



CENIZAS DE BIOSÓLIDO DE PTAR COMO LLENANTE MINERAL EN LA ELABORACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIPO MDC-19

MÓNICA YINETH LARA PÉREZ

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS DE AQUINO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
TUNJA
2016**



CENIZAS DE BIOSÓLIDO DE PTAR COMO LLENANTE MINERAL EN LA ELABORACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIPO MDC-19

MÓNICA YINETH LARA PÉREZ

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN
CONSTRUCCIÓN Y NUEVOS MATERIALES**

DIRECTOR: WILLIAM RICARDO MOZO MORENO
Magister en Ingeniería Ambiental - Ingeniero Civil

**UNIVERSIDAD SANTO TOMAS DE AQUINO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
TUNJA
2016**

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Tunja, 13 de Julio del 2016

Dedicatoria

Desde hace mucho tiempo comprendí que para los que soñamos no existen los imposibles, hoy es una clara muestra de que con perseverancia se puede llegar a cumplir cada una de esos sueños que por momentos se ven lejanos. Gracias Dios porque me permitiste luchar por este sueño que comenzó hace cinco años, y con tu bendición lo he logrado.

Luis German Lara Dueñas, Omaida Pérez Zúñiga y Yenny D. Lara Pérez, que sería de mi vida sin la compañía de ustedes, sin las palabras de aliento que me brindaron a lo largo de este camino, cada día descubrimos que no existe nada en el mundo que no podamos lograr si estamos juntos, porque en cada sube y baja fueron ese motor que me impulsaba día a día, este era ese sueño que siempre quisimos lograr, este triunfo no es más que para ustedes, es una pequeña muestra de lo mucho que me han brindado.

Andrés Lara Pérez, gracias por esa perseverancia, a pesar de tantas discusiones no se rindió y logró ayudarme a tomar una de las mejores decisiones de mi vida, por ser esa persona que día a día me demuestra que con sencillez se puede llegar muy lejos, aunque la gente no crea en nosotros, sabemos que somos más fuertes.

Manuel y Purita, porque han sido la base de esta hermosa familia, que siempre me brindo todo su apoyo, quienes nos han inculcado algo tan valioso como lo es el amor por cada uno de sus miembros, ustedes fueron por quienes cada día luche para cumplir esta promesa. A mis dos ángeles, que aunque partieron muy pronto el amor sigue intacto y sé que desde el cielo me dieron la fuerza necesaria para no rendirme.

Finalmente a mis amigos: Marian I. Avella, Harold Y. Ladino, Deiner A. Sarmiento y Manuel F. Sáenz; por los momentos compartidos, gracias por haber estado siempre a mi lado, por el apoyo y sin importar nada creyeron siempre en mí, y porque sencillamente lo reído nadie no lo quita. No es un adiós, es un hasta pronto ingenieros. A quien me dio la confianza, y supo creer en mí, quien siempre estuvo a mi lado apoyándome y regalando momentos de felicidad, porque sabemos que una promesa es para siempre y a cada una de las personas que estuvieron conmigo a lo largo de este camino.

Hoy estoy donde estoy porque nunca me he cansado de levantarme y porque cada caída no ha sido más que una razón para ser más fuerte, cuando se quiere algo con fuerza, se puede llegar muy lejos.

Agradecimientos

Al fin concluye esta etapa tan importante de mi vida y de ella solo me queda agradecer a esta Institución Universidad Santo Tomas, a su Facultad de Ingeniería Civil y a todo su claustro docente, por haberme brindado los conocimientos necesarios en mi formación como Ingeniera Civil. A los ingenieros: Ricardo Mozo, quien puso en mí su confianza, para el desarrollo de esta investigación, permitiéndome así alcanzar el más grande de mis logros, por las enseñanzas inculcadas y más aún la paciencia a lo largo de este camino; Daniel A. Moreno, Ana M. Benítez C, Miguel A. Toledo, Carlos A. Corredor quienes me brindaron el apoyo necesario; a los laboratoristas: Fernando Morales, Fredy Hernández y José Vargas, por su atenta colaboración en cada una de las tareas necesarias para el desarrollo de esta investigación que más que un requisito comenzó como un reto y sin la ayuda de cada uno de ellos no hubiera sido posible culminar.

CONTENIDO

RESUMEN.....	10
ABSTRACT.....	11
INTRODUCCIÓN	12
OBJETIVOS.....	15
1. ESTADO DEL ARTE	16
2. MARCO TEÓRICO	25
2.1. BIOSÓLIDOS EN COLOMBIA.....	25
2.1.1. Definición.	25
2.1.2. Características.....	25
2.1.3. Normatividad.	25
2.2. MEZCLAS ASFÁLTICAS	27
2.2.1. Clasificación	29
2.2.2. Agregados Pétreos:.....	30
2.2.3. Diseño	32
2.2.4. Mezclas Densas en Caliente (MDC):.....	33
2.2.5. Ensayos	33
2.3. MÉTODO MARSHALL	34
2.3.1. Pautas de Comportamiento Ensayo Marshall:	36
2.4. MODULO RESILIENTE.....	37
3. METODOLOGÍA.....	39
3.1. MATERIALES EMPLEADOS.....	39
3.1.1. Ensayos Realizados al Material Granular:	39
3.1.2. Ensayos Realizados al Cemento Asfáltico:	44
3.1.3. Ensayos Realizados al Biosólido	44
3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	45
3.2.1. Dosificación y Curva de Diseño.	45
3.2.2. Briquetas Realizadas según Diseño Marshall.	46
3.2.3. Calculo Modulo Resiliente.....	52
4. RESULTADOS	54
4.1 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL GRANULAR.....	54
4.2. DOSIFICACIÓN Y CURVA DE DISEÑO	58
4.3. CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA.	60
4.3.1 Filler:	61
4.3.2 Biosolido:.....	61
4.4 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA.....	61
4.4.1. Filler:	61
4.4.2. Biosolido:.....	62
4.5. PRUEBA MARSHALL PARA CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO.....	63
4.5.1. Contenido Optimo de Asfalto.....	64
4.6. BRIQUETAS CON DIFERENTES PORCENTAJES DE BIOSOLIDO	64
4.7. CALCULO MODULO RESILIENTE.	67
CONCLUSIONES	73
BIBLIOGRAFÍA	75
ARTÍCULOS DE REVISTAS.....	77
ANEXOS	79

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Valores limites por la EPA Norma CFR 40 parte 503 Biosólidos.....	26
Tabla 2 Valores máximos permisibles de Categorización de Biosólidos para su uso.	26
Tabla 3: Causas y efectos de las propiedades de una mezcla asfáltica.	28
Tabla 4. Ficha Técnica de la Calidad de Ensayos de Laboratorio Asfalto 60/70	44
Tabla 5. Resultados Gravedad Especifica y Absorción de los Agregados Gruesos y Finos.....	56
Tabla 6. Índice de Alargamiento y Aplanamiento Agregado Grueso.....	56
Tabla 7. Cantidad Material Granular para los Diferentes Porcentajes de Contenido de Asfalto	59
Tabla 8. Franjas Granulométricas para Mezclas Asfálticas en Caliente.....	59
Tabla 9. Curva de Diseño. MDC-19	59
Tabla 10. Porcentaje Material Retenido para cada Contenido de Asfalto	60
Tabla 11. Fases Cristalinas del Filler.	61
Tabla 12. Fases Cristalinas del Biosolido.	61
Tabla 13. Resultados Fluorescencia de Rayos X del Filler.....	61
Tabla 14. Resultados Fluorescencia de Rayos X del Biosolido.....	62
Tabla 15. Resultados Prueba Marshall.....	63
Tabla 16. Resultados Extrapolación Valores de Porcentaje de Vacíos.....	64
Tabla 17. Resultados Extrapolación Valores de Flujo	64
Tabla 18. Datos para Obtener el Contenido Optimo de Asfalto	64
Tabla 19: Relación de pesos de agregados retenidos para los diferentes porcentajes de inclusión.....	65
Tabla 20. Resultados Briquetas con Inclusión de Biosólido.....	65
Tabla 21. Ficha Técnica Briquetas 0% de Biosolido.	67
Tabla 22. Ficha Técnica Briquetas 50% de Biosolido.	67
Tabla 23. Resultados Caracterización de los Agregados.	73

LISTA DE GRAFICAS

	Pág.
Grafica 1. Curva Agregado Grueso.....	55
Grafica 2. Curva Agregado Fino.....	55
Grafica 3. Curva Llenante Mineral	56
Grafica 4. Curva de Diseño MDC-19	60
Grafica 5. Resultados Peso Unitario	63
Grafica 6. Resultados Estabilidad	63
Grafica 7. Resultados Porcentaje de Vacíos	64
Grafica 8. Resultados Flujo.....	64
Grafica 9. Peso Unitario Vs % de Biosolido.....	66
Grafica 10 Estabilidad Vs % de Biosolido.....	66
Grafica 11. Flujo Vs % de Biosolido	66
Grafica 12. % de Vacíos Vs % de Biosolido	66

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Agregado Grueso, Planta de Asfalto Beinco S.A.S.....	31
Figura 2. Agregado Fino, Planta de Asfalto Beinco S.A.S.....	31
Figura 3. Llenante Mineral, Planta de Asfalto Beinco S.A.S.....	31
Figura 4. Ligante Asfáltico.....	32
Figura 5. Metodología Investigación.....	39
Figura 6. Agregado Grueso Sumergido en Agua.....	40
Figura 7. Prueba de Cono, Agregado Fino.....	40
Figura 8. Agregado Fino Saturado en Picnómetro.....	40
Figura 9. Máquina de los Ángeles. Desgaste de Material.....	41
Figura 10. Agitador Mecánico.....	42
Figura 11. Lectura Equivalente de Arena.....	42
Figura 12. Calibrador de Espesores.....	42
Figura 13. Calibrador de Longitudinales.....	42
Figura 14. Tamices para Granulometría de los Agregados.....	43
Figura 15. Hidrómetro.....	43
Figura 16. Biosólido en Bandas Transportadoras.....	45
Figura 17. Molde de compactación 4" diámetro y 3" de altura.....	46
Figura 18. Martillo de compactación con zapata circular (peso 10 lb - altura de caída 18").....	46
Figura 19. Pedestal firme anclado al piso.....	46
Figura 20. Prensa de ensayo Marshall.....	46
Figura 21. Mezcla Agregados y Cemento Asfáltico.....	47
Figura 22. Mezcla Agregados y Cemento Asfáltico a Temperatura de 110°C.....	47
Figura 23. Molde Listo para Agregar Mezcla Densa en Caliente.....	48
Figura 24. Emparejamiento de la Mezcla con 25 Golpes en su Interior.....	48
Figura 25. Montaje en Pedestal de la Mezcla Densa en Caliente, para Compactación.....	48
Figura 26. Briquetas en molde de Compactación.....	49
Figura 27. Briquetas Estándar sin Contenido de Biosólido.....	49
Figura 28. Requisitos de los Agregados para Mezclas Asfálticas en Caliente.....	54
Figura 29. Biosólido luego del proceso de quema.....	57
Figura 30. Biosólido en Cuchara de Casagrande, para límite Líquido.....	58
Figura 31. Biosólido, Ensayo de Límite Plástico.....	58
Figura 32. Equivalente de Arena de Biosólido.....	58
Figura 33: Criterios del diseño preliminar de la mezcla asfáltica en caliente por el método Marshall.....	63
Figura 34: Briquetas Modificadas con Biosólido.....	65
Figura 35. TMAP Tunja, 2016.....	68
Figura 36. Curva de Factores de Ponderación de Temperatura.....	68
Figura 37. Determinación T ₈₀₀ e Índice de Penetración.....	69
Figura 38. Temperatura de la mezcla T mix °C.....	70
Figura 39. Nomograma de Van der Poel.....	70
Figura 40. Nomograma de Bonnaure para Mezcla sin Contenido de Biosólido.....	71
Figura 41. Nomograma de Bonnaure para Mezcla con 50% de Contenido de Biosólido.....	72

RESUMEN

Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en sus diferentes procesos de depuración generan una gran cantidad de material residual conocido como lodo, el cuál en algunos casos es sometido a un proceso secundario de tratamiento, modificando sus propiedades y convirtiéndolo en biosólido.

En esta investigación se evalúa una alternativa de valorización para el biosólido usándolo como sustituto parcial o total del filler en la elaboración de mezclas asfálticas tipo MDC 19. Para cumplir con el propósito del proyecto se realizan los siguientes procesos: Recolección y caracterización de las materias primas, diseño de mezcla para MDC 19 (determinación del contenido óptimo de asfalto) y sustitución del filler por la ceniza de biosólido en porcentajes del (0%, 25%, 50%, 75% y 100%).

Para la caracterización de los agregados, se realizaron ensayos de laboratorio como granulometría, gravedad específica, absorción, resistencia al desgaste, equivalente de arena e índice de alargamiento y aplanamiento; con el fin de determinar si cumplían con los valores mínimos exigidos por la norma INVIAS.

Se definió un contenido óptimo de asfalto en la mezcla elaborando 3 briquetas para 5 porcentajes diferentes de asfalto (4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5 %), 15 en total. El porcentaje se seleccionó con base en los resultados obtenidos en propiedades como: flujo y estabilidad, peso específico y porcentaje de vacíos.

Los resultados de las pruebas realizadas dan como porcentaje óptimo de asfalto el 4.6% teniendo en cuenta los criterios para el diseño de mezclas asfálticas de la norma INV. Art.450 – 13, para un nivel de tránsito 2 en capa de rodadura. Una vez definido el contenido óptimo de asfalto, se elaboraron probetas con los 5 porcentajes de remplazo propuestos (filler – biosólido); a las que se les determinaron flujo y estabilidad, peso específico y porcentaje de vacíos. El proyecto se desarrolló a nivel de laboratorio con el fin de determinar la mejor relación (filler – biosólido).

De los resultados obtenidos en el estudio se puede concluir que incorporar biosólido en la mezcla tiene beneficios como: mejorar su estabilidad y relación estabilidad/flujo; incremento del porcentaje de vacíos proporcional al contenido de biosólido. Con el llenante mineral 100% de biosólido el porcentaje de vacíos se incrementa a valores superiores de los permitidos por la norma. Lo cual daría como resultado una permeabilidad alta en la mezcla, ocasionando un rápido deterioro de la carpeta asfáltica.

Finalmente, es posible concluir que la mejor combinación en la mezcla es (50% biosólido - 50% filler), ya que cumple con lo exigido por la norma INVIAS 748-14; mejorando la estabilidad, la relación estabilidad/flujo y el porcentaje de vacíos en comparación con lo encontrado en la mezcla patrón (0% biosólido); lo que se traduciría en un mejor comportamiento de la mezcla ante la acción del tránsito vehicular.

Palabras Clave—Biosolido, Mezclas Asfálticas, PTAR, Marshall, Filler, MDC.19

ABSTRACT

Residuals water treatment plants (PTAR) and its different processes of purification generate a great quantity of residual material known as mud, which in some cases is submitted to a secondary process of treatment, modifying its properties and turning it in to biosolids.

This investigation evaluates an alternative valuation for the biosolid using it as partial or total substitute of the filler in the elaboration of asphalt mixtures type HDM 19. To accomplish the purpose of the project it develops 4 phases inside the process of investigation: Compilation and characterization of the raw materials; Design of mixture for HDM 19; (Determination of the ideal content of asphalt) and the filler substitution for the biosolid ash in percent of (0%, 25%, 50%, 75%, 100%).

For the characterization of the attachés, laboratory test programs were realized as granulometry, specific gravity, absorption, resistance to the wear, equivalent of sand and index of stretching and levelling; in order to determine if they were fulfilling with the minimal values demanded by the norm INVIAS.

An ideal content of asphalt was defined in the mixture elaborating 3 briquettes for 5 different asphalt percentages (4.5, 5.0, 5.5, 6.0, and 6.5 %), 15 in total. The percentage was selected in base of the results obtained in properties as: flow and stability, specific weight and emptinesses percentage.

The realized tests results proofs as ideal percentage of asphalt 4.6 % given the criteria for the design of asphalt mixtures from the INV. Art.450 – 13 norm, for a level of traffic 2 in cap of tread. Once defined the ideal content of asphalt, manometers were elaborated by 5 proposed replacement percentages (filler - biosolid); which determined flow and stability, specific weight and the emptinesses percentage. The project developed to laboratory level in order to determine the best relation (filler - biosólido).

From the obtained results in the study it is possible to conclude that incorporate biosolid in the mixture has benefits as: improve its stability and relation stability / flow; increase of the proportional emptinesses percentage to the content of biosolid. With the mineral fuller 100 % of biosolid the emptinesses percentage increases to top values of the allowed ones in the norm. Which would give as a result high permeability in the mixture causing a fast deterioration of the asphalt folder.

Finally, it is possible to conclude that the best combination in the mixture is (50 % biosolid - 50 % filler), since it fulfills with the demanded in the norm; INVIAS 748-14 improving the stability, the relation stability / flow and the emptinesses percentage in comparison with found in the mixture boss (0 % biosolid); what would be translated in a better behavior of the mixture in the action of the vehicular traffic.

Key words: Biosolids, Asphalt Mixtures, PTAR, Marshall, Filler, HDM 19.

INTRODUCCIÓN

Las Aguas Residuales, son una de las amenazas más grandes para las fuentes hídricas, ya que son portadoras de diferentes elementos o compuestos como: metales pesados, materia orgánica y patógena; que pueden ser tóxicos y peligrosos para la vida acuática y de los seres humanos. Con el tratamiento a las aguas residuales se reduce el riesgo de contaminación del entorno ambiental.

Los esfuerzos por mejorar la calidad de los efluentes vertidos a los cuerpos de agua podrían verse opacados por una gestión ineficiente de los subproductos generados durante el proceso de tratamiento de las aguas residuales. Una mala gestión ambiental de esos subproductos podría generar problemas ambientales graves como: la contaminación de las aguas superficiales por escorrentía, la contaminación de las aguas subterráneas/acuíferos por lixiviación, la contaminación de los suelos por un elevado contenido de metales pesados, la presencia de olores desagradables y problemas de salud pública.

Un adecuado manejo ambiental de lodos o biosólidos generados en el proceso de depuración del agua residual es un tema que día a día toma más fuerza y que nos convoca a su estudio.

Poco a poco las industrias y las entidades gubernamentales han venido tomando conciencia de la importancia de la construcción y operación de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), por lo que cada vez más se incrementa su número; un ejemplo de lo anterior son las acciones futuras planeadas para La PTAR EL SALITRE y el proyecto de saneamiento del río Bogotá.

La ampliación del caudal de tratamiento de la PTAR EL SALITRE a 8 m³/s, la implementación de la segunda fase con tratamiento secundario y la construcción de la PTAR CANOAS para el tratamiento de las aguas provenientes de las cuencas Fucha y Tunjuelo con una capacidad de 18 m³/s son algunas de esas acciones.¹

En la actualidad el proceso de tratamiento aplicado en la PTAR es de tipo primario químicamente asistido con el cual se extrae del agua un 40% de materia orgánica y un 60% de sólidos suspendidos totales. La Planta trata el agua residual producida por aproximadamente 2.2 millones de habitantes (cuencas Torca y Salitre), correspondientes al 28% del total de la población de Bogotá D.C. Los afluentes residuales provienen principalmente de hogares, oficinas, colegios y universidades, entre otros.

Actualmente la PTAR entrega 4000 L/s de agua tratada al río Bogotá². Producto de esos procesos se generan más de 4500 toneladas de biosólido al mes; cifra considerable y motivadora para la evaluación de diferentes alternativas de disposición para el subproducto.

¹ PTAR SALITRE FASE I. Planta de tratamiento de aguas residuales [online]. [citado 20 mayo 2011]. Disponible en: < http://www.acueducto.com.co/wpsv61/wps/html/resources/PTAR/plegable_general.pdf>

² Gestión de subproductos [online]. Bogotá Colombia. PTAR El Salitre. [citado 20 mayo 2011]. Disponible en: <<http://www.acueducto.com.co>>

La disposición del biosólido en rellenos sanitarios es una de las formas más comunes para deshacerse del residuo. Esta práctica genera un problema serio, el cual tiene su explicación en el alto contenido de nitrógeno presente en el biosólido; nitrógeno que al no ser absorbido por las plantas, es fácilmente lixiviado y movilizado pudiendo generar eutroficación y contaminación por nitratos en los mantos acuíferos.

Adicional al problema anterior, la presencia de altos porcentajes de nitrógeno en los suelos podría causar que en el ciclo hidrológico de recarga de los mantos acuíferos, las aguas que se infiltran entren en contacto con este compuesto y contaminen el agua generalmente usada para consumo humano. La presencia de nitratos en el agua potable implica un riesgo en la salud, sobre todo para los infantes³. Los problemas ya mencionados hacen que sea indispensable establecer alternativas que permitan el aprovechamiento de este material y eliminen o aplacen la opción de disposición en vertederos o en áreas de disposición.

La gran cantidad de material resultante del tratamiento, el posible aumento en la tasa de producción por la construcción y puesta en marcha de las estructuras complementarias propuestas en el esquema de saneamiento (PTAR CANOAS, segunda fase de la PTAR SALITRE) y la disminución de la oferta de los lugares de disposición normal, temporal o de emergencia y los anteriormente mencionados; son algunos de los factores que motivan la investigación relacionada con la aplicación de estos subproductos en la elaboración de materiales de construcción.

La investigación está encaminada a estudiar la alternativa de incorporación de biosólido de la PTAR EL SALITRE como material para la fabricación de mezclas asfálticas, en búsqueda de beneficios como: el aprovechamiento del residuo, la prevención de una contaminación futura, la disminución de la cantidad del residuo destinada a los vertederos, la disminución en la demanda de áreas para la disposición, la prevención de una posible contaminación física, química y microbiológica de los suministros de aguas y áreas en las que se generen productos para el consumo humano; evitar que los subproductos entren en contacto con humanos, animales de pastoreo, animales y cultivos de la cadena alimentaria o que estén expuestos en la superficie del suelo accesibles a niños y mascotas, y prevenir la reproducción de moscas, mosquitos, roedores y otros animales⁴.

La investigación que se propone sería una propuesta innovadora para la gestión ambiental realizada por la PTAR pues son escasos los estudios realizados y todos están enfocados al aprovechamiento del biosólido como enmienda orgánica del suelo⁵, se estaría evaluando una alternativa más de aprovechamiento en el programa de gestión de la PTAR para prevenir un posible almacenamiento del biosólido.

