

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

En la actualidad, la construcción y el mantenimiento de carreteras representa un importante desafío para las autoridades y empresas encargadas de estas obras. La demanda de infraestructuras viales de calidad, durables y seguras es cada vez mayor, pero también los recursos disponibles para la construcción y mantenimientos de infraestructura vial son limitados, especialmente en países en vías de desarrollo como Bolivia.

Es por esto donde la investigación y desarrollo de nuevos materiales pueden jugar un papel crucial en la búsqueda de nuevos materiales usables en la construcción de carreteras. Las mezclas asfálticas en caliente modificado con la adición de fibras de acero se presenta como una alternativa interesante y prometedora.

Las fibras de acero provenientes del reciclado de neumático, es un material que se obtiene a partir del reciclaje de neumáticos usados el cual es procesado en una planta recicladores de neumáticos, separándolo del caucho y otros tipos de componentes del neumático. Este material es de fácil obtención en estas plantas y viable para aplicar en la construcción de nuestros caminos y calles.

En Bolivia no existe una gran cantidad de empresas recicladoras, en este caso gracias a la Ayuda de INGOQUI la cual es una empresa recicladora de neumáticos ubicada en la ciudad de Cochabamba por la zona de Quillacollo. Esta empresa recicla aproximadamente al día 150 neumáticos, generando caucho y fibras de acero en grandes cantidades.

Sin embargo, a pesar de que este material es prometedor y presenta varias ventajas iniciales, todavía es necesario profundizar en el conocimiento de las características y propiedades que tiene. Es por este motivo que el presente proyecto de investigación se enfoca en la determinación de las propiedades de esta mezcla asfáltica modificada, con el objetivo de analizar su viabilidad como un material de bajo costo y alta calidad para la construcción y mantenimiento de carreteras en nuestro país.

1.2. Situación problemática

En la actualidad, el uso de mezclas asfálticas modificadas se ha convertido en una alternativa viable para mejorar las propiedades de las carreteras, incluyendo su durabilidad y resistencia a la fatiga y a la deformación permanente. Los materiales convencionales utilizados en la producción de mezclas asfálticas, como el asfalto y los agregados, se están agotando rápidamente, lo que ha llevado a la búsqueda de nuevos materiales sostenibles y rentables. En este sentido, las fibras de acero proveniente del reciclado de neumático se han propuesto como una alternativa para mejorar las propiedades de las mezclas asfálticas y, al mismo tiempo, reducir los costos de producción y aumentar la sostenibilidad.

Aunque la adición de fibras de acero provenientes del reciclado de neumático en las mezclas asfálticas se ha investigado en estudios previos en otros países, aún existen desafíos importantes en la caracterización de estas mezclas. En particular, se necesita un mayor conocimiento sobre el efecto de la adición de aserrín de acero de neumático fuera de uso en las características mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente. Además, es necesario entender el efecto de este material reciclado en la interacción entre los diferentes componentes de la mezcla, así como en el comportamiento a largo plazo de las carreteras.

Por tanto, se requiere de una investigación exhaustiva y detallada para determinar las características de las mezclas asfálticas en caliente modificadas con la adición de fibras de acero proveniente del reciclado de neumáticos, y establecer su efectividad y seguridad en la construcción y mantenimiento de carreteras. En este contexto, se plantea la siguiente pregunta problema.

1.2.1. Problema

¿Cuáles son las características de las mezclas asfálticas en caliente que han sido modificadas mediante la incorporación de fibras de acero provenientes del reciclado de neumáticos, y como se contrastan con las mezclas asfálticas convencionales?

1.2.2. Delimitación temporal y espacial del problema

La delimitación temporal y espacial establece los límites en términos de tiempo y espacio dentro de los cuales se llevará a cabo el presente trabajo de investigación.

- Delimitación temporal: El estudio se llevará a cabo durante un periodo de 14 meses, desde julio del 2023 hasta septiembre del 2024.
- Delimitación espacial: El estudio se centrará en la ciudad de Tarija, siendo su base de operaciones el laboratorio de Asfaltos, el laboratorio de Hormigón y laboratorio de Suelos de la Universidad Juan Misael Saracho.

1.3. Justificación

En Bolivia, aún no contamos con una red completa de carreteras asfaltadas o en buen estado, lo cual es un desafío para nuestro desarrollo. Además, la contaminación y acumulación de basura empeoran cada año, requiriendo medidas urgentes.

La construcción y mantenimiento de carreteras es crucial para el desarrollo económico y social, ya que son la principal vía de comunicación y transporte terrestre. Su buen estado es esencial para la movilidad de personas y mercancías, y para el crecimiento regional.

Este problema también impacta significativamente el medio ambiente. Sin medidas adecuadas, la contaminación podría convertirse en una crisis mayor, afectando ríos, calles y aire en nuestras ciudades. Es fundamental abordar esta problemática para proteger nuestro entorno y garantizar un futuro sostenible.

En Bolivia, se descartan aproximadamente tres millones de neumáticos cada año, y solo el 4% se recicla. El aumento en la fabricación de neumáticos y la falta de tratamiento adecuado representan un problema ambiental creciente.

Esta investigación busca mejorar la calidad de las carreteras mediante el uso de materiales reciclados. Enfocada en las mezclas asfálticas en caliente modificadas con fibras de acero recicladas de neumáticos, pretende evaluar su viabilidad como una alternativa ecológica y alta calidad para la construcción y mantenimiento de carreteras. Los resultados pueden ser útiles para autoridades, empresas de construcción y mantenimiento, y profesionales interesados en mejorar la infraestructura vial.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Determinar las características de mezclas asfálticas en caliente modificadas con la adición de fibras de acero provenientes del reciclado de neumáticos a través de la metodología Marshall para determinar sus propiedades.

1.4.2. Objetivos específicos

- Caracterizar la granulometría de los agregados naturales.
- Describir las propiedades y características físicas de fibras de acero.
- Realizar los ensayos para la caracterización del cemento asfáltico.
- Elaborar briquetas de mezcla asfáltica convencional.
- Determinar el porcentaje de cemento asfáltico óptimo en las mezclas asfálticas convencionales.
- Elaborar un diseño preliminar de briquetas incrementando diferentes porcentajes de fibras de acero proveniente del reciclado de neumático al 0.25%, 0.5%, 0.75 %, 1%, 2% y 5%.
- Clasificar las fibras de acero en rangos de longitud de 0-2 cm, 2-4cm y 4-6 cm con diferentes porcentajes de mezclas asfálticas.
- Realizar comparación con trabajos similares realizados en la universidad.
- Elaborar el análisis de dispersión de los datos obtenidos
- Establecer conclusiones y recomendaciones basadas en los resultados de la investigación.

1.5. Hipótesis

Si se agrega fibra de acero proveniente de neumático reciclado a las mezclas asfálticas en caliente, entonces se mejorará las características de la mezcla asfáltica,

1.6. Operacionalización de las variables

1.6.1. Variables independientes

Porcentajes de fibras de acero proveniente del reciclado de neumáticos.

1.6.2. Variables dependientes

Las Características de la mezcla asfáltica.

1.6.3. Conceptualización y operacionalización de variables

- **Variable independiente:**

Tabla 1.1 Variable independiente

Variable	Concepto	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Adición de fibras de acero proveniente del reciclado de neumático	Los agregados utilizados en la preparación de la mezcla asfáltica en pequeñas proporciones se sustituyen por las fibras de acero proveniente del reciclado de neumático	Fibra de acero	Cantidad (%)	Diseño mezcla asfáltica método Marshall

Fuente. Elaboración propia.

- **Variable dependiente:**

Tabla 1.2 Variable dependiente

Variable	Concepto	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Características de la mezcla asfáltica	La compatibilidad con las propiedades mecánicas y físicas de la mezcla depende de la dosificación y calidad de la producción de briquetas	Calidad del cemento asfáltico	Cantidad (%)	Ensayos de laboratorio
		Ensayo de estabilidad	Densidad (kg/m ³) y Peso (kg)	Método Marshall
			Carga axial Mpa, kg/mm ² , kg/cm ²	Investigación bibliográfica y experimental

Fuente. Elaboración propia.

1.7. Identificación del tipo de investigación

Esta investigación adopta un enfoque causal explicativo al intentar determinar cómo la adición de materiales no convencionales, como las fibras de acero recicladas de neumáticos, impacta en las propiedades de las mezclas asfálticas. Para lograrlo, se utiliza el método Marshall como una norma estandarizada para evaluar y comparar el desempeño de las mezclas modificadas con estos materiales alternativos.

1.8. Unidades de estudio y decisión muestral

Es necesario definir los componentes del estudio metodológico para una mayor comprensión e implementación adecuada de este trabajo de investigación.

1.8.1. Unidad de estudio

La unidad se enfoca en los ensayos de laboratorio realizados en asfaltos y hormigón, específicamente aquellos requeridos para aplicar el método de diseño conocido como "Marshall". Estos ensayos constituyen la unidad de muestra utilizada en el estudio.

1.8.2. Población

Las mezclas asfálticas modificadas con aditivos, estas comprenden una variedad de combinaciones al asfalto convencional. Estos aditivos pueden incluir polímeros, plastificantes u otros modificadores de asfalto, que se incorporan con el fin de mejorar las propiedades específicas de las mezclas.

1.8.3. Muestra

Dado que rara vez se puede medir la totalidad de la población, se opta esta vez por elegir una muestra. En la presente investigación la muestra elegida son las mezclas asfálticas en caliente modificada con la adición de fibras de acero proveniente del reciclado de neumático. Con 3° muestras elaboradas en el laboratorio de asfaltos de la universidad Juan Misael Saracho.

1.8.4. Selección de técnicas de muestreo

Se determino nuestra técnica de muestreo como “muestreo probabilístico”, del tipo “muestreo simple no aleatorio”.

Tabla 1.3 Técnicas de muestreo

Conceptos	Acciones			Productos
	Gabinete	Campo	Laboratorio	
Especificaciones técnicas	Determinar parámetros iniciales de concreto asfáltico	Obtención de la muestra de control	Densidad	Comparación con ficha de especificaciones técnicas
			Ductilidad	
			Punto de inflamación	
			Punto de ablandamiento	
			Viscosidad cinemática	
	Determinación de áridos para ensayo Marshall	Obtención de la muestra de control	Desgaste en la máquina de los ángeles	
			Caras fracturadas	
			Equivalente de arena	
		Granulometría		
Pruebas	Diseño método Marshall	Contenido de fibra de acero proveniente del reciclado de neumático	Ensayos Marshall	Incidencia en el contenido óptimo de C.A.
Cálculos	Elaboración de planillas y graficas		Verificación de resultados	Control de mediciones
Conclusiones	Análisis de resultados técnicos y económicos			Análisis final de incidencia

Fuente. Elaboración propia.

1.9. Métodos y técnicas empleadas

1.9.1. Métodos

Para la realización de la investigación usaremos el método inductivo, este método es un enfoque de razonamiento y generación de conocimiento que se basa en la observación y la recopilación de evidencia específica para llegar a conclusiones o generalizaciones más amplias. En este método, se parte de casos particulares o datos concretos y se busca identificar patrones, tendencias o regularidades que permitan establecer principios generales o teorías más amplias.

En el método inductivo, se recopilan datos y evidencias a través de la observación de fenómenos o situaciones específicas. Estos datos se analizan y se buscan patrones, tendencias o regularidades que permitan formular una hipótesis o una afirmación general. A partir de esta afirmación general, se puede establecer prioritariamente que la mezcla asfalta modificada con la adición de fibra de acero proveniente de neumáticos reciclados va mejorar las características de una mezcla asfáltica convencional, esto se podrá comprobar con la comparación de datos resultantes de los ensayos de laboratorio.

1.9.2. Técnicas

La técnica de muestreo que se utilizarán en el presente trabajo de investigación es el muestreo aleatorio simple, porque todas las muestras tendrán las mismas probabilidades y variaciones.

1.9.3. Procedimiento para el análisis y la interpretación de la información

La información será analizada mediante tablas, gráficos, y cálculos aplicados en el programa Microsoft Excel.

1.9.4. Alcance de la investigación

En esta investigación se analizará la elaboración de briquetas con mezclas asfálticas calientes convencionales y mezclas asfálticas calientes modificadas con la adición de fibras de acero proveniente del reciclado de neumático.

Una vez determinado el porcentaje óptimo de cemento asfáltico, se procederá a dosificar y crear 18 muestras preliminares con seis diferentes porcentajes de fibras de acero recicladas de neumáticos: 0.25%, 0.5%, 0.75%, 1%, 2% y 5%. Estas muestras se someterán a pruebas de laboratorio para obtener las características de las mezclas asfálticas modificadas. Posteriormente, se realizará una comparación entre las propiedades de las muestras de mezclas asfálticas sin modificar y las muestras modificadas.

Posteriormente, se llevará a cabo un ensayo con 18 briquetas para determinar el rango óptimo de cemento asfáltico recomendado para la fabricación de las briquetas, considerando los rangos de cemento asfáltico que se usaran para la elaboración de briquetas con fibras de acero clasificadas por su longitud.

Una vez identificado el rango de cemento asfáltico adecuado, se procederá a elaborar 27 briquetas para cada uno de los rangos de longitud: corta (0-2 cm), media (2-4 cm) y larga (4-6 cm), sumando un total de 81 briquetas. Estas briquetas serán sometidas al ensayo de ruptura mediante el método Marshall para evaluar su comportamiento.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE MODIFICADAS CON LA ADICIÓN DE FIBRAS DE ACERO PROVENIENTE DEL RECICLADO DE NEUMÁTICO

2.1 Cemento asfáltico

2.1.1 Definición

El cemento asfáltico es un producto bituminoso semi-sólido a temperatura ambiente, preparado a partir de hidrocarburos naturales mediante un proceso de destilación, el cual contiene una proporción muy baja de productos volátiles, posee propiedades aglomerantes y es esencialmente soluble en tricloroetileno (INVIAS, 2012).

El asfalto puede definirse como un material de color oscuro, con cualidades aglutinantes, compuesto esencialmente de hidrocarburos, sólido o semisólido a las temperaturas ambientes ordinarias y que se licúa gradualmente al calentarse.

El asfalto es de particular interés al ingeniero porque es un material fuertemente cementante, altamente adhesivo, impermeable y durable. Es una sustancia termoplástica, que imparte flexibilidad controlable a las mezclas de agregados minerales con los cuales se combina. Es además muy resistente a la acción de la mayor parte de los álcalis, ácidos y sales. Puede ser licuado aplicándole calor, disolviéndolo en derivados del petróleo de distinta volatilidad o bien, emulsificándolo en agua.

El asfalto es parte integrante de muchos petróleos. Cuando se refinan dichos petróleos para separar las fracciones volátiles el residuo que queda es el asfalto. Procesos análogos que ocurren en la naturaleza han formado depósitos naturales de asfalto, algunos prácticamente libres de materias extrañas y otros en que el asfalto se encuentra mezclado con cantidades variables de ciertos minerales, agua y otras sustancias. Los depósitos naturales en que el asfalto se presenta dentro de la estructura de una roca porosa se conocen comúnmente con el nombre de asfaltos de roca o también como rocas asfálticas.

No todos los petróleos crudos contienen asfalto y en los que contienen, las proporciones de este son muy variables. Los crudos de petróleo se dividen fundamentalmente en 2

grupos: crudos parafínicos y crudos asfálticos. Los últimos son desde luego los más adecuados para la obtención de asfaltos. Ya que la frontera entre los crudos asfálticos y parafínicos no puede ser rígida, existen también crudos intermedios, llamados semiparafínicos (Zerecero Galicia, 1997).

Los productos asfálticos utilizados en pavimentos provienen de la destilación del petróleo crudo, ya sea en forma natural o industrial. Estos materiales ligan el agregado pétreo para conformar mezclas asfálticas y son los responsables de brindar, a la capa asfáltica, resistencia mecánica bajo carga monotónica, estática y/o cíclica, impermeabilidad y durabilidad (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015).

2.1.2 Origen del asfalto

Hemos mencionado anteriormente que las fuentes de donde procede el asfalto son los depósitos naturales y el petróleo crudo; de éste se extrae después de obtener las fracciones volátiles sometiéndolo a refinación o destilación. Puesto que los asfaltos naturales provienen de un proceso natural de destilación o transformación del petróleo, lo que realmente estaría en discusión es el origen del propio petróleo.

No se sabe exactamente cómo se formó el petróleo en el subsuelo. Las teorías sobre su origen son muchas y aún se siguen discutiendo hasta la fecha. Algunos investigadores defienden el origen mineral o inorgánico del petróleo y explican su formación de diversas maneras como las siguientes:

- Bajo la superficie terrestre existen carburos metálicos que en contacto con el agua se descomponen produciendo hidrocarburos, los que al condensarse en estratos superiores más fríos, dieron lugar al petróleo.
- Los metales alcalinos que se encuentran en estado libre en el interior de la tierra reaccionan con el bióxido de carbono a altas temperaturas y estas reacciones, en contacto con el agua, producen los hidrocarburos que constituyen el petróleo.

Otros investigadores se inclinan por el origen orgánicos del petróleo, sosteniendo que proviene de la descomposición de residuos de animales y vegetales que se han transformado en aceite. Este origen se estima más razonable al comprobarse que los

estratos en que se ha formado el petróleo no han estado nunca a temperaturas superiores a los 38°C, lo que descarta la teoría del origen inorgánico, ya que la obtención a partir de carburos metálicos requiere temperaturas mucho más elevadas.

Los estudios recientes hechos en el laboratorio analizando rocas petrolíferas de campos productores, parecen confirmar un origen orgánico, ya que se han encontrado en ellas ciertas propiedades ópticas que sólo se localizan en sustancias orgánicas; por otro lado, el contenido de nitrógeno y otras sustancias en el petróleo, solamente puede proceder de materiales orgánicos.

También puede confirmar el origen orgánico, el hecho de que la mayor parte de los yacimientos de petróleo en el mundo se localizan en lugares que fueron ocupados por lagos y mares hace millones de años (Zerecero Galicia, 1997).

2.1.3 Obtención del cemento asfáltico

El petróleo crudo se hace circular a gran presión y velocidad por una tubería situada en el interior de un horno que alcanza elevadas temperaturas. Calentado a las temperaturas apropiadas se le introduce a una torre de destilación en donde se vaporizan los componentes más ligeros o más volátiles, que son extraídos y sometidos a un proceso de condensación y refinación, para obtener de ellos naftas, gasolinas, kerosinas, aceites ligeros y una amplia gama de otros productos.

El residuo que queda de este primer proceso de separación de las fracciones más ligeras del petróleo, puede usarse como un aceite combustible o ser procesado de una variedad de formas. Si sus características son adecuadas y ha sido refinado para alcanzar una consistencia apropiada, puede servir como uno de los asfaltos rebajados de fraguado lento (FL), a los que a veces se les denomina aceites para caminos.

El mismo residuo, si se le reduce a una determinada consistencia y se le inyecta aire a elevada temperatura, se obtiene lo que se llama un asfalto soplado u oxidado, que tiene propiedades que permiten utilizarlo para una diversidad de aplicaciones y de productos industriales, que incluyen asfalto para impermeabilización de azoteas, esmaltes para recubrimiento de tuberías, asfaltos para el sellado y levantamiento de pavimentos de concreto hidráulico que han sufrido asentamientos, y muchos otros.

Cuando el residuo de la destilación reúne buenas características para producir asfalto de propiedades adecuadas para los trabajos de pavimentación, y que generalmente es la mayor cantidad, se somete a un proceso de refinación posterior para obtener el cemento asfáltico, que es, por decirlo así, el asfalto básico para la elaboración de los demás materiales asfálticos utilizables en la construcción y conservación de obras viales. Existen 2 métodos para la producción comercial del cemento asfáltico: el método de destilación y el método de extracción de solventes.

En el método de destilación, el residuo de la primera separación de las fracciones ligeras, se calienta a una temperatura adecuada y se alimenta a otra torre de destilación, en la que generalmente se produce un vacío parcial para facilitar el proceso. También se introduce a menudo vapor cerca del fondo de la torre, para abatir la presión parcial del sistema y ayudar a remover cualquier aceite ligero contenido en el asfalto. Se extraen las nuevas fracciones destiladas y el proceso se controla adecuadamente para producir un cemento asfáltico de la consistencia deseada.

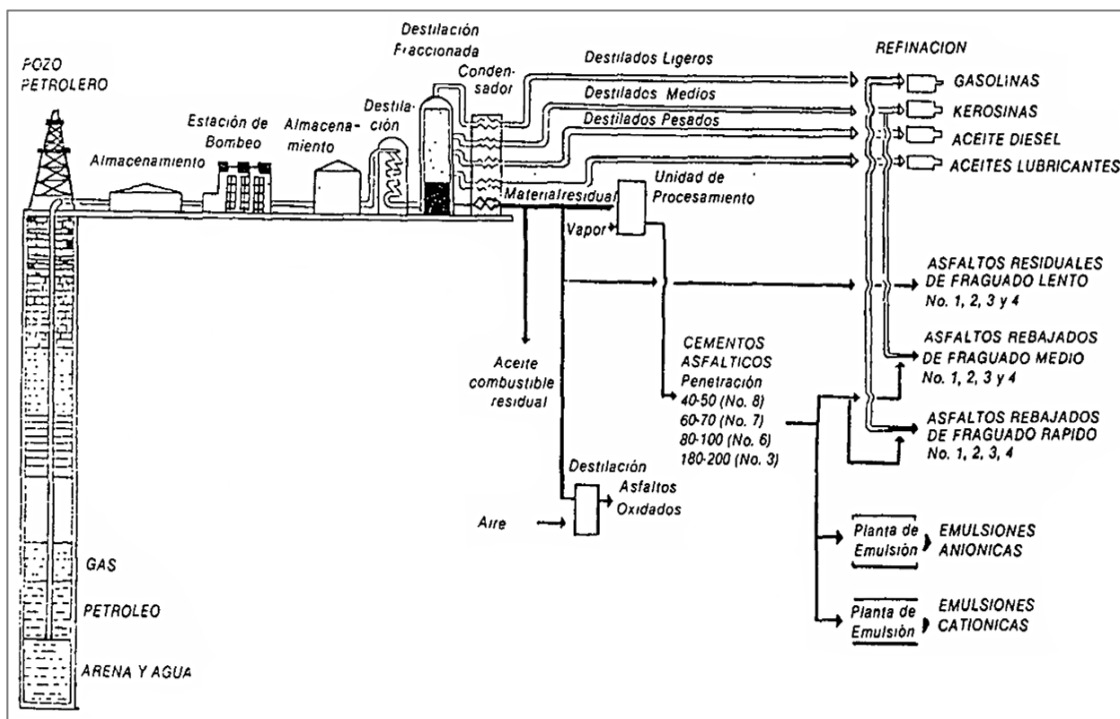
El método de extracción de solventes hace uso de una fracción ligera de hidrocarburo de limitado poder de disolución, tal como el propano líquido. Se mezcla dicho solvente con el residuo de la primera destilación que hemos venido mencionando y esto hace que se produzca una separación en 2 fases: por un lado aceites y ceras y por el otro el asfalto. Un simple proceso de decantación permite separar las 2 fases. Controlando adecuadamente la operación se llega a obtener el cemento asfáltico de la consistencia requerida.

Es decir, el cemento asfáltico no es otra cosa que el asfalto que hemos definido anteriormente, pero obtenido a través de un proceso controlado de refinación del petróleo, que le imparte características adecuadas para emplearse en los trabajos de pavimentación. Es por tanto también un material sólido o semisólido a las temperaturas ambientes normales. Dependiendo de su consistencia o grado de dureza, existen varios tipos de cementos asfálticos, según se verá más adelante.

Para utilizar el cemento asfáltico en las obras citadas, es necesario fluidificarlo mediante calentamiento a elevadas temperaturas. Si se requiere hacer mezclas o aplicaciones de asfalto en frío, habrá que licuar el cemento asfáltico por otros procedimientos, que consisten fundamentalmente en mezclarle solventes ligeros del petróleo, con lo que se

obtienen los asfaltos rebajados, o emulsionarlo en agua, dando lugar a las emulsiones asfálticas (Zerecero Galicia, 1997).

Figura 2.1 Esquema del tratamiento del petróleo para obtener los diversos productos asfálticos.



Fuente: Zerecero Galicia (1997)

2.1.4 Composición química del asfalto

El asfalto es un compuesto constituido fundamentalmente por la mezcla de un gran número de hidrocarburos de diversos tipos, asociados en proporciones también muy variables.

La mayoría de estos hidrocarburos están presentes en el petróleo crudo, pero el proceso de destilación origina ciertas transformaciones químicas y hace que se eliminen los hidrocarburos ligeros, quedando en el asfalto sólo hidrocarburos pesados.

En los hidrocarburos constituyentes del asfalto los átomos de carbono se unen entre sí mediante cadenas o enlaces sencillos, dobles o triples y cuyas valencias libres se saturan con átomos de hidrógeno (Zerecero Galicia, 1997).

La estructura molecular del asfalto se ha considerado tradicionalmente como un coloide dado sus características de flujo no newtoniano, su elasticidad retardada, exudación de aceites, floculación de asfaltenos bajo la acción de solventes no polares, etc. Todo ello condujo inicialmente a pensar que el asfalto era un líquido micelar compuesto por dos fases, una continua o maltenos y otra discontinua o asfaltenos (León Arenas, 2006).

2.1.4.1 Estructura físico-química del asfalto

El estudio de la composición química del asfalto en su conjunto resulta complicado, por lo que es frecuente recurrir al procedimiento de analizar primeramente su estructura física, que permite clasificar sus componentes en varias fracciones, y luego estudiar la composición química de cada una de estas fracciones en forma separada.

Los hidrocarburos que constituyen el asfalto forman una solución coloidal en la que un grupo de moléculas de los hidrocarburos más pesados están rodeadas por moléculas de hidrocarburos más ligeros, sin que exista una separación franca entre ellas, sino por el contrario, una transición gradual.

Los núcleos de hidrocarburos más pesados forman los asfaltenos. Rodeando a los asfaltenos existen las resinas, que constituyen la fase intermedia y, finalmente, ocupando el espacio restante, se encuentran los aceites.

Podemos representar esquemáticamente la estructura física del asfalto como se muestra en la Figura 2.

