovechamiento y disposición final) para este tipo de residuos provenientes de la construcción, está creando en el entorno de nuestras ciudades un problema que se agrava año tras año e incide directamente sobre los medios naturales, propiciando su deterioro. Además, el abandono de estos residuos implica un gasto innecesario en la búsqueda y explotación de nuevos materiales, por el contrario, podrían ser reutilizados y transformados en materias primas para la construcción.

## 1.2 FORMULACIÓN

¿Qué tan factible es la utilización de residuos de construcción y demolición RCD, para el desarrollo de mezclas asfálticas semidensas en caliente y un nivel de tránsito tres, sin afectar sus propiedades mecánicas?

## 1.3 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

### 1.3.1 Variables Dependientes:

Comportamiento mecánico y relación estabilidad/flujo.

Nivel de tránsito o solicitudes de carga de diseño y que soportará el pavimento.

Las propiedades del cemento asfáltico.

Dosificación y fórmula de trabajo.

### 1.3.2 Variables Independientes:

Caracterización del llenante mineral.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Diseñar una mezcla asfáltica densa en caliente incorporando agregado artificial proveniente de los residuos de construcción y demolición RCD, con las especificaciones de una capa de rodadura y un nivel de tránsito tres.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar la caracterización del agregado artificial, y del ligante asfáltico.
- Analizar los resultados obtenidos tomando como referencia lo dispuesto en la norma INVIAS, artículo 450-13, para mezclas asfálticas densas en caliente de gradación continua.
- Determinar una fórmula de mezcla de trabajo, definiendo las temperaturas de mezcla y compactación, así mismo, la proporción de material y porcentaje de contenido de asfalto.
- Establecer la viabilidad del uso de agregado artificial, verificando los resultados de los parámetros mecánicos (rigidez), para la mezcla asfáltica desarrollada a partir de la fórmula de trabajo y que soportará un nivel de tránsito tres (3).

### 3. JUSTIFICACIÓN

El sector de la construcción en Bogotá, ha tenido un crecimiento acelerado en los últimos años, en consecuencia, la existencia de grandes volúmenes de partículas de residuo producto de actividades de demolición, siendo las escombreras zonas dispuestas para efectos de recepción y disposición de dichos materiales, sin que se contemple la reutilización y retorno al ciclo constructivo.

Las investigaciones de pavimentos flexibles se han enfocado en mayor medida en el desarrollo de asfaltos modificados, es el caso de adición de polímeros como gránulos de caucho proveniente de llantas trituradas. En cambio, el reciclaje de los residuos de construcción y demolición (RCD), transformados en agregados para ser utilizadas como bases y subbases granulares en los pavimentos, es una práctica que se ha venido adelantando poco a poco en Colombia.

El desarrollo de este proyecto pretende realizar un aprovechamiento de residuos de construcción y demolición (RCD), para ser utilizados como agregados en las mezclas asfálticas, por lo anterior, poder reemplazar de manera total los agregados naturales por artificiales usados en la elaboración de concretos asfálticos, sin afectar sus parámetros mecánicos (esfuerzo-deformación).

Como resultado, poder contribuir y difundir los beneficios del uso de (RCD), entre los que se destacan: protección del medio ambiente, reducción de recursos en la explotación de agregados, evitar la sobreexplotación de canteras y entornos naturales en gran medida deforestados, por último, disminuir los costos en transporte de materiales hasta zonas de acopio y de plantas de asfaltos.

## 4. MARCO DE REFERENCIA

### 4.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Se presenta a continuación, algunos apartes de otros autores quienes recientemente han incursionado en la investigación del uso de RCD y de pavimentos modificados con poli estireno reutilizado, en la construcción de infraestructura vial, ya sea, en la elaboración de capas granulares de la estructura del pavimento o en capas de rodadura.

En España se han adelantado estudios en el campo del aprovechamiento de RCD, se ha analizado la situación de Europa, presentan cifras como: en España, tan sólo un 1% de RCD se reutiliza, mientras que, Holanda incorpora alrededor del 90% del RCD. Durante el proceso de reciclaje una de las principales dificultades esta en la homogeneidad de los materiales que llegan y el falta de información del origen o procedencia de los residuos. Cuanto más mezclados sean los residuos que se producen, más facilidad hay en su reutilización y a su vez se puede llevar a cabo con mayores garantías. (Barluega & Hernández, 2005).

El proceso macro de reciclaje y aprovechamiento de los RCD, inicia con la recolección y transporte de estos a las estaciones de transferencia o directamente a las instalaciones de clasificación y tratamiento, donde serán clasificados en distintas fracciones según su volumen y granulometría. Las fracciones de escombros provenientes de la planta de clasificación deberán ser trasladadas a la planta de reciclaje, donde serán sometidas a procesos de trituración mecánico por impacto, por tanto, disminuyendo el tamaño de los RCD y además, se procede a la eliminación de impurezas. Finalizado este proceso se obtiene un producto final apto para la venta. (Barluega & Hernández, 2005).

Es importante aclarar que el uso de agregados reciclados como nuevos materiales en la construcción, tuvo sus inicios en la elaboración de concretos desde hace varias décadas, incluso autores mencionan que se conocen documentos de la segunda guerra mundial que señalan la reutilización de agregados artificiales.

España, por ejemplo, es uno de los países donde se ha impulsado ampliamente las investigaciones del uso de RCD, incluso han fijado especificaciones técnicas para lo que ellos denominan áridos reciclados, facilitando la selección de materiales, ya que, las plantas que distribuyen dichos materiales deben garantizar ciertas propiedades físicas descritas en dichas especificaciones.

En un estudio reciente en ese país, se dosificó una mezcla de concreto a partir de agregado artificial, lo interesante fue el aspecto industrial que se le dio a dicho análisis, al fundirse losas de (5.2 X 3) m y se tomaron testigos, en paralelo, se fundieron losas de las mismas dimensiones con concreto realizado con agregados naturales. Al final, en la revisión de uno de los parámetros más importantes, esto es, la resistencia a la compresión de los cilindros a diferentes edades, se obtuvo

que a los 28 días el concreto con agregado natural presenta una resistencia de 36,4 MPa, mientras que, el concreto con RCD tiene una resistencia de 31,9 MPa. (Barluega & Hernández, 2005).

Existen investigaciones acerca de la caracterización de asfaltos modificados con material reciclado en Colombia. Dichos trabajos presentan la posibilidad de obtener una mezcla asfalto-polímero estable que, además de reducir la inversión, tenga mejores propiedades fisicoquímicas que el asfalto convencional "CIB", al usar dicho asfalto, al igual que modificadores como ripio de llanta y poliestireno expandido "icopor" proveniente de vasos desechables, llegaron a la conclusión que los vasos de icopor utilizados como polímero modificador mejora considerablemente las propiedades elásticas del ligante, por otro lado, el caucho de llanta molida mejora aspectos como la susceptibilidad a los cambios de temperatura, la resistencia a la fatiga y la inflamabilidad. (Figueroa & Reyes, 2009).

También, se ha incursionado en el diseño de mezclas asfálticas con aditivos conocidos como zeolita sintética, que en esencia son gravas con la característica que el 20% de su peso es agua retenida en sus poros, y que al ser calentadas dichas rocas liberan grandes cantidades de vapor de agua. Lo que se busca es reducir las altas temperaturas para producir mezclas, denominadas también "mezclas tibias", cuyo proceso requiere el consumo de grandes cantidades de energía, sin afectar la viscosidad del ligante. Las conclusiones a las que llegaron fueron que las mezclas se rigidizan más rápidamente, se reduce la emisión de CO<sub>2</sub> considerablemente, y aumenta la seguridad durante el proceso de colocación de mezclas asfálticas. (Huertas & Arévalo, 2014).

Recientemente en la Universidad de Brasilia, se ejecutaron investigaciones de la aplicabilidad de residuos reciclados con ligantes 50/70 impulsados por la sustentabilidad y la escasez de recursos naturales en ese país. Dentro de las conclusiones a las que llegaron fueron que aspectos como la densidad del RCD son más bajas respecto al agregado natural, y que los valores de absorción se aumentan, por lo anterior, recomiendan que la normativa se adapte a las condiciones de estos materiales, ya que, las normas no se han actualizado luego no disponen de órdenes de magnitud para los materiales artificiales. Para finalizar, las mezclas elaboradas con RCD presentan una disminución de hasta el 20% en el módulo resiliente. (Quiñones, Ferney. 2014).

Por último, estudiantes de La Universidad Pontificia Javeriana de la Ciudad de Cali, han liderado investigaciones del uso de agregados reciclados de concreto en la construcción de capas de rodadura. La idea fue la de plantear diseños variando el porcentaje de agregado reciclado, sin duda uno de los parámetros a evaluar es el del comportamiento mecánico del pavimento y su eventual comparación con un asfalto compuesto por el 100% de agregado natural. Se llegó a la conclusión que no recomiendan el reemplazo de material artificial con el 50% o 70% del total de la mezcla, ya que, no se cumple con las recomendaciones del INVIAS. (Cardona & López, 2016).

## 4.2 MARCO CONTEXTUAL

Este proyecto tuvo el aval y decisión tomada por el consejo curricular, de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas del programa de pregrado de Ingeniería Civil. Igualmente, con el préstamo de las instalaciones, elementos y en colaboración de los funcionarios del laboratorio de materiales de la universidad. Se destaca así mismo, la colaboración del Laboratorio Echeverry EIE en la ejecución de algunos ensayos.

## 4.3 MARCO LEGAL O NORMATIVO

Los ensayos ejecutados para el desarrollo de esta investigación, se realizaron con base en lo dispuesto por la normatividad vigente del Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Se menciona a continuación las normas consultadas:

Tabla 1. Marco Legal o Normativo

<b>I.N.V. E-213-13.</b> Análisis granulométricos de agregados gruesos y finos
<b>I.N.V. E-217-13.</b> Densidad bulk (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados compactados o sueltos
<b>I.N.V. E-218-13.</b> Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm por medio de la máquina de los angeles
<b>I.N.V. E-220-13.</b> Sanidad de los agregados frente a la acción de las soluciones de sulfato de sodio o magnesio
<b>I.N.V. E-223-13.</b> Gravedad específica y absorción de agregados gruesos
<b>I.N.V. E-227-13.</b> Porcentaje de caras fracturadas en los agregados
<b>I.N.V. E-235-13.</b> Valor de azul de metileno en agregados finos y en llenantes minerales
<b>I.N.V. E-238-13.</b> Determinación de la resistencia del agregado grueso al desgaste por abrasión utilizando el aparato microdeval
<b>I.N.V. E-224-13.</b> Evaluación de la resistencia mecánica de los agregados gruesos por el método de 10% de finos
<b>I.N.V. E-240-13.</b> Método para determinar partículas planas y alargadas o planas y alargadas en agregados gruesos

<b>I.N.V. E-706-07.</b> Penetración de los materiales asfálticos
<b>I.N.V. E-712-07.</b> Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola)
<b>I.N.V. E-724-07.</b> índice de penetración de cementos asfálticos
<b>I.N.V. E-748-07.</b> Resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall
<b>Capítulo 4-Pavimentos Asfálticos.</b> Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (concreto asfáltico) Artículo 450-13.

#### 4.4 MARCO TEÓRICO

Un pavimento se podría definir como una estructura conformada por varias capas de materiales de diferentes calidades, además, construidas adecuadamente con espesores obtenidos de un diseño, cuyo objetivo es transmitir de forma disipada las cargas (estáticas y móviles) por un tiempo dado al terreno de fundación o subrasante, teniendo presente los parámetros de resistencia del suelo de apoyo.

En definitiva, la subrasante recibe un esfuerzo que no le produce deformación y se basa en la relación de propiedades mecánicas de los materiales, en particular, el módulo de elasticidad y relación de Poisson. Un pavimento asfáltico se caracteriza porque las solicitudes no se disipan totalmente en la capa asfáltica, a su vez los esfuerzos se transmiten por disipación de tensiones, en consecuencia, se admiten grandes deformaciones en las primeras capas.

Para el diseño de un pavimento flexible lo acorde es ubicarse en la zona elástica de la curva esfuerzo-deformación, es decir, transmitir las cargas sin rotura en el rango elástico, evitándose por supuesto los suelos plásticos, es por esto que el espesor de la estructura depende de la resistencia de la subrasante.

Desde el punto de vista estructural, se tiene en cuenta las deformaciones permisibles para describir el funcionamiento del pavimento, es decir, al presentarse deflexiones ante una carga puntual, entonces aparecen los esfuerzos tanto por compresión como por tensión, denominadas respectivamente ahuellamiento y agrietamiento.

##### 4.4.1 Variables de diseño.

El Ing. Santiago Caballero resume bien en su publicación de 1974, las variables que se deben tener en cuenta para el diseño de un pavimento asfáltico mencionadas a continuación:

- a) Estructurales. Incluyen características relativas a cada una de las capas que constituyen el pavimento, como espesores, resistencia y deformabilidad en las condiciones esperadas de servicio. (Caballero Santiago, 1974).
- b) De carga. Se refieren a los efectos producidos por el tránsito mezclado al circular por la vía. En este caso son importantes datos relacionados con tránsito diario medio anual, tasa de crecimiento anual, cargas por eje sencillo o tándem, histograma de distribución del tránsito en la sección transversal y vida útil del proyecto. (Caballero Santiago, 1974).
- c) De clima y condiciones regionales. Las características reológicas de los materiales que constituyen el pavimento dependen de la temperatura, régimen de precipitación, precipitación media anual y nivel freático. (Caballero Santiago, 1974)

El comportamiento del pavimento está directamente relacionado con la interacción de los parámetros de diseño (estructura, tránsito, clima y condiciones regionales) con una cuarta que sería variables de conservación.

#### 4.4.2 Procedimientos Analíticos.

Se conocen publicaciones desde 1940, donde se han abordado teorías basadas en métodos analíticos para calcular el esfuerzo y la tensión o deflexión, impuestas por las cargas en las distintas capas de la estructura de pavimento, que se idealizan mediante un modelo físico o modelo de respuesta, y se busca aplicar las teorías conocidas de resistencia de materiales.

Según (Jorge Coronado, 2002), los modelos físicos de respuesta pueden ser de tres tipos en función de la modelación geométrica y del cálculo en que se basen:

- ✓ Sistema Multicapa.
- ✓ Teoría de placas.
- ✓ Elementos finitos.

El análisis de fluencias y deformaciones también está dado por la naturaleza de los materiales, entre los que se destacan: elásticos y visco elásticos.

Es importante mencionar la teoría de distribución de esfuerzos verticales de Boussinesq, cuyo análisis se basó en la aplicación de una carga puntual concentrada a una placa estática, circular, flexible, apoyada uniformemente sobre una superficie de característica elástica, homogéneo e isótropo. Según (Luis Vásquez, 2017) Los esfuerzos, deformaciones y desplazamientos bajo un área uniformemente cargada se determinan mediante integración. Por otra parte, los neumáticos de los vehículos se pueden modelar como áreas circulares.