³ Facultad de ciencias químicas. Universidad Autónoma de Chihuahua. Manejo de sólidos residuales o biosólidos. [Online]. [Citado 15 enero 2012]. En internet: <<http://www.oocities.org/edrochac/residuales/biosolidos9.pdf>>

⁴ Salvato, J. A., Nemerow, N. L., & Agardy, F. J. Environmental Engineering. CANADÁ: JOHN WILEY & SONS, INC. (2003)

⁵ PTAR SALITRE FASE I. Planta de tratamiento de aguas residuales [online]. [citado 20 mayo 2011]. Disponible en: <http://www.acueducto.com.co/wpsv61/wps/html/resources/PTAR/Plegable_tecnico.pdf>

Los resultados dejarían ver si existe la posibilidad de dar un uso secundario al residuo y contribuir con las políticas de desarrollo sostenible, ya que al realizar la quema del Biosólido para incorporar estas cenizas en las mezclas asfálticas, el nitrógeno presente se elimina debido a que ya no hay presencia de materia orgánica.

Las plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia, generan 274 toneladas de biosólidos al día; 4 plantas son las responsables de la mayor cantidad: El salitre en Bogotá, Cañaveral (Cali), San Fernando (Medellín) y Río Frio (Bucaramanga), las cifras presentadas hacen necesario el estudio de alternativas que permitan un manejo adecuado de estos residuos y que eviten que resulten en las fuentes hídricas como material contaminante. (Velez, 2007)

A nivel regional se está llevando a cabo la construcción de tres PTAR en ciudades como: DUITAMA, SOGAMOSO Y TUNJA. La puesta en marcha de estas plantas traerá consigo beneficios como: la disminución de la contaminación en fuentes de agua superficiales y subterráneas, disminución de los riesgos a la salud pública, disminución en la afectación a la calidad de vida de las poblaciones aledañas a la descarga de las aguas residuales, cumplimiento de la normativa ambiental vigente y mejoramiento de la calidad de vida, entre otros. De lo mencionado se puede inferir que es muy positivo el avance en este campo; pero no se puede dejar de lado lo que esta actividad generará.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Establecer si la incorporación de cenizas de biosólido generado en la PTAR El Salitre como materia prima para la fabricación de mezclas asfálticas en caliente es una alternativa viable para su aprovechamiento.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar las características de las materias primas usadas para la fabricación de mezclas asfálticas en caliente.
- Especificar un diseño de mezcla para una MDC – 19 y su contenido óptimo de asfalto.
- Determinar el efecto que tiene remplazar (0%, 25%, 50%, 75% y 100%) del llenante mineral en la MDC – 19 por ceniza de biosólido sobre propiedades de la mezcla como: peso unitario, estabilidad, flujo y porcentaje de vacíos.

1. ESTADO DEL ARTE

En las mezclas asfálticas el asfalto y el agregado son combinados en proporciones exactas, esto determina las propiedades físicas de la mezcla y el desempeño de la misma como pavimento terminado. Se han realizado varias investigaciones con el ánimo de perfeccionar estas mezclas con la adición de distintos materiales, dichas investigaciones son una base teórica fundamental en el planteamiento de la investigación y a continuación se reseñan las más importantes.

(Moreno & Calvo, 2014) Estudiaron el comportamiento de mezclas asfálticas MDC-2 con caucho y cuero incorporados por vía húmeda mediante el ensayo Marshall, el objetivo fue determinar el porcentaje óptimo de asfalto modificado para los agregados en la mezcla. Estos materiales fueron obtenidos de las botas de combate desechadas por los militares. Se elaboraron muestras ejecutando la caracterización del material granular, del cemento asfáltico, agente modificador, y modificación de la mezcla con porcentajes de 1, 2, 4 y 8% de caucho y cuero.

La fluidez de la mezcla aumenta cuando hay mayor porcentaje de cuero, además el mejor comportamiento lo presenta la mezcla con 8% de aditivo, 100% de caucho vulcanizado y en el 6% de asfalto modificado este comportamiento superior se mantiene durante todos los porcentajes de asfalto modificado. Esta investigación muestra mejoras en las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica, ya que al agregar caucho vulcanizado se evidencia mejoras en la rigidez Marshall, y al aumentar su porcentaje de inclusión se obtienen mayores deformaciones, lo cual evidencia que el caucho proporcione más elasticidad a la mezcla.

(Reyes & Rincon, 2009). Buscaron determinar la resistencia a tracción indirecta al reemplazar el relleno mineral por cemento, cal y ceniza volante con porcentajes de 25, 50, 75 y 100%. Mediante el método Marshall se obtuvo el porcentaje óptimo de asfalto 6.0, y las curvas de estabilidad, densidad y flujo. Al reemplazar el relleno por ceniza volante al 100%, la mezcla asfáltica soporta mejor las deformaciones e incrementa su resistencia y al reemplazar por cemento las deformaciones aumentan, el incremento en resistencia no es significativo o en oportunidades disminuye con la sustitución, la capacidad para soportar deformaciones mejora en forma sustancial al introducirle cemento.

Existe un incremento en la resistencia a la tracción indirecta de la mezcla asfáltica con granulometría MDC-10 al reemplazar el 100% del relleno natural por cal, aumenta su ductilidad y al reemplazar el relleno natural por ceniza volante la deformación y resistencia aumento, haciendo que la mezcla sea más dúctil y resistente a los esfuerzos del tráfico. Finalmente al realizar el análisis conjunto de la resistencia y la ductilidad de la mezcla, se estableció que los mejores comportamientos se producen cuando hay un reemplazo de relleno natural por cal, sin importar el porcentaje utilizado.

(Modarres & Morteza, 2014) Investigaron el efecto del polvo obtenido en los residuos de carbón al ser utilizado como material de relleno en la mezcla de asfalto en caliente. Mediante el método Marshall se obtuvo la resistencia a la tracción indirecta y pruebas

del módulo resiliente realizados en condiciones secas y saturadas, en donde la estabilidad aumento mediante la incorporación del polvo. La mezcla de asfalto que contiene polvo mostro un comportamiento más flexible, al combinar los residuos de carbón y polvo de piedra caliza en igual proporción se obtuvo una mezcla con alta resistencia al agua teniendo en cuenta la curva de tensión-deformación. Con la incorporación de polvo la estabilidad aumento más de 800 Kg, respecto a la mínima requerida para condiciones de carga pesada

La mezcla que contiene polvo de residuos de carbón exhibió mayor tenacidad, por lo tanto, este material no tuvo efectos perjudiciales sobre la flexibilidad de la mezcla que es una propiedad importante a temperaturas más bajas y condiciones de carga repetidas pesadas. Se recomendó utilizar polvo de desecho del carbón natural y de piedra caliza en partes iguales ya que algunas propiedades de la mezcla se veían optimizadas con esta modificación. Para todas las propiedades estudiadas, al utilizar cenizas de residuos de carbón se obtuvo una mayor estabilidad y rigidez que con los otros dos aditivos, sin embargo, la preparación de esta mezcla necesita un equipo de incineración que aumenta los costos totales de producción además aumenta la energía total consumida y la contaminación ambiental.

(Sebnem, Mehmet, Nihat, Secan, & Serdal, 2013) Investigaron la posibilidad de implementar la ceniza de la cascara de arroz como relleno mineral en la mezcla densa de asfalto en caliente. Se determinó que el espesor de la película será mayor si la gradación de agregado es más grueso, el contenido óptimo de asfalto para el diseño de la mezcla se determinó tomando el valor medio de cuatro contenidos de asfalto (máxima estabilidad, máxima densidad aparente, mediana de los limites diseñados de vacíos de aire porcentuales en la mezcla total 4%, mediana de los límites de huecos diseñados llenos de bitumen en la mezcla total 80%). Concluyendo que las mezclas que utilizan 50% de ceniza de cascara de arroz y 50% piedra caliza como filler han tenido la mejor prueba Marshall.

(Pasandin & Perez, 2013) Estudiaron las propiedades mecánicas de las mezclas, utilizando áridos reciclados de hormigón de la construcción realizando un estudio de laboratorio. El contenido óptimo de asfalto aumenta al incrementar el contenido de áridos reciclados de hormigón, mientras el contenido de aglutinante eficaz disminuye.

Por un lado, esto indico que la porosidad del mortero unido al contenido de áridos hace que este absorba el aglutinante en proporción con el porcentaje de árido en mezclas asfálticas densas en caliente y la tendencia a la disminución del aglutinante es eficaz al aumentar el contenido de áridos ya que indica que el espesor de la película de asfalto disminuye con el aumento del contenido de este, lo que podría afectar la mezcla, especialmente para altos contenidos del árido.

Las mezclas bituminosas hechas con árido reciclable de hormigón de residuos de demolición, mostraron una buena sensibilidad a la humedad. Con un pre tratamiento adecuado, un contenido limitado de árido reciclable de hormigón, puede ser utilizado en las regiones cálidas. El uso de áridos reciclable de hormigón en mezclas asfálticas en caliente promueve la construcción sostenible, proporcionando numerosos beneficios, tales como la reducción de la extracción de áridos naturales de las canteras, y la

evitación del impacto visual de los rellenos sanitarios, la prevención de rechazo de las materias primas. Sin embargo, el costo de la eliminación de impurezas es una desventaja al utilizar áridos reciclables de hormigón en mezclas asfálticas en caliente.

(Waqar & Murat, 2013) El objetivo de su investigación era demostrar que la adición de concreto reciclado puede mejorar la resistencia de las mezclas a la deformación permanente. La susceptibilidad de cada mezcla se determinó basándose en los resultados de ensayos de fluencia repetidos no confinados utilizando varios parámetros derivados de un modelo de energía.

El contenido óptimo de asfalto oscila entre el 4,9% y el 6,0% en las mezclas gruesas, mientras que se convierte para mezclas finas se encuentra entre 4,4% y 6,8%, cuando el contenido de concreto asfáltico reciclable se incrementa hasta un 75%, la tasa de deformación para las mezclas gruesas es mayor que para los finos independientemente del contenido de concreto asfáltico reciclable que se utilizó, esto se debe a que las mezclas gruesas muestran un comportamiento más plástico. Las mezclas finas mostraron una mejor resistencia a la deformación permanente por tener constantes de pendiente más pequeñas mientras que exhibe efecto insignificante del contenido de concreto reciclable asfáltico.

Concluyendo así que independientemente del porcentaje de concreto reciclado utilizado, las mezclas graduadas finas mostraron una mejor resistencia a la deformación permanente y que al aumentar el contenido de concreto asfáltico reciclado, la resistencia a la deformación permanente de las mezclas gruesas mejora, teniendo efecto contrario en las mezclas de agregado fino.

(Clavijo & Aranda, 2014) Realizaron su investigación para determinar y analizar el comportamiento físico-mecánico de la mezcla densa en caliente MDC-2, para así compararla con una mezcla convencional, se realizaron diversas mezclas modificadas por vía húmeda en diferentes porcentajes con caucho y cuero en una proporción 25% y 75% respectivamente, se determinó el contenido óptimo de asfalto y porcentaje de materiales modificantes que permitan el mejor desempeño de la mezcla en cuanto a sus propiedades de resistencia, deformación y durabilidad mediante el método Marshall. En esta investigación la estabilidad Marshall no se ve mejorada con la adición de los materiales sin embargo cumple con la normatividad INVIAS.

(Arabani & Azarhoosh, 2012) Buscaban determinar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas con agregados de residuos de hormigón y de escoria de acero. Mediante seis mezclas asfálticas diferentes que contenían tres tipos de agregado: dacita, hormigón reciclado y escoria de acero. Para esto se evaluaron los tres tipos de áridos (dacita, escoria de acero y residuos hormigón asfáltico). Utilizando dacita como agregado principal, y escoria de acero y residuos de hormigón asfáltico como agregados secundarios. En todas las mezclas, se empleó aglutinante de asfalto de penetración 60-70.

Se investigaron seis mezclas de hormigón asfáltico. La primera mezcla era una mezcla de concreto asfáltico con agregado 100% dacita y fue etiquetada como la mezcla de control. Alternativamente, en las otras mezclas, escoria de acero y residuos de hormigón

asfáltico se utilizaron como agregados. La mezcla de hormigón asfáltico se basó en el diseño de la mezcla Marshall. Los resultados indicaron que el contenido de asfalto óptimo de las mezclas fue de 5,1%, 5,6%, 6,5%, 5,3%, 5,5% y 5,9%, respectivamente.

Cuando se utilizó árido reciclado de hormigón y escoria de acero se utilizan como un agregado fino, la estabilidad Marshall del material aumento y el flujo disminuyo, además que al utilizar áridos reciclados de hormigón como finos y áridos gruesos de escoria de acero aumentó significativamente el módulo resiliente de las mezclas. El módulo elástico de agregados finos con la mezcla de áridos reciclados de hormigón aumento aproximadamente 44% respecto al módulo elástico de la mezcla de control. Sin embargo, el mayor módulo de resiliencia se observó en el agregado fino utilizando mezcla de escoria de acero, que poseía un módulo resiliente 2,35 veces mayor que la de la mezcla de control.

Concluyendo así que la sustitución de los agregados gruesos por dacita con árido reciclado de hormigón en mezclas de asfalto afectó negativamente a las propiedades mecánicas del material ya que la mezcla y compactación alteraron las partículas y en el ensayo de fluencia dinámica, la mezcla óptima está en el contenido de escoria de acero utilizada como agregado grueso.

(Yilmaz, Vural, & Kuloglu, 2011) Implementaron asfaltita como carga mineral en las mezclas asfálticas en caliente. Se tomó asfaltita molida y se utilizaron las partículas menores de 0,075 mm como relleno en caliente para mezclar con el asfalto. El diseño de las mezclas asfálticas se llevó a cabo mediante el ensayo Marshall, ensayo de tracción indirecta, prueba de resistencia a la tracción y prueba de fatiga a la tracción indirecta.

En la prueba de estabilidad Marshall, los valores no mostraron una disposición estable con el aumento del contenido de asfaltita. Pero toda la prueba da un gran resultado en el valor de estabilidad Marshall debido a que la asfaltita puede resistir bien a efectos del agua. El ensayo del módulo de rigidez a la tracción indirecta se realizó a tres temperaturas diferentes, los valores de este aumentaron regularmente con el aumento de asfaltita demostrando así que las mezclas que contengan asfaltita pueden resistir a altas cargas a bajas temperaturas.

Las relaciones de resistencia a la tracción aumentaron con el contenido asfaltita, mientras que las mezclas de control perdieron 35% de su resistencia a la tracción después de un ciclo de congelación-descongelación. El efecto de mejora de la utilización de asfaltita como relleno fue señalado con la prueba de fatiga. Se concluyó a través de los resultados de las pruebas de laboratorio que el uso de asfaltita como relleno en asfalto de mezcla en caliente exhibió un alto rendimiento especialmente mediante la mejora de la resistencia a daños por humedad y la fatiga la vida.

(Chen, Lin, Wu, & Liu, 2011) Investigaron el uso de polvo de ladrillo reciclado como sustitución del llenante mineral en mezclas asfálticas, para el diseño y preparación de la mezcla se utilizaron dos tipos de materiales para así producir el mismo agregado en gradaciones y agregados similares.

Para encontrar el contenido óptimo de ligante asfáltico se llevaron a cabo pruebas Marshall, encontrando así que el contenido óptimo de la mezcla de asfalto con relleno de ladrillo reciclado y relleno de piedra caliza fue de 5,0% y 5,1%, respectivamente, y el contenido de relleno mineral de ambas mezclas de asfalto fue 4,0%. También se realizaron pruebas del módulo de tracción indirecta, pruebas de sensibilidad del agua, ensayos de fluencia estático y dinámico y ensayos de resistencia a la fatiga.

Llegando a la conclusión que la mezcla con relleno de ladrillo reciclado tenía un módulo de tracción indirecta superior a 40°C, lo que indicaba que la mezcla con reciclado de relleno de ladrillo tiene una mejor resistencia a la formación de surcos respecto a la mezcla de control. En comparación con el relleno de piedra caliza, la adición de carga de ladrillo reciclado mejora la sensibilidad al agua y la vida de fatiga de las mezclas de asfalto.

La adición de carga de ladrillo reciclado también podría disminuir considerablemente la deformación permanente a 60°C por ambos ensayos de fluencia estático y dinámico, que resultan en una mejor resistencia a la formación de surcos de la mezcla de asfalto a altas temperaturas y finalmente el uso del polvo de ladrillo reciclado como relleno mineral en la mezcla asfáltica es factible, en estudios sobre su comportamiento en el campo debe llevarse a cabo para apoyar los hallazgos de este estudio.

(Sacramento, Lee, & Kim, 2010) Evaluaron el comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente elaboradas con cal hidratada a través de diversas pruebas de laboratorio como: modulo dinámico, rendimiento, deformación permanente. En este estudio se utilizó superpave, aglutinante, seis tipos de agregado y cal hidratada en cinco mezclas preparadas para así mantener la angulosidad agregada y las características mineralógicas constantes, la única variable fue la cantidad de cal hidratada.

Obteniendo así que el efecto del contenido de cal hidratada en mezcla de rigidez no era muy sensible a altas frecuencias de carga, mientras que se observó un claro efecto de la cal hidratada en mezclas de refuerzo en las frecuencias de carga inferior. Los efectos de refuerzo mayores de cal hidratada se dio en las frecuencias bajas de carga esto explica la mejora del rendimiento de la resistencia rutina en las mezclas asfálticas en condiciones de alta temperatura.

En las pruebas de fatiga en el modo en fuerza controlada, hubo una tendencia generalmente creciente de la resistencia a una carga cíclica como la cal hidratada se utilizó con una excepción en la adición de cal hidratada de 1,5% en este estudio. Esperando que la tendencia sea cada vez mayor, ya que, en general, la vida de fatiga de mezclas más rígidas en el modo de fuerza controlada son más largos.

La resistencia de las mezclas a deformaciones permanentes mejoró de manera exponencial cuando se añadió cal hidratada. Sin embargo, también se observó que hay una cantidad crítica (2,0% en este estudio en particular), donde no se obtuvo ninguna mejora adicional en el rendimiento. Finalmente existe una aplicación más adecuada de cal hidratada en mezclas asfálticas para mejorar el rendimiento general del pavimento considerando los diversos modos de deterioro del pavimento.

(Jianying, Peiliang, & Shaopeng, 2009) Investigaron el efecto del hidróxido de aluminio sobre el desempeño del asfalto y asfalto modificado con superpave, evaluando el desempeño mecánico, pérdida de estabilidad, resistencia a la tracción indirecta mediante método Marshall.

Los resultados experimentales indicaron que la limitación de índice de oxígeno de dos tipos de retardantes de llama modificados, poseen mejor resistencia a la llama cuando se añadió la cantidad adecuada. El retardante de llamas mixtas puede aumentar la carta de intención de asfalto a bajo contenido, requiriendo así que el contenido de hidróxido de aluminio sea superior para lograr la igualdad de este índice.

Finalmente para investigar el efecto del agua sobre la mezcla de asfalto compactado, mediante método Marshall, se sumergieron en baño de agua a 60°C, 8 muestras de cada mezcla. Revelando que los retardantes de llama mixtos para modificar las mezclas asfálticas tienen la mejor estabilidad Marshall y el más bajo porcentaje de pérdida en estabilidad después de 30 minutos y/o 24 horas de inmersión.

La estabilidad Marshall de la mezcla de asfalto modificado con hidróxido de aluminio disminuye cuando se aumenta el contenido del hidróxido de aluminio, sugiriendo que al implementar hidróxido de aluminio puede aumentar la estabilidad Marshall y mejorar la resistencia a la humedad de estas mezclas, aunque al compararlas no muestra una diferencia aparente. El alto contenido de asfalto conduce una deformación permanente, debido al exceso de ligante asfáltico que causa la pérdida de la fricción interna. Pero la mezcla con contenido de retardantes de llama mixto presenta una mejor resistencia en la prueba de seguimiento de ruedas, creyendo así que estos contribuyen en la cohesión de la capacidad en mezclas asfálticas.

Concluyendo así que los retardantes de llama mixtos y el hidróxido de aluminio pueden mejorar la estabilidad y disminuir su porcentaje de pérdida en la mezcla, los retardantes reducen significativamente la inflamabilidad del aglutinante de asfalto en un bajo contenido, la descomposición térmica del aglutinante de asfalto se ve afectada con el uso del hidróxido de aluminio y el contenido de este tiene un efecto sobre el rendimiento de la mezcla, cuando se aumenta su contenido conduce a una mayor estabilidad inicial y condicionada, este aumento es eficaz en la mejora de la resistencia sobre las mezclas convencionales.

(Shu & Huang, 2014) Desarrollaron un resumen de los diferentes avances que ha tenido el uso de caucho de neumáticos en el asfalto. Ya que el uso de polvo de neumático en las mezclas ha sido un éxito debido a la buena compatibilidad y la interacción entre las partículas de caucho y del aglutinante de asfalto, dando lugar a que las propiedades y el rendimiento de la mezcla mejoren.

La interacción de polvo de neumático y ligante asfáltico han jugado un papel importante no solo en el rendimiento sino también en el procesamiento y almacenamiento. Implicando dos mecanismos opuestos que ocurren simultáneamente: hinchazón de las partículas de caucho que tiene lugar cuando el asfalto es absorbido en las partículas, debido a la naturaleza orgánica; y la disolución de las partículas de caucho que sucede

solo cuando el tiempo de mezclado es innecesariamente largo y la temperatura es excesivamente alta.

Aunque debido a que el polvo de neumático se almacena a altas temperaturas por las diferencias en la gravedad específica, se presenta un problema de inestabilidad de almacenamiento, para esto se plantea la disminución de los tamaños de las partículas de caucho, de la diferencia de la densidad y el aumento de la viscosidad del asfalto.

También se informó del alto costo de la construcción de caucho modificado ya que este oscila entre 1 y 3,6 veces de mezclas asfálticas convencionales, pero al considerar esto, es más preocupante el costo del ciclo de vida, donde debido a un estudio sobre un análisis de costo del ciclo de vida basada en la estadística (Hicks & Epps, 2000) concluyeron que cuando se diseñan adecuadamente, mezclas asfálticas con adición de caucho podría ser más rentable que el pavimento convencional.

Concluyendo así que el uso de caucho en mezclas de pavimento trae beneficios económicos, técnicos y ambientales. Ya que conduce a un aumento en la resistencia a la fatiga y a las bajas temperaturas, aunque uno de los principales problemas es la estabilidad de almacenamiento.

