

CAPÍTULO I

DISEÑO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

CAPÍTULO I

DISEÑO TEÓRICO

1.1 Introducción

La presente investigación se centra en analizar el impacto de la incorporación de microfibras sintéticas Fibermesh 150 en mezclas asfálticas en caliente, analizando específicamente cómo esta adición afecta la estabilidad Marshall, lo que potencialmente extendería la vida útil del pavimento y mejoraría su desempeño.

En el ámbito internacional, diversos estudios han explorado el uso de fibras sintéticas en mezclas asfálticas en caliente, obteniendo resultados positivos. Por ejemplo, investigaciones en Turquía y Perú han demostrado que ciertas fibras pueden mejorar la resistencia a la fisuración y la estabilidad Marshall de las mezclas asfálticas (Tapkin, 2008), (Santa Cruz Becerra, 2023) A nivel nacional, el uso de fibras y microfibras en mezclas asfálticas es poco común, pero trabajos de investigación sobre el uso de fibras han mostrado resultados prometedores en términos de mejora de propiedades mecánicas (Mamani, 2016) Estos antecedentes resaltan la necesidad de una investigación sobre el uso de microfibras en las mezclas asfálticas en caliente.

El objetivo principal de esta investigación es analizar el comportamiento de la estabilidad Marshall en mezclas asfálticas en caliente modificadas con diferentes proporciones de microfibras sintéticas Fibermesh 150. Para ello, se llevarán a cabo una serie de ensayos de laboratorio, que incluyen la preparación de muestras, la realización de pruebas y el análisis de los resultados obtenidos. Se espera que estos ensayos proporcionen una comprensión clara de cómo las microfibras afectan la estabilidad Marshall, con el fin de ofrecer recomendaciones basadas en evidencia y establecer un uso eficiente.

Investigaciones como esta permiten ampliar el conocimiento en el campo de las mezclas asfálticas modificadas, brindando nuevas perspectivas para mejorar la estabilidad Marshall. Estas mejoras son cruciales para abordar problemas como la formación de grietas y fisuras, que acortan significativamente la vida útil de los pavimentos. La relevancia de este estudio para la sociedad radica en su potencial para reducir los costos de mantenimiento de carreteras y mejorar la calidad de las infraestructuras viales.

1.2 Antecedentes

Un estudio clave en el análisis sobre los usos de fibras en pavimentos flexibles es el estudio de Maurer y Malasheskie (1989), titulado "Field performance of fabrics and fibers to retard reflective cracking" (Rendimiento en campo de tejidos y fibras para retardar el agrietamiento por reflexión), publicado en la revista Geotextiles and Geomembranes. En esta investigación, se evaluó el desempeño de diferentes tratamientos, incluyendo mezclas asfálticas reforzadas con fibras de poliéster, para reducir el agrietamiento reflectante sobre capas asfálticas. Los resultados demostraron que las secciones reforzadas con fibras presentaron una reducción significativa en el agrietamiento transversal en comparación con las secciones de control sin refuerzo. Este estudio proporcionó evidencia temprana de que la incorporación de fibras en mezclas asfálticas puede mejorar la resistencia al agrietamiento y aumentar la durabilidad de los pavimentos flexibles. El uso de fibras en pavimentos flexibles se introdujo con el objetivo de controlar el agrietamiento por fatiga y reducir la deformación permanente, especialmente en condiciones de tráfico pesado.

Un estudio realizado por Bracamonte y Claire (2022) en la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) evaluó el comportamiento físico-mecánico de mezclas asfálticas modificadas con fibra natural de totora (*Schoenoplectus Tatora*). Se incorporaron porcentajes de 0.15%, 0.25% y 0.35% de fibra a una mezcla convencional con cemento asfáltico 85-100, y se analizaron propiedades como la estabilidad Marshall, la fluencia, la densidad y el contenido de vacíos. Los resultados mostraron que la adición de fibra de totora mejora notablemente las propiedades mecánicas de la mezcla, evidenciando su viabilidad como refuerzo natural en pavimentos flexibles.