Los modelos elegidos para el análisis de los pavimentos flexibles se caracterizan por sistemas multicapas y ecuaciones elásticas, por consiguiente, se destaca la hipótesis de Burmister (Teoría de capas elásticas). Se aclara, que dichos modelos tienen la ventaja de que permiten establecer los espesores de cada una de las capas con coeficientes de seguridad.

#### 4.4.3 Hipótesis de Burmister.

El Ing. Jorge Coronado Iturbe menciona las principales características de la hipótesis y se describen a continuación:

- a) El pavimento se representa como una estructura por una serie de capas horizontales paralelas, indefinidas en planta y de espesor constante, apoyadas en un espacio semi-indefinido de Boussinesq. (Jorge Coronado, 2002).
- b) Cada capa se considera como un medio continuo homogéneo isotrópico y linealmente elástico (C.H.I.L.E). Se caracteriza mecánicamente por su módulo de elasticidad y su coeficiente de Poisson. (Jorge Coronado, 2002).
- c) Cada una de las cargas que actúan sobre el pavimento, se representan mediante una presión, en general vertical distribuida uniformemente sobre un área circular. (Jorge Coronado, 2002).
- d) Cada capa se apoya sobre la subyacente de forma continua. El contacto entre capas puede modelarse en condiciones de adherencia total. (Jorge Coronado, 2002).
- e) Se desprecian las fuerzas de inercia y los efectos térmicos. (Jorge Coronado, 2002).
- f) No se suelen considerar los esfuerzos cortantes que se producen en la zonas de contacto entre las cargas y la superficie del pavimento, debido a que salvo en casos excepcionales son prácticamente despreciables. (Jorge Coronado, 2002).

#### 4.4.4 Soluciones Para Sistemas de Dos Capas.

Según (Luis Vásquez, 2017), Burmister y otros proponen ábacos para sistemas de dos capas a partir de la solución general del sistema multicapa. Los ábacos permiten obtener respuestas de interés en el análisis de pavimentos flexibles:

- Distribución del esfuerzo vertical ( $\sigma_z$ ) para  $h_1=a$ .
- Esfuerzo vertical en la interfase entre la subrasante y el pavimento bajo el centro de la carga ( $\sigma_c/\sigma_z$ ).

- Esfuerzo horizontal radial en la interfase entre la subrasante y el pavimento bajo el centro de la carga ( $\sigma_1$ ).
- Desplazamiento vertical en la superficie bajo el centro de la carga ( $u_z=0$ ).

## 5. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

### 5.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación se centra en la forma cuantitativa, dado que, para evaluar las propiedades físicas y mecánicas tanto del material pétreo, como de las briquetas resultado del diseño de mezcla, se aplicarán los procedimientos y fórmulas de cálculo para resolver numéricamente los datos obtenidos de los diferentes ensayos.

#### 5.1.1 Experimental.

Al variar el agregado en el diseño de mezcla, se busca determinar que tanto cambiarán las propiedades mecánicas, así mismo, comparar dichos resultados con lo propuesto en el artículo del Instituto Nacional de Vías, Ínvias 450-13, cuyos parámetros se basan en concretos asfálticos con agregados de origen natural.

### 5.2 POBLACIÓN Y MUESTRA

Las quince (15) briquetas producto del diseño de mezcla, de manera que, a cada porcentaje de asfalto le corresponden tres (3) especímenes.

Tabla 2. Proporción de materiales según el porcentaje de asfalto (Fuente: elaboración propia)

<b>Contenido de asfalto (%)</b>	4,5	5	5,5	6	6,5
<b>Contenido de asfalto (gr)</b>	54	60	66	72	78
<b>Cantidad de llenante mineral (gr)</b>	60	60	60	60	60
<b>Cantidad de agregado (RCD) (gr)</b>	1086	1080	1074	1068	1062
<b>TOTAL (gr):</b>	1200	1200	1200	1200	1200

### 5.3 FORMA DE RECOLECTAR LA INFORMACIÓN

Mediante la aplicación de ensayos de laboratorio, los mismos se basarán con lo dispuesto en las normas Invias en cuanto a procedimientos, equipos, cálculos y resultados. Dichas pruebas serán aplicables tanto al material granular, como al asfalto y al producto final del diseño (briquetas).

## **5.4 PLAN DE ANÁLISIS DE LOS DATOS**

Los datos obtenidos se consolidarán en tablas, con el fin de que sea más fácil la comparación con los valores y órdenes de magnitud establecidos en el artículo 450-13 del Invías. Los resultados finales de estabilidad y flujo se representarán por medio de gráficas.

## **5.5 DISEÑO METODOLÓGICO**

El diseño metodológico se divide en cuatro fases:

- ✓ Búsqueda y recolección de materiales.
- ✓ Caracterización de agregados pétreos y del material bituminoso.
- ✓ Dosificación de la mezcla asfáltica.
- ✓ Ejecución de ensayos y análisis de resultados.

### **5.5.1 Fase 1. Búsqueda y recolección de materiales.**

- 5.5.1.1 Material pétreo: El material es suministrado por la planta de reciclados industriales, ubicada en el Km 1.5 de la vía Bogotá-Siberia. Dicho agregado es seleccionado y no está contaminado por el contacto de otras sustancias.
- 5.5.1.2 Cemento asfáltico: El material bituminoso es suministrado por una dependencia de la Unidad de Mantenimiento Vial de Bogotá, y corresponde a un asfalto convencional con denominación comercial 80-100.
- 5.5.1.3 Llenante mineral: Se utiliza ceniza (subproducto o residuo), proveniente de las actividades de generación de energía en termoeléctricas. La planta de concreto de Cemex, ubicada en Bogotá en la autopista al llano Km 7, facilita dicho material.

### **5.5.2 Fase 2. Caracterización de agregados pétreos y del material bituminoso**

- 5.5.2.1 Material Granular: Para la caracterización del agregado, se ejecutaron ensayos para el análisis granulométrico, peso unitario, resistencia al desgaste tanto por el método de la máquina de los ángeles como con el uso del aparato microdeval, densidad y absorción, limpieza de agregados y forma de las partículas.
- 5.5.2.2 Material Bituminoso: Para conocer las propiedades, clasificarlo y descartar asfaltos envejecidos, se realizaron ensayos de penetración, viscosidad, punto de ablandamiento y el cálculo del índice de penetración.

A continuación se relacionan las normas que se emplearon para la ejecución de los ensayos y el cumplimiento de esta fase de la investigación:

Tabla 3. Ensayos aplicados al agregado artificial. (Fuente: elaboración propia)

<b>ENSAYOS AL MATERIAL GRANULAR</b>		
<b>Nombre del ensayo</b>	<b>Norma</b>	<b>Objetivo del Ensayo</b>
Granulometria	I.N.V.E - 213 - 07	Determinar cuantitativamente la distribución de los tamaños de las partículas de agregados gruesos y finos de un material
Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados	NTC 92	Determinar la masa unitaria en condición compactada o suelta y el cálculo de los vacíos entre las partículas de agregados finos, gruesos o mezclados.
Resistencia al desgaste de los agregados por medio de la máquina de los Angeles	I.N.V.E - 218 - 07	El método se emplea para determinar la resistencia al desgaste de agregados naturales o triturados, empleando la citada máquina con una carga abrasiva
Determinación de la resistencia del agregado grueso al desgaste por abrasión utilizando el aparato Micro-Deval	I.N.V.E - 238 - 07	Determinar la resistencia a la abrasión y durabilidad de agregados pétreos que han sido sometidos a la acción combinada de abrasión y molienda con bolas de acero en presencia de agua
Valor de azul de metileno en agregados finos y en llenantes minerales	I.N.V.E - 235 - 07	Determinar la cantidad de material potencialmente dañino (incluyendo arcilla y material orgánico) presente en la fracción fina de un agregado mediante la determinación de 1 valor de azul de metileno
Gravedad Específica y Absorción de agregados gruesos	I.N.V.E - 223 - 07	Determinar las gravedades específicas bulk, bulk saturada y superficialmente seca y aparente, así como la absorción.

Nombre del ensayo	Norma	Objetivo del Ensayo
Metodo para determinar la densidad y la absorcion del agregado fino	NTC 237	Determinar la densidad aparente y nominal a una condicion de temperatura de 23 grados centigrados y la absorcion del agregado fino.
Metodo para determinar particulas planas, alargadas o planas y alargadas en los agregados gruesos	I.N.V.E - 240 - 07	Determinar el porcentaje de particulas planas, alargadas o planas y alargadas, en un agregado grueso.
Porcentaje de caras fracturadas en los agregados	I.N.V.E - 227 - 07	Determinar el porcentaje, en masa o conteo de una muestra de agregado grueso compuesta por particulas fracturadas que cumplan con los requisitos especificos.
Sanidad de los agregados frente a la accion de las soluciones de sulfato de sodio o de magnesio.	I.N.V.E - 220 - 07	Determinar la resistencia a la desintegracion de los agregados, por accion de soluciones saturadas de sulfato de sodio o de magnesio
Evaluacion de la resistencia mecanica de los agregados por el metodo 10% de finos	I.N.V.E - 224- 07	Determinar la resistencia mecanica de un agregado, tomando como parametro de referencia la carga de compresion necesaria que se debe aplicar al material para que se produzca un 10% de finosproducto de la accion mecanica
Equivalente de arena de suelos y agregados finos	I.N.V.E - 133 - 07	Determinar la proporcion relativa del contenido de polvo fino nocivo, o material arcilloso, en los suelos o agregados finos.

Tabla 4. Ensayos aplicados al asfalto. (Fuente: elaboración propia)

Nombre del ensayo	Norma	Objetivo del Ensayo
Penetración de los materiales asfálticos	I.N.V.E-706-13	Busca determinar la consistencia del material asfáltico a emplear en el diseño
Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola)	I.N.V.E-712-13	Busca determinar la temperatura a la que el asfalto se ablanda, por ende hay cambios en su consistencia

### 5.5.3 Fase 3. Dosificación de la mezcla asfáltica.

5.5.3.1 Temperatura de mezclado y compactación: Una vez ejecutado el ensayo de viscosidad en asfalto, empleando el aparato de viscosímetro rotacional, se procedió a interpretar los resultados y elaborar la gráfica de Viscosidad Vs Temperatura, de la misma se intersectan los valores a 200 y 300 centipoins con la curva y se lee en las abscisas la temperatura de mezcla y compactación.

5.5.3.2 Diseño de la mezcla asfáltica: Para el diseño se aplicó el procedimiento del método Marshall, según (Garber, Nicholas, 2005) en este método se usan prototipos de prueba de 4 pulgadas de diámetro y 2 ½ pulgadas de altura. Se preparan mediante un proceso específico de calentamiento, mezclado y de compactación de la mezcla del asfalto con los agregados, la cual se sujeta entonces a un ensayo de estabilidad-flujo y a un análisis de densidad-vacíos. La estabilidad se define como la resistencia máxima a la carga N en libras que el prototipo va a alcanzar a 140°F bajo condiciones especificadas. El flujo es el movimiento total del prototipo, en unidades de 0.01 pulgada durante la prueba de estabilidad, a medida que la carga se incrementa del cero al máximo.

### 5.5.4 Fase 4. Ejecución de ensayos y análisis de resultados

Para la implementación de las prácticas, se siguieron los procedimientos, recomendaciones y cálculos descritos en las normas Invias. La mayoría de las actividades de caracterización se realizaron en las instalaciones del laboratorio de materiales de la Universidad Distrital. Para el caso del ensayo de estabilidad y flujo por el método Marshall se acudió al servicio del laboratorio Echeverry EIE.

Los resultados de los ensayos, se relacionaron por medio de tablas y se establecieron trazabilidades de las propiedades físicas al comparar los resultados obtenidos con las recomendaciones del artículo 450-13. Igualmente, con los valores de estabilidad y flujo, se analiza el comportamiento del diseño por medio de gráficas y de esta forma presentar las respectivas conclusiones y recomendaciones.

## 6 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

### 6.1 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

Con el fin de establecer las propiedades físicas y mecánicas del agregado artificial, dado que, visualmente el material pétreo aparentaba condiciones favorables al no estar contaminado por otros componentes, y no presentaba sobre tamaños, sin embargo, no se garantizaba la idoneidad para el uso del mismo en carpetas de rodadura para un nivel de tránsito tan alto.

#### 6.1.1 Granulometría

Uno de los primeros aspectos en abordarse fue el de determinar la distribución de tamaños, mediante el ensayo de análisis granulométrico, evaluar esta propiedad del material granular es de gran importancia, porque se podrán tomar medidas en caso de que no se cumpla con dicho parámetro antes de definir la fórmula de trabajo Marshall.

##### 6.1.1.1 Requisitos generales de caracterización

Las franjas de valores recomendados (porcentaje que pasa), para una mezcla de gradación continua MCD-19 y un nivel de tránsito (3) NT3, fueron consultados de la tabla 450-3 del artículo 450-13 del instituto Nacional de Vías INVIAS. Con dichos valores se comparó los resultados de los ensayos aplicados al material RCD.

Tabla 5. Franjas granulométricas para mezclas densas. (Fuente: 450-13 INVIAS)

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									
DENSA	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

Para la representación en porcentaje de la distribución de los tamaños del agregado, se elabora un diagrama en escala semilogarítmica (sólo en el eje de las abscisas), básicamente se representa para la abertura de un tamiz el porcentaje de muestra que queda retenida. Los resultados de los ensayos de granulometría con su respectiva gráfica se presentan a continuación:



Tabla 6. Resultados granulometría y franjas recomendadas INV-450-13

ABERTURA PULG	ABERTURA mm	% PASA		
		ENSAYO	L.INFERIOR	L.SUPERIOR
1"	25	92,9	100	100
3/4"	19	74,3	100	100
1/2"	12.5	35,5	95	80
3/8"	9.5	13,0	88	70
Nº 4	4.75	0,3	65	49
Nº 10	2	0,2	45	29
Nº 40	0.43	0,2	25	14
Nº 80	0.180	0,1	17	8
Nº 200	0.075	0,1	8	4

En la gráfica se establece la curva granulométrica de la muestra objeto del ensayo, la cual no cumple y está por fuera del orden de magnitud, en comparación con las curvas para los límites inferior y superior de las franjas recomendadas en el artículo 450-13 del Instituto Nacional de Vías. Por tanto, se realizará el ajuste granulométrico pertinente.