(Wu, Lin, & Chen, 2011) El objetivo principal era investigar el potencial del uso de polvo de agregado fino reciclado, subproducto de la producción de hormigón reciclado como relleno en mezclas asfálticas ya que al eliminar este material causa muchos problemas ambientales. Se utiliza como llenante en la mezcla de asfalto mediante la sustitución de polvo de piedra caliza.

Se llevó a cabo ensayos de resistencia a la tracción, módulo de pruebas indirectas, pruebas de tres puntos para flexión, fluencia dinámica y fatiga para comparar las propiedades entre mezclas asfálticas con piedra caliza y polvo de agregado fino reciclado, indicando que esta última pueden mejorar las propiedades de la mezcla como lo es la sensibilidad al agua y la resistencia a la fatiga. Sin embargo causa disminución en el rendimiento a baja temperatura. Indicando que se puede utilizar en regiones calientes.

(Beale & You, 2010) Observaron que la necesidad del diseño de la carretera de asfalto y su construcción sostenible se estaba convirtiendo en una prioridad dentro de la industria del transporte de asfalto. Por lo tanto investigaron implementar hormigón reciclado en mezclas asfálticas en caliente; el objetivo principal era caracterizar las propiedades de las mezclas con áridos reciclados de hormigón obtenidos de la demolición de la infraestructura de hormigón de cemento armado o sin formato.

Concluyendo que es posible implementar áridos reciclados de hormigón en carreteras donde las cargas de tráfico sean mínimas, la deformación permanente en la calzada no sería un problema con un porcentaje máximo del 75%, para utilizar el árido reciclado de hormigón se requiere un límite máximo para así asegurar que la resistencia a la tracción de la mezcla se conserven bajo los efectos del hielo, la nieve y otras formas de precipitación, el módulo dinámico incrementan.

(Ye, Li, & Wu, 2008) Investigaron los efectos de la fibra de poliéster sobre las características reológicas y las propiedades de fatiga, los resultados del ensayo de viscosidad indican que al aumentar el contenido de fibra de poliéster en bajas temperaturas, las pruebas de modulo dinámico con un contenido de 0,3% de fibra de poliéster se reducen a la misma temperatura conduciendo a una disminución en la fatiga.

Al comparar la mezcla modificada con la de control, el ciclo a fallo por fatiga con porcentajes de 0.5, 0.4 y 0.3% aumenta aproximadamente 1.9, 2.9 y 3.6 veces respectivamente. Confirmando que la propiedad de la fatiga en la mezcla se puede mejorar adicionando la fibra especialmente en niveles de tensión más bajos.

El módulo de cizallamiento complejo y el de pérdida del aglutinante disminuyen al aumentar el contenido de la fibra de poliéster, indicando así que la resistencia a las grietas por fatiga puede ser mejorada. El número de ciclos hasta el fallo de la mezcla modificada con fibra de poliéster se pueden aumentar en todos los niveles de estrés mejorando así la resistencia a la fatiga.

(Iwanski, Kowalska, & Maciejewski, 2015) El objetivo de su investigación fue evaluar las propiedades del asfalto espumado, que se producen a partir de una cera sintética modificando asfalto 50/70 para el uso de aglutinante en las capas de construcción en las carreteras. Para esto se evaluaron parámetros básicos del asfalto antes del proceso de formación de espuma, las características de formación del asfalto espumado y los diferentes niveles de contenido de agua en la formación de espuma. El impacto de la modificación de cera Fischer-Tropsch se evaluó con el contenido que va de 0,5% a 3,0%, teniendo en cuenta: punto de reblandecimiento de la temperatura, temperatura del punto de rotura, viscosidad dinámica, índice de penetración y el rango de plasticidad.

Las características físicas del asfalto espumado se evaluaron con parámetros empíricos como la máxima relación de expansión que es una medida de la viscosidad del asfalto espumado, una estimación de lo bien que la espuma se puede dispersar en los agregados para crear una mezcla uniforme y la vida media indica la estabilidad de la espuma proporcionando información acerca de la velocidad de decaimiento de espuma. Estos parámetros son inversamente proporcionales, el aumento del contenido de agua en la formación de espuma conduce a un aumento de la máxima relación de expansión y la disminución de la vida media larga.

El aumento del contenido de cera en un intervalo de 0,5% a 3,0% dio lugar a un endurecimiento considerable, por la disminución de la penetración y el aumento de la temperatura del punto de reblandecimiento, en un intervalo de 0,0% a 2,5% indujo la mejora en la espumabilidad del asfalto que se demuestra en el aumento de la relación de expansión y vida media, con una modificación de 2,5%, el 3,0% resulto en una disminución en la vida media de la espuma del asfalto, pero fue notablemente favorable respecto a la obtenida por el asfalto de la base.

Los resultados más favorables de formación de espuma se lograron para el asfalto que contiene 2,0%, 2,5%, y 3,0% de cera, ya que pueden ser utilizados para mezclas asfálticas en frío y en caliente, mientras que las restantes eran adecuadas solo para mezclas asfálticas en frío.

(Behnood & Ameri, 2012) Desarrollaron un estudio para investigar la viabilidad de utilizar agregados de escoria de acero en piedra matrix asphalt que es una mezcla caliente de asfalto desarrollada en Alemania que maximiza la fracción de agregado grueso, proporcionando un esqueleto estable de piedra que se mantiene unida por una mezcla de cemento asfáltico, relleno y aditivo estabilizante.

Para esto se desarrollaron estudios de laboratorio como estabilidad Marshall, sensibilidad a la humedad, pérdida de estabilidad, módulo resiliente y ensayo de fluencia dinámica, se llevaron a cabo en cinco mezclas asfálticas diferentes que contienen dos tipos de escoria de acero y un tipo de piedra caliza.

De acuerdo con los resultados, la resistencia a la tracción indirecta, y de módulo resiliente hay que tener en cuenta que las mezclas con escoria de acero tuvieron un mejor resultado respecto a los que contienen piedra caliza. La sustitución de la porción gruesa de agregado de piedra caliza con escoria de acero aumentó la estabilidad Marshall y disminuyó los valores de flujo, indicando así que tienen alta rigidez y resistencia a la deformación permanente.

La estabilidad Marshall y la resistencia a la tracción indirecta que se obtuvieron a partir de pruebas de susceptibilidad a la humedad, indicaron que al utilizar escoria de acero como agregado grueso se mejoró la resistencia de la mezcla a la humedad y los resultados de la fluencia dinámica indicaron que la mezcla es más resistente a la deformación permanente y tiene menos profundidad de huella.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. BIOSÓLIDOS EN COLOMBIA

El agua se contamina por la adición de residuos de agricultura, domésticos, industriales y comerciales en concentraciones o cantidades importantes, llegando al punto de restringir su uso.⁶ Se entiende por aguas residuales, en general, aquellas alteradas en su composición por el uso al que han sido sometidas, lo que conlleva a una pérdida de calidad y una necesidad de tratamiento o depuración⁷.

En el proceso de tratamiento de aguas residuales urbanas, se obtienen como subproductos el material retenido en los dispositivos de desbaste, arenas, grasas y biosólidos, siendo estos últimos los que suponen la mayor parte del volumen y presentan importantes problemas de tratamiento y evacuación.

2.1.1. Definición. Es el producto resultante de la estabilización de la fracción orgánica de los lodos generados en el tratamiento de aguas residuales municipales, con características físicas, químicas y microbiológicas que permiten su uso. No son biosólidos las escorias y cenizas producto de la oxidación o reducción térmica de lodos, así como los residuos que se retiran de los equipos e instalaciones de la fase preliminar del tratamiento de aguas residuales, ni los provenientes de dragados o de limpieza de sumideros.⁸

2.1.2. Características. Los biosólidos de la PTAR El Salitre contienen generalmente una alta concentración de nitratos y fosfatos, lo que los convierte en un fertilizante orgánico de muy buena calidad; lo anterior gracias a que las aguas residuales de la PTAR el Salitre no viene de la zona en la cual está concentrada la industria Bogotana. Las aguas que trata la PTAR el Salitre son principalmente de origen doméstico y de comercios y en menor medida de vertimientos industriales.

2.1.3. Normatividad. Los biosólidos se han investigado en el mundo por más de 30 años, y hace más de una década tienen en los países desarrollados un marco normativo que regula su aprovechamiento en actividades agrícolas y no agrícolas, así como su disposición.

Para realizar una adecuada gestión de estos residuos se deben conocer aspectos tan relevantes como la procedencia, cantidad y características. Aspectos que están relacionados con la calidad y la tasa de flujo de aguas residuales a ser tratadas, la época del año, las características de los sistemas de tratamiento de aguas y los métodos de procesamiento de los lodos (Mahamud & Gutiérrez, 1998).

⁶ Salvato, J. A., Nemerow, N. L., & Agardy, F. J. Environmental Engineering. CANADÁ: JOHN WILEY & SONS, INC. (2003)

⁷ Barrenetxea Orozco. Contaminación Ambiental: Una visión desde la química. Madrid. España: Thomson Editores Spain. (2003)

⁸ República de Colombia, Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. Decreto 1287, 10 de Julio de 2014. p. 2

En el programa de gestión del biosólido implementado en la PTAR el Salitre se contempla el monitoreo periódico de ciertos parámetros que permiten conocer su comportamiento y características físicas, químicas y microbiológicas. Mensualmente se analizan metales pesados en una muestra compuesta de biosólido. Además de lo anterior, se realizan muestreos puntuales para el análisis de características físicas, químicas y microbiológicas y se monitorea diariamente el proceso de tratamiento de los lodos⁹.

La agencia de protección ambiental de Estados Unidos (EPA), define valores límites de la concentración de constituyentes químicos, estos se presentan en la tabla 1.¹⁰

Tabla 1. Valores límites por la EPA Norma CFR 40 parte 503 Biosólidos

Constituyentes	Concentración Máxima (mg/kg)
Arsénico	75
Cadmio	85
Cobre	4300
Plomo	840
Mercurio	57
Molibdeno	75
Níquel	420
Selenio	100
Zinc	7500

Fuente: EPA. A Plain English Guide to the USEPA. Estados Unidos, 1994. Part 503 Biosolids Rule

Colombia cuenta con el decreto 1287 del 10 de Julio de 2014, por el cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. En la tabla 2, se presentan los valores máximos permisibles para la categorización de los biosólidos.

Tabla 2 Valores máximos permisibles de Categorización de Biosólidos para su uso.

Criterio	Variable	Unidad de Medida (Biosólido, base Seca)	Valores Máximos Permisibles	
			Categoría A	Categoría B
Químicos-Metales	Arsénico (As)	mg/kg	20	40
	Cadmio (Cd)		8	40
	Cobre (Cu)		1000	1750
	Cromo (Cr)		1000	1500
	Mercurio (Hg)		10	20
	Molibdeno (Mb)		18	75
	Níquel (Ni)		80	420
	Plomo (Pb)		300	400
	Selenio (Se)		36	100
	Zinc (Zn)		2000	2800

Fuente: Republica de Colombia, Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. Decreto 1287, 10 de julio de 2014

Los biosólidos que no cumplan los valores máximos permisibles establecidos podrán usarse en la operación de rellenos sanitarios como cobertura diaria, disposición conjunta

⁹ Biosólido. Acueducto agua y alcantarillado de Bogotá. [online]. [citado 25/12/2011]. Disponible en: <http://www.acueducto.com.co>

¹⁰ EPA. (194) a Plain English Guide to the USEPA Part 503 Biosolids Rule.

con residuos sólidos municipales en rellenos sanitarios y de manera independiente en sitios autorizados y en procesos de valorización energética. Y los que no se usen de acuerdo a lo dispuesto, deberán disponerse o ser tratados hasta cumplir con los valores establecidos para viabilizar su uso.

Estos podrán ser almacenados hasta por un periodo máximo de seis meses, en condiciones que garanticen el control de las emisiones de gases, manejo de lixiviados y el control a la proliferación de vectores. El sitio de almacenamiento deberá contar con un sistema de gestión de aguas residuales.¹¹

El biosólido de la PTAR EL SALITRE se clasifica como clase B; material en el cual se detectan patógenos, los cuales han sido estabilizados hasta niveles que no presentan algún riesgo para la salud pública y el medio ambiente. Lo anterior contando con que se tenga control en el manejo y disposición del subproducto.

Para la aplicación del biosólido clase B en los suelos, se deben llevar a cabo medidas de control como restricción al público en las áreas restauradas con este material y la prevención del consumo del material vegetal en animales. Razones como las anteriormente expuestas son una justificación más para la búsqueda de nuevas alternativas de valorización de este residuo producto del tratamiento a las aguas residuales

2.2. MEZCLAS ASFÁLTICAS

El asfalto es un aglomerante resistente, muy adhesivo, altamente impermeable y duradero. Es una sustancia plástica que da flexibilidad controlable a las mezclas de áridos con las que se combina usualmente. Además, es altamente resistente a la mayor parte de los ácidos, álcalis y sales.¹²

Se emplean en la construcción de capas de rodadura o en capas inferiores y su función es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica.¹³

El objetivo primordial del procedimiento de diseñar una mezcla es la de garantizar que la mezcla de pavimentación posea cada una de estas propiedades.

- **Estabilidad:** Es la capacidad de resistir desplazamientos y deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y lisura bajo cargas repetidas. Valores muy altos de estabilidad producen un pavimento demasiado rígido y, por lo tanto, menos durable de lo deseado. Depende de la fricción y la cohesión interna.
- **Durabilidad:** habilidad para resistir factores tales como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades del asfalto y separación de las películas de

¹¹ República de Colombia, Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. Op. Cit., p. 5

¹² Universidad Mayor de San Simón. Facultad de Ciencias y Tecnología. Texto Guía de Pavimentos. Cochabamba: Civilgeeks.com, 2004. p. 37

¹³ *Ibíd.*, p. 67

asfalto. Estos factores pueden ser el resultado de la acción del clima, el tránsito, o una combinación de ambos.

- **Impermeabilidad:** resistencia al paso de aire y agua hacia su interior, o a través de él. Esta característica está relacionada con el contenido de vacíos de la mezcla compactada, el grado de impermeabilidad está determinado por el tamaño de los vacíos, sin importar si están o no conectados, y por el acceso que tienen a la superficie del pavimento.
- **Trabajabilidad:** Facilidad con que una mezcla de pavimentación puede ser colocada y compactada. Las mezclas que poseen buena trabajabilidad son fáciles de colocar y compactar, puede ser mejorada modificando los parámetros de la mezcla, el tipo de agregado y/o granulometría.
- **Flexibilidad:** Capacidad de un pavimento asfáltico para acomodarse, sin que se agriete, a movimientos y asentamientos graduales de la subrasante, es una característica deseable en todo pavimento asfáltico debido a que todas las subrasantes se asientan bajo cargas o se expanden por expansión del suelo.
- **Resistencia a la fatiga:** El paso repetido de las cargas, de un valor inferior al de rotura, va produciendo un agotamiento progresivo por fatiga del material, en las condiciones en las que la mezcla tiene un comportamiento elástico, esto es, en condiciones de bajas temperaturas y de elevadas velocidades. El aumento de las deflexiones puede conducir a agrietamientos generalizados, lo que se conoce como piel de cocodrilo. Su determinación se lleva a cabo en laboratorio sometiendo las probetas a ensayos de cargas repetidas. A medida que el porcentaje de vacíos en un pavimento aumenta, ya sea por diseño o por falta de compactación, la resistencia a la fatiga disminuye.
- **Resistencia al deslizamiento:** Habilidad de una superficie de pavimento de minimizar el deslizamiento o resbalamiento de ruedas de los vehículos, cuando la superficie esta mojada. Para obtener una buena resistencia al deslizamiento, el neumático debe ser capaz de mantener contacto con las partículas del agregado en vez de rodar sobre una película de agua en la superficie
- **Relajación:** Es un estado de deformaciones que se aplican en un principio de manera instantánea y se mantiene constante; luego se determinan los esfuerzos necesarios de aplicación en el tiempo. Esta función se define de la misma manera que el flujo, el esfuerzo en un cuerpo visco elástico lineal durante una experiencia de relajación es proporcional a la deformación impuesta, para un cuerpo visco elástico-lineal dado, la función flujo y la función relajación no son independientes, y es imposible calcular una de esas funciones si no se conoce la otra.¹⁴

Tabla 3: Causas y efectos de las propiedades de una mezcla asfáltica.

¹⁴ CAPITULO 4: Diseño mezclas asfálticas. Disponible en: http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_130_181_83_1181.pdf [citado 13 de febrero de 2013]. P, 65-70.

CAUSAS	EFFECTOS
INESTABILIDAD	
Exceso de asfalto en la mezcla.	Undulaciones, ahuellamientos y afloramiento o exudación.
Exceso de arena de tamaño medio en la mezcla.	Baja resistencia durante la compactación y posteriormente, durante cierto tiempo; dificultad para la compactación.
Agregado redondeado sin, o con pocas, superficies trituradas.	Ahuellamiento y canalización.
POCA DURABILIDAD	
Bajo contenido de Asfaltos.	Endurecimiento rápido del asfalto y desintegración por pérdida de agregado.
Alto contenido de vacíos debido al diseño o a la falta de compactación.	Endurecimiento temprano del asfalto seguido por agrietamiento o desintegración.
Agregados susceptibles al agua.	Películas de asfalto se desprenden del agregado dejando un pavimento desgastado, o desintegrado.
PERMEABILIDAD	
Bajo contenido de Asfalto.	Las películas delgadas de asfalto causaran tempranamente, un envejecimiento y una desintegración de la mezcla.
Alto contenido de Vacíos en la Mezcla de Diseño.	El agua y el aire pueden entrar fácilmente en el pavimento, causando oxidación y desintegración de la mezcla.
Compactación Inadecuada.	Resultará en vacíos altos en el pavimento, lo cual conducirá a la infiltración de agua y baja estabilidad.
PROBLEMAS EN LA TRABAJABILIDAD	
Tamaño máximo de partícula grande.	Superficie áspera, difícil de colocar.
Demasiado agregado grueso.	Puede ser difícil de compactar.
Temperatura muy baja de mezcla.	Agregado sin revestir, mezcla poco durable, superficie áspera, difícil de compactar.
Demasiada arena de tamaño medio.	La mezcla se desplaza bajo la compactadora y permanece tierna o blanda.
Bajo contenido de relleno mineral.	Mezcla tierna, altamente permeable.
Alto contenido de relleno mineral.	Mezcla muy viscosa, difícil de manejar, poco durable.
MALA RESISTENCIA A LA FATIGA	
Bajo contenido de asfalto.	Agrietamiento por fatiga.
Vacíos altos de diseño.	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga.
Falta de compactación.	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga.
Espesor inadecuado de pavimento.	Demasiada flexión seguida por agrietamiento por fatiga.
POCA RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO	
Exceso de asfalto.	Exudación, poca resistencia al deslizamiento.
Agregado mal graduado o con mala textura.	Pavimento liso, posibilidad de hidroplaneo.
Agregado pulido en la mezcla.	Poca resistencia al deslizamiento.

Fuente: CAPITULO 4: Diseño mezclas asfálticas. Disponible en: http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_130_181_83_1181.pdf [citado 13 de Febrero de 2013].

2.2.1. Clasificación

- Por la temperatura de puesta en obra:
 - Mezclas asfálticas en caliente: Se fabrican a unas temperaturas elevadas, en el rango de los 150°C, según la viscosidad del ligante, se calientan también los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos. La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores a la temperatura ambiente.

- Mezclas asfálticas en frío: El ligante suele ser una emulsión asfáltica, y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.
- Por la granulometría:
 - Mezclas continuas: Una cantidad muy distribuida de diferentes tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico.
 - Mezclas discontinuas: Una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico.¹⁵
- Por la proporción de vacíos en la mezcla asfáltica:
 - Mezclas cerradas o densas: La proporción de vacíos no supera el 6%.
 - Mezclas semicerradas o semidensas: La proporción de vacíos esta entre el 6% y 10%.
 - Mezclas abiertas: La proporción de vacíos supera el 12%.
 - Mezclas porosas o drenantes: La proporción de vacíos es superior al 20%.

2.2.2. *Agregados Pétreos:* Las mezclas asfálticas están compuestas por agregados, asfaltos y vacíos de aire. La calidad de la mezcla asfáltica está directamente ligada con las propiedades y dosificación de los agregados y del cementante, como también a la cantidad de los vacíos de aire.

Las mezclas asfálticas constituyen la parte superior de los pavimentos flexibles y proporcionan un medio de distribución de carga y de impermeabilización que protege la estructura de pavimento de los efectos adversos del agua y de la acción del tránsito. Se emplean para la construcción de pavimentos nuevos, para incrementar la resistencia o mantener una calidad satisfactoria en la superficie de un pavimento existente, o para mejorar la resistencia al deslizamiento.

Los agregados empleados para la ejecución de la mezcla asfáltica en caliente deberán poseer una naturaleza tal, que al aplicársele una capa de material asfáltico a utilizar en el trabajo, esta no se desprenda por la acción combinada del agua y del tránsito.¹⁶

2.2.2.1 *Agregado Grueso:* Es la porción del agregado retenida en el tamiz #4. Dicho agregado deberá proceder de la trituración de piedra de cantera o de grava natural, o por una combinación de ambas.

¹⁵ PADILLA RODRÍGUEZ, Alejandro. Mezclas Asfálticas. Capítulo 3 UPC.

¹⁶ Mezclas asfálticas en caliente, densas, semidensas, gruesas, y de alto módulo. Desarrollo Urbano, alcaldía mayor de Bogotá D.C. Disponible en: http://app.idu.gov.co/espec_tecnicas/Capitulo_5/510-11.pdf.

Figura 1. Agregado Grueso, Planta de Asfalto Beinco S.A.S



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Septiembre de 2015

Lugar: Planta de Asfalto Beinco R&R S.A.S.

2.2.2.2. Agregado Fino: Es la porción comprendida entre los tamices #4 y #200. El agregado fino deberá proceder en su totalidad de la trituración de piedra de cantera o de grava natural, o parcialmente de fuentes naturales de arena. Los granos del agregado fino deberán ser duros, limpios y de superficie rugosa y angular. El material deberá estar libre de cualquier sustancia que impida la adhesión del asfalto.

Figura 2. Agregado Fino, Planta de Asfalto Beinco S.A.S



Fuente: LARA PÉREZ M.Y., Septiembre de 2015

Lugar: Planta de Asfalto Beinco R&R S.A.S.

2.2.2.3. Filler o llenante mineral: Es la porción del agregado que pasa el tamiz #200, la cual podrá provenir de los procesos de trituración y clasificación de los agregados pétreos o del colector de polvo de la planta mezcladora, o podrá ser un producto comercial, generalmente cal hidratada o cemento portland.