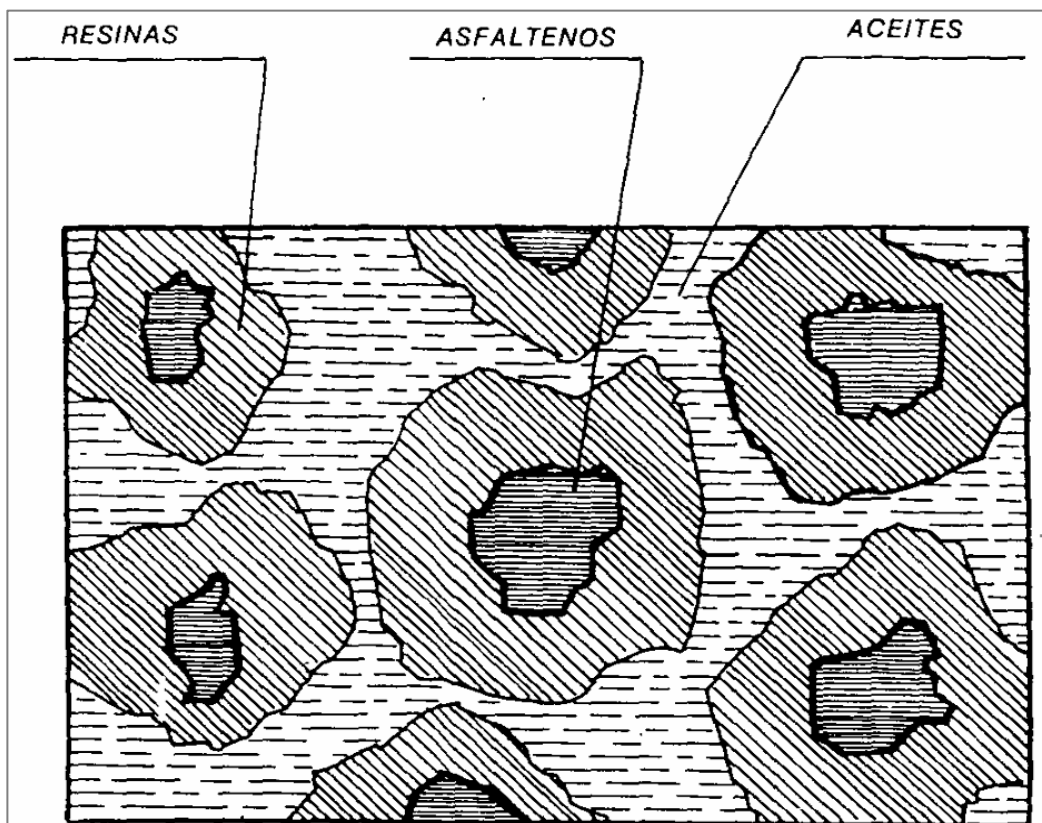
La separación del asfalto en sus 3 fracciones o componentes principales, puede lograrse si se le disuelve en un hidrocarburo saturado de bajo punto de ebullición, con el que se logra romper la estructura coloidal, disolviéndose parte del material, mientras que el resto precipita en forma de partículas terrosas de color muy oscuro. Los cuerpos que precipitan son los asfaltenos y a los que se disuelven se les llama maltenos, estando integrados por las resinas y los aceites.

Las resinas y los aceites que constituyen los maltenos se separan a su vez haciendo pasar la solución anterior a través de un filtro de arcilla activada, que retiene las resinas y conserva en disolución los aceites. Los aceites pueden separarse de la solución destilando

ésta y las resinas lavando el filtro con un disolvente más activo y destilando también posteriormente.

La distinción que hemos hecho entre asfaltenos, resinas y aceites, no es absoluta, ya que las proporciones varían con el tipo de disolvente empleado en la precipitación de los asfaltenos y con el tipo de filtro empleado para la separación de las resinas, de tal manera que si se da como característica de un asfalto su contenido de asfaltenos, debe indicarse simultáneamente el tipo de disolvente empleado para la separación.

Figura 2.2 Representación esquemática de los componentes del asfalto



Fuente: Zerecero Galicia (1997)

Esto confirma el hecho real de que no existen en la composición coloidal del asfalto fronteras bien definidas entre las fases, sino que todos sus componentes se ordenan en una transición gradual que va desde los asfaltenos más pesados hasta los aceites más ligeros, del mismo modo que se pasa insensiblemente de un color a otro en el espectro luminoso (Zerecero Galicia, 1997).

2.1.4.1.1 Los asfaltenos

Se definen como los compuestos solubles que se precipitan del petróleo crudo por la adición de un mínimo de 40 volúmenes de n-pentano. Son partículas sólidas, cuyo color va desde el café oscuro hasta el negro, sin punto de fusión definido; al calentarse forman una masa viscosa que se descompone, se hincha y aglutina, dejando un residuo de carbón.

Los asfaltenos concentran los compuestos indeseables de los asfaltos, pues contienen los metales pesados y el azufre. Es importante anotar que por la deshidrogenación de los anillos en los crudos resultan los compuestos clúster, los cuales están formados por una serie de átomos en donde cada uno de ellos se encuentra enlazado, por lo menos, con otros dos átomos de la misma clase formando un poliedro o fragmento de poliedro (León Arenas, 2006).

2.1.4.1.2 Los maltenos

Son la fracción soluble en hidrocarburos saturados de bajo punto de ebullición. Se describe como un dispersante coloidal de partículas las de asfaltina disueltas en un material parecido al aceite y muy pesado. Los maltenos están constituidos por anillos aromáticos, anillos nafténicos y una muy poca cadena parafínica; generalmente existe mayor proporción de maltenos que asfaltenos. El mayor contenido del primero (maltenos) es lo que le da la calidad a un asfalto; esto quiere decir que la naturaleza química de los maltenos regula en gran parte las propiedades químicas de los asfaltos. Los maltenos se separan por métodos físicos en resinas y aceites; las resinas son más pesadas que los aceites, tienen un punto de ebullición más elevado y un carácter más aromático, presentan mayor poder de adsorción. Los maltenos también se pueden separar en diferentes fracciones con distintos puntos de ebullición (León Arenas, 2006).

2.1.4.1.3 Las resinas y los aceites

Las resinas o aromáticos polares tienen un peso molecular de l. 100 UMA, con un mayor poder de adsorción y actúan como agente estabilizador de los asfaltenos.

Los aceites, a su vez, poseen un menor poder de adsorción. Son compuestos aromáticos de nafta y componentes saturados, con un peso molecular de 700 UMA. El nivel de

compuestos saturados es importante en el asfalto, ya que las ceras o parafinas se consideran como componentes no deseables en él.

Un asfalto de buena calidad requiere que sus componentes químicos estén en una relación que garantice su estabilidad una vez se encuentre en servicio.

Si el asfalto es tratado con un hidrocarburo saturado de bajo punto de ebullición (por ejemplo: N-Pentano), se presentará un rompimiento de la estructura coloidal, disolviéndose una parte del material, mientras que el resto precipitará en forma de partículas grumosas de color oscuro. Los cuerpos precipitados son los asfaltenos y los que quedan disueltos los maltenos; filtrando la disolución obtenida anteriormente a través de un filtro de arcilla activada, se retienen las resinas quedando los aceites en disolución.

De este proceso de descomposición se concluye que los asfaltenos son los principales componentes del núcleo de las micelas, los aceites predominan en el líquido intermicelar y las resinas constituyen una fase intermedia entre núcleo y líquido intermicelar (León Arenas, 2006).

2.1.5 Clasificación de las mezclas asfálticas

Según Padilla (2004), existen varios parámetros de clasificación para establecer las diferencias entre las distintas mezclas y las clasificaciones pueden ser diversas:

- **Por Fracciones de agregado pétreo empleado**
 - Masilla asfáltica: Polvo mineral más ligante.
 - Mortero asfáltico: Agregado fino más masilla.
 - Concreto asfáltico: Agregado grueso más mortero.
 - Macadam asfáltico: Agregado grueso más ligante asfáltico.

- **Por la Temperatura de puesta en obra.**
 - Mezclas asfálticas en Caliente: Se fabrican con asfaltos a unas temperaturas elevadas, en el rango de los 150 grados centígrados, 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 al ambiente, pues en caso contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente.

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

- **Por la proporción de Vacíos en la mezcla asfáltica**

Este parámetro suele ser imprescindible para que no se produzcan deformaciones plásticas como consecuencia del paso de las cargas y de las variaciones térmicas.

- Mezclas Cerradas o Densas: La proporción de vacíos no supera el 6 %.
- Mezclas Semi-cerradas o Semi-densas: La proporción de vacíos está entre el 6 % y el 10 %.
- Mezclas Abiertas: La proporción de vacíos supera el 12 %.
- Mezclas Porosas o Drenantes: La proporción de vacíos es superior al 20 %.

- **Por el Tamaño máximo del agregado pétreo**

- Mezclas Gruesas: Donde el tamaño máximo del agregado pétreo excede los 10 mm.
- Mezclas Finas: También llamadas microaglomerados, pueden denominarse también morteros asfálticos, pues se trata de mezclas formadas básicamente por un árido fino incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico. El tamaño máximo del agregado pétreo determina el espesor mínimo con el que ha de extenderse una mezcla que vendría a ser del doble al triple del tamaño máximo.

- **Por la Estructura del agregado pétreo**

- Mezclas con Esqueleto mineral: Poseen un esqueleto mineral resistente, su componente de resistencia debida al rozamiento interno de los agregados es notable. Ejemplo, las mezclas abiertas y los que genéricamente se denominan

concretos asfálticos, aunque también una parte de la resistencia de estos últimos, se debe a la masilla.

- Mezclas sin Esqueleto mineral: No poseen un esqueleto mineral resistente, la resistencia es debida exclusivamente a la cohesión de la masilla. Ejemplo, los diferentes tipos de masillas asfálticas.

- **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.

Tabla 2.1 Clasificación de las mezclas asfálticas

Parámetro de Clasificación	Tipo de mezcla
Fracciones de agregado empleadas	Masilla
	Mortero
	Concreto
	Macadam
Temperatura de puesta en obra	En Frío
	En Caliente
Huecos en la mezcla (h)	Cerradas ($h < 6\%$)
	Semicerradas ($6\% < h < 12\%$)
	Abiertas ($h > 12\%$)
	Porosas ($h > 20\%$)
Tamaño máximo del agregado (t máx)	Gruesas (t máx > 10 mm)
	Finas (t máx < 10 mm)
Estructura del agregado	Con esqueleto mineral
	Sin esqueleto mineral
Granulometría	Continuas
	Discontinuas

Fuente: Padilla (2004)

2.1.6 Propiedades de los cementos asfálticos

La estructura coloidal de los ligantes asfálticos hace bastante complicado el estudio de sus propiedades reológicas, que se dificulta aún más por el acentuado carácter termoplástico de estos materiales. Este carácter, o sea la propiedad que tienen de ablandarse y hacerse deformables por efecto del calor, recuperando al enfriarse sus propiedades originales, es el que ha hecho posible el empleo del asfalto como ligante desde la más remota antigüedad, pero es también el que más complica sus propiedades reológicas, pues todas deben estudiarse en general como funciones de la temperatura representadas por curvas más o menos complicadas. Zerecero (1997) describe las siguientes propiedades:

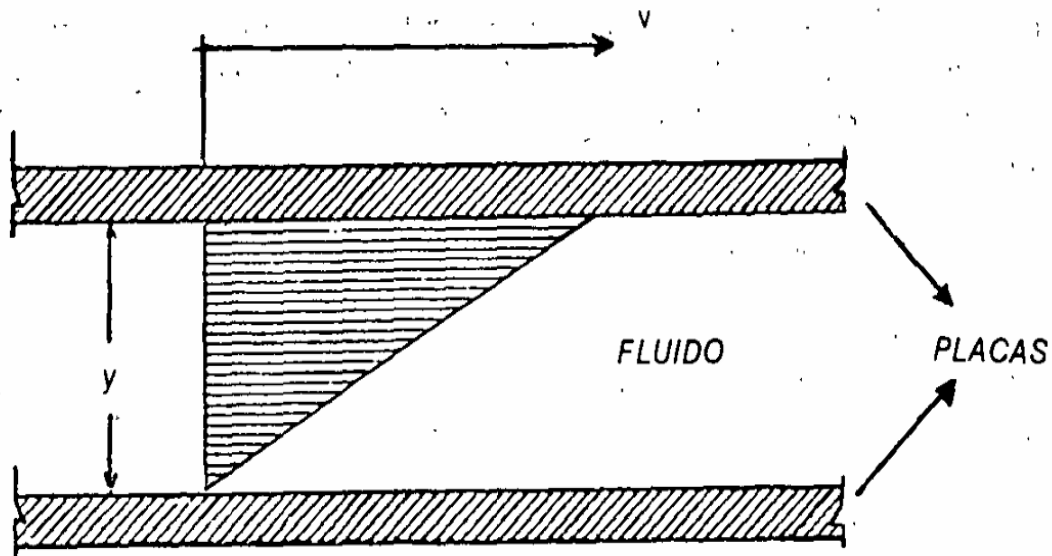
- **Consistencia y susceptibilidad**

La consistencia de un asfalto, como de cualquier otro material, es el estado físico que presenta en un momento dado, con relación a los estados sólido, líquido y gaseoso de la materia. Como lo hemos mencionado anteriormente, el asfalto, a las temperaturas ambientes normales, es un material sólido o semisólido que mediante calentamiento pasa gradualmente al estado líquido. Es decir, la consistencia del asfalto depende principalmente de su temperatura, propiedad que se menciona usualmente. como susceptibilidad.

- **Viscosidad, tixotropía y elasticidad**

La viscosidad se define como la resistencia que presenta un material a ser deformado, en función de la velocidad de aplicación de una carga, y se debe al rozamiento o fricción interna de sus moléculas. Supongamos una capa delgada de un fluido contenida entre dos placas de metal de las que una es fija y la otra puede desplazarse. La única fuerza que se opone al desplazamiento de esta placa es la resistencia que presenta el fluido a deformarse. Esta resistencia es inversamente proporcional a la distancia entre las placas, y en fluidos como el agua y la glicerina, la resistencia es directamente proporcional a la velocidad de desplazamiento de la placa móvil. En la Figura 3 representamos esquemáticamente el dispositivo descrito.

Figura 2.3 Representación esquemática de la viscosidad



Fuente: Zerecero (1997)

- **Ductilidad**

La ductilidad de un asfalto puede definirse como su capacidad para sufrir alargamientos sin disgregación de su masa.

Esta es una de las pruebas más importantes del asfalto desde el punto de vista de su aplicación práctica, porque es la que le da, junto con la adhesividad, sus excelentes propiedades como ligante. En casi todas sus aplicaciones el asfalto queda sometido a tracciones y compresiones alternadas que resiste deformándose, pero sin romperse, gracias a sus propiedades plásticas relacionadas con su ductilidad.

- **Punto de inflamación**

Esta propiedad está más relacionada con su utilización. El punto de inflamación corresponde a la temperatura a la que el asfalto puede ser calentado con seguridad sin peligro de que se incendie en presencia de una flama abierta.

2.1.7 Ensayos de caracterización del cemento asfáltico

Las pruebas que se efectúan a los asfaltos, como en el caso de cualquier otro material, son un medio eficaz para conocer de la mejor manera posible sus propiedades y tratar de predecir su comportamiento cuando se utilizan, en un determinado trabajo. Al mismo tiempo los resultados de dichas pruebas permiten verificar el cumplimiento de normas o especificaciones de calidad que aseguren el buen uso de los distintos materiales (Zerecero Galicia, 1997).

2.1.7.1 Ductilidad (AASHTO T51-00)

La ductilidad de un material bituminoso es la longitud, medida en cm., a la cual se alarga (elongación) antes de romperse cuando dos extremos de una briqueta, confeccionada con una muestra y de la forma descrita en 1 se traccionan a la velocidad y temperatura especificadas. A menos que otra condición se especifique, el ensayo se efectúa a una temperatura de $25 \pm 0,5$ °C y a una velocidad de 5 cm/min \pm 5%. Para otras temperaturas deberá especificarse la velocidad (AASHTO T51-00).

Equipos y materiales

- **Moldes**

El molde, de bronce o zinc, debe ser similar en diseño al mostrado en la figura 4; los extremos b y b' se denominan clips y las partes a y a', lados del molde. Cuando se arme el molde se obtendrá la briqueta especificada.

- **Baño de agua**

Mantenga el baño a la temperatura de ensayo especificada, con una tolerancia de $\pm 0,1$ °C. El volumen mínimo de agua es de 10 l. Sumerja la muestra a una profundidad no menor que 10 cm. y apóyela sobre una bandeja perforada, ubicada a no menos que 5 cm. del fondo del baño.

- **Ductilímetro**

Para traccionar las briquetas de material bituminoso se puede usar cualquier aparato construido de modo que la muestra se mantenga continuamente sumergida en agua,

como se especifica en el procedimiento, al mismo tiempo que los clips se traccionan a una velocidad uniforme y sin vibraciones excesivas. Este aparato debe ser termo regulable para mantener la temperatura especificada en forma homogénea en toda la masa de agua, dentro de la tolerancia indicada en el procedimiento.

- **Termómetros**

El termómetro se utilizará en un rango de temperatura entre -8 y 32 °C; debe cumplir los requerimientos descritos en la norma.

Procedimiento

- **Preparación del molde**

Arme el molde sobre una placa base; cubra cuidadosamente la superficie de la placa y las superficies interiores de los lados a y a' del molde (figura 4) con una película delgada de anti adhesivo para prevenir que el material por ensayar se adhiera. La placa sobre la cual se coloca el molde debe estar perfectamente plana y a nivel, de modo que la superficie inferior del molde esté completamente en contacto.

- **Moldeo de las muestras para el ensayo**

Caliente la muestra con cuidado, previniendo calentamientos locales, hasta que esté suficientemente fluida para verter. Sin embargo, durante el calentamiento, la temperatura no debe exceder de 80 a 110 °C por encima del punto de ablandamiento esperado.

Tamice la muestra fundida a través del tamiz $0,3$ mm (N° 50); luego continúe revolviendo y vierta el material dentro del molde. Durante el llenado cuide no tocar ni desarreglar el molde, de modo que no se distorsione la briqueta; vierta con un chorro delgado hacia atrás y hacia adelante, de extremo a extremo, hasta que el molde quede por sobre el nivel de llenado. Deje enfriar a temperatura ambiente por un período de 30 a 40 min. y luego coloque en el baño de agua mantenido a la temperatura de ensayo especificada por 30 min. Luego recorte el exceso de ligante asfáltico con una espátula o cuchillo caliente, resistente y afilado, de modo que el molde se ajuste al nivel de llenado.

Nota 1: Como anti adhesivo o desmoldante se puede usar vaselina, silicona u otros.

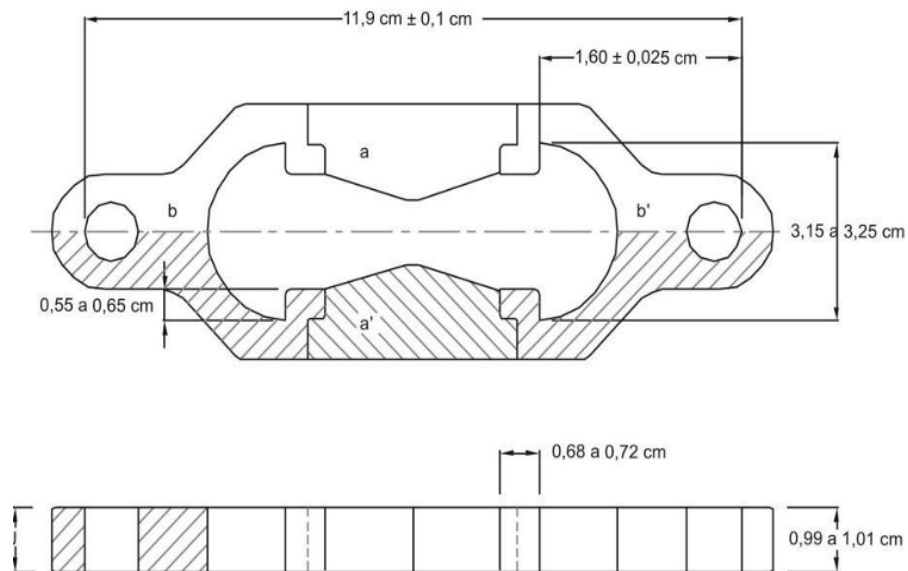
- **Conservación de las muestras a la temperatura de ensayo**

Coloque la placa y el molde con la briqueta en el baño de agua y manténgala por un período de 85 a 95 min. a la temperatura especificada; luego quite la briqueta de la placa, separe las partes a y a' e inmediatamente ensaye la briqueta.

- **Ensayo**

Enganche los anillos de cada extremo de los clips a las clavijas del ductilímetro y sepárelos a la velocidad uniforme especificada hasta la ruptura de la briqueta; se permite una tolerancia de $\pm 5\%$ para la velocidad especificada. Mida la distancia en cm. entre los clips traccionados en el momento de producirse la ruptura. Durante el desarrollo del ensayo, el agua en el estanque del ductilímetro cubrirá la briqueta a lo menos 2,5 cm. y ésta se mantendrá continuamente a la temperatura especificada con una tolerancia de $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Figura 2.4 Molde para ensayo de ductilidad



Fuente: Norma AASHTO T51-00

2.1.7.2 Penetración (ASTM D 5)

Este método de ensayo cubre la determinación de la penetración de materiales bituminosos semi-sólidos y sólidos.

Las agujas, contenedores y otras condiciones descriptas en este método de ensayo sirven para las determinaciones de penetraciones hasta 500.

penetración, consistencia de un material bituminoso expresada como la distancia en décimos de milímetros a la que una aguja Standard verticalmente penetra la muestra de material bajo condiciones conocidas de carga, tiempo y temperatura.

Procedimiento

- Examine el vástago de la aguja y guía para establecer la ausencia de agua y otros materiales extraños. Si se espera que la penetración exceda los 350 use una aguja larga, en otros casos, use una aguja corta. Limpie la aguja de penetración con tolueno u otro solvente apropiado, seque con una tela limpia, e inserte la aguja en el penetrómetro. Al menos que esté especificado en otros casos, coloque el peso de 50-g sobre la aguja, haciendo un peso total de $100 + 0.1$ g.
- Si los ensayos van a ser realizados con el penetrómetro en el baño, coloque el contenedor de la muestra directamente en el soporte sumergido del penetrómetro.
- Mantenga el contenedor de la muestra completamente cubierto con agua en el baño. Si los ensayos se realizarán con el penetrómetro fuera del baño, coloque el contenedor de la muestra en la placa de transferencia, cubra el recipiente completamente con agua a la temperatura constante del baño y coloque la placa de transferencia en el soporte del penetrómetro.
- Posicione la aguja bajándola lentamente hasta que su punta haga contacto con la superficie de la muestra. Esto es cumplido llevando la punta de la aguja al contacto con su imagen reflejada en la superficie de la muestra, auxiliándose con una lámpara. Si el penetrómetro quedó en una determinada lectura muévelo o traiga el puntero hasta el cero.

- Libere rápidamente el dispositivo que mantiene retenida la aguja por el periodo de tiempo especificado y ajuste el instrumento para medir la distancia penetrada en décimas de milímetros. Si el recipiente se mueve, ignore el resultado.
- Haga por lo menos tres determinaciones en puntos sobre la superficie de la muestra a no menos de 10 mm. del borde del contenedor y no menos de 10 mm. aparte. Si la placa de transferencia es usada, retorne la muestra y la placa de transferencia a la temperatura constante del baño entre determinaciones. Use una aguja limpia para cada determinación. Si la penetración es mayor a 200, use al menos tres agujas dejándolas en la muestra hasta que las tres determinaciones hayan sido completadas.

Realice un reporte a la unidad entera más cercana del promedio de tres penetraciones (ASTM D5).

2.1.7.3 Viscosidad (AASHTO T201)

Este método, describe el procedimiento para determinar la viscosidad cinemática de la cinemática de los asfaltos líquidos, residuos de destilación de asfaltos líquidos (bitúmenes), todos a 60 °C (140 °F) y de cementos asfálticos a 135 °C (275 °F), en el rango de 6 a 100.000 mm² /s (cSt).

Procedimiento

- Escoja un viscosímetro limpio y seco, que dé un tiempo de flujo mayor de 60 s y precaliéntese a la temperatura de prueba.
- Coloque el viscosímetro en el baño de temperatura constante manteniendo vertical el tubo. Introduzca la muestra a través del tubo, teniendo cuidado de no humedecer los lados de dicho tubo, dentro del brazo transversal hasta que el borde guía esté dentro de 0.5 mm de la marca de llenado sobre el tubo sifón.
- Mantenga el baño a la temperatura de prueba dentro de ± 0.01 °C (± 0.02 °F) para pruebas a temperaturas de 60 °C (140 °F) y dentro de ± 0.03 °C (± 0.05 °F) para pruebas a temperatura de 135 °C (275 °F) con tolerancia de ± 0.06 °C (± 0.10 °F). Aplicar las correcciones necesarias.

- Cargue el viscosímetro.
- Deje el viscosímetro cargado en el baño suficiente tiempo (30 minutos) hasta que la muestra haya alcanzado la temperatura de la prueba.
- Inicie el flujo del viscosímetro.
- Mida el tiempo requerido para que el borde guía del menisco pase de la primera marca de tiempo primera marca de tiempo hasta la segunda, con aproximación de 0,1. Si este tiempo de flujo es menor de 60 s, seleccione un viscosímetro de diámetro capilar más pequeño y repita la operación.
- Terminada la prueba limpie el viscosímetro con varios enjuagues con un solvente apropiado completamente miscible con la muestra seguido por un solvente volátil.
- Seque el tubo pasando una corriente lenta de aire seco y filtrado a través del capilar durante 2 min.

2.1.7.4 Punto de inflamación y combustión en la copa abierta de Cleveland (ASTM D 1310-01)

El método define la determinación de los Puntos de Inflamación y Combustión por medio de la copa abierta de Cleveland, para productos del petróleo y otros líquidos, excepto aceites combustibles y materiales que tienen un punto de inflamación por debajo de 79°C determinado por medio de este método de ensayo (ASTM D1310-01).

Equipos

- **Copa Abierta de Cleveland**

Consiste en una copa de ensayo, una placa de calentamiento, un aplicador de la llama, un calentador y apoyo.

- **Protector**

Se recomienda un protector cuadrado de 460 mm y 610 mm de alto que tenga un frente abierto.

- **Termómetro**

Un termómetro que tenga un rango de -6 a 400°C .

Procedimiento

- Llene la copa a una temperatura conveniente, no excediendo 100°C por encima de lo esperado para el Punto de Ablandamiento; de esa manera la parte superior del menisco está en la línea de llenado. Para ayudar en esta operación use un medidor del nivel de llenado. Si un exceso de muestra se ha agregado a la copa, quítelo usando una pipeta u otro aparato adecuado. Sin embargo, si hay muestra que esté fuera del aparato, vacíe, limpie y vuelva a llenar. Destruya cualquier burbuja de aire sobre la superficie de la muestra.
- La luz de la llama de prueba se ajusta a un diámetro de $3,0$ a $5,0$ mm y se compara con el tamaño del cabezal.
- Aplique calor inicialmente de modo que la temperatura de la muestra suba a una velocidad entre 14 y 17°C por minuto. Cuando la temperatura de la muestra se aproxime a los 55°C por debajo del Punto de Inflamación esperado, disminuya el calor de modo que la velocidad de la temperatura para 28°C antes del Punto de Inflamación, sea de 5 a 6°C por min.
- Comenzando, al menos 28°C por debajo del Punto de Inflamación, aplique la llama de prueba cada 2°C sucesivos leídos en el termómetro. Pase la llama de prueba a través del centro de la copa, en ángulos rectos al diámetro que pasa a través del termómetro; con suavidad continúe el movimiento aplicando la llama en línea recta a lo largo de la circunferencia de un círculo que tenga un radio al menos de 150 mm. El centro de la llama de prueba debe moverse en un plano que diste menos de 2 mm por encima del plano del borde superior de la copa, pasando en una dirección primero y en el próximo intervalo en la dirección opuesta. El tiempo consumido en pasar la llama a través de la copa será cercano a 1 seg. Durante los últimos 17°C , suba la temperatura previa al Punto de Inflamación.

