

**APROVECHAMIENTO DE ARENAS IMPREGNADAS POR DERIVADOS DEL
CRUDO EN LA PREPARACION DE MEZCLAS DENSAS EN CALIENTE
MDC-2**

YESSICA GOMEZ LOPEZ

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
2015**

**APROVECHAMIENTO DE ARENAS IMPREGNADAS POR DERIVADOS DEL
CRUDO EN LA PREPARACION DE MEZCLAS DENSAS EN CALIENTE
MDC-2**

YESSICA GOMEZ LOPEZ

Proyecto de grado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil

Director (a):

MARIA FERNANDA SERRANO GÚZMAN

PhD. Ingeniería Civil

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

2015

NOTA DE ACEPTACION

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Bucaramanga, Julio de 2015

DEDICATORIA

Este logro es gracias a Dios primeramente, y a todos aquellos que me apoyaron y colaboraron para que este fuera posible, que me animaron cuando sentí que ya no tenía fuerzas para continuar, y confiaron en que llegaría a la meta, sobre todo aquellas personas que son mis pilares y siempre me han llevado en sus oraciones.

Yessica Gomez Lopez

AGRADECIMIENTOS

A la universidad Pontificia Bolivariana, por brindarme una educación integral, con excelencia y sentido humano, llenándome de capacidades para emprender esta vida profesional que estoy por comenzar.

A mi mamá y a mi abuela, quienes siempre estuvieron pendientes de cada paso que di, las veces que caí y por extender los brazos para animarme a continuar. Gracias por tanto amor y por toda la confianza y fe depositada en mí.

A mi directora de proyecto, Dra. María Fernanda Serrano Guzmán, quien me atendió cada inquietud y aclaró toda duda que se presentaba durante este proceso. Gracias por dedicarme tiempo, tenerme paciencia y sobretodo apoyarme y darme soluciones cuando las cosas no querían salir bien.

A mi amiga Diana Montero González, por acompañarme y ayudarme en el laboratorio, sabiendo que no sería un trabajo fácil, se arriesgó, y llegó conmigo hasta el final, sin esperar nada a cambio.

A la ingeniera Julieth Delgado Garnica, quien también fue una guía, su colaboración en este proceso fue fundamental, gracias por aportarme sus conocimientos.

Al personal del laboratorio, el señor Vicente Páez y Ramiro Díaz, quienes me guiaron en la elaboración de procedimientos y ensayos, gracias por cada una de las soluciones que me dieron para hacer las cosas más rápida y eficientemente.

TABLA DE CONTENIDO

	PAG
INTRODUCCION	13
1. GENERALIDADES	14
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.2 JUSTIFICACION	15
1.3 OBJETIVOS	16
1.3.1 Objetivo General	16
1.3.2 Objetivos Específicos	16
1.4 Relevancia del tema	16
2. MARCO DE REFERENCIA	17
2.1 Tipos de pavimentos	17
2.1.1 Pavimentos flexibles	17
2.1.2 Pavimento Rígido	17
2.1.3 Pavimento Semi-Rigido	17
2.2 Mezcla Asfáltica	18
2.2.1 Características de la mezcla asfáltica	18
2.3 Mezclas Densas En Caliente	19
2.3.1 Mezclas MDC-1, MDC-2, MDC-3	20
2.4 Agregados Pétreos	20
2.5 Asfalto	21
2.6 Arenas Impregnadas Por Derivados Del Crudo	21
2.7 Estudios Previos Sobre Mezclas Asfálticos Modificadas	21
3. METODOLOGIA	22
3.1 Materiales Empleados	23
3.1.1 Ensayos a los materiales granulares	23
3.1.2 Ensayos al material contaminado	27
3.1.3 Asfalto	28
3.2 Briquetas Realizadas Según Diseño Marshall	29
3.2.1 Dosificación de los agregados	30
3.2.2 Procedimiento para el diseño de briquetas	31
3.2.3 Procedimiento para la elaboración de panelas	32
3.2.4 Pruebas mecánicas para la verificación, comportamiento de mezclas asfálticas	32
4. RESULTADOS	35
4.1 Caracterización de los materiales	35
4.1.1 Granulometría de agregado grueso y fino	35
4.1.2 Gravedad específica y adsorción de los agregados	36
4.1.3 Índices de aplanamiento y alargamiento	38
4.1.4 Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado	38
4.1.5 Equivalente de arena	38

4.2	Caracterización de las arenas contaminadas	39
4.2.1	Análisis granulométrico de los agregados	39
4.2.2	Determinación del contenido orgánico	40
4.2.3	Determinación de los tamaños de las partículas	41
4.3	Caracterización del asfalto	41
4.4	Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente	42
5.	ANALISIS DE RESULTADOS	43
5.1	Caracterización del material granular	43
5.2	Caracterización de las arenas contaminadas	44
5.3	Caracterización del asfalto	45
5.4	Prueba Marshall	45
5.5	Identificación mejor mezcla modificada	51
6.	Conclusiones	52
7.	Recomendaciones	54
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	55
	ANEXOS	56
	RESGISTRO FOTOGRAFICO	67

LISTA DE FIGURAS

	PAG
Figura 1. Metodología	24
Figura 2. Curva granulométrica del agregado grueso	36
Figura 3. Curva granulométrica del agregado fino	37
Figura 4. Curva granulométrica de arenas contaminadas, lavado normal	40
Figura 5. Curva granulométrica de arenas contaminadas, lavadas con detergente.	40
Figura 6. Flujo Vs mezclas testigo y con la arena contaminada	40
Figura 7. Estabilidad Vs Mezclas testigo y combinaciones con arena contaminada	47
Figura 8. Gravedad específica de Bulk Vs Combinaciones	48
Figura 9. Peso Unitario Vs Combinaciones	49
Figura 10. % vacíos agregado mineral Vs combinaciones	49
Figura 11. %Vacíos Llenos Vs Combinaciones	50
Figura 12. % de vacíos mezcla total Vs combinaciones	50
Figura 13. Estabilidad/Flujo Vs Combinaciones	51

LISTA DE TABLAS

	PAG
Tabla 1. Porcentajes de asfalto y variación en el porcentaje de agregados	31
Tabla 2. Dosificación de agregados para cada porcentaje de asfalto, por briqueta	31
Tabla 3. Dosificación de agregados para cada porcentaje de asfalto, por panela	32
Tabla 4. Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente	32
Tabla 5. Gravedad específica y absorción del agregado grueso	38
Tabla 6. Gravedad específica y absorción del agregado fino	38
Tabla 7. Índices de aplanamiento y alargamiento del agregado grueso	39
Tabla 8. Porcentaje de caras fracturadas, agregado grueso	39
Tabla 9. Ensayo equivalente de arena	39
Tabla 10. Porcentaje de contenido de materia orgánica, arenas contaminadas sin lavar	41
Tabla 11. Porcentaje de contenido de materia orgánica, arenas contaminadas con lavado	41
Tabla 12. Ensayo del hidrómetro para las arenas contaminadas	42
Tabla 13. Resultados ensayos realizados al asfalto	43
Tabla 14. Resumen de la prueba Marshall	43
Tabla 15. Caracterización de los agregados pétreos	45
Tabla 16. Caracterización de las arenas contaminadas	45
Tabla 17. Caracterización del asfalto	46
Tabla 18. Resumen de estudio de los especímenes con las diferentes proporciones	47
Tabla 19. Mejores mezclas obtenidas por los resultados de los ensayos aplicados	52

LISTA DE ANEXOS

	PAG
Anexo 1. Análisis granulométrico del agregado grueso	56
Anexo 2. Análisis granulométrico del agregado fino	57
Anexo 3. Gravedad específica y adsorción del agregado grueso	58
Anexo 4. Gravedad específica y adsorción del agregado fino	59
Anexo 5. Porcentaje de caras fracturadas en los agregados	60
Anexo 6. Índice de aplanamiento y alargamiento de los agregados	61
Anexo 7. Contenido de materia orgánica por pérdida de ignición	62
Anexo 8. Diseño de mezclas asfálticas en caliente empleando el método Marshall	63
Anexo 9. Análisis granulométrico de las arenas contaminadas con lavado	65
Anexo 10. Análisis granulométrico de las arenas contaminadas lavadas con detergente	66

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: APROVECHAMIENTO DE ARENAS IMPREGNADAS POR DERIVADOS DEL CRUDO EN LA PREPARACIÓN DE MEZCLAS DENSAS EN CALIENTE MDC-2

AUTOR(ES): Yessica Gómez López

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): María Fernanda Serrano Guzmán

RESUMEN

El pavimento flexible es la principal infraestructura de las vías colombianas, estas permiten la movilización por las carreteras facilitando el desarrollo económico. Este desarrollo trae consigo el aumento de vehículos, los cuales producen cargas por medio de sus ejes equivalentes, que resultan esfuerzos aplicados a la carpeta asfáltica. En la actualidad, son altos los costos de construcción, por esta razón se busca una mejora en las mezclas, aprovechando materiales que reduzcan el costo de la producción, pero también que mantengan o mejoren su rendimiento. Lo que se busca es un diseño que garantice un óptimo comportamiento, que tanto el efecto al medio ambiente, como el económico, sea menor. Este trabajo de grado busca por medio del estudio de las características de los agregados, y de las arenas contaminadas por derivados del crudo, presentar una nueva forma de producir mezcla asfáltica, sin dejar de lado las propiedades mecánicas óptimas que esta requiere. Para cumplir con este fin, fue necesaria la caracterización del asfalto a usar, del agregado fino, grueso y de las arenas contaminadas, con la elaboración de 72 briquetas con tres diferentes porcentajes de asfalto. De lo anterior se conoce que la dosificación más óptima y con mejor comportamiento, fue la mezcla contaminada 1, que estaba conformada por el 100% agregado grueso, 50% agregado fino y 50% arenas contaminadas, estas presentaron un mejor comportamiento, más cercano al de las briquetas testigo.

PALABRAS CLAVES:

Pavimento, asfalto, mezcla asfáltica.

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: USE OF ARENAS IMPREGNATED WITH OIL DERIVATIVES IN THE PREPARATION OF MIXTURES DENSE HOT MDC -2

AUTHOR(S): Yessica Gómez López

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: María Fernanda Serrano Guzmán

ABSTRACT

The flexible pavement is the main infrastructure of the Colombian roads, these allow the mobilization on the roads facilitating economic development. This development brings more vehicles, which produce charges by its equivalent axes, resulting stresses applied to the asphalt. At present, they are high construction costs, therefore seeks an improvement in the mix, using materials that reduce the cost of production, but also maintain or improve their performance. What is sought is a design that ensures optimal performance, both the effect on the environment, such as economic, whichever is less. This degree work looking through the study of the characteristics of aggregates and sand contaminated with oil derivatives, present a new way of producing asphalt mix, without neglecting the optimal mechanical properties is required. To meet this end, characterization was necessary to use asphalt, fine aggregate, and coarse sand contaminated with 72 making briquettes with three different percentages of asphalt. From the above it is known that the most optimal and best performing, dosage was contaminated mixture 1, which was composed of 100% coarse aggregate, 50% fine aggregate and 50% contaminated sand, they performed better, closer to the witness briquettes.

KEYWORDS:

Pavement, asphalt, asphalt mixture

INTRODUCCIÓN

El pavimento flexible es la principal infraestructura de las vías colombianas, sobretodo en vías primarias y secundarias, permitiendo la movilización por las carreteras facilitando el desarrollo económico. Este desarrollo trae consigo el aumento de vehículos, los cuales producen cargas por medio de sus ejes equivalentes, que resultan esfuerzos aplicados a la carpeta asfáltica. En la actualidad, son altos los costos del asfalto, por lo tanto se busca mejorarlos, implementando el aprovechamiento de materiales que reduzcan el costo de la producción, pero también que mantengan o mejoren su rendimiento. La intención es aprovechar las arenas contaminadas por derivados del crudo, como agregado, para así proporcionar resistencia y durabilidad a la mezcla. En este trabajo se implementaron arenas que fueron contaminadas debido a un derrame, que en colaboración con ECOPETROL, se busca una solución, debido a que la acumulación de estas arenas, es una afectación al medio ambiente.

Las arenas contaminadas a utilizar, son traídas de Tumaco, Nariño, en busca de una solución, se decide experimentar en mezclas densas en caliente, modificando el porcentaje de agregado, para así conocer si es rentable la utilización de estas, para poder dar solución a la acumulación de estas arenas para así evitar daños ambientales.

1. GENERALIDADES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Siempre se ha conocido acerca de la contaminación ambiental que se ha dado, pero en estos últimos años, vemos que es un tema mucho más discutible y más preocupante, ahora se le está dando mucha más importancia y valor a las soluciones que se puedan presentar para ayudar a mitigar el daño que se la ha hecho al medio ambiente.

Uno de los problemas que se han venido presentando en nuestro país son los ataques a productoras de crudo, a redes de conducción de la misma o a vehículos transportadores. Y es allí donde vemos problemas como que el que hacer con este material que se expande por el suelo o ríos o quebradas, contaminando todo a su paso, generando un daño ambiental no contemplado, y siempre se trata de mitigar el daño limpiando estos derrames, acoplado el material en costales y apilándolos, pero aquí es donde se empieza a generar otro problema, puesto que este procedimiento está bien hasta ese punto ya que no se puede acumular este tipo de material y dejarlo sin ninguna función.

Cuando se implementan mezclas asfálticas se busca un diseño que permita una fácil aplicación del asfalto, un óptimo comportamiento y un menor efecto sobre el medio ambiente; teniendo en cuenta que se van a usar arenas contaminadas, se busca que estas tengan una excelente cohesión con el asfalto y el agregado pétreo usado comúnmente en las mezclas densas en caliente; siguiendo esta línea de la investigación, la caracterización es importante para que se presente la fácil aplicación y cohesión entre los materiales, para así poder comparar una mezcla densa en caliente tradicional, con esta modificada y determinar qué tan viable es reutilizar estas arenas.

Es tradicional en las mezclas densas en caliente usar un porcentaje de asfalto de 5.2%, pero para esta investigación se usaron tres tipos de porcentajes, como lo fueron el 4.5%, 5.0% y 5.5%, para así ampliar el campo de información y de comparación en busca de una solución y aplicación de esta metodología.

1.2 JUSTIFICACION

La implementación de nuevos materiales en mezclas asfálticas favorece en la disminución de costos de producción, mejorando las características de las mezclas asfálticas convencionales y su uso en la pavimentación.

La problemática ambiental obliga a buscar procedimientos que sean amigables con el medio ambiente, a reutilizar materiales que siempre se habían desechado y de los cuales no se habían pensado en alguna posibilidad de utilizar en procesos de producción ya establecidos. En este caso se brinda la posibilidad de la utilización de un material renovable siendo aprovechado como materia prima para la realización de la mezcla de pavimentos flexibles.

La reutilización de materiales para el diseño de mezclas densas en caliente o mezclas asfálticas, pretende generar mezclas que garanticen mejorar las propiedades mecánicas en cuanto al esfuerzo y deformación de la carpeta asfáltica, haciendo que esta mezcla tenga una mejora en sus características tales como la estabilidad, la resistencia y la durabilidad, soportando cargas del tránsito solicitado y a futuro.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas densas en caliente preparadas con arenas impregnadas con derivados del crudo recuperadas de derrames.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- ✓ Evaluar la calidad mecánica de uso de las arenas recuperadas de los derrames de derivados del crudo.
- ✓ Diseñar una mezcla densa en caliente tipo 2 para el aprovechamiento de arenas recuperadas por derrames de derivados del crudo.
- ✓ Comparar el comportamiento mecánico de mezclas densas en caliente con agregados convencionales y mezclas densas en caliente con arenas recuperadas en derrames de derivados del crudo.

1.4 RELEVANCIA DEL TEMA

La estructura del pavimento está diseñada especialmente para la circulación del tráfico automotor, por lo que es una solución económica y eficaz. El rápido crecimiento de nuestro país, implica un alto crecimiento en las vías y por ende un impacto sobre el medio ambiente, por lo tanto es necesario que el mejoramiento y la construcción de nuevas vías vayan de la mano con la sostenibilidad; aprovechando materiales recuperados, en las mezclas asfálticas, se contribuye de manera significativa en la retribución a la naturaleza de lo que se toma para el diario vivir.

2. MARCO DE REFERENCIA

Teniendo en cuenta que el mejoramiento de la infraestructura vial hace parte de los planes de ordenamiento de los municipios, y conociendo las limitaciones presupuestales, es necesario buscar alternativas que contribuyan a suplir esta necesidad, partiendo de planes económicos y viales, que puedan ayudar a ese objetivo. A continuación se hace una descripción teórica de algunos términos que se deben tener en cuenta para llevar a cabo este proyecto.

2.1 TIPOS DE PAVIMENTOS

2.1.1 Pavimentos Flexibles

Se componen principalmente de una carpeta asfáltica la cual lleva una base y una sub-base de carácter no rígido. A continuación sus principales componentes:

- ✓ Capa superficial: Esta es la capa superior, la que está en contacto con el tráfico y puede estar compuesta por una o varias carpetas asfálticas.
- ✓ Base: Esta es la capa que se encuentra inmediatamente debajo de la capa superficial y está compuesta principalmente de agregados ya sea estabilizados o sin estabilizar.
- ✓ Capa sub-base: Esta es la capa (o capas) que están por debajo de la base y no siempre es necesaria.

2.1.2 Pavimentos Rígidos

Estos pavimentos están constituidos por losas de concreto hidráulico apoyadas sobre una subrasante o sobre una capa de material seleccionado, la cual se denomina subbase del pavimento rígido. La capacidad estructural de un pavimento rígido depende la resistencia de las losas y, por lo tanto, el apoyo de las capas subyacentes ejerce poca influencia en el diseño del espesor del pavimento.

2.1.3 Pavimentos Semi-rígidos

Estos pavimentos es la combinación de pavimentos “flexibles” y pavimentos “rígidos”, normalmente la capa rígida está por debajo y la capa flexible por encima. Es usual que un pavimento semi-rígido comprenda una capa de base de

concreto o tratada con cemento portland junto con una superficie de rodadura de cemento asfáltico.¹

2.2 MEZCLA ASFALTICA

Se forma al combinar agregados pétreos y un ligante, de tal manera que al cubrirse los agregados con una película continua de ligante se realiza una mezcla, es un material que puede ser fabricado tanto en centrales móviles como en fijas, para ser transportadas al sitio de obra y así extender el material para la posterior compactación.