Figura 3. Llenante Mineral, Planta de Asfalto Beinco S.A.S



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Septiembre de 2015

Lugar: Planta de Asfalto Beinco R&R S.A.S.

2.2.2.4 Ligante asfáltico El ligante deberá ser el establecido en los documentos técnicos del proyecto en función de las condiciones de operación de la vía, la composición de la estructura del pavimento y la posición de la capa asfáltica.

Figura 4. Ligante Asfáltico



Fuente: Materiales Bituminosos. <http://www.dtt.ufpr.br/Pavimentacao/Notas/Mod.%204%20%20Materiais%20Asfalticos.pdf>

2.2.3. *Diseño de Mezcla Asfálticas:* El diseño de una mezcla asfáltica consiste en establecer las proporciones óptimas de los agregados y el ligante que producirán una mezcla que pueda ser extendida y compactada en una superficie uniforme de textura adecuada, que sea resistente a la deformación, que soporte sin agrietarse las deflexiones elásticas repetidas del pavimento, y que sea impermeable al agua y durable.

La cantidad de asfalto está influenciada por la cantidad de arena y, en especial, del llenante (filler). Se ha encontrado que bajo condiciones normales y entre límites razonables, la adición del llenante reduce la cantidad de asfalto para la mezcla. El filler puede ser natural o de aporte, en este último caso puede ser cemento Pórtland, polvo calizo de trituración o cualquier material inerte. La adición de un llenante satisfactorio incrementa la estabilidad de la mezcla asfáltica. Cantidades excesivas de llenante pueden reducir la durabilidad de la mezcla asfáltica debido a la reducción de la película de asfalto sobre los agregados.

Los contenidos de llenante nunca deben exceder el 10% del peso total de los agregados en mezclas asfálticas y el 20% para mezclas de arena asfalto. Usualmente, consideraciones prácticas y ejecuciones óptimas indican cantidades de llenante del 5% para mezclas asfálticas y del 10% para mezclas de arena asfalto. Las mezclas deben diseñarse empleando un llenante comercial que cumpla con las especificaciones ASTM.

La granulometría está establecida por normas o especificaciones que determinan husos o bandas granulométricas, aunque el diseño está basado más en consideraciones volumétricas y en las características de compactación y empaquetamiento de los agregados. Los métodos de diseño primordialmente son empíricos, entre los más conocidos se tienen el Marshall, Hveem, el derivado del SHRP, Superpave (EEUU); y el Duriez (Francia), entre otros

2.2.4. Mezclas Densas en Caliente (MDC): Esta mezcla puede ser colocada como capa de base o de rodadura; esta última capa tiene la responsabilidad de brindar durabilidad, comodidad y seguridad de los usuarios y además es la que va a soportar de manera completa las cargas aplicadas tanto verticales como horizontales. Para que las mezclas sean de alta calidad deben tener drenabilidad, buena adherencia, agregado o ligante, buena resistencia a la deformación plástica y homogeneidad. Cada capa de rodadura debe cumplir con las funciones de eliminar las vibraciones molestas a elevadas velocidades.

Las mezclas asfálticas en caliente son las más empleadas en muchas partes del mundo, debido a su flexibilidad, duración, uniformidad, resistencia a la fatiga y economía entre otras características, generando por ende investigaciones y desarrollos para mejorar sus propiedades mecánicas y dinámicas. Muchos de los adelantos se han enfocado en el proceso constructivo de la conformación de las carpetas de rodadura.¹⁷

2.2.5. Ensayos

2.2.3.1 Contenido de Asfalto. El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende, de características del agregado como la granulometría y la capacidad de absorción. Entre más finos contenga la gradación de la mezcla, mayor será el área superficie total y la cantidad de asfalto requerida para cubrir, uniformemente, todas las partículas. Por otro lado las mezclas más gruesas exigen menos asfalto debido a que poseen menos área superficie total.

La capacidad de absorción del agregado usado en la mezcla es importante para determinar el contenido óptimo de asfalto. Esto se debe a que se tiene que agregar suficiente asfalto a la mezcla para permitir absorción, y para que además se puedan cubrir las partículas con una película adecuada de asfalto. El contenido total de asfalto es la cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla.¹⁸

2.2.3.2 Determinación del Peso Específico. El peso específico es la relación en peso para volúmenes iguales de betún y agua refinados ambos a la temperatura de 25° C. Su determinación comprende una muestra de betún a las temperaturas y medio ambiente. Se expande cuando se le calientan y se contraen cuando se enfrían. Para fijar condiciones determinadas aplicables a un valor dado del peso específico, debe indicarse la temperatura del material y del agua.¹⁹

2.2.3.3 Estabilidad y Flujo Marshall. La estabilidad es una medida de la carga bajo la cual una probeta falla totalmente durante un ensayo, cuando la carga es aplicada lentamente, los cabezales superior e inferior del aparato se acercan, y la carga sobre la briqueta aumenta al igual que la lectura en el indicador del cuadrante. Luego se

¹⁷ ORTIZ REYES, Oscar Javier. CAMACHO TAUTA, Javier Fernando y LIZCANO, B. Freddy. Influencia de la temperatura y Nivel de Compactación en las Propiedades Dinámicas de una Mezcla Asfáltica. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, 2006. P.126.

¹⁸ CAPITULO 4: Diseño mezclas asfálticas. Op. Cit., p. 64

¹⁹ GADVAY, Lisseth. Peso específico del asfalto. Guía para el laboratorio de Asfaltos. Universidad Técnica de Machala.

suspende la carga una vez se obtiene la carga máxima, esta carga es el valor de la estabilidad. El flujo es la deformación está indicada por la disminución en el diámetro vertical de la briqueta.

2.2.3.4 Análisis de Vacíos. Los vacíos son las pequeñas bolsas de aire que se encuentran entre las partículas de agregado revestidas de asfalto. El porcentaje de vacíos se calcula a partir del peso específico total de cada probeta compactada y de peso específico teórico de la mezcla de pavimento. Los vacíos en el agregado mineral, está definido por el espacio intergranular de vacíos que se encuentra entre las partículas de agregado de la mezcla de pavimentación compactada, incluyendo los vacíos de aire y el contenido efectivo de asfalto, y se expresan como un porcentaje de volumen total de la mezcla.²⁰

2.3. MÉTODO MARSHALL

Este método determina el procedimiento para realizar los ensayos de estabilidad y fluencia de mezclas asfálticas preparadas en caliente, utilizando el equipo Marshall. Se determinan características físicas de las mezclas y se analizan los parámetros que definen el contenido de asfalto. Para la estabilidad se emplea el principio de corte en compresión semi-confinada, sometiendo una muestra a esfuerzos de compresión diametral a una temperatura de 60°C. La aplicación de esfuerzos y la rotura se consiguen con un dispositivo diseñado especialmente para las pruebas de estabilidad.

El valor de estabilidad representa la resistencia estructural de la mezcla compactada y está afectada principalmente por el contenido de asfalto, la composición en granulometría y el tipo de agregado. El valor de estabilidad es un índice de calidad del agregado.

La mezcla debe tener la fluidez necesaria para que pueda compactarse a la densidad exigida y producir una textura superficial adecuada. El valor del flujo representa la deformación producida en el sentido del diámetro del espécimen antes de que se produzca su fractura. Este valor indica la tendencia para alcanzar una condición plástica y consecuentemente será un indicio de la resistencia que ofrecerá la carpeta asfáltica a deformarse bajo la acción de las cargas que por ella transiten.²¹

El método MARSHALL se emplea en la dosificación de mezclas densas en caliente de agregados pétreos y cemento asfáltico con o sin llenante mineral. El objetivo es determinar la proporción adecuada de cemento asfáltico con muestras de 2 ½ in de altura por 4 in de diámetro que asegure:

- Suficiente estabilidad para satisfacer el servicio sin desplazamientos o distorsiones.
- Suficiente asfalto para que sea durable y recubra las partículas del agregado, impermeabilizando y ligándolas entre sí, compactadas adecuadamente.
- Suficiente trabajabilidad para que no se segregue al colocarla en el pavimento.

²⁰ CAPITULO 4: Diseño mezclas asfálticas. Op. Cit., p. 73-74

²¹ Texto Guía de Pavimentos Op. Cit., p. 264-265

- Suficientes vacíos en la mezcla para proveer un espacio que impida la pérdida de estabilidad al compactarse adicionalmente por las cargas del tránsito o aumentos de asfalto por las altas temperaturas.

Cuando se elabora el diseño de una mezcla es frecuentemente necesario hacer varias combinaciones de prueba para encontrar una que cumpla con todos los criterios de diseño. Cada una de las mezclas de prueba sirve como una guía para evaluar y ajustar las pruebas siguientes. Para el diseño de mezclas preliminares o exploratorias, es aconsejable comenzar con una gradación de agregado que se acerque a la media de los límites establecidos. Las mezclas de prueba iniciales sirven para establecer la fórmula de trabajo y verificar que la gradación de agregado dentro de los límites especificados puede ser reproducida en la planta mezcladora.

Cuando las mezclas de prueba no cumplen los criterios de diseño, con cualquier contenido de asfalto seleccionado, será necesario modificar o rediseñar la mezcla. La manera más fácil de rediseñar una mezcla, para corregir una deficiencia, es cambiar la gradación de los agregados ajustando los porcentajes empleados. Este ajuste suele ser suficiente para cumplir con las especificaciones.

Existen lineamientos generales para ajustar las mezclas de prueba, aunque estas sugerencias no funcionan en todos los casos:

Pocos vacíos y baja Estabilidad: Los vacíos pueden incrementarse de diferentes formas. Una estrategia general para lograr vacíos suficientes en el agregado mineral (y en consecuencia, proveer espacio para una adecuada cantidad de asfalto y vacíos de aire), es ajustar la graduación del agregado mediante la adición de más agregado grueso o fino.

Si el contenido de asfalto es más alto de lo normal, y el exceso no es necesario para remplazar el absorbido por el agregado, dicho contenido de asfalto debe reducirse con el fin de incrementar el porcentaje de vacíos, proveyendo un adecuado VMA (Voids in Mineral Aggregate).

Se debe recordar que al disminuir el porcentaje de asfalto se afectará la durabilidad del pavimento. Una reducción excesiva en el contenido de asfalto puede ocasionar fracturación, oxidación acelerada e incremento de la permeabilidad. Si los ajustes anteriores no producen una mezcla estable, tendrá que cambiarse el agregado.

También es posible mejorar la estabilidad e incrementar el contenido de vacíos en el agregado de la mezcla, mediante el incremento del agregado grueso o la reducción de la cantidad de material que pasa la malla No. 200. El contenido de vacíos puede mejorarse, sin sacrificar la estabilidad de la mezcla, con la incorporación de arena triturada.

Pocos Vacíos y Estabilidad Satisfactoria: Eventualmente, los bajos contenidos de vacíos pueden producir inestabilidad asociada con el flujo plástico después de que el pavimento ha sido expuesto al tránsito debido a la reorientación de las partículas y a la compactación adicional. Los vacíos insuficientes pueden ser producto de la cantidad

requerida de asfalto para obtener una durabilidad alta en mezclas finas; no obstante la estabilidad podría ser satisfactoria inicialmente para el tipo de tránsito especificado.

Asimismo, la degradación de un agregado pobre durante la producción de la mezcla o bajo la acción del tránsito puede ocasionar subsecuentemente la inestabilidad y el flujo si el contenido de vacíos de la mezcla no es suficiente. Por estas razones, las mezclas con pocos vacíos tendrán que ajustarse por uno de los métodos dados en el literal anterior, sin importar que la estabilidad inicial sea satisfactoria.

Vacíos Satisfactorios y Baja Estabilidad: La baja estabilidad, cuando los vacíos y la gradación del agregado son satisfactorios, puede indicar algunas deficiencias en el agregado. Se deberán tomar acciones para mejorar la forma de las partículas de los agregados empleando material producto de trituración, incrementando el porcentaje de agregado grueso en la mezcla o, posiblemente, aumentando el tamaño máximo del agregado. Las partículas de agregado con textura rugosa y superficies poco redondeadas presentan mayor estabilidad cuando se mantiene o incrementa el volumen de vacíos.

Muchos Vacíos y Estabilidad Satisfactoria: Los altos contenidos de vacíos se asocian frecuentemente con mezclas de alta permeabilidad. Al permitir la circulación de aire y agua a través del pavimento se puede ocasionar el endurecimiento prematuro del asfalto, el desprendimiento del agregado o posible el desprendimiento del asfalto en el agregado. Aun cuando la estabilidad sea satisfactoria se deben realizar ajustes para reducir los vacíos. Se logran pequeñas reducciones mediante la adición de polvo mineral a la mezcla.

Muchos Vacíos y Baja Estabilidad: Se deben tomar en cuenta dos pasos para este tipo de condiciones; el primero es ajustar el volumen de vacíos mediante los métodos discutidos en los puntos anteriores; y el segundo, si los ajustes no mejoran la estabilidad, es evaluar la calidad de los materiales.²²

2.3.1. *Pautas de Comportamiento Ensayo Marshall:*

- La densidad aumenta con el contenido de asfalto hasta un máximo después del cual comienza a decrecer.
- La curva de estabilidad es similar a la curva de la densidad, salvo que la máxima estabilidad ocurre normalmente (no siempre) a un contenido de asfalto ligeramente inferior al de máxima densidad.
- Los valores de flujo aumentan con los incrementos en el contenido de asfalto.
- El porcentaje de vacíos con aire en la mezcla total disminuye al incrementarse el contenido de asfalto, tendiendo hacia un mínimo.

2.3.2. *Selección del Contenido Óptimo de Asfalto en la Mezcla.* Con base en las curvas que se obtienen en los resultados de las pruebas Marshall a las briquetas, el contenido óptimo de asfalto se calcula promediando los siguientes valores:

²² LÓPEZ, DAVID. Variabilidad del Módulo Resiliente de una Mezcla Asfáltica MDC-2. Universidad Nacional de Colombia. P. 22-25

- a) El que corresponde a la densidad máxima.
- b) El que corresponde a la estabilidad máxima.
- c) El que corresponde al valor medio del porcentaje de vacíos con aire permitido

Por lo general la mezcla de diseño a elegir debe ser la más económica que cumpla con los criterios establecidos. Siempre que las condiciones económicas fuesen iguales, se elegirá la mezcla de mayor estabilidad, aunque debe tenerse presente que las mezclas con estabilidad muy alta y flujo muy bajo no son deseables, porque los pavimentos hechos con tales mezclas tienden a ser muy rígidos y frágiles y pueden agrietarse bajo tránsito. Esto es particularmente cierto cuando las características de la base y la subrasante son tales que permiten deflexiones relativamente altas en el pavimento.

Es asimismo deseable que el porcentaje de vacíos de aire permanezca dentro de los límites fijados por las especificaciones, ya que si es muy bajo habrá tendencia hacia la exudación del asfalto de la mezcla, mientras que si es muy alto puede producirse un envejecimiento prematuro del asfalto por cuanto la capa queda más expuesta a los agentes atmosféricos que se traduce en la desintegración del pavimento.²³

2.4. MODULO RESILIENTE

Es el módulo elástico a ser usado con la teoría elástica. Se conoce bien que la mayoría de los materiales del pavimento no son elásticos pues experimentan alguna deformación permanente después de cada aplicación de carga. Sin embargo, si la carga es pequeña comparado con la resistencia del material y se aplica un número grande de repeticiones, la deformación bajo cada aplicación de carga es casi completamente recuperable, proporcional a la carga y puede ser considerada como elástica.

El tipo y duración de las cargas usadas en la prueba de esfuerzo repetido deben simular lo que realmente ocurre en el campo. Cuando la carga de la rueda está a una distancia considerable de un punto dado en el pavimento, el esfuerzo en ese punto es cero. Cuando la carga está directamente sobre el punto dado, la tensión en el punto es máxima. Es por consiguiente razonable asumir que el pulso de esfuerzo pueda ser de forma sinusoidal o de forma triangular, cuya duración depende de la velocidad del vehículo y la profundidad del punto debajo de la superficie del pavimento.

Debido a que la carga aplicada es normalmente pequeña, el ensayo de módulo resiliente es una prueba no destructiva y la misma muestra puede usarse para muchas pruebas bajo diferentes condiciones de carga y medioambientales.

Para carreteras pavimentadas con material asfáltico, la prueba de tensión indirecta es muy empleada para determinar el módulo resiliente. El ensayo de tensión indirecta involucra una carga de compresión de un espécimen cilíndrico a lo largo de su diámetro vertical. A las velocidades de tráfico típicas y temperaturas del pavimento, el asfalto se comporta casi elásticamente y su módulo de tensión indirecta es una medida de su resistencia a la flexión y de su habilidad carga deformación.

²³ Método Marshall para Diseño de Mezclas de Agregados con Cemento Asfáltico. P. 91

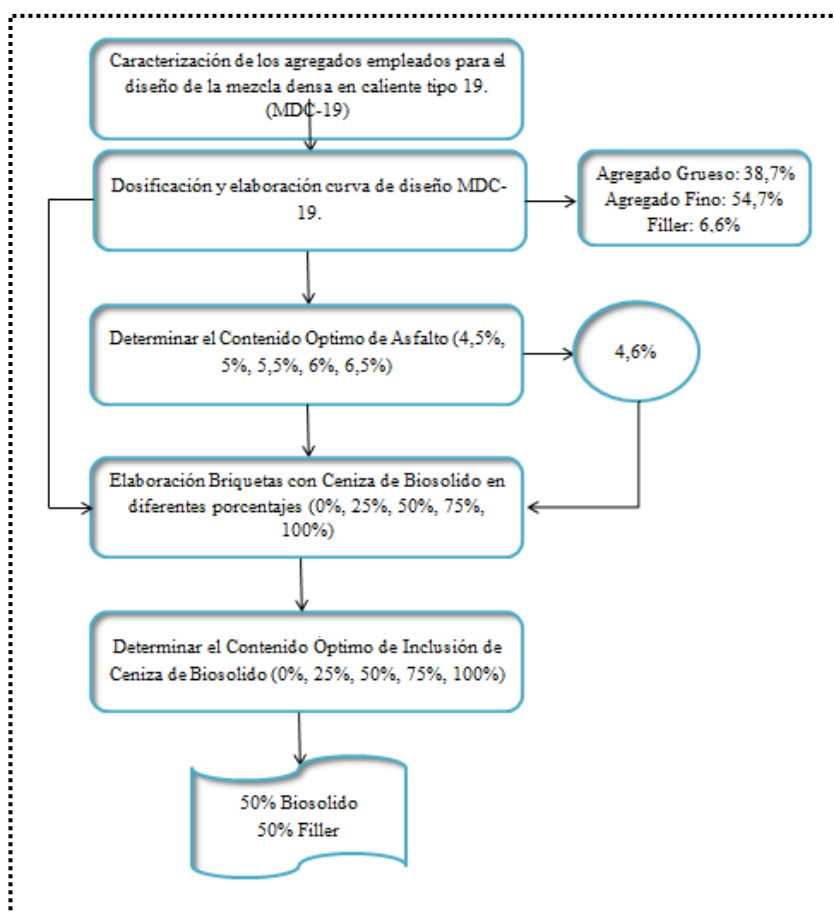
La acumulación de la deformación permanente probablemente es el inconveniente más grande de la prueba de tensión indirecta. Esto tiende a esconder la evidencia de daño de fatiga, y de acuerdo con la prueba, no caracteriza la conducta de fatiga directamente, esto es particularmente cierto para las temperaturas altas dónde la conducta no lineal y visco elástica del material es más pronunciada.

Cuando no se dispone del equipo adecuado para medir los módulos dinámicos de las mezclas asfálticas se han empleado fórmulas o expresiones que usan la composición volumétrica de la mezcla y las características del asfalto para estimar un valor para el módulo de la mezcla. Conviene comentar que son expresiones desarrolladas en otros países con materiales cuya respuesta a las condiciones locales no es necesariamente igual a la obtenida en los sitios de la cual se obtuvo la información.²⁴

²⁴ LOPEZ, DAVID. Op Cit. P, 33-35

3. METODOLOGÍA

Figura 5. Metodología Investigación.



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Septiembre de 2015

3.1. MATERIALES EMPLEADOS

Los materiales utilizados en este proyecto de investigación son provenientes de la planta de asfalto Beinco S.A.S, ubicada en la ciudad de Tunja, Boyacá; cumpliendo estos los requisitos necesarios para una Mezcla Densa en Caliente tipo 19 (MDC-19).

3.1.1. Ensayos Realizados al Material Granular:

- Gravedad Específica y Absorción de los Agregados Gruesos (INV. E-223)

El ensayo se usa para determinar la densidad de la porción esencialmente sólida de un gran número de partículas de agregado y suministra el valor promedio que representa la muestra. Se sumerge en agua una muestra de 2 Kg del agregado durante un periodo de 24h, para llenar sus poros permeables. Se seca la muestra en un horno a 110°C, se deja al aire a temperatura ambiente de 1 a 3 horas y posteriormente se sumerge en agua, a temperatura ambiente durante 24 h. Después del periodo de inmersión, se seca la muestra del agua y se secan las partículas con un paño absorbente de gran tamaño, hasta que se elimine el agua superficial visible. Luego de determinar la masa en el aire, se

coloca la muestra en el interior de la canastilla metálica y se determina su masa sumergida en el agua, a la temperatura de 23°C. Finalmente se seca la muestra en horno a 110°C hasta masa constante, se enfría el aire a temperatura ambiente de 1 a 3 h y se determina su masa.²⁵

Figura 6. Agregado Grueso Sumergido en Agua.



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Octubre de 2015

Lugar: Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja.

- Gravedad Específica y Absorción de los Agregados Finos (INV. E-222)

Se utiliza para determinar la densidad de la porción esencialmente solida de un gran número de partículas. Se sumerge en agua una muestra del agregado durante 24 h, para llenar sus poros permeables. Una vez retiradas del agua, las partículas del agregado se secan superficialmente y se determina su masa, se realiza la prueba de cono para verificar la condición saturada y superficialmente seca. Posteriormente, la muestra se coloca en un recipiente graduado y se determina su volumen. Finalmente, la muestra se seca al horno y se determina su masa seca.²⁶

Figura 7. Prueba de Cono, Agregado Fino



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Octubre de 2015

Lugar: Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja.

Figura 8. Agregado Fino Saturado en Picnómetro



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Octubre de 2015

Lugar: Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja.