- Evite alteraciones del vapor en la copa de ensayo poniendo atención en movimientos descuidados o en aires suaves cercanos a la copa.
- Informe el Punto de Inflamación como la temperatura leída en el termómetro, cuando aparece el destello en cualquier punto de la superficie del material, pero no confunda el verdadero destello con el halo azulado que algunas veces circunda la llama de prueba.
- Para determinar el Punto de Combustión continúe calentando de modo que la temperatura de la muestra se eleve a una razón de 5 a 6°C por min. Continúe aplicando la llama a intervalos de 2°C hasta que el material se inflame y continúe quemándose como mínimo 5 seg. Informe la temperatura de este punto como el Punto de Combustión del material.

2.1.7.5 Método para determinar la densidad del cemento asfáltico (ASTM D71-94)

Esta norma describe los procedimientos que se deben seguir para la determinación del peso específico de materiales asfálticos sólidos y semisólidos y alquitranes blandos, mediante el empleo del picnómetro a la temperatura requerida.

Materiales y equipos

- Picnómetro Hubberd
- Baño de agua
- Termómetro
- Balanza analítica
- Agua destilada

Procedimiento

- Primeramente se debe calibrar el picnómetro con agua.
- Caliente una pequeña cantidad de material hasta una condición fluida, mediante la aplicación de calor en forma suave; debe prevenir la pérdida por evaporación. Una

vez que la muestra esté suficientemente fluida viértala dentro del picnómetro, limpio y seco, hasta aproximadamente la mitad.

- Es conveniente calentar ligeramente el picnómetro antes de vaciar el material. Se deben tomar precauciones para evitar que el material toque las paredes del picnómetro por encima de su nivel final, y evite la inclusión de burbujas de aire, aplicando ligeramente la llama de un mechero a la superficie del picnómetro y del asfalto. Enfríe el picnómetro y su contenido a temperatura ambiente y determine la masa con la tapa incluida. Designe esta masa como C, aproximando a 0,01 g.
- Termine de llenar con agua destilada, inserte la tapa firmemente, sumérjalo completamente en un vaso lleno de agua destilada y colóquelo en el baño, a la temperatura de ensaye por unos 30 min. Retire el picnómetro del vaso y séquelo con un paño.
- Determine la masa y désignela como D, aproximando a 0,01 g.

2.2 Agregados

Los agregados son materiales pétreos naturales seleccionados; materiales sujetos a tratamientos de disgregación, cribado, trituración o lavado, o materiales producidos por expansión, calcinación o fusión excipiente (Norma N·CMT·2·02·002, 2019).

2.2.1. Fuentes de los agregados utilizados en pavimentos

Según Corredor (2004), la fuentes y materiales que son empleados para la elaboración de pavimentos pueden ser:

- **Agregados naturales.** - Son gravas y arenas encontradas en depósitos de ríos o minas, y son empleadas sin ningún procesamiento adicional, salvo tamizado o lavado, en caso de que ello sea necesario.
- **Agregados procesados.** - Son gravas o Rocas que se someten a procesos de trituración y cernido para lograr incrementar su resistencia, mejorar su granulometría, reducir el tamaño máximo de las partículas, cambiar la forma de las partículas y mejorar la textura superficial de los granos.

- **Agregados estabilizados.** - Son materiales locales que, por no lograr alcanzar propiedades físicas que les permitan ser empleados en las capas del pavimento, son mejoradas mediante la incorporación de agentes externos tales como cemento, cal, asfaltos líquidos o emulsionados, o aceites sulfonados.
- **Agregados artificiales (o sintéticos).** - Son aquellos que provienen de la modificación fisico-química de materiales naturales.

2.2.2 Filler

Según el Sistema de Clasificación de Suelos SUCS, se define como polvo mineral, a la parte del agregado pétreo total que pasa el tamiz #200. Y según la normativa Europea UNE-EN 933-2., se define como polvo mineral, a la parte del agregado pétreo total que pasa el tamiz 0.063mm.

El filler o polvo mineral de aportación es un producto comercial de naturaleza pulverulenta (cemento normalmente o cenizas volantes de central térmica) o un polvo en general calizo, especialmente preparado para utilizarlo en mástico para mezclas asfálticas. Cuando se trate de un producto comercial, se garantiza perfectamente su control y se conocen sus propiedades tanto físicas como químicas y su futuro comportamiento en la mezcla. Cuando se utiliza el otro tipo de filler, (de recuperación), que es aquel que se obtiene de las plantas asfálticas, no se sabe exactamente cuáles son sus componentes y en ocasiones varía su composición con el tiempo y puede estar o no, dentro de las normativas, debido a que es un residuo (Padilla, 2004).

2.2.3 Ensayos realizados a los agregados

2.2.3.1 Granulometría AASHTO T27-99

Este método establece el procedimiento para tamizar y determinar la granulometría de los áridos.

Es aplicable a los áridos que se emplean en la elaboración de morteros, hormigones, tratamientos superficiales y mezclas asfálticas (AASHTO T27-99) .

Equipos

- Balanza
- Tamices
- Horno
- Herramientas y accesorios

Procedimiento

- Preparación de tamices
- Seleccione un juego de tamices de acuerdo con la especificación correspondiente al material por ensayar. Dispóngalos según aberturas decrecientes, montados sobre el depósito receptor y provisto de su tapa. Todos estos elementos deben estar limpios y secos. Verifique los tamaños de abertura de las mallas, a lo menos una vez cada seis meses.

- Tamizado

Efectúelo en dos etapas:

- Un tamizado inicial que puede ser manual o mecánico
- Un tamizado final que debe ser manual.

- Tamizado inicial

- Determine la masa de la muestra de ensaye en estado seco, registre aproximando a 1 g para áridos finos y a 10 g para áridos gruesos; vacíela sobre el tamiz superior y cubra con la tapa:

- Agite el conjunto de tamices por un período suficiente.

- Tamizado final

- Retire el primer tamiz, provisto de depósito y tapa

- Sosténgalo de un costado con una mano, manteniéndolo ligeramente inclinado
- Golpee firmemente el costado libre hacia arriba con la palma de la otra mano a un ritmo de 150 golpes/min.
- Gire el tamiz cada 25 golpes en 1/6 de vuelta.
- Al completar cada ciclo de 150 golpes, pese separadamente el material retenido sobre el tamiz y el material que pasa, recogido en el depósito.
- Traslade el material que pasa en cada ciclo al tamiz siguiente.
- Repita el ciclo en el mismo tamiz con el material retenido hasta que se recoja en el depósito una masa inferior al 1% de la masa retenida, con lo cual dé por terminado el tamizado de esa fracción.
- Retire el tamiz siguiente provisto de depósito y tapa para efectuar con dicho tamiz los ciclos necesarios, y así sucesivamente hasta completar todos los tamices.
- Determine la masa final del material retenido en cada tamiz y del material que pasa por el tamiz de menor abertura, recogido en el depósito. Registre con la aproximación que sea mayor entre 1 g y 0,1% de la pesada.

2.2.3.2 Gravedad específica y densidad de agregados gruesos AASHTO T85-91

En la norma AASHTO T85-91 establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos.

Es aplicable a los áridos gruesos de densidad neta entre 2.000 y 3.000 kg/m³, que se emplean en el análisis de suelos, elaboración de hormigones y obras asfálticas.

Equipos y materiales

- Balanza
- Horno
- Canastillo porta muestra

- Estanque
- Recipientes

Procedimiento

- Pesada al aire ambiente del árido saturado superficialmente seco
 - Retire la muestra del agua y seque superficialmente las partículas, haciéndolas rodar sobre un paño absorbente húmedo hasta que desaparezca la película visible de agua adherida. Seque individualmente las partículas mayores manteniendo el árido, ya secado superficialmente, cubierto por un paño húmedo hasta el momento de pesar. Efectúe toda la operación en el menor tiempo posible.
 - Determine inmediatamente la masa del pétreo saturado superficialmente seco, por pesada al aire ambiente, aproximando a 1 g. Registre su valor como M_{ss} .
- Pesada sumergida
 - Coloque la muestra inmediatamente en el canastillo porta muestra.
 - Sumerja el canastillo en agua a $20 \pm 3^\circ \text{C}$, por un período de al menos 3 min.
 - Determine la masa sumergida, aproximando a 1 g. Registre su valor como S_{UMM} .
- Pesada al aire ambiente del árido seco
 - Retire la muestra del canastillo y vacíela completamente del recipiente, cuidando de no dejar partículas atrapadas.
 - Seque la muestra hasta masa constante en horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$.
 - Enfríe la muestra hasta temperatura ambiente, en lo posible dentro de un recipiente protegido, para evitar la absorción de humedad del aire.

- Determine la masa de la muestra seca, por pesada al aire ambiente, aproximando a 1 g. Registre su valor como Ms.

2.2.3.3 Gravedad específica y densidad de agregados finos AASTHO T84

Este método establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua de los áridos finos.

Es aplicable a los áridos finos de densidad neta entre 2.000 y 3.000 kg/m³, que se emplean en la elaboración de hormigones y obras asfálticas (AASTHO T84).

Equipos y materiales

- Balanza
- Horno
- Recipientes
- Matraz
- Molde
- Pisón

Procedimiento

- Elimine paulatinamente el exceso de agua, evitando la pérdida de finos. Revuelva la muestra frecuentemente para asegurar un secado uniforme, hasta llevarla a su condición suelta.
- Coloque el molde cónico sujeto firmemente contra una superficie lisa, plana y no absorbente, con su diámetro mayor hacia abajo, llénelo con el árido en condición suelta en una capa y enrase.
- Compacte suavemente con 25 golpes de pisón uniformemente distribuidos sobre la superficie. En cada golpe deje caer el pisón libremente desde una altura de 5 mm sobre la superficie del árido. Dicha altura debe conservarse, ajustándola a la nueva elevación de la muestra después de cada golpe.

- Remueva cuidadosamente todo material sobrante en la superficie. Levante el molde verticalmente. Si hay humedad libre la muestra conservará la forma del cono. En este caso elimine el exceso de humedad, repitiendo el procedimiento, a intervalos frecuentes, desde
- Cuando, al retirar el molde, el árido caiga suavemente según su talud natural, será indicación que éste ha alcanzado la condición saturada superficialmente seca.
- Inmediatamente que el árido alcance la condición de saturado superficialmente seco, obtenga el tamaño de muestra de ensaye requerido, pese y registre su masa.
- Coloque la muestra en el matraz y cúbrala con agua a una temperatura de $20 \pm 3^\circ$ C, hasta alcanzar aproximadamente $2/3$ del volumen del matraz.
- Agite el matraz a fin de eliminar burbujas de aire golpeándolo ligeramente contra la palma de la mano. En caso de pétreos muy finos, se debe utilizar una bomba de vacío.
- Deje reposar durante 1 h manteniendo una temperatura de $20 \pm 3^\circ$ C.
- Llene con agua a $20 \pm 3^\circ$ C hasta la marca de calibración, agite y deje reposar un instante. Mida y registre la masa total del matraz con la muestra de ensaye y el agua (Mm).
- Saque la muestra del matraz, evitando pérdidas de material, y séquela hasta masa constante en horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ$ C. Déjela enfriar a temperatura ambiente. Determine y registre la masa de la muestra de ensaye en condición seca (ms). Llene el matraz solamente con agua a una temperatura de $20 \pm 3^\circ$ C hasta la marca de calibración. Mida y registre la masa del matraz con agua (Ma).

2.2.3.4 Desgaste mediante la Máquina de los Ángeles AASTHO T96-99

Este método establece el procedimiento para determinar la resistencia al desgaste de los áridos mayores a 2,36 mm, de densidad neta entre 2.000 y 3.000 Kg/m³, mediante la máquina de Los Ángeles (AASHTO T96-99).

Equipos y materiales

- Tambor de acero de 710 ± 6 mm de diámetro interior y de 510 ± 6 mm de longitud interior
- montado horizontalmente por sus vástagos axiales con una tolerancia de inclinación de 1 en 100, uno de los cuales debe tener un dispositivo de polea o similar, para acoplar un motor. En su manto cilíndrico debe tener una abertura para introducir la muestra, con una tapa provista de dispositivos para fijarla firmemente en su lugar y que asegure la estanqueidad del material sobre tamiz N° 50 (0.3 mm).
- Debe llevar en su superficie interior una aleta consistente en una plancha de acero desmontable, fijada rígida y firmemente a todo lo largo de una generatriz del cilindro, de modo que se proyecte radialmente hacia el interior en 90 ± 3 mm. La distancia entre la aleta y la abertura, medida a lo largo de la circunferencia exterior del cilindro y en la dirección de rotación, debe ser igual o mayor que 1,25 m.
- La rotación debe estar comprendida entre 30 y 33 rpm, ser contrapesada e impulsada de modo de mantener una velocidad periférica uniforme y tener incorporado un dispositivo contador de revoluciones con detención automática.

Procedimiento

- Pese los tamaños de las fracciones correspondientes al grado elegido. Registre la masa del total de material por ensayar como masa inicial de la muestra (mi), aproximando a 1 g.
- Coloque la masa inicial de material en la máquina de Los Ángeles y ensaye de acuerdo con el grado elegido (número y masa de esferas, y número de revoluciones).
- Una vez completado el número de revoluciones correspondiente, saque el material de la máquina evitando pérdidas y contaminaciones.
- Separe la carga abrasiva.

- Efectúe un primer tamizado en un tamiz de 2,36 mm o superior, a fin de evitar dañar el tamiz de corte (1,7 mm).
- Tamice manualmente el material bajo 2,36 mm por tamiz de 1,7 mm (N° 12).
- Reúna todo el material retenido en ambos tamices, lávelo, séquelo hasta masa constante en horno a 100 ± 5 ° C y deje enfriar a temperatura ambiente.
- Pese y registre la masa del material retenido como masa final de la muestra (mf), aproximando a 1 g.

2.2.3.5 Peso unitario de los agregados AASHTO T19-14

Este método de prueba cubre la determinación de la densidad aparente (“peso unitario”) del agregado en condición compactada o suelta, y los huecos calculados entre partículas en agregados finos, gruesos o mixtos con base en la misma determinación. Este método de prueba es aplicable a agregados que no excedan los 125 mm [5 pulgadas] de tamaño máximo (AASHTO T19-14).

Equipos y materiales

- Balanza
- Varilla de apisonamiento
- Medida: Una medida cilíndrica de metal, preferiblemente provista de asas.

Procedimiento

- Primeramente, se calibra la medida.
- Llene la medida hasta un tercio y nivele la superficie con los dedos. Varillar la capa de árido con 25 golpes de varilla apisonadora distribuidos uniformemente sobre la superficie. Llene la medida hasta dos tercios de su capacidad y nuevamente nivele y varilla como se indica arriba. Finalmente llenar la medida hasta rebosar y volverá varillar de la forma mencionada anteriormente. Nivele la superficie del agregado con los dedos o una regla, de tal manera que cualquier ligera proyección de las piezas más grandes del agregado grueso equilibre aproximadamente los huecos más grandes en la superficie debajo de la parte

superior de la medida.

Al colocar varillas en la primera capa, no permita que la varilla golpee con fuerza el fondo de la medida. Al apisonar la segunda y tercera capa, use un esfuerzo vigoroso, pero no más fuerza que la necesaria para hacer que la varilla apisonadora penetre hasta la capa anterior de agregado.

Determine la masa de la medida más el contenido y la masa de la medida sola y registre los valores con una precisión de 0,05 kg [0,1 lb] más cercana.

2.2.3.6 Equivalente de arena AASHTO T176-00

Este método establece un procedimiento rápido para determinar las proporciones relativas de finos plásticos o arcillosos en los áridos que pasan por tamiz de 4,75 mm (N°4).

Equivalente de arena es el porcentaje de arena propiamente tal con respecto al total de arena y de impurezas coloidales floculadas, particularmente arcillosas, húmicas y eventualmente ferruginosas (AASHTO T176-00).

Equipos y materiales

- Probeta graduada
- Pisón
- Medida
- Tamiz N°4
- Recipiente
- Agitador mecánico
- Herramientas y accesorios

Procedimiento

- Coloque la botella del sifón con la solución de ensaye a aproximadamente 1 m sobre la superficie de trabajo. Sifone la solución de ensaye en la probeta hasta que alcance un nivel de 100 ± 5 mm. Obtenga por cuarteo el material suficiente para

llenar una medida. Llene una medida; asiente el material golpeando el fondo de la medida contra la mesa de trabajo a lo menos 4 veces, enrase y vierta en la probeta.

- Golpee firmemente el fondo de la probeta contra la palma de la mano hasta desalojar las burbujas de aire. Deje la probeta en reposo por un período de 10 min. Coloque el tapón y suelte la arena del fondo inclinando y sacudiendo el tubo. Agite la probeta y su contenido mediante uno de los siguientes procedimientos:
 - Agitación manual. Sujete la probeta en posición horizontal y agite vigorosamente en un movimiento lineal horizontal con un desplazamiento de 230 ± 25 mm. Agite 90 ciclos en aproximadamente 30 s.
 - Agitación mecánica. Fije la probeta en el agitador mecánico y agite durante un período de 45 ± 1 s.
- Coloque la probeta sobre la mesa de trabajo, destápela y lave sus paredes interiores mediante el irrigador.
- Introduzca el irrigador hasta el fondo de la probeta con un movimiento lento de penetración y torsión para remover todo el material.
- Retire el irrigador en forma similar, regulando el flujo de la solución de modo de ajustar el nivel final a 380 mm Deje sedimentar por un periodo de $20 \text{ min} \pm 15 \text{ s}$.
- Al final del período de sedimentación lea y registre el nivel superior de la arcilla, aproximando al milímetro.
- Introduzca el pisón en la probeta y hágalo descender suavemente hasta que quede apoyado en la arena. Registre el nivel superior de la arena aproximando al milímetro.

2.2.3.7 Partículas alargadas caras achatadas ASTM D4791-10

Este método de prueba cubre la determinación de los porcentajes de partículas planas, partículas alargadas o partículas planas y alargadas en agregado gruesos (ASTM D4791-10).

Equipos y materiales

- Dispositivo de calibre proporcional.
- Tamices
- Balanza

Procedimiento

- Secar al horno la masa a una temperatura de 110 ± 5 °C.
- Tamizar el material en tamiz N°4 o N°8.
- Prueba cada una de las partículas en cada fracción de tamaño y coloque en uno de los cuatro grupos: (1) partículas planas, (2) partículas alargadas, (3) partículas que cumplen los criterios de los dos primeros grupos y (4) ni plano ni alargado.

2.4 Fibras de acero proveniente del reciclado de neumáticos

2.4.1 Neumáticos

Los elastómeros o cauchos son materiales poliméricos cuyas dimensiones pueden variar mucho si son sometidos a tensiones mecánicas, volviendo prácticamente a sus dimensiones originales cuando las tensiones cesan.

El caucho natural se extrae comercialmente a partir del látex del árbol *Hevea brasiliensis*. La materia prima es un líquido lechoso denominado látex. La estructura de la goma natural es principalmente cis-poli(1,4-isopreno), un polímero de cadena larga, mezclado con pequeñas cantidades de proteínas, lípidos, sales inorgánicas además de otros componentes (Sanchez Juan, 2012).

Caucho es el polímero que surge como un material viscoso conocido como látex, en la savia de diversas plantas, pero también es un material que puede ser confeccionado de forma sintética (Otero, 2020).

Figura 2.5 Partes de un neumático



Fuente: Sánchez (2012)

2.4.2 Fibra de acero reciclada

Según Sánchez (2012), se trata de un acero de muy buena calidad y grandes prestaciones. Este material se recicla en empresas siderúrgicas.

Existen dos clases de alambres, los cuales se clasifican así:

Normal: 0.3 a 0.7 (g bronce / kg de alambre)

Alta resistencia: 0.6 a 1.0 (g bronce / kg de alambre)

Dimensión y tolerancia:

Diámetro: 0.94 mm

Tolerancia: +0.05

Redondez: 0.03 mm

2.4.2.1 Obtención de las fibras de acero

Para la elaboración del presente trabajo de investigación se obtuvo la fibra de acero reciclado de la empresa INGOQUI, que es una empresa ubicada en la ciudad de

Cochabamba, Bolivia. Esta empresa se dedica a reciclar los neumáticos para darles diversos usos como caucho granulado para elaboración de pistas de atletismo, trapeadores de caucho, entre otros usos.

El siguiente procedimiento es el descrito por la empresa INGOQUI, de donde se obtuvo la fibra de acero reciclada:

Lavado de las llantas: En primer lugar, las llantas son lavadas para eliminar cualquier suciedad superficial.

Cepillado: Luego, se cepillan para remover cualquier residuo adicional de suciedad o partículas adheridas.

Triturado: Una vez limpias, las llantas se ingresan a una máquina trituradora, donde son descompuestas en fragmentos.

Extracción del acero: Durante el triturado, se extrae la estructura de acero que contienen las llantas.

Separación del caucho y acero: Finalmente, se separa la fibra de acero que ha quedado mezclada con el caucho. Este proceso permite obtener tanto caucho en grano como fibras de acero recicladas.

2.5 Pavimentos

Los pavimentos para carreteras y vías urbanas son estructuras viales multicapa, es decir, están constituidos por un conjunto de capas superpuestas relativamente horizontales compuestas por materiales seleccionados. Estas estructuras son diseñadas para soportar las cargas impuestas por el tránsito y por las condiciones ambientales (función estructural). Asimismo, deben diseñarse con el fin de ofrecer un paso cómodo, seguro y confortable al parque automotor que se imponga sobre su superficie en determinado período de tiempo (objetivo funcional). Las cargas dinámicas de los vehículos que transitan sobre estas estructuras producen en las interfaces de las capas esfuerzos cíclicos y deformaciones verticales, horizontales y de corte. El pavimento se soporta sobre una subrasante natural o sobre una plataforma, que puede ser la subrasante mejorada,

estabilizada, o un terraplén, que se denomina capa de conformación (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015).

De manera general, se pueden considerar las siguientes familias de pavimentos:

- Pavimentos flexibles.
- Pavimentos con capas asfálticas gruesas.
- Pavimentos con capas tratadas con ligantes hidráulicos.
- Pavimentos con estructuras mixtas.
- Pavimentos con estructuras inversas.
- Pavimentos rígidos.
- Pavimentos articulados o en adoquín.
- Pavimento semirrígido

2.5.1 Pavimento flexible

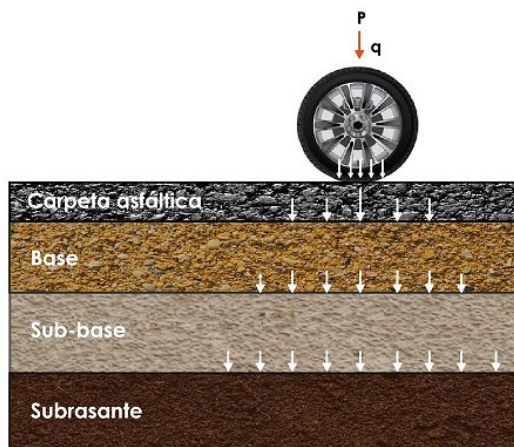
Las estructuras de pavimento del tipo flexible pueden ser definidas como estructuras viales conformadas por una capa asfáltica apoyada sobre capas de menor rigidez, compuestas por materiales granulares no tratados o liga dos (base, subbase, afirmado y en algunos casos subrasante mejorada o material de conformación), que a su vez se soportan sobre el terreno natural o subrasante. Los esfuerzos que generan las cargas vehiculares se disipan a través de cada una de las capas de la estructura de tal forma que, al llegar a la subrasante, la resistencia mecánica del suelo que la compone debe ser capaz de resistir dicho esfuerzo sin generar deformaciones que permitan el deterioro funcional o estructural de la vía. Adicionalmente, cada una de las capas de la estructura debe resistir la influencia del medio ambiente. La capa asfáltica en un pavimento flexible está conformada por la carpeta de rodadura, la base intermedia y la base asfáltica; sin embargo, esta capa puede estar constituida únicamente por la capa de rodadura cuando los niveles de tránsito son bajos. Las principales funciones de la capa asfáltica son las siguientes:

- **Estructural.** Esta capa debe estar diseñada y construida de tal forma que sea resistente a los fenómenos de fatiga y acumulación de las deformaciones permanentes inducidas por las cargas cíclicas vehiculares que se repiten en el tiempo. Adicionalmente, debe resistir los efectos del clima.
- **Funcional.** Esta capa recibe de manera directa las cargas que circulan sobre la superficie del pavimento; por lo tanto, debe estar diseñada y construida de tal manera que permita la circulación cómoda y segura del parque automotor durante su vida útil (serviciabilidad).
- **Impermeabilización.** Esta capa impide la penetración directa del agua a las capas subyacentes, restringiendo la pérdida de resistencia al corte que pueden experimentar las capas granulares de base y subbase, así como la subrasante cuando se incrementa el grado de saturación de los materiales que la conforman.

Cada una de las capas que componen la carpeta asfáltica están compuestas por mezclas asfálticas, las cuales a su vez se componen de materiales granulares (agregado pétreo) seleccionados, ligados con un material asfáltico o asfalto.

Estas mezclas están conformadas por agregados pétreos con granulometría y requisitos mínimos de calidad diferentes. Asimismo, presentan diferencias en cuanto a su función dentro de la estructura del pavimento y al tipo de material asfáltico o ligante que utilizan.

Figura 2.6 Perfil típico de una estructura de pavimento flexible



Fuente: Loria Salazar (2007)

2.5.1.1 Estructura de un pavimento flexible

2.5.1.1.1 Capa de rodamiento

Capa superior del pavimento que soporta directamente el tránsito, constituido por una o más capas (Corredor, 2004).

2.5.1.1.2 Base

Capa, o capas, de agregados, o de suelos o agregados tratados, destinadas a distribuir las cargas provenientes del paso de los vehículos sobre la sub-base o sub-rasante de la vía, y encima de la cual se construye la capa de rodamiento.

Las capas base, debido a su ubicación muy cercana a la superficie del pavimento, deben poseer alta resistencia a la deformación para ser capaces de soportar los elevados esfuerzos que son impuestos sobre ellas como efecto del paso de las cargas; normalmente se construyen de piedra o grava trituradas, escoria de acería, suelos estabilizados con cemento o asfalto. (Corredor, 2004).