Diversos estudios previos han evidenciado que la incorporación de fibras, sean naturales o sintéticas, contribuye a mejorar la cohesión interna de la mezcla, controla la formación de fisuras y distribuye de manera más uniforme los esfuerzos inducidos por cargas repetitivas. El uso de microfibras en mezclas asfálticas se fundamenta en su capacidad para incrementar la resistencia a la tracción, disminuir la deformación permanente y alargar la vida útil del pavimento. Antecedentes como el trabajo de Maurer y Malasheskie (1989), así como investigaciones recientes con fibras naturales como la totora, refuerzan

el argumento de que el refuerzo fibroso es una estrategia eficaz para mejorar las propiedades mecánicas del pavimento flexible.

1.3 Justificación

1.3.1 Justificación Académica

la presente investigación se sustenta en diversas teorías y fundamentos académicos pertenecientes al área de Materiales de Construcción y Pavimentos de la carrera de Ingeniería Civil. Estas teorías no solo aportan al desarrollo metodológico del estudio, sino que también al campo de los pavimentos flexibles. Las principales teorías aplicadas son:

1. Teoría del Diseño de Mezclas Asfálticas (Marshall): establece los procedimientos para seleccionar y evaluar mezclas asfálticas en base a su estabilidad, fluencia, densidad, y contenido óptimo de ligante.
2. Teoría del Refuerzo de Materiales con Fibras: sustenta el efecto de refuerzo que generan las microfibras al distribuir tensiones internas, mejorar la resistencia a la tracción y controlar la propagación de grietas.
3. Teoría de la Mecánica de Pavimentos: se enfoca en la interacción entre cargas de tránsito, características del material y la respuesta estructural del pavimento.

Estas teorías permiten comprender y evaluar cómo la incorporación de microfibras sintéticas Fibermesh 150 influye en las mezclas asfálticas, aportando al desarrollo técnico-científico de la carrera y fomentando investigaciones futuras en tecnología de pavimentos.

1.3.2 Justificación sobre la Aplicación Técnica - Práctica

Desde el punto de vista técnico, esta investigación propone una solución innovadora y accesible al problema de la baja durabilidad en pavimentos asfálticos expuestos a cargas de tránsito y condiciones ambientales adversas. La aplicación de microfibras sintéticas Fibermesh 150 como modificador de mezclas asfálticas puede ser replicada con facilidad por ingenieros civiles en obras viales, utilizando los equipos y métodos ya existentes en laboratorios y plantas de producción de mezclas. Los resultados obtenidos en esta investigación pueden convertirse en una guía técnica para el diseño de nuevas mezclas

con mayor resistencia a la formación de fisuras, mejor estabilidad Marshall y desempeño general. Esta solución práctica es adaptable a diferentes tipos de proyectos viales, lo que permite su aplicación en distintas escalas, desde calles urbanas hasta carreteras de alto tránsito. La facilidad de implementación y la replicabilidad hacen que los resultados de esta investigación representen un aporte técnico-práctico valioso para la mejora de los procesos constructivos en el área de pavimentación.

1.3.3 Justificación e Importancia Social

La importancia social de esta investigación radica en su capacidad para influir positivamente en la calidad de vida de la población a través de una mejora significativa en la durabilidad y funcionalidad de las vías de comunicación. Al utilizar microfibras sintéticas en la elaboración de mezclas asfálticas más resistentes, se disminuyen los costos de mantenimiento, se reducen las interrupciones por reparaciones frecuentes y se aumenta la seguridad vial. Esto es especialmente relevante en contextos donde el acceso a materiales y tecnologías de alta gama es limitado, ya que la solución planteada es económica, replicable y de bajo impacto ambiental. generando un beneficio social sustancial. En este sentido, la investigación no solo aporta al conocimiento técnico, sino que también se convierte en una herramienta para el desarrollo sostenible de las infraestructuras viales, favoreciendo directamente a comunidades, municipios y gobiernos locales al optimizar recursos y garantizar mayor eficiencia en las inversiones públicas.