²⁵ *Ibíd.*, p. 125

²⁶ *Ibíd.*, p. 107

- Resistencia al Desgaste de los Agregados de Tamaños Menores de 1 ½" por medio de la Máquina de los Ángeles (INV. E-218)

Este ensayo mide la degradación de un agregado pétreo, como resultado de una combinación de acciones que incluyen abrasión, impacto y molienda en un tambor de acero rotatorio que contiene un número determinado de esferas metálicas, que depende de la granulometría de la muestra del ensayo. A medida que gira el tambor, una pestaña de acero recoge la muestra y las esferas de acero y las arrastra hasta que caen por gravedad en el extremo opuesto del tambor, creando un efecto de impacto y trituración. Tras el número especificado de revoluciones, se retira el contenido del tambor y se tamiza la porción del agregado para medir la gradación, como un porcentaje de pérdida.²⁷

Figura 9. Máquina de los Ángeles. Desgaste de Material



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Octubre de 2015

Lugar: Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja.

- Equivalente de Arena de Suelos y Agregados Finos. (INV. E-133)

Este ensayo tiene por objeto determinar, las porciones relativas de polvo y material de apariencia arcillosa o finos plásticos presentes en suelos o agregados finos de tamaño inferior a 4,75 mm. Se obtienen 1500g de material que pase el tamiz #4 y se divide en tres porciones de muestra, se ajusta el montaje del sifón a un botellón de 1 galón de cloruro de calcio y se coloca en un estante situado a 90 cm por encima de la superficie de trabajo. Se vierte en la solución de cloruro una de las porciones separadas del material, se deja reposar durante 10 minutos y al finalizar se tapa el cilindro con el tapón y se agita simultáneamente el cilindro. Inmediatamente se coloca el cilindro en posición vertical se inserta un tubo irrigador, se aplica la acción punzante y de giro mientras se lavan los finos hasta que el cilindro este lleno hasta la marca de 381 mm.

Determinación de la lectura de Arcilla: Después de pasados 20 minutos del periodo de sedimentación, se toma la lectura y se anota el nivel de la parte superior, a este valor se denomina lectura de arcilla. Si la lectura no se puede tomar en un periodo máximo de 30 min se debe repetir el procedimiento.

Determinación de la lectura de Arena: Después de tomar la lectura de arcilla, se introduce el conjunto del disco. La barra y el sobrepeso hasta que llegue a la arena. Cuando el pie descansa sobre la arena, se inclina el dispositivo hacia las graduaciones

²⁷ *Ibíd.*, p. 75

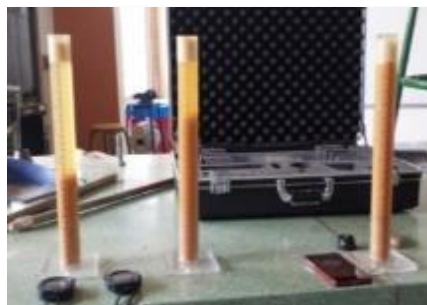
del cilindro hasta que el indicador toque la pared. Se restan 254 mm y se registra el valor como lectura de arena.²⁸

Figura 10. Agitador Mecánico



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Octubre de 2015
Lugar: Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja.

Figura 11. Lectura Equivalente de Arena



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Octubre de 2015
Lugar: Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja.

- Índice de Aplanamiento y Alargamiento de los Agregados (INV. E-230)

Las partículas planas y alargadas tienden a producir mezclas de concreto poco trabajables, lo que puede afectar su durabilidad a largo plazo. Para el índice de aplanamiento se utiliza un calibrador de espesores y para el índice de alargamiento se utiliza un calibrador de longitudinales²⁹

Figura 12. Calibrador de Espesores.



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Octubre de 2015
Lugar: Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja.

Figura 13. Calibrador de Longitudinales.



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Octubre de 2015
Lugar: Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja.

- Granulometría de los Agregados Gruesos y Finos (INV. E-213)

Este método determina cuantitativamente la distribución de los tamaños de las partículas de los agregados grueso y fino de un material, por medio de tamizado. Los resultados se emplean para determinar el cumplimiento de las especificaciones en relación con la distribución de partículas para suministrar los datos necesarios para el control de la producción de los agregados y de las mezclas que los contengan. La muestra se deberá mezclar completamente y reducir a un tamaño apropiado para el ensayo, después de secada, la muestra deberá tener una masa mínima de 300g para

²⁸ NORMAS Y ESPECIFICACIONES INVIAS, Normas de ensayo para materiales de Carretera. Instituto Nacional de Vías, 2015. Sección 100 P.297

²⁹ *Ibíd.*, p. 173

agregado fino y 2 kg para agregado grueso con tamaño máximo nominal de $\frac{1}{2}$ ". Se selecciona la serie de tamices, ordenados descendientemente. Después de pasar todo el material seleccionado por los tamices se realiza el pesado de cada uno de ellos para continuar con la construcción de la curva granulométrica y el análisis del mismo. Se calcula el porcentaje que pasa, el porcentaje total retenido con base en la masa total de la muestra inicial seca.³⁰

Figura 14. Tamices para Granulometría de los Agregados



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Octubre de 2015
Lugar: Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja.

- Granulometría del Llenante Mineral (INV. E-215)

Este ensayo se basa en la ley de Stokes, la cual relaciona la velocidad de una esfera, cayendo libremente a través de un fluido, con el diámetro de la esfera. El hidrómetro se usa para determinar el porcentaje de partículas de suelos dispersados, que permanecen en suspensión en un determinado tiempo. Se aplica a partir de partículas de suelos que pasa el tamiz #200.³¹

Figura 15. Hidrómetro



Fuente: <http://equipamientocientifico.com/suelo/1031-hidrometro-para-suelos-de-bouyoucos.html>

³⁰ NORMAS Y ESPECIFICACIONES INVIAS, Normas de ensayo para materiales de Carretera. Instituto Nacional de Vías, 2015. Sección 200 P.33

³¹ NORMAS Y ESPECIFICACIONES INVIAS. Sección 100. Op. Cit., p. 53

3.1.2. Ensayos Realizados al Cemento Asfáltico:

La planta de asfalto Beinco S.A.S, suministro la ficha técnica presentada en la tabla 4 y la curva Reologica (Anexo A) del cemento asfáltico 60/70 realizada por la gerencia de la refinería Barrancabermeja.

Tabla 4. Ficha Técnica de la Calidad de Ensayos de Laboratorio Asfalto 60/70

Análisis	Unidad	Resultado	Especificación	Método
Curva Reologica				
Viscosidad a 60°C	cP	268000	Reportar	ASTM D 4402
Viscosidad a 80°C	cP	23650	Reportar	ASTM D 4402
Viscosidad a 100°C	cP	3507	Reportar	ASTM D 4402
Viscosidad a 135°C	cP	415	Reportar	ASTM D 4402
Viscosidad a 150°C	cP	207	Reportar	ASTM D 4402
Gravedad Api/ Gravedad Especifica en Crudos				
Gravedad API	Grados API	6.8	Reportar	ASTM D 4052
Densidad a 15°C	kg/m ³	1022.5	Reportar	ASTM D 4052
Índice de Penetración Calculado				
Penetración a 25°C	mm/10	66	60 Mín. 70 Máx.	ASFALTO VENT
Índice de Penetración	N/A	-6	Reportar	ASFALTO VENT
Punto Ablandamiento	°C	49.8	45 Mín. 55 Máx.	ASFALTO VENT
Punto de Inflamación	°C	296	232 Mín.	ASTM D 92-12

Fuente: Certificado de Calidad Asfalto 60/70. Gerencia Refinería Barrancabermeja. Ecopetrol 28/03/2016.

3.1.3. Ensayos Realizados al Biosólido

Siguiendo los lineamientos establecidos por la NTC – ISO 5667-13 (Gestión ambiental. Calidad de agua. Parte 13. Guía para el muestreo de lodos de aguas residuales y plantas de tratamiento de aguas)³²; el muestreo se realizó de la siguiente manera:

- Revisión del lugar para muestreo

Como primera medida, se realizó una visita a las instalaciones de la PTAR para conocer el proceso de tratamiento a las aguas residuales y determinar cuál sería el lugar más adecuado para la realización de un muestreo manual. De la visita se estableció como lugar de muestreo las bandas transportadoras, ubicadas al final del proceso de tratamiento al que son sometidos los lodos producto de la depuración de las aguas residuales.

- Muestreo desde bandas transportadoras

El proceso de recolección de la muestra fue manual y se llevó a cabo en una sección de las bandas transportadoras; para evitar el sesgo en la muestra, la pala o elemento recolector se insertó de manera alterna al paso del biosólido y se aseguró que la muestra incluyera todo el ancho de la banda transportadora.

³² INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Gestión ambiental. Calidad de agua. Parte 13: Guía para el muestreo de lodos de aguas residuales y plantas de tratamiento de aguas. NTC - ISO 5667-13. Bogotá D.C.: El instituto, 1998. 21 p.

Figura 16. Biosólido en Bandas Transportadoras



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Octubre de 2015

Lugar: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales. El Salitre, Bogotá.

- Equipo y Tipo de muestreo utilizado

Para evitar la contaminación de la muestra por el material de los equipos de muestreo se usaron bolsas de polietileno y para la recolección del material se hizo un muestreo aleatorio (puntual) de la banda transportadora.

- Pretratamiento

Se llevó a cabo la quema del biosólido traído de la PTAR en un horno a gas natural para así eliminar la materia orgánica presente. Las briquetas se realizan con el producto final de este proceso (ceniza).

3.1.3.1. Caracterización del Biosólido.

- Análisis mineralógico:

Es una técnica dedicada a la identificación de los minerales, y al conocimiento detallado de sus propiedades físicas y químicas, pudiendo así clasificarlos y determinar su utilidad, peligrosidad, vida útil, etc. Para esto existen varios métodos de análisis como: el estudio microscópico, difracción de rayos x, análisis espectrografico, microsonda electrónica, fluorescencia de rayos x y absorción atómica.³³

3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL

3.2.1. Dosificación y Curva de Diseño. Generalmente, en la planta asfáltica se dispone de un material del tipo grava (retenido en tamiz # 4), de una arena gruesa (pasa # 4 y retiene # 40), de una arena fina (pasa # 40 y retiene # 200), con los cuales se trata de obtener la granulometría especificada.

³³ CANDIOTTI, HUGO. Análisis Mineralógico en la Industria. El ingeniero Geólogo Bogotá D.C., 2005. P. 37

Como los materiales se van a agrupar teniendo en cuenta los tamices #4, #40 y #200, los porcentajes usados se determinaron como muestran las formulas 1, 2, 3 y 4; teniendo en cuenta la gradación deseada, ($PT = Pasa Tamiz$): ³⁴

$$\% Grava = 100 - \%PT\#4 \quad (1)$$

$$\% Arena Gruesa = \% PT\#4 - \% PT\#40 \quad (2)$$

$$\% Arena Fina = \% PT\#40 - \% PT\#200 \quad (3)$$

$$\% Llenante Mineral = \% PT\#200 \quad (4)$$

3.2.2 Briquetas Realizadas según Diseño Marshall.³⁵ Se realizaron 3 briquetas por cada contenido de asfalto de acuerdo al método Marshall cumpliendo con los parámetros para una mezcla caliente tipo 19 (MDC-19).

3.2.2.1. Equipo:

Figura 17. Molde de compactación 4" diámetro y 3" de altura



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Febrero de 2016
Lugar: Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja.

Figura 19. Pedestal firme anclado al piso.



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Febrero de 2016
Lugar: Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja.

Figura 18. Martillo de compactación con zapata circular (peso 10 lb - altura de caída 18")



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Febrero de 2016
Lugar: Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja.

Figura 20. Prensa de ensayo Marshall.



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Febrero de 2016
Lugar: Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja.

³⁴ Método Marshall para Diseño de Mezclas de Agregados con Cemento Asfáltico. P. 82-83

³⁵ *Ibíd.*, p. 81

3.2.2.2. Procedimiento³⁶:

- a) Se coloca la mezcla de cada fracción de agregado y se calienta a 110°C, mezclándose rápidamente con el cemento asfáltico, teniendo en cuenta la cantidad indicada para cada agregado.

Figura 21. Mezcla Agregados y Cemento Asfáltico



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Febrero de 2016

Lugar: Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja.

- b) Se hace la mezcla entre agregados y asfalto en el menor tiempo posible para evitar disminuciones perjudiciales en la temperatura.

Figura 22. Mezcla Agregados y Cemento Asfáltico a Temperatura de 110°C



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Febrero de 2016

Lugar: Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja.

- c) Antes de colocar la mezcla dentro del molde, tanto este como el martillo de compactación deben limpiarse y calentarse durante 30 minutos a una temperatura de 100°C.

³⁶ *Ibíd.*, p. 85

Figura 23. Molde Listo para Agregar Mezcla Densa en Caliente



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Febrero de 2016

Lugar: Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja.

- d) Se coloca la mezcla de 1200 gramos y se empareja, aplicando 15 golpes alrededor del perímetro y 10 en su interior.

Figura 24. Emparejamiento de la Mezcla con 25 Golpes en su Interior



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Febrero de 2016

Lugar: Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja.

- e) Se sujeta el molde con el aro de ajuste que tiene para tal efecto, se apoya sobre la mezcla el martillo de compactación y se aplican 77 golpes, a caída libre y cuidando que el martillo este siempre vertical.

Figura 25. Montaje en Pedestal de la Mezcla Densa en Caliente, para Compactación.



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Febrero de 2016

Lugar: Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja.

- f) Terminada la aplicación del número de golpes requeridos, se retira el molde del dispositivo de ajuste, se le quita la placa base y se invierte el molde y se vuelve a montar el dispositivo, aplicando el mismo número de golpes a la que ahora es la cara superior de la muestra.
- g) Se retira el molde del pedestal, y se deja enfriar la briqueta en el molde a temperatura ambiente y se marca.

Figura 26. Briquetas en molde de Compactación



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Febrero de 2016

Lugar: Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja.

- h) Se saca la briqueta del molde. Y finalmente, se coloca sobre una superficie lisa y bien ventilada durante toda la noche.

Figura 27. Briquetas Estándar sin Contenido de Biosólido



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Febrero de 2016

Lugar: Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja.

Las briquetas con (0, 25, 50, 75 y 100) % de biosólido se realizaron siguiendo el mismo procedimiento.

3.2.2.1 Ensayos Realizados a las Briquetas³⁷

- Contenido de Asfalto:
 - a) Se pesa la muestra y el filtro utilizado para posteriormente colocar la muestra en la taza sumergida en gasolina y se coloca el filtro en la campana y un recipiente en el desagüe para el vestidor de gasolina.
 - b) Se enciende la máquina de centrifugado incrementando su velocidad hasta 3600 rpm, a medida que la maquina expulsa la gasolina con el asfalto se debe ir adicionando más gasolina hasta que salga de una manera clara, en ese momento se termina el proceso de lavado y se detiene la máquina.
 - c) Se retira la cubierta y el filtro se limpia bien para que no quede material adherido a este y se pesa el material y filtro para sacar la diferencia del peso inicial con peso final tanto del filtro como del agregado y se saca el porcentaje del contenido de asfalto.
- Peso Específico “bulk” de las probetas compactadas:

El peso específico “bulk” de una probeta compactada es la relación entre su peso en el aire y su volumen incluyendo los vacíos permeables.

Si la probeta tiene una textura superficial densa e impermeable, su peso específico “bulk” se determina sencillamente mediante la fórmula 5.

$$Gb = \frac{Wa}{W_{ss} - W_w} \quad (5)$$

Siendo:

Wa = Peso de la probeta seca en aire.

W_w = Peso de la probeta en el agua.

W_{ss} = Peso en el aire de la probeta saturada y superficialmente seca.

Si la textura superficial de la probeta es abierta y permeable, su volumen se determina por la diferencia entre su peso en el aire y su peso en el agua estando parafinada y el peso específico “bulk” se hallara con la fórmula 6.

$$Gb = \frac{Wa}{W_{ap} - W_{wp} - \frac{W_{ap} - Wa}{G_p}} \quad (6)$$

Siendo:

Wa = Peso en el aire de la probeta sin parafina.

W_{ap} = Peso en el aire de la probeta parafinado.

W_{wp} = Peso en el agua de la probeta parafinada.

G_p = Peso específico de la parafina.

³⁷. *Ibíd.*, p. 87-90

- Ensayo de Estabilidad y Flujo
 - a) Se limpia cuidadosamente la superficie interior de la mordaza de prueba y se lubrican las barras guías con una delgada película de aceite, de manera que el segmento superior del anillo deslice libremente. Si se usa un anillo para medir la carga aplicada, debe controlarse que su dial este bien fijo y en cero cuando no haya carga.
 - b) Estando listo el aparato de carga Marshall para el ensayo, se coloca la probeta en la mordaza inferior de prueba y se centra. Luego se ajusta el anillo superior en posición y se centra el conjunto en el mecanismo de carga.
 - c) A continuación se coloca el medidor de flujo sobre la barra guía y se lleva una aguja a cero.
 - d) Se aplica carga a la probeta a una velocidad de 2 pulgadas/minuto hasta que ocurra la falla. El punto de falla se define mediante la máxima lectura obtenida en el dial de carga. El número correspondiente a esta lectura se anota como ESTABILIDAD MARSHALL
 - e) Mientras se está aplicando carga, se mantiene el medidor de flujo firmemente en posición sobre la barra guía y se retira cuando ocurra la carga máxima. La lectura en el dial en este instante se denomina FLUJO y se acostumbra a expresar en milímetros.
- Análisis de densidad y vacíos.

Al terminar los ensayos de estabilidad y flujo, debe realizarse un análisis de la densidad y vacíos para cada serie de muestras en la siguiente forma:

- a) Se promedian los pesos específicos “Bulk” de todas las probetas elaboradas con el mismo porcentaje de asfalto, descartando las que se alejen demasiado del promedio.
- b) Se calcula el peso específico promedio del agregado total, mediante la fórmula 7:

$$G_{agr} = \frac{100}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}} \quad (7)$$

Dónde:

P_n = Porcentajes en peso de cada una de las fracciones de material que intervienen en el total del agregado

G_n = Pesos específicos de los materiales a los que corresponden las fracciones anteriormente mencionadas.

- c) Se calcula el peso específico máximo teórico de la muestra para cada porcentaje de asfalto. Se calcula mediante la ecuación 8:

$$G_{mt} = \frac{100}{\frac{\% \text{ Agregados}}{G_{agr}} + \frac{\% \text{ Cemento Asfáltico}}{G_{asf}}} \quad (8)$$

- d) Se calcula el porcentaje de absorción de asfalto por peso de agregado seco, para cada porcentaje de cemento asfáltico utilizado, mediante la fórmula 9:

$$A_a = \frac{G_{mm} - G_{mt}}{G_{mm} \times G_{mt} \times \% \text{ Agregados}} \times 10000 \quad (9)$$

Dónde:

G_{mm} = Peso específico máximo medido.

G_{mt} = Peso específico máximo teórico.

$\% \text{ Agregados}$ = Porcentaje de agregados con la relación al peso de la mezcla total.

- e) Se determina el porcentaje en volumen que ocupa el agregado con respecto al volumen total de la probeta, como muestra la fórmula 10.

$$V_{agr} = \frac{\% \text{ Agregado} \times G_b}{G_{agr}} \quad (10)$$

- f) Se calcula el porcentaje de vacíos con aire con respecto al volumen total de la probeta.

$$V_v = \left(1 - \frac{G_b}{G_m}\right) \times 100 \quad (11)$$

3.2.3. Cálculo Modulo Resiliente.³⁸

Finalmente se lleva a cabo el cálculo del modo Resiliente, donde se tiene en cuenta los siguientes parámetros.

3.2.3.1. Temperatura media anual ponderada:

Se obtiene de la estación climatológica de la Universidad Pedagógica de Colombia. Existe una curva de factores de ponderación de temperatura para cada una de las temperaturas medias mensuales. El promedio de la sumatoria del factor de temperatura es un factor de ponderación promedio. Las temperaturas medias mensuales de aire, se refieren a una temperatura efectiva del asfalto para obtener el modulo efectivo de este. Con este factor de ponderación se entra a la curva de factores de ponderación de temperatura y finalmente se lee el valor ponderado de la temperatura

³⁸ Higuera, Carlos. NOCIONES SOBRE MÉTODOS DE DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS PARA CARRETERAS.

3.2.3.2. Determinación de T800 e IP:

Se determinó la T800 por medio del nomograma de Van der Poel, para el cálculo del módulo dinámico del bitumen teniendo el índice de penetración el cual se determinó por el reporte de resultados de ensayos de laboratorio obtenido en la gerencia refinería Barrancabermeja, coordinación inspección de calidad.

3.2.3.3. Módulo de rigidez del asfalto Sb. Para ello es necesario conocer

- Índice de penetración.
- Tiempo de aplicación de carga. La SHELL recomienda emplear un tiempo de 0.02s, que corresponde a una velocidad del vehículo de 50–60 Km/h.
- $\Delta T = T800 - T \text{ mezcla}$. Donde la T mezcla se obtiene de un nomograma.

Finalmente teniendo en cuenta el módulo dinámico y los porcentajes de agregados y de asfalto se ingresa al monograma de BONNAURE, para determinar el módulo de rigidez de la mezcla (S_{mix})

4. RESULTADOS

4.1 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL GRANULAR

En la figura 28 se presentan los requisitos que deben cumplir los agregados para mezclas asfálticas en caliente, especificados por la norma INVIAS.

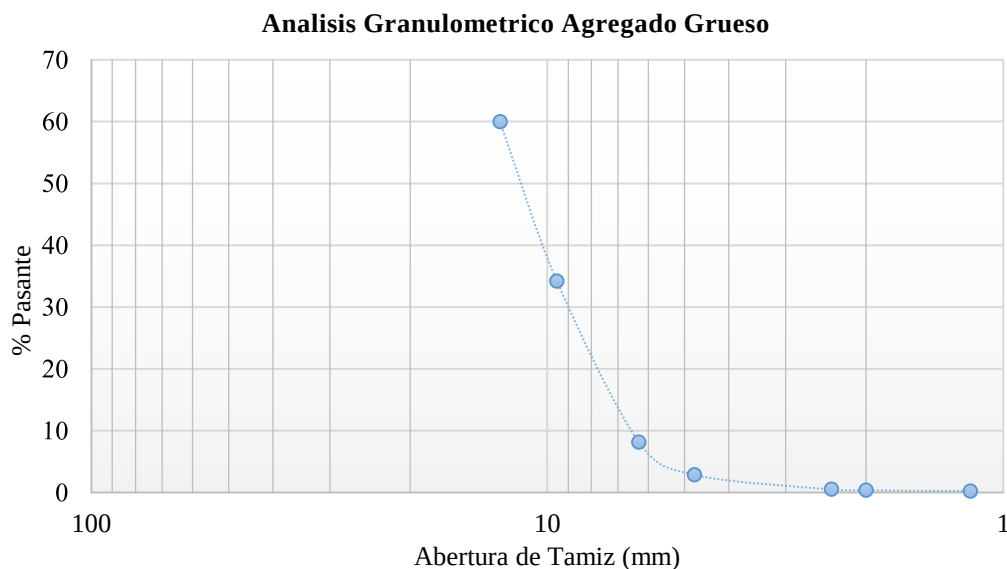
Figura 28. Requisitos de los Agregados para Mezclas Asfálticas en Caliente.