La mezcla asfáltica se constituye en la mayor parte de un 90% de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de llenante mineral y el otro 5% del ligante asfáltico, para lograr una mezcla óptima es de vital importancia que todas las dosificaciones se cumplan, el ligante asfáltico y el polvo mineral son elementos que influyen en la calidad de la mezcla.

2.2.1 Características de la mezcla asfáltica

Estas son las características más importantes de una mezcla asfáltica.

- ✓ Estabilidad: Es la capacidad de resistir la deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento inestable presenta huellamientos, corrugaciones y otras señas que indican cambios en la mezcla.
- ✓ Durabilidad: Es la capacidad para resistir la acción de los agentes climáticos y del tránsito, que se observan en desintegración del agregado, cambios en las propiedades del asfalto y separación de las películas de asfalto.
- ✓ Impermeabilidad: Es la resistencia al paso de aire y agua hacia el interior del pavimento.
- ✓ Flexibilidad: Es la capacidad del pavimento para acomodarse sin agrietamientos, a movimientos y asentamientos graduales de la subrasante.
- ✓ Resistencia al deslizamiento: Es la capacidad de proveer suficiente fricción para minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie este mojada.
- ✓ Resistencia a la fatiga: Es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito. Expresa la capacidad de la mezcla a deformarse repetidamente sin fracturarse.

¹DELGADO Garnica Julieth, ARIZA Mahecha Johany Sneyder, Evaluación de una mezcla densa en caliente modificada con la adición de cenizas volantes y caucho.

2.3 MEZCLAS DENSAS EN CALIENTE

Se define como mezcla asfáltica en caliente a la combinación de materiales finos seleccionados y bien gradados incluyendo el polvo de tamaños finos con un ligante hidrocarbonado y en algunos casos adicionándole algún aditivo. Las partículas de agregados después de mezclado deben presentarse muy bien recubiertas por una película homogénea del ligante. Para que una mezcla densa en caliente funcione y se deje compactar, la temperatura puesta en obra debe ser superior a la ambiente.²

Existen diferentes procedimientos para calcular las cantidades de cada material para una mezcla densa en caliente. Entre ellos tenemos:

- ✓ Thehubbar-Field (1920's). fue uno de los primeros métodos de mezcla asfáltica, en el cual evaluaba el contenido de vacíos en la mezcla y en el agregado del material y se compara con una estabilidad ya obtenida para medir la deformación. Este método funciono adecuadamente para la evaluación de mezclas las cuales contenían agregado de tamaño pequeño o granulometrías finas, pero no se obtuvieron los resultados deseados en mezclas asfálticas en caliente con agregados de tamaños máximos nominales altos.
- ✓ Método Marshall (1930's). Fue descubierto durante la segunda guerra mundial y después se adaptó para su uso en carreteras. Tiene en cuenta que la estabilidad representa la carga que tolera la mezcla y el flujo la deformación que representa la misma; todo esto a su vez junto con su porcentaje de vacíos como pruebas fundamentales para su implementación. Este método se desarrolló y ha funcionado bien, salvo algunas modificaciones en algunas de sus especificaciones en los años 40's.
- ✓ Método Hveem (1930's). Es un método contemporáneo con el método Marshall, a diferencia que el principal parámetro de evaluación de este es la estabilidad pseudotriaxial.
- ✓ Método de la Western Association Of State on Transportation Officials WASTHO (1984). Este método fue recomendado para realizar cambios que se requieran en los materiales y en las especificaciones de diseño de mezclas asfálticas en caliente para mejorar la resistencia a las roderas.
- ✓ Método de Asphalt Aggregate Mixture Analysis System. (AAMAS) (1987). Después de muchos años de desarrollo y evolución de los métodos de diseño para mezclas asfálticas, se dio la necesidad de encontrar un nuevo método de compactación de las mezclas en el laboratorio y la evolución de sus propiedades volumétricas, desarrollo pruebas para identificar las

² DELGADO Garnica Julieth, ARIZA Mahecha Johany Sneyder, Evaluación de una mezcla densa en caliente modificada con la adición de cenizas volantes y caucho.

25 deformaciones permanentes, grietas de fatiga resistencia a las grietas a baja temperatura.

- ✓ Método Superpave (1993). Este método vio sus inicios tomando aspectos de diseño del método AAMAS. El método superpave contiene un nuevo diseño volumétrico completo de mezcla. El funcionamiento de dicho método predice a través de modelos y métodos de ensayo en laboratorio, grietas por bajas temperaturas. Después de un largo proceso de investigación en laboratorio por 7 años, los modelos estuvieron listos en el año 2000. Superpave promete ser un diseño confiable el cual se basa en métodos de ensayos de laboratorios que pueden ser usados para la identificación de la resistencia a las deformaciones plásticas de los pavimentos.

2.3.1 Mezclas MCD-1, MDC-2, MDC-3.

Las mezclas MDC-1, MDC-2 Y MDC-3 son mezclas densas en caliente; también son llamadas concreto asfáltico, están definidas por la combinación uniformemente dosificada de agregado y cemento asfáltico, mezclado a una temperatura previamente determinada, que garantiza una mejor adherencia entre ellos.

- ✓ **MDC-1:** Las mezclas densas en caliente MDC-1 se pueden utilizar como capa intermedia (base asfáltica) con un espesor compacto mayor a 50mm y como capa de rodadura con un espesor compacto mayor a 60mm.
- ✓ **MDC-2:** Las mezclas densas en caliente MDC-2 se utilizan como capa de rodadura con espesores entre 40 y 60mm y mayores a 60mm.
- ✓ **MDC-3:** Las mezclas densas en caliente MDC-3 se utilizan como capa de rodadura con espesores entre 30 y 40mm.³

2.4 AGREGADOS PETREOS

Un agregado pétreo es un material mineral duro e inerte, usado en forma de partículas gradadas o fragmentos, como parte de un pavimento flexible. Los agregados se usan tanto en las capas de base granular como para la elaboración de mezclas asfálticas. El agregado constituye entre el 90 y 95% en peso y entre el 75 y 85% en volumen en la mayoría de las estructuras de pavimento. Esto hace que la calidad del agregado usado sea un factor determinante en el comportamiento del pavimento.⁴

³ GONZÁLEZ Rudas, Néstor Julio, GUTIÉRREZ González, Wilson Alfonso, Comportamiento de una mezcla densa en caliente MDC-2 modificada con limalla. 2013. Bucaramanga

⁴ DELGADO Garnica Julieth, ARIZA Mahecha Johany Sneyder, Evaluación de una mezcla densa en caliente modificada con la adición de cenizas volantes y caucho. 2014.

2.5 ASFALTO

El asfalto es una sustancia usada como agente adhesivo, protector y para la impermeabilización en la construcción. Es residuo de un proceso aplicado en aceites crudos llamado destilación, es un elemento líquido pegajoso de coloración negra y con alta viscosidad.

El asfalto es un material que se puede encontrar en la naturaleza en yacimientos naturales o puede ser obtenido como subproducto de la destilación de determinados crudos de petróleo. Posee características muy específicas que lo hacen ideal para los trabajos de pavimentación, principalmente la cohesión y la adhesión con materiales granulares. Tiene una consistencia sólida, al calentarlo se ablanda y se vuelve líquido, lo que permite recubrir los agregados durante el proceso de fabricación de la mezcla asfáltica en caliente.

El asfalto cambia su comportamiento dependiendo de la temperatura y el tiempo de aplicación de la carga. Es más duro a bajas temperaturas y más blando a altas, por esto, se debe seleccionar el tipo de asfalto más conveniente dependiendo del clima del sitio de colocación.

2.6 ARENAS IMPREGNADAS POR DERIVADOS DEL CRUDO

Este material no es de fácil adquisición puesto que solo se consigue si ha ocurrido un accidente en el proceso de producción del petróleo. Como bien se ha nombrado, este proyecto tendrá como agregado nuevo estas arenas, dando una solución para cuando se presenten ese tipo de accidentes, ya que ambientalmente no se pueden dejar estas arenas impregnadas por petróleo crudo, a la intemperie.

2.7 ESTUDIOS PREVIOS SOBRE MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS

El grupo de investigación en detección de contaminantes y remediales DECOR ha realizado otros estudios con mezclas asfálticas modificadas, haciendo uso de residuos industriales.

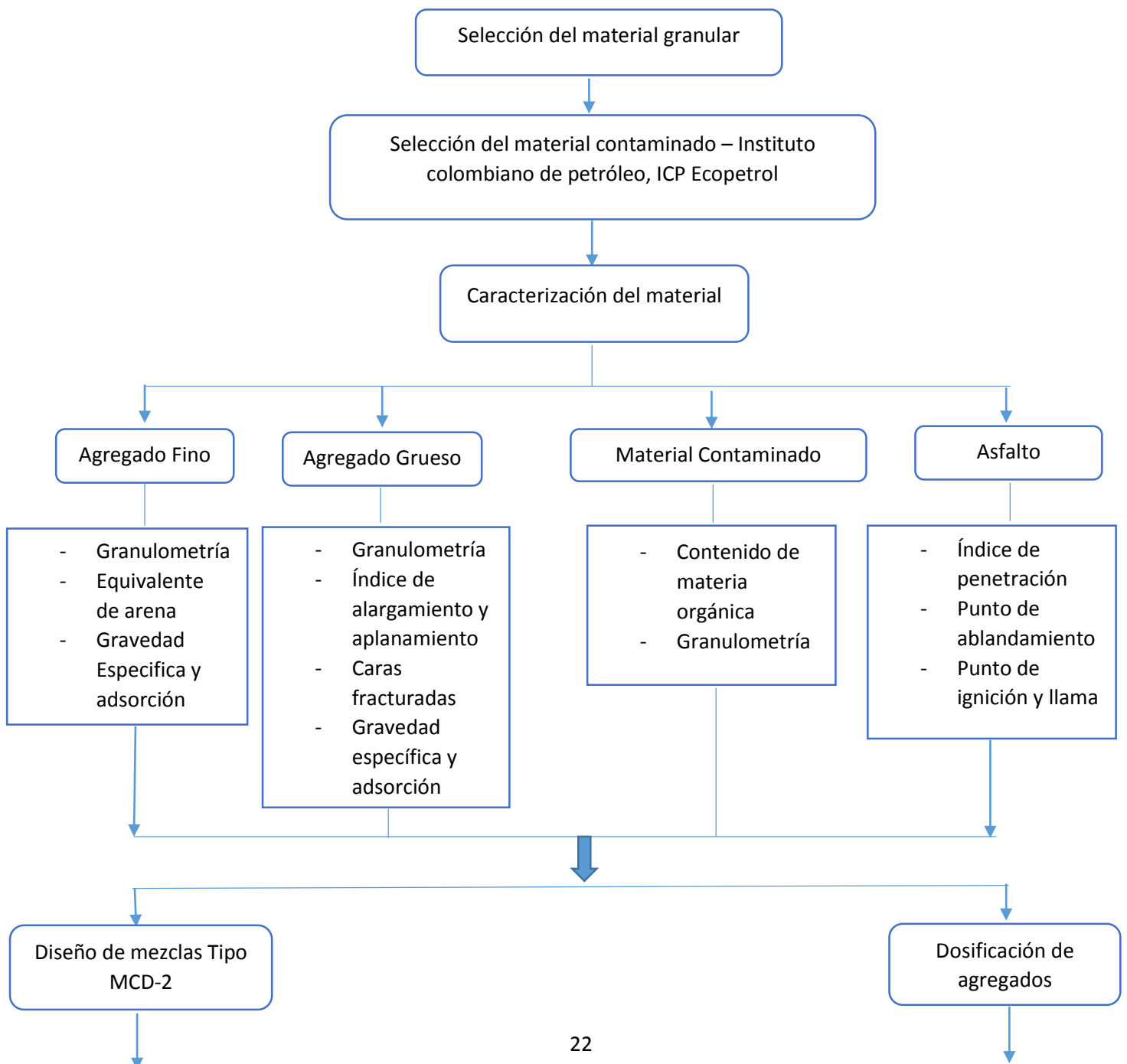
Para la mezcla que se trabajara en este proyecto, no se encuentra información de que se haya hecho antes o que se tengan algunos resultados base, lo que sí se puede encontrar son empresas que producen material compuesto por arenas finas impregnadas de crudo de petróleo que ha sido refinado naturalmente.

Lo que se espera obtener con este proyecto, son esos estudios base que puedan servir para nuevos procedimientos que se quieran hacer con mezclas asfálticas modificadas por arenas impregnadas de petróleo

3. METODOLOGIA

Para llevar a cabo este proyecto se realizaron panelas en el equipo roller compactador de las cuales se extraen 4 núcleos, formando briquetas con las dimensiones establecidas para el ensayo Marshall, también se realizaron briquetas manuales como se establece en la norma para así poner hacer una comparación y obtener un rango de resultados y conclusiones, más amplio.

Estas mezclas están compuestas por dos materias primas: material pétreo y cemento asfáltico. Primero se mezclan los materiales pétreos entre si y luego con el cemento asfáltico en estado líquido como material ligante para dar como resultado final una mezcla densa en caliente.



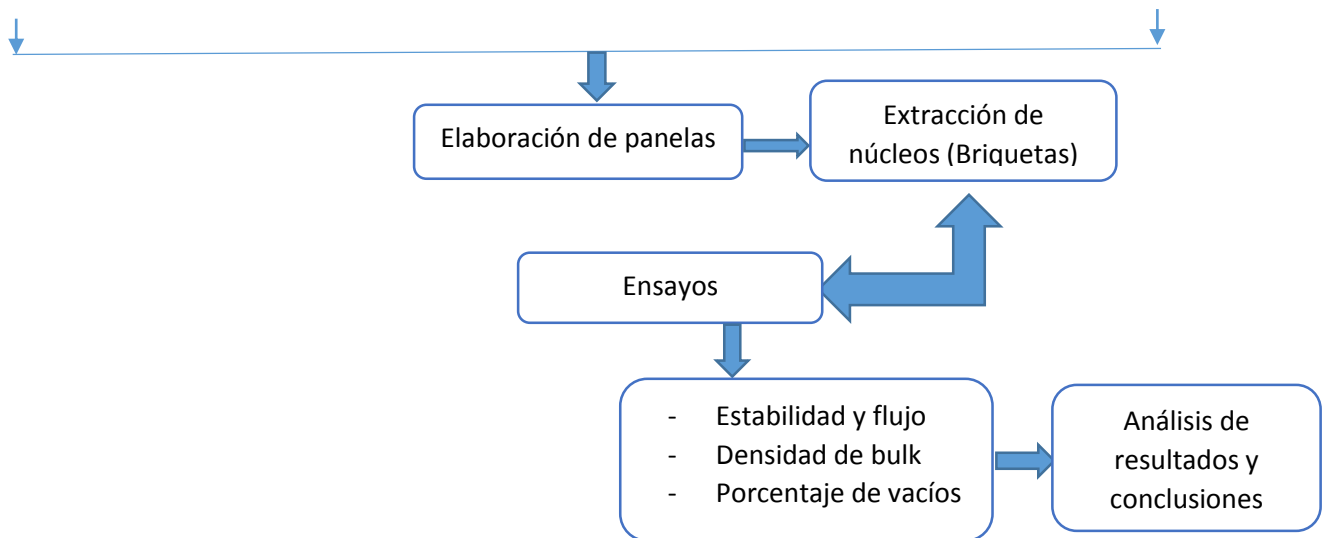


Figura 1. Metodología

3.1 MATERIALES EMPLEADOS

3.1.1 Ensayos a los materiales granulares

Los siguientes ensayos se llevaron a cabo en el material granular para obtener su clasificación:

- ✓ Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino (INVE-213)
- ✓ Densidad, densidad relativa (Gravedad específica) y adsorción del agregado fino (INVE-222)
- ✓ Densidad, densidad relativa (Gravedad específica) y adsorción del agregado grueso (INVE-223)
- ✓ Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso (INVE-227)
- ✓ Índices de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras (INVE-230)

3.1.1.1 Descripción de los procedimientos de la caracterización del material granular

a) Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino (INVE-213)

Para llevar a cabo este ensayo se deben seguir los siguientes pasos:

- Se extiende el material en una superficie uniforme en la cual se pueda hacer el mezclado para que exista homogeneidad en los agregados.
- Se realiza el cuarteo de manera manual, de este se escogen 2/4 partes del material, el cual es sometido a un lavado para limpiar la muestra de impurezas, de partículas que puedan pasar por el tamiz N° 200 (abertura 0.074mm).

- Después del lavado, el material es llevado al horno a una temperatura de 110 °C durante un periodo de 24 horas, se procede a la selección de la serie de tamices.

Para finalizar se pesa el material retenido en dicha serie de tamices y se procede a realizar la curva granulométrica y la clasificación del mismo.

b) Índices de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carretera (INVE – 230)

Para realizar el procedimiento descrito en la norma INVE-230, se debe tener en cuenta que para determinar el índice de aplanamiento, no son aplicables las partículas de tamaños menores a 6.3mm (1/4") o mayores a 63mm (2 1/2"). Mientras que para determinar el índice de alargamiento no son aplicables las partículas de tamaños menores de 6.3mm (1/4") o mayores a 50mm (2").

- **INDICE DE APLANAMIENTO:** El ensayo consiste en dos operaciones sucesivas, la primera consiste en dividir la muestra en fracciones mediante el uso de tamices. Luego cada fracción se pasa por unos tamices de barras paralelas. Las partículas que pasen por el tamiz son consideradas planas.
- **INDICE DE ALARGAMIENTO:** Al igual que el índice de aplanamiento, este ensayo consiste en dos operaciones sucesivas, la primera es la división de la muestra en fracciones por medio del uso de tamices. Luego cada fracción se pasa por un calibrador de longitudes, el cual tiene barras verticales. Se considera que todas las partículas retenidas por las barras son alargadas.

c) Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso (INVE-227)

Se toma la muestra y se pasa por el tamiz 4.75mm (N⁰4) para separar los agregados gruesos de los finos. Se toma una cantidad de material de 1/2", no menor a 500gr, luego se lava el material para eliminar partículas finas. Se seca en el horno a una temperatura de 110 °C. Después del secado se esparce la muestra en una superficie seca y grande, y se procede a inspeccionar cada una de las partículas para poder clasificar si se tiene una o varias caras fracturadas. Luego con una espátula o herramienta similar se debe clasificar la muestra en tres categorías; (1) partículas fracturadas, (2) partículas que no cumplen con el criterio especificado.