Ilustración 1. Curva granulométrica (Fuente:elaboración propia)

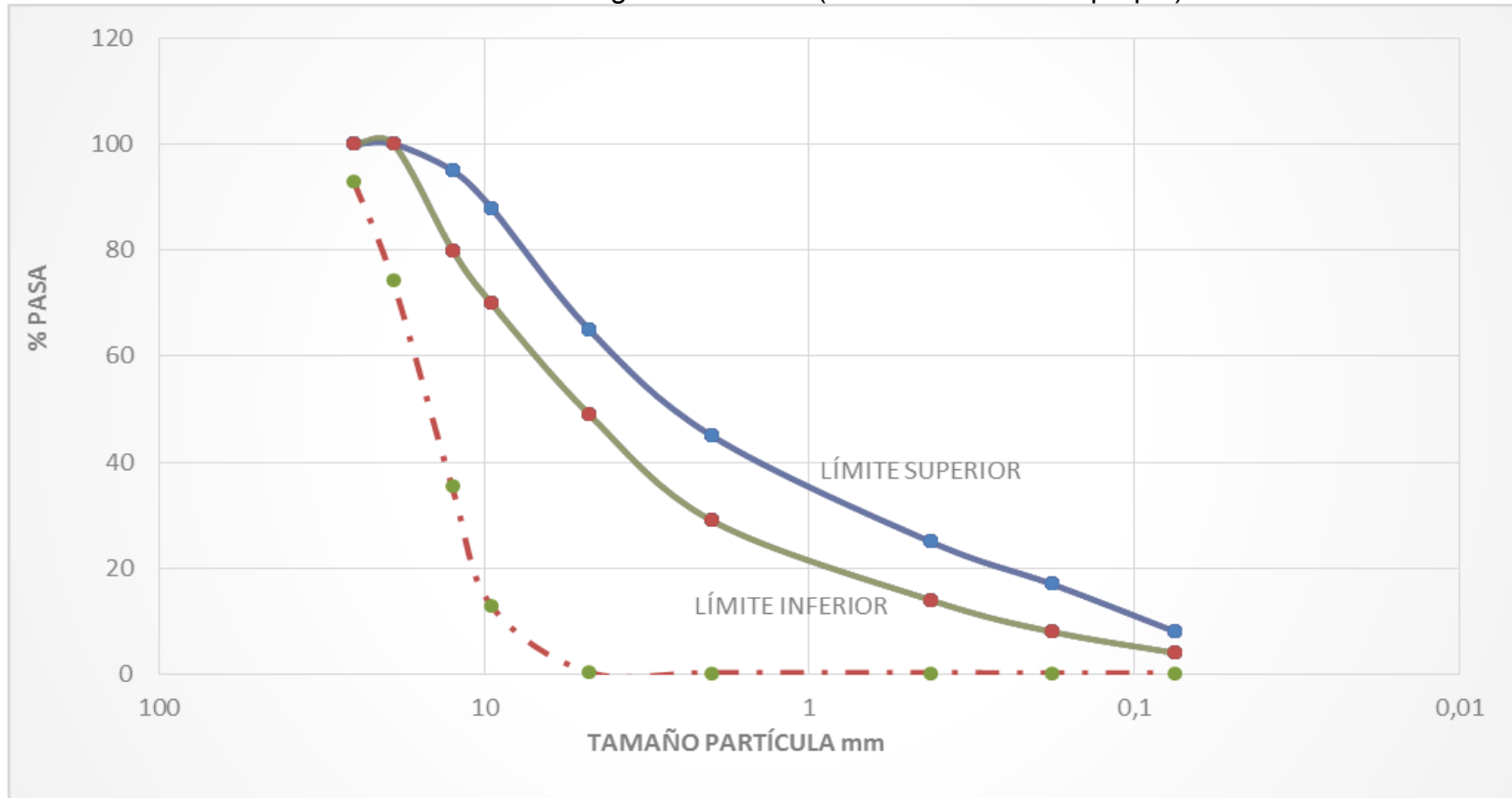


Tabla 7. Clasificación del RCD. (Fuente: elaboración propia)

(%) Reten. 3/4"	(%) Reten. No.4	CANTIDAD DE MATERIAL GRUESO Y FINO (%)				(%) Pasa 200	Cu	Cc	CLASIFICACIÓN	
		GRAVA GRUESA	GRAVA FINA	ARENA GRUESA	ARENA FINA				U.S.C.S	AASHTO
									GP	A-1-a
18,6	12,7	25,70	74,00	0,10	0,10	0,1	1,99	1,03	Grava mal gradada	Fragmentos de roca grava y arena

### 6.1.1.2 Ajuste de la granulometría

Al consultar las teorías sobre granulometrías continuas ideales se encontró: la gradación de Fuller y Thompson y la gradación de Weymouth. La última mencionada se basa en la ecuación  $p = 100\left(\frac{d}{D}\right)^n$ .

En donde:

$p$  = Porcentaje que pasa por el tamiz ( $d$ )

$D$  = Tamaño máximo del agregado (mm).

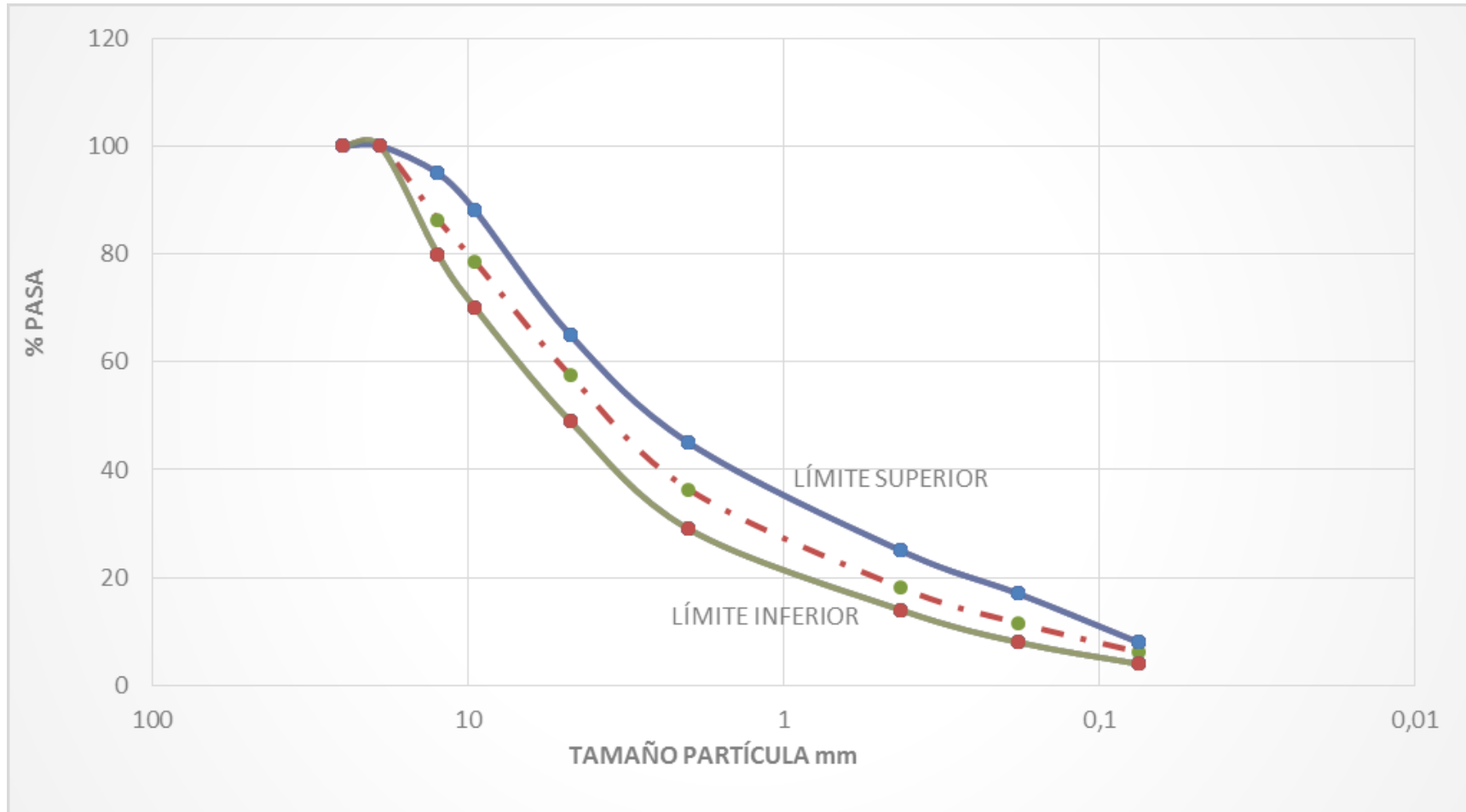
$n$  = Exponente que gobierna la distribución de las partículas y es función del agregado grueso.

Se procede a determinar el porcentaje máximo que pasa en cada tamiz, de acuerdo a un tamaño máximo de agregado de 19 mm que equivale a 3/4". Por último, se establecen los nuevos valores y gráficamente se observa el comportamiento de la curva, la cual deberá quedar dentro de la franja recomendada.

Tabla 8. Pesos retenidos de la granulometría ajustada (Fuente: Elaboración propia)

PESO RETENIDO (gr)					
SERIE TAMIZ	C.A 4.5%	C.A 5.0%	C.A 5.5%	C.A 6.0%	C.A 6.5%
3/4"	0	0	0	0	0
1/2"	156	155	155	154	153
3/8"	91	90	90	89	89
Nº 4	244	243	242	240	239
Nº 10	242	241	240	238	237
Nº 40	209	208	207	206	204
Nº 80	76	75	75	74	74
Nº 200	71	71	70	70	70
FONDO	57	57	57	56	56
	1146	1140	1134	1128	1122
<b>TOTAL</b>	1200	1200	1200	1200	1200

Ilustración 2. Curva granulométrica ajustada. (Fuente: elaboración propia)



Se observa que la curva granulométrica (línea punteada) cumple, ya que, dentro de los límites superior e inferior según lo recomendado por el artículo 450-13.

### **6.1.2 Trazabilidad de los ensayos aplicados al material granular**

Se procede a evaluar las demás propiedades del agregado artificial y consolidar los resultados obtenidos en tablas, con el fin de comparar cada uno con los órdenes de magnitud sugeridos en la tabla 450-3 del artículo 450-13 del Instituto Nacional de Vías. A continuación se enuncian los ensayos ejecutados:

- Resistencia al desgaste mediante la máquina de los ángeles, I.N.V.E - 218 – 13.
- Determinación de la resistencia del agregado grueso al desgaste por abrasión utilizando el aparato Micro-Deval, I.N.V.E - 238 – 13.
- Valor de azul de metileno en agregados finos y en llenantes minerales, I.N.V.E - 235 – 13.
- Método para determinar partículas planas, alargadas o planas y alargadas en los agregados gruesos, I.N.V.E - 240 – 13.
- Porcentaje de caras fracturadas en los agregados, I.N.V.E - 227 – 13.
- Sanidad de los agregados frente a la acción de las soluciones de sulfato de sodio o de magnesio, I.N.V.E - 220 – 13.
- Evaluación de la resistencia mecánica de los agregados por el método 10% de finos, I.N.V.E - 224- 07.
- Equivalente de arena de suelos y agregados finos, I.N.V.E - 133 – 13.

Tabla 9. Evaluación de las propiedades físicas. Fuente: elaboración propia

TABLA COMPARATIVA CARACTERIZACION DEL MATERIAL RESPECTO A LA NORMA I.N.V.E - 2013				
Nombre del ensayo	Norma	Resultado	Parametro de la Norma	Cunplimiento de la Norma
Resistencia al desgaste de los agregados por medio de la maquina de los Angeles	I.N.V.E - 218 - 13	30,63 %	Menor 25 %	No
Determinacion de la resistencia del agregado grueso al desgaste por abrasion utilizando el aparato Micro-Deval	I.N.V.E - 238 - 13	16,84 %	Menor 20 %	Si
Valor de azul de metileno en agregados finos y en llenantes minerales	I.N.V.E - 235 - 13	3,25	Menor 10	Si
Gravedad Especifica y Absorcion de agregados gruesos	I.N.V.E - 223 - 13	2,17 6,56 %		cumple
Metodo para determinar la densidad y la absorcion del agregado fino	NTC 237	2,18 6,24 %		cumple
Metodo para determinar particulas planas, alargadas o planas y alargadas en los agregados gruesos	I.N.V.E - 240 - 13	9,32 %	Menor 10 %	Si
Porcentaje de caras fracturadas en los agregados	I.N.V.E - 227 - 13	94,04 %	100%	No
Sanidad de los agregados frente a la accion de las soluciones de sulfato de sodio o de magnesio.	I.N.V.E - 220 - 13	35,33 %	Menor 18 %	No
Evaluacion de la resistencia mecanica de los agregados por el metodo 10% de finos	I.N.V.E - 224- 13	182 KN 77 %	Mayor 110 KN 75 %	Si
Equivalente de arena de suelos y agregados finos	I.N.V.E - 133 - 13	55%	Mayor 50 %	Si

De los resultados obtenidos se puede observar que el valor del ensayo de desgaste en la máquina de los ángeles no cumple, en otras palabras su dureza es baja, lo anterior se debe al origen del agregado, ya que, durante el proceso de demolición y trituración van perdiendo algunas propiedades mecánicas que se ven reflejados en prácticas de desgaste por impacto. Sin embargo, la norma no es clara en otorgar un margen diferente considerando la procedencia de los materiales.

Al determinarse la forma de las partículas del agregado, se busca limitar el uso de las partículas planas y alargadas, ya que, incide en el comportamiento mecánico del pavimento, siendo la forma angular la más recomendada por demostrar buena trabazón, rugosidad y acomodamiento.

Frente a lo obtenido mediante el ensayo de sanidad de los agregados frente a los ataques de sulfatos, es importante tomar algún tipo de acción para mejorar esta propiedad, ya que, afecta directamente la durabilidad de la capa de rodadura, en especial siendo tan expuesta a ataques químicos de sales y otros compuestos.

Según el ensayo de densidad en agregado grueso, se observa que esta dentro del orden de magnitud empírico, ya que, la norma no ha establecido límites en sus valores. Una densidad recomendada es aquella que se ubique entre  $(2-2.9) \text{ gr/cm}^3$ , y entre mayor sea la densidad menor es la absorción del agregado.

### 6.1.3 Caracterización del Cemento Asfáltico

Se elige un asfalto convencional 80-100, lo anterior se debe a que se analiza una capa de rodadura, con un nivel de tránsito 3 y se considera una temperatura media anual de la región  $<15^{\circ}\text{C}$ . Dicho material fue suministrado por la Unidad de Mantenimiento Vial y para su caracterización se ejecutaron los ensayos de penetración, punto de ablandamiento y viscosidad, por tanto, conocer sus propiedades, clasificarlo y descartar el uso de asfaltos envejecidos. Por último, se calcula el índice de penetración.