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	NIVEL DE TRÁNSITO		
		NT1	NT2	NT3
Dureza, agregado grueso (O)				
Desgaste en la máquina de los Ángeles, máximo (%)				
- Capa de: rodadura / intermedia / base, 500 revoluciones	E-218	25/35/-	25/35/35	25 / 35 / 35
- Capa de: rodadura / intermedia / base, 100 revoluciones		5/7/-	5/7/7	5/7/7
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)	E-238			
- Capa de: rodadura / intermedia / base			25/30/30	20/25/25
Resistencia mecánica por el método del 10% de finos, capa de: rodadura / intermedia / base	E-224			
- Valor en seco, mínimo (kN)				110/90/75
- Relación húmedo/seco, mínima (%)				75/75/75
Coefficiente de pulimiento acelerado para rodadura, mínimo	E-232	0.45	0.45	0.45
Durabilidad (O)				
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, agregados fino y grueso, máximo (%)	E-220	18	18	18
Limpieza, agregado grueso (F)				
Impurezas en agregado grueso, máximo (%)	E-237	0.5	0.5	0.5
Limpieza, gradación combinada (F)				
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-125 y E-126	NP	NP	NP
Equivalente de arena, mínimo (%) (Nota 1)	E-133	50	50	50
Valor de azul de metileno, máximo (Nota 1)	E-235	10	10	10
Geometría de las partículas, agregado grueso (F)				
Partículas planas y alargadas, relación 5:1, máximo (%)	E-240	10	10	10

Fuente: Mezclas Asfálticas de Gradación Continua. Norma INVIAS. Art. 450-3.

- Resistencia al Desgaste de los Agregados de Tamaños Menores de 1 ½" por medio de la Máquina de los Ángeles (INV. E-218): El porcentaje de pérdidas obtenido es de 21,3% concluyendo así que el agregado es de buena calidad, cumpliendo con la norma Invias, la cual indica que para capa de rodadura y nivel de tránsito 2, el porcentaje máximo es del 25%.
- Granulometría de los Agregados Gruesos y Finos (INV. E-213): en la gráfica 1 se presenta la granulometría de los agregados gruesos. La forma de la curva da una idea de su graduación y permite establecer que es un material que no presenta una distribución uniforme (grava mal graduada) con un 66 % aproximadamente de gravilla (19 - 9.5 mm).

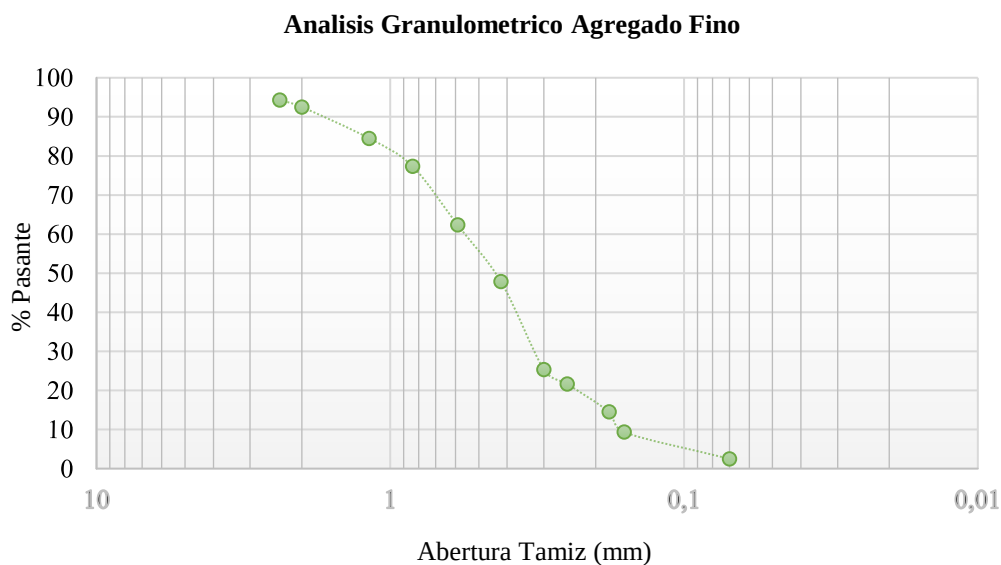
Grafica 1. Curva Agregado Grueso.



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Abril de 2016.

En la gráfica 2 se presenta la granulometría del agregado fino y se observa el comportamiento de una arena mal graduada, donde más de un 80% del material componente del agregado pasa el tamiz de 1 mm de abertura y un 70% del total de la fracción se clasifica como arena fina (2.00 – 0.42 mm).

Grafica 2. Curva Agregado Fino.

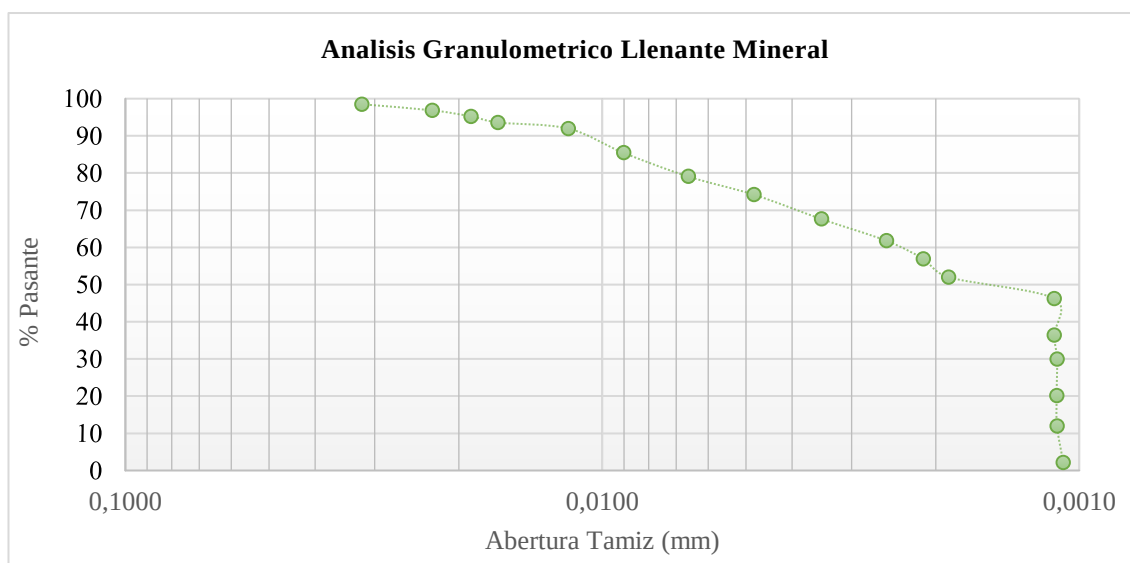


Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Abril de 2016.

- Granulometría del Llenante Mineral (INV. E-215): El llenante mineral es un material que tiene una composición granulométrica pasante del tamiz #200 como se observa en la gráfica. Es un material no arcilloso que pasa por el tamiz #200 y se incorpora a la mezcla con el fin de aumentar la estabilidad y disminuir el porcentaje de asfalto necesario para obtener un determinado porcentaje de vacíos en la mezcla,

este además afecta la durabilidad, por esto se debe controlar estrictamente su cantidad y calidad.

Grafica 3. Curva Llenante Mineral



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Abril de 2016.

- Gravedad Específica y Absorción de los Agregados Gruesos y Finos (INV. E-223/222): La gravedad específica de los agregados se encuentra entre 2,48 – 2,80 g/cm³, valor que cumple los requisitos para ser usado como materia prima en mezclas asfálticas. (ASOCRETO, 1997). Siendo mayor el valor del agregado fino debido a que este tiene una mayor compactación y menor relación de vacíos. Con el porcentaje de vacíos se puede concluir que este material retiene poca agua, generando un beneficio para la dosificación de la mezcla.

Tabla 5. Resultados Gravedad Específica y Absorción de los Agregados Gruesos y Finos

Agregado Grueso			Agregado Fino		
Gravedad Específica SH	2,653	g/cm ³	Gravedad Específica SH	2,667	g/cm ³
Gravedad Específica SSS	2,697	g/cm ³	Gravedad Específica SSS	2,635	g/cm ³
Absorción	1,67	%	Absorción	1,21	%

Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Abril de 2016.

- Índice de Aplanamiento y Alargamiento de los Agregados (INV. E-230): El índice de alargamiento y aplanamiento obtenido por el material granular utilizado en la mezcla cumple con el índice máximo de 10% establecido en la norma Invias para capa de rodadura con un nivel de tránsito 2.

Tabla 6. Índice de Alargamiento y Aplanamiento Agregado Grueso

Abertura	2" a 1 1/2"	1 1/2" a 1"	1" a 3/4"	3/4" a 1/2"	1/2" a 3/8"	3/8" a 1/4"
Alargamiento	-	-	1,9%	1,0%	4,4%	1,4%
Aplanamiento	1,7%	1,1%	1,5%	1,8%	2,1%	-

Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Abril de 2016.

- Equivalente de Arena de Suelos y Agregados Finos. (INV. E-133): El equivalente de arena obtenido es de 54% con esto se puede establecer que la muestra tiene un grado de limpieza suficiente para utilizarse en capa de rodadura. Cumpliendo con la norma Invias, que indica que para capa de rodadura y nivel de transito 2, el porcentaje mínimo es de 50%.
- Porcentaje de biosólido que pasa el tamiz #200: Se llevó a cabo el desgaste de la ceniza del biosólido por el método de la máquina de los ángeles, con 1500 revoluciones. Concluyendo así que solo el 3,3% pasa el tamiz #200.

Figura 29. Biosólido luego del proceso de quema.



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Febrero de 2016

Lugar: Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja.

- Límite Líquido y Límite Plástico del Biosólido: Esta propiedad se mide mediante un procedimiento normalizado en que una mezcla de suelo y agua, es capaz de ser moldeada, se deposita en la cuchara de Casagrande y se golpea consecutivamente contra la base, hasta que el surco que previamente se ha recortado, se cierre. Para medir la plasticidad se han desarrollado varios criterios, Atterberg menciona que no es una propiedad permanente de las arcillas, sino circunstancial y dependiente de su contenido de agua. Este material no presenta límite líquido ni plástico.³⁹

³⁹ BORFITZ, Arturo; U.N.E.E, Facultad de Ingeniería. Cátedra Geotecnia. 2008.

Figura 30. Biosolido en Cuchara de



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Febrero de 2016
Lugar: Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja.

Figura 31. Biosolido, Ensayo de Limite Plástico.



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Febrero de 2016
Lugar: Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja.

- Equivalente de Arena: Se llevó acabo el ensayo de equivalente de arena del biosólido obteniendo así un 33%.

Figura 32. Equivalente de Arena de Biosolido



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Febrero de 2016
Lugar: Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja.

4.2. DOSIFICACIÓN Y CURVA DE DISEÑO

Se seleccionaron porcentajes de cemento asfaltico de 4,5% a 6,5% en intervalos de 0,5% respecto a la mezcla total. La tabla 7 presenta la cantidad de material granular para cada briqueta teniendo en cuenta los diferentes porcentajes de contenido de cemento asfaltico.⁴⁰

⁴⁰ *Ibíd.*, p. 83

Tabla 7. Cantidad Material Granular para los Diferentes Porcentajes de Contenido de Asfalto

Peso Agregados					
%	4.5 %	5.0 %	5.5 %	6.0 %	6.5 %
(g)	1146	1140	1134	1128	1122

Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Abril de 2016.

Para realizar la dosificación se debe tener en cuenta la cantidad de material granular que pasa en cada tamiz. En la tabla 8 se encuentran las franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente, sugeridas por la norma.

Tabla 8. Franjas Granulométricas para Mezclas Asfálticas en Caliente.

TIPO DE MEZCLA		TAMIZ									
		% PASA									
		1 ½"	1"	¾"	½"	3/8"	#4	#10	#40	#80	#200
Densa	MDC-25		100	80-95	67-85	60-77	43-59	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-19			100	80-95	70-88	49-65	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-10					100	65-87	43-61	16-29	9-19	5-10
Semi Densa	MSC-25		100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
	MSC-19			100	80-95	65-80	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
Gruesa	MGC-38	100	75-95	65-85	47-67	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11	2-6
	MGC-25		100	75-95	55-75	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11	2-6
Alto Modulo	MAM-25		100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	10-20	8-14	6-9

Fuente: Norma INVIAS, Capítulo 4 Pavimentos Asfálticos. Art.450

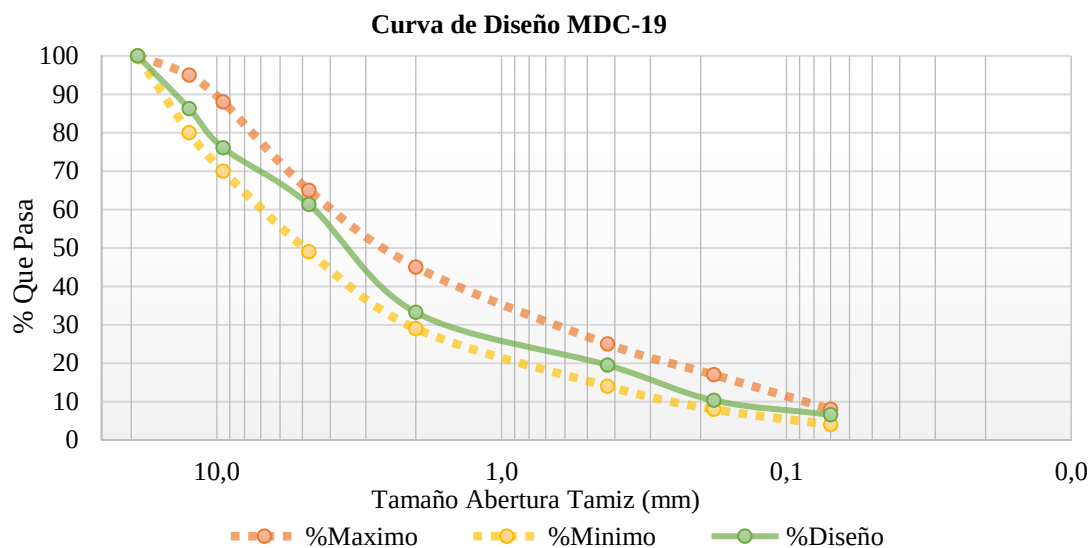
Con la distribución granulométrica del agregado usado para el diseño de la mezcla se tiene una mezcla continua, debido a sus bien distribuidas fracciones granulométricas que van del tamiz ¾" al tamiz #200. La prueba de gradación se realizó de acuerdo a la norma Invias, en la tabla 9 se presentan los datos necesarios para la elaboración de la curva de diseño, mostrada en la gráfica 4.

Tabla 9. Curva de Diseño. MDC-19

Tamiz	Milímetros	Pasante Max	Pasante Min	Diseño
¾"	19,0	100	100	100,0
1/2	12,50	95	80	86,2
3/8	9,50	88	70	76,0
Nº 4	4,75	65	49	61,3
Nº 10	2,00	45	29	33,2
Nº 40	0,43	25	14	19,5
Nº 80	0,18	17	8	10,3
Nº 200	0,07	8	4	6,6

Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Abril de 2016.

Grafica 4. Curva de Diseño MDC-19



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Abril de 2016.

En la tabla 10 se relaciona la cantidad de material retenido en cada tamiz para cada uno de los porcentajes de contenido de asfalto, verificando así que se cumpla el peso de los agregados presentados en la tabla 7.

Tabla 10. Porcentaje Material Retenido para cada Contenido de Asfalto

Tamiz	% Retenido	4,5%	5%	5,5%	6%	6,5%
1/2	13,8	157,69	156,86	156,04	155,21	154,39
3/8	10,2	117,08	116,47	115,86	115,25	114,63
Nº 4	14,7	168,73	167,84	166,96	166,08	165,19
Nº 10	28,1	321,91	320,23	318,54	316,86	315,17
Nº 40	13,7	157,12	156,29	155,47	154,65	153,83
Nº 80	9,2	105,20	104,65	104,10	103,55	103,00
Nº 200	3,7	42,68	42,46	42,24	42,01	41,79
Filler	6,6	75,58	75,19	74,79	74,40	74,00
Total	100,0	1146	1140	1134	1128	1122

Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Abril de 2016.

4.3. CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA.

Se lleva a cabo un ensayo de difracción de rayos X, que permite determinar la estructura detallada de los materiales es decir conocer la posición que ocupan los átomos, iones o moléculas que lo forman para determinar propiedades físicas y químicas del material. Obteniendo los resultados presentados en el anexo E.

4.3.1 Filler:

Tabla 11. Fases Cristalinas del Filler.

	Fase	Nombre	Cuantitativo
Cristalino	Si O ₂	Cuarzo	10,5%
	Ca C O ₃	Calcita	39,0%
	Ca Mg (C O ₃) ₂	Dolomita	6,0%
	K Al ₃ Si ₃ O ₁₀ (O H) ₂	Moscovita	6,2%
	Na (Al Si ₃ O ₈)	Albita	4,2%
	Fe S ₂	Pirita	2,2%
	Ca (S O ₄) (H ₂ O) ₂	Yeso	0,9%
Total Cristalino			69,0%
Amorfos y Otros			31,0%

Fuente: Laboratorio de Rayos X, Universidad Industrial de Santander.

4.3.2 Biosolido:

Tabla 12. Fases Cristalinas del Biosolido.

	Fase	Nombre	Cuantitativo
Cristalino	Si O ₂	Cuarzo	11,0%
	Fe ₂ O ₃	Hematita	8,7%
	(Ca ₂₋₅₈₉ Mg ₀₋₄₁₁) (P O ₄) ₂	Fosfato de Calcio y Magnesio	14,4%
	Ca ₈₉₅ NA ₁₄ Al ₁₋₈₃ Si ₂₋₁₆ O ₈	Aluminosilicato de Calcio y Sodio	33,3%
	Fe ₃ O ₄	Magnetita	N.C
	Si O ₂	Cristobalita	23,2%
	Fe ₂ (Si O ₄)	Silicato de Hierro	2,3%
Total Cristalino			93,0%
Amorfos y Otros			7,0%

Fuente: Laboratorio de Rayos X, Universidad Industrial de Santander.

4.4 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA.

Se llevó a cabo un ensayo de fluorescencia de rayos x que se basa en el estudio de las emisiones de fluorescencia generadas después de la excitación de una muestra mediante una fuente de rayos X. La radiación incide sobre la muestra excitando los átomos presentes en la misma, que emiten a su vez radiación característica denominada fluorescencia de rayos X. Ver Anexo F.

4.4.1. Filler:

Tabla 13. Resultados Fluorescencia de Rayos X del Filler

Elemento	Numero Atómico (Z)	Concentración	Oxido	Concentración
Si	14	20,95%	SiO ₂	44,83%
Ca	20	11,04%	CaO	15,45%
Fe	26	10,41%	Fe ₂ O ₃	14,88%
Al	13	6,32%	Al ₂ O ₃	11,94%
P	15	3,35%	P ₂ O ₅	7,68%
Mg	12	0,98%	MgO	1,63%

Elemento	Numero Atómico (Z)	Concentración	Oxido	Concentración
K	19	0,72%	TiO ₂	1,09%
Ti	22	0,65%	K ₂ O	0,87%
Zn	30	0,29%	ZnO	0,36%
Na	11	0,24%	Na ₂ O	0,33%
Ba	56	0,14%	SO ₃	0,19%
Cu	29	0,09%	BaO	0,16%
S	16	0,07%	CuO	0,11%
Mn	25	0,07%	MnO	0,10%
Zr	40	0,06%	ZrO ₂	0,08%
Sr	38	0,05%	SrO	0,06%
Cr	24	0,03%	Cr ₂ O ₃	0,04%
V	23	0,01%	V ₂ O ₅	0,02%
Ni	28	0,01%	NiO	0,02%
Elementos Minoritarios				
Elemento	Numero Atómico (Z)	Concentración	Oxido	Concentración
Rb	37	39 mg/Kg	Rb ₂ O	43 mg/Kg

Fuente: Laboratorio de Rayos X, Universidad Industrial de Santander.

4.4.2. Biosolido:

Tabla 14. Resultados Fluorescencia de Rayos X del Biosolido

Elemento	Numero Atómico (Z)	Concentración	Oxido	Concentración
Ca	20	27,64%	CaO	38,67%
Si	14	6,41%	SiO ₂	13,72%
Al	13	3,59%	Al ₂ O ₃	6,79%
Mg	12	1,85%	MgO	3,06%
Fe	26	1,38%	Fe ₂ O ₃	1,97%
K	19	1,12%	SO ₃	1,93%
S	16	0,77%	K ₂ O	1,35%
Na	11	0,17%	Na ₂ O	0,23%
Ti	22	0,13%	TiO ₂	0,22%
P	15	0,05%	P ₂ O ₅	0,11%
Mn	25	0,04%	MnO	0,05%
Sr	38	0,03%	SrO	0,04%
Ba	56	0,03%	ZnO	0,03%
Zn	30	0,03%	BaO	0,03%
Cl	17	0,02%	Cl	0,02%
Elementos Minoritarios				
Elemento	Numero Atómico (Z)	Concentración	Oxido	Concentración
Zr	40	63 mg/Kg	ZrO ₂	86 mg/Kg
Rb	37	55 mg/Kg	CuO	63 mg/Kg
Cu	29	54 mg/Kg	Rb ₂ O	60 mg/Kg
Ni	28	29 mg/Kg	NiO	37 mg/Kg
Pb	82	26 mg/Kg	PbO	28 mg/Kg

Fuente: Laboratorio de Rayos X, Universidad Industrial de Santander.