Si se especifica más de un número de caras fracturadas, se repite el procedimiento sobre la misma muestra para cada requisito.

d) Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino (INVE-222)

Para la realización de este ensayo se tomó aproximadamente 1kg de la muestra de material fino, de acuerdo con la norma INVE-202. Se coloca la muestra en un recipiente y se lleva al horno a una temperatura constante de 110 °C. Luego de que la muestra se enfríe se sumerge y se mantiene en este estado durante 24 horas. Después de este periodo, se decanta el agua de manera cuidadosa para evitar la pérdida de finos y se extiende la muestra sobre una superficie plana no absorbente, se deja secar con sol o con aire caliente. En el instante en que se considere que la muestra esté libre de humedad superficial, se hace la prueba del cono, donde el diámetro mayor estará apoyado en la superficie, se pone en su interior una porción de la muestra, en estado suelto, en cantidad suficiente para llenarlo hasta rebosar. En seguida se apisona ligeramente el agregado dentro del molde, aplicándole 25 golpes con la varilla, cada golpe se debe dar dejando caer libremente el pisón bajo la acción de la gravedad. A continuación, se remueve la arena suelta que haya alrededor de la base del molde y se levanta este verticalmente. Si hay humedad superficial presente. La muestra de agregado fino mantendrá su forma cónica, por lo que se continuara secando y mezclando y repitiendo el procedimiento del cono hasta que se presente un derrumbe parcial de la muestra de agregado fino, la cual indica que se ha alcanzado la condición superficialmente seca.

e) Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso (INVE-223)

Para llevar a cabo este ensayo se debe eliminar el material inferior a 4.75mm (Nº4), mediante el proceso de tamizado y se lava para eliminar particular finas. Se seca la muestra en el horno a una temperatura constante de 110 °C, se deja al aire a temperatura ambiente durante 1 a 3 horas. Posteriormente se sumerge en agua a temperatura ambiente durante 24 horas. Después de la inmersión se saca la muestra del agua y se seca con un paño absorbente para así eliminar el agua superficialmente. Luego de este secado se pesa la muestra para así determinar la masa en el aire, después se pone la muestra en la canastilla metálica y se determina su masa sumergida en el agua a una temperatura de 23 °C. A continuación se seca la muestra en el horno a una temperatura de 110 °C hasta masa constante, se enfría al aire a temperatura ambiente durante 1 o 3 horas y en seguida se determina su masa.

f) Equivalente de arena de suelos y agregados finos (INVE – 133)

Para llevar a cabo este ensayo es necesario que el material fino a utilizar sea el que pase por el tamiz de 4.75mm (Nº4).

Se obtienen los 85ml de material a introducir en el recipiente, se seca el material hasta masa constante a una temperatura de 110 °C y se enfría a temperatura ambiente. Después de tener el material se vierte una solución de trabajo de cloruro de calcio en el cilindro graduado hasta una altura de 101.6 ± 2.54 mm, con ayuda de un embudo se vierte el material, tratando que este no se adhiera a las paredes del tubo, se deja reposar durante 10 minutos. Al finalizar los 10 minutos se tapa el cilindro y se gira para que de esta manera se pueda desprender el material que se encuentra en el fondo. Se asegura el cilindro y se pone en el agitador metálico por un tiempo de 45 ± 1 minuto.

PROCEDIMIENTO DE IRRIGACION: Durante este procedimiento se debe mantener el cilindro de manera vertical. Luego se inserta el tubo irrigador dentro del cilindro, se afloja la pinza de presión de la manguera y se lava el material de las paredes del cilindro a medida que se baja el irrigador, el cual debe llegar hasta el fondo del cilindro, aplicando suavemente una acción punzante y giro mientras fluye solución de trabajo por la boca del irrigador. Esto impulsa hacia arriba el material fino que este en el fondo y lo pone en suspensión sobre las partículas gruesas de arena. Este procedimiento continua hasta que el cilindro este lleno hasta la marca de 381mm (15"). Cuando se consiga esta altura, se debe retirar el irrigador. Se deja en reposo el cilindro con su contenido durante 20 minutos.

DETERMINACION DE LA LECTURA DE ARCILLA: Al finalizar los 20 minutos del periodo de sedimentación, se lee y anota el nivel de la parte superior de la suspensión arcillosa. Este valor se denomina "lectura de arcilla". Si no se ha formado una línea clara de demarcación al finalizar los 20 minutos, se debe dejar reposar la muestra hasta que este clara la línea clara de demarcación, si al pasar 30 minutos, esta sigue sin ser clara, se debe repetir el ensayo.

DETERMINACION DE LA LECTURA DE ARENA: Después de tomar la lectura de arcilla, se introduce el dispositivo para tomar lecturas, dentro del cilindro, y se baja suavemente hasta que llegue sobre la arena, se debe impedir que el dispositivo toque las paredes del cilindro mientras baja. Cuando el disco de asentamiento descansa sobre la arena, se inclina el dispositivo hacia las graduaciones del cilindro, hasta que el indicador del dispositivo toca la pared del cilindro. Se restan 254mm (10") al nivel marcado por el borde superior del indicador y se registra este valor como la lectura "lectura de arena".

3.1.2 Ensayos al material contaminado

Los siguientes ensayos, son ensayos complementarios para la caracterización del material contaminado.

a) Determinación del contenido orgánico de un suelo mediante el ensayo de pérdida por ignición (INVE – 121 – 13)

Se debe pasar el material por el tamiz N°10 y tomar 100gr de la misma para llevar a cabo la realización del ensayo. Se coloca la muestra en un recipiente y se lleva al horno a una temperatura de 110°C hasta obtener una masa constante. Luego se remueve la muestra del horno y se coloca en el desecador y se permite su enfriamiento. Se escoge una muestra con una masa aproximada de 10 a 40gr, se coloca en un crisol tarado o en un plato de evaporación de porcelana y se determina su masa. A continuación se coloca el crisol o el plato que contiene la muestra dentro de la mufla durante 6 horas a 445°C, se saca la muestra de la mufla, se coloca en el desecador hasta obtener su enfriamiento y se determina su masa.

b) Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos (INVE – 123 – 13)

La preparación de la muestra está constituida por dos fracciones una retenida sobre el tamiz 2mm (N°10) y otra que pase por dicho tamiz. Ambas fracciones serán ensayadas por separado. Para la porción que de la muestra retenida en el tamiz 2mm (N°10), la masa dependerá del tamaño máximo de la partícula. El tamaño de la porción que pasa por el tamiz de 2mm (N°10) será, aproximadamente, de 115gr para suelos arenosos y de 65gr para suelos limosos o arcillosos.

HUMEDAD HIGROSCOPICA: Cuando una muestra de suelo secado al aire se pesa para el ensayo del hidrómetro, se debe pesar una segunda porción de 10 a 15gr en un pequeño recipiente metálico o de vidrio, la cual se seca en el horno a 110°C hasta masa constante y se pesa de nuevo, se anotan los dos valores y se calcula la humedad higroscópica.

DISPERSION DE LA MUESTRA DEL SUELO: Si el suelo es predominantemente arenoso, la muestra deberá ser del orden de 100gr. Se coloca la muestra en el vaso de vidrio de 250ml y se cubre con 125ml de solución de hexmetafosfato de sodio (40gr/litro). Se agita con la varilla de vidrio hasta que el suelo este humedecido completamente y se permita su saturación durante 16 horas como mínimo. Terminado el periodo de saturación se pasa al recipiente agitador donde se agitara durante 1 minuto.

ENSAYO DEL HIDROMETRO: Terminada la etapa de dispersión, se coloca la lechada suelo-agua al cilindro para la sedimentación y se añade agua destilada o desmineralizada, hasta que el volumen total sea de 1000ml. Luego se pone la mano sobre el extremo abierto del cilindro (o colocando un tapón de caucho) se voltea el cilindro patas arriba y viceversa durante un minuto para completar la agitación de la lechada. Al terminar del minuto, se coloca el cilindro sobre una superficie plana y se hacen lecturas en los siguientes intervalos: 2, 5, 15, 30, 60, 250 y 1440 minutos.

ANALISIS POR TAMIZADO: Luego de tomar la última lectura con el hidrómetro, se transfiere la suspensión a un tamiz de 75µm (Nº200) y se lava con agua potable hasta que el lavado se vuelva de color claro. En seguida, se transfiere el material retenido en el tamiz a un recipiente adecuado, se seca en el horno a 110°C y se realiza un análisis por tamizado, usando tantos tamices como desee o lo que establezca la especificación del material que se está ensayando.

3.1.3 Asfalto

3.1.3.1 Ensayos realizados al material bituminoso

a) Penetración de los materiales bituminosos (INVE-706-13)

La temperatura de calentamiento deberá exceder a la prevista del punto de ablandamiento en más de 90°C. El tiempo total de calentamiento deberá ser el mínimo necesario para asegurar la fluidez del producto. Se permite que la muestra se enfríe al aire a una temperatura entre 15 y 30°C por un periodo entre 45 minutos y 1½ hora para el recipiente pequeño (33 x 16mm), de 1 a 1½, para el tamaño medio (55 x 35mm), y entre 1½ y 2 horas para el grande. Una vez cumplido con el tiempo se procede a desarrollar el ensayo con el equipo de penetración; se acerca la aguja a la superficie del asfalto, se realizan por lo menos tres penetraciones en cada recipiente sobre puntos diferentes, usándose para cada penetración una aguja diferente.

b) Punto de inflamación y de combustión mediante la copa abierta de Cleveland (INVE-709-13)

Se llena la copa a cualquier temperatura, que no sea mayor de 56°C por debajo del punto de inflamación esperado de la muestra. Si se ha vertido demasiado material en la copa se remueve el exceso. Se deshacen todas las burbujas de aire sobre la superficie de la muestra.

Inicialmente se le aplica calor de manera que la velocidad de incremento de la temperatura de la muestra sea de 5 a 17°C por minuto. Cuando la temperatura sea de, aproximadamente, 56°C por debajo del punto de inflamación esperado, se disminuye la intensidad del calor, de manera que la temperatura aumente para los últimos 28°C antes de llegar al punto de inflamación, a razón de 5 a 6°C por minuto. Cuando la temperatura de la muestra este a unos 28°C por debajo del punto de inflamación esperado, se comienza la operación de barrido con la llama de ensayo, una vez por cada aumento de 2°C. Se registra como punto de inflamación observado, la lectura en el aparato de medida de temperatura, en el instante en que la llama de ensayo produce un destello marcado sobre la superficie. Para determinar el punto de combustión, se continúa calentando el espécimen a la misma velocidad y se continúa pasando la llama de ensayo, hasta que el espécimen se encienda y se mantenga la llama por lo menos durante 5 minutos. Se registra como punto de combustión la temperatura a la cual la llama de ensayo produce esta ignición sostenida de la muestra.

c) Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (Aparato de anillo y bola) (INVE-712-13)

Se realiza el montaje del equipo para la elaboración del ensayo; el material se calienta hasta que se encuentre en su estado líquido y se vierte en los anillos para luego dejar reposar por 30 minutos; a partir de este instante no debe tardar más de 240 minutos en terminarse el ensayo. Se procede hacer un baño líquido con agua destilada entre 30°C y 80°C. Se anota para cada bola y anillo la temperatura en el termómetro en el momento en que la bola toque el fondo del plato de base.

3.2 Briquetas realizadas según diseño Marshall

Las briquetas se realizaron conforme al diseño Marshall para mezclas densas en caliente tipo 2 (MDC-2).

Se inició con la elaboración de briquetas manuales, para las cuales se calentaba tanto el agregado como el material bituminoso logrando una adherencia entre ellos. Las briquetas fueron compactadas mediante golpes con el martillo Marshall, específicamente 75 golpes por cada cara. Para la elaboración de las muestras se realizó la granulometría correspondiente según la norma INVIAS. Se trabajaron 3 porcentajes diferentes de asfalto con dos variaciones en los agregados, como lo fue la inclusión de las arenas contaminadas.

Para la realización de panelas, también se calentó el agregado y el material bituminoso de manera que se adhirieran, esta mezcla fue vertida en el molde y puesta en el equipo roller compacter, el cual compactaba llegando a una densidad específica. Es necesario aclarar que tanto la granulometría como la dosificación se hicieron a mayor escala debido a que para este procedimiento se utiliza mucho más material. Luego de sacar la panela, a esta se le realizaba un proceso de extracción de núcleos.

A continuación se muestran las proporciones, los 3 diferentes porcentajes de asfalto y la variación en los agregados.

Porcentaje de asfalto utilizado	Variación en los agregados
4,50%	Agregados convencionales
5,00%	100% Grueso, 50% Fino, 50% Contaminado
5,50%	100% Grueso, 75% Fino, 25% Contaminado

Tabla 1. Porcentajes de asfalto y variación en el porcentaje de agregados

3.2.1 Dosificación de los agregados

En la tabla 2 se observa la cantidad de material en gramos para cada briqueta, teniendo en cuenta que se utilizaron porcentajes de asfalto de 4.5, 5.0 y 5.5 por cada briqueta. Mientras que en la tabla 3 se muestra la cantidad de material necesaria para la elaboración de panelas en las cuales también se utilizaron los mismos porcentajes descritos anteriormente.

Dosificación							
Tamiz	% Que pasa	Valor Medio	%	% de asfalto			
				4,50%	5,00%	5,50%	
				1146	1140	1134	
1"	/	/	/	/	/	/	
3/4"	100	100	0,00%	0	0	0	
1/2"	80 - 95	88	12,5%	143,25	142,5	141,75	
3/8"	70 - 88	79	8,5%	97,41	96,9	96,39	
No 4	49 - 65	57	22,0%	252,12	250,8	249,48	
No 10	29 - 45	37	20,0%	229,2	228	226,8	
No 40	14 - 25	20	17,5%	200,55	199,5	198,45	
No 80	8 - 17	13	7,0%	80,22	79,8	79,38	
No 200	4 - 8	6	6,5%	74,49	74,1	73,71	
Fondo	6 - 0	6	6,0%	68,76	68,4	68,04	
				100,00%	1146	1140	1134

Tabla 2. Dosificación de agregados para cada porcentaje de asfalto, por briqueta

Dosificación							
Tamiz	% Que pasa	Valor Medio	%	% de asfalto			
				4,50%	5,00%	5,50%	
				23875	23750	23625	
1"	/	/	/	/	/	/	
3/4"	100	100	0,00%	0	0	0	
1/2"	80 - 95	88	12,5%	2984,375	2968,75	2953,125	
3/8"	70 - 88	79	8,5%	2029,375	2018,75	2008,125	
No 4	49 - 65	57	22,0%	5252,5	5225	5197,5	
No 10	29 - 45	37	20,0%	4775	4750	4725	
No 40	14 - 25	20	17,5%	4178,125	4156,25	4134,375	
No 80	8 - 17	13	7,0%	1671,25	1662,5	1653,75	
No 200	4 - 8	6	6,5%	1551,875	1543,75	1535,625	
Fondo	6 - 0	6	6,0%	1432,5	1425	1417,5	
				100,00%	23875	23750	23625

Tabla 3. Dosificación de agregados para cada porcentaje de asfalto, por panela

3.2.2 Procedimiento para el diseño de briquetas (Compactación)

Para el diseño de una mezcla densa en caliente tipo 2 (MDC-2); se realizaron probetas cilíndricas de 102mm (4") de diámetro y una altura nominal de 63.5mm (2 1/2") con un peso de 1200gr, compuesta por materiales grueso y fino. Expresados en la tabla 4.

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
		% Que pasa									
Densa	MDC-1		100	80-95	67-85	60-77	43-59	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-2			100	80-95	70-88	49-65	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-3					100	65-87	43-61	16-29	9-19	5-10
Semi - Densa	MSC-1		100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
	MSC-2			100	80-95	65-80	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
Gruesa	MGC-0	100	75-95	65-85	47-67	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11	2-6
	MGC-1		100	75-95	55-75	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11	2-6
Alto Modulo	MAM		100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	10-20	8-14	6-9

Tabla 4. Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente

Se debe calentar el molde, el collarín y los materiales pétreos como el asfalto, ya sea en un horno o en una cocina a una temperatura de 110°C y 140°C respectivamente. Después de haberse definido el peso de los materiales correspondientes a cada briqueta, se procede al mezclado entre el ligante, asfalto junto con los materiales logrando una homogeneidad. Antes de verter la mezcla homogénea se debe poner un papel de filtro dentro del molde. Luego de tener el filtro y de verter la mezcla, se procede a dar los 75 golpes por una cara, al finalizar estos se voltea el molde para así poder dar los siguientes 75 golpes y lograr la compactación de la briqueta. A continuación se enumera el espécimen y se le toman medidas tanto de diámetro como de altura. Se recomienda tomar como mínimo tres medidas y se procede a dejarla reposar 24 horas para luego ser ensayada.

3.2.3 Procedimiento para la elaboración de panelas asfálticas

Para la elaboración de panelas el procedimiento es muy similar a al procedimiento descrito para las briquetas. En esta ocasión el molde es una prima rectangular, el cual tiene 180 mm de alto, 260 mm de ancho y 320 mm de largo, estas medidas son tomadas desde el interior del molde y con peso aproximado de 30kg. En este procedimiento no calentamos el molde, ya que al entrar en contacto con la plataforma del equipo roller compacter, el rose del metal caliente con el frío no permite el libre paso del molde hasta el puesto donde se debe ajustar. El molde debe lubricarse en su interior con BIOVAR SOL, para que la mezcla no se adhiera a las paredes de este. Se debe tener en cuenta que para la elaboración de panelas, la mezcla entre agregados y asfalto debe dar como total 25Kg, lo que hace que el calentamiento del material se logre en mayor tiempo y que la mezcla entre es y el asfalto sea más pesada. Esta mezcla debe hacerse por partes para poder lograr la homogeneidad entre los materiales, y se debe hacer de forma rápida para impedir que la mezcla se enfríe. Cuando ya se tiene todo el material mezclado y en el molde, se procede a introducirlo en el equipo roller compacter, el molde debe ponerse en la plataforma y luego rodarlo hasta el fondo, al lograr esto, se debe ajustar con la varilla, cerrar la cabina y encender el equipo. Al equipo se le debe introducir datos como el peso del material, la densidad, el tipo de molde, el tipo de rodillo y especificar las pasadas, después de introducir estos datos se procede a dar la orden de inicio y el equipo empieza a compactar hasta llegar a la densidad que se quiere.