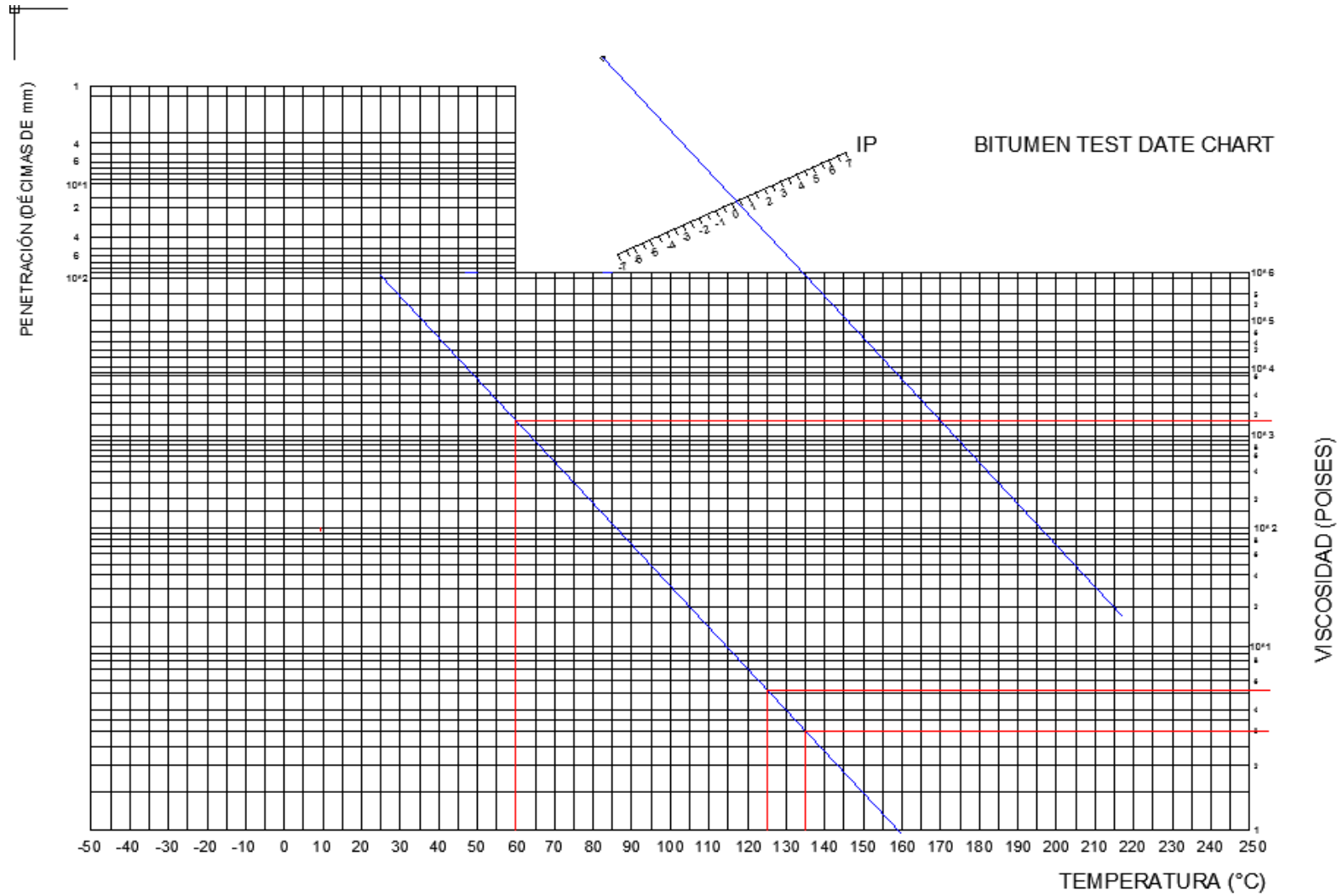
Tabla 10. Resultados y evaluación de parámetros. (Fuente: elaboración propia)

Nombre del ensayo	Norma	Unidades	Resultado	Parámetro de la Norma	Evaluación de Parámetro
Ensayo de Penetración en materiales asfálticos	I.N.V.E - 706 - 13	0.1 mm	95	80-100	Si Cumple
Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola)	I.N.V.E - 712 - 13	$^{\circ}\text{C}$	48	45-52	Si Cumple

Con los anteriores valores se ingresa al nomograma de Heukelom y se establece la viscosidad dinámica a  $60^{\circ}\text{C}$ ,  $125^{\circ}\text{C}$  y  $135^{\circ}\text{C}$ , posteriormente, la clasificación por medio de la A.S.T.M, ASHTO e INVIAS, además, se puede determinar el índice de penetración y la gráfica radiológica.



Ilustración 3. Nomograma de Heukelom.



NOMOGRAMA DE HEUKELOM

6.1.3.1 Resultados de viscosidad dinámica y clasificación del asfalto.

Tabla 11. Valores obtenidos del Nomograma. Fuente: Elaboración propia

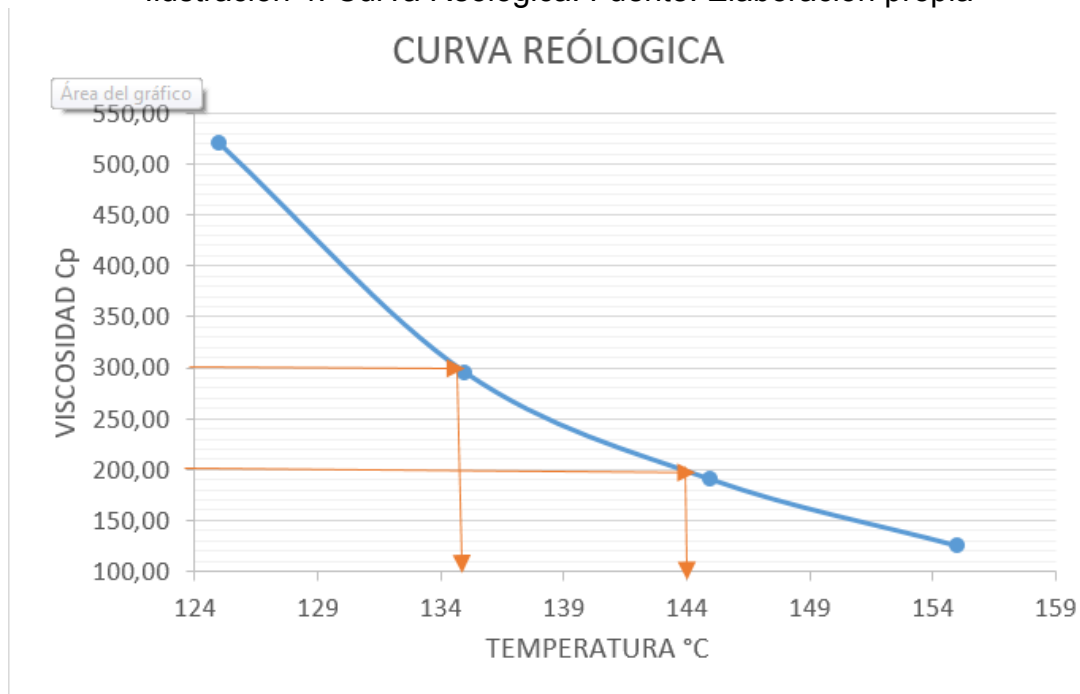
TEMPERATURA °C	VISCOSIDAD DINÁMICA Cp
60	114000
125	520
135	295

Al revisar el parámetro recomendado en la tabla 410-1 del artículo 410-INVIAS, y compararlo con el obtenido en el nomograma, se cumple con la viscosidad, ya que, la norma determina un valor mínimo de 100000 Cp para una temperatura de 60°C. Por otro lado, el índice de penetración equivale a 0,25.

Tabla 12. Resultados y clasificación. Fuente: Elaboración propia

PARAMÉTRICO	RESULTADOS	CLASIFICACIÓN	
		INVIAS	ASTM
PENETRACIÓN (1/10 mm)	95	AC. 80-100	AC-10
PUNTO DE ABLANDAMIENTO (°C)	48		
VISCOSIDAD 60°C (Cp)	114000		
VISCOSIDAD 135 °C (Cp)	295		
I.P	0.17: Asfalto con baja susceptibilidad térmica con características reológicas y de flujo intermedios		

Ilustración 4. Curva Reológica. Fuente: Elaboración propia



De la anterior gráfica e intersectando la viscosidad a 200 y 300 Cp, con la curva y leyendo los valores en las ordenadas, se obtiene la temperatura de mezclado y compactación respectivamente.

Temperatura de Mezclado=144°C.

Temperatura de Compactación=134.5°C.

#### 6.1.3.2 Cálculo del IP por el método matemático.

Para la determinación del índice de penetración, se tuvo en cuenta el la fórmula de Pfeifer.

Ilustración 6. Fórmula para determinar el índice de Penetración, I.N.V.E-714

$$A = \frac{\text{Log Pen } T - \text{Log } 800}{T - T_{R\&B}}$$
$$IP = \frac{20 - 500 A}{1 + T 50 A}$$

Donde.

A = Susceptibilidad térmica del asfalto.

T = Temperatura de referencia de penetración del asfalto (°C).

Pen T = Penetración del asfalto para la temperatura T ( $\frac{1}{10}$  mm)

T<sub>R&B</sub> = Temperatura a la cual la penetración del asfalto es de 800 1/10 mm (°C)

800: Penetración del asfalto de 800 1/10 mm.

$$IP=0.17$$

## 6.2 Parámetros para el diseño de mezcla

Se siguieron las recomendaciones de la norma I.N.V.E 748-13, en cuanto al equipo a utilizar, procedimientos generales e informe de cálculos y resultados. Igualmente, se acataron las asesorías tanto del tutor del proyecto como de los encargados del laboratorio, entre lo que se destaca:

- Ajuste de la granulometría de acuerdo a la proporciones del agregado artificial según los porcentajes de asfalto definidos, luego se pesaron los agregados buscando el valor determinado para cada peso retenido de cada tamiz.
- Control de la temperatura en todos los instantes de la elaboración de briquetas, desde el calentamiento de los agregados y el del asfalto, se garantizó la temperatura de mezcla y compactación.
- Se colocaron algunos elementos en el horno como el cabezal del martillo de compactación, el recipiente donde se mezclaban los materiales y el molde para compactación. Lo anterior, con el fin de no alterar la temperatura de mezcla, ya que, al contacto con los elementos en mención a temperatura ambiente, la temperatura lograda de mezcla podría bajarse.
- Homogenización y mezclado adecuados del agregado con el asfalto.
- Al momento de disponer la mezcla homogenizada en el molde para compactar, se golpeó el molde en su perímetro para lograr mejor acomodación de las partículas y evitar exceso de poros.
- Extracción y marcado de las briquetas según el porcentaje trabajado y el punto del espécimen.

Tabla 13. Contenido de asfalto. Fuente: elaboración propia

<b>Contenido de Asfalto</b>		
<b>Porcentajes</b>	<b>Contenido de asfalto (gr)</b>	<b>No. Especímenes</b>
4,5	54	3
5	60	3
5,5	66	3
6	72	3
6,5	78	3

- El número de golpes aplicado a la mezcla fue de 75 por cada cara del molde, se tuvo especial cuidado de aplicar los golpes de forma adecuada, garantizando la libre caída del martillo y en total perpendicularidad.

Finalmente, las quince (15) briquetas fueron trasladadas al laboratorio Echeverry E.I.E., de la ciudad de Bogotá, en sus instalaciones fueron ejecutados los ensayos de densidad bulk, estabilidad y flujo.

#### 6.2.1 Tablas de los resultados obtenidos.

A continuación se presentan las tablas con los resultados de Densidad Bulk, igualmente, los valores de Estabilidad y Flujo otorgados por el Laboratorio Echeverry EIE.

Tabla 14. Densidades Bulk. Fuente: elaboración propia

<b>Contenido de Asfalto (%)</b>	<b>Densidad Bulk (25°C) g/cm<sup>3</sup></b>
4,5	1,900
5	1,912
5,5	1,924
6	1,935
6,5	1,945

Con los resultados obtenidos del ensayo de estabilidad y flujo, se determina la resistencia máxima para la carga N en libras, que causa la falla de la briketa en un ambiente idealizado de 60 °C, por otro lado, el flujo indica la cantidad total de deformación en unidades de 0,01 pulgadas que se presenta hasta el punto que la carga comienza a disminuir (Garber, J. 2005). A continuación se presentan los valores obtenidos para cada contenido de asfalto:

Tabla 15. Resultados de estabilidad. Fuente: elaboración propia

<b>Contenido de Asfalto (%)</b>	<b>Estabilidad (N)</b>
4,5	4979
5	8755
5,5	7673
6.0	5934
6,5	6045

Tabla 16. Resultados de flujo. Fuente: elaboración propia

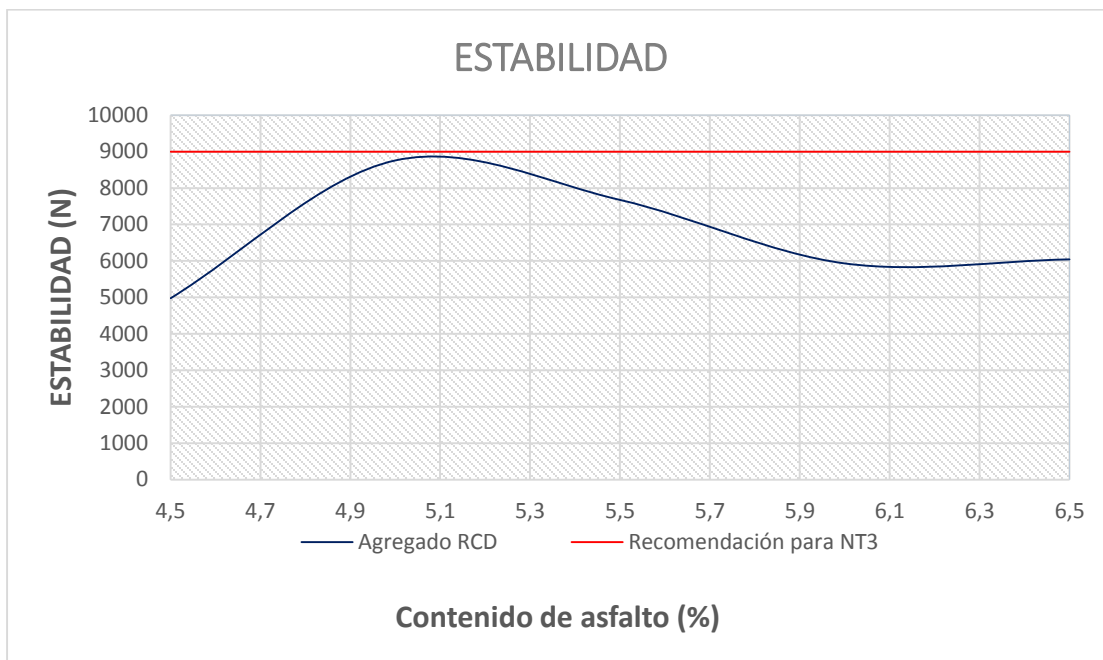
<b>Contenido de Asfalto (%)</b>	<b>Flujo (mm)</b>
4,5	4,1
5	3,8
5,5	4,6
6.0	5,0
6,5	5,4

## 7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 7.1 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

Se decidió representar los resultados del ensayo de estabilidad remitidos por el laboratorio externo. Lo anterior, para una mejor visualización de los valores, así mismo se incluyó los parámetros de la tabla 450-3 del artículo 450 del Instituto Nacional de Vías.