4.5. PRUEBA MARSHALL PARA CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO

El ensayo Marshall se realizó para 15 briquetas, con el fin de obtener el contenido óptimo de asfalto. El diseño preliminar debe cumplir con los parámetros presentados en la figura 29. En el anexo G, se presentan los resultados.

Figura 33: Criterios del diseño preliminar de la mezcla asfáltica en caliente por el método Marshall.

CARACTERÍSTICA		NORMA ENSAYO INV	MEZCLAS DENSAS, SEMIDENSAS Y GRUESAS			MEZCLA DE ALTO MÓDULO
			CATEGORÍA DE TRÁNSITO			
			NT1	NT2	NT3	
Compactación (golpes/cara)		E-748 (E-800) (Nota 1)	50	75 (112)	75 (112)	75
Estabilidad mínima (N)			5,000	7,500 (16,875)	9,000 (33,750)	15,000
Flujo(mm) (Nota 2)			2.0 a 4.0	2.0 a 4.0 (3.0 a 6.0)	2.0 a 3.5 (3.0 a 5.3)	2.0 a 3.0
Relación Estabilidad / Flujo (kN/mm)			2.0 a 4.0	3.0 a 5.0 (4.5 a 7.5)	3.0 a 6.0 (4.5 a 9.0)	-
Vacíos con aire (Va),% (Nota 3)	Rodadura	E-736	3.0 a 5.0	3.0 a 5.0	4.0 a 6.0	NA
	Intermedia	o	4.0 a 8.0	4.0 a 7.0	4.0 a 7.0	4.0 a 6.0
	Base	E-799	NA	5.0 a 8.0	5.0 a 8.0	4.0 a 6.0

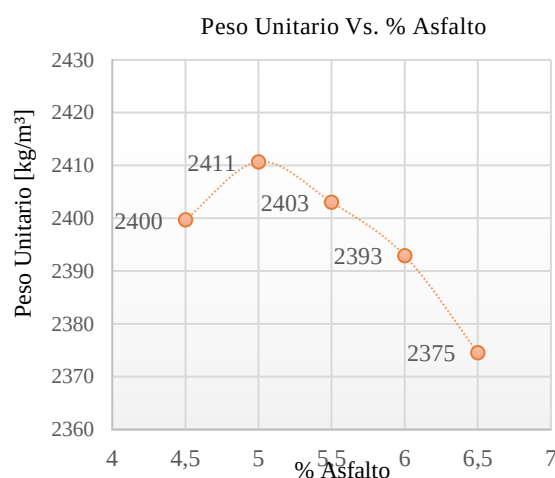
Fuente: Mezclas Asfálticas de Gradación Continua. Norma INVIAS. Art. 450-13. Pág. 3.

Tabla 15. Resultados Prueba Marshall

% Asfalto	Peso Unitario (K/m ³)	Estabilidad (Kg)	Porcentaje Vacíos (%)	Flujo (mm)
4,5	2400	918,5	2,17	4,43
5,0	2411	1032,5	0,74	5,18
5,5	2403	845,3	0,66	6,45
6,0	2393	720,9	0,54	7,03
6,5	2375	627,5	1,33	6,30

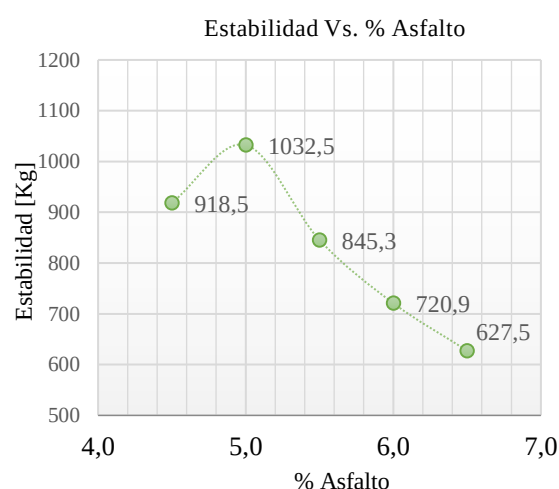
Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Junio de 2016.

Grafica 5. Resultados Peso Unitario



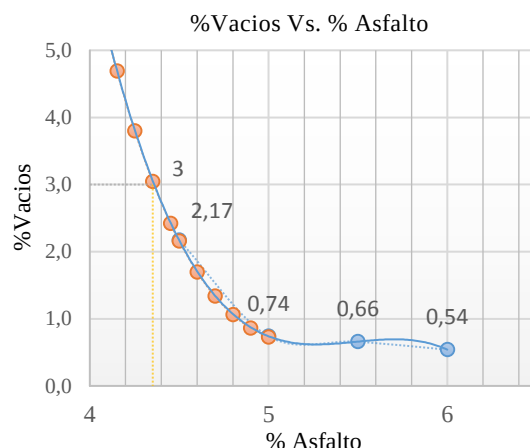
Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Junio de 2016., ensayos realizados en el Laboratorio López Hermanos Ltda.

Grafica 6. Resultados Estabilidad



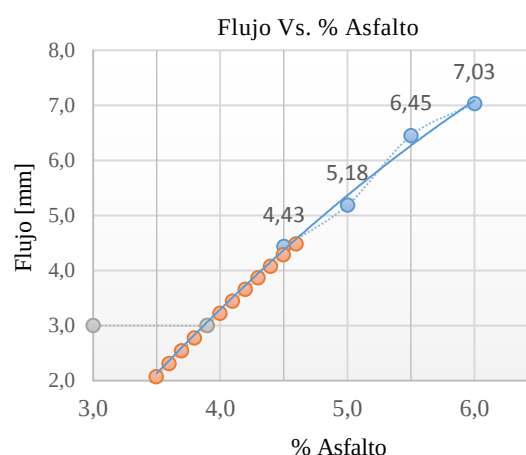
Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Junio de 2016., ensayos realizados en el Laboratorio López Hermanos Ltda.

Grafica 7. Resultados Porcentaje de Vacíos



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Junio de 2016., ensayos realizados en el Laboratorio López Hermanos Ltda.

Grafica 8. Resultados Flujo



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Junio de 2016., ensayos realizados en el Laboratorio López Hermanos Ltda.

Tabla 16. Resultados Extrapolación Valores de Porcentaje de Vacíos

% Vacíos	2.2	2.4	3.0	3.8	4.7
% Asfalto	4.5	4.5	4.4	4.3	4.2

Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Junio de 2016.

Tabla 17. Resultados Extrapolación Valores de Flujo

Flujo	2.54	2.77	3.00	3.22	3.44
% Asfalto	3.7	3.8	3.9	4.0	4.1

Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Junio de 2016.

4.5.1. Contenido Optimo de Asfalto.

Teniendo en cuenta los resultados del ensayo Marshall, presentados en las gráficas 5, 6, 7 y 8; el contenido óptimo de asfalto se calcula promediando el valor que corresponde al peso unitario y estabilidad máxima, porcentaje de vacíos del 3% y un flujo de 3mm.

Tabla 18. Datos para Obtener el Contenido Optimo de Asfalto

Propiedad	Peso Unitario	Estabilidad	% Vacíos	Flujo	Contenido Optimo
Contenido de Asfalto (%)	5,0	5,0	4,4	3,9	4,6

Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Junio de 2016.

El valor óptimo de contenido de asfalto, a implementar en la elaboración de las briquetas con contenido de biosólido para las pruebas es de 4,6%.

4.6. BRIQUETAS CON DIFERENTES PORCENTAJES DE BIOSOLIDO

Con el contenido óptimo de asfalto (4,6%), se llevó a cabo la elaboración de las briquetas con diferentes porcentajes de inclusión de biosólido, en la tabla 19 se presenta la cantidad de agregados retenidos en cada tamiz, de filler y biosólido para cumplir con la curva de diseño, dado que la cantidad de agregados es de 1144,8g.

Tabla 19: Relación de pesos de agregados retenidos para los diferentes porcentajes de inclusión

Tamiz	% Retenido	0%	25%	50%	75%	100%
1/2	13,8	157,52	157,52	157,52	157,52	157,52
3/8	10,2	116,96	116,96	116,96	116,96	116,96
Nº 4	14,7	168,55	168,55	168,55	168,55	168,55
Nº 10	28,1	321,57	321,57	321,57	321,57	321,57
Nº 40	13,7	156,95	156,95	156,95	156,95	156,95
Nº 80	9,2	105,09	105,09	105,09	105,09	105,09
Nº 200	3,7	42,64	42,64	42,64	42,64	42,64
Pasa 200	6,6	75,50	75,50	75,50	75,50	75,50
Filler		75,50	56,63	37,75	18,88	0,00
Biosolido		0,00	18,88	37,75	56,63	75,50

Fuente: Autor

Figura 34: Briquetas Modificadas con Biosólido



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Junio de 2016.

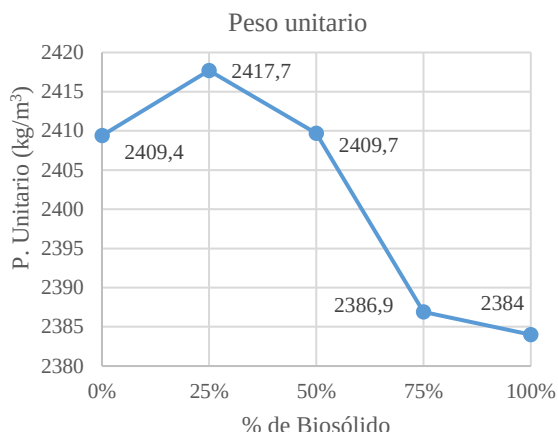
Lugar: Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja.

Tabla 20. Resultados Briquetas con Inclusión de Biosólido

Propiedad	% Biosolido				
	0%	25%	50%	75%	100%
Peso Unitario	2409,4	2417,7	2409,7	2386,9	2384
Estabilidad	1320	1406,1	1457	1369,1	1268,8
Flujo	4,89	4,9	4,1	3,9	4,2
% Vacíos	1,19	1,54	2,35	2,01	5,4

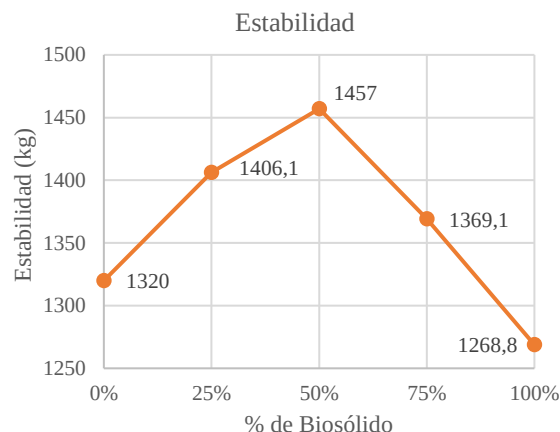
Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Junio de 2016.

Grafica 9. Peso Unitario Vs % de Biosólido



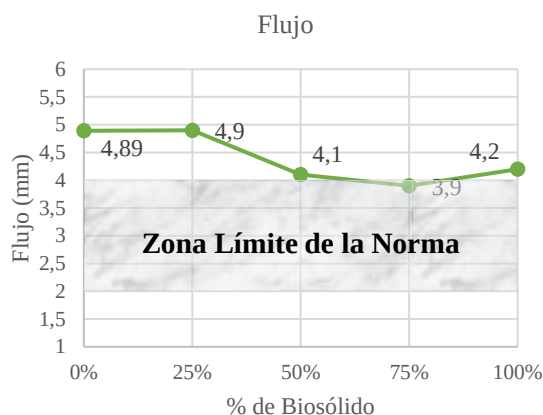
Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Junio de 2016., ensayos realizados en el Laboratorio López Hermanos Ltda.

Grafica 10 Estabilidad Vs % de Biosólido



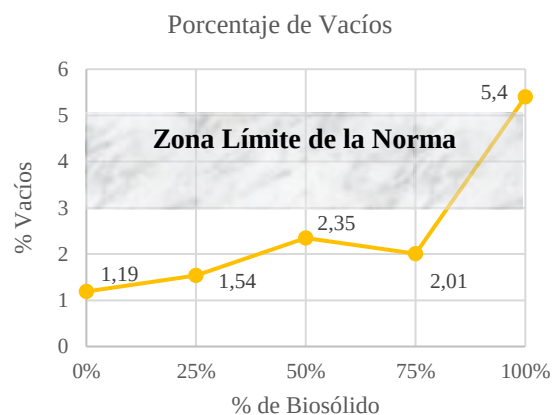
Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Junio de 2016., ensayos realizados en el Laboratorio López Hermanos Ltda.

Grafica 11. Flujo Vs % de Biosólido



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Junio de 2016., ensayos realizados en el Laboratorio López Hermanos Ltda.

Grafica 12. % de Vacíos Vs % de Biosólido



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Junio de 2016., ensayos realizados en el Laboratorio López Hermanos Ltda.

Observando los resultados del el ensayo Marshall, con el cual se determinaron las propiedades de la mezcla como: peso unitario, estabilidad, flujo y porcentaje de vacíos, se encontró que el mayor peso unitario lo presentan las briquetas con un 25% de ceniza de biosólido, sin embargo los valores de flujo y porcentaje de vacíos no son cercanos a los porcentajes establecidos en la norma.

Al reemplazar el 75% de filler, comparado con la mezcla estándar, la estabilidad aumento a diferencia del peso unitario que disminuyo $42,5 \text{ kg/m}^3$, por esta razón se descartó como una opción viable, al realizar el reemplazo total del filler por la ceniza de biosólido el peso unitario y estabilidad disminuyen notablemente, mientras que el flujo y porcentaje de vacíos sobrepasan el límite de 4 y 5 establecido en la norma respectivamente.

Teniendo en cuenta lo anterior, se determina que el porcentaje óptimo de inclusión de ceniza de biosólido como material llenante es del 50%, dado que la estabilidad aumento un 10% respecto a la mezcla con 0% de ceniza de biosólido, además el flujo y porcentaje de vacíos presentan los valores más cercanos al rango establecido en la Invias art 450-13, el peso unitario presenta una variación mínima aumentando 0,3 kg/m³.

Con esto se logra reemplazar la mitad del filler, siendo un porcentaje significativo para disminuir el impacto ambiental generado por el biosólido, teniendo en cuenta los volúmenes de producción de asfaltos en el presente y a futuro, pues actualmente en Colombia existen 120.000 km de vías, de los cuales, aproximadamente el 10% se encuentran pavimentadas, lo cual demuestra en un contexto global, que hace falta una mayor inversión en esta importante área de la infraestructura nacional. Además de esto, los datos indican que gran parte de la inversión de recursos está dirigida a la rehabilitación de las vías en vez de la adecuación y pavimentación de las que se necesitan o hacen falta. De cualquier forma, el uso de las mezclas asfálticas en estas obras es inminente.

Tabla 21. Ficha Técnica Briquetas 0% de Biosolido.

Característica	Unidad	Valor	Limites
Peso Unitario	Kg/m ³	2409,4	-
Estabilidad	N	12944	7500
Flujo	mm	4,89	2-4
Porcentaje de Vacíos	%	1,19	3-5
Relación Estabilidad/Flujo	kN/mm	2,65	3-5

Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Junio de 2016.

Tabla 22. Ficha Técnica Briquetas 50% de Biosolido.

Característica	Unidad	Valor	Limites
Peso Unitario	Kg/m ³	2409,7	-
Estabilidad	N	14288	7500
Flujo	mm	4,1	2-4
Porcentaje de Vacíos	%	2,35	3-5
Relación Estabilidad/Flujo	kN/mm	3,48	3-5

Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Junio de 2016.

4.7. CALCULO MODULO RESILIENTE.

Se debe tener en cuenta la temperatura media anual ponderada del aire (TMAP), para la ciudad de Tunja presentada en la figura 31, con un factor de ponderación para cada una de las temperaturas medias mensuales, este se refiere a una temperatura efectiva del asfalto para obtener el modulo .

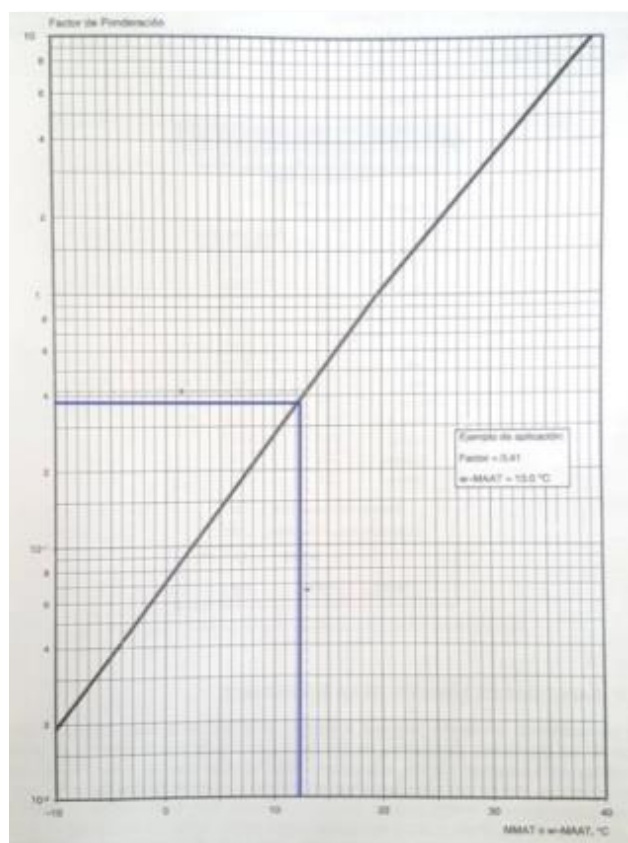
Figura 35. TMAP Tunja, 2016

Ubicación:	Tunja	
Año:	2016	
	TMM °C	Factor Ponderación
Enero	12,8	0,386
Febrero	13,2	0,407
Marzo	13,7	0,435
Abril	13,5	0,424
Mayo	13,2	0,407
Junio	12,3	0,362
Julio	11,9	0,343
Agosto	12,2	0,357
Septiembre	12,4	0,366
Octubre	12,7	0,381
Noviembre	13,1	0,402
Diciembre	12,8	0,386
Factor Ponderación Total	0,000	
Factor Ponderación Promedio	0,000	
TMAP	16,9 °C	

$$\bar{f}_p = 0,3883$$

Fuente: Software TMAP, Datos: Estación Climatológica de la UPTC, Tunja.

Figura 36. Curva de Factores de Ponderación de Temperatura

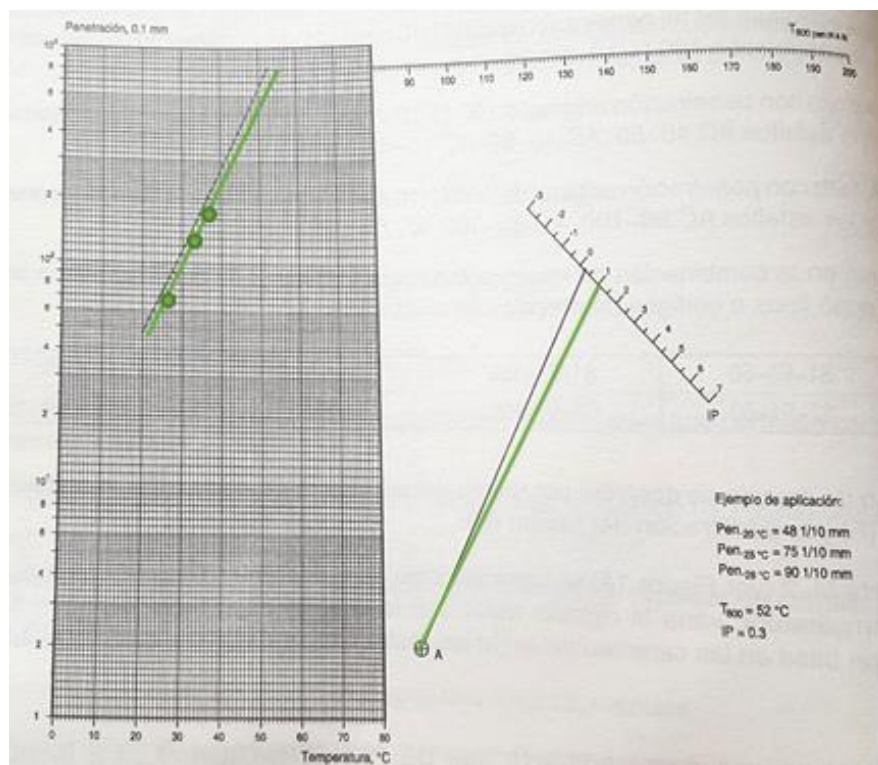


Fuente: Método Shell, Nomograma tomado de: HIGUERA Carlos, Nociones sobre Métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras.

$$w - MAAT = 12,1C^{\circ}$$

Temperatura para 800 1/10mm de penetración (T_{800}) e índice de Penetración (IP): En la figura 36 se determina el T_{800} que es la temperatura a la cual la penetración es de 800 1/10 mm, y el índice de Penetración IP, que es una medida de la susceptibilidad térmica del asfalto. Un valor bajo del índice de penetración indica que el asfalto es susceptible a los cambios de temperatura.

Figura 37. Determinación T_{800} e Índice de Penetración



Fuente: Método Shell, Nomograma tomado de: HIGUERA Carlos, Nociones sobre Métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras.

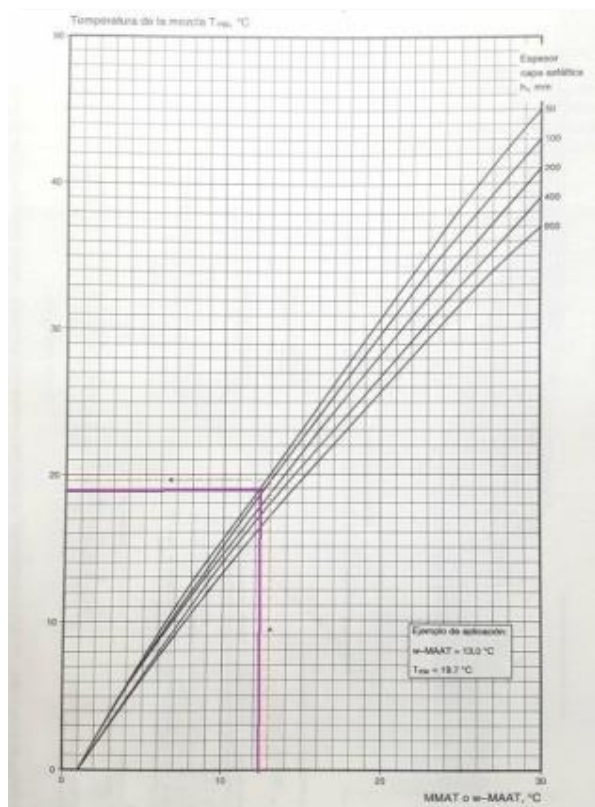
$$T_{800} = 56^{\circ}\text{C}$$

$$IP = 1.1$$

Módulo Dinámico del Asfalto Sb: Para ello es necesario conocer:

- Índice de penetración.
 - Tiempo de aplicación de carga. La SHELL recomienda emplear un tiempo de 0.02 s. Que corresponde a una velocidad del vehículo de 50 – 60 Km/h
 - $\Delta T = T_{800} - T_{\text{mezcla}}$.
- Con la temperatura media anual $w - \text{MMAT}$ se va al punto medio entre los espesores mínimos y máximos de las carpetas asfálticas, decisión que se toma teniendo en cuenta que en el proceso de diseño aún no se conocen los espesores.