1.4 Planteamiento del problema.

1.4.1 Situación Problemática.

Las mezclas asfálticas tradicionales exhiben una durabilidad limitada al ser sometidas a cargas de tráfico repetidas, lo que genera deformaciones permanentes y fisuraciones en los pavimentos. Estas fallas comprometen la seguridad vial y aumentan significativamente los costos asociados con el mantenimiento y la reparación de las vías. La estabilidad Marshall, un parámetro esencial en el diseño y control de mezclas asfálticas, mide la capacidad de la mezcla para resistir deformaciones bajo carga. Sin embargo, las mezclas convencionales frecuentemente no logran mantener una estabilidad adecuada en condiciones adversas, como altas temperaturas o tráfico intenso.

Como una posible solución a este problema, se ha sugerido la incorporación de aditivos como las microfibras sintéticas Fibermesh 150, las cuales podrían mejorar el desempeño mecánico de las mezclas asfálticas. No obstante, la escasez de estudios previos sobre su efectividad, genera incertidumbre acerca de su impacto real en propiedades como la estabilidad Marshall.

Si no se realizan estudios detallados para evaluar el efecto de las microfibras Fibermesh 150 en la estabilidad Marshall de las mezclas asfálticas calientes, su uso podría basarse en suposiciones en lugar de evidencia sólida. Esto podría derivar en la aplicación de soluciones inadecuadas, perpetuando los problemas de durabilidad y elevando los costos de mantenimiento.

Por ello, resulta imprescindible llevar a cabo un análisis exhaustivo que incluya pruebas de laboratorio, análisis de resultados y la identificación de las condiciones óptimas para la incorporación de estas microfibras. Este enfoque permitirá desarrollar directrices basadas en datos concretos, las cuales orienten a ingenieros y constructores en la mejora de la calidad y durabilidad de los pavimentos asfálticos.

1.4.2 Delimitación espacial.

Área de trabajo: está en el área de pavimentos.

Base de operaciones: Laboratorio de asfaltos.

Aplicación: Construcción de carreteras.

1.4.3 Delimitación Temporal

Tabla 1. Delimitación Temporal

Fecha aproximada	Evento	¿Como contribuirá este dato?
Marzo de 2024	Investigación de diferentes tipos de materiales	conocimiento sobre los diversos materiales que pueden ser utilizados en mezclas asfálticas.
Junio de 2024	Se da procedente el título de la propuesta	Esta aprobación valida la investigación

Septiembre de 2024	Ingreso a laboratorios	Caracterización de los agregados, el cemento asfáltico y la elaboración de las briquetas
Mayo de 2025	Entrega de borrador al docente guía	Borrador completo para ser revisado y aprobado por el docente
Julio 2025	Predefensa de la investigación	Validará la solidez de los resultados y la coherencia del análisis antes de la entrega final.

Fuente: Elaboración propia

1.4.4 Formulación del problema.

¿De qué manera la incorporación de microfibras sintéticas Fibermesh 150 influye en el comportamiento de la estabilidad Marshall de mezclas asfálticas en caliente?

1.5 Objetivos de la Investigación.

1.5.1 Objetivo General.

Analizar el comportamiento de la estabilidad Marshall en mezclas asfálticas calientes modificadas con diferentes porcentajes de microfibras sintéticas Fibermesh 150.

1.5.2 Objetivos Específicos.

- Caracterizar las propiedades de los agregados y del cemento asfáltico utilizados en las mezclas asfálticas calientes, mediante ensayos de laboratorio estandarizados.
- Analizar cómo la incorporación, en proporciones crecientes de microfibras Fibermesh 150 modifica los parámetros de las mezclas asfálticas calientes.
- Comparar la estabilidad Marshall de la mezcla asfáltica convencional con la de las mezclas modificadas con microfibras, para cuantificar la mejora aportada por el refuerzo interno.

- Establecer la dosificación óptima de Fibermesh 150 que maximice la estabilidad Marshall sin comprometer la trabajabilidad y volumetría de la mezcla.