Ilustración 5. Estabilidad de la mezcla, fuente: elaboración propia

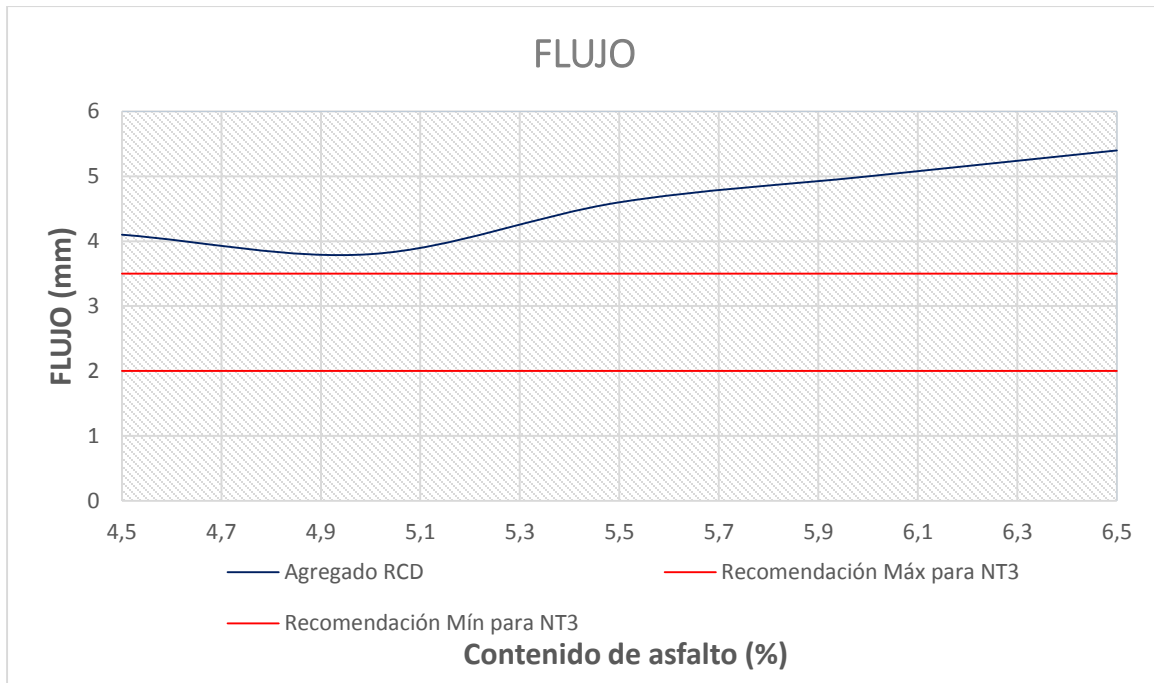


Se puede establecer que los resultados están siempre por debajo de los mínimos establecidos en la normativa vigente, lo anterior, indica que el diseño ejecutado no es viable para soportar el tipo de tránsito considerado, pues dicho tránsito se caracteriza por ser el más alto en cuanto a solicitudes de carga.

## 7.2 RESULTADOS DE FLUJO

Los resultados obtenidos del ensayo de flujo, se graficaron junto con los valores recomendados del Instituto Nacional de Vías. Se establecen los promedios por cada porcentaje de asfalto.

Ilustración 6. Flujo de la mezcla, fuente: elaboración propia



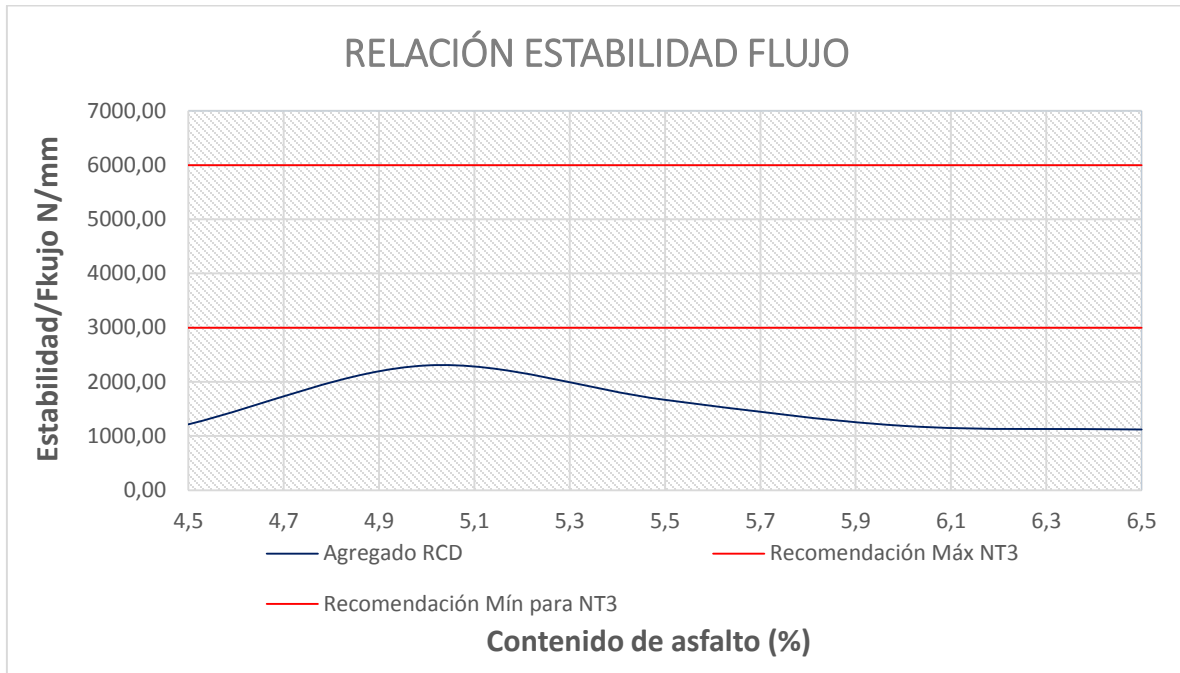
Se puede observar que los valores de deformación están por encima del límite superior, significa que, las deformaciones tienden a ser altas bajo solicitudes de carga bajas en comparación con lo dispuesto en la 450-10.



### 7.3 RELACIÓN ESTABILIDAD-FLUJO

Este importante parámetro, es calculado partiendo del cociente entre la estabilidad y el flujo, de los valores promedios de cada porcentaje de asfalto. Al igual que en los anteriores diagramas se anexan los valores que recomienda el artículo 450-13.

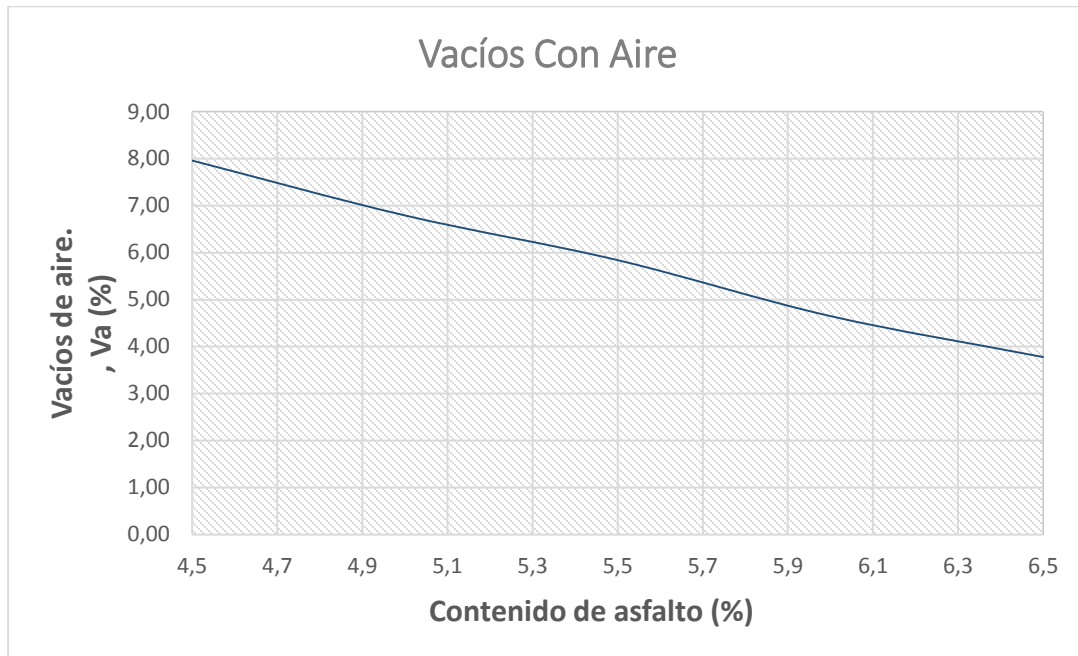
Ilustración 7. Estabilidad-Flujo de la mezcla, fuente: elaboración propia



Dicho cociente también es conocido como la rigidez, y se puede observar que los valores obtenidos están por debajo del mínimo recomendado por el artículo 450-13.

## 7.4 PORCENTAJE DE VACÍOS CON AIRE

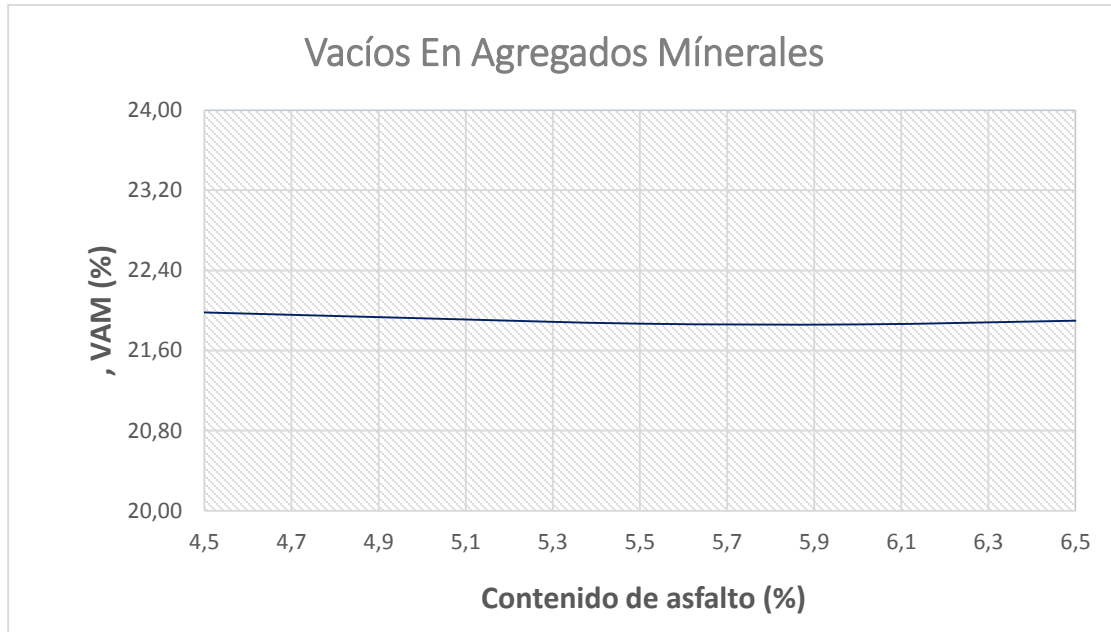
Ilustración 8. Porcentaje de vacíos. Fuente: elaboración propia



Este porcentaje hace referencia a los huecos entre las partículas del agregado recubierto para la mezcla compacta, se puede observar que está dentro de los parámetros recomendados.

## 7.5 PORCENTAJE DE VACÍOS EN AGREGADO

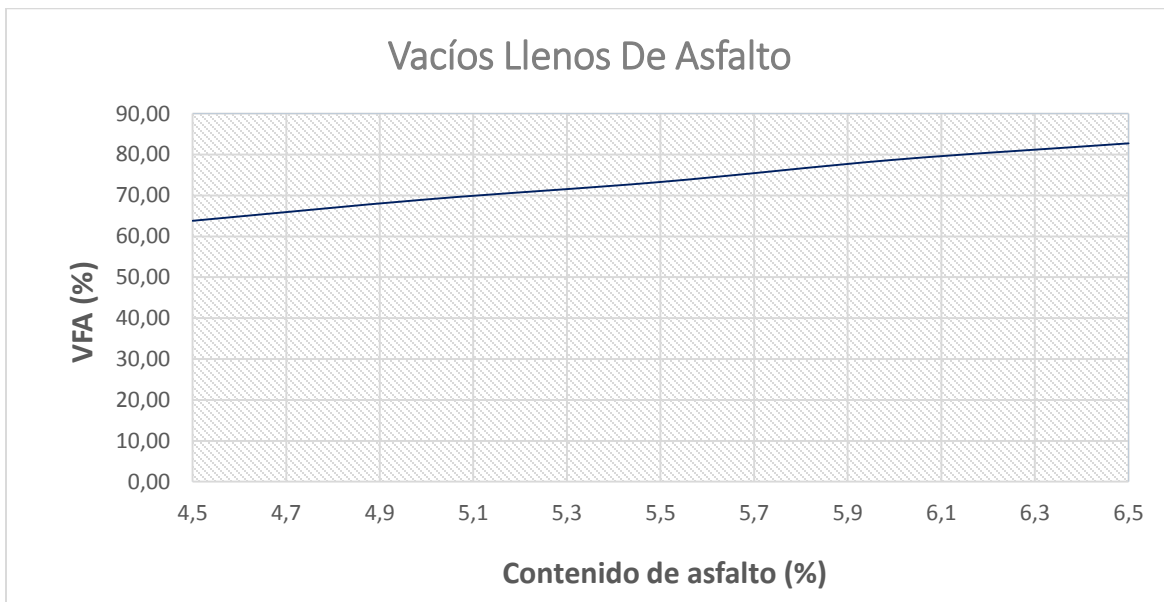
Ilustración 9. Vacíos en agregados. Fuente: elaboración propia



Se cumple con la recomendación de mínimo 15% de vacíos, es decir, que los espacios intergranulares entre las partículas es adecuado.

## 7.6 VACÍOS LLENOS DE ASFALTO

Ilustración 10. Vacíos llenos de asfalto. Fuente: elaboración propia



Se cumple con el parámetro recomendado en el artículo 450-13, se establece que el VFA deberá estar entre (65 a 75)%.

## 8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 8.1 CONCLUSIONES

Los valores obtenidos de estabilidad en ninguno de los casos cumplió con lo establecido por la norma INVIAS, el resultado más cercano fue el de las briquetas con un contenido de 5,0% de asfalto con una estabilidad de 8755 N, sin embargo para el caso de un nivel de tránsito tres lo recomendado es mínimo 9000 N.

En el caso del parámetro de flujo, el comportamiento de los especímenes es con tendencia a presentar deformaciones altas, ya que, no está dentro del rango de valores (2,0-3,5) mm, definidos en el artículo 450-13 del INVIAS, conviene subrayar que, las briquetas con 5,0% de ligante asfáltico presentan en promedio un 3,8 mm.

Con respecto a la caracterización del agregado artificial, algunos de los ensayos no cumplen con lo dispuesto en la norma, es el caso del resultado del desgaste en la máquina de los ángeles, que dio un valor cercano al 30,63% siendo el ideal menor que 25%. Para mejorar dicho aspecto una solución conveniente sería la de en el diseño de mezcla no utilizar el 100% de RCD, sino que, variar el porcentaje y combinarlo con cierta cantidad de agregado natural.