3.2.4 Pruebas mecánicas para la verificación comportamiento de mezclas asfálticas.

- ✓ Análisis de la densidad de vacíos
- ✓ Peso específico "Bulk"
- ✓ Ensayo de estabilidad y flujo

a) Análisis de la densidad de vacíos

Se promediaron los datos para tener un valor específico para cada diseño. También se tomaron los pesos específicos "Bulk" de las probetas que fueron elaboradas con el mismo porcentaje de asfalto.

ANALISIS Y DESCRIPCION DE LAS FORMULAS EMPLEADAS

- ✓ Calculo del peso específico promedio del agregado total

$$PsAgr = \frac{Psagr + Psaf}{2}$$

Psagr = Peso específico agregado grueso

Psaf = Peso específico agregado fino

- ✓ Calculo del peso específico teórico

$$Psm_t = \frac{100}{\frac{\% \text{ de agregado}}{PsAgr} + \frac{\% \text{ de asfalto}}{PsAsf}}$$

PsAgr = Peso específico agregado grueso

PsAsf = Peso específico del asfalto

Se tiene en cuenta el porcentaje de asfalto como porcentaje del volumen total de probetas, para conocer el porcentaje del volumen total de probetas, para conocer el porcentaje en volumen que ocupa el agregado con respecto al volumen total de la probeta, se halla el porcentaje de vacíos en los agregados en la mezcla compactada, que es igual a la resta de 100 menos el volumen total de los agregados. Se calcula el porcentaje de vacíos con aire en la mezcla total, con respecto a la mezcla compactada.

b) Gravedad específica "Bulk" y densidad de mezclas asfálticas compactadas absorbentes empleando especies recubiertos con una película de parafina (INVE – 734-13)

Para llevar a cabo este ensayo, se deben tomar unos datos iniciales, como lo son, las tres medidas de las alturas y el peso seco de cada briqueta. Este ensayo consiste en sumergir las probetas por lo menos 5 minutos en agua a una temperatura ambiente de 25°C, tomarle el peso sumergido y luego con una toalla eliminar el exceso del agua. Para así poder obtener el peso saturado y el superficialmente seco, habiendo completado estos datos, se puede calcular la densidad de "Bulk" a cada una. Luego

aplicarles un factor de corrección de temperatura del agua de 25°C correspondiente a 0.997 según la tabla 1 de la norma INVE-734-13.

$$G_s = \frac{W_a}{(W_{ss} - W_w)}$$

Wa = Peso de la muestra seca en aire

Wss = Peso de la muestra superficialmente seca e internamente saturada

Ww = Peso de la muestra en el agua.

Para hallar el peso de la muestra en agua se debe colocar una canastilla dentro de un balde con agua y allí se coloca la probeta, este sistema se encuentra suspendido de una balanza que determina su peso.

c) Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall (INVE – 748 – 13)

Este ensayo consiste en someter las briquetas en un baño de agua durante 30 a 40 minutos, manteniendo el baño en el horno a una temperatura de 60° C. Se retira de una probeta del baño de agua, se debe secar todo exceso de agua con una toalla, y se coloca centrada en la mordaza inferior, se monta la mordaza superior con el medidor de deformación y el conjunto se sitúa centrado en la prensa. Se coloca el medidor de flujo en posición, se ajusta a cero, y se mantiene su vástago firmemente junto a la mordaza superior mientras se le aplica carga.

4. RESULTADOS

Este estudio comprende la caracterización de los materiales para la preparación de mezclas densas en caliente, MDC-2. A continuación se muestran los resultados de dichos ensayos.

4.1 Caracterización de los materiales

Con el fin de cumplir con los parámetros establecidos para la elaboración de mezclas asfálticas, se realizaron los siguientes ensayos.

4.1.1 Granulometría de agregado grueso y fino

La caracterización del material se realizó bajo los parámetros de la norma INVE-213-13, utilizando la serie de tamices establecidos para ello.

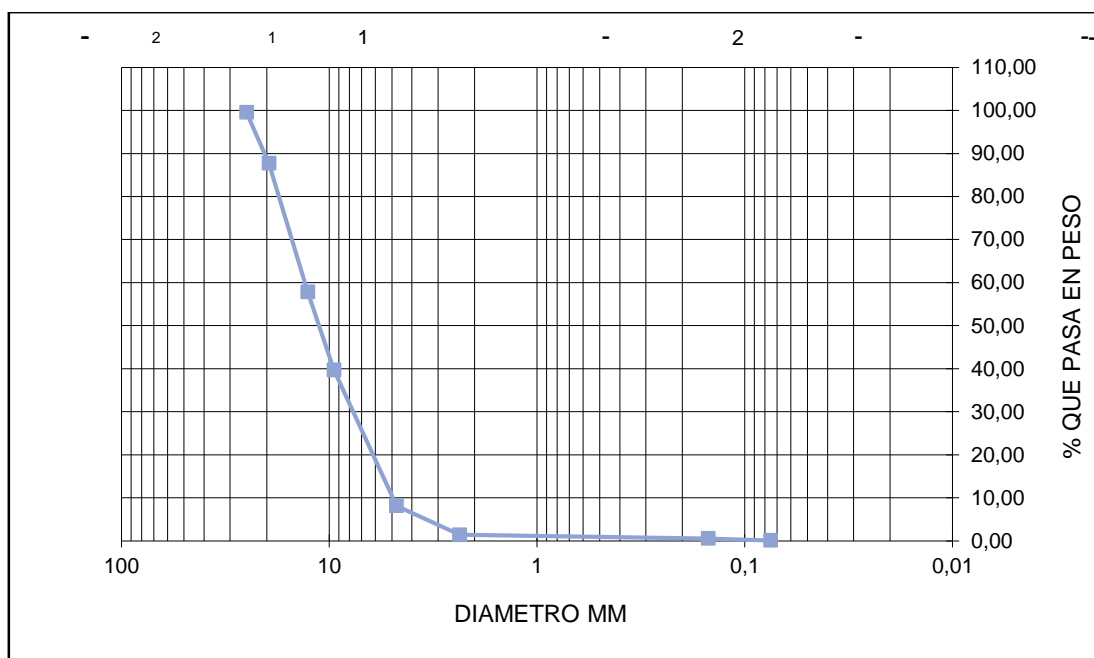


Figura 2. Curva granulométrica del agregado grueso

Se llevó a cabo el ensayo al agregado y se graficó el resultado para así obtener datos dicientes de su uniformidad.

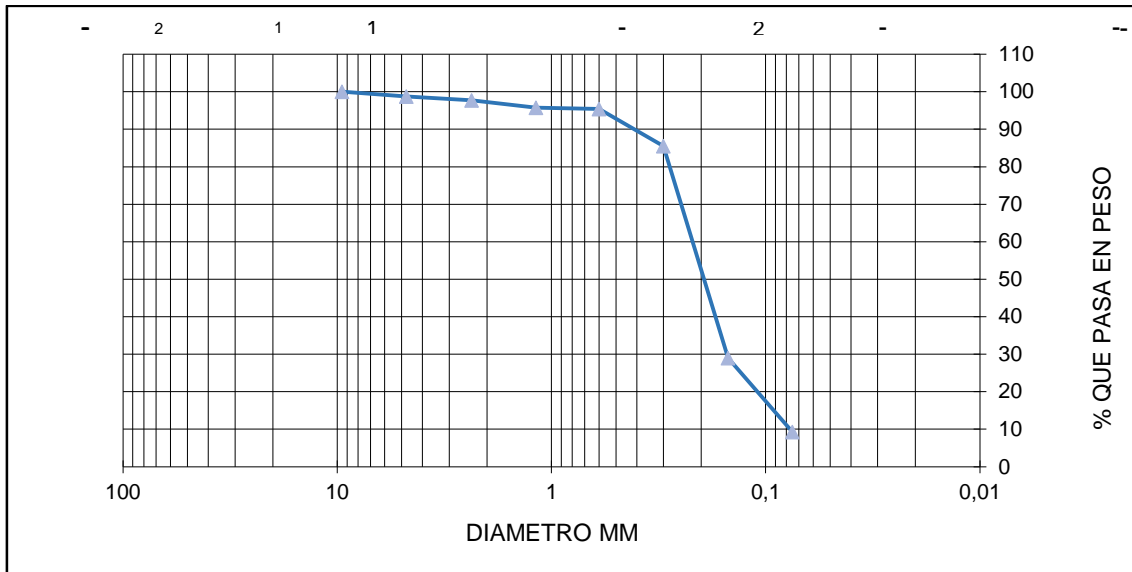


Figura 3. Curva granulométrica del agregado fino

4.1.2 Gravedad específica y absorción de los agregados

Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso (INVE-223)

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos al realizar este ensayo.

A=	3079,2	gr
B=	3131,2	gr
C=	1913	gr
Densidad Relativa (gravedad específica) SH =	$A/(B-C)$	2,528
Densidad Relativa (gravedad específica) SSS=	$B/(B-C)$	2,570
Densidad Relativa Aparente (Gravedad específica aparente) =	$A/(A-C)$	2,640
Densidad SH, Kg/M3=	$997,5 * A/(B-C)$	2521,34
Densidad SH, Lb/pie3=	$62,27 * A/(B-C)$	157,40

Densidad SSS, Kg/M3 =	$997,5*B/(B-C)$	2563,92
Densidad SSS, Lb/pie3 =	$62,27*B/(B-C)$	160,06
Densidad Aparente Kg/M3 =	$997,5*A/(A-C)$	2633,77
Densidad Aparente Lb/pie3=	$62,27*A/(A-C)$	164,42
Absorción, % =	$(B-A/A)*100$	1,69

Tabla 5. Gravedad específica y absorción del agregado grueso

Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino (INVE-222)

Este ensayo se realizó para la caracterización del material a utilizar para la elaboración de la mezcla densa en caliente. Estos son los resultados obtenidos.

A	488,4	gr
B	690,2	gr
C	982,8	gr
Densidad Relativa (Gravedad Especifica) SH=	$A/(B+S-C)$	2,35
Densidad Relativa (Gravedad Especifica) SSS=	$S/(B+S-C)$	2,41
Densidad Relativa Aparente (Gravedad Especifica Aparente) =	$A/(B+A-C)$	2,49
Densidad SH, Kg/M3 =	$997,5*A/(B+S-C)$	2348,98
Densidad SH, Lb/pie3 =	$62,27*A/(B+S-C)$	146,64
Densidad SSS, Kg/M3=	$997,5*S/(B+S-C)$	2404,77
Densidad SSS, Lb/pie3 =	$62,27*S/(B+S-C)$	150,12054
Densidad Aparente, Kg/M3 =	$997,5*A/(B+A-C)$	2488,15
Densidad Aparente Lb/pie3 =	$62,27*A/(B+A-C)$	155,33
Absorción % =	$(S-A/A)*100$	2,38

Tabla 6. Gravedad específica y absorción del agregado fino

4.1.3 Índices de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carretera (INVE – 230)

En la tabla 6 se muestran los resultados obtenidos en este ensayo que se realizó bajo los parámetros establecidos en la norma INVE-230-13.

Índice de aplanamiento (AI)=	84,16	%
Índice de alargamiento (IL) =	18,95	%

Tabla 7. Índices de aplanamiento y alargamiento del agregado grueso

4.1.4 Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso (INVE-227)

El ensayo se llevó a cabo bajo los parámetros establecidos en la norma INVE-227-13, y se obtuvo el porcentaje de caras fracturadas del material, este valor lo que nos indica si es posible el uso del material para la preparación de mezclas asfálticas.

Tamiz		
Pasa	Retenido	% Caras Fracturadas
1 ½ "	1"	100,00
1"	¾"	55,97
¾"	½"	92,58
½"	⅜"	52,51

Tabla 8. Porcentaje de caras fracturadas, agregado grueso

4.1.5 Equivalente de arena de suelos y agregados finos (INVE – 133)

Este ensayo se llevó a cabo bajo los parámetros establecidos en la norma INVE-133. Estos fueron los resultados arrojados.

Ensayo	Arcilla	Arena
1	3,9	3,7
2	3,7	3,6

Tabla 9. Ensayo equivalente de arena

4.2 Caracterización de las arenas contaminadas

4.2.1 Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino (INVE-213)

Este ensayo se realizó de dos maneras, en la primera se lavó el material como se describe en la norma mientras que en la segunda se lavó con detergente, estos fueron los resultados arrojados de las dos maneras.

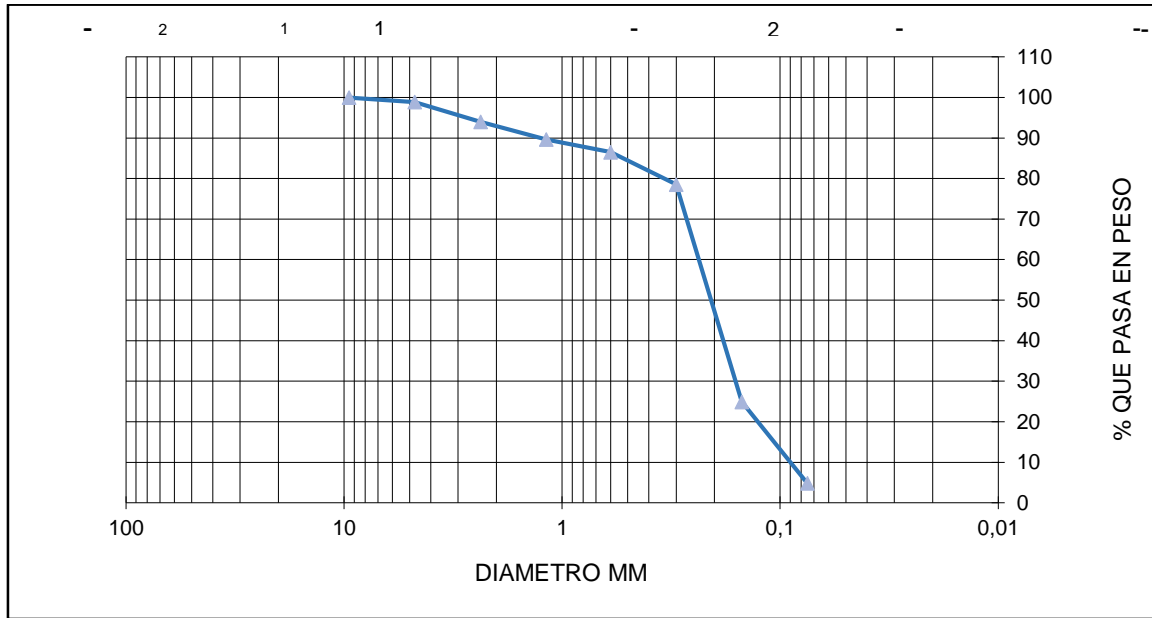


Figura 4. Curva granulométrica de arenas contaminadas, lavado normal

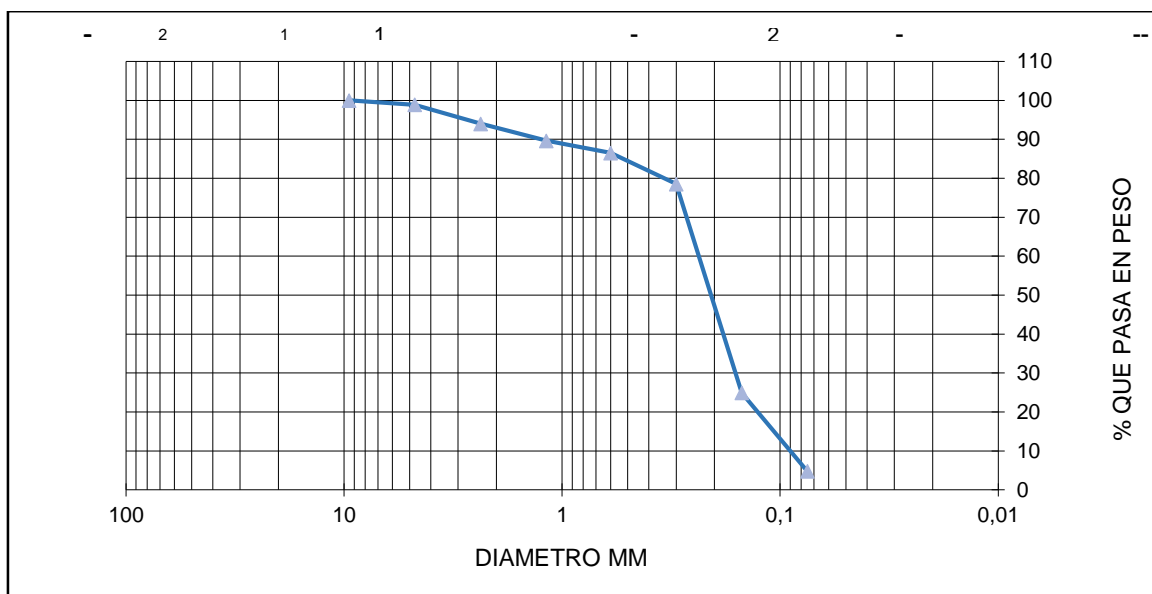


Figura 5. Curva granulométrica de arenas contaminadas, lavadas con detergente.

Después de dos días sumergido en agua con jabón se procedió al lavado, se concentra una capa de grasa en la parte superior del recipiente, en este caso se desintegraron los grumos que contenía la muestra al inicio del proceso, además, cabe resaltar que el lavado del material con jabón fue más rápido que el lavado solo con agua, donde el suelo se torna más áspero y se dificulta el proceso debido a la presencia de grumos que no se trituran fácilmente con las manos.

4.2.2 Determinación del contenido orgánico de un suelo mediante el ensayo de pérdida por ignición (INVE – 121 – 13)

Este ensayo se llevó a cabo, gracias a la colaboración del laboratorio químico de ingeniería ambiental, puesto que en nuestro laboratorio no contamos con el equipo mufla, y este es fundamental para llevar a cabo este proceso. Los datos arrojados por este ensayo fueron los siguientes.