Figura 38. Temperatura de la mezcla T_{mix} °C.



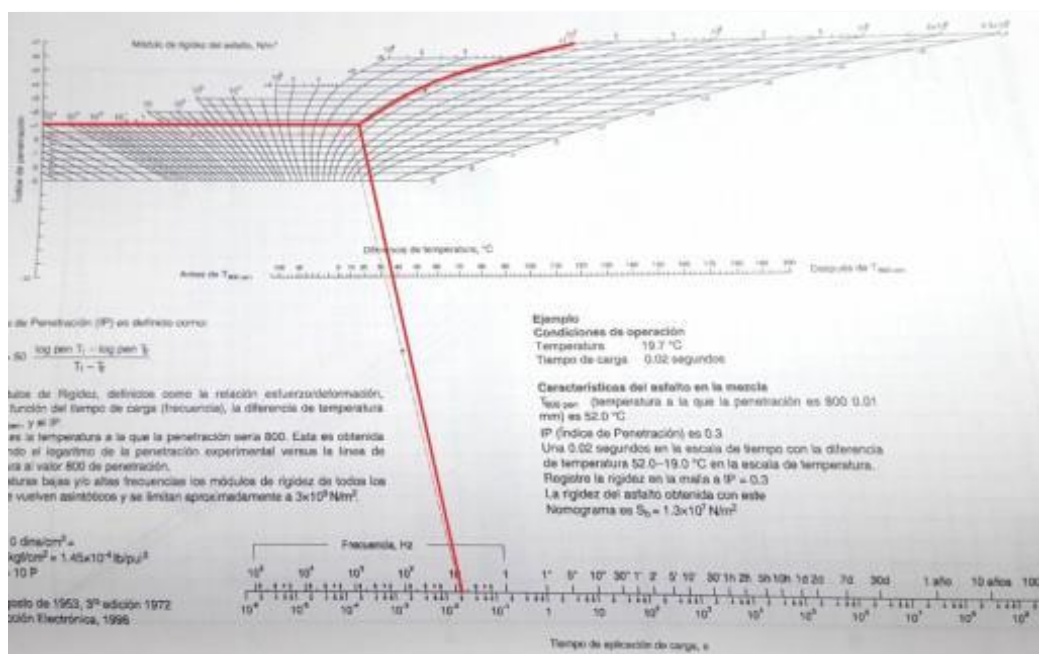
$T_{Mix} = 19^\circ\text{C}$

Diferencia de Temperatura:

$$\Delta = 56 - 19 = 37^\circ\text{C}$$

Fuente: Método Shell, Nomograma tomado de: HIGUERA Carlos, Nociones sobre Métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras.

Figura 39. Nomograma de Van der Poel



Fuente: Método Shell, Nomograma tomado de: HIGUERA Carlos, Nociones sobre Métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras.

Nomograma de Van Der Poel

$$S_b = 0,1 * 10^7 \text{ N/m}^2$$

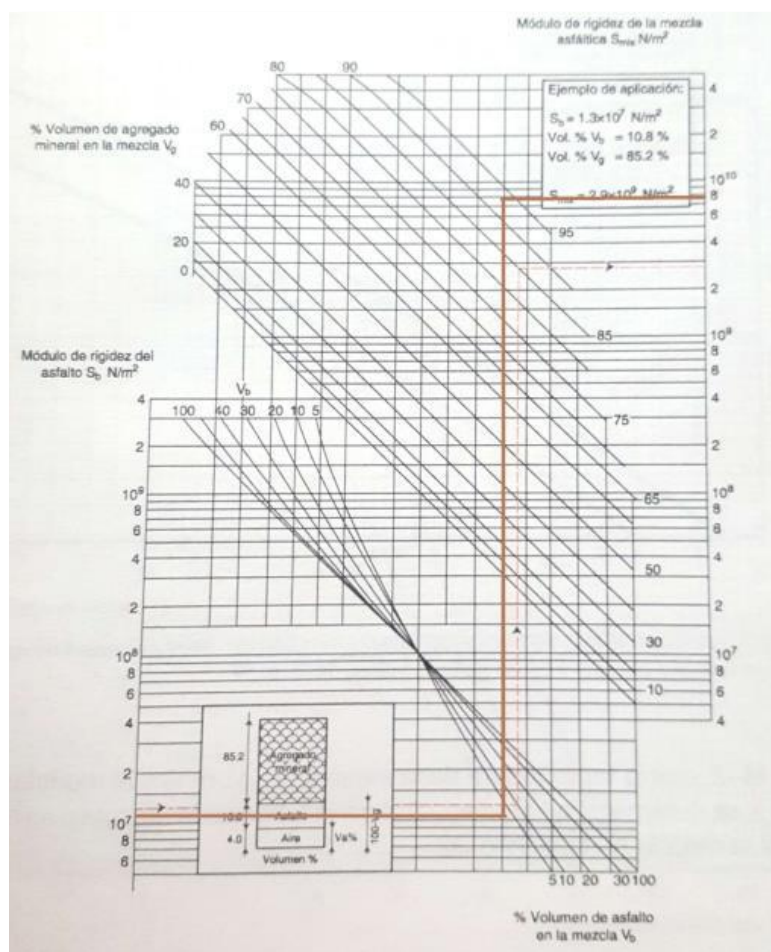
Módulo de Rigidez de la Mezcla S Mix Sin Contenido de Biosólido.

Se emplea en la gráfica de BONNAURE y para ello es necesario conocer, además del módulo de elasticidad dinámica del asfalto, la composición volumétrica de la mezcla asfáltica de acuerdo con el diseño de ella en el laboratorio.

% Volumen de agregado mineral de la mezcla: 94,5%

% Volumen de asfalto de la mezcla Asfalto: 4.6%

Figura 40. Nomograma de Bonnaure para Mezcla sin Contenido de Biosólido



Fuente: Método Shell, Nomograma tomado de: HIGUERA Carlos, Nociones sobre Métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras.

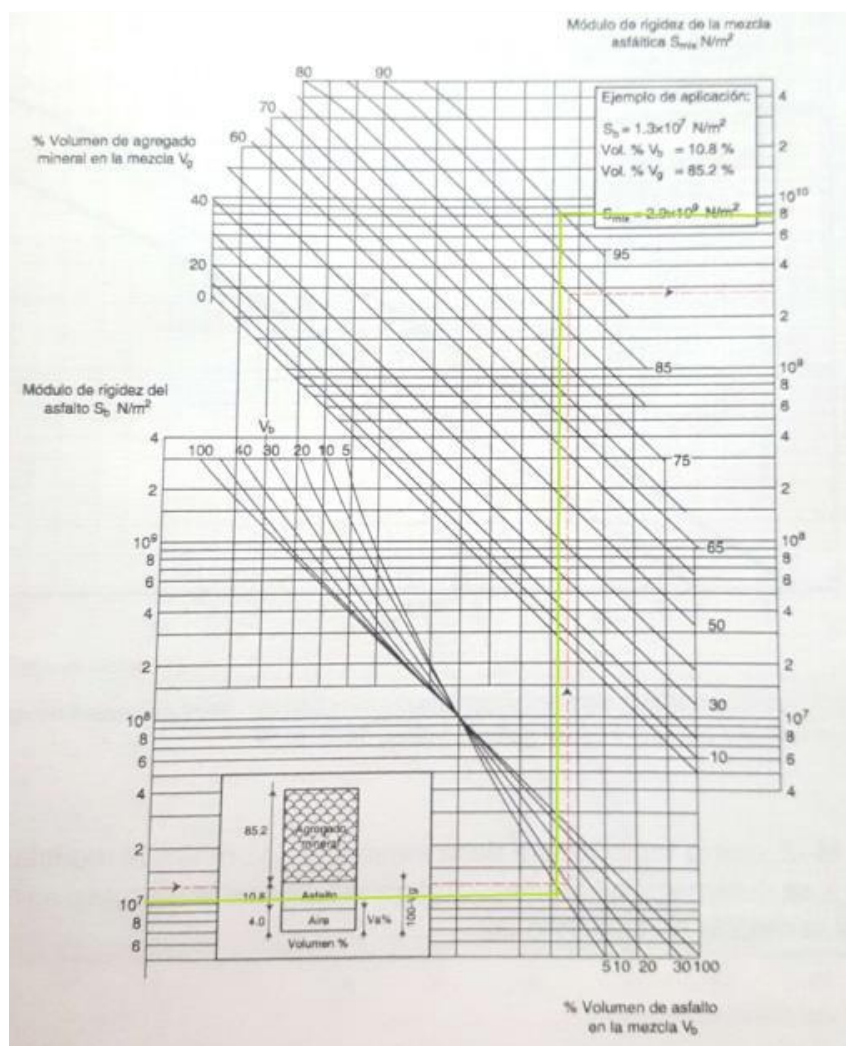
$$S_{mix} = 8 * 10^9 \text{ N/m}^2$$

Módulo de Rigidez de la Mezcla S mix con 50% de Inclusión de Biosólido.

% Volumen de agregado mineral de la mezcla: 94,2%

% Volumen de asfalto de la mezcla Asfalto: 4.6%

Figura 41. Nomograma de Bonnaure para Mezcla con 50% de Contenido de Biosólido



Fuente: Método Shell, Nomograma tomado de: HIGUERA Carlos, Nociones sobre Métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras.

$$S_{mix} = 7,9 * 10^9 \text{ N/m}^2$$

Luego de determinar el módulo resiliente de la mezcla asfáltica estándar (0% de inclusión de ceniza de biosólido) y la mezcla con un 50% de ceniza de biosólido, se puede concluir que al implementar asfalto modificado con ceniza de biosólido, la capa de rodadura no sufrirá un aumento en su espesor debido a que disminuye $0,1 * 10^9 \text{ N/m}^2$, esto se debe a que el valor influyente es el porcentaje de agregados y la diferencia es muy baja, por ende no se presenta un aumento en los costos de la construcción de la infraestructura vial.

CONCLUSIONES

- A partir de la caracterización del biosólido realizada en la PTAR EL SALITRE y la comparación con el decreto 1287; se puede concluir que es un material que mantiene sus concentraciones promedio de elementos potencialmente tóxicos por debajo de los límites permitidos por la norma en comparación. Es importante aclarar que los valores que allí se emiten, van encaminados a la posible utilización del biosólido en el suelo (uso que tiene algunas restricciones ya mencionadas en este texto). A pesar de lo anterior, el biosólido sigue siendo un residuo sólido generado en gran cantidad (volumen) potencialmente contaminante, por lo que deben buscarse alternativas adicionales a su aplicación en el suelo.
- Se realizó la evaluación de las características de los agregados provenientes de la planta de asfalto Beinco S.A.S, encontrando que estos cumplen con lo establecido en la norma INVIAS, art 450-13, garantizando así que la mezcla de asfalto no presente problemas de trabajabilidad, inestabilidad, durabilidad y de resistencia al deslizamiento, siendo beneficioso y así mejorar sus propiedades mecánicas, en donde se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 23. Resultados Caracterización de los Agregados.

CARACTERÍSTICA	VALOR OBTENIDO	VALOR ESTABLECIDO NORMA
Gravedad Especifica Agregado Grueso (g/cm ³)	2,65	2,48-2,80
Gravedad Especifica Agregado Fino (g/cm ³)	2,67	2,48-2,80
Porcentaje de Absorción de Agregado Grueso (%)	1,67	-
Porcentaje de Absorción de Agregado Fino (%)	1,21	-
Resistencia al Desgaste Agregado Grueso (%)	21,27	MÁXIMO 25%
Equivalente de Arena (%)	54,33	MÍNIMO 50%
Equivalente de Arena de Biosolido (%)	33	MÍNIMO 50%
Índice de Alargamiento	1,0 - 4,4	MÁXIMO 10%
Índice de Aplanamiento	1,1 - 2,1	MÁXIMO 10%

Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Agosto de 2015

- Se llevó a cabo el diseño de mezcla para MDC-19 con los agregados pétreos caracterizados, ya que es una de las mezclas asfálticas más utilizadas en Colombia para conformar carpetas de rodadura y por ende se encuentran sometidas de manera directa a las condiciones reales de carga y ambientales, teniendo en cuenta los límites granulométricos de la norma Invias, para así cumplir con la curva de diseño.
- La mezcla que cumple las exigencias de la norma INVIAS es (50% ceniza de biosólido - 50% filler); pues mejora sus propiedades; al aumentar su estabilidad, aumenta la capacidad del asfalto para resistir el desplazamiento y deformación, evitando ahuellamientos, ondulamientos y demás cambios que desfavorecen la calidad de la mezcla y el flujo disminuye acercándose a los límites exigidos por la norma, con esto se evita que la mezcla tienda a deformarse; esto lo ocasionan las

cargas repetitivas del tránsito y al aumentar el porcentaje de vacíos, aporta una mayor durabilidad a la mezcla.

- En la investigación se determina sustituir un porcentaje del filler o llenante mineral, por la ceniza de biosólido proveniente de la PTAR El Salitre, dado que es el material con menor porcentaje de participación en la mezcla, pero un mayor costo comparado con el agregado grueso y fino, teniendo en cuenta que el llenante mineral suministrado proviene del municipio de Moniquira, y su compra y transporte por m³ es de aproximadamente \$70.000, el biosólido proveniente de la ciudad de Bogotá, solo se tiene en cuenta el valor el transporte desde esta ciudad; debido a que el biosólido no tiene ningún costo, este transporte es de aproximadamente \$60.000 tonelada, concluyendo así que la factibilidad económica mejora notablemente.
- En cuanto a la parte ambiental evaluada (lixiviación de elementos tóxicos) se puede concluir que las briquetas fabricadas con porcentajes de incorporación de ceniza de biosólido no son considerados residuos peligrosos o desechos tóxicos. Con esto se puede decir que desde este punto de vista ambiental, la alternativa de valorización del subproducto como materia prima para la fabricación de las mezclas asfálticas es viable.
- Finalmente, con los resultados de esta investigación se ha demostrado que desde los puntos de vista: técnico y ambiental evaluados es posible incluir la ceniza del biosólido de la planta de tratamiento aguas residuales EL SALITRE, como materia prima en la fabricación de mezclas asfálticas; controlando el porcentaje de adición de la ceniza de biosólido y el contenido de asfalto.

BIBLIOGRAFÍA

BARRENETXEA OROZCO. Contaminación Ambiental: Una visión desde la química. Madrid. España: Thomson Editores Spain. (2003)

CAPITULO 4: Diseño mezclas asfálticas [citado 13 de febrero de 2013]. Disponible en: http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_130_181_83_1181.pdf

DESARROLLO URBANO, ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. Mezclas asfálticas en caliente, densas, semidensas, gruesas, y de alto módulo. Disponible en: http://app.idu.gov.co/espec_tecnicas/Capitulo_5/510-11.pdf.

GADVAY, Lisseth. Peso específico del asfalto. Guía para el laboratorio de Asfaltos. Universidad Técnica de Machala.

HIGUERA, CARLOS. Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

LÓPEZ, DAVID. Variabilidad del Módulo Resiliente de una Mezcla Asfáltica MDC-2. Universidad Nacional de Colombia.

MAHAMUD LÓPEZ, Manuel; GUTIÉRREZ LAVÍN, Antonio y SASTRE ANDRÉS, Herminio. Biosólidos generados en la depuración de aguas (i): planteamiento del problema. Ingeniería del Agua. Vol. 3 Núm. 2 (1996)

NORMAS Y ESPECIFICACIONES INVIAS, Normas de ensayo para materiales de Carretera. Instituto Nacional de Vías, 2015.

PADILLA RODRÍGUEZ, Alejandro. Mezclas Asfálticas. Capítulo 3 UPC.

PTAR EL SALITRE. Guía Conceptual sobre la PTAR el Salitre [online]. [Citado 04 de mayo de 2013] Disponible en: http://www.acueducto.com.co/wpsv61/wps/html/resources/PTAR/guia_concPTARSalitre.pdf

PTAR EL SALITRE. Gestión de subproductos [online]. Bogotá Colombia. [Citado 20 mayo 2011]. Disponible en: <http://www.acueducto.com.co>

PTAR SALITRE FASE I. Planta de tratamiento de aguas residuales [online]. [Citado 20 mayo 2011]. Disponible en: http://www.acueducto.com.co/wpsv61/wps/html/resources/PTAR/plegable_general.pdf

PTAR SALITRE FASE I. Planta de tratamiento de aguas residuales [online]. [Citado 20 mayo 2011]. Disponible en: http://www.acueducto.com.co/wpsv61/wps/html/resources/PTAR/Plegable_tecnico.pdf

REPÚBLICA DE COLOMBIA. Ministerio de minas y energía. Instituto colombiano de geología y minería. INGEOMINAS. Catálogo de propiedades físicas y químicas para cerámica roja en los centros urbanos de Medellín, Ibagué y sabana de Bogotá. Marzo 2003.

REPÚBLICA DE COLOMBIA, Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. Decreto 1287, 10 de Julio de 2014

SALVATO, J. A., NEMEROW, N. L., & AGARDY, F. J. Environmental Engineering. Canadá: John Wiley & Sons, Inc. (2003)

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA. Facultad de Ciencias Químicas. Manejo de sólidos residuales o biosólidos. [Online]. [Citado 15 enero 2012]. En internet: <http://www.oocities.org/edrochac/residuales/biosolidos9.pdf>

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMÓN. Facultad de Ciencias y Tecnología. Texto Guía de Pavimentos. Cochabamba: Civilgeeks.com, 2004.

ARTÍCULOS DE REVISTAS

- Arabani, M., & Azarhoosh, A. (2012). The Effect of Recycled Concrete Aggregate and Steel Slag on the Dynamic Properties of Asphalt Mixtures. *Construction and Building Materials*, 1-7.
- ASOCRETO. (1997). Manual Tecnologia y Propiedades. *Instituto del Concreto*.
- Beale, J., & You, Z. (2010). The Mechanical Properties of Asphalt Mixtures with Recycled Concrete Aggregates. *Construction and Building Materials*, 230-235.
- Behnood, A., & Ameri, M. (2012). Experimental Investigation of Stone Matrix Asphalt Mixtures Containing Steel Slag. *Scientia Iranica*, 1214-1219.
- Chen, M.-Z., Lin, J.-T., Wu, S.-P., & Liu, C. (2011). Utilization of Recycled Brick Powder as Alternative Filler in Asphalt Mixture. *Construction and Building Materials*, 1532-1536.
- Clavijo, C., & Aranda, C. (2014). *Analisis del Comportamiento Fisico-Mecanico de una Mezcla Densa en Caliente Tipo MDC-2 Modificada con Caucho y Cuero en Porcentajes (25%,75%) Respectivamente*. Bogota.
- Hicks, G., & Epps, J. (2000). Vida para materiales de pavimentacion de asfalto-caucho. En: procedimiento, Asfalto Caucho 2000. *El material del Pavimento del Siglo 21*.
- Iwanski, M., Kowalska, A., & Maciejewski, K. (2015). Application of Synthetic wax for Improvement of Foamed Bitumen Parameters. *Construction and Building Materials*, 62-69.
- Jianying, Y., Peiliang, C., & Shaopeng, W. (2009). Investigation of the Properties of Asphalt and its Mixtures Containing Flame Retardant Modifier. *Construction and Building Materials*, 2277-2282.
- Modarres, A., & Morteza, R. (2014). Application of coal waste powder as filler in hot mix asphalt. *Construction and building materials*, 476-483.
- Moreno, L., & Calvo, D. (2014). *Estudio mecanico del asfalto modificado con polimeros y cueros que son utilizados en la elaboracion del calzado*.
- Pasandin, A., & Perez, L. (2013). Laboratory evaluation of hot-mix asphalt containing construction and demolition waste. *Construction and Building Materials*, 497-505.
- Reyes, O., & Rincon, J. (2009). Influencia de las características del relleno mineral en la resistencia de una mezcla asfáltica. *EIA*, 93-103.

- Sacramento, T., Lee, J., & Kim, Y.-R. (2010). Material-Specific Effects of Hydrated Lime on the Properties and Performance Behavior of Asphalt Mixtures and Asphaltic Pavements. *Construction and Building Materials*, 538-544.
- Sebnem, S., Mehmet, S., Nihat, M., Secan, S., & Serdal, T. (2013). Evaluation of rice husk ash as filler in hot mix asphalt concrete. *Construction and building materials*, 390-397.
- Shalfie, M., Ibrahim, I., & Rahman, A. (2012). The Addition Effects of Macro and Nano Clay on the Performance of Asphalt Binder. *Egyptian Journal of Petroleum*, 149-154.
- Shu, X., & Huang, B. (2014). Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: an overview. *Construction and Building Materials*, 217-224.
- Velez, J. A. (2007). Los biosolidos: ¿Una solucion o un problema? *Revista Limpia*, 2(2), 57-71.
- Waqar, A., & Murat, G. (2013). Rutting susceptibility of Asphalt Concrete with Recycled Concrete Aggregate using Revised Marshall Procedure. *Construction an Building Materials*, 341-349.
- Wu, S., Lin, J., & Chen, M. (2011). Potential of Recycled Fine Aggregates Powder as Filler in Asphalt Mixture. *Construction and Building Materials*, 3909-3914.
- Ye, Q., Li, N., & Wu, S. (2008). Investigation of Rheological and Fatigue Properties of Asphalt Mixtures Containing Polyester Fibers. *Construction and Building Materials*, 2111-2115.
- Yilmaz, M., Vural, B., & Kuloglu, N. (2011). Effects of Using Asphaltite as Filler on Mechanical Properties of Hot Mix Asphalt. *Construction and Building Materials*, 4279-4286.

ANEXOS