El ajuste necesario de la granulometría del material se debió realizar, a causa de, los valores de porcentaje que pasa no se localizan dentro de las franjas de límite superior e inferior de la recomendación de la tabla 450-6 del artículo INVIAS consultado. Entre los puntos críticos está el del porcentaje que pasa del tamiz No. 4, normalmente es del orden de entre 40% a 65%, la muestra arrojó un 80,63% lo que resulta de partículas con tamaños menores en esta fracción en particular.

Sí bien es cierto que la viabilidad de la implementación de RCD en la elaboración de pavimentos asfálticos, se basaba en el adecuado comportamiento de la resistencia mecánica (estabilidad/flujo); no se desestima el uso de este material en vías con niveles de tránsito menores, en particular de un NT2, si se compara los aspectos de resistencia con lo fijado en la tabla 450-10, se cumple ampliamente.

## **8.2 RECOMENDACIONES**

Se propone seguir investigando en esta línea de sostenibilidad y que procura la protección de los medios naturales, diseñando mezclas no con 100% de RCD, en cambio, variando en diferentes proporciones en combinación con agregado natural. Para el proceso de ajuste granulométrico se podrá emplear materiales granulares de origen natural que aporten a la resistencia y disminuyan el efecto del desgaste por fricción.

No se desestima el uso de RCD para vías con menores índices de tránsito, sin embargo, si se deben tomar acciones para mejorar algunas de sus propiedades físicas y mecánicas que de no implementarse podrían afectar la durabilidad del pavimento.

Durante la etapa de ejecución de ensayos y compactación de briquetas, el cuidado y los por menores son fundamentales, en especial cuando se trabaja con materiales de origen bituminoso, y que tienden a ser muy susceptibles a los cambios de temperatura, pues de no regularse este aspecto los resultados pueden presentar importantes variaciones.

## BIBLIOGRAFÍA

CARDONA BARONA, Rafael. Caracterización de un Agregado Reciclado de Concreto (ARC) Para la Construcción de la Carpeta Asfáltica de Pavimentos Flexibles. Universidad Pontificia Javeriana. Santiago de Cali, 2016. Internet: [vitela.javerianacali.edu.co/handle/11522/7701](http://vitela.javerianacali.edu.co/handle/11522/7701).

CABALLERO CORRO, Santiago. Diseño Estructural de Carreteras. Instituto de Ingeniería UNAM. México D.F, 1974.

CORONADO, Jorge. Manual Centroamericano Para Diseño de Pavimentos. Agencia De Los Estados Unidos Para El Desarrollo Internacional. Tegucigalpa, 2002.

GARBER, J Nicholas. (2005). Ingeniería de Tránsito y de Carreteras. Ed. Thomson. México D.F

HERNÁNDEZ OLIVARES, Francisco. Materiales de última Generación. Universidad de Alcalá. Madrid, 2005. Internet: [www.omaaragon.org/riesgos/ficheros](http://www.omaaragon.org/riesgos/ficheros).

HUERTAS PASIVE, Leidy. Diseño de Una Mezcla de Asfalto en Caliente MSC-25 Reciclada Modificada con Zeolítica Sintética. Universidad Católica de Colombia. Bogotá, 2014. Internet: [repository.ucatolica.edu.co](http://repository.ucatolica.edu.co).

INFANTE FIGUROA, Ana. Caracterización Físicoquímica y Morfológica de Asfalto Modificados con Material Reciclado. Ingeniería e Investigación. Bogotá, 2008. Internet: [revistas.javeriana.edu.co/index.php/iyu/article](http://revistas.javeriana.edu.co/index.php/iyu/article).

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Mezclas Asfálticas en Caliente de Gradación Continua. Artículo 450-13.

MONTEJO FONSECA, Alfonso. Ingeniería de Pavimentos para Carreteras. Segunda edición, Universidad Católica de Colombia. Bogotá, 2002.

Quiñones, F. Aplicabilidade De Resíduos Reciclados Da Construção E Demolição Como Agregados Em Misturas Asfálticas. Universidad de Brasilia. Brasilia, 2014.

R. MISLE y L. LASSO, “Evaluación Técnica, Económica e Institucional de la Gestión de Residuos de Construcción y Demolición en la Ciudad de Bogotá”. Bogotá, Octubre de 2012, 8p – 62p. Trabajo de investigación (Magister en ingeniería civil). Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería.

WRIGHT, Paul. (2011). Ingeniería de Carreteras. Ed. Limusa Wiley. México D.F

VÁQUEZ VARELA, Luis Ricardo. Método Marshall Para El Diseño De Mezclas Asfálticas En Caliente. Universidad Nacional de Colombia. Manizales, 2016.

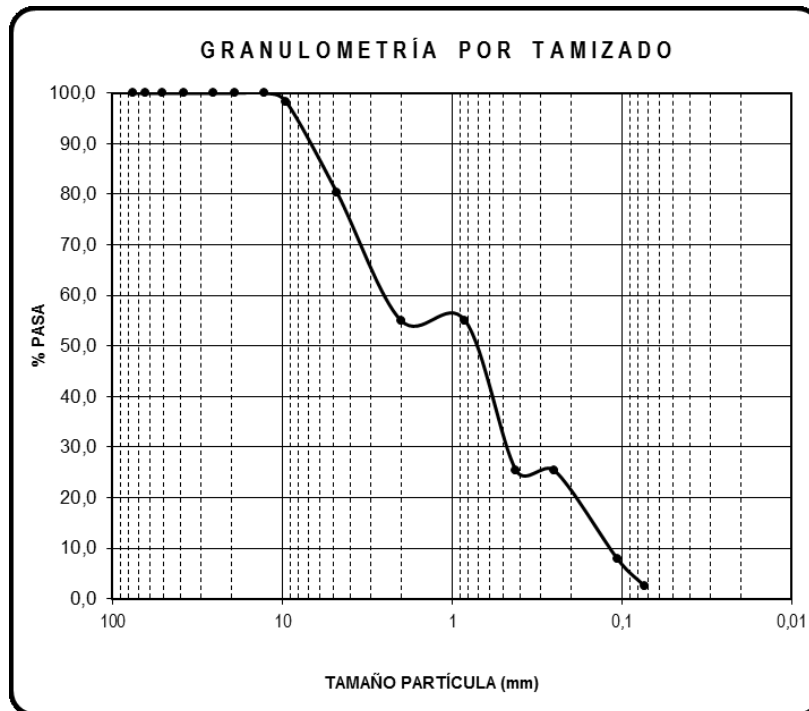
# **ANEXOS**



Tabla 17. Datos del ensayo de granulometría en arena. (Fuente: elaboración propia)

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO ASTM D 422-63-07 / INV E 123-07				
PTS=	2.000,0	PTSL=	2.000,00	
Tamiz	P Retenido	% Retenido	% Ret Acum	% Pasa
3"		0,0	0,0	100,0
2 ½"		0,0	0,0	100,0
2"		0,0	0,0	100,0
1 ½"		0,0	0,0	100,0
1"	0,00	0,0	0,0	100,0
¾"	0,00	0,0	0,0	100,0
½"	0,00	0,0	0,0	100,0
3/8"	33,00	1,7	1,7	98,4
Nº 4	361,00	18,1	19,7	80,3
Nº 10	505,00	25,3	45,0	55,1
Nº 20		0,0	45,0	55,1
Nº 40	593,00	29,7	74,6	25,4
Nº 60		0,0	74,6	25,4
Nº 80	351,20	17,6	92,2	7,8
Nº 200	104,80	5,2	97,4	2,6
FONDO	52,00	2,6	100,0	0,0
TOTAL	2.000,00	100,0		

Ilustración 11. Granulometría en arena. Fuente: elaboración propia



0,0	GRAVA GRUESA
19,7	GRAVA FINA
25,3	ARENA GRUESA
29,7	ARENA MEDIA
22,8	ARENA FINA
Grava (%)	20
Arena (%)	77
Finos (%)	3
Total (%)	100

Clasificación AASHTO A-1-b : Fragmentos de roca grava y arena.

Clasificación S.U.C.S SP: Arena mal gradada con grava.

Módulo de finura: 3.52 indica que es una arena muy gruesa.

Determinacion de Masas Unitarias ( Agregado Fino Y Grueso )

**EQUIPO UTILIZADO**

Balanza	Balanza o Bascula con precision dentro 0.1%
Molde	Recipiente metalico cilindrico
varilla	varilla de acero lisa



**DESARROLLO DEL LABORATORIO**

Procedimiento: Se llena una tercera parte del molde, se apisona la capa uniformemente con una varilla de apisonamiento. Luego se completan las dos terceras partes del molde, se nivela y se apisona nuevamente. Este procedimiento se realiza 3 veces, registrando su peso.



**RESULTADOS**

**AGREGADO FINO**

Masa Unitaria Suelta = 1540 kg /m<sup>3</sup>  
 Masa Unitaria Apisonada = 1660 kg /m<sup>3</sup>  
 Humedad = 5,49 %

**AGREGADO GRUESO**

Masa Unitaria Suelta = 1270 kg /m<sup>3</sup>  
 Masa Unitaria Apisonada = 1370 kg cm<sup>3</sup>  
 Humedad = 4,05 %

Resistencia al desgaste de los agregados por medio de la maquina de los Angeles

EQUIPO UTILIZADO

Balanza	Balanza o Bascula con precision dentro 0,1%
Horno	Capaz de matener una temperatura uniforme de 110 grados Centigrados
Maquina de los Angeles	Cilindro hueco de acero
Carga Abrasiva	Esferas de acero de un diametro aproximado de 46.8mm y una masa comprendida entre 390g y 445 g.



DESARROLLO DEL LABORATORIO

Para el desarrollo del laboratorio se tomo la muestra de acuerdo a la norma I.N.V.E - 218 - 13

Se eligio la gradacion mas parecida al agregado que se va a usar en el proyecto. Gradacion B.



Masa (g)	Pasa Tamiz (mm)	Retenido Tamiz (mm)
2500	19	12,5
2500	12,5	9,5

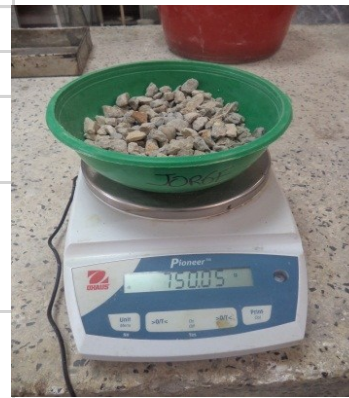
RESULTADOS

Porcentaje de Desgaste = 30,63 %

Determinacion de la resistencia del agregado grueso al desgaste por abrasion utilizando el aparato Micro-Deval

EQUIPO UTILIZADO

Balanza	Balanza o Bascula con precision dentro 0.1%
Horno	Capaz de matener una temperatura uniforme de 110 grados Centigrados
Aparato Micro-Deval	Se compondra de uno a cuatro cilindros huecos, con capacidad para 5 litros.
Carga Abrasiva	46.8mm y una masa comprendida entre 390g y 445 g.



DESARROLLO DEL LABORATORIO

La muestra del ensayo consistira en un material pasante del tamiz de 19mm y retenido en el tamiz de 9,5mm.

Tabla 1. preparacion de la muestra seca al horno (I.N.V.E - 238 )

Masa (g)	Pasa Tamiz (mm)	Retenido Tamiz (mm)
375	19,1	16
375	16	12,5
750	12,5	9,5



RESULTADOS

Porcentaje de Perdida = 16,84 %

Valor de azul de metileno en agregados finos y en llenantes minerales

EQUIPO UTILIZADO

Balanza	De 200g de capacidad y 0.001g de sensibilidad
bureta	de color ambar de por lo menos 50ml
varilla	varilla de vidrio
papel	papel filtro whatman N.2
Azul de metileno	De grado reactivo, fechado y almacenado adecuadamente
Agua	Agua Destilada



DESARROLLO DEL LABORATORIO

Preparacion de la solucion : se agregaron 5 g de azul de metileno por cada Litro de agua destilada

procedimiento : se realizan adiciones a la muestra de 0,5 g de solucion de azul de metileno hasta obtener el resultado del ensayo



RESULTADOS

VA = 3,25 Mg / g ( se realizaron 13 adiciones de solucion de azul de metileno a la muestra )

## Gravedad Especifica y Absorcion de agregados gruesos

### EQUIPO UTILIZADO

Balanza	Balanza o Bascula con precision dentro 0,1%
tanque de agua	tanque que permita que la muestra quede totalmente sumergida
tamices	serie de tamices
canastilla	canastilla metalica
Dispositivo de suspension	Dispositivo que permita suspender la canastilla de la balanza, una vez sumergida



### DESARROLLO DEL LABORATORIO

Procedimiento: De acuerdo al tamaño máximo Nominal del material obtenemos la cantidad para realizar el ensayo

El material a utilizar en el proyecto tiene un tamaño máximo Nominal de 25mm por lo que de acuerdo a la tabla 1. I.N.V.E - 223 - 13, la cantidad para este ensayo es de 4 Kg.



### RESULTADOS

Gravedad Especifica Bulk	✓	2,17		
Gravedad Especifica Bulk sss	✓	2,31		
Gravedad Especifica Aparente	✓	2,53		
Absorcion		6,56%		

Metodo para determinar la densidad y la absorcion del agregado fino

EQUIPO UTILIZADO

Balanza	Balanza o Bascula con precision dentro 0,1%
picnometro	un frasco u otro recipiente adecuado del cual se pueda introducir facilmente la muestra
tamices	serie de tamices
pison	pison metalico con masa de 340 g
Molde	molde metalico en forma de tronco conico.



DESARROLLO DEL LABORATORIO

Procedimiento : Material se deja en inmersión, a continuación se realiza un secado al material y se toman 250 g , Se llena parcialmente el picnometro con agua, a continuación se introduce el agregado fino, llevamos material al horno, se registran los pesos, realizamos los calculo respectivos.



RESULTADOS

	Peso Especifico Nominal	2,54	
	Absorcion	6,24%	



Porcentaje de caras fracturadas en los agregados

EQUIPO UTILIZADO

Balanza	Balanza o Bascula con precision dentro del 0.1 %
espatula	para ayudar a separar los agregados
tamices	serie de tamices



DESARROLLO DEL LABORATORIO

Procedimiento: Se tamiza el material sobre el tamiz 4.75mm, luego reducimos la muestra en ese tamiz por cuarteo.

De acuerdo al tamaño Maximo Nominal del material tomamos la cantidad de material para la realizacion del ensayo, el material tiene un TMN 25mm por lo que tomamos una muestra de 3000g.



RESULTADOS

Porcentaje de caras fracturadas = 94,04 %

Sanidad de los agregados frente a la acción de las soluciones de sulfato de sodio o de magnesio.