Suelo Contaminado Sin Lavar		
A=	20.01	gr
B=	18.71	gr
C=	85.90	gr
% Contenido de materia orgánica	1.97	%

Tabla 10. Porcentaje de contenido de materia orgánica, arenas contaminadas sin lavar

Suelo Contaminado Con Lavado		
A=	20.00	gr
B=	18.99	gr
C=	85.90	gr
% Contenido de materia orgánica	1.53	%

Tabla 11. Porcentaje de contenido de materia orgánica, arenas contaminadas con lavado

4.2.3 Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos (INVE-123-13). (Ensayo del hidrómetro)

De este ensayo cabe resaltar que se realizó específicamente el ensayo del hidrómetro. El cual arrojó los siguientes resultados:

Tiempo	Lectura	Temperatura
2 min	2,1	25,4 °C
5 min	1,6	25,3 °C
15 min	1,4	25,2 °C
30 min	1,1	25 °C
1 hora	1,0	25 °C
4 horas	1,0	25 °C
24 horas	0,9	23,9 °C
48 horas	0,9	24 °C
120 horas	0,7	24,4 °C
144 horas	0,7	24,9 °C

Tabla 12. Ensayo del hidrómetro para las arenas contaminadas

Este ensayo no tuvo éxito, debido a que no se observó ningún cambio considerable en el color que permitiera el análisis de partículas suspendidas, o del material asentado. En la norma se indica que el ensayo debe durar 1440 minutos, es decir 24 horas, pero para estas arenas contaminadas se hizo la realización del ensayo durante más tiempo esperando un cambio, pero no tuvo éxito, la lectura variaba muy poco a pesar de que los intervalos de tiempo se hacían más largos.

4.3 Caracterización del asfalto

El material bituminoso fue sometido a los ensayos pertinentes para llevar a cabo su caracterización. Todos se llevaron a cabo bajo los requerimientos de la norma INVIAS.

- ✓ Penetración de los materiales bituminosos (INVE-706-13)
- ✓ Puntos de inflamación y combustión mediante la copa abierta de Cleveland (INVE-709-13)
- ✓ Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola) (INVE-712-13)

A continuación se muestran los resultados resumidos en la tabla.

	Penetración Promedio	Punto de ablandamiento °C	Punto de ignición °C	Punto de llama °C	Peso específico gr/Cm3
Molde Pq	69	55	302	225	1.13
Molde Md	65				
Molde Gr	80				

Tabla 13. Resultados ensayos realizados al asfalto

4.4 Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall (INVE-748-13)

En la siguiente tabla se muestra el resumen de resultados arrojados durante la realización del ensayo Marshall, que fue realizado a las briquetas con mezclas densas en caliente. Se tuvieron en cuenta tres mezclas diferentes cada una con tres diferentes porcentajes de asfalto.

Tipo de muestra	Peso Unitario Lb/in3	% Vacíos Agregados	% Vacíos Mezcla	Estabilidad (Libras)	Flujo (mm)
Testigo, asfalto de dudosa procedencia	136,13	17,58	11,21	3877,33	18,17
Testigo con 4,5% de asfalto	140,18	15,13	8,57	1971,13	26,38
Testigo con 5,0% de asfalto	142,48	14,18	7,07	2040,00	27,00
Testigo con 5,5% de asfalto	141,93	14,96	7,43	1292,25	26,00
Contaminada 1 y con 4,5% de asfalto	145,02	12,19	5,41	1001,13	18,75
Contaminada 1 y con 5,0% de asfalto	144,31	13,08	5,87	1200,13	16,75
Contaminada 1 y con 5,5% de asfalto	144,04	13,70	6,05	1056,29	22,71
Contaminada 2 y con 4,5% de asfalto	139,62	15,46	8,94	2093,43	17,00
Contaminada 2 y con 5,0% de asfalto	142,35	14,26	7,16	1361,25	17,25
Contaminada 2 y con 5,5% de asfalto	143,33	14,12	6,51	949,00	16,86

Tabla 14. Resumen de la prueba Marshall

5. ANALISIS DE RESULTADOS

La implementación de nuevas tecnologías, generan un crecimiento en el desarrollo investigativo, mediante materiales innovadores, lo cual parte del aprovechamiento de materiales ya existentes o de residuos de los mismos. Muchas veces la producción de ciertos elementos genera una problemática para el medio ambiente, causando daños irreversibles. Encontrar una solución en la cual se puedan reutilizar estos materiales, residuos o elementos, de manera que se puedan transformar para así generar elementos constructivos, económicos y amigables con el medio ambiente.

Lo que se buscó con este proyecto, fue una solución para aquellas arenas contaminadas debido a un riego, provocado o no, las cuales si son apiladas en un espacio o si se dejan a la intemperie van a generar daños al medio ambiente, por esta razón en busca de una mejor alternativa se procede a implementar estas arenas en mezclas asfálticas, esperando que al ser contaminadas por derivados del crudo y al ser el asfalto un derivado del mismo, se puede hallar una adherencia entre estos materiales aportando propiedades mecánicas favorables en la mezcla.

Se generaron tres tipos de mezclas con tres diferentes porcentajes de asfalto, a las cuales se les realizó varios estudios que se encuentran en esta investigación. Donde estos elementos fueron incorporados en una mezcla densa en caliente tipo 2, MDC-2.

5.1 Caracterización del material granular

En la elaboración del diseño Marshall se trabajó con una mezcla de agregados de la siguiente proporción, la mezcla testigo estaba conformada por el 100% de agregado grueso y 100% de agregado fino, la mezcla contaminada número 1, se le modificaron los porcentajes de la siguiente manera, 100% grueso, 50% agregado fino y 50% de agregado contaminado y por último la mezcla contaminada número 2, se hizo con 100% agregado grueso, 75% agregado fino y 25% de agregado contaminado, lo que se planteó fue una modificación en el agregado fino con la implementación de las arenas contaminadas, cada una de estas mezclas fue elaborada con el 4.5%, 5.0% y el 5.5% de asfalto. En la siguiente tabla se muestra en resumen la verificación del cumplimiento de las normas.

Ensayo	Norma	Especificación	Valor	Unidad
	INV	INV Art 400		
		MDC		
Granulometría	E - 213	-	-	-
Gravedad Especifica De Gruesos	E - 223	-	2,528	g/cm3
Gravedad Especifica De Finos	E - 222	-	2,355	g/cm4
Caras Fracturadas	E - 227	76% Máximo	75,67	%
Índice de Aplanamiento	E - 213	30% Máximo	18,95	%
Índice de Alargamiento	E - 213	30% Máximo	18,72	%
% de Adsorción de Agregado Grueso	E - 223	-	1,69	%
% de Adsorción de Agregado Fino	E - 222	-	2,38	%

Tabla 15. Caracterización de los agregados pétreos

5.2 Caracterización de las arenas contaminadas

La arena contaminada empleada en esta investigación tenía una coloración gris oscura y presentaba grumos, pero siendo un material que pasa por el tamiz No.4, es tomado como fino, de acuerdo a los ensayos realizados a la misma. Adicionalmente se le halló la gravedad específica para finos así como también el contenido de materia orgánica por medio de la pérdida de ignición.

Para la preparación de la mezcla que iba a llevar un porcentaje de estas arenas contaminadas, se determinó que se reemplazarían los tamices No.4, No.10 y No.40. Siendo esta la adición para la elaboración del diseño Marshall de la mezcla densa en caliente modificada (MDC-2). En la siguiente tabla se muestra la caracterización de estas arenas contaminadas.

Ensayo	Norma	Especificación	Valor	Unidad
	INV	INV Art 400		
		MDC		
Granulometría	E - 213	-	-	-
Gravedad Especifica De Finos	E - 222	-	2,635	g/cm3
Contenido de materia orgánica	E -121	1,60	1,53	%
% de Adsorción de Agregado Fino	E - 222	-	0,97	%

Tabla 16. Caracterización de las arenas contaminadas

5.3 Caracterización del asfalto

El asfalto utilizado para la realización de estas mezclas densas en caliente fue de 60/70, sin modificar, ya que este estudio se basaba solo en el comportamiento de las arenas contaminadas. En la siguiente tabla se muestra el resumen de los ensayos con su respectiva norma y resultados.

Ensayo	Norma	Especificación		Valor
	INV	Min	Max	
Punto Ignición (°C)	INV E-709	230	-	302
Punto llama (°C)	INV E-709	230	-	225
Peso específico (g/cm ³)	INV E-711	-	-	1.13
Punto Ablandamiento (°C)	INV E-712	-	-	55
Índice penetración (0.1mm)	INV E-724	60	70	71,3

Tabla 17. Caracterización del asfalto

5.4 Prueba Marshall

Para saber el comportamiento de estas arenas contaminadas, era necesaria la realización de la prueba Marshall para poder obtener un resultado diciente de estabilidad y flujo que permita concluir cual fue la mezcla que obtuvo un comportamiento óptimo frente a la modificación a la que fue sometida.

Proporción	% de Asfalto	Flujo	Estabilidad	Gbulk	Peso unitario Lb/in ³	% de vacíos mezcla total	% vacíos agregados	% Vacíos llenos	Estabilidad / Flujo
Testigo, asfalto de dudosa procedencia	4,5	18,17	3877,33	2,26	136,13	11,21	17,58	0,61	213,43
Testigo con 4,5% de asfalto	4,5	26,38	1971,13	2,22	140,18	8,57	15,13	0,64	74,73
Testigo con 5,0% de asfalto	5,0	27,00	2040,00	2,26	142,48	7,07	14,18	0,67	75,56
Testigo con 5,5% de asfalto	5,5	26,00	1292,25	2,24	141,93	7,43	14,96	0,67	49,70
Contaminada 1 y con 4,5% de asfalto	4,5	18,75	1001,13	2,29	145,02	5,41	12,19	0,69	53,39

Contaminada 1 y con 5,0% de asfalto	5,0	16,75	1200,13	2,29	144,31	5,87	13,08	0,69	71,65
Contaminada 1 y con 5,5% de asfalto	5,5	22,71	1056,29	2,30	144,04	6,05	13,70	0,69	46,50
Contaminada 2 y con 4,5% de asfalto	4,5	17,00	2093,43	2,24	139,62	8,94	15,46	0,63	123,14
Contaminada 2 y con 5,0% de asfalto	5,0	17,25	1361,25	2,26	142,35	7,16	14,26	0,67	78,91
Contaminada 2 y con 5,5% de asfalto	5,5	16,86	949,00	2,22	143,33	6,51	14,12	0,68	56,30

Tabla 18. Resumen de estudio de los especímenes con las diferentes proporciones

Se analizó gráficamente el comportamiento de cada uno de los datos obtenidos lo que se busco fue comprar cuál de las mezclas era la mejor. Estos son los datos obtenidos gráficamente.

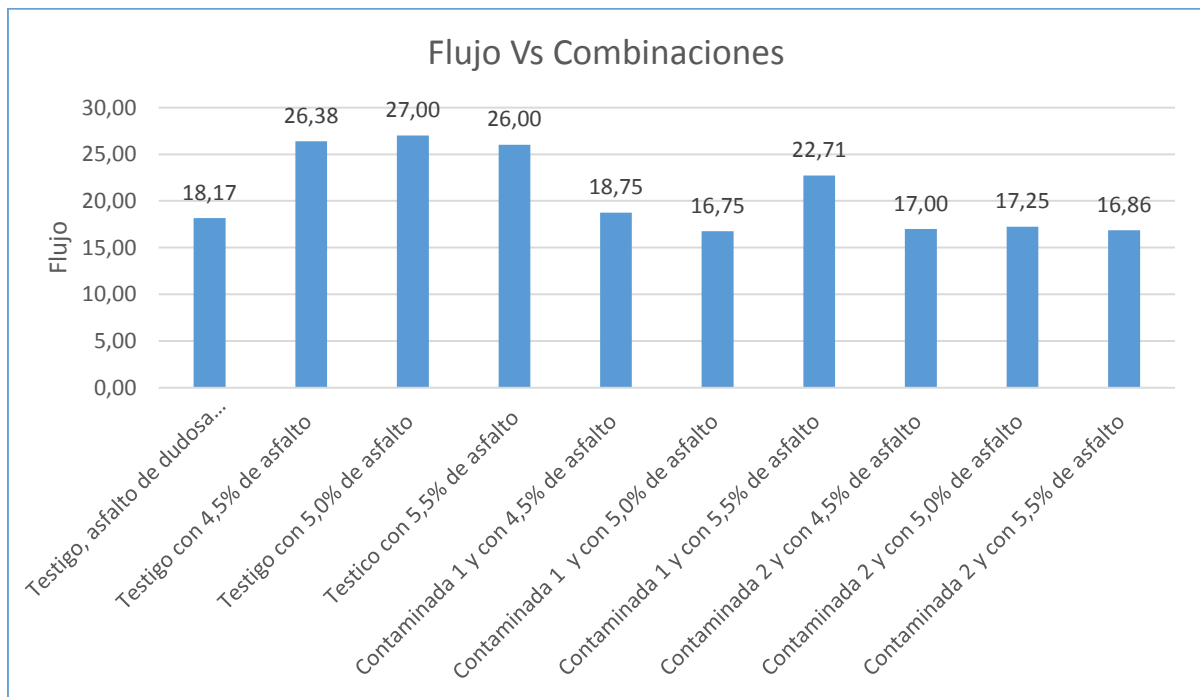


Figura 6. Flujo Vs mezclas testigo y combinaciones con la arena contaminada

Se puede observar que las mezclas hechas con el asfalto de dudosa procedencia tienen bajo flujo y esto puede ser a causa de que este asfalto utilizado inicialmente no era apto para la realización de mezclas asfálticas pues anteriormente había sido contaminado. Las briquetas testigo tienen un buen

comportamiento mientras que a las que se les añadió arena contaminada tienen un bajo comportamiento respecto a la testigo. Se nota más esta variación al usar más asfalto, es decir, en las mezclas contaminadas y con un porcentaje del 5.0% y del 5.5% de asfalto, es donde se observa un bajo rendimiento.

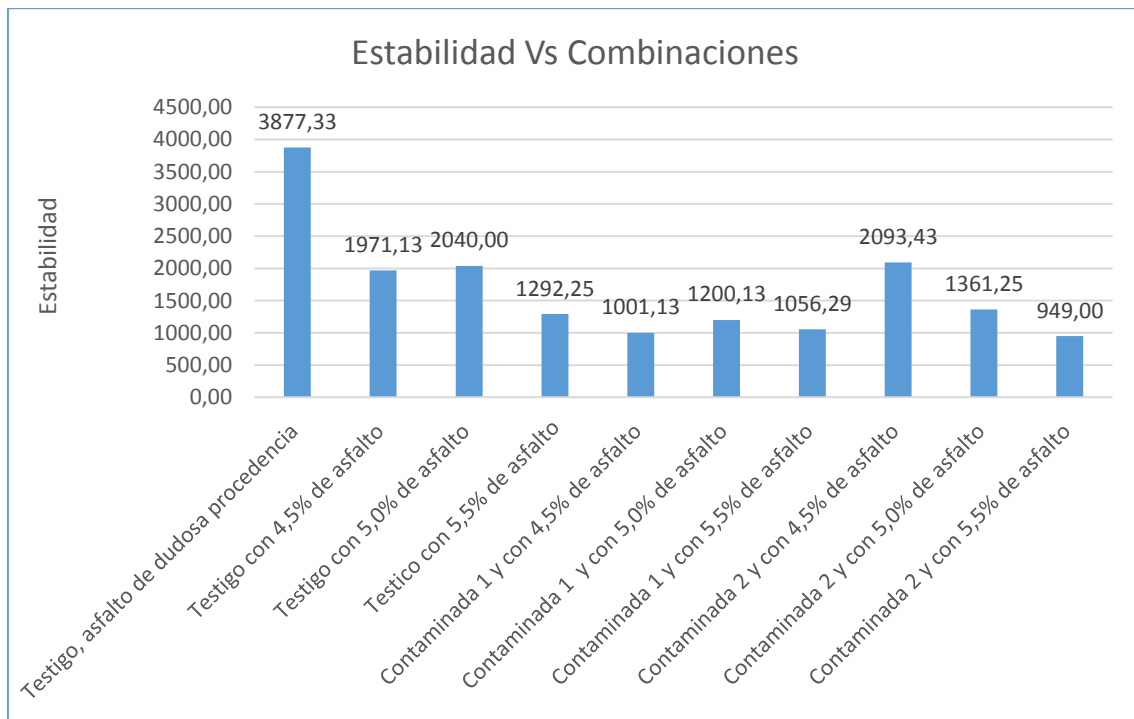


Figura 7. Estabilidad Vs Mezclas testigo y combinaciones con arena contaminada

La muestra elaborada con el asfalto de dudosa procedencia, el cual fue contaminado anteriormente, presenta resultados positivos, y en ninguna de las otras mezclas se llega a la resistencia de este, este dato se expone para tener en cuenta que iniciando esta tesis nos encontramos con este asfalto que no era el que se utilizaría en esta ocasión ya que esta investigación busca es el comportamiento de las arenas contaminadas en mezclas densas en caliente sin modificaciones en el asfalto, por esta razón este dato no es un dato guía, sino más bien de aclaración.

Con respecto a los otros datos, se puede observar que en la mezcla contaminada 1, que es la que fue elaborada con el 100% de agregado grueso, 50% agregado fino y 50% de arenas contaminadas, no sobrepasan los rangos establecidos por la testigo, es decir que se obtuvo bajo resistencia. Lo mismo sucede con la mezcla contaminada 2, que fue elaborada con 100% agregado grueso, 75% agregado fino y 25% de arenas contaminadas, excepto por la mezcla contaminada 2 con un porcentaje del 4.5% de asfalto, esta supera el rango de la muestra patrón para este porcentaje.