1.6 Planteamiento de la Hipótesis y sus Variables.

1.6.1 Formulación de la Hipótesis.

1.6.1.1 Hipótesis

La adición de microfibras Fibermesh 150 a una mezcla asfáltica en caliente mejora significativamente el comportamiento de la estabilidad Marshall.

1.6.2 Identificación y conceptualización de variables

Las variables identificadas son las siguientes.

Variable independiente: *La cantidad de microfibras sintéticas Fibermesh 150 expresadas en porcentaje.*

Variable dependiente: *El valor de la estabilidad Marshall.*

1.7 Conceptualización y Operacionalización de las variables.

Tabla 2. Variables Independiente y dependiente

VARIABLE INDEPENDIENTE	CONCEPTO	DIMENSION	INDICADOR	VALOR/ACCION
La cantidad de microfibras sintéticas	Se refiere a un incremento gradual de microfibras sintéticas Fibermesh 150	Porcentaje de microfibras	Porcentaje [%]	Se utilizarán diferentes porcentajes de microfibras Fibermesh 150

VARIABLE DEPENDIENTE	CONCEPTO	DIMENSION	INDICADOR	VALOR/ACCION
Valor de estabilidad Marshall	Se refiere la carga máxima	Valor de la estabilidad	Libras [Lb]	Se realizará el ensayo Marshall de acuerdo

	que soporta una probeta cilíndrica de mezcla asfáltica antes de fallar	Marshall en libras		con el procedimiento estándar norma ASTM D-1559
		Fluencia	pulgadas [plg]	Deformación durante rotura de los especímenes

Fuente: Elaboración propia

1.7.1 Determinación del alcance de la investigación.

Esta investigación es de nivel causal/explicativo pre experimento debido a la manipulación de la variable independiente, que en este caso es la incorporación de microfibras sintéticas Fibermesh 150 en las mezclas asfálticas calientes. Esto implica que se llevarán a cabo ensayos de laboratorio donde se prepararán diferentes mezclas asfálticas con diversas proporciones de microfibras sintéticas para analizar su efecto en las propiedades mecánicas, específicamente en la estabilidad Marshall.

La investigación se llevó a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Asfaltos y el Laboratorio de Hormigones y Resistencia de materiales de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, Estos laboratorios cuentan con el equipo necesario para realizar los ensayos de estabilidad Marshall y de los materiales de la mezcla (agregados y cemento asfáltico)

CAPÍTULO II

ESTADO DE CONOCIMIENTO

CAPITULO II

ESTRUCTURACIÓN DE ESTADO DE CONOCIMIENTO

2.1 Marco teórico

2.1.1 Definición de asfalto

El asfalto es una mezcla natural o artificial en la que el betún está asociado con materia mineral inerte. Es de color negro o negro parduzco. A una temperatura entre 50 y 100 ° C está en estado líquido, mientras que a una temperatura inferior a esta permanece en estado sólido.

El asfalto es una mezcla de materia mineral inerte, cal, alúmina, cal, sílice, etc. y un hidrocarburo conocido como betún asfáltico.

En algunos lugares el asfalto está disponible en la naturaleza a una profundidad de 3 a 60 metros. Se le conoce como asfalto natural.

La variedad común utilizada en todo el mundo es el asfalto residual, que se obtiene por destilación fraccionada de petróleo crudo. (Maldonado, 2021)

Debido a que es un material termoplástico, se ablanda a medida que se calienta y se endurece a medida que se enfría. Es el material de pavimentación básico en uso hoy en día.

Figura 1. asfalto



Fuente: (Asfalto, 2023)

2.1.2 Composición química de los asfaltos

la configuración de la estructura interna de un asfalto es determinada por la constitución química de sus moléculas.