EQUIPO UTILIZADO

Balanza	Balanza o Bascula con precision dentro del 0.1 %
Recipientes para muestras	Recipientes para sumergir las muestras de los agregados en la solución.
tamices	serie de tamices
Horno	Capaz de mantener una temperatura uniforme de 110 grados Centigrados
solucion de sulfato de sodio	la solución saturada de sulfato de sodio, se prepara disolviendo la cantidad necesaria de sal en agua.



DESARROLLO DEL LABORATORIO

Se preparo una solución de sulfato de sodio para sumergir las muestras

Agregado grueso: se realizo tamizado y se elimino el material inferiores al tamiz de 4,75m. La muestra para el ensayo de agregado grueso se tomo teniendo como referencia la tabla 1. I.N.V.E -220 - 13, Se utilizaron 1880g

Agregado Fino: La muestra del agregado fino debe pasar por el tamiz de 9,5mm. Para el ensayo se utilizaron 500g de material fino como se indica en la Norma I.N.V.E - 220 -13



RESULTADOS

	Agregado Grueso	35,33 %	cinco ciclos
	Agregado Fino	27,5 %	cinco ciclos

Metodo para determinar particulas planas, alargadas o planas y alargadas en los agregados gruesos

EQUIPO UTILIZADO

Balanza	Balanza o Bascula con precision dentro del 0.1 %
dispositivo de calibracion	Placa de base, con dos postes fijos y un brazo movil montado entre los postes de tal forma que las aberturas entre el brazo y los postes mantienen una relacion constante.
tamices	serie de tamices



DESARROLLO DEL LABORATORIO

Se prueban una a una las particulas de cada fraccion



RESULTADOS

	indice de alargamiento global	9,32%
	indice de aplanamiento global	9,89%

Tabla 15. Resultados del ensayo de penetración en materiales asfálticos, fuente: elaboración propia

	Unidad	Norma de ensayo	Min	Máx	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
<b>Penetración (25°C, 100g, 5seg)</b>	0.1 mm	E-706	80	100	93	95	97
<b>Promedio de las tres lecturas</b>			95				

Ilustración 13. Ejecución ensayo de penetración, fuente: elaboración propia

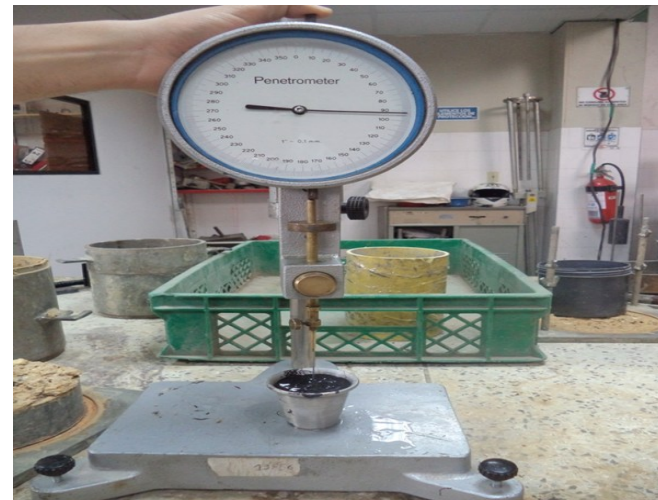


Tabla 16. Resultados del ensayo de punto de ablandamiento, fuente elaboración propia

	<b>Unidad</b>	<b>Norma de ensayo INV</b>	<b>Min</b>	<b>Máx</b>	<b>Resultado ensayo</b>
<b>Punto de ablandamiento con aparato de anillo y bola</b>	°C	E-712	45	52	48

Ilustración 14. Vertimiento de asfalto en molde y montaje del equipo, fuente elaboración propia



Ilustración 17. Ejecución de ensayo, medición de la temperatura al instante de caída de las esferas, fuente: elaboración propia

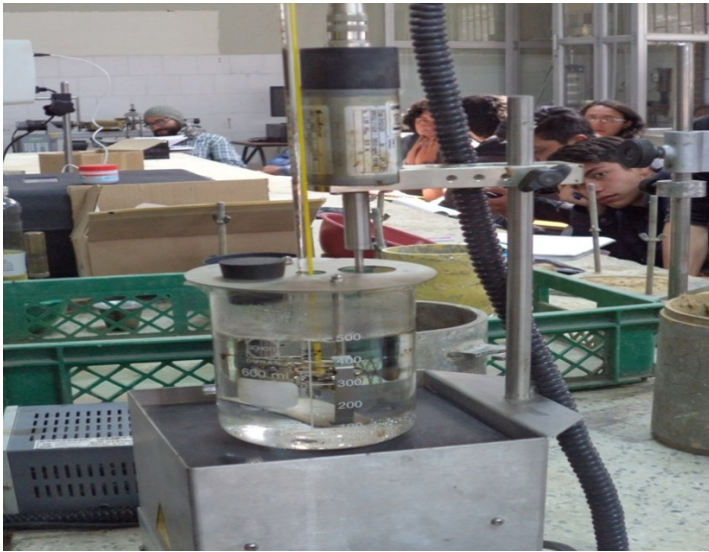




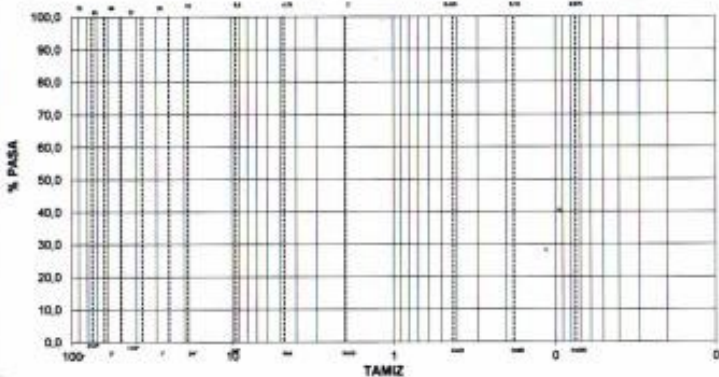
Ilustración 18. Resultados Estabilidad y Flujo. Laboratorio Echeverry E.I.E

		<b>Laboratorio de Control de Calidad</b> Cra. 29C No. 71A 30 Teléfonos: 2255814 - 6304515 - 2315808		<b>CALIDAD QUE GENERA CONFIANZA</b>																	
<b>TÍTULO</b> INFORME DE ENSAYO: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO, CONTENIDO DE ASFALTO, DENSIDAD, ESTABILIDAD Y FLUJO DE MEZCLA ASFÁLTICA																					
Norma: INV E - 732, 733, 748 y 782 - 13				Control de Documentos: EIE-F-03-30		Revisión No. 8 Fecha de Edición: 17/01/16															
<b>Compañía</b> ING. RICARDO CASTRO VANEGAS						<b>INFORME 017/ 0022</b>															
<b>Obra</b> Aprovechamiento de los residuos de construcción y demolición para ser utilizados como agregados en el diseño de mezclas asfálticas						<b>O. T / Muestra No.</b> 15046/ 5194															
<b>Material</b> Concreto asfáltico tipo MDC-19						<b>Fecha de Entrada</b> 2017-01-11															
<b>Procedencia</b> No suministrada						<b>Fecha de Ensayo</b> 2017-01-12/ 18															
Peso Específico agregados: (Gag) = _____                      Peso Específico Asfalto: (Gas) = _____                      Peso Específico del agua a 25 °C: 997 kg/m <sup>3</sup> Temperatura de Compactación: 138°C                      Golpes por Capa: 75                      Temperatura Ensayo Estabilidad - Flujo: 80°C																					
Brigada No.	Contenido de Asfalto	Espesor Propuesto	Espesor Realizado	MASA MUESTRA			Agua absorbida	DENSIDAD			VOLUMEN TOTAL			ESTABILIDAD		*FLUJO					
				Saca en Agua	S.S.G.	Sumergida en agua		Granulometría Sub	Densidad 25 °C	Módulo Tefelón	Módulo Medido	Asfalto Absorbido	Agregados	Vaciado con aire	Asfalto		Vaciado en Agregados Minerales	Asfalto Efectivo	Vaciado libre de asfalto	Medida	Consigna
%	mm	mm	mm	g	g	g	%	kg/m <sup>3</sup>	g x 997,0	g	Grav	%	%	%	%	%	%	kg	kg	H	mm
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v
1	4,5	75,50	0,77	1162,2	1163,7	555,1	0,3	1,909	1904									989	700	7456	3,8
2	4,5	70,97	0,84	1106,2	1109,1	547,6	0,5	1,870	1964									1360	1140	11190	3,2
3	4,5	76,32	0,76	1180,7	1181,5	563,7	0,1	1,911	1905									1026	778	7630	3,8
								1,830	1924									893	6760		3,8

\* Los valores de Flujo Marshall fueron determinados aplicando el método del Pico de la curva Deformación - Carga - INV E - 748

MALLA	GRANULOMETRÍA				PORCENTAJE DE ASFALTO	RELACION ESTABILIDAD - FLUJO
	MASA INICIAL (g)	MASA FINAL (g)	MRI (g)	% RET		
1"					Método A	
3/4"					M <sub>1</sub>	RELACION LLEANTE - LIGANTE EFECTIVO
1/2"					M <sub>2</sub>	
3/8"					Masa Fines	
No. 4					Masa Med	
10					Masa Gravel	INDICE DE PELICULA DE ASFALTO
40					Volumen total de extracto	
80					Volumen fracción de ensayo	
200					Masa capote	
100%*					Masa capote + cement	
					% Asfalto	

----- Especificación  
 ..... Fórmula de trabajo  
 - - - - - Gradación Muestra ensayada



OBSERVACIONES: \* Briquetas compactadas por la compañía contratante.  
 \* Briquetas parafinadas - La Briqueta No. 2 está desportillada

FECHA DE EMISIÓN DE INFORME	REVISO	APROBO
2017-01-18	ING. JAVIER MÉNDEZ	ING. GERARDO BRAVO PLATA

<b>TÍTULO</b>	<b>INFORME DE ENSAYO: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO, CONTENIDO DE ASFALTO, DENSIDAD, ESTABILIDAD Y FLUJO DE MEZCLA ASFÁLTICA</b>		
	Norma	Control de Documentos	Revisión No. 8
	INV. E - 732, 733, 748 y 782 - 13	EIE-F-03-30	Fecha de Edición: 17/01/16

<b>Compañía</b>	ING. RICARDO CASTRO VANEGAS	<b>INFORME 017/ 0022</b>
<b>Obra</b>	Aprovechamiento de los residuos de construcción y demolición para ser utilizados como agregados en el diseño de mezclas asfálticas	<b>O. T / Muestra No.</b> 15045/ 5194
<b>Material</b>	Concreto asfáltico tipo MDC-19	<b>Fecha de Entrada</b> 2017-01-11
<b>Procedencia</b>	No suministrada	<b>Fecha de Ensayo</b> 2017-01-12/ 16

Empaque No.	Contenido de Envase	Espesor (mm)	Fuerza (kg/cm²)	Peso Específico Agregados: Gag =			Peso Específico Asfalto: Gas =			Peso Específico del agua a 25 °C	Temperatura de Compactación	Golpes por Cara	Temperatura Ensayo Estabilidad - Paja	*FLUJO							
				MASA MUESTRA			DENSIDAD			Asfalto Absorbido	VOLUMEN TOTAL				ESTABILIDAD						
				Beca en Aire	S.S.S.	Sumergido en agua	Gravedad específica sub	Densidad 25 °C	Módulo Teórico		Módulo Medido	Agregados	Vaciado con aire		Asfalto	Vaciado en Agregados Minerales	Asfalto Estudido	Vaciado Seco de asfalto	Medida	Concisa	
%	mm	g	g	g	%	kg/m³	g/cm³	g/cm³	g/cm³	%	%	%	%	%	kg	kg	N	mm			
a	b	c	d	e	f	g	$\frac{d}{e-f}$	$\frac{d}{g-897.0}$	Gh	Gram	$\frac{g-10^2}{h(100-g)}$	$\frac{(100-k)g}{G+Ag}$	(1-g)(1*100)	100-l+k	100-k	1-g(100-k/100)	r	s	t	u	
1	5,5	77,10	0,75	1118,9	1122,1	525,0	0,4	1,875	1670									369	275	2710	4,0
2	5,0	78,90	0,75	1120,3	1121,9	534,8	0,3	1,906	1902									577	434	4252	4,1
3	5,0	74,53	0,78	1139,3	1142,5	546,8	0,5	1,912	1906									1036	813	7976	4,3
								1,898	1693									588	4560		4,1

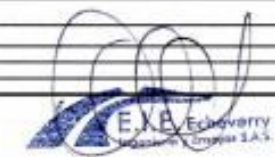
\* Los valores de flujo Marshall fueron determinados aplicando el método del Pico de la curva Deformación - Carga - INV E - 748

MALLA	GRANULOMETRÍA				PORCENTAJE DE ASFALTO	RELACION ESTABILIDAD - FLUJO
	MASA INICIAL (g)	MASA FINAL (g)	MBF (g)	% PASA		
1"					Método A	RELACION LLENANTE - LIGANTE EFECTIVO
3/4"						
1/2"					ÍNDICE DE PELICULA DE ASFALTO	
3/8"						
No. 4					Masa capote + canchales	% Asfalto
10						
40						
80						
200						
FD-PH						

**ESPECIFICACIONES:**  
 - - - - - Especificación  
 - - - - - Fórmula de trabajo  
 - - - - - Gradación Muestra ensayada

**OBSERVACIONES:**  
 \* Briquetas compactadas por la compañía contratante.  
 \* Briquetas parafinadas - Las Briquetas No. 1 y 2 están desportilladas

<b>FECHA DE EMISION DE INFORME</b>	<b>REVISO</b>	<b>APROBO</b>
2017-01-18	ING. JAVIER MÉNDEZ	ING. GERARDO BRAVO PLATA







# Laboratorio de Control de Calidad

Cra. 29C No. 71A 30  
Teléfonos: 2255814 - 6304515 - 2315608

**CALIDAD QUE  
GENERA CONFIANZA**



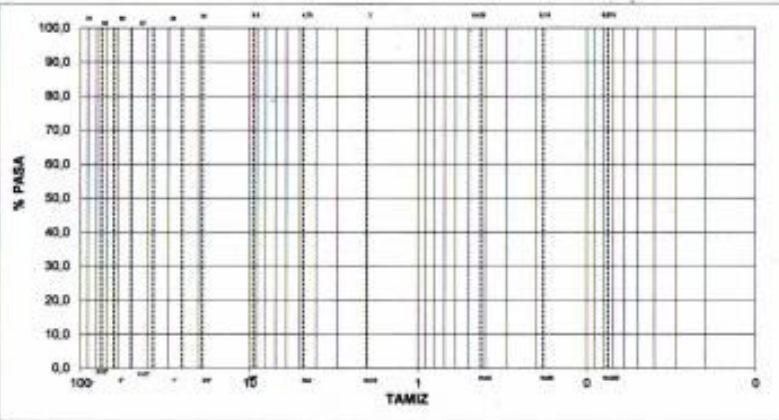
<b>TÍTULO</b>	<b>INFORME DE ENSAYO: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO, CONTENIDO DE ASFALTO, DENSIDAD, ESTABILIDAD Y FLUJO DE MEZCLA ASFÁLTICA</b>		
	Norma	Control de Documentos	Revisión No. 8
	INV. E - 732, 733, 748 y 782 - 13	EIE-F-03-30	Fecha de Edición: 17/01/18