2.5.1.1.3 Sub-base

Parte de la estructura del pavimento construida directamente sobre la sub-rasante, y que sirve de soporte a la base (Corredor, 2004).

2.5.1.1.4 Subrasante

Este término realmente es compartido en los aspectos de diseño geométrico: en ellos se refiere al plano que separa la infraestructura y superestructura del pavimento; y en el diseño de pavimentos: en el cual se refiere a los últimos centímetros (generalmente 50,0 cm) del relleno o corte del movimiento de tierras, que sirven de soporte a la estructura capaz de recibir y reducir las cargas del pavimento. La sub-rasante no forma parte del pavimento, pero es una variable fundamental en su determinación (Corredor, 2004).

2.5.1.2 Conceptos estructurales básicos en los pavimentos flexibles

En el caso de los pavimentos flexibles, su capacidad de soporte se debe a la forma de cómo se distribuyen las cargas aplicadas sobre la superficie. Por definición, un pavimento flexible consiste de una serie de capas con el mejor material cercano a la superficie. Como

consecuencia, la carga aplicada se reduce con la profundidad. La forma como ésta varíe dependerá de las propiedades de los diferentes materiales empleados en la construcción del pavimento. La sub-rasante es, finalmente la capa que debe soportar las cargas impuestas, al igual que las capas que sobre ella serán construidas.

La Figura 14 muestra la carga de una rueda (W), que es transmitida a la superficie del pavimento a través del caucho del vehículo, y que resulta en una presión unitaria vertical aproximadamente uniforme, identificada como P_0 . Cada capa del pavimento absorbe parte de esta presión, y distribuye la presión restante sobre la capa inferior de tal manera que este esfuerzo se ve reducido a un valor menor al esfuerzo resistente de la capa subyacente.

Cada vez que un vehículo pasa sobre una sección de un pavimento, éste sufre una deformación, o deflexión, que es recuperable; es decir es una deformación elástica.

La Figura 15 representa como la carga del vehículo (W) deforma levemente la estructura del pavimento, causando esfuerzos de tracción y compresión dentro del mismo. Las capas asfálticas tienen resistencia a la tracción y compresión para soportar los esfuerzos impuestos. Las capas granulares de sub-base y/o base sólo resisten esfuerzos de compresión.

2.5.2 Método Marshall ASTM D 1559

Este método especificado en la norma ASTM D 1559 recoge el procedimiento que debe seguirse para la realización del ensayo Marshall con las mezclas asfálticas.

El método puede emplearse tanto para el proyecto de mezclas asfálticas como para el control en obra de las mismas.

El ensayo sólo puede aplicarse a mezclas asfálticas de fabricación en caliente en las que el aglomerante sea betún de penetración, y con áridos cuyo tamaño máximo sea 25,4 mm: (1 ") o menor.

El método en sí comienza con la preparación de probetas fabricadas con la mezcla asfáltica, pero previamente a esta operación es necesario:

- Que los materiales se hayan ensayado para saber si cumplen las especificaciones

- Que se hayan dosificado los distintos tamaños de áridos, con objeto de que la granulometría total cumpla 'los requisitos de la especificación.
- Que se haya estudiado en obra, el machaqueo, clasificación y acopio de los para poder conseguir por mezcla de ellos la granulometría apropiada y su constancia.
- Que se haya determinado el peso específico real de los áridos y el peso específico del filler y del betún, para emplearlos en los cálculos de densidades y huecos.

2.5.2.1 Preparación de las mezclas

Por medio del método Marshall se determina el contenido óptimo de betún para una mezcla de áridos de una composición y granulometría determinadas. Para ello se prepara una serie de probetas en las cuales el contenido de betún de la mezcla se va aumentando de medio en medio por ciento, realizando tantas mezclas como sean necesarias para que por lo menos se tengan dos contenidos de betún por encima y por debajo del óptimo. Para empezar a trabajar Se hace una estimación del contenido de betún óptimo y con objeto de obtener datos más precisos se moldean tres probetas, como mínimo, de cada contenido de betún. Por tanto, el estudio de una mezcla asfáltica realizando una serie de probetas con seis contenidos de betún diferentes, exige la fabricación de 1& probetas. Cada probeta necesita normalmente unos 1.200 gr. de áridos y por ello la cantidad mínima de mezcla de áridos será de unos 25 -kg. La cantidad de betún necesaria será de unos 2 kg,

Fijada previamente la composición en tanto por ciento de cada árido para obtener la granulometría total de la mezcla que se desea, se calcula el peso necesario de cada uno de ellos para realizar la amasada de cada- probeta, de 1.200 a 1.300 gr., en principio. Después de compactar la primera probeta se mide su altura, que deberá ser de $63,5 \pm 3,2$ mm. ($2 \frac{1}{2} \pm 1/8$ ").

Se echan en recipientes apropiados, bandejas o cazos, fracciones representativas de los áridos tomados por cuarteo y se calientan en una placa eléctrica o estufa a una temperatura comprendida entre 175 y 190° C.

Se calienta también el betún necesario dentro de un cazo sobre la placa eléctrica, .o en estufa, a una temperatura comprendida entre 145 y 160° C, No debe mantenerse el betún

a esta temperatura más de una hora y no debe emplearse betún recalentado. El betún dentro del recipiente se agita frecuentemente para evitar los sobrecalentamientos locales.

Se tara el recipiente donde se va a efectuar la mezcla y se pesan en él las fracciones correspondientes de cada árido, previamente determinadas, necesarias para fabricar una probeta, empleando el método acumulativo.

Se agita la mezcla de áridos y se forma un cráter en el centro. Se añade entonces la cantidad necesaria de betún. En este momento la temperatura de los áridos debe estar comprendida entre 140 y 155° C. y en todo caso ser algo inferior a la del betún.

Se mezclan vigorosamente los áridos con el betún, bien mecánicamente o a mano, tan rápidamente como sea posible. una vez conseguida una distribución uniforme del betún se añade el peso necesario de filler sin calentar y se sigue agitando hasta conseguir una mezcla de composición homogénea.

Al terminar la operación de mezclado, la temperatura de la mezcla dispuesta para la compactación no debe ser inferior a 110° C. En caso de ser más baja se desecha la amasada. Con objeto de obtener resultados más uniformes, y sobre todo en el proyecto de dosificaciones, es conveniente mantener lo más exactamente posible una misma temperatura de la mezcla (125 + 5° C,) para las distintas amasadas, en el momento de la compactación (ASTM D 1559).

2.5.2.2 Compactación de la probeta

Antes de preparar la mezcla el conjunto del molde y la base de la masa de compactación se limpian y se calientan a una temperatura entre 100 y 150 C., colocándolos sobre una placa eléctrica, en una estufa o bien sumergiéndolos en un baño de agua hirviendo.

Colocado el molde de compactación caliente sobre la mesa de trabajo, se coloca un disco de papel -de filtro o de estroza de 10 cm. de diámetro sobre la superficie de la base del molde.

Se echa entonces dentro del molde la mezcla recién amasada, a la temperatura correcta, por medio de un cogedor curvo, evitando las segregaciones de material y distribuyendo

bien la mezcla dentro del molde por medio de una espátula, dando al final una forma redondeada a la superficie.

Se traslada el molde con la mezcla a la base de compactación y se le aplica el número de golpes especificado con la masa. Hay que procurar que la base del molde y la de la maza se mantengan paralelas mientras se aplican los golpes, para lo cual la varilla guía debe mantenerse vertical.

Después de apisonar la primera cara se desmonta el collar, se invierte el molde con la probeta, se vuelve a poner el collar y se aplican.

Normalmente se aplican 50 golpes por cada cara en la compactación de mezclas proyectadas para tráfico con 7,5 kg/cm² de presión en los neumáticos y 75 golpes por cada cara cuando la presión es de 15 kg/cm².

Terminada la compactación, se desmonta el collar y la base y se sumerge el molde con la probeta en un cubo con agua fría, por lo menos durante dos minutos, una vez fría, se saca la probeta del molde por medio del extractor en la prensa y se colocan cuidadosamente sobre una superficie plana hasta que se ensayen, marcándolas para su identificación (ASTM D 1559).

2.5.2.3 Determinación de la estabilidad y la deformación

Después de haber determinado la densidad aparente de las probetas se realiza el ensayo de su estabilidad y deformación como sigue:

Se comprueba el cero del medidor de deformación, colocando en la mordaza de rotura un cilindro metálico o de madera de 101,6 mm. (4") e insertando el medidor de deformación sobre la varilla de guía. Este calibrado debe hacerse sobre la varilla guía marcada y con las señales de las mordazas de rotura coincidiendo.

Se sumergen las probetas en un baño de agua a 60,00 C. \pm 0,5° C., durante un tiempo superior a veinte minutos -e inferior a treinta minutos. Para muestras con alquitrán el mismo tiempo a 37,8+1 0 C.

Se limpian perfectamente las superficies interiores de las mordazas de rotura y se engrasan las varillas de guía con una película de aceite de manera que la mordaza superior se deslice libremente.

Si se emplea anillo dinamométrico se comprueba que el cuadrante marque cero cuando el anillo está sin carga.

Se saca entonces la probeta del baño y se seca cuidadosamente su superficie con un paño. Se coloca centrada sobre la mordaza inferior, se monta entonces la mordaza superior y el conjunto se sitúa centrado en la prensa,

Se monta el medidor de deformación sobre la varilla guía marcada y se comprueba la lectura inicial.

Se aplica entonces la carga a la probeta a una velocidad de deformación constante de 50,8 mm. por minuto (2" [minuto) hasta que se produce la rotura; El punto de rotura viene definido por la carga máxima obtenida. Los kilos necesarios para producir la rotura de la probeta a 60 ° C. es el valor de la estabilidad Marshall (ASTM D 1559).

CAPÍTULO III

RELEVAMIENTO DE INFORMACIÓN

3.1. Introducción

En este capítulo se detallan las pruebas necesarias para llevar a cabo el diseño de la mezcla propuesta en el estudio. Estas pruebas se realizarán en muestras de material pétreo obtenidas en la posta municipal de Tarija. Asimismo, se llevarán a cabo los ensayos de caracterización del cemento asfáltico y del material propuesto para esta investigación. Por lo tanto, es esencial describir y mostrar los ensayos realizados durante el proceso de investigación.

El capítulo se divide principalmente en tres partes: la primera consiste en la descripción detallada del procedimiento para la caracterización de los materiales pétreos (grava de 3/4", gravilla de 3/8", arena y filler); la segunda parte aborda el análisis de la fibra de acero proveniente del reciclado de neumáticos; y finalmente, la tercera parte se enfoca en el análisis del cemento asfáltico.

3.2. Selección de materiales

Para este proyecto se emplearon materiales disponibles en el municipio de Tarija que cumplen con las normativas vigentes. En esta localidad, existen varias plantas clasificadoras de áridos de río; sin embargo, se priorizan los áridos utilizados por la alcaldía y aquellos que se emplean en proyectos de asfaltado para garantizar su calidad. Los áridos seleccionados provienen de materiales recolectados por la Alcaldía de Cercado, Tarija, en la posta municipal, y estos materiales se obtienen del banco de acopio de La Pintada.

La fibra de acero proveniente del reciclado de neumático fue proporcionada por la empresa recicladora INGOQUI, ubicada en la ciudad de Cochabamba, Bolivia.

3.2.1. Obtención del material pétreo y cemento asfáltico

Los materiales a utilizar deben cumplir ciertas especificaciones de las Normas ASTM y AASHTO, como se mencionó antes, se priorizan los áridos utilizados por la alcaldía y que se emplean en proyectos de asfaltos para garantizar su calidad.

Figura 3.1. Recolección del material



Fuente: Elaboración propia

Asimismo, el cemento asfáltico fue proporcionado en la misma posta municipal de Tarija. Este material, al igual que los áridos, cumple con las normativas vigentes y es esencial para garantizar la calidad y consistencia de la mezcla asfáltica empleada en el proyecto.

Figura 3.2. Recolección del cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia

3.2.2. Obtención de las fibras de acero proveniente del reciclado de neumático

Las fibras de acero, son un material que se obtiene de plantas recicladoras de neumáticos en desuso.

INGOQUI, una empresa boliviana ubicada en la ciudad de Cochabamba, se dedica a la reutilización de caucho y recicla aproximadamente 150 neumáticos al día. Esta empresa ha facilitado la provisión de las fibras de acero necesarias para el desarrollo de esta investigación, contribuyendo así al aprovechamiento de materiales reciclados y al avance del proyecto.

Figura 3.3. Fibras de Acero recicladas por INGOQUI



Fuente: Empresa Ingoqui

3.3. Ensayos de caracterización de agregados

3.3.1. Granulometría (AASHTO T – 27)

Este método define el procedimiento para tamizar y determinar la granulometría de los áridos. Es aplicable a los áridos utilizados en la fabricación de morteros, hormigones, tratamientos superficiales y mezclas asfálticas.

Para la granulometría del agregado grueso, se utilizó una muestra de 5000 gramos. Se realizaron tres ensayos para evaluar la homogeneidad del tamaño de las partículas y se calculó un promedio de los resultados obtenidos. En el caso de la arena, también se efectuaron tres ensayos, pero con muestras de 1000 gramos cada una.

Figura 3.4. Granulometría de los agregados (Grava (3/4”), gravilla (3/8”) y arena)



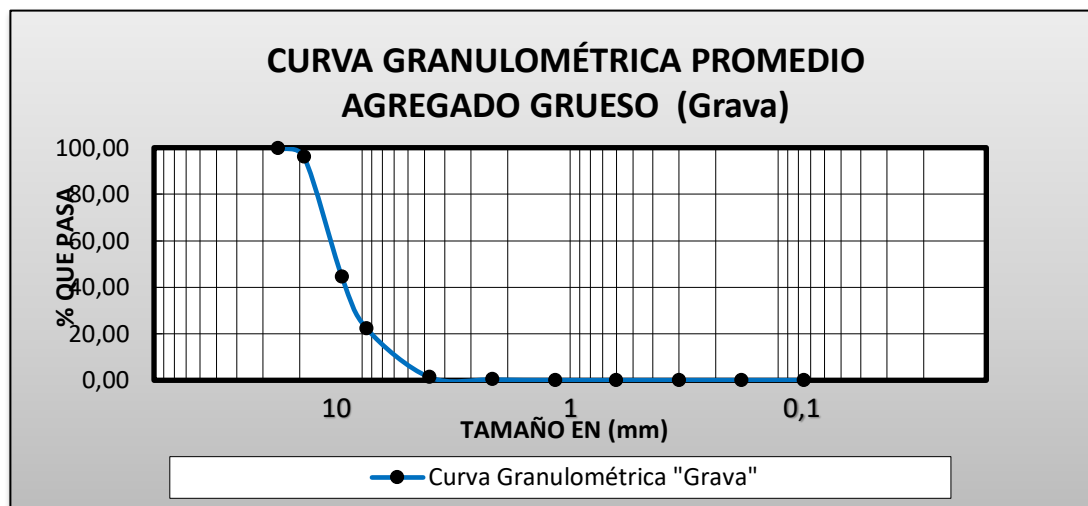
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.1 Granulometría grava

Peso Total (gr.)		5000							
		Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3		Promedio	
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	% que pasa del total	Peso Ret.	% que pasa del total	Peso Ret.	% que pasa del total	Peso Ret.	% que pasa del total
1"	25,4	0,00	100,00	53,30	98,93	0,00	100,00	17,77	99,64
3/4"	19,0	391,10	92,18	83,30	97,27	87,30	98,25	187,23	95,90
1/2"	12,5	2269,40	46,79	2698,70	43,29	2745,20	43,35	2571,10	44,48
3/8"	9,50	1204,70	22,70	1071,50	21,86	1064,30	22,06	1113,50	22,21
N°4	4,75	981,80	3,06	1074,30	0,38	1078,40	0,50	1044,83	1,31
N°8	2,36	123,10	0,60	11,10	0,16	20,00	0,10	51,40	0,28
N°16	1,18	29,70	0,00	6,60	0,02	3,30	0,03	13,20	0,02
N°30	0,60	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,03	0,00	0,02
N°50	0,30	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,03	0,00	0,02
N°100	0,15	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,03	0,00	0,02
N°200	0,075	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,03	0,00	0,02
BASE	-	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,03	0,00	0,02
SUMA		4999,8		4998,8		4998,50		4999,03	
PÉRDIDAS		0,2		1,2		1,50		0,97	

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.1 Curva Granulométrica grava



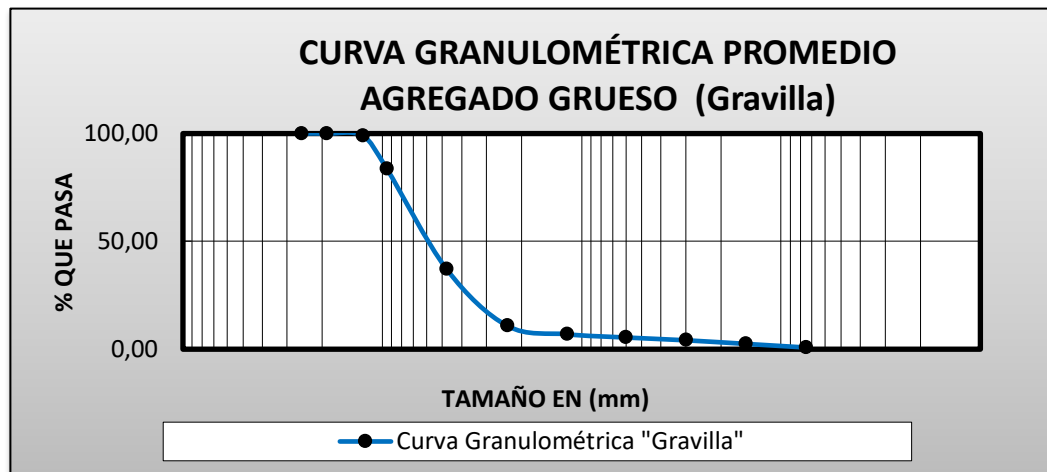
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.2 Granulometría gravilla

Peso Total (gr.)		5000							
		Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3		Promedio	
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	% que pasa del total	Peso Ret.	% que pasa del total	Peso Ret.	% que pasa del total	Peso Ret.	% que pasa del total
1"	25,4	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
3/4"	19,0	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
1/2"	12,5	51,80	98,96	46,30	99,07	49,80	99,00	49,30	99,01
3/8"	9,50	870,10	81,56	680,10	85,47	743,50	84,13	764,57	83,72
N°4	4,75	2458,50	32,39	2240,40	40,66	2303,80	38,06	2334,23	37,04
N°8	2,36	1292,60	6,54	1338,10	13,90	1301,30	12,03	1310,67	10,82
N°16	1,18	142,60	3,69	245,20	9,00	199,30	8,05	195,70	6,91
N°30	0,60	33,80	3,01	100,10	7,00	89,90	6,25	74,60	5,42
N°50	0,30	24,70	2,52	98,10	5,03	70,50	4,84	64,43	4,13
N°100	0,15	36,60	1,79	119,60	2,64	93,80	2,96	83,33	2,46
N°200	0,075	39,00	1,01	113,10	0,38	100,70	0,95	84,27	0,78
BASE	-	49,40	0,02	17,60	0,03	45,80	0,03	37,60	0,03
SUMA		4999,1		4998,6		4998,40		4998,70	
PÉRDIDAS		0,9		1,4		1,60		1,30	

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.2 Curva Granulométrica gravilla



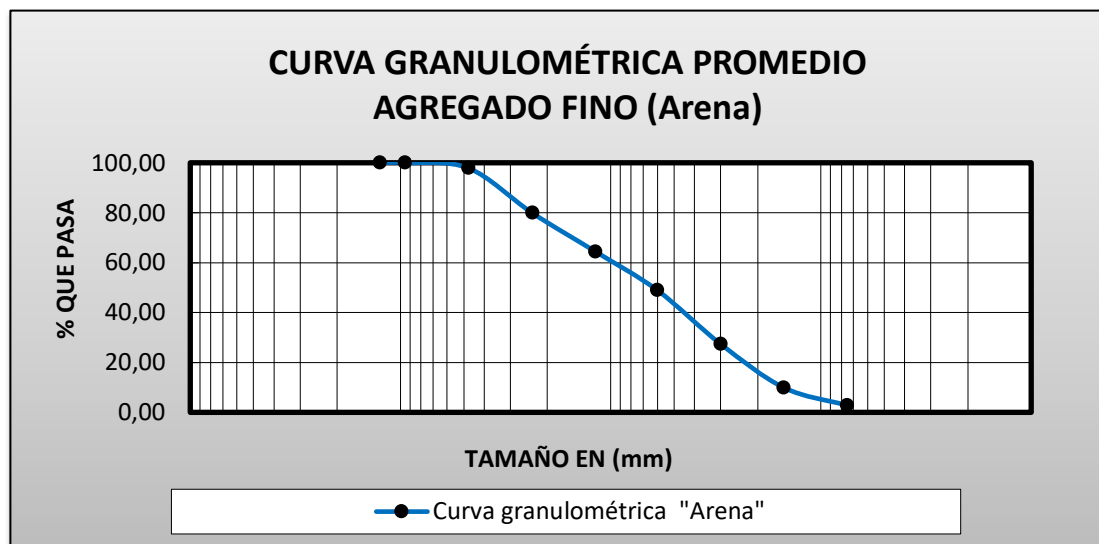
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.3 Granulometría agregado fino

Peso Total (gr.)		1000							
		Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3		Promedio	
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	% que pasa del total	Peso Ret.	% que pasa del total	Peso Ret.	% que pasa del total	Peso Ret.	% que pasa del total
1/2"	12,5	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
3/8"	9,50	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
N°4	4,75	23,10	97,69	15,80	98,42	25,20	97,48	21,37	97,86
N°8	2,36	196,00	78,09	148,20	83,60	195,60	77,92	179,93	79,87
N°16	1,18	163,00	61,79	139,50	69,65	162,40	61,68	154,97	64,37
N°30	0,60	154,20	46,37	158,20	53,83	151,30	46,55	154,57	48,92
N°50	0,30	207,80	25,59	231,60	30,67	206,80	25,87	215,40	27,38
N°100	0,15	162,80	9,31	197,20	10,95	164,50	9,42	174,83	9,89
N°200	0,075	64,90	2,82	81,20	2,83	66,80	2,74	70,97	2,80
BASE	-	27,68	0,05	27,90	0,04	26,80	0,06	27,46	0,05
SUMA		999,5		999,6		999,40		999,49	
PÉRDIDAS		0,5		0,4		0,60		0,51	

Fuente: Elaboración arena

Gráfico 3.3 Curva Granulométrica arena



Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Peso específico del agregado grueso (AASHTO T85-91)

Este método describe los procedimientos para calcular la densidad aparente de los áridos. Se aplica a los áridos utilizados en la preparación de morteros, hormigones, tratamientos superficiales y mezclas asfálticas.

Para determinar el peso específico del agregado grueso, se extrajo una muestra de 5000 gramos. Se llevaron a cabo tres ensayos específicos para gravas y gravillas.

El proceso para preparar los agregados gruesos mezclando completamente el material y luego cuarteándolo hasta obtener la cantidad mínima requerida para el ensayo. Después de este paso, la muestra se lava con agua para eliminar el polvo y otras impurezas adheridas a las partículas. Luego, se seca en un horno a una temperatura entre 100°C y 110°C y se enfría al aire durante 1 a 3 horas hasta alcanzar la temperatura ambiente. Después de enfriar, se pesa la muestra y se repite el proceso de secado hasta que el peso sea constante. Posteriormente, la muestra se sumerge en agua a temperatura ambiente durante 24 ± 4 horas. Después de este periodo, se retira del agua y se secan las partículas con un paño absorbente, asegurándose de eliminar cualquier agua superficial visible. Se determina entonces el peso de la muestra en estado saturado con superficie seca. A

continuación, se coloca la muestra en una canastilla metálica y se determina su peso sumergido en agua a temperatura de 25°C. Se procede a secar nuevamente la muestra en el horno, se enfría al aire y se determina el peso seco hasta que sea constante.

Resultado del ensayo peso específico (Grava)

Tabla 3.4 Peso específico de la grava

MUESTRA N°	PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm³)	PESO ESPECÍFICO SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm³)	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm³)	% DE ABSORCIÓN
1	2,61	2,64	2,69	1,16
2	2,60	2,63	2,68	1,13
3	2,61	2,64	2,70	1,19
PROMEDIO	2,61	2,64	2,69	1,16

Fuente: Elaboración propia

Resultado del ensayo peso específico (Gravilla)

Tabla 3.5 Peso específico de la gravilla

MUESTRA N°	PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm³)	PESO ESPECÍFICO SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm³)	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm³)	% DE ABSORCIÓN
1	2,58	2,63	2,72	2,00
2	2,56	2,61	2,69	1,90
3	2,58	2,63	2,71	1,80
PROMEDIO	2,57	2,62	2,71	1,90

Fuente: Elaboración propia

3.3.3. Peso específico del agregado fino (AASHTO T84-00)

Este método detalla los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua de los áridos finos. Es aplicable a áridos finos con una densidad neta entre 2.000 y 3.000 kg/m³, utilizados en la fabricación de hormigones y pavimentos asfálticos. Para calcular el peso específico del agregado fino, se tomó una muestra de 500 gramos y se realizaron tres ensayos.

Figura 3.5. Peso específico del agregado fino



Fuente: Elaboración propia

Resultado del ensayo peso específico (Arena)

Tabla 3.6 Peso específico de la gravilla

MUESTRA N°	PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm ³)	PESO ESPECÍFICO SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm ³)	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm ³)	% DE ABSORCIÓN
1	2,71	2,76	2,85	1,88
2	2,62	2,67	2,76	1,90
3	2,68	2,73	2,82	1,86
PROMEDIO	2,67	2,72	2,81	1,88

Fuente: Elaboración propia

3.3.4. Peso unitario agregado (Grava, Gravilla) y agregado fino (Arena), (AASHTO T-19) (ASTM C-29)

El peso unitario de unos áridos dados puede determinarse sobre volumen suelto o sobre volumen compactado. Para ellos se emplea un recipiente cilíndrico de volumen conocido.

Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en el método AASHTO T-19 y ASTM C-29

Figura 3.6. Peso Unitario compactado



Fuente: Elaboración propia

Resultado del ensayo peso unitario suelto y compactado (Grava)

Tabla 3.7 Peso unitario suelto y compactado (Grava)

MUESTRA N°	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm ³)	PESO UNITARIO COMPACTADO (gr/cm ³)
1	1,497	1,650
2	1,492	1,638
3	1,503	1,643
PROMEDIO	1,497	1,644

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.8 Peso unitario suelto y compactado (Gravilla)

MUESTRA N°	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm ³)	PESO UNITARIO COMPACTADO (gr/cm ³)
1	1,460	1,564
2	1,454	1,573
3	1,448	1,587
PROMEDIO	1,454	1,575

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.9 Peso unitario suelto y compactado (Arena)

MUESTRA N°	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm ³)	PESO UNITARIO COMPACTADO (gr/cm ³)
1	1,560	1,613
2	1,556	1,616
3	1,550	1,615
PROMEDIO	1,555	1,615

Fuente: Elaboración propia

3.3.5. Método para determinar el desgaste mediante la máquina de los ángeles (ASTM E 131, AASHTO T96-99)

Los agregados deben ser lo suficientemente resistentes para soportar los efectos del manipuleo durante su paso por la planta de asfalto, donde se producen choques entre granos y entre granos y componentes metálicos de la planta, así como los procesos de compactación durante la construcción y las cargas aplicadas por el tráfico. Estos efectos y esfuerzos pueden triturar y degradar las partículas, y la capacidad de un material para mantener su granulometría original ante estas condiciones se define como su resistencia.