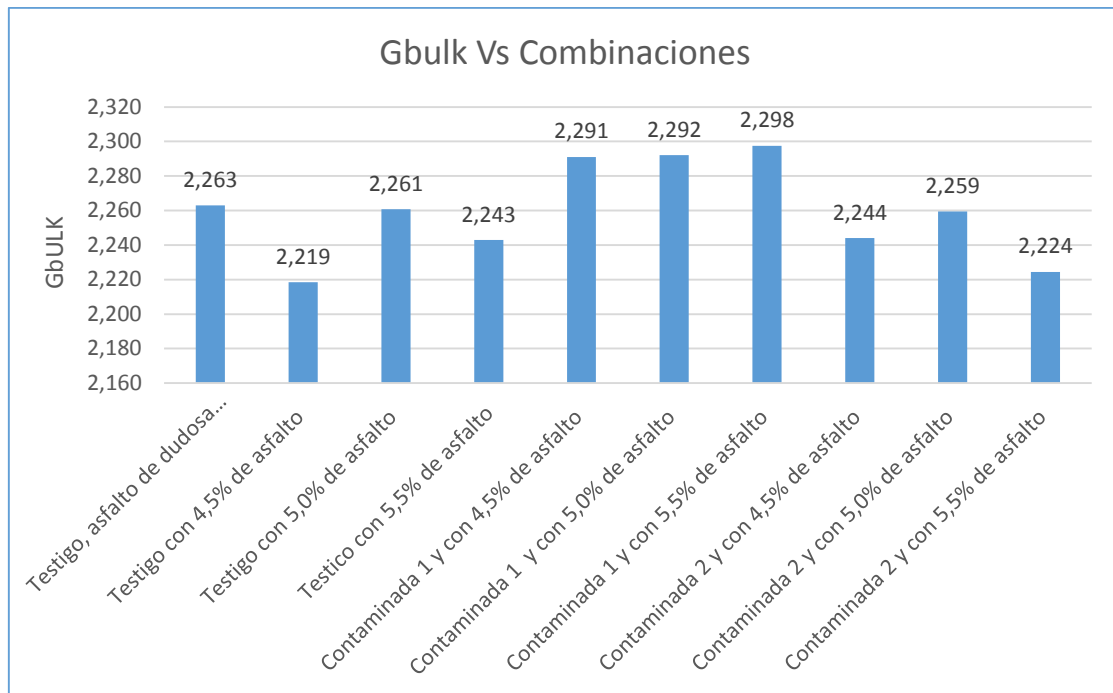


Figura 8. Gravedad específica de Bulk Vs Combinaciones

Las muestras con la mezcla contaminada 1, obtuvo mayor densidad sobrepasando las muestras testigo. Este aumento es constante en las tres mezclas cada una con 100% de agregado grueso, 50% agregado fino y 50% de arenas contaminadas, y con los tres diferentes porcentajes de asfaltos con las cuales fue diseñada, del 4.5%, 5.0% y 5.5%.

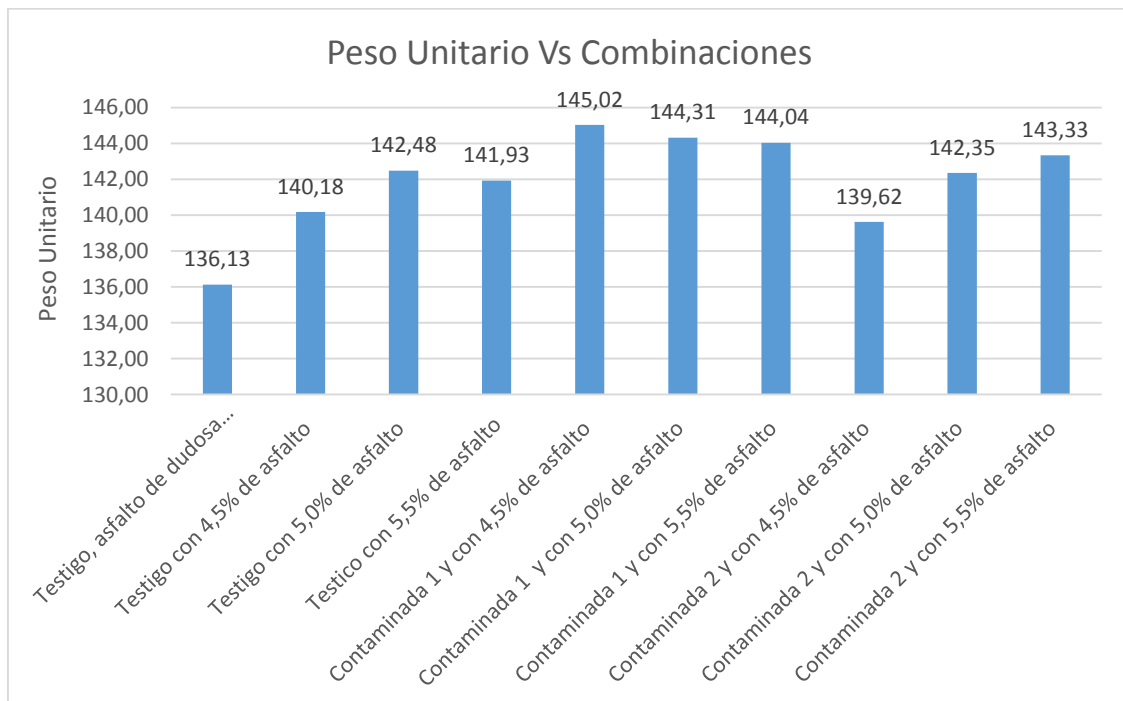


Figura 9. Peso Unitario Vs Combinaciones

Como se observa en la figura, las mezclas contaminadas 1, siguen siendo superiores tanto a la testigo como a la mezcla contaminada 2.

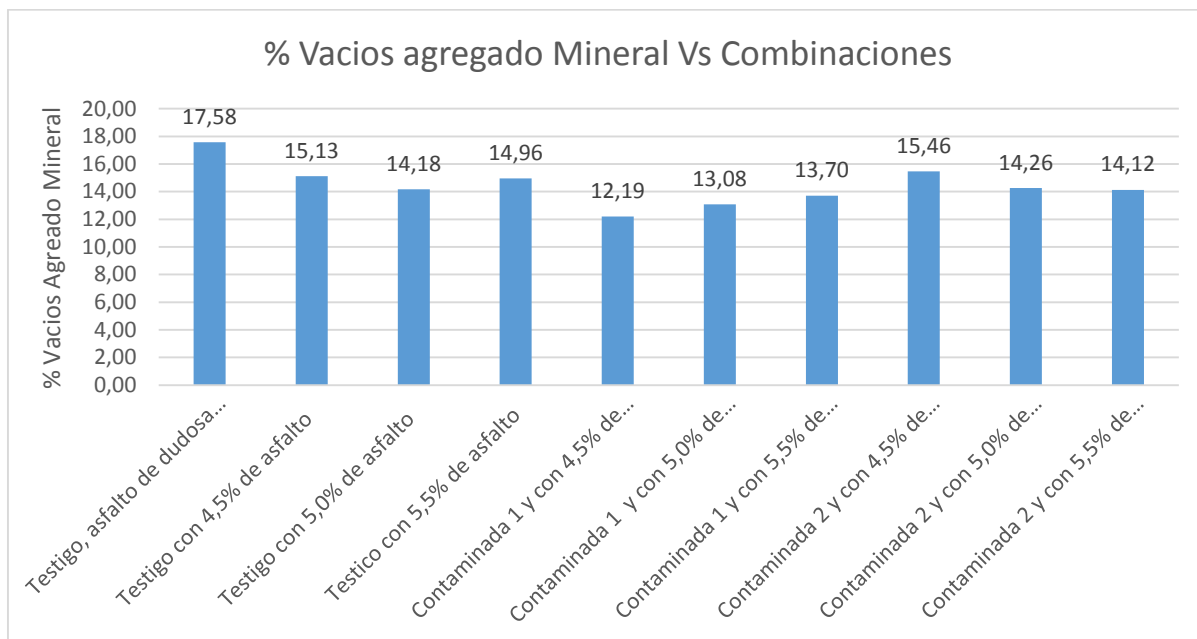


Figura 10. % vacíos agregado mineral Vs combinaciones

En esta ocasión la mezcla contaminada 2 supera a la mezcla contaminada 1 y a la muestra testigo más específicamente en aquellas que se usó el 4.5% y el 5.0% de asfalto.

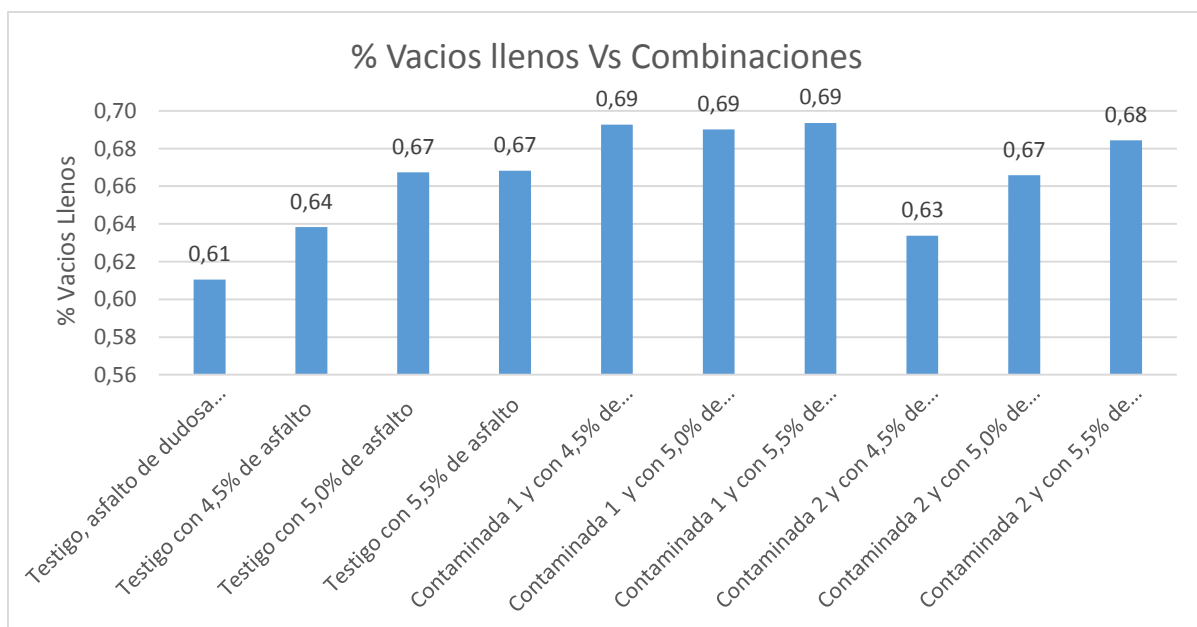


Figura 11. %Vacíos Llenos Vs Combinaciones

En estos resultados es notorio que las mezclas contaminadas 1, tienen el mismo comportamiento, es constante el resultado, superando a la muestra testigo.

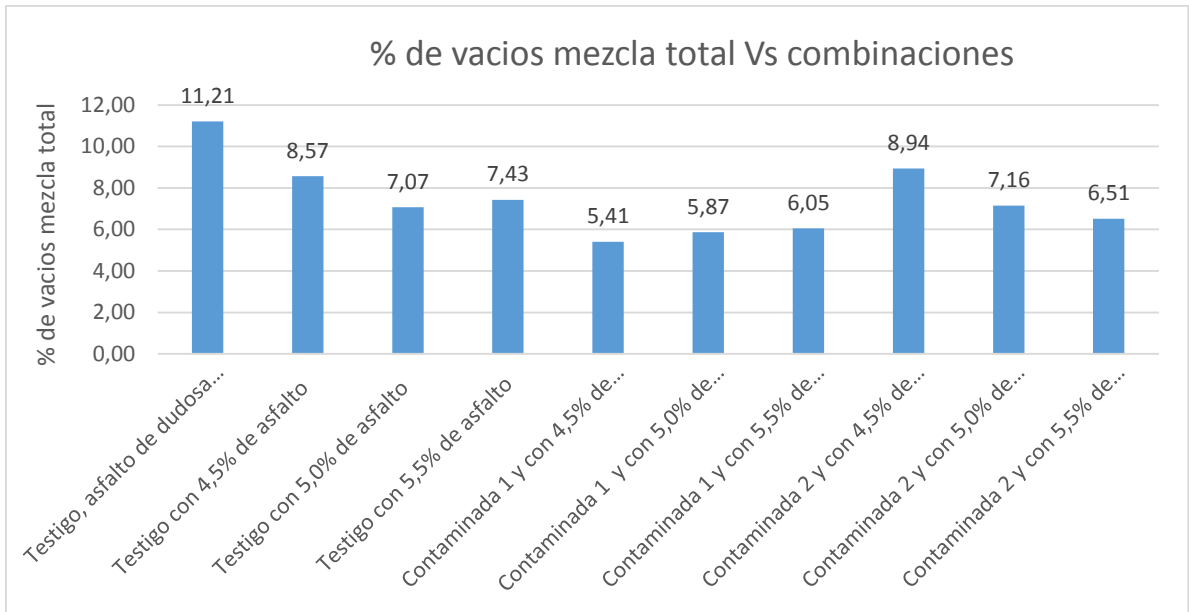


Figura 12. % de vacíos mezcla total Vs combinaciones

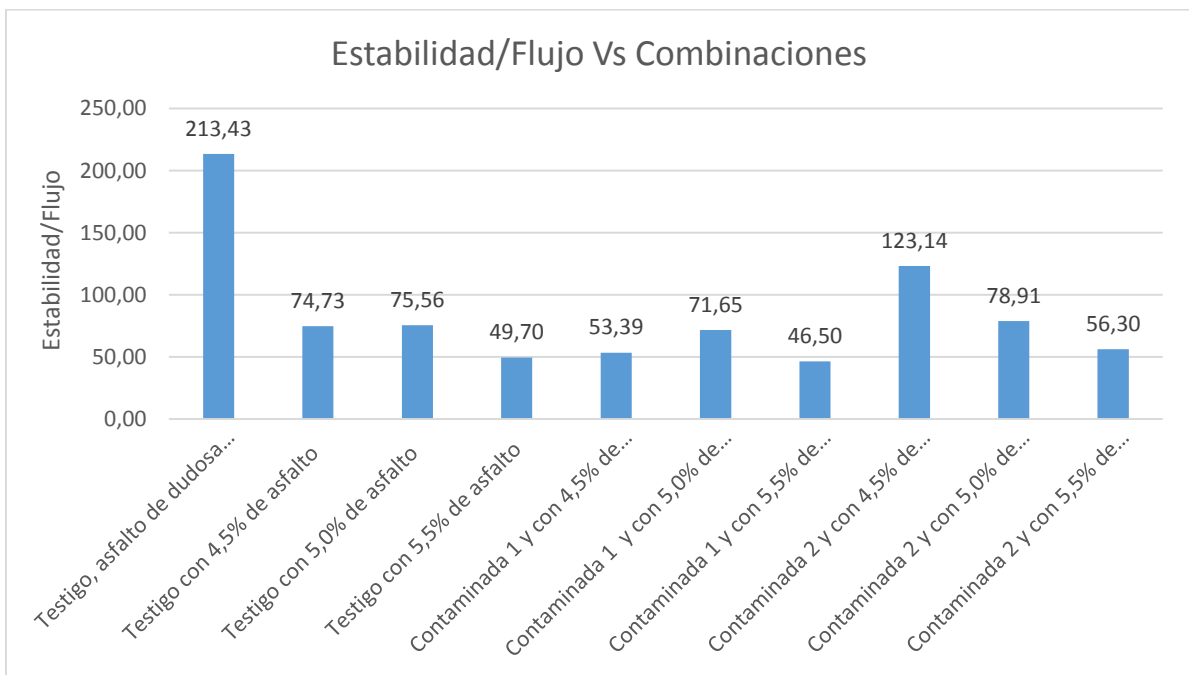


Figura 13. Estabilidad/Flujo Vs Combinaciones

5.5 Identificación mejor mezcla modificada

Con el fin de obtener datos precisos se hizo una comparación entre los resultados obtenidos por los ensayos realizados a las briquetas. Se compararon las muestras que pudieron concluir esta investigación.

Se comparó la muestra testigo con la que tuvo un mejor comportamiento de acuerdo con su estabilidad y flujo, densidad de Bulk y porcentaje de vacíos. En la siguiente tabla se muestra el resultado.

Proporción	% de Asfalto	Flujo	Estabilidad	Gbulk	Peso unitario Lb/in ³	% de vacíos mezcla total	% vacíos agregados	% Vacíos llenos	Estabilidad / Flujo
Testigo, asfalto de dudosa procedencia	4,5	18,17	3877,33	2,26	136,13	11,21	17,58	0,61	213,43
Testigo con 4,5% de asfalto	4,5	26,38	1971,13	2,22	140,18	8,57	15,13	0,64	74,73
Testigo con 5,0% de asfalto	5,0	27,00	2040,00	2,26	142,48	7,07	14,18	0,67	75,56
Testigo con 5,5% de asfalto	5,5	26,00	1292,25	2,24	141,93	7,43	14,96	0,67	49,70
Contaminada 1 y con 4,5% de asfalto	4,5	18,75	1001,13	2,29	145,02	5,41	12,19	0,69	53,39
Contaminada 1 y con 5,0% de asfalto	5,0	16,75	1200,13	2,29	144,31	5,87	13,08	0,69	71,65
Contaminada 1 y con 5,5% de asfalto	5,5	22,71	1056,29	2,30	144,04	6,05	13,70	0,69	46,50
Contaminada 2 y con 4,5% de asfalto	4,5	17,00	2093,43	2,24	139,62	8,94	15,46	0,63	123,14
Contaminada 2 y con 5,0% de asfalto	5,0	17,25	1361,25	2,26	142,35	7,16	14,26	0,67	78,91
Contaminada 2 y con 5,5% de asfalto	5,5	16,86	949,00	2,22	143,33	6,51	14,12	0,68	56,30

Tabla 19. Mejores mezclas obtenidas por los resultados de los ensayos aplicados

6. Conclusiones

Con respecto a los agregados pétreos

El material granular es proveniente de la fuente de explotación natural ubicada en Pescadero (Santander), al cual se le realizaron los pertinentes ensayos para su clasificación y caracterización, cumpliendo con lo establecido en las especificaciones del Instituto Nacional de Vías. En toda mezcla es de suma importancia los finos y más si es para mezclas de carpeta asfáltica, y aunque el agregado cumplió con los límites mínimos y máximos en la granulometría, se encontró una deficiencia en el tamiz No.200 y el pasa 200; estos finos son llenante mineral y son los encargados de la adhesión entre el agregado.

Con referencia de las arenas contaminadas

Este material fue aportado por el Instituto Colombiano del Petróleo, ICP, el cual suministro estas arenas que habían sido recopiladas debido a un derrame ocasionado en Tumaco, Nariño. En busca de una solución a esta problemática que sigue vigente en nuestro país, ya que apilar estas arenas y dejarlas sin ningún uso también son perjudiciales para el medio ambiente.