<b>Compañía</b>	ING. RICARDO CASTRO VANEGAS	<b>INFORME 017/ 0022</b>	
<b>Obra</b>	Aprovechamiento de los residuos de construcción y demolición para ser utilizados como agregados en el diseño de mezclas asfálticas	<b>O. T / Muestra No.</b>	15046/ 5194
<b>Material</b>	Concreto asfáltico tipo MDC-19	<b>Fecha de Entrada</b>	2017-01-11
<b>Procedencia</b>	No suministrada	<b>Fecha de Ensayo</b>	2017-01-12/ 18

No. de Ensayo	Espesor de la Muestra (mm)	Temperatura de Ensayo (°C)	Peso Específico Agregado (g/cm³)	MASA MUESTRA			Agua Absorbida (%)	DENSIDAD				Asfalto Absorbido (%)	VOLUMEN TOTAL				ESTABILIDAD			*FLUJO						
				Peso Específico de agua = 1.000 g/cm³				Peso Específico de Asfalto = 1.400 g/cm³			Peso Específico del agua a 25 °C = 997 kg/m³				Temperatura de Compactación = 135°C				Golpes por Cara = 75			Temperatura Ensayo Estabilidad - Flujo = 60°C				
				Bolsa en Aire (g)	S.S.S. (g)	Escurecida en agua (g)		Densidad específica total (g/cm³)	Densidad 25 °C (g/cm³)	Método Teórico (g/cm³)	Método Medido (g/cm³)		Agregados (%)	Vació con aire (%)	Asfalto (%)	Vació en Agregados Minerales (%)	Asfalto Efectivo (%)	Vació libre de asfalto (%)	Medida (kg)		Corregida (kg)	N (mm)				
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	r	s	t	u							
1	5.5	73.50	0.80	1121.3	1123.4	548.5	0.4	1.944	1938							1213	972	9527	4.7							
2	5.5	76.45	0.76	1139.0	1140.9	549.0	0.3	1.925	1919							1015	768	7531	4.5							
3	5.5	75.06	0.77	1136.7	1139.5	548.5	0.4	1.899	1893							785	608	5922	4.5							
								1.922	1917							782	7073		4.4							

\* Los valores de Flujo Marshall fueron determinados aplicando el método del Pico de la curva Deformación - Carga - INV E - 748

MALLA	GRANULOMETRÍA				PORCENTAJE DE ASFALTO	RELACION ESTABILIDAD - FLUJO
	MASA INICIAL (g)	MASA FINAL (g)	RELACION LLENANTE - LIGANTE EFECTIVO	INDICE DE PELICULA DE ASFALTO		
1"					Método A	
3/4"					M <sub>1</sub>	
1/2"					M <sub>2</sub>	
3/8"					M <sub>3</sub>	
No. 4					M <sub>4</sub>	
10					M <sub>5</sub>	
40					M <sub>6</sub>	
80					M <sub>7</sub>	
200					M <sub>8</sub>	
FD-PPL					M <sub>9</sub>	



**OBSERVACIONES:** \* Briquetas compactadas por la compañía contratante.  
\* Briquetas parafinadas - Las Briquetas No. 1 y 3 están desportilladas.

<b>FECHA DE EMISION DE INFORME</b>	<b>REVISO</b>	<b>APROBADO</b>
2017-01-18	ING. JAVIER MÉNDEZ	ING. GERARDO BRAVO PLATA



**TÍTULO** INFORME DE ENSAYO: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO, CONTENIDO DE ASFALTO, DENSIDAD, ESTABILIDAD Y FLUJO DE MEZCLA ASFÁLTICA

Norma: Control de Documentos Revisión No. 8  
INV. E - 732, 733, 748 y 782 - 13 EIE-F-03-30 Fecha de Edición: 17/01/16

**Compañía** ING. RICARDO CASTRO VANE GAS **INFORME 017/ 0022**

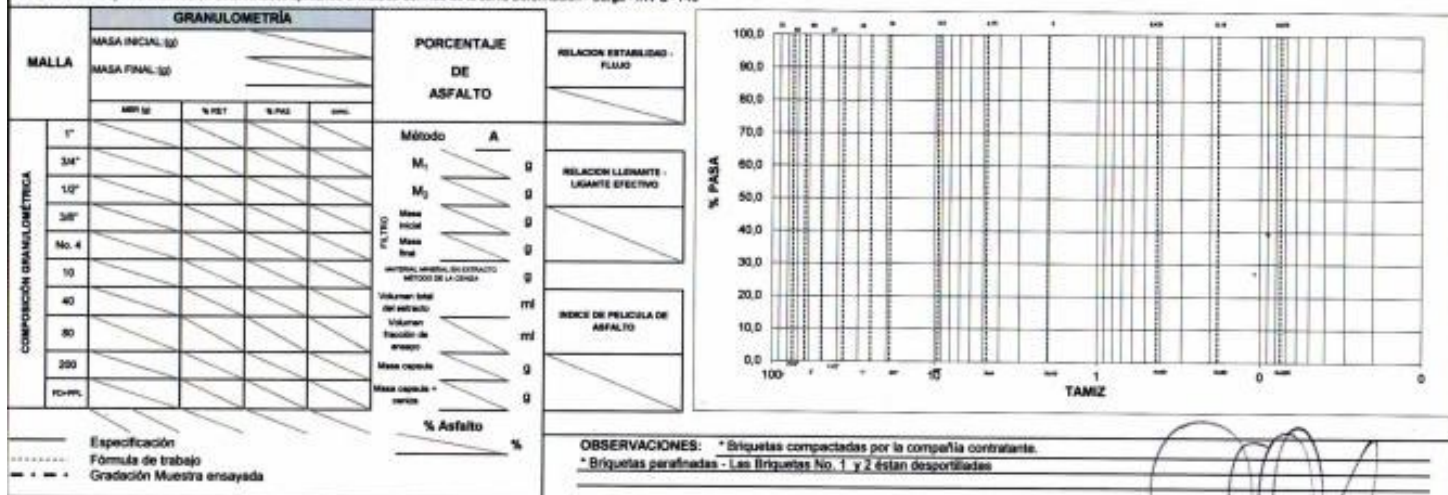
**Obra** Aprovechamiento de los residuos de construcción y demolición para ser utilizados como agregados en el diseño de mezclas asfálticas **O. T / Muestra No.** 10046/ 5194

**Material** Concreto asfáltico tipo MDC-19 **Fecha de Entrada** 2017-01-11

**Procedencia** No suministrada **Fecha de Ensayo** 2017-01-12/ 18

Brigada No.	Contenido de Asfalto	Pico de la curva	Factor de corrección	MASA MUESTRA			Agua absorbida	DENSIDAD				Asfalto Absorbido	VOLUMEN TOTAL			ESTABILIDAD			*FLUJO			
				Seca en Aire	S.S.S.	Sumergida en agua		Gravedad específica bulk	Densidad 25 °C	Método Táctico	Método Medido		Agregados	Vaciés con aire	Asfalto	Vaciés en Agregados Mineros	Asfalto Efectivo	Vaciés finos de asfalto		Medida	Corregida	
				g	g	g		g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>		g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>		g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>
1	75,37	0,77	1161,0	1167,8	558,2	1,1	1,905	1899										811	825	8124	5,2	
2	76,08	0,76	1174,9	1178,8	558,2	0,8	1,893	1887										794	805	8032	5,0	
3	77,58	0,74	1169,9	1178,3	552,6	1,0	1,876	1871										789	886	5747	4,9	
							1,892	1890											805	804	5834	5,0

\* Los valores de flujo Marshall fueron determinados aplicando el método del Pico de la curva Deformación - Carga - INV E - 748



**FECHA DE EMISION DE INFORME** 2017-01-18

**REVISOR** ING. JAVIER MÉNDEZ **INGENIERO TÉCNICO**

**APROBADO** ING. GERARDO BRAVO PLATA **GERENTE TÉCNICO**

**FIRMA Y SELLO**

<b>TÍTULO</b>	<b>INFORME DE ENSAYO: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO, CONTENIDO DE ASFALTO, DENSIDAD, ESTABILIDAD Y FLUJO DE MEZCLA ASFÁLTICA</b>		
	Norma	Control de Documentos	Revisión No. 8
	INV. E - 732, 733, 748 y 782 - 13	EIE-F-03-30	Fecha de Edición: 17/01/16

<b>Compañía</b>	ING. RICARDO CASTRO VANEGAS	<b>INFORME 017/ 0022</b>	
<b>Obra</b>	Aprovechamiento de los residuos de construcción y demolición para ser utilizados como agregados en el diseño de mezclas asfálticas	<b>O. T / Muestra No.</b>	15046/ 5194
<b>Material</b>	Concreto asfáltico tipo MDC-19	<b>Fecha de Entrada</b>	2017-01-11
<b>Procedencia</b>	No suministrada	<b>Fecha de Ensayo</b>	2017-01-12/ 18

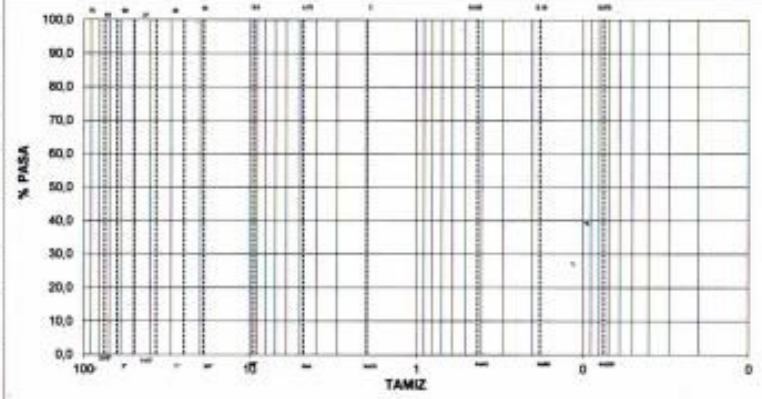
Peso Específico agregados: Gag =		Peso Específico Asfalto Gas =		Peso Específico del agua a 25 °C: 997 kg/m³	Temperatura de Compactación: 135°C	Golpes por Capa: 75	Temperatura Ensayo Estabilidad - Flujo: 60°C																
Temperatura de Ensayo	Contenido de Asfalto	Espesor de Capa	Espesor de Muestra	MASA MUESTRA			Agua absorbida	DENSIDAD				Asfalto Absorbido	VOLUMEN TOTAL			Vacíos en Agregados Minerales	Asfalto Efectivo	Vacíos llenos de asfalto	ESTABILIDAD			*FLUJO	
				Seca en Aire	S.S.S.	Sumergida en agua		Gravimétrico específico sub	Densidad 25 °C	Módulo Teórico	Módulo Medido		Agregados	Vacíos con aire	Asfalto				Medida	Corregida	Medida		
%	mm	mm	mm	g	g	g	%	g/cm³	g/cm³	g/cm³	g/cm³	%	%	%	%	%	%	%	kg	kg	N	mm	
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x
6.5	75.40	0.77	1164.5	1167.6	551.4	0.5	1.800	1094											784	804	5821	5.3	
6.5	78.31	0.76	1167.3	1173.0	564.4	0.9	1.918	1912											807	812	8001	5.6	
6.5	73.99	0.79	1182.4	1188.2	562.7	0.0	1.897	1091											800	834	8213	5.4	
							1.901	1890												818	8045	5.4	

\* Los valores de Flujo Marshall fueron determinados aplicando el método del Pico de la curva Deformación - Carga - INV E - 748

<b>GRANULOMETRÍA</b>					<b>PORCENTAJE DE ASFALTO</b>		<b>RELACION ESTABILIDAD - FLUJO</b>		
<b>MACA</b>	MASA INICIAL (g)		MASA FINAL (g)						
	MBR (g)	% RET	% PAS	mm					
<b>COMPROBACION GRANULOMETRICA</b>	1"				<b>Método A</b>	<b>RELACION LLENANTE - LIQUANTE EFECTIVO</b>			
	3/4"						M <sub>1</sub>		
	1/2"						M <sub>2</sub>		
	3/8"						Masa inicial		
	Nº. 4						Masa final		
	10						Método de cálculo de densidad		
	40						Volumen total del agregado		
	80						Volumen fracción de agregado		
	200						Masa agregada		
	10-100						Masa agregada + asfalto		
				% Asfalto					

..... Especificación  
- - - - - Fórmula de trabajo  
- \* - \* - Gradación Muestra ensayada

**OBSERVACIONES:** \* Briquetas compactadas por la compañía contratante.  
\* Briquetas parafradas



<b>FECHA DE EMISION DE INFORME</b>	<b>REVISO</b>	<b>APROBO</b>	 <b>FRMA Y SELLO</b>
2017-01-18	ING. JAVIER MÉNDEZ	ING. GERARDO BRAVO PLATA	
	INGENIERO TÉCNICO	GERENTE TÉCNICO	

Nota: Este folio no deberá reproducirse parcial o totalmente sin la aprobación por escrito de E.I.E. Echeverry Ingeniería y Ensayos S.A.S.

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Marco Legal o Normativo .....	14
Tabla 2 Proporción de materiales según el porcentaje de asfalto .....	18
Tabla 3 Ensayos aplicados al agregado artificial.....	20
Tabla 4 Ensayos aplicados al asfalto. ....	22
Tabla 5 Franjas granulométricas para mezclas densas .....	24
Tabla 6 Resultados granulometría y franjas recomendadas INV-450-13. ....	25
Tabla 7 Clasificación del RCD .....	26
Tabla 8 Pesos retenidos de la granulometría ajustada .....	27
Tabla 9 Evaluación de las propiedades físicas.....	30
Tabla 10 Resultados y evaluación de parámetros.....	32
Tabla 11 Valores obtenidos del Nomograma .....	34
Tabla 12 Resultados y clasificación .....	34
Tabla 13 Contenido de asfalto.....	36
Tabla 14 Densidades Bulk.....	37
Tabla 15 Resultados de estabilidad. ....	37
Tabla 16 Resultados de flujo .....	38
<u>Tabla 17</u> Datos del ensayo de granulometría en arena.....	49

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Curva granulométrica.....	26
Ilustración 2 Curva granulométrica ajustada .....	28
Ilustración 3 Nomograma de Heukelom .....	33
Ilustración 4 Curva Reológica.....	34
Ilustración 5 Estabilidad de la mezcla. ....	39
Ilustración 6 Flujo de la mezcla. ....	40
Ilustración 7 Estabilidad-Flujo de la mezcla .....	41
Ilustración 8 Porcentaje de vacíos.....	42
Ilustración 9 Vacíos en agregados .....	43
Ilustración 10 Vacíos llenos de asfalto .....	44
Ilustración 11 Granulometría en arena .....	49