Un asfalto es una mezcla química compleja de moléculas que son predominantemente hidrocarburos con pequeñas cantidades de componentes policíclicos de estructura análogas y grupos funcionales con contenido de azufre, nitrógeno y átomos de oxígeno. El asfalto también contiene pequeñas cantidades de metales como vanadio, níquel, hierro, magnesio y calcio, los cuales se encuentran en la forma de sales inorgánicas y óxidos o en estructuras de porfirina. Un análisis elemental de asfaltos fabricados de una variedad de crudos de petróleo crudos muestra que la mayoría de asfaltos contienen:

- Carbón 82-88%
- Hidrógeno 8-11 %
- Azufre 0-6%
- Oxígeno
- Nitrógeno

Es posible separar los asfaltos en grupos químicos principales llamados Asfáltenos y Máltenos. Los máltenos a la vez se subdividen en saturados, aromáticos y resinas. Los cuatro grupos no están bien definidos ya que hay superposición entre los grupos. Sin embargo, esto permite relacionar la reología del asfalto con la composición química. Los métodos disponibles para separar los asfaltos en fracciones pueden ser clasificados como:

- Extracción con solventes
 - Absorción por sólidos finamente divididos y eliminación de soluciones no absorbidas por filtración.
 - Cromatografía
 - Destilación molecular usada en conjunto con algunas de las técnicas mencionadas.
- (Menéndez Acurio, 2009)

2.1.3 Propiedades Físicas del asfalto

Las propiedades físicas del asfalto, de mayor importancia para el diseño, construcción, y mantenimiento de carreteras son: durabilidad, adhesión, susceptibilidad a la temperatura, envejecimiento y endurecimiento.

(Institute Asphalt, 1982)

2.1.3.1 Durabilidad.

Es la medida de que tanto puede retener un asfalto sus características originales cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento. Es una propiedad juzgada principalmente a través del comportamiento del pavimento, y por consiguiente es difícil de definir solamente en términos de las propiedades del asfalto. Esto se debe a que el comportamiento del pavimento está afectado por el diseño de la mezcla, las características del agregado, la mano de obra en la construcción, y otras variables, que incluyen la misma durabilidad del asfalto.

Sin embargo, existen pruebas rutinarias usadas para evaluar el comportamiento del asfalto frente al envejecimiento en horno. Estas son la Prueba de Película delgada en Horno (TFO) y la Prueba de Película Delgada en Horno Rotatorio (RTFO).

(Institute Asphalt, 1982)

2.1.3.2 Adhesión y cohesión.

Adhesión es la capacidad del asfalto para adherirse al agregado en la mezcla de pavimentación. Cohesión es la capacidad del asfalto de mantener firmemente, en su puesto, las partículas de agregado en el pavimento terminado.

El ensayo de ductilidad no mide directamente la adhesión o la cohesión; más bien, examina una propiedad del asfalto considerada por algunos como relacionada con la adhesión y la cohesión. En consecuencia, el ensayo es del tipo “califica – no califica”, y solo puede indicar si la muestra es, o no, lo suficiente dúctil para cumplir con los requisitos mínimos.

(Institute Asphalt, 1982)

2.1.3.3 Susceptibilidad a la temperatura.

Los asfaltos son termoplásticos; esto es, se vuelven más duros (más viscosos) a medida

que su temperatura disminuye, y más blandos (menos viscosos) a medida que su temperatura aumenta. Esta característica se conoce como susceptibilidad a la temperatura o tasa de variación de viscosidad con la temperatura, y es una de las propiedades más valiosas en un asfalto. La susceptibilidad a la temperatura varía entre asfaltos de petróleos de diferente origen, aún si los asfaltos tienen el mismo grado de consistencia.

Es muy importante conocer la susceptibilidad a la temperatura del asfalto que va a ser utilizado pues indica la temperatura adecuada a la cual se debe mezclar el asfalto con el agregado, y la temperatura a la cual se debe compactar la mezcla sobre la base de la carretera. Debe entenderse que es de vital importancia conocer las características de viscosidad de un asfalto en todo el rango de temperatura. Debe tener suficiente fluidez a altas temperaturas para que pueda cubrir las partículas de agregado durante el mezclado, y así permitir que estas partículas se desplacen unas respecto a otras durante la compactación.