Gracias a los ensayos realizados se pudo determinar que este material tiene un tamaño máximo No. 50, se pueden encontrar partículas más grandes pero muchas de ellas se deben a grumos los cuales deben ser triturados de manera mecánica ya que de lo contrario sus resultados no serán los óptimos.

Estas arenas contaminadas habían sido evaluadas en tres puntos diferentes en el lugar donde había ocurrido el derrame, en el cual se realizó un informe para el Instituto Colombiano de Petróleo, ICP, pero para este estudio no se tuvo en cuenta estos tres puntos, al contrario se mezclaron los tres y se generalizó la caracterización y clasificación. Se debe resaltar que aun así el porcentaje de materia orgánica es un poco elevado si se realiza el ensayo con las arenas en su estado original, pero si se someten a un lavado con detergente baja un poco este porcentaje de contenido de materia orgánica.

Según las mezclas asfálticas en las que fueron empleadas estas arenas, al utilizarlas en un mayor porcentaje de estas, los resultados arrojados por el porcentaje de vacíos de la mezcla en total, fue menor a los arrojados por las muestras testigo mientras que al hacer la mezcla con un porcentaje menor los resultados dieron un poco más alto y cercanos a la muestra testigo. Se debe tener precaución con los datos superiores ya que estos pueden provocar endurecimiento temprano del asfalto seguido por agrietamiento o desintegración debido a la infiltración de agua y baja estabilidad.

En la mezcla contaminado 2, la cual tenía el 100% de agregado grueso, 75% agregado fino y 25% de agregado contaminado, las briquetas realizadas con esta mezcla presentaron fallas antes de ser ensayadas, al sacarlas de baño maría ya la probeta se encontraba agrietada y separado el asfalto del agregado.

Para la realización de este estudio se realizaron panelas de las cuales se extraían núcleos que fueron cortados a la medida de una briqueta manual a las cuales se les aplicaron los ensayos establecidos por el método Marshall, pero por cada panela realizada, se elaboraba una briqueta manual para así poder comparar la resistencia obtenida a partir de núcleos de una panela con la resistencia que se puede obtener con la realización de una briqueta manual. Estos resultados fueron notablemente diferentes, ya que en las briquetas manuales se encontró mayor estabilidad superando en ocasiones el doble de lo resistido por una briqueta sacada de un núcleo de panela. Lo que nos indica que sigue siendo más eficiente y durable el método tradicional y que aún falta más investigación que permita llegar a las mismas condiciones del método manual y tradicional.

Durante la realización del mezclado del asfalto con los agregados tradicionales y las arenas contaminadas, era aparente la adherencia entre los materiales, pero en el momento de ser sumergida la briqueta en agua, y al ser sacada, era visible la afectación que esta había producido en la briqueta, debido a los vacíos que permiten la filtración del agua, así fue como varias briquetas fallaron antes de ser ensayadas, siendo descartadas del análisis.

La relación estabilidad/flujo identifico que las muestras realizadas con la mezcla contaminada presenta valores cercanos a los resultados obtenidos con las muestras testigo y que tienen buena respuesta frente a las sollicitaciones seguidas por las muestras elaboradas con la mezcla contaminada 2.

7. RECOMENDACIONES

Con respecto al laboratorio

- ✓ Se recomienda que el laboratorio pueda contar con un control de calidad y de inventario, para que de esta manera se pueda tener una información base de los materiales para que pueda ser confrontada por medio de los ensayos de caracterización.

Con respecto a la mezcla

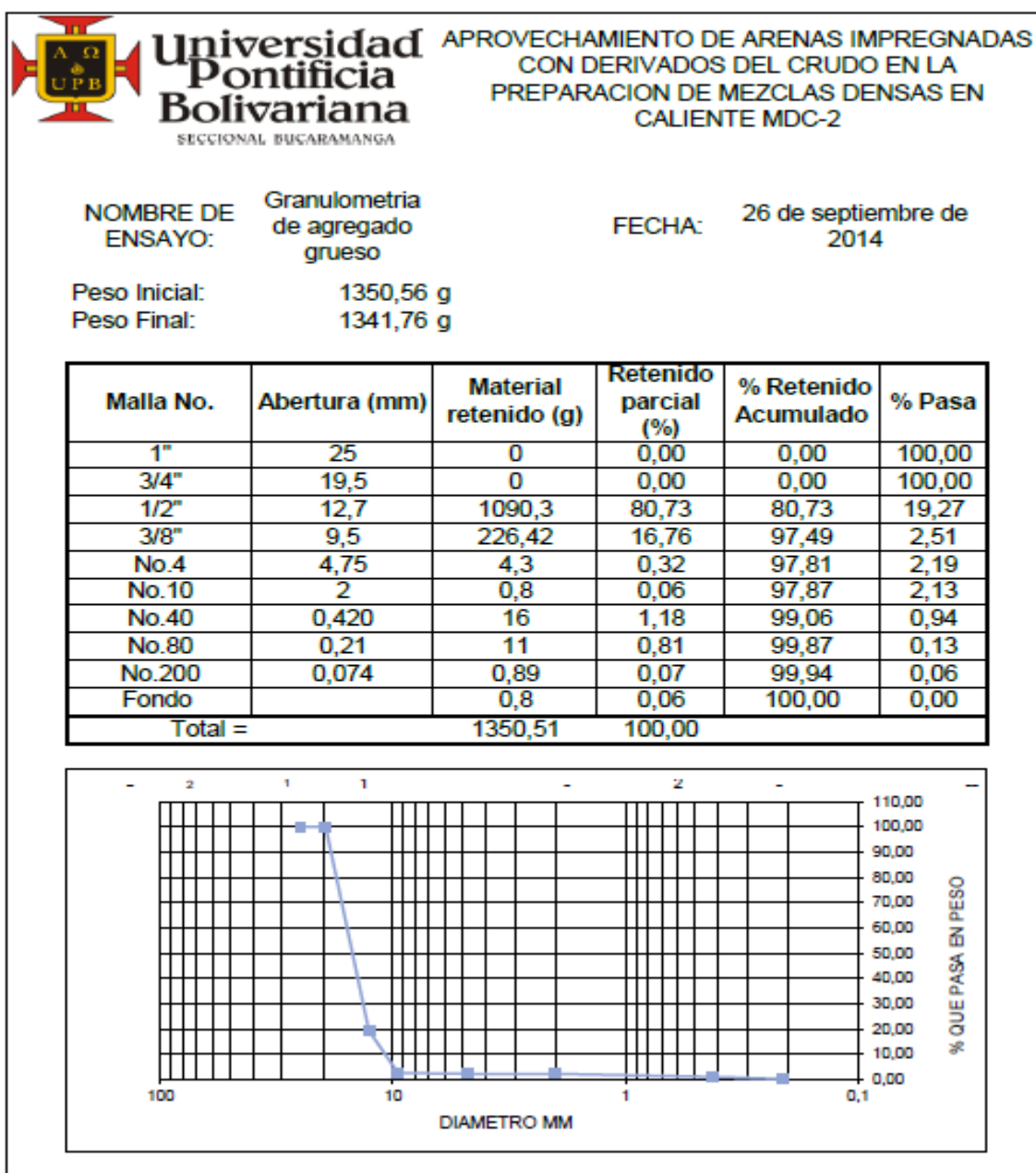
- ✓ Debido a que los resultados en la prueba Marshall no son los más satisfactorios, se recomienda que en caso de decidir utilizar estas arenas en la construcción o rehabilitación de una vía, se implementen en vías terciarias, vías en las que el tráfico sea bajo.
- ✓ Es posible que se logre encontrar la mezcla perfecta, pero para esto se deben continuar haciendo pruebas, cambiando los porcentajes, ya sea del asfalto, cambiándolos por puntos medios, como también cambiando la combinación de los agregados.
- ✓ Durante este proceso se observó que la diferencia entre las briquetas sacadas de núcleos y las briquetas hechas manualmente, de manera tradicional, es bastante grande, por esta razón se sugiere que si se va a seguir con el estudio, se hagan briquetas manuales para así poder tener resultados más acertados que concuerden con lo establecido en las normas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

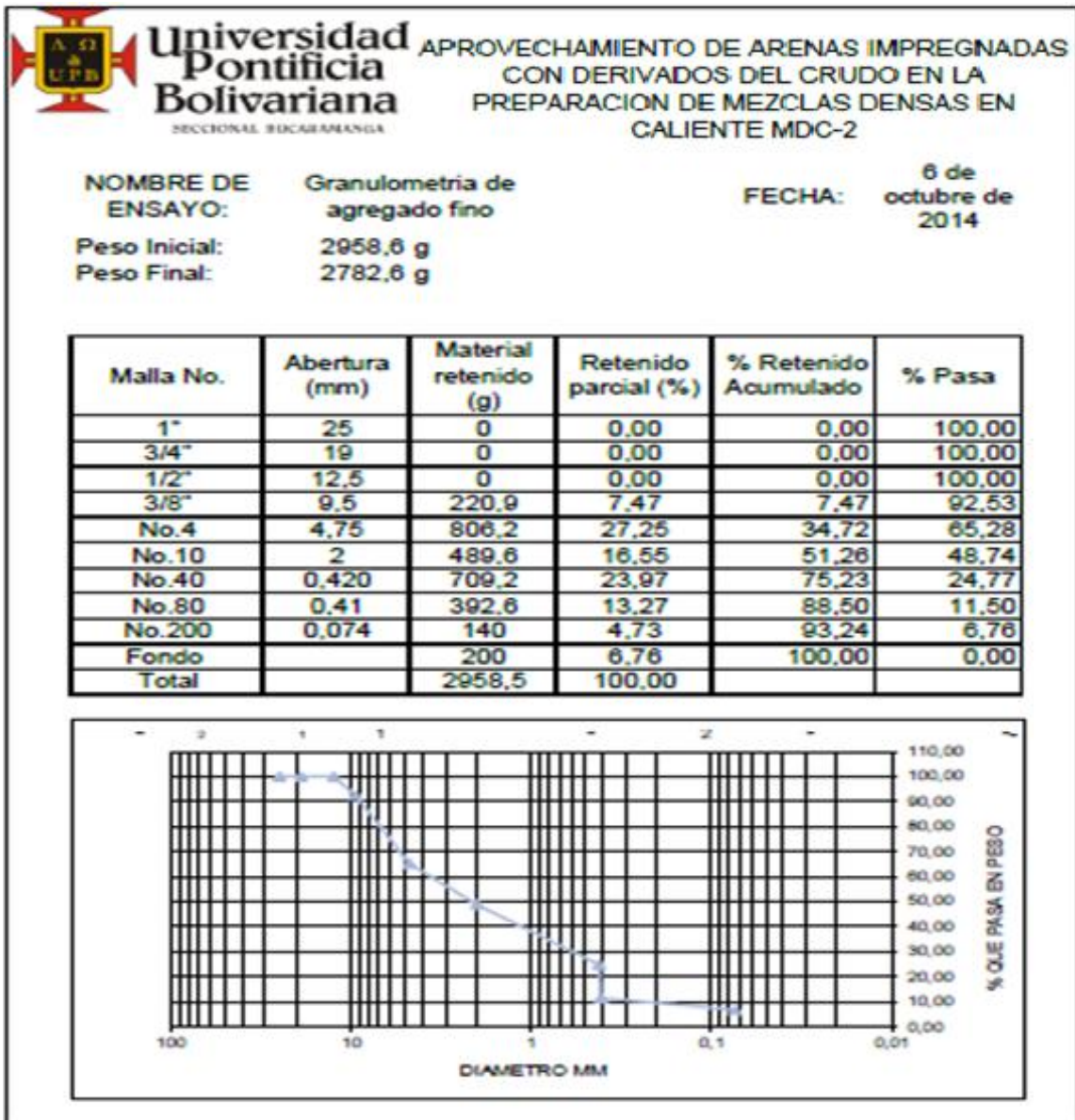
- ✓ DELGADO Garnica Julieth, ARIZA Mahecha Johany Sneyder, Evaluación de una mezcla densa en caliente modificada con la adición de cenizas volantes y caucho. Tesis de grado para optar el título de ingeniero civil, Universidad Pontificia Bolivariana. 2014.
- ✓ OROZCO Muñoz Guillermo Andrés, MURILLO Chacón Juan pablo, Evaluación del comportamiento de una mezcla densa en caliente modificada con ceniza proveniente de locaciones petroleras. Tesis de grado para optar el título de ingeniero civil, Universidad Pontificia Bolivariana. 2011.
- ✓ INVIAS, especificación técnica, artículo 450-07
- ✓ I.N.V. E – 748, Instituto nacional de vías, Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall. 2013.
- ✓ GONZÁLEZ Rudas, Néstor Julio, GUTIÉRREZ González, Wilson Alfonso, Comportamiento de una mezcla densa en caliente MDC-2 modificada con limalla. 2013. Bucaramanga.
- ✓ ING. MINAYA GONZÁLEZ, Silene, M.I. ORDOÑEZ HUAMÁN, Abel, Manual de laboratorio ensayos para pavimentos, volumen 1. 2001. Lima
- ✓ REMOLINA BONILLA, Miguel Ángel, Diseño por el método Marshall de mezclas asfálticas en la planta de Tecnopavimentos S. A, supervisor del sistema de calidad y auxiliar de residente en obra. 2011. Bucaramanga.

ANEXOS


Anexo 1. Análisis granulométrico del agregado grueso




Anexo 2. Análisis granulométrico del agregado fino




Anexo 3. Gravedad específica y adsorción del agregado grueso

 Universidad Pontificia Bolivariana SECCIONAL BUCARAMANGA		APROVECHAMIENTO DE ARENAS IMPREGNADAS CON DERIVADOS DEL CRUDO EN LA PREPARACION DE MEZCLAS DENSAS EN CALIENTE MDC-2	
NOMBRE DE ENSAYO:		Gravedad específica y absorción del agregado grueso	
Densidad Relativa (gravedad específica) SSS=	$B/(B-C)$		2,570
Densidad Relativa Aparente (Gravedad específica aparente) =	$A/(A-C)$		2,640
Densidad SH, Kg/M3=	$997,5*A/(B-C)$		2521,34
Densidad SH, Lb/pie3=	$62,27*A/(B-C)$		157,40
Densidad SSS, Kg/M3 =	$997,5*B/(B-C)$		2563,92
Densidad SSS, Lb/pie3 =	$62,27*B/(B-C)$		160,06
Densidad Aparente Kg/M3 =	$997,5*A/(A-C)$		2633,77
Densidad Aparente Lb/pie3=	$62,27*A/(A-C)$		164,42
Absorción, % =	$(B-A/A)*100$		1,69


Anexo 4. Gravedad específica y adsorción del agregado fino

 Universidad Pontificia Bolivariana <small>SECCIONAL BUCARAMANGA</small>		APROVECHAMIENTO DE ARENAS IMPREGNADAS CON DERIVADOS DEL CRUDO EN LA PREPARACION DE MEZCLAS DENSAS EN CALIENTE MDC-2
NOMBRE DE ENSAYO: Gravedad Especifica y Absorción del Agregado Fino		
Peso Seco	A=	488,4
Peso Superficialmente Seco	B=	690,2
Peso Sumergido	C=	982,8
Peso Saturado y superficialmente seco	S =	500
Densidad Relativa (Gravedad Especifica) SH=	$A/(B+S-C)$	2,35
Densidad Relativa (Gravedad Especifica) SSS=	$S/(B+S-C)$	2,41
Densidad Relativa Aparente (Gravedad Especifica Aparente) =	$A/(B+A-C)$	2,49
Densidad SH, Kg/M3 =	$997,5 \cdot A/(B+S-C)$	2348,98
Densidad SH, Lb/pe3 =	$62,27 \cdot A/(B+S-C)$	146,64
Densidad SSS, Kg/M3=	$997,5 \cdot S/(B+S-C)$	2404,77
Densidad SSS, Lb/pe3 =	$62,27 \cdot S/(B+S-C)$	150,12054
Densidad Aparente, Kg/M3 =	$997,5 \cdot A/(B+A-C)$	2488,15
Densidad Aparente Lb/pe3 =	$62,27 \cdot A/(B+A-C)$	155,33
Absorcion, % =	$(S-A) \cdot 100$	2,38

Anexo 5. Porcentaje de caras fracturadas en los agregados

		Universidad Pontificia Bolivariana		APROVECHAMIENTO DE ARENAS IMPREGNADAS CON DERIVADOS DEL CRUDO EN LA PREPARACION DE MEZCLAS DENSAS EN CALIENTE MDC-2	
SECCIONAL BUCARAMANGA					
NOMBRE DE ENSAYO:		Caras Fracturadas			
Tamiz		Peso Inicial	Peso Caras Fracturadas	Peso Caras no Fracturadas	% De Caras Fracturadas
Pasa	Retenido				
1 1/2"	1"	0	0	0	0
1"	3/4"	0	0	0	0
3/4"	1/2"	328	178	140	55,97
1/2"	3/8"	1500	1385	111	92,58