Para medir la resistencia de los agregados a estos efectos y esfuerzos, se utiliza el ensayo de desgaste de Los Ángeles (DLA), normalizado por la ASTM bajo el número C-131. Este

ensayo evalúa básicamente la resistencia de los puntos de contacto de un agregado al desgaste y/o abrasión.

Figura 3.7. Realización del ensayo de desgaste de los Ángeles



Fuente: Elaboración propia

Para preparar la muestra de agregado grueso (grava) destinada al ensayo, se trabajó con una muestra de gradación B, según se detalla en las siguientes tablas. Para la carga abrasiva, se utilizó el método B, que emplea 11 esferas.

Para preparar la muestra de agregado grueso (gravilla) destinada al ensayo, se utilizó una muestra de gradación C, basada en las siguientes tablas. Para la carga abrasiva, se aplicó el método C, que requiere 8 esferas.

Tabla 3.10 Granulometría de la muestra de agregado para ensayo

Pasa tamiz		Retenido en tamiz		Peso y granulometría de la muestra para ensayo (g)			
mm	(alt)	mm	(alt)	A	B	C	D
37.5	(1 1/2 ")	-25,00	(1 ")	1.250 ± 25			
25	(1 ")	-19,00	(3/4")	1.250 ± 25			
19	(3/4")	-12.50	(1/2 ")	1.250 ± 10	2.500 ± 10		
12.5	(1/2 ")	-9.50	(3/8 ")	1.250 ± 10	2.500 ± 10		
9.5	(3/8 ")	-6.30	(1 1/4 ")			2.500 ± 10	
6.3	(1/4 ")	-4.75	(N°4)			2.500 ± 10	
4.75	(N°4)	-2.36	(N°8)				5.000 ± 10
Totales				5.000 ± 10	2.500 ± 10	5.000 ± 10	5.000 ± 10

Fuente: Elaboración propia

Resultado del agregado grueso triturado por la máquina de los ángeles (grava)

Tabla 3.11 % De desgaste Maquina de los ángeles (grava).

Gradación	Peso inicial	Peso final	% De desgaste	Especificación ASTM
B	5.000	3826	23,48	35% MAX

Fuente: Elaboración propia.

Resultado del agregado grueso triturado por la máquina de los ángeles (gravilla)

Tabla 3.12 % De desgaste Maquina de los ángeles (gravilla).

Gradación	Peso inicial	Peso final	% De desgaste	Especificación ASTM
C	5.000	3766,7	24,67	35% MAX

Fuente: Elaboración propia.

3.3.6. Porcentaje de caras fracturadas en los áridos

La muestra de ensayo debe ser representativa de la granulometría promedio del agregado y se obtendrá mediante un cuidadoso cuarteo del total de la muestra recibida. Luego, se realizará un análisis granulométrico de la muestra cuarteada.

A continuación, se separará por tamizado la fracción de la muestra que se encuentra entre los tamaños de 37,5 mm y 9,5 mm (1 1/2" y 3/8"), descartando el resto del material. El proceso se realiza en su mayoría de forma visual, separando según criterio.

Figura 3.8. % de caras fracturadas



Fuente: Elaboración propia

Resultado del Porcentaje de caras fracturadas (Gravas)

Tabla 3.13 Porcentaje de caras fracturadas (Gravas).

Ensayo	Lecturas	Lecturas	Lecturas	Lecturas
Ensayo N.º	1	2	3	PROMEDIO
Peso total (grs.) (a)	10000	10000	10000	10000
Peso retenido tamiz N°8 (grs.) (b)	9345,20	9324,20	9256,50	9308,63
Caras no fracturadas (grs.) (a-b)	654,80	675,80	743,50	691,37
% Caras Fracturadas = (b/a) *100	93,45	93,24	92,57	93,09

Resultado	93,09	>	75
-----------	-------	---	----

Fuente: Elaboración propia.

Resultado del Porcentaje de caras fracturadas (Gravillas)

Tabla 3.14 Porcentaje de caras fracturadas (Gravillas).

Ensayo	Lecturas	Lecturas	Lecturas	Lecturas
Ensayo N.º	1	2	3	Promedio
Peso total (grs.) (a)	5000	5000	5000	5000
Peso retenido tamiz N°8 (grs.) (b)	4653,20	4468,70	4458,90	4526,93
Caras no fracturadas (grs.) (a-b)	346,80	531,30	541,10	473,07
% Caras Fracturadas = (b/a) *100	93,06	89,37	89,18	90,54

Resultado	90,54	>	75
-----------	-------	---	----

Fuente: Elaboración propia.

3.3.7. Determinación de partículas alargadas y achatadas (ASTM D-4791)

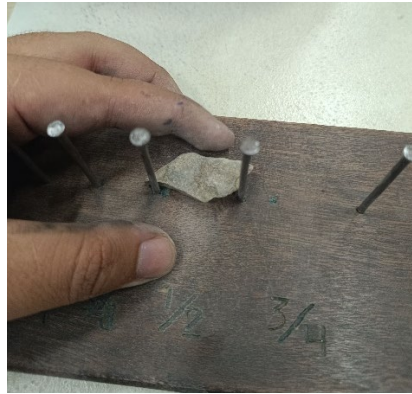
Este método describe el procedimiento para determinar los índices de aplanamiento y alargamiento de los áridos utilizados en la construcción de carreteras.

Según este método, el índice de aplanamiento de una fracción de árido se define como el porcentaje en peso de las partículas cuya dimensión mínima (espesor) es inferior a 3/5 de la dimensión media de la fracción.

El índice de alargamiento de una fracción de árido se define como el porcentaje en peso de las partículas cuya dimensión máxima (longitud) es superior a 9/5 de la dimensión media de la fracción.

Este método no se aplica a las fracciones de árido con tamaños inferiores a 6,3 mm (1/4").

Figura 3.9. Caras alargadas



Fuente: Elaboración propia

Resultado del Porcentaje de caras largas y achatadas (Gravas)

Tabla 3.15 Determinación de partículas largas y achatadas GRAVA 3/4".

Material	Peso Retenido (gr)	Peso Retenido Partículas Chatas Alargadas (gr)	% Retenido Partículas Chatas Alargadas
3/4"	5000	14,4	0,29
Peso Total de la Muestra	5.000		
(% Total de Partículas Laminares (Máximo 10%))			0,29

Fuente: Elaboración propia.

Resultado del Porcentaje de caras largas y achatadas (Gravillas)

Tabla 3.16 Determinación de partículas largas y achatadas GRAVILLA 3/8".

Material	Peso Retenido (gr)	Peso Retenido Partículas Chatas Alargadas (gr)	% Retenido Partículas Chatas Alargadas
3/8"	5000	255,1	5,10
Peso Total de la Muestra	5.000		
(% Total de Partículas Laminares (Máximo 10%))			5,10

Fuente: Elaboración propia.

3.3.8. Método para determinar el equivalente de arena (ASTM D 2419, AASHTO T176-00)

Este método proporciona un procedimiento rápido para determinar las proporciones relativas de finos plásticos o arcillosos en los áridos que pasan por el tamiz de 4,75 mm (N° 4). Es una prueba de laboratorio diseñada para determinar qué porcentaje de una muestra puede clasificarse como arena. De manera sencilla, se separan las partículas finas o polvos de las arenas mediante una solución química. Se considera que una arena es de excelente calidad si su equivalente es superior al 90%.

Figura 3.10. Enrasado de fino hasta la línea referencial



Fuente: Elaboración propia

Resultado del Porcentaje del ensayo equivalente de arena

Tabla 3.17 Resultado ensayo de equivalente de arena

N° de muestra	H1 (cm)	H2 (cm)	Equivalente de arena (%)
1	11,2	11,4	98,25
2	11,2	11,7	95,73
3	11,1	11,7	94,87
		Promedio	96,28

Fuente: Elaboración propia.

3.4. Ensayos de caracterización de las fibras de acero provenientes del reciclado de neumático

3.4.1. Propiedades visibles de las fibras de acero

Estas son las características observables a simple vista de las fibras de acero provenientes del reciclaje de neumáticos: color, superficie, flexibilidad e integridad.

Tabla 3.18 Propiedades visibles

Propiedades visibles	Descripción
Color	gris oscuro
Superficie	lisa
Flexibilidad	cierta flexibilidad
Integridad	presenta curvas

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2. Tamaño de las fibras de acero

Para determinar el diámetro y la longitud promedio de las fibras de acero, se llevó a cabo una medición manual utilizando una regla y un vernier. Se seleccionaron 30 muestras diferentes de fibras de acero y se midieron individualmente. Estas mediciones permitieron obtener datos precisos sobre las dimensiones promedio de las fibras, fundamentales para evaluar su aplicabilidad y comportamiento en diversas aplicaciones.

Resultados de la medición del diámetro promedio

Tabla 3.19 Diámetro promedio

N° Muestras	Diámetro Promedio (mm)
30	0,24

Fuente: Elaboración propia.

Resultados de la longitud promedio

Tabla 3.20 Longitud promedio

N° Muestras	Longitud Promedio (mm)
30	3,18

Fuente: Elaboración propia.

3.5. Ensayos de caracterización del cemento asfáltico

3.5.1. Ensayo de penetración

Este método describe un procedimiento para determinar la dureza de materiales bituminosos sólidos y semisólidos mediante la penetración. La prueba de penetración se utiliza como una medida de consistencia, donde valores altos de penetración indican consistencias más blandas.

La penetración se define como la distancia, expresada en décimas de milímetro, que una aguja estándar penetra verticalmente en un material bajo condiciones específicas de carga, tiempo y temperatura. Normalmente, la prueba se realiza a 25 °C durante 5 segundos con una carga total de 100 gramos, incluida la aguja. Cuanto más suave sea el betún, mayor será el valor de penetración.

Para la caracterización del cemento asfáltico 85-100, se realizaron tres ensayos. Los equipos y procedimientos necesarios para llevar a cabo el ensayo de penetración están detalladamente descritos en las normas AASHTO T49-97 y ASTM D-5, que proporcionan una guía precisa para asegurar la consistencia y reproducibilidad de los resultados.

Resultados de la longitud promedio

Tabla 3.21 Punto de penetración

	Temperatura	Carga	Tiempo
Condiciones:	5 segundos	100 gr	25 °C
	1	2	3
Lecturas:	85	95	85
	87	88	95
	80	86	82
Penetración Promedio:	84	90	87
Penetración final:	87		

Fuente: Elaboración propia

El resultado final del punto de penetración del cemento asfáltico es el promedio de tres ensayos realizados, y cumple con el rango de 85 – 100, que le da el nombre al cemento

asfáltico. Este rango de penetración indica que el cemento asfáltico posee una consistencia adecuada para su uso en mezclas asfálticas.

3.5.2. Punto de inflamación mediante la copa abierta de Cleveland

El punto de inflamación de un ligante asfáltico es la temperatura más baja la cual se separan materiales volátiles de la muestra, y crean un “destello” en presencia de una llama abierta.

Se debe observar la temperatura a la cual ocurre este termómetro, teniendo en cuenta que la temperatura mínima es de 323 °C.

Resultado del ensayo punto de inflamación y combustión

Tabla 3.22 Punto de inflamación y combustión del cemento asfáltico

	1	2	3
Punto de inflamación °C:	230	240	232
Punto de combustión °C:	288	288	290
Promedio Punto de inflamación °C:	234		

Fuente: Elaboración propia

3.5.3. Ensayo para determinar la ductilidad

La ductilidad de un material bituminoso se mide como la longitud, en centímetros, a la cual una muestra se alarga antes de romperse. Esto ocurre cuando los dos extremos de una briqueta, hecha con la muestra, se traccionan a una velocidad y temperatura específicas. Este ensayo es crucial para evaluar la capacidad del material para soportar deformaciones sin fracturarse.

Los procedimientos y equipos necesarios para realizar este ensayo se describen detalladamente en los métodos AASHTO T 51-00 y ASTM D-113.

Tabla 3.23 Resultado del ensayo de ductilidad

	1	2	3
Elongación (cm):	104	103	102
Promedio (cm):	103		

Fuente: Elaboración propia

3.5.4. Ensayo peso específico del asfalto

Este método describe el procedimiento para determinar la densidad de los asfaltos utilizando un picnómetro a la temperatura requerida. La gravedad específica de una sustancia se refiere a la relación entre su peso en el aire a una temperatura determinada y el peso del mismo volumen de agua a 25°C. En otras palabras, la gravedad específica es la relación entre el peso de un volumen específico de material y el peso del mismo volumen de agua, ambos a una temperatura determinada. Por ejemplo, una gravedad específica de 1,05 significa que el material es 1,05 veces más pesado que el agua a la temperatura especificada.

Tabla 3.24 Resultado del ensayo de peso específico

	1	2	3
Peso del picnómetro (gr) (A):	36,2	34,5	32,7
Peso del picnómetro + agua destilada (gr) (B):	83,6	84,2	84,8
Peso del picnómetro + cemento asfáltico (gr) (C):	65,3	66,2	61,8
Peso del picnómetro + agua destilada + cemento asfáltico (gr) (D):	85,7	85,4	85,5
Densidad (kg/m ³):	1,075	1,036	1,022
Densidad promedio (kg/m ³):	1,044		

Fuente: Elaboración propia

3.5.5. Ensayo punto de ablandamiento

Este método describe un procedimiento para determinar el punto de ablandamiento de materiales asfálticos, cuyos valores se encuentran en el rango de 30 a 200°C, utilizando el aparato de anillo y bola.

El punto de ablandamiento se define como la temperatura promedio a la cual dos discos de asfalto se ablandan lo suficiente para permitir que cada bola, cubierta con aglutinante bituminoso, descienda una altura de $25 \pm 0,4$ mm.

Figura 3.11. Muestra con cemento asfáltico y agua destilada



Fuente: Elaboración propia

Resultado del ensayo Punto de ablandamiento

Tabla 3.25 Punto de ablandamiento.

	1	2
Temperatura °C:	47,5	48,00
Promedio (°C):	48,00	

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV

DISEÑO, EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Diseño por el método Marshall para el contenido óptimo

Se realizaron las dosificaciones de los porcentajes de cada agregado de manera que se cumpliera con las especificaciones, determinando así la granulometría de la mezcla asfáltica convencional 85/100. Estas dosificaciones se desarrollaron en los laboratorios de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho. Se estableció que la mezcla de agregados está compuesta por un 41% de arena, un 27% de grava de 3/4", un 29% de gravilla de 3/8" y 3% de filler para la granulometría de la mezcla, cumpliendo con las especificaciones del manual de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC).

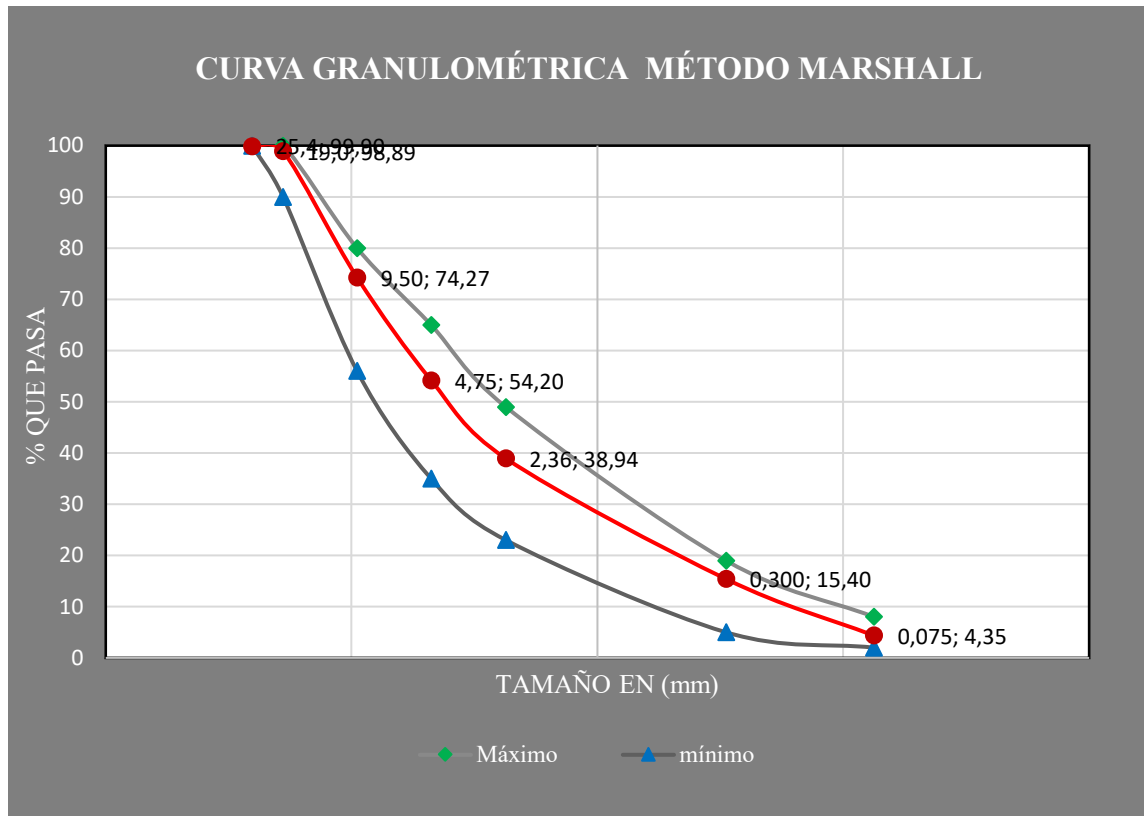
A continuación, se mostrarán los pesos para la dosificación con los porcentajes establecidos que cumplen con la granulometría de 3/4" de tamaño máximo nominal con un 4 a 10% de vacíos.

Tabla 4.1 Diseño granulométrico

Tamices	tamaño (mm)	DOSIFICACIÓN				CURVA DE DOSIFICACIÓN		Especificaciones	
		Grava (%)	Gravilla (%)	Arena (%)	Filler (%)	% Ret	% que pasa del total	ASTM D3515	
		27,00	29,00	41,00	3,00			Mínimo	Máximo
1"	25,4	4,80	0,00	0,00	0,00	0,10	99,90	100	100
3/4"	19,0	50,55	0,00	0,00	0,00	1,11	98,89	90	100
1/2"	12,5	694,20	14,30	0,00	0,00	15,28	84,72	-	-
3/8"	9,50	300,65	221,72	0,00	0,00	25,73	74,27	56	80
Nº4	4,75	282,11	676,93	43,80	0,00	45,80	54,20	35	65
Nº8	2,36	13,88	380,09	368,86	0,00	61,06	38,94	23	49
Nº16	1,18	3,56	56,75	317,68	0,00	68,62	31,38	-	-
Nº30	0,60	0,00	21,63	316,86	0,00	75,39	24,61	-	-
Nº50	0,30	0,00	18,69	441,57	0,00	84,60	15,40	5	19
Nº100	0,15	0,00	24,17	358,41	0,00	92,26	7,74	-	-
Nº200	0,075	0,00	24,44	145,48	0,00	95,65	4,35	2	8
BASE	-	0,00	10,90	56,29	150,00	100,00	0,00	-	-
	PESO TOTAL	1349,74	1449,62	2048,96	150,00				

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.1 Curva granulométrica de la mezcla según diseño Marshall



Fuente: Elaboración propia

Contenido mínimo de cemento asfáltico

Con la granulometría de los agregados se determinó el porcentaje mínimo de cemento asfáltico, donde se utilizó el método basado en la distribución de tamaño de partículas:

$$P = 0,020*a + 0,045*b + c*d$$

Donde:

a = Porcentaje de material retenido en la malla N°10

b = Porcentaje que pasa malla N°10 y se retiene en N°200

c = Porcentaje que pasa malla N°200

d = Coeficiente asfáltico según el tipo de material

Tabla 4.2 Índice asfáltico

Material pétreo	Índice asfáltico
Gravas y arenas redondeadas de baja absorción	0,15
Gravas angulosas trituradas de baja absorción	0,20
Gravas angulosas o redondeadas de mediana absorción	0,30
Gravas trituradas de alta absorción	0,35

Fuente: Elaboración propia

Nos da como resultado:

$$P = 4,18$$

Pero adoptamos

$$P = 4,20 \%$$

El resultado fue un porcentaje mínimo de contenido de cemento asfáltico del 4,20%. A partir de este valor, se resta un 1% para el primer porcentaje y, para los siguientes, se suma un 0,5%, respecto del contenido mínimo calculado. De esta manera, se determinan seis porcentajes con diferentes contenidos de cementos asfálticos para obtener el contenido óptimo de cemento asfáltico. Estos porcentajes se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4.3 Variaciones del porcentaje de asfalto para el porcentaje óptimo.

Porcentaje de cemento asfáltico (%)	Numero de briquetas
3,2	3
4,2	3
4,7	3
5,2	3
5,7	3
6,2	3

Fuente: Elaboración propia.

Una vez determinado los porcentajes de agregado de la mezcla, se procede a calcular las cantidades de cada uno de sus componentes, las cantidades utilizadas para la dosificación se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 4.4 Dosificación para el contenido óptimo del asfalto 85/100

Porcentaje de Cemento asfáltico (%)	3,2%	4,2%	4,7%	5,2%	5,7%	6,2%
Porcentaje de Agregado (%)	96,80%	95,80%	95,30%	94,80%	94,30%	93,80%
Peso del Cemento Asfáltico (gr) *	38,40	50,40	56,40	62,40	68,40	74,40
Peso de Grava (gr) *	313,63	310,39	308,77	307,15	305,53	303,91
Peso de Gravilla (gr) *	336,86	333,38	331,64	329,90	328,16	326,42
Peso de Arena (gr) *	476,26	471,34	468,88	466,42	463,96	461,50
Peso de Filler (gr) *	34,85	34,49	34,31	34,13	33,95	33,77
Peso total de la briqueta (gr) *	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

Se elaboraron 18 briquetas con los porcentajes obtenidos. Asimismo, se ajustó el porcentaje de agregados en la mezcla, utilizando los mismos porcentajes para ambos tipos de asfalto, dado que en ambas mezclas se emplea el mismo agregado.

Tabla 4.5 Planilla de criterios de diseño Marshall

Método Marshall	Tráfico ligero		Tráfico medio		Tráfico pesado	
	Carpeta y base		Carpeta y base		Carpeta y base	
Criterio de mezcla	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.
Compactación, número de golpes en cada uno de los especímenes	35		50		75	
Estabilidad (N)	3336	-	5338	-	8006	-
(lb)	750	-	1200	-	1800	-
Flujo (0,25 mm) (0,01")	8	18	8	16	8	14
Porcentaje de vacíos	3	5	3	5	3	5
Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto	70	80	65	78	65	75

Fuente: Criterios del instituto del asfalto USA para el diseño Marshall

4.2. Desarrollo de la elaboración de briquetas

Equipo y material usado:

- Martillo de compactación.
- Moldes de briquetas.
- Extractor de probetas.
- Balanza de precisión
- Bandejas metálicas.
- Estufa.
- Termómetro.
- Espátula.
- Medidor de estabilidad.
- Agregado.
- Cemento asfáltico.

A continuación, se detalla los pasos que se sigue para realizar las briquetas, estos pasos son iguales tanto para las mezclas asfálticas convencionales y nuestra mezcla asfáltica modificada con fibra de acero.

Paso 1: Para preparar la mezcla asfáltica, lo primero que se debe hacer es pesar el agregado según la dosificación detallada antes para cada agregado, las fibras de acero y el porcentaje de cemento asfáltico que se utilizará.

Paso 2: Una vez preparado el material, es necesario preparar los equipos e instrumentos que se utilizarán. En este caso, se requiere que los anillos estén limpios y calentados previamente. Además, la base del martillo también debe estar caliente para asegurar una correcta compactación de las briquetas.

Paso 3: Teniendo el material y equipo listo se debe proceder a la dosificación de la mezcla. En un recipiente añadir los agregados, cemento asfáltico, fibras de acero y ponerlo a fuego lento para que adquiriera temperatura. Se debe mezclar con la ayuda de una cuchara hasta se obtenga una buena adherencia en la mezcla, controlando que la temperatura que no suba de los 170 °C.

Paso 4: Una vez que se obtenga la mezcla, se debe verter dentro del molde para su compactación. La compactación se realiza introduciendo la mezcla en el anillo, el cual debe estar cubierto con un papel filtro para evitar que la mezcla se adhiera al martillo. Se aplican 75 golpes por cada cara del anillo.

Paso 5: El desmoldado de las briquetas se realiza utilizando una prensa tipo gata. Este proceso implica colocar el molde con la briketa compactada en la prensa y aplicar una presión controlada para liberar la briketa del molde sin dañarla.

Paso 6: A las 24 horas de haber compactado las briquetas, y antes de introducirlas en el equipo Marshall, deben ser procesadas. Esto incluye medirlas, limpiarlas y pesarlas. Luego, se deben sumergir en un recipiente con agua a 25°C durante 10 minutos.

Después de los 10 minutos, las briquetas deben ser pesadas tanto sumergidas en agua como secas superficialmente. Una vez completados estos pasos, se sumergen nuevamente en agua a 60°C durante media hora antes de ser llevadas al equipo Marshall donde se realizará la ruptura de las briquetas.

Figura 4.1. Ruptura de briketa en ensayo Marshall



Fuente: Elaboración propia

4.3. Resultados de la mezcla asfáltica convencional

Tabla 4.6 Resultados del ensayo Marshall

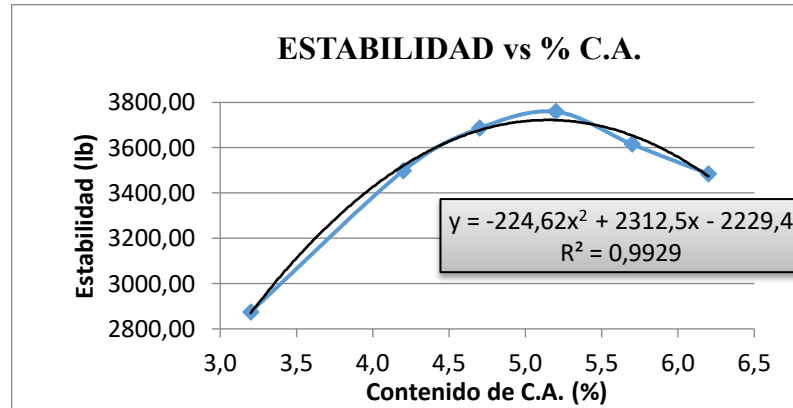
N° de probeta	% de Asfalto		altura promedio de probeta	Densidad Briqueta		% de Vacíos			Estabilidad Marshall	Fluencia
	base Mezcla	base Agregados		densidad real	Densidad promedio	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)	Estabilidad promedio	Fluencia promedio
1	3,20	3,31	6,540	2,50	2,41	7,79	15,18	48,65	2875,30	17,00
2			6,650	2,38						
3			6,520	2,35						
4	4,20	4,38	6,010	2,34	2,42	5,89	15,62	62,28	3498,55	15,67
5			5,910	2,49						
6			6,490	2,42						
7	4,70	4,93	6,370	2,47	2,43	4,80	15,73	69,45	3685,93	15,33
8			6,470	2,38						
9			6,510	2,42						
10	5,20	5,49	6,430	2,44	2,42	4,31	16,35	73,65	3758,98	15,33
11			6,310	2,40						
12			6,340	2,41						
13	5,70	6,04	6,490	2,41	2,41	3,76	16,93	77,77	3615,10	16,33
14			6,330	2,44						
15			6,370	2,39						
16	6,20	6,61	6,260	2,29	2,39	3,78	17,98	78,97	3484,53	17,00
17			6,330	2,46						
18			6,380	2,43						
ESPECIFICACIONES			mínimo			3	13	65	1800	8
			máximo			5	-	75	-	16

Fuente: Elaboración propia

Obteniendo todos estos valores se procede a realizar las gráficas que detallen las curvas

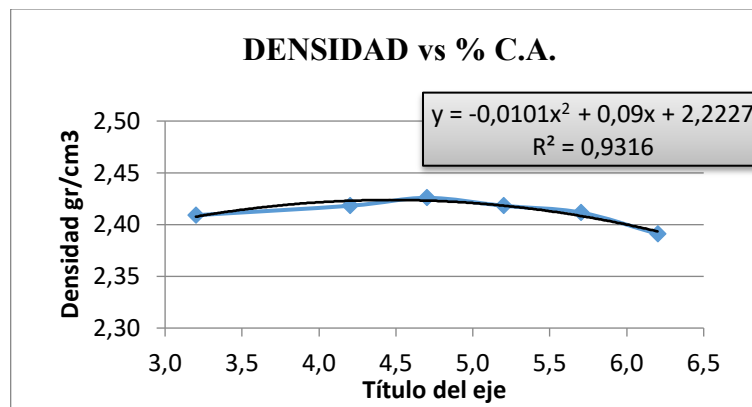
- Porcentaje de asfalto vs densidad de la probeta
- Porcentaje de asfalto vs porcentaje de vacíos en aire con respecto a la mezcla total
- Porcentaje de asfalto vs vacíos de agregado mineral (VAM)
- Porcentaje de asfalto vs porcentaje de vacíos llenos de asfaltos (RBV)
- Porcentaje de asfalto vs estabilidad corregida
- Porcentaje de asfalto vs fluencia (flujo)

Gráfico 4.2 Porcentaje de asfalto vs estabilidad corregida



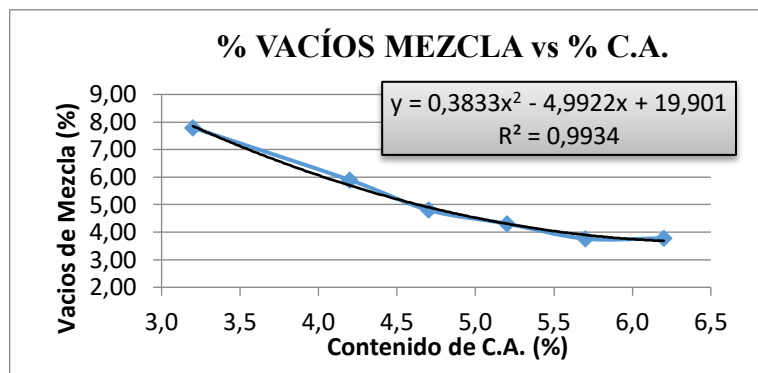
- Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.3 Porcentaje de asfalto vs densidad de la probeta



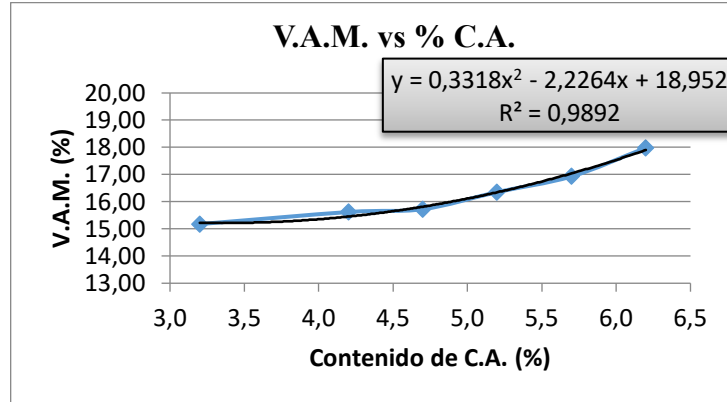
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.4 Porcentaje de asfalto vs porcentaje de vacíos en aire de la mezcla



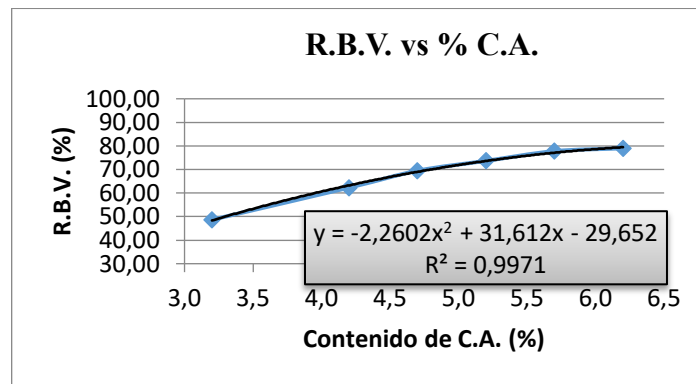
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.5 Porcentaje de asfalto vs vacíos de agregado mineral (VAM)



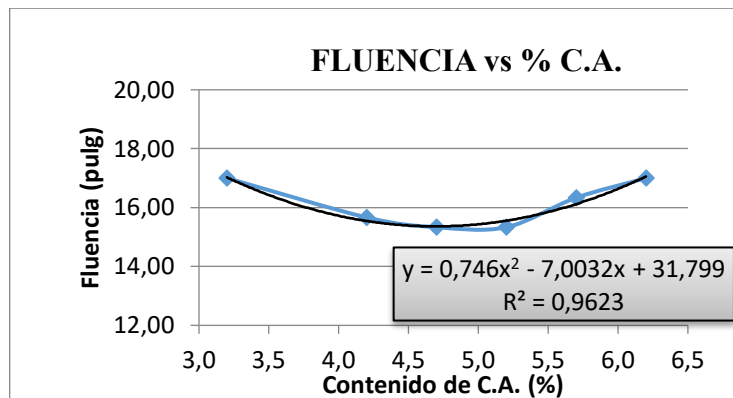
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.6 Porcentaje de asfalto vs porcentaje de vacíos lleno de asfalto (RBV)



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.7 Porcentaje de asfalto vs fluencia (flujo)



Fuente: Elaboración propia

4.4. Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico

De acuerdo a las gráficas obtenidas se tiene:

Tabla 4.7 Resultados del diseño óptimo de la mezcla convencional

DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO	Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
	Estabilidad Marshall (Lb)	3722,49	5,15
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2,42	4,46
	Vacios de la mezcla (%)	4,00	5,55
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%) =	5,05

Fuente: Fuente propia

Mediante las ecuaciones formadas en las gráficas, es posible obtener el valor de los resultados del ensayo, puesto que la variable x el porcentaje óptimo de cemento asfáltico.

Tabla 4.8 Resultados al porcentaje óptimo de cemento asfáltico convencional

Ensayo	Valor	Unidades	Rango	
			min	máx.
Densidad	2,41	gr/cm ³	-	-
Estabilidad	3720,35	lb	1800	-
Fluencia	15,45	pulg	8	16
V.A.M	16,17	%	13	-
R.B.V	72,35	%	65	75
% Vacios mezcla	4,47	%	3	5

Fuente: Fuente propia

4.5. Procedimiento Marshall preliminar a briquetas con adición de fibras de acero proveniente del reciclado de neumático

El procedimiento es prácticamente el mismo que para la mezcla asfáltica convencional, con la diferencia de que se agrega fibra de acero a la mezcla. Para ello, partiremos del cemento asfáltico óptimo del 5,05% y variaremos el porcentaje de fibras de acero junto con los agregados. Utilizaremos los siguientes porcentajes de fibra de acero en la mezcla asfáltica: 0,25%, 0,5%, 0,75%, 1%, 2% y 5%.

Se lleva a cabo un procedimiento preliminar debido a que aún no se conoce con precisión el comportamiento de la fibra de acero en la mezcla asfáltica. Esto permitirá, al clasificar las fibras de acero por tamaño, contar con una base sólida para diseñar de manera óptima el procedimiento del método Marshall, teniendo una idea clara de cómo influyen las fibras en la mezcla.

4.5.1. Dosificación de briquetas preliminares modificadas con la adición de fibras de acero recicladas de neumáticos

Tabla 4.9 Dosificación para mezcla asfáltica modificada

Fibras de acero (%)	0,25%	0,50%	0,75%	1,00%	2,00%	5,00%
Porcentaje de Cemento asfáltico (%)	5,05%	5,05%	5,05%	5,05%	5,05%	5,05%
Porcentaje de Agregado (%)	94,70%	94,45%	94,20%	93,95%	92,95%	89,95%
Peso del Cemento Asfáltico (gr) *	60,60	60,60	60,60	60,60	60,60	60,60
Peso de Grava (gr) *	306,83	306,02	305,21	304,40	301,16	291,44
Peso de Gravilla (gr) *	329,56	328,69	327,82	326,95	323,47	313,03
Peso de Arena (gr) *	465,92	464,69	463,46	462,23	457,31	442,55
Peso de Filler (gr) *	34,09	34,00	33,91	33,82	33,46	32,38
Fibras de acero (gr) *	3,00	6,00	9,00	12,00	24,00	60,00
Peso total de la briketa (gr) *	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Fuente propia

4.5.2. Elaboración y ruptura de briquetas de mezcla modificada preliminar con la adición de fibras de acero proveniente del reciclado de neumático

Figura 4.2. Elaboración de briquetas con fibras de acero preliminares



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.3. Ruptura de briquetas con fibras de acero preliminar



Fuente: Elaboración propia

Durante el proceso de compactación, las briquetas con un 5% de fibra de acero resultaron ser un fracaso, ya que se desmoronaban después de la compactación. Este fenómeno se explicará con más detalle más adelante.

4.5.3. Resultados de la mezcla asfáltica preliminar modificado con fibras de acero proveniente del reciclado de neumático

Tabla 4.10 Resultado del ensayo Marshall para mezcla asfáltica con fibras de acero

N° de probeta	% de Asfalto		altura promedio de probeta	Densidad Briqueta		% de Vacíos			Estabilida	Fluenci	
	Fibra de Acero	base Mezcla		base Agregados	densidad real	Densidad promedio	% de vacíos	V.A.M. (vacíos)	R.B.V. (relación)	d Marshall	a
	%	%		%	grs/cm ³	grs/cm ³	%	%	%	libras	0,01 pulg
1	0,25	5,05	5,32	6,590	2,24	2,27	10,32	21,31	51,56	2450,77	15,33
2				6,150	2,30						
3				6,600	2,28						
4	0,5	5,05	5,32	6,670	2,24	2,24	11,74	22,56	47,95	1734,06	20,33
5				6,660	2,24						
6				6,640	2,23						
7	0,75	5,05	5,32	6,680	2,22	2,21	12,77	23,46	45,57	1518,90	22,00
8				6,610	2,25						
9				6,640	2,16						
10	1	5,05	5,32	6,620	2,22	2,21	12,60	23,31	45,95	1470,08	30,67
11				6,720	2,22						
12				6,630	2,21						
13	2	5,05	5,32	6,760	2,20	2,20	13,26	23,89	44,49	1401,64	31,33
14				6,550	2,20						
15				6,870	2,19						
ESPECIFICACIONES				mínimo		3	13	65	1800	8	
				máximo		5	-	75	-	16	

Fuente: Elaboración propia

En la tabla de resultados, se puede observar que las características de la mezcla asfáltica preliminar modificada con la adición de fibras de acero provenientes de neumáticos no cumplen con ningún rango especificado a partir del 0,5%.

Con un porcentaje de fibras de acero del 0,25%, solo se cumplen dos propiedades, que son precisamente las planteadas en la hipótesis. Por esta razón, se procederá a detallar y comparar estas dos propiedades: la estabilidad y la fluencia con las mezclas asfálticas convencionales en su porcentaje óptimo de cemento asfáltico.

4.5.4. Análisis de los resultados obtenidos del procedimiento Marshal preliminar

4.5.4.1 Briquetas con un 5% de fibra de acero proveniente del reciclado de neumático

Durante la investigación, se observó que al incluir un 5% de fibra de acero en la mezcla asfáltica, las briquetas se desmoronaban después de la compactación. Este comportamiento se debe a que el acero es liso y, al utilizarse en un porcentaje elevado, genera una resistencia a la compactación. La superficie lisa del acero impide una adecuada adherencia con el cemento asfáltico y los agregados, lo que resulta en una estructura interna débil. Al no poder compactarse adecuadamente y carecer de la cohesión necesaria, las briquetas se desintegran, comprometiendo así la integridad y las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica

Figura 4.4. Desmoronamiento de briqueta con 5% de fibras de acero

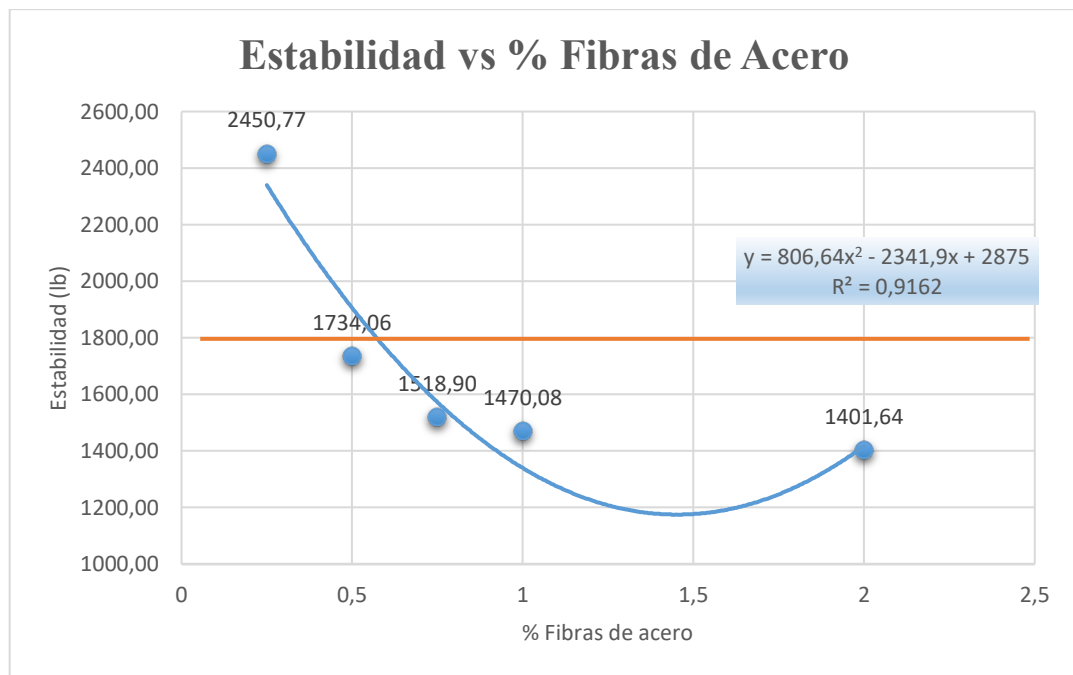


Fuente: Elaboración propia

También se observó que las fibras de acero, provenientes del reciclado de neumáticos, sobresalen de la estructura de la briqueta. Esta particularidad plantea preocupaciones adicionales, ya que sugiere que, en una aplicación práctica en carreteras, estas fibras podrían causar daños significativos a los vehículos, aumentando el riesgo de accidentes y afectando negativamente la seguridad vial.

4.5.4.2 Análisis de los resultados de estabilidad en la mezcla asfáltica modificada con adición de fibras de acero preliminar

Gráfico 4.8 Porcentaje de fibras de acero vs Estabilidad



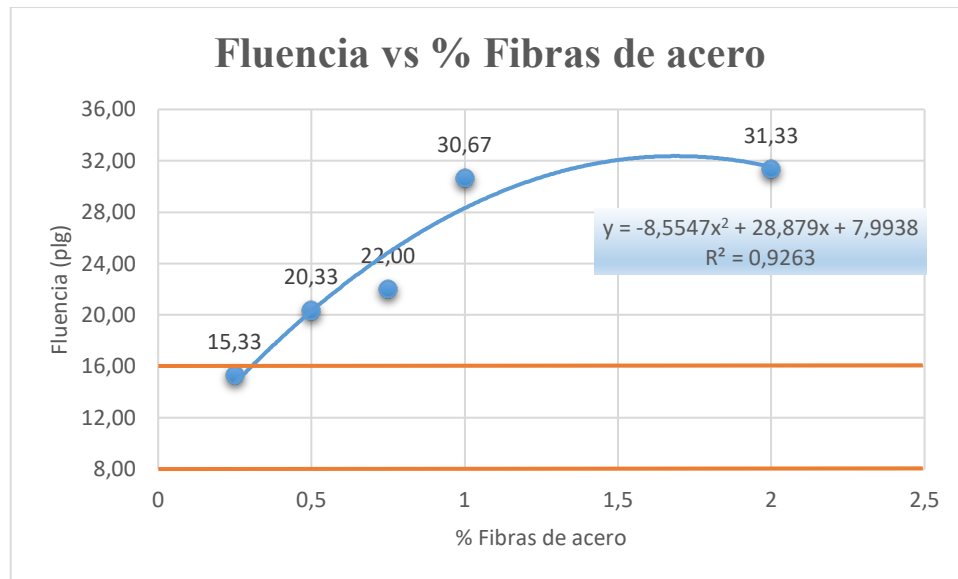
Fuente: Elaboración propia

Según las especificaciones, se establece un valor mínimo de estabilidad de 1800 lb. En este contexto, solo las briquetas con un 0,25% de fibras de acero cumplen con este requisito, mientras que las otras briquetas con diferentes porcentajes de fibra de acero proveniente del reciclado de neumático quedan por debajo de dicho umbral. Este resultado

sugiere que no se ajustan a la normativa y, por ende, no se consideran una opción viable para su aplicación en carreteras reales.

4.5.4.3 Análisis de los resultados de fluencia en la mezcla asfáltica modificada con adición de fibras de acero preliminar

Gráfico 4.9 Porcentaje de fibras de acero vs Fluencia

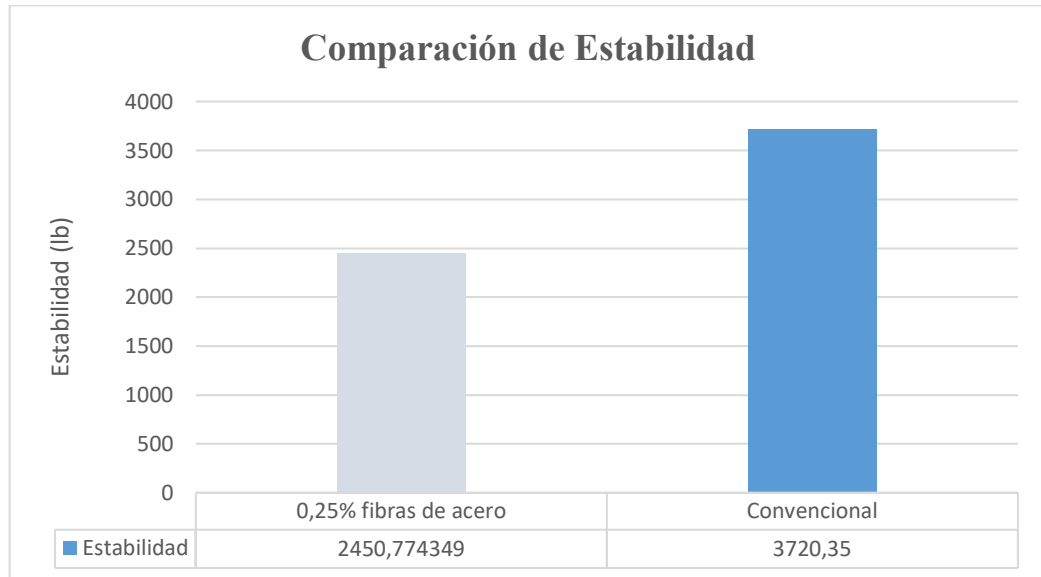


Fuente: Elaboración propia

Lo mismo ocurre con la fluencia, ya que solo las briquetas con un 0,25% de fibra de acero cumplen con los requisitos establecidos. A medida que se aumenta el porcentaje de fibra de acero, la deformidad aumenta, llegando a un punto donde ya no cumple con el rango deseado. La deformidad registrada con un porcentaje de 0,25% es de 15,33 pulgadas, un valor dentro del rango aceptable de 8 a 16 pulgadas. Este hallazgo subraya la importancia de mantener una proporción precisa de fibra de acero en la mezcla asfáltica para garantizar el cumplimiento de las normativas.

4.5.4.4 Comparación de estabilidad entre la mezcla asfáltica convencional y modificada preliminar

Gráfico 4.10 Comparación de estabilidad

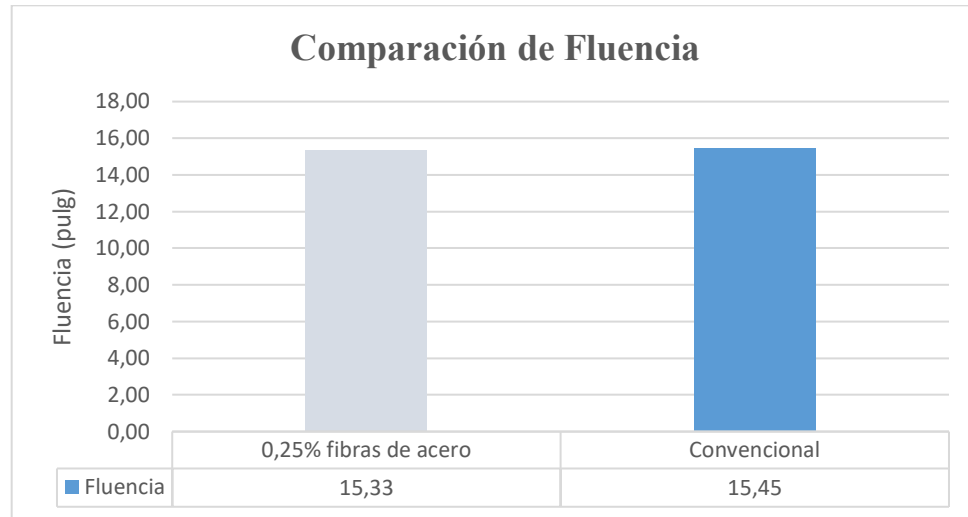


Fuente: Elaboración propia

En esta gráfica se puede observar claramente cómo la estabilidad registrada con un 0,25% de fibra de acero proveniente del reciclado de neumáticos es inferior a la de una mezcla asfáltica convencional. La mezcla asfáltica modificada preliminar tiene una reducción del 34.12% con respecto a la mezcla asfáltica convencional. Por consiguiente, podemos concluir que, aunque se cumpla con la normativa, la inclusión de fibra de acero no beneficia a las mezclas asfálticas; por el contrario, disminuye su estabilidad. Además, si el porcentaje de fibra de acero aumenta, la estabilidad se ve aún más comprometida, saliendo del rango permitido por la normativa. Este hallazgo destaca la importancia de evaluar minuciosamente el impacto de la fibra de acero en la estabilidad de las mezclas asfálticas.

4.5.4.5 Comparación de fluencia entre la mezcla asfáltica convencional y modificada preliminar

Gráfico 4.11 Comparación de fluencia



Fuente: Elaboración propia

En esta gráfica se evidencia que la fluencia registrada con un 0,25% de fibra de acero proveniente del reciclado de neumáticos es ligeramente mayor que la de una mezcla asfáltica convencional, concretamente una mejora del 0.77% con respecto de la mezcla asfáltica convencional, marcando 15.33 pulgadas, dentro del rango aceptable de 8 a 16 pulgadas. Sin embargo, al igual que en el caso anterior, esto se limita únicamente al porcentaje de 0,25%. Si el porcentaje de fibra de acero aumenta, la fluencia se compromete aún más, saliendo del rango permitido por la normativa. Esto sugiere que, aunque se cumpla con los requisitos establecidos, la adición de fibra de acero no contribuye significativamente a mejorar la fluencia de las mezclas asfálticas.

4.6 Identificación del rango de cemento asfáltico para mezclas modificadas con fibras

Observamos que la incorporación de fibras de acero a la mezcla asfáltica ha resultado perjudicial en términos de desempeño inicial. Sin embargo, aún no se ha evaluado el comportamiento de la mezcla con diferentes porcentajes de cemento asfáltico, lo que podría influir en los resultados. Por este motivo, se ha diseñado un estudio para determinar el rango óptimo de porcentajes de cemento asfáltico que se empleará en la etapa final del diseño de la mezcla asfáltica modificada. Esta mezcla contará con la adición de fibras de acero clasificadas en diferentes rangos de longitud, permitiendo un análisis más completo y preciso de su comportamiento en la mezcla.

4.6.1 Dosificación de briquetas para la obtención del rango de cemento asfáltico a utilizar

Tabla 4.11 Dosificación para mezcla asfáltica modificada

Fibra de acero (%)	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%
Porcentaje de Cemento asfáltico (%)	5,55%	6,05%	7,05%	8,05%	9,05%	10,05%
Porcentaje de Agregado (%)	94,20%	93,70%	92,70%	91,70%	90,70%	89,70%
Peso del Cemento Asfáltico (gr) *	66,60	72,60	84,60	96,60	108,60	120,60
Peso de Grava (gr) *	305,21	303,59	300,35	297,11	293,87	290,63
Peso de Gravilla (gr) *	327,82	326,08	322,60	319,12	315,64	312,16
Peso de Arena (gr) *	463,46	461,00	456,08	451,16	446,24	441,32
Peso de Filler (gr) *	33,91	33,73	33,37	33,01	32,65	32,29
Fibras de acero (gr) *	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Peso total de la briketa (gr) *	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Fuente propia

4.6.2 Resultados de la mezcla asfáltica para determinar el rango de cemento asfáltico a utilizar

Tabla 4.12 Resultado del ensayo Marshall para determinar cemento asfáltico

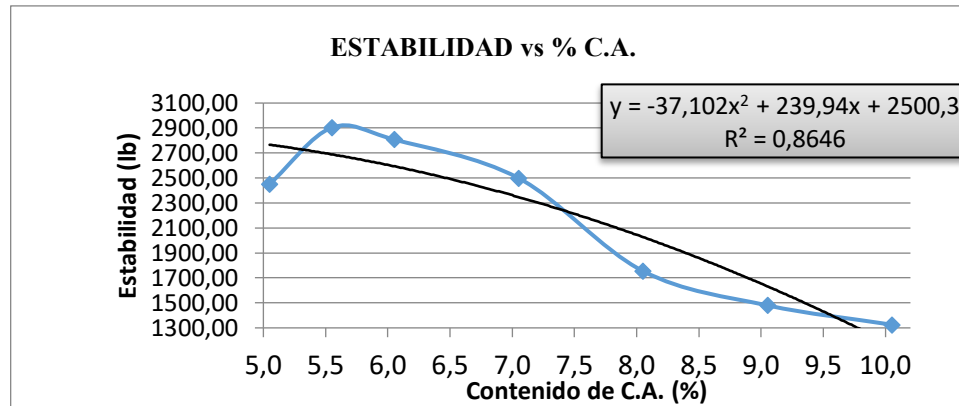
N° de probeta	% de Asfalto			altura promedio de probeta	Densidad Briqueta		% de Vacíos			Estabilidad Marshall	Fluencia
	Fibra de acero	base Mezcla	base Agregados		densidad real	Densidad promedio	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen)	Estabilidad promedio	Fluencia promedio
	%	%	%		grs/cm3	grs/cm3	%	%	%	libras	0,01 pulg
1	0,25	5,05	5,32	6,590	2,24	2,27	10,32	21,31	51,56	2450,77	15,33
2				6,150	2,30						
3				6,600	2,28						
4	0,25	5,55	5,88	6,320	2,12	2,13	15,21	26,53	42,68	2903,03	15,00
5				6,420	2,12						
6				6,450	2,15						
7	0,25	6,05	6,44	6,370	2,16	2,16	13,40	25,90	48,26	2808,14	15,33
8				6,390	2,14						
9				6,390	2,16						
10	0,25	7,05	7,58	6,270	2,16	2,16	11,77	26,37	55,36	2499,49	15,33
11				6,180	2,17						
12				6,190	2,15						
13	0,25	8,05	8,75	6,270	2,16	2,16	10,36	27,01	61,65	1754,90	17,33
14				6,190	2,17						
15				6,250	2,15						
16	0,25	9,05	9,95	6,180	2,13	2,12	10,28	28,70	64,17	1480,30	23,00
17				6,180	2,13						
18				5,980	2,11						
19	0,25	10,05	11,17	6,040	2,19	2,18	6,30	27,29	76,94	1325,38	25,00
20				6,080	2,20						
21				6,170	2,15						
ESPECIFICACIONES					mínimo		3	13	65	1800	8
					máximo		5	-	75	-	16

Fuente: Fuente propia

Tras la ruptura de las briquetas de mezclas asfálticas modificadas con diferentes porcentajes de cemento asfáltico, se observa que aumentar dicho porcentaje reduce significativamente los porcentajes de vacío en la mezcla, mejorando la relación entre el betún y los vacíos. Sin embargo, este incremento tiene un impacto negativo en los valores de estabilidad y fluencia, los cuales disminuyen considerablemente a medida que se aumenta el porcentaje de cemento asfáltico.

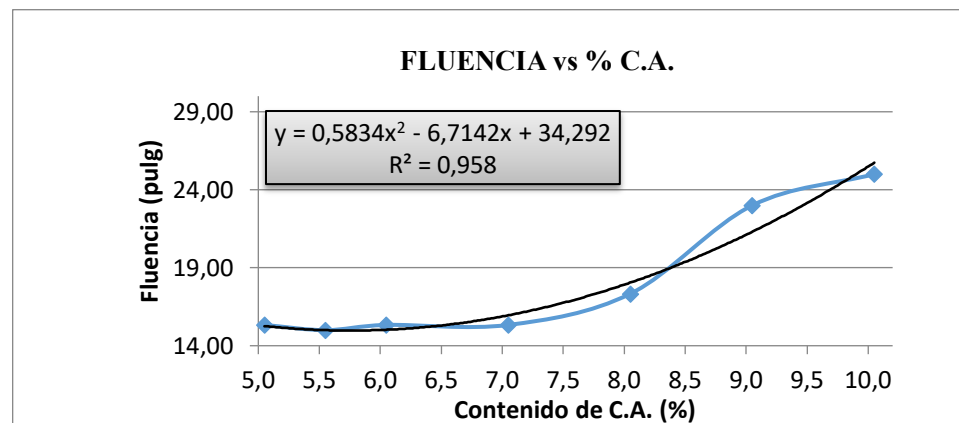
Dado este comportamiento, se tomará como criterio principal de selección la estabilidad y la fluencia para determinar los tres porcentajes óptimos de cemento asfáltico que serán utilizados en el diseño final de la mezcla modificada, la cual incluirá la adición de fibras de acero clasificadas según sus rangos de longitud. Este enfoque permitirá equilibrar el comportamiento mecánico de la mezcla con la inclusión de las fibras de acero.

Gráfico 4.12 Porcentaje de asfalto vs estabilidad



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.13 Porcentaje de asfalto vs fluencia



Fuente: Elaboración propia

Se observa que la mayor estabilidad se alcanza con un 5.55% de cemento asfáltico, y que la fluencia también presenta su mejor comportamiento en este mismo valor. Por lo tanto,

se han definido los siguientes rangos de porcentajes de cemento asfáltico para el diseño final que incluirá el uso de fibras de acero clasificadas por tamaño: 5.05%, 5.55% y 6.05%

4.7 Procedimiento Marshall a briquetas con adición de fibras de acero proveniente del reciclado de neumático clasificadas por su longitud

Conociendo que los rangos de trabajo serán del 5.05%, 5.55% y 6.05% de cemento asfáltico, se utilizarán proporciones de 0.25%, 0.5% y 1% de fibras de acero para las mezclas asfálticas, correspondientes a cada rango de longitud de las fibras de acero obtenidas del reciclaje de neumáticos.

4.7.1 Clasificación de las fibras de acero por su rango de longitud

Se clasificaron las fibras de acero en tres rangos de longitud: cortas (0-2 cm), medias (2-4 cm) y largas (4-6 cm). La clasificación se realizó de forma manual, una por una, lo que hizo que el proceso fuera muy largo y requiriera mucho cuidado para evitar mezclar los diferentes tamaños de las fibras. Durante la clasificación, se observó que no había muchas fibras en el rango de longitud larga, mientras que las más abundantes eran las de longitud media.

4.7.2 Dosificación de briquetas modificadas con la adición de fibras de acero recicladas de neumáticos clasificadas

Para cada rango de fibra de acero, se llevará a cabo una dosificación específica, adaptada a las características de las fibras clasificadas. En total, se elaborarán 27 briquetas para cada rango de longitud de las fibras: cortas (0-2 cm), medias (2-4 cm) y largas (4-6 cm). Estas briquetas se prepararán siguiendo los porcentajes de cemento asfáltico establecidos (5.05%, 5.55% y 6.05%), así como las diferentes proporciones de fibras de acero (0.25%, 0.5% y 1%), lo que resultará en una evaluación detallada de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas para cada combinación de longitud de fibra y porcentaje de asfalto.

4.7.2.1 Dosificación de briquetas modificadas con la adición de fibras de acero recicladas de neumáticos Cortas (0-2 cm)

Tabla 4.13 Dosificación para mezcla asfáltica modificada con fibras de acero cortas

Porcentaje de Cemento asfáltico (%)	0,25%	0,50%	1,00%	0,25%	0,50%	1,00%
Porcentaje de Cemento asfáltico (%)	5,05%	5,05%	5,05%	5,55%	5,55%	5,55%
Porcentaje de Agregado (%)	94,70%	94,45%	93,95%	94,20%	93,95%	93,45%
Peso del Cemento Asfáltico (gr) *	60,60	60,60	60,60	66,60	66,60	66,60
Peso de Grava (gr) *	306,83	306,02	304,40	305,21	304,40	302,78
Peso de Gravilla (gr) *	329,56	328,69	326,95	327,82	326,95	325,21
Peso de Arena (gr) *	465,92	464,69	462,23	463,46	462,23	459,77
Peso de Filler (gr) *	34,09	34,00	33,82	33,91	33,82	33,64
Fibras de acero (gr) *	3,00	6,00	12,00	3,00	6,00	12,00
Peso total de la briketa (gr) *	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Fuente propia

Tabla 4.14 Dosificación para mezcla asfáltica modificada con fibras de acero cortas

Fibra de Acero (%)	0,25%	0,50%	1,00%
Porcentaje de Cemento asfáltico (%)	6,05%	6,05%	6,05%
Porcentaje de Agregado (%)	93,70%	93,45%	92,95%
Peso del Cemento Asfáltico (gr) *	72,60	72,60	72,60
Peso de Grava (gr) *	303,59	302,78	301,16
Peso de Gravilla (gr) *	326,08	325,21	323,47
Peso de Arena (gr) *	461,00	459,77	457,31
Peso de Filler (gr) *	33,73	33,64	33,46
Fibras de acero (gr) *	3,00	6,00	12,00
Peso total de la briketa (gr) *	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Fuente propia

4.7.2.2 Dosificación de briquetas modificadas con la adición de fibras de acero recicladas de neumáticos Medianas (2-4 cm)

Tabla 4.15 Dosificación para mezcla asfáltica modificada con fibras de acero medianas

Porcentaje de Cemento asfáltico (%)	0,25%	0,50%	1,00%	0,25%	0,50%	1,00%
Porcentaje de Cemento asfáltico (%)	5,05%	5,05%	5,05%	5,55%	5,55%	5,55%
Porcentaje de Agregado (%)	94,70%	94,45%	93,95%	94,20%	93,95%	93,45%
Peso del Cemento Asfáltico (gr) *	60,60	60,60	60,60	66,60	66,60	66,60
Peso de Grava (gr) *	306,83	306,02	304,40	305,21	304,40	302,78
Peso de Gravilla (gr) *	329,56	328,69	326,95	327,82	326,95	325,21
Peso de Arena (gr) *	465,92	464,69	462,23	463,46	462,23	459,77
Peso de Filler (gr) *	34,09	34,00	33,82	33,91	33,82	33,64
Fibras de acero (gr) *	3,00	6,00	12,00	3,00	6,00	12,00
Peso total de la briketa (gr) *	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Fuente propia

Tabla 4.16 Dosificación para mezcla asfáltica modificada con fibras de acero medianas

Fibra de Acero (%)	0,25%	0,50%	1,00%
Porcentaje de Cemento asfáltico (%)	6,05%	6,05%	6,05%
Porcentaje de Agregado (%)	93,70%	93,45%	92,95%
Peso del Cemento Asfáltico (gr) *	72,60	72,60	72,60
Peso de Grava (gr) *	303,59	302,78	301,16
Peso de Gravilla (gr) *	326,08	325,21	323,47
Peso de Arena (gr) *	461,00	459,77	457,31
Peso de Filler (gr) *	33,73	33,64	33,46
Fibras de acero (gr) *	3,00	6,00	12,00
Peso total de la briketa (gr) *	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Fuente propia

4.7.2.3 Dosificación de briquetas modificadas con la adición de fibras de acero recicladas de neumáticos Largas (4-6 cm)

Tabla 4.17 Dosificación para mezcla asfáltica modificada con fibras de acero largas

Porcentaje de Cemento asfáltico (%)	0,25%	0,50%	1,00%	0,25%	0,50%	1,00%
Porcentaje de Cemento asfáltico (%)	5,05%	5,05%	5,05%	5,55%	5,55%	5,55%
Porcentaje de Agregado (%)	94,70%	94,45%	93,95%	94,20%	93,95%	93,45%
Peso del Cemento Asfáltico (gr) *	60,60	60,60	60,60	66,60	66,60	66,60
Peso de Grava (gr) *	306,83	306,02	304,40	305,21	304,40	302,78
Peso de Gravilla (gr) *	329,56	328,69	326,95	327,82	326,95	325,21
Peso de Arena (gr) *	465,92	464,69	462,23	463,46	462,23	459,77
Peso de Filler (gr) *	34,09	34,00	33,82	33,91	33,82	33,64
Fibras de acero (gr) *	3,00	6,00	12,00	3,00	6,00	12,00
Peso total de la briketa (gr) *	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Fuente propia

Tabla 4.18 Dosificación para mezcla asfáltica modificada con fibras de acero largas

Fibra de Acero (%)	0,25%	0,50%	1,00%
Porcentaje de Cemento asfáltico (%)	6,05%	6,05%	6,05%
Porcentaje de Agregado (%)	93,70%	93,45%	92,95%
Peso del Cemento Asfáltico (gr) *	72,60	72,60	72,60
Peso de Grava (gr) *	303,59	302,78	301,16
Peso de Gravilla (gr) *	326,08	325,21	323,47
Peso de Arena (gr) *	461,00	459,77	457,31
Peso de Filler (gr) *	33,73	33,64	33,46
Fibras de acero (gr) *	3,00	6,00	12,00
Peso total de la briketa (gr) *	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Fuente propia

4.7.3 Ruptura de briquetas modificadas con la adición de fibras de acero recicladas de neumáticos clasificadas

Al realizar la ruptura de las briquetas con fibras de acero cortas y medianas, el proceso se llevó a cabo de manera normal. Sin embargo, hubo problemas con las briquetas que contenían fibras de acero largas, ya que se desmoronaban al retirarlas del desmoldador. Solo fue posible analizar 6 de estas briquetas, específicamente las que contenían el 0.25% de fibra de acero.

Figura 4.5. Briquetas desmoronadas con fibras de acero recicladas largas



Fuente: Elaboración propia

4.7.4 Resultados de la mezcla asfáltica modificada con fibras de acero clasificada por rangos

A continuación, se presentarán los datos obtenidos durante la ruptura de las briquetas mediante el ensayo Marshall. En primer lugar, se mostrarán los resultados correspondientes a las briquetas con fibras de acero cortas, seguidas de las que contienen fibras de acero medianas, y finalmente, las que incluyen fibras de acero largas.

4.7.4.1 Resultados de la mezcla asfáltica modificada con fibras de acero cortas proveniente del reciclado de neumático

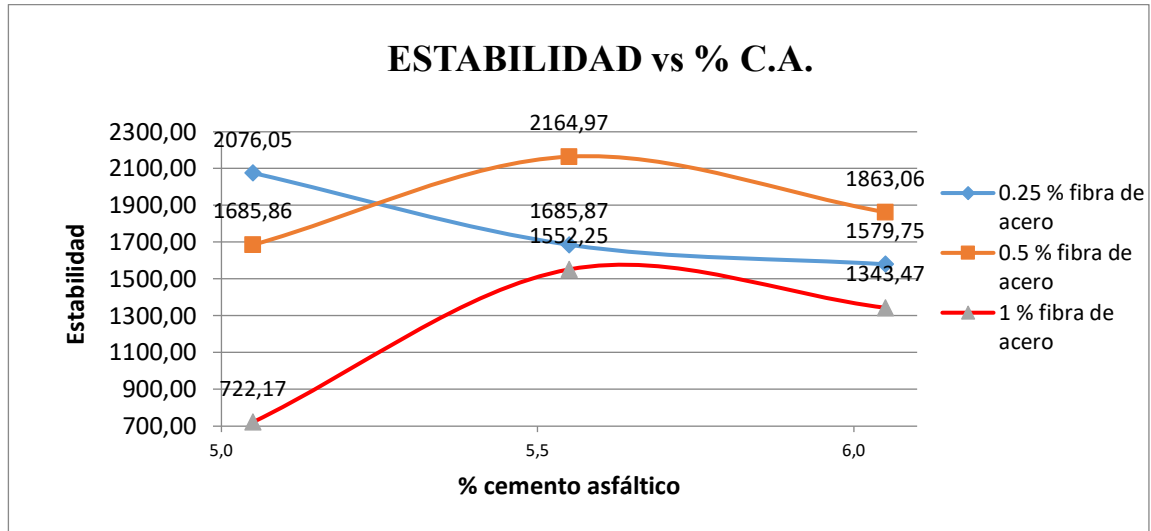
Tabla 4.19 Resultado del ensayo Marshall con fibras de acero cortas

N° de probeta	% de Asfalto			altura promedio de probeta	Densidad Briqueta		% de Vacíos			Estabilidad Marshall	Fluencia
	Fibra de acero	base Mezcla	base Agregados		densidad real	Densidad promedio	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)	Estabilidad promedio	Fluencia promedio
	%	%	%		grs/cm3	grs/cm3	%	%	%	libras	0,01 pulg
1				6,510	2,26						
2	0,25	5,05	5,32	6,450	2,23	2,25	11,35	22,21	48,91	2076,05	13,00
3				6,640	2,24						
4				6,500	2,23						
5	0,5	5,05	5,32	6,520	2,22	2,21	12,75	23,44	45,60	1685,86	13,67
6				6,740	2,18						
7				6,800	2,18						
8	1	5,05	5,32	6,910	2,16	2,15	15,17	25,57	40,65	722,17	16,33
9				6,990	2,11						
10				6,660	2,23						
11	0,25	5,55	5,88	6,620	2,22	2,19	12,95	24,57	47,32	1685,87	15,00
12				6,960	2,12						
13				6,440	2,30						
14	0,5	5,55	5,88	6,480	2,29	2,29	8,93	21,09	57,67	2164,97	14,67
15				6,450	2,27						
16				6,600	2,25						
17	1	5,55	5,88	6,530	2,26	2,26	10,17	22,17	54,11	1552,25	14,33
18				6,400	2,26						
19				6,530	2,28						
20	0,25	6,05	6,44	6,430	2,29	2,29	8,14	21,40	61,97	1579,75	14,67
21				6,350	2,30						
22				6,480	2,32						
23	0,5	6,05	6,44	6,580	2,27	2,29	8,09	21,36	62,13	1863,06	15,33
24				6,480	2,28						
25				5,930	2,32						
26	1	6,05	6,44	6,620	2,22	2,29	8,16	21,42	61,92	1343,47	14,00
27				6,470	2,32						
ESPECIFICACIONES					mínimo		3	13	65	1800	8
					máximo		5	-	75	-	16

Fuente: Fuente propia

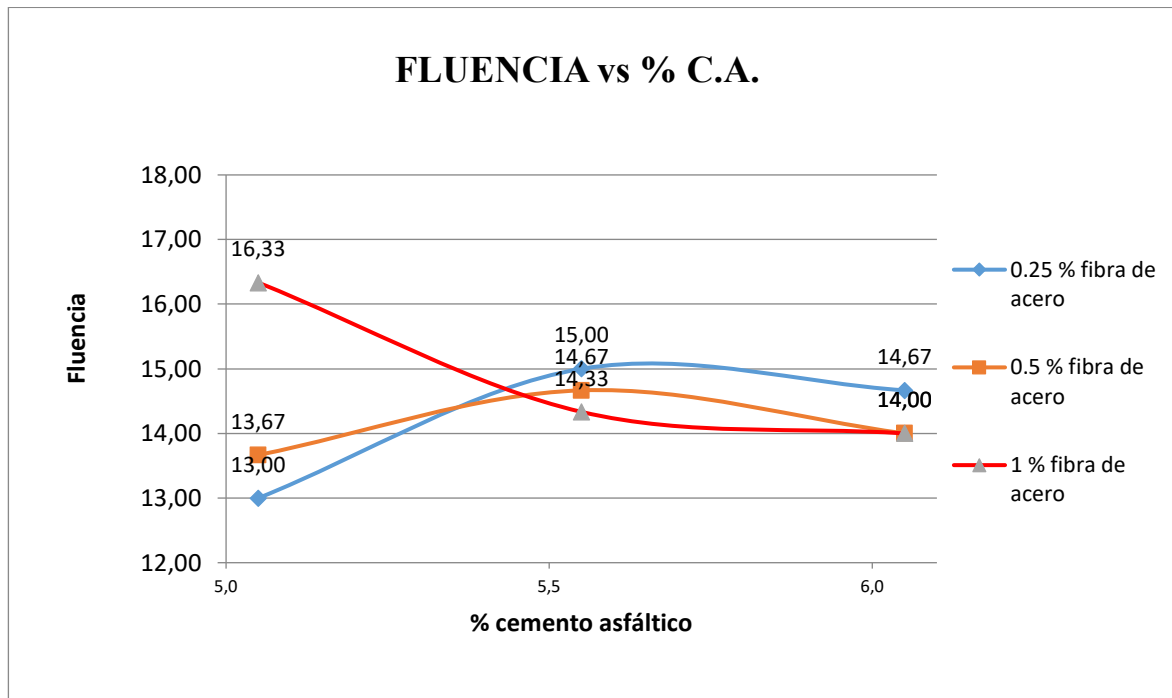
Se puede observar de una mejor manera el comportamiento de la estabilidad y fluencia en las siguientes graficas.

Gráfico 4.14 Comparación de estabilidad vs cemento asfáltico con fibras de acero cortas



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.15 Comparación de fluencia vs cemento asfáltico con fibras de acero cortas



Fuente: Elaboración propia

4.7.4.2 Mezcla asfáltica óptima modificada con fibras de acero cortas proveniente del reciclado de neumático

Para determinar la distribución óptima en las mezclas asfálticas modificadas con fibras de acero cortas (0-2 cm), se realizará un análisis basado en su rendimiento. Aunque se observa una mejora en el porcentaje de vacíos llenos con betún (R.B.V.), este dato es solo uno de los factores a considerar al seleccionar el valor óptimo. En este caso, la combinación más efectiva se encuentra en la mezcla que contiene un 5.55% de cemento asfáltico y un 0.5% de fibras de acero.

Tabla 4.20 Resultados al porcentaje óptimo de mezcla asfáltica con fibras de acero cortas

Ensayo	Valor	Unidades	Rango	
			min	máx.
Densidad	2,29	gr/cm ³	-	-
Estabilidad	2164,97	lb	1800	-
Fluencia	14,67	pulg	8	16
V.A.M	21,69	%	13	-
R.B.V	57,67	%	65	75
% Vacios mezcla	8,93	%	3	5

Fuente: Fuente propia

4.7.4.3 Resultados de la mezcla asfáltica modificada con fibras de acero medianas proveniente del reciclado de neumático

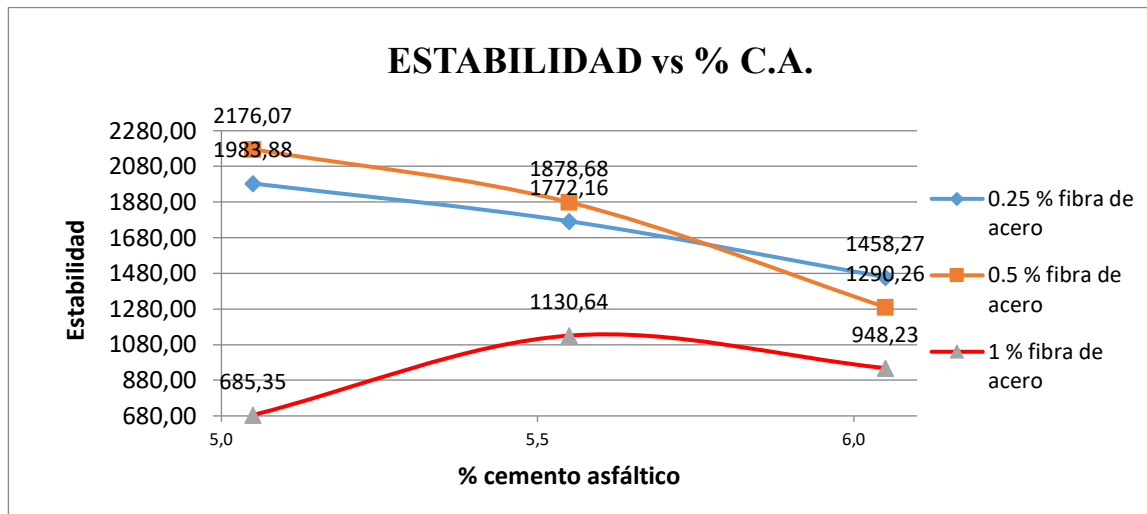
Tabla 4.21 Resultado del ensayo Marshall con fibras de acero medianas

N° de probeta	% de Asfalto			altura promedio de probeta	Densidad Briqueta		% de Vacíos			Estabilidad Marshall	Fluencia
	Fibra de acero	base Mezcla	base Agregados		densidad real	Densidad promedio	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)	Estabilidad promedio	Fluencia promedio
	%	%	%								
1	0,25	5,05	5,32	6,510	2,25	2,27	10,38	21,37	51,40	1983,88	15,00
2				6,630	2,25						
3				6,490	2,31						
4	0,5	5,05	5,32	6,470	2,32	2,30	9,28	20,39	54,52	2176,07	15,33
5				6,450	2,28						
6				6,510	2,29						
7	1	5,05	5,32	6,800	2,18	2,17	14,54	25,01	41,87	685,35	18,00
8				6,830	2,17						
9				7,010	2,15						
10	0,25	5,55	5,88	6,420	2,28	2,28	9,23	21,35	56,78	1772,16	15,33
11				6,420	2,29						
12				6,490	2,27						
13	0,5	5,55	5,88	6,410	2,28	2,26	9,87	21,91	54,95	1878,68	17,67
14				6,510	2,25						
15				6,500	2,27						
16	1	5,55	5,88	6,710	2,22	2,22	11,57	23,38	50,51	1130,64	17,67
17				6,600	2,23						
18				6,530	2,21						
19	0,25	6,05	6,44	6,360	2,33	2,32	7,03	20,46	65,61	1458,27	16,67
20				6,480	2,29						
21				6,280	2,32						
22	0,5	6,05	6,44	6,510	2,28	2,27	8,78	21,95	60,00	1290,26	18,67
23				6,530	2,24						
24				6,390	2,30						
25	1	6,05	6,44	6,470	2,25	2,26	9,26	22,36	58,59	948,23	19,00
26				6,410	2,29						
27				6,500	2,24						
ESPECIFICACIONES					mínimo		3	13	65	1800	8
					máximo		5	-	75	-	16

Fuente: Fuente propia

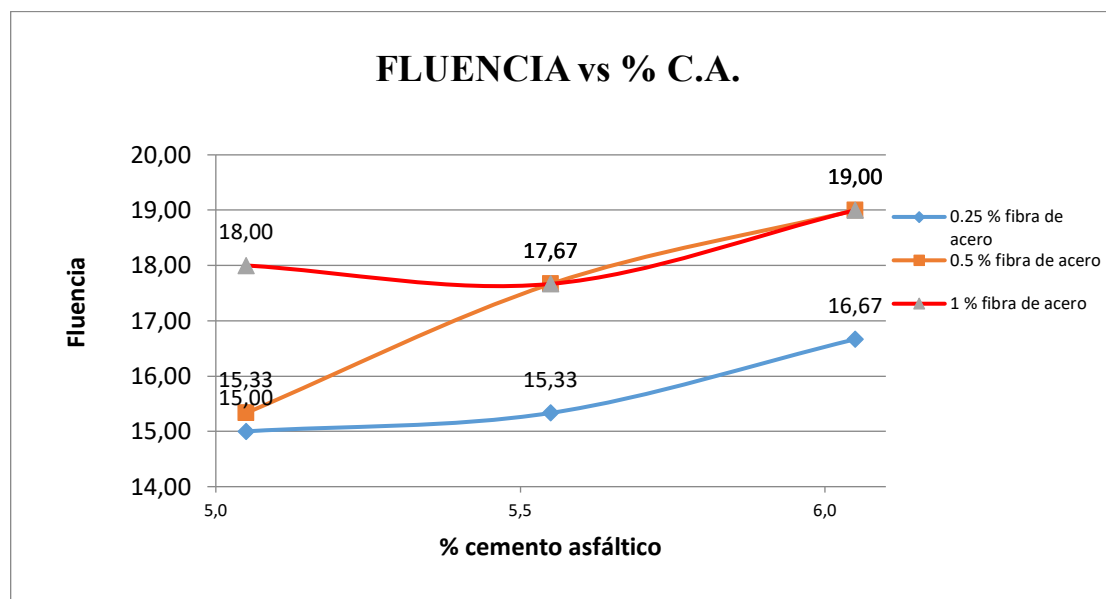
Se puede observar de una mejor manera el comportamiento de la estabilidad y fluencia en las siguientes graficas.

Gráfico 4.16 Comparación de estabilidad vs cemento asfáltico con fibras de acero medianas



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.17 Comparación de fluencia vs cemento asfáltico con fibras de acero medianas



Fuente: Elaboración propia

4.7.4.4 Mezcla asfáltica óptima modificada con fibras de acero medianas proveniente del reciclado de neumático

Para determinar la distribución óptima en las mezclas asfálticas modificadas con fibras de acero medianas (2-4 cm), se realizará un análisis basado en su rendimiento. Aunque se observa una mejora en el porcentaje de vacíos llenos con betún (R.B.V.), este dato es solo uno de los factores a considerar al seleccionar el valor óptimo. En este caso, la combinación más efectiva se encuentra en la mezcla que contiene un 5.05% de cemento asfáltico y un 0.5% de fibras de acero.

Tabla 4.22 Resultados al porcentaje óptimo de mezcla asfáltica con fibras de acero medianas

Ensayo	Valor	Unidades	Rango	
			min	máx.
Densidad	2,30	gr/cm ³	-	-
Estabilidad	2176,07	lb	1800	-
Fluencia	15,33	pulg	8	16
V.A.M	20,39	%	13	-
R.B.V	54,52	%	65	75
% Vacios mezcla	9,28	%	3	5

Fuente: Fuente propia

4.7.4.5 Resultados de la mezcla asfáltica modificada con fibras de acero largas proveniente del reciclado de neumático

Tabla 4.23 Resultado del ensayo Marshall con fibras de acero largas

N° de probeta	% de Asfalto			altura promedio de probeta	Densidad Briqueta		% de Vacíos			Estabilidad Marshall	Fluencia
	Fibra de acero	base Mezcla	base Agregados		densidad real	Densidad promedio	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregados)	R.B.V. (relación)	Estabilidad promedio	Fluencia promedio
	%	%	%		grs/cm ³	grs/cm ³	%	%	%	libras	0,01 pulg
1				6,640	2,24						
2	0,25	5,05	5,32	6,450	2,28	2,25	11,17	22,06	49,36	1463,12	18,33
3				6,650	2,23						
4				7,230	2,14						
5	0,25	5,05	5,32	6,660	2,22	2,19	13,38	23,99	44,25	790,83	20,33
6				6,650	2,23						

Fuente: Fuente propia

4.7.4.6 Mezcla asfáltica óptima modificada con fibras de acero largas proveniente del reciclado de neumático

El uso de fibras de acero largas (4-6 cm) resulta perjudicial para las mezclas asfálticas, ya que generan una fuerte resistencia a la compactación, lo que provoca que las briquetas se desmoronen al retirarlas del desmoldador o incluso antes. Esto ocurre porque los alambres largos interfieren con la cohesión de los agregados, impidiendo una correcta compactación y debilitando la estructura de la mezcla. Además, las fibras largas crean vacíos excesivos, lo que compromete la integridad de las briquetas.

Por esta razón, no es posible obtener una mezcla asfáltica óptima cuando se utilizan fibras de acero alargadas.

4.8 Precios unitarios para carpeta asfáltica

Con el objetivo de realizar el análisis de costos de la mezcla asfáltica modificada con fibras de acero recicladas, se realizó un análisis del precio unitario de la carpeta asfáltica. Este análisis permite identificar los costos asociados a los diferentes componentes de la mezcla y estimar el impacto de la inclusión de fibras de acero sobre el costo total. Esto permitió identificar los costos asociados a los diferentes componentes de la mezcla, tomando en cuenta los materiales utilizados, como los agregados y el cemento asfáltico, la mano de obra necesaria para la producción y colocación, así como el uso de maquinaria específica para la fabricación, transporte y compactación de la carpeta asfáltica.

Tabla 4.24 Precios de las diferentes carpetas asfálticas

Ítem	Precio (Bs.)
Carpeta asfáltica convencional	1924,40
Carpeta asfáltica modificada con fibras de acero cortas	2115,20
Carpeta asfáltica modificada con fibras de acero medianas	1983,08

Fuente: Fuente propia

4.9 Análisis de los resultados obtenidos del procedimiento Marshal para las mezclas asfálticas modificadas

4.9.1 Análisis estadístico de la dispersión de datos

Para determinar si la muestra de datos es representativa, calcularemos el coeficiente de variación (C.V.), el cual nos permitirá evaluar la dispersión relativa de los datos obtenidos.

4.9.1.1 Análisis estadístico de la dispersión de datos para mezclas asfálticas con fibras de acero cortas

Para tener una muestra representativa de los datos analizados se debe obtener el C.V coeficiente de variación para los diferentes % de fibra de acero.

Tabla 4.25 Coeficiente de variación para mezclas asfálticas modificadas con 0.25 % de fibras de acero cortas

% Fibra de acero	Estabilidad	Fluencia
0,25	2205,68	12
	1198,60	12
	2023,87	15
	1839,99	15
	1687,84	14
	1529,78	16
	1677,01	15
	1618,29	14
	1443,97	15
Promedio	1691,67	14,22
Desviación estándar	302,67	1,39
C.V	17,89	9,80

Fuente: Fuente propia

Tabla 4.26 Coeficiente de variación para mezclas asfálticas modificadas con 0.5 % de fibras de acero cortas

% Fibra de acero	Estabilidad	Fluencia
0,5	1641,23	12
	1853,02	14
	1563,34	15
	2166,92	14
	2035,33	14
	2292,66	16
	2014,49	15
	1721,72	16
	1852,96	15
Promedio	1904,63	14,56
Desviación estándar	243,20	1,24
C.V	12,77	8,49

Fuente: Fuente propia

Tabla 4.27 Coeficiente de variación para mezclas asfálticas modificadas con 1 % de fibras de acero cortas

% Fibra de acero	Estabilidad	Fluencia
1	810,19	16
	705,05	16
	651,28	17
	1709,91	15
	1326,79	15
	1620,04	13
	1538,27	13
	1151,57	16
	1340,57	13
Promedio	1205,96	14,89
Desviación estándar	401,05	1,54
C.V	33,26	10,32

Fuente: Fuente propia

Los datos son representativos, ya que el C.V (coeficiente de variación) es menor a 30, solamente los datos obtenidos con 1% de fibra de acero tiene una dispersión mayor y no representativa.

4.9.1.2 Análisis estadístico de la dispersión de datos para mezclas asfálticas con fibras de acero medianas

Para tener una muestra representativa de los datos analizados se debe obtener el C.V coeficiente de variación para los diferentes % de fibra de acero.

Tabla 4.28 Coeficiente de variación para mezclas asfálticas modificadas con 0.25 % de fibras de acero medianas

% Fibra de acero	Estabilidad	Fluencia
0,25	1926,49	16
	1909,31	14
	2115,83	15
	2003,39	15
	1677,98	15
	1635,10	16
	1596,15	16
	1279,80	18
	1498,84	16
Promedio	1738,10	15,67
Desviación estándar	269,15	1,12
C.V	15,49	7,14

Fuente: Fuente propia

Tabla 4.29 Coeficiente de variación para mezclas asfálticas modificadas con 0.5 % de fibras de acero medianas

% Fibra de acero	Estabilidad	Fluencia
0,5	2296,57	15
	2095,75	16
	2135,78	15
	1987,27	17
	1652,47	18
	1996,31	18
	1432,74	18
	1053,83	20
	1384,21	18
Promedio	1781,66	17,22
Desviación estándar	418,88	1,64
C.V	23,51	9,53

Fuente: Fuente propia

Tabla 4.30 Coeficiente de variación para mezclas asfálticas modificadas con 1 % de fibras de acero medianas

% Fibra de acero	Estabilidad	Fluencia
1	650,60	18
	853,75	18
	551,63	18
	1033,64	17
	1052,09	18
	1306,19	18
	849,51	19
	1058,93	18
	936,25	20
Promedio	921,40	18,22
Desviación estándar	228,22	0,83
C.V	24,77	4,57

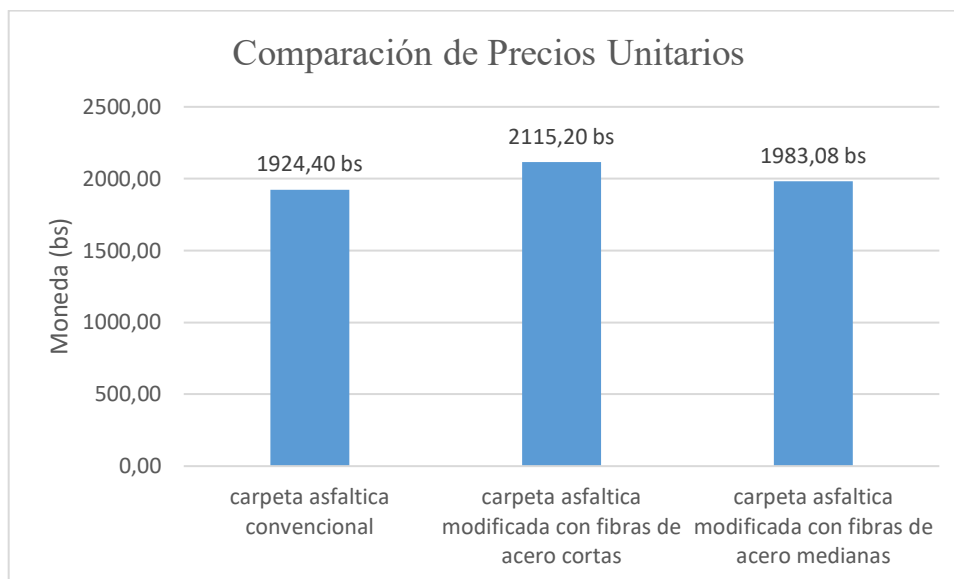
Fuente: Fuente propia

En el caso de las fibras de acero medianas, todos los valores obtenidos presentan un coeficiente de variación (C.V.) inferior a 30. Esto indica que los datos son consistentes y están dentro del rango de dispersión aceptable, lo que asegura su representatividad. Un C.V. menor a 30 sugiere una baja variabilidad relativa entre las muestras, lo que refuerza la fiabilidad de los resultados obtenidos y su capacidad para reflejar las características reales de las mezclas asfálticas con fibras de acero medianas.

4.9.2 Comparación de precios unitarios de mezcla asfáltica convencional y modificadas con fibra de acero

Para contrastar adecuadamente los datos obtenidos en el análisis de costos del precio unitario de la carpeta asfáltica, es fundamental revisar y analizar detalladamente los resultados. Esto permitirá identificar patrones, diferencias significativas y posibles áreas de mejora, asegurando que las conclusiones estén bien fundamentadas en la información obtenida durante el proceso.

Gráfico 4.18 Comparación de precio unitario de carpeta asfáltica



Fuente: Elaboración propia

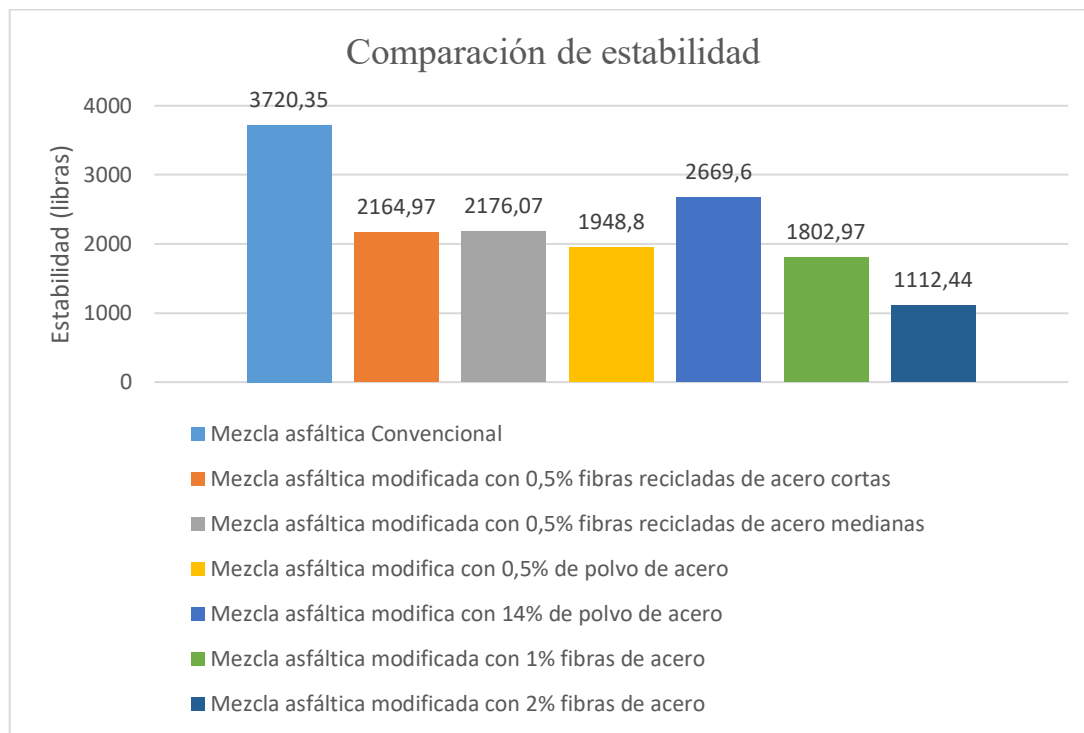
Se observa que la carpeta asfáltica convencional es la opción más económica entre las analizadas, debido a que comparte varios materiales con las mezclas modificadas. Un factor clave en la determinación de precios es que la fibra de acero, aunque se vende a precio de chatarra en el mercado, es difícil de obtener, ya que su adquisición depende principalmente de empresas especializadas en el reciclaje de neumáticos. Como resultado, la carpeta asfáltica convencional resulta ser un 9.02% más económica que la mezcla modificada con fibras de acero cortas y 2.96% que la mezcla modificada con fibra de acero mediana.

4.9.3 Comparación de estabilidad para las mezclas asfálticas convencionales, modificadas con fibra de acero y de trabajos similares

Para encontrar un trabajo comparable al realizado en esta investigación, se consultó el banco de tesis de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho. La investigación más similar, que comparte varios aspectos relevantes con el presente estudio, es la titulada "Análisis sobre el efecto de la adición de polvo de acero en mezclas asfálticas", realizada por Rocío Maricela Montero Rodríguez. También se comparó con una tesis de una universidad externa, la cual es titulada "Análisis del comportamiento mecánico de una

mezcla asfáltica abierta con la adición de fibras de acero" por Karla Gabriela Capa Moya de la Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.

Gráfico 4.19 Comparación de estabilidad de mezclas asfálticas modificadas y convencional



Fuente: Elaboración propia

La mezcla asfáltica convencional presenta una estabilidad de 3720.35 lb, sirviendo como referencia para evaluar el impacto de las modificaciones. Las mezclas modificadas, en general, muestran una reducción significativa en la estabilidad. Por ejemplo, la mezcla con 0.5% de fibras recicladas de acero cortas presenta una estabilidad de 2164.97 lb, lo que indica una disminución del 41.7% en comparación con la mezcla convencional. Esto sugiere que la adición de fibras recicladas de acero puede no ser efectiva para aumentar la estabilidad, al menos en el porcentaje utilizado. Al comparar las mezclas con diferentes tipos de fibras de acero recicladas, se observa que las mezclas modificadas con fibras medianas (2176.07 lb) y fibras cortas (2164.97 lb) tienen una estabilidad similar, lo que sugiere que el tamaño de las fibras puede no tener un efecto considerable en la estabilidad a este porcentaje. Sin embargo, al aumentar el porcentaje de fibras a 1% y 2%, se observa

una caída dramática en la estabilidad, alcanzando 1802.97 lb y 1112.44 lb, respectivamente.

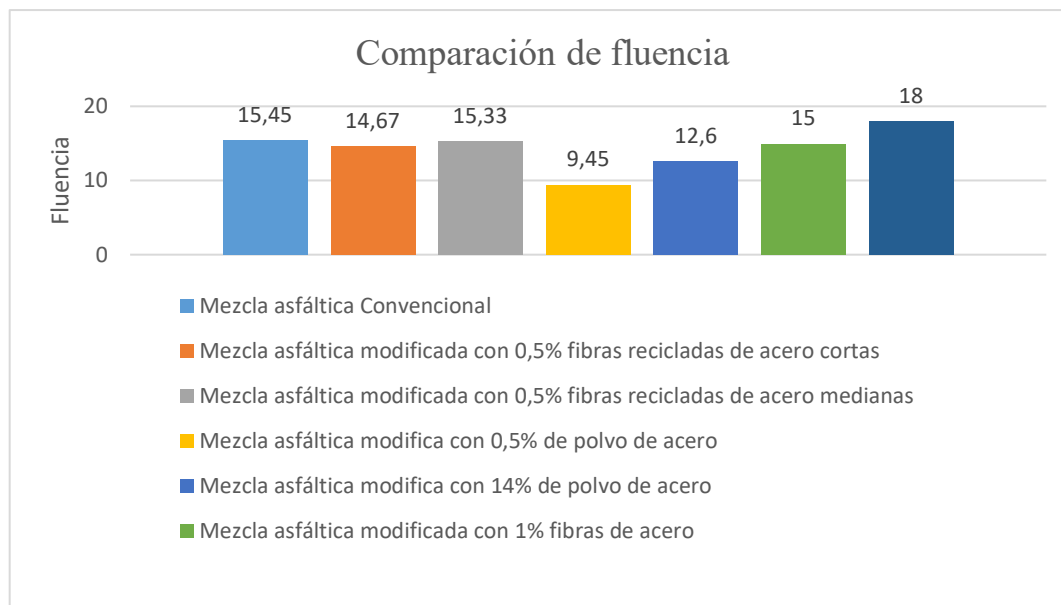
La mezcla modificada con 0.5% de polvo de acero presenta la estabilidad más baja de 1948.80 lb, lo que indica que el uso de polvo de acero a este porcentaje también tiene un impacto negativo en la estabilidad. Sin embargo, al aumentar la cantidad de polvo de acero a 14%, se observa una mejora significativa en la estabilidad, alcanzando 2669.60 lb, aunque aún inferior a la mezcla convencional. Este resultado sugiere que, a concentraciones más altas, el polvo de acero puede contribuir a mejorar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica.

En general, los resultados sugieren que la inclusión de fibras de acero recicladas, en el contexto de este estudio, tiende a reducir la estabilidad en las concentraciones estudiadas. Es posible que los métodos de incorporación y la interacción entre las fibras y el asfalto no sean óptimos, lo que limita el rendimiento de las mezclas. Por otro lado, el uso de polvo de acero presenta un comportamiento mixto, donde las bajas concentraciones son perjudiciales, pero concentraciones más altas pueden mejorar la estabilidad.

4.9.4 Comparación de fluencia para las mezclas asfálticas convencionales, modificadas con fibra de acero y de trabajos similares

Para encontrar un trabajo comparable al realizado en esta investigación, se consultó el banco de tesis de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho. La investigación más similar, que comparte varios aspectos relevantes con el presente estudio, es la titulada "Análisis sobre el efecto de la adición de polvo de acero en mezclas asfálticas", realizada por Rocío Maricela Montero Rodríguez. También se comparó con una tesis de una universidad externa, la cual es titulada "Análisis del comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica abierta con la adición de fibras de acero" por Karla Gabriela Capa Moya de la Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.

Gráfico 4.20 Comparación de fluencia de mezclas asfálticas modificadas y convencional



Fuente: Elaboración propia

La mezcla asfáltica convencional presenta una fluencia de 15.45, estableciendo un punto de referencia para la evaluación de las mezclas modificadas. Las mezclas modificadas en general exhiben una variabilidad en los niveles de fluencia, con la mezcla de 0.5% de fibras recicladas de acero cortas mostrando una ligera disminución a 14.67. Este resultado sugiere que la incorporación de fibras recicladas puede contribuir a una ligera mejora en la resistencia a la deformación, aunque la diferencia no es drástica.

Al examinar las mezclas con diferentes tipos de fibras, la mezcla con fibras medianas muestra una fluencia de 15.33, lo que indica que la variación en el tamaño de las fibras no tiene un efecto significativo en la deformación en este porcentaje. Sin embargo, cuando se aumenta el porcentaje de fibras a 1% y 2%, se observa que la fluencia se incrementa, alcanzando 15 y 18 respectivamente. Este aumento puede ser indicativo de que una mayor cantidad de fibras de acero no contribuye a la rigidez de la mezcla, resultando en una mayor deformación bajo carga.

La mezcla modificada con 0.5% de polvo de acero presenta la fluencia más baja, con un valor de 9.45, lo que sugiere que la adición de polvo de acero en esta proporción mejora la resistencia a la deformación, haciéndola más robusta frente a cargas. Por otro lado, al aumentar la cantidad de polvo de acero a 14%, la fluencia aumenta a 12.6, lo que indica

que una mayor concentración de polvo puede llevar a un comportamiento menos favorable en términos de rigidez.

En general, se observa que la inclusión de fibras de acero recicladas tiende a aumentar la fluencia de las mezclas en los porcentajes estudiados, lo que podría indicar que estas fibras, aunque puedan tener otras propiedades beneficiosas, no contribuyen a mejorar la rigidez de la mezcla en condiciones de carga. En contraste, el uso de polvo de acero parece ofrecer beneficios en menor proporción, pero estos beneficios pueden revertirse al utilizar concentraciones más altas.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- La hipótesis inicial de esta investigación proponía que la incorporación de fibras de acero recicladas de neumáticos en las mezclas asfálticas en caliente incrementaría tanto la resistencia como la deformación de la mezcla, al actuar como refuerzo para los agregados en la matriz asfáltica. Sin embargo, los resultados obtenidos en el estudio no respaldan esta premisa, sugiriendo que la adición de fibras de acero, en las concentraciones evaluadas, no contribuye de manera significativa a mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas.
- Las briquetas preliminares con un 5% de fibra de acero se desmoronaron después de la compactación, indicando una falta de cohesión en la mezcla. El desmoronamiento se debió a la superficie lisa del acero y a la alta oposición a la compactación generada por el porcentaje elevado de fibras, lo que impidió una adecuada adherencia y compactación
- Solo las briquetas preliminares con un 0,25% de fibra de acero cumplieron con los requisitos de estabilidad y fluencia especificados en las normas.
- Debido a las limitaciones observadas, la mezcla asfáltica modificada con fibra de acero, en los porcentajes estudiados, no es adecuada para su aplicación en proyectos reales donde se requieren altos estándares de rendimiento y durabilidad.
- Las briquetas exhiben fibras de acero que sobresalen del molde, lo que sugiere que, si se emplearan en una carretera real, podrían ocasionar daños y cortes en los neumáticos de los vehículos, planteando un riesgo significativo para la seguridad vial.
- La clasificación de las fibras de acero por tamaños debe realizarse manualmente, lo cual representa una desventaja significativa, ya que es un proceso que demanda mucho tiempo y esfuerzo para garantizar una correcta separación de las fibras. Esta limitación puede afectar la eficiencia y precisión del estudio, incrementando tanto el tiempo de preparación como el riesgo de errores en la clasificación.

- Las mezclas asfálticas compactadas con fibras de acero de longitud entre 4 y 6 cm se desmoronaron con facilidad. Esto indica que el uso de fibras de acero más largas es aún más desventajoso para las mezclas asfálticas modificadas, ya que dificulta la compactación adecuada y compromete la cohesión de la mezcla, afectando negativamente su estabilidad estructural.
- En comparación con las mezclas asfálticas preliminares, las mezclas asfálticas con fibras de acero clasificadas por rangos de longitud mostraron una leve mejora en sus características. Sin embargo, a pesar de esta mejora, no alcanzaron los rangos mínimos establecidos por la normativa vigente, lo que limita su viabilidad para cumplir con los estándares de calidad requeridos en aplicaciones de pavimentación.
- El precio unitario de la mezcla asfáltica convencional es más favorable en comparación con el de la mezcla asfáltica modificada.
- La dispersión de los datos es representativa en la mayoría de los casos analizados, con excepción de las mezclas asfálticas que contienen un 1% de fibras de acero cortas.

Recomendaciones

- No se recomienda el uso de fibras de acero en la práctica real de la construcción de carreteras debido a su efecto negativo en la mezcla asfáltica.
- Es recomendable verificar la exactitud de los dispositivos en cada uno de los experimentos, así como los criterios para el diseño de mezclas actuales.
- Se recomienda tener extremo cuidado al manipular la mezcla asfáltica modificada con fibras de acero, ya que podría pincharse durante la manipulación de la briqueta. Es importante utilizar guantes protectores y seguir los procedimientos de seguridad adecuados para evitar lesiones.
- Se recomienda utilizar guantes protectores resistentes al calor para manipular las briquetas y evitar quemaduras. Además, es importante usar gafas de seguridad para proteger los ojos de posibles salpicaduras de asfalto caliente durante el proceso de compactación.

- Es recomendable en el momento de la compactación estar atento a los golpes que realiza el martillo, puesto que podría presentar alguna anomalía en el conteo de los golpes.
- Es recomendable estar atento durante el proceso de compactación a los golpes dados por el martillo, ya que podría haber alguna anomalía en el conteo de los mismos. Es importante asegurarse de que el martillo esté funcionando correctamente y que cada golpe se registre adecuadamente para obtener resultados precisos en el ensayo Marshall.
- Es crucial controlar los tiempos especificados para cada ensayo, asegurándose de que se sigan rigurosamente para evitar cualquier variabilidad en los resultados de los ensayos de laboratorio. Esto garantizará la consistencia y la precisión de los datos obtenidos.