Luego deberá volverse lo suficiente viscoso, a temperaturas ambientales normales, para mantener unidas las partículas de agregado.

2.1.4 Mezclas asfálticas

Mezcla asfáltica también llamado concreto bituminoso o agregado asfáltico consiste en un agregado de asfalto y materiales minerales (mezcla de varios tamaños de áridos y finos) que se mezclan juntos, se extienden en capas y se compactan.

Debido a sus propiedades es el material más común en los proyectos de construcción para firmes de carreteras, aeropuertos y aparcamientos. Debido a sus buenas propiedades como impermeabilizante también se usa en el núcleo de ciertas presas como impermeabilizante. Los términos "hormigón asfáltico", "cemento asfáltico bituminoso" y sus abreviaciones "AC" (del inglés asphalt concrete) son generalmente usados sólo en ingeniería y en documentos de construcción y literatura. El término más común es "asfalto", que además por defecto tiende a incluir a los pavimentos de hormigón de cemento, aunque en realidad éstos no estén compuestos realmente de asfalto. La definición ingenieril de hormigón incluye cualquier material compuesto por un agregado cementado con un aglutinante, que puede ser cemento Portland, pero que en el caso que nos ocupa es asfalto. Informalmente el hormigón asfáltico es conocido en Norteamérica como "blacktop" (en referencia a su

superficie negra)

2.1.5 Clasificación de las mezclas asfálticas

Existen varios parámetros de clasificación para establecer las diferencias entre las distintas mezclas y las clasificaciones pueden ser diversas:

a) 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.

b) 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 a la 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.

c) 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 %.

d) Por el Tamaño máximo del agregado pétreo.

- Mezclas Gruesas: Donde el tamaño máximo del agregado pétreo excede los 10 mm.
- Mezclas Finas: También llamadas micro aglomerados, 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.

e) 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.

f) 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. Propiedades consideradas en el diseño de mezclas asfálticas (Rodríguez, 1998)

2.1.6 Propiedades consideradas en el diseño de mezclas asfálticas

El diseño de una mezcla asfáltica consiste básicamente en la selección del tipo y granulometría del agregado a emplear, y de la selección del tipo y contenido de asfalto, de tal manera que se obtengan las propiedades deseadas en la mezcla y se satisfagan los requisitos específicos del proyecto. La selección apropiada de los materiales (con la calidad suficiente) que constituirán la mezcla y de sus proporciones correctas, requiere el conocimiento de las propiedades más significativas de las mezclas, y de su influencia en el comportamiento del pavimento (Cepeda, 2002). Para una aplicación específica e independientemente del procedimiento de diseño empleado, las propiedades relevantes en una mezcla asfáltica en caliente son:

- a) Estabilidad
- b) Durabilidad
- c) Flexibilidad
- d) Resistencia a la fatiga
- e) Resistencia al fracturamiento por bajas temperaturas
- f) Resistencia al daño por humedad
- g) Resistencia al deslizamiento
- h) Trabajabilidad

a) Estabilidad o resistencia a las deformaciones plásticas

Esta propiedad se refiere a la capacidad de la mezcla asfáltica para resistir la deformación y el desplazamiento, debidos a las cargas que resultan del tránsito vehicular. Un pavimento es estable cuando conserva su forma; y es inestable cuando desarrolla deformaciones permanentes, corrugaciones y otros signos de desplazamiento de la mezcla. La estabilidad depende, sobre todo, de la fricción interna y la cohesión. La fricción interna depende de la textura superficial, forma de la partícula, y granulometría del agregado; así como de la densidad de la mezcla, y la cantidad y tipo de asfalto; mientras que la cohesión depende del contenido de asfalto. La cohesión se incrementa con el incremento del contenido de asfalto, hasta un punto óptimo, después del cual el aumento en el contenido de asfalto forma una película demasiado gruesa en las partículas de asfalto, lo que produce una pérdida de fricción entre las partículas de agregado.

b) Durabilidad

Es