Anexo 6. Índice de aplanamiento y alargamiento de los agregados

 Universidad Pontificia Bolivariana SECCIONAL BUCARAMANGA	APROVECHAMIENTO DE ARENAS IMPREGNADAS CON DERIVADOS DEL CRUDO EN LA PREPARACION DE MEZCLAS DENSAS EN CALIENTE MDC-2																																															
	NOMBRE DE ENSAYO:	Índice de aplanamiento y alargamiento																																														
Peso Inicial	4632,6 gr																																															
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 10%;">Malla No. (Pulg)</th> <th style="width: 10%;">Masa retenida (gr)</th> <th style="width: 10%;">Masa que pasa por el tamiz de ranura (gr)</th> <th style="width: 10%;">% De aplanamiento</th> <th style="width: 10%;">Masa retenida en el tamiz de barras (gr)</th> <th style="width: 10%;">% De Alargamiento</th> <th style="width: 10%;">Índice de aplanamiento (AI) % =</th> <th style="width: 10%;">Índice de alargamiento (IL) % =</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1"</td> <td>21</td> <td>0</td> <td>0,00</td> <td>0</td> <td>0,00</td> <td rowspan="5" style="text-align: center; vertical-align: middle;">84,16</td> <td rowspan="5" style="text-align: center; vertical-align: middle;">18,95</td> </tr> <tr> <td>3/4"</td> <td>548</td> <td>60</td> <td>10,95</td> <td>85</td> <td>15,51</td> </tr> <tr> <td>1/2"</td> <td>1384</td> <td>299</td> <td>21,60</td> <td>340</td> <td>24,57</td> </tr> <tr> <td>3/8"</td> <td>840</td> <td>147</td> <td>17,50</td> <td>210</td> <td>25,00</td> </tr> <tr> <td>1/4"</td> <td>1106</td> <td>224</td> <td>20,25</td> <td>243</td> <td>21,97</td> </tr> <tr> <td>Total =</td> <td>3899</td> <td>730</td> <td>70</td> <td>878</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Malla No. (Pulg)	Masa retenida (gr)	Masa que pasa por el tamiz de ranura (gr)	% De aplanamiento	Masa retenida en el tamiz de barras (gr)	% De Alargamiento	Índice de aplanamiento (AI) % =	Índice de alargamiento (IL) % =	1"	21	0	0,00	0	0,00	84,16	18,95	3/4"	548	60	10,95	85	15,51	1/2"	1384	299	21,60	340	24,57	3/8"	840	147	17,50	210	25,00	1/4"	1106	224	20,25	243	21,97	Total =	3899	730	70	878			
Malla No. (Pulg)	Masa retenida (gr)	Masa que pasa por el tamiz de ranura (gr)	% De aplanamiento	Masa retenida en el tamiz de barras (gr)	% De Alargamiento	Índice de aplanamiento (AI) % =	Índice de alargamiento (IL) % =																																									
1"	21	0	0,00	0	0,00	84,16	18,95																																									
3/4"	548	60	10,95	85	15,51																																											
1/2"	1384	299	21,60	340	24,57																																											
3/8"	840	147	17,50	210	25,00																																											
1/4"	1106	224	20,25	243	21,97																																											
Total =	3899	730	70	878																																												

Anexo 7. Contenido de materia orgánica por pérdida de ignición

	Universidad Pontificia Bolivariana SECCIONAL BUCARAMANGA	APROVECHAMIENTO DE ARENAS IMPREGNADAS CON DERIVADOS DEL CRUDO EN LA PREPARACION DE MEZCLAS DENSAS EN CALIENTE MDC-2
Nombre del ensayo =	Contenido de materia organica por perdida de ignicion	
Suelo Contaminado Sin Lavar		
A=	20,01	gr
B=	18,71	gr
C=	85,90	gr
% Contenido de materia organica	1,97	%
Suelo Contaminado Lavado		
A=	20,00	gr
B=	18,99	gr
C=	85,90	gr
% Contenido de materia organica	1,53	%

Anexo 8. Diseño de mezclas asfálticas en caliente empleando el método Marshall

Briquetas testigo					
Tipo de muestra	Peso Unitario Lb/in ³	% Vacios Agregados	% Vacios Mezcla	Estabilidad (Libras)	Flujo (mm)
Briquetas realizadas con asfalto contaminado, de dudosa procedencia					
briquetas, Asfalto Contaminado 1	128,82	22,00	15,98	2825	17
briquetas, Asfalto Contaminado 2	138,74	16,00	9,51	4200	20
briquetas, Asfalto Contaminado 3	146,87	11,07	4,20	4661	19
briquetas, Asfalto Contaminado 4	135,47	17,97	11,64	4789	17
briquetas, Asfalto Contaminado 5	130,30	21,11	15,01	3524	16
briquetas, Asfalto Contaminado 6	136,55	17,32	10,94	3265	20
Briquetas Testigo con el 4,5% de asfalto					
Testigo 1 con 4,5% de asfalto	135,87	17,73	11,38	2210	27
Testigo 2 con 4,5% de asfalto	141,42	14,37	7,76	2876	26
Testigo 3 con 4,5% de asfalto	139,36	15,62	9,10	2118	26
Testigo 4 con 4,5% de asfalto	136,68	17,24	10,85	1011	30
Testigo 5 con 4,5% de asfalto	148,91	9,84	2,87	2482	24
Testigo 6 con 4,5% de asfalto	144,67	12,41	5,64	2722	25
Testigo 7 con 4,5% de asfalto	138,14	16,36	9,90	1298	24
Testigo 8 con 4,5% de asfalto	136,37	17,43	11,06	1052	29
Briquetas Testigo con el 5,0% de asfalto					
Testigo 1 con 5,0% de asfalto	144,82	12,77	5,54	1054	24
Testigo 2 con 5,0% de asfalto	148,03	10,84	3,45	957	32
Testigo 3 con 5,0% de asfalto	148,33	10,66	3,25	2339	28
Testigo 4 con 5,0% de asfalto	139,77	15,81	8,84	2293	26
Testigo 5 con 5,0% de asfalto	140,28	15,51	8,51	1040	30
Testigo 6 con 5,0% de asfalto	136,05	18,06	11,26	2390	27
Testigo 7 con 5,0% de asfalto	135,95	18,11	11,33	3080	25
Testigo 8 con 5,0% de asfalto	146,62	11,69	4,37	3167	24
Briquetas Testigo con el 5,5% de asfalto					
Testigo 1 con 5,5% de asfalto	145,58	12,78	5,05	1372	23

Testigo 2 con 5,5% de asfalto	143,62	13,95	6,32	1626	23
Testigo 3 con 5,5% de asfalto	147,68	11,52	3,68	1529	26
Testigo 4 con 5,5% de asfalto	141,82	15,03	7,50	1390	24
Testigo 5 con 5,5% de asfalto	143,33	14,13	6,52	1320	25
Testigo 6 con 5,5% de asfalto	136,16	18,42	11,19	867	37
Testigo 7 con 5,5% de asfalto	143,80	13,84	6,21	954	26
Testigo 8 con 5,5% de asfalto	133,44	20,05	12,97	1280	24

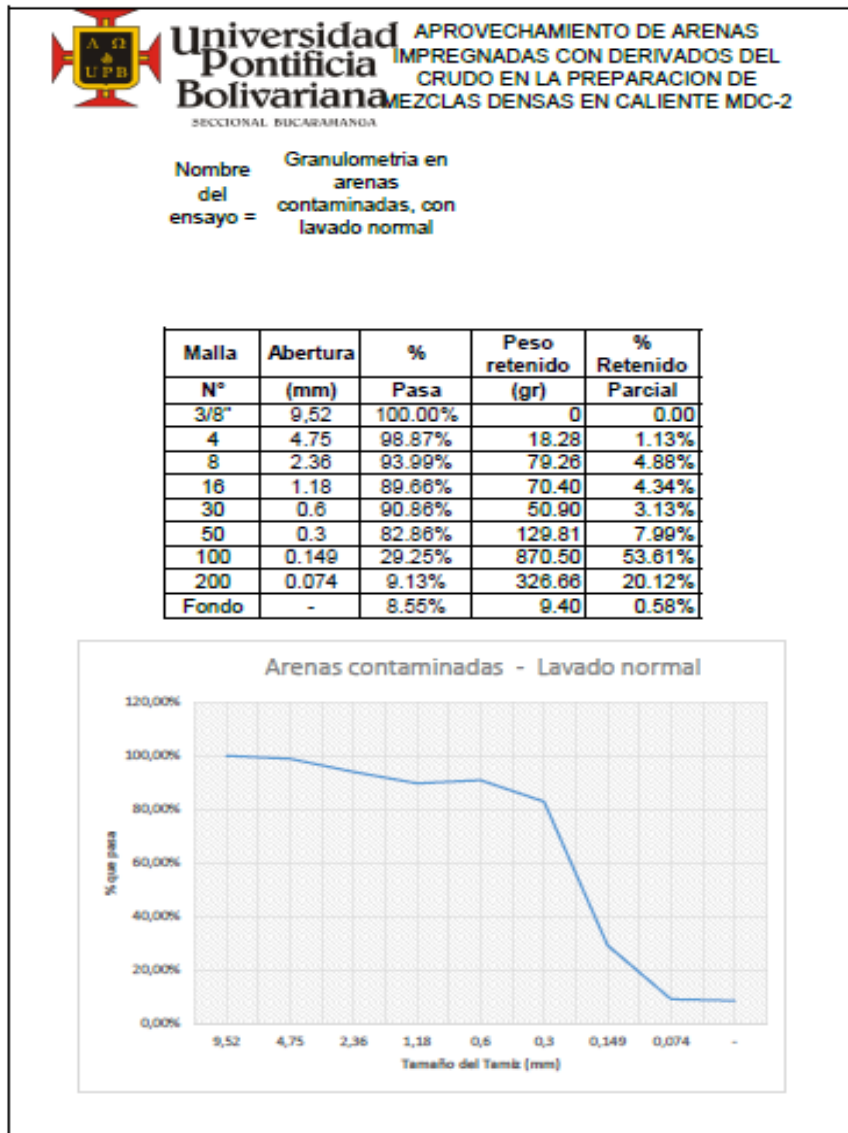
Briquetas Contaminadas, 100% Grueso, 50% Fino, 50% arenas contaminadas					
Tipo de muestra	Peso Unitario Lb/in ³	% Vacios Agregados	% Vacios Mezcla	Estabilidad (Libras)	Flujo (mm)
Briquetas contaminadas y con 4,5% de asfalto					
Contaminada 1 y con 4,5% de asfalto	149,41	9,54	2,55	1400	20
Contaminada 2 y con 4,5% de asfalto	139,91	15,29	8,75	1125	16
Contaminada 3 y con 4,5% de asfalto	147,96	10,41	3,50	980	20
Contaminada 4 y con 4,5% de asfalto	145,50	11,90	5,10	590	17
Contaminada 5 y con 4,5% de asfalto	148,49	10,09	3,15	896	22
Contaminada 6 y con 4,5% de asfalto	143,81	12,93	6,20	2075	20
Contaminada 7 y con 4,5% de asfalto	138,87	15,92	9,42	497	20
Contaminada 8 y con 4,5% de asfalto	146,26	11,44	4,60	446	15
Briquetas contaminadas y con 5,0% de asfalto					
Contaminada 1 y con 5,0% de asfalto	138,85	16,37	9,43	1496	14
Contaminada 2 y con 5,0% de asfalto	148,97	10,27	2,83	1653	17
Contaminada 3 y con 5,0% de asfalto	137,30	17,30	10,45	1504	15
Contaminada 4 y con 5,0% de asfalto	148,56	10,52	3,10	1370	18
Contaminada 5 y con 5,0% de asfalto	134,28	19,12	12,41	235	14
Contaminada 6 y con 5,0% de asfalto	145,70	12,24	4,97	319	16
Contaminada 7 y con 5,0% de asfalto	150,97	9,07	1,53	1173	20
Contaminada 8 y con 5,0% de asfalto	149,84	9,75	2,27	1851	20
Briquetas contaminadas y con 5,5% de asfalto					

Contaminada 1 y con 5,5% de asfalto	142,65	14,53	6,96	393	25
Contaminada 2 y con 5,5% de asfalto	138,28	17,15	9,81	Se agrieto antes de ser fallada	
Contaminada 3 y con 5,5% de asfalto	148,55	11,00	3,11	651	21
Contaminada 4 y con 5,5% de asfalto	145,62	12,75	5,02	1039	20
Contaminada 5 y con 5,5% de asfalto	141,96	14,94	7,41	127	14
Contaminada 6 y con 5,5% de asfalto	145,85	12,62	4,87	2004	25
Contaminada 7 y con 5,5% de asfalto	146,76	12,07	4,27	780	26
Contaminada 8 y con 5,5% de asfalto	142,63	14,55	6,97	2400	28

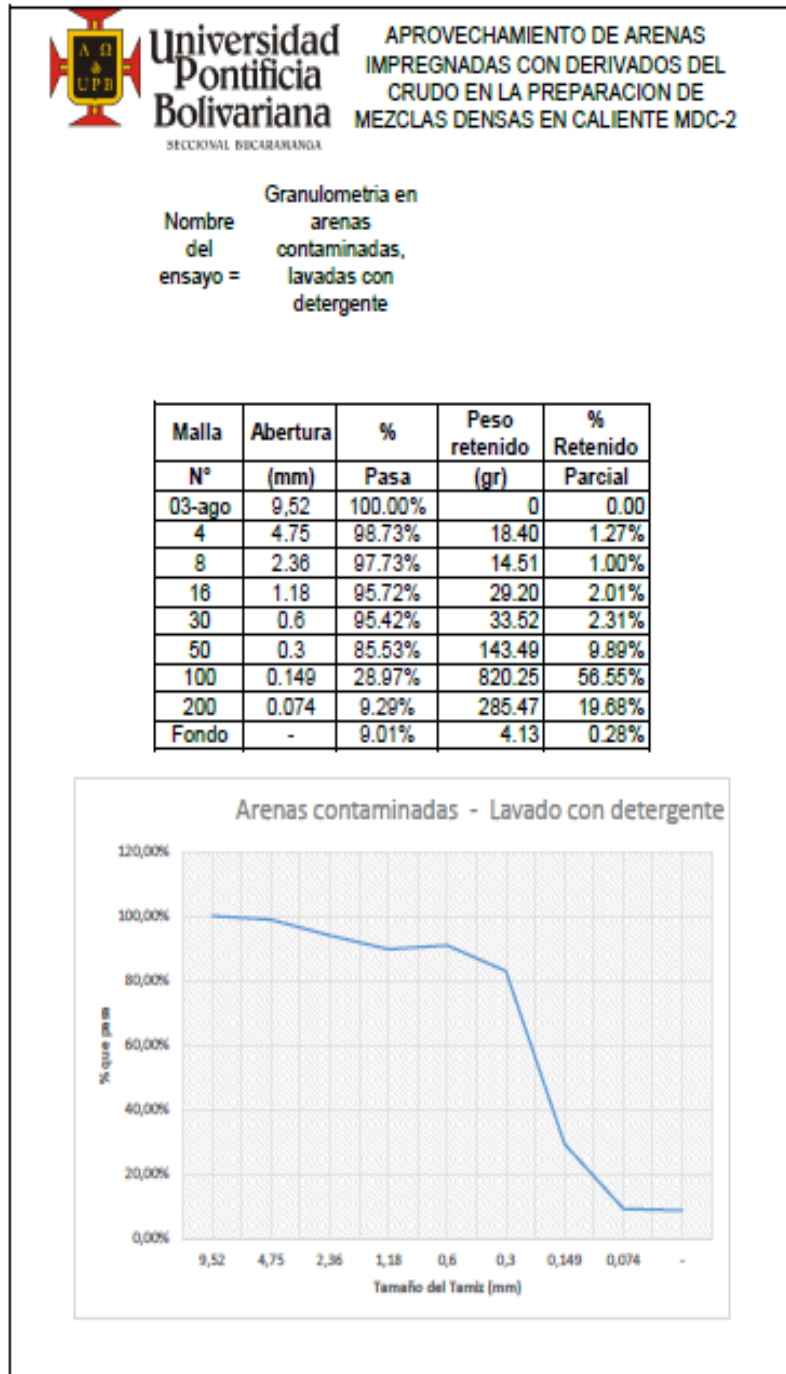
Briquetas Contaminadas, 100% Grueso, 75% Fino, 25% arenas contaminadas					
Tipo de muestra	Peso Unitario Lb/in ³	% Vacios Agregados	% Vacios Mezcla	Estabilidad (Libras)	Flujo (mm)
Briquetas contaminadas y con 4,5% de asfalto					
Contaminada 1 y con 4,5% de asfalto	136,74	17,21	10,81	402	17
Contaminado 2 y con 4,5% de asfalto	142,86	13,50	6,82	451	16
Contaminado 3 y con 4,5% de asfalto	116,32	29,57	24,13	Se agrieto antes de ser fallada	
Contaminado 4 y con 4,5% de asfalto	141,37	14,40	7,79	691	15
Contaminado 5 y con 4,5% de asfalto	142,98	13,43	6,74	4051	17
Contaminado 6 y con 4,5% de asfalto	144,62	12,43	5,67	3585	18
Contaminado 7 y con 4,5% de asfalto	148,14	10,30	3,37	2593	19
Contaminado 8 y con 4,5% de asfalto	143,90	12,87	6,14	2881	17
Briquetas contaminadas y con 5,0% de asfalto					
Contaminada 1 y con 5,0% de asfalto	138,87	16,36	9,42	364	17
Contaminada 2 y con 5,0% de asfalto	151,67	8,65	1,07	3151	19
Contaminada 3 y con 5,0% de asfalto	133,98	19,30	12,61	192	15
Contaminada 4 y con 5,0% de asfalto	146,97	11,48	4,14	2100	18
Contaminada 5 y con 5,0% de asfalto	134,57	18,95	12,23	231	12
Contaminada 6 y con 5,0% de asfalto	147,66	11,07	3,69	2611	22
Contaminada 7 y con 5,0% de asfalto	135,26	18,53	11,78	231	16
Contaminada 8 y con 5,0% de asfalto	149,79	9,78	2,30	2010	19

Briquetas contaminadas y con 5,5% de asfalto					
Contaminada 1 y con 5,5% de asfalto	140,07	16,08	8,64	254	15
Contaminada 2 y con 5,5% de asfalto	144,27	13,56	5,90	1375	19
Contaminada 3 y con 5,5% de asfalto	145,05	13,09	5,39	1385	17
Contaminada 4 y con 5,5% de asfalto	147,72	11,50	3,65	1540	17
Contaminada 5 y con 5,5% de asfalto	143,74	13,88	6,24	294	15
Contaminada 6 y con 5,5% de asfalto	147,56	11,59	3,75	1565	20
Contaminada 7 y con 5,5% de asfalto	142,80	14,44	6,86	230	15
Contaminada 8 y con 5,0% de asfalto	135,43	18,86	11,66	Se agrieto antes de ser fallada	

Anexo 9. Análisis granulométrico de las arenas contaminadas con lavado normal



Anexo 10. Análisis granulométrico de las arenas contaminadas lavadas con detergente



REGISTRO FOTOGRAFICO



Ensayo de aplanamiento y alargamiento



Ensayo de equivalente de arena



Punto de ignición y llama



Penetración



Punto de ablandamiento



Ensayo del hidrómetro



Tamizado y separación de las cantidades a utilizar para la elaboración de
paneles



Adición del asfalto, mezclado de materiales, llenado del molde para paneles y disposición del molde junto con el material en el equipo roller compacter



Panela terminada y extracción de núcleos



Ensayo de densidad y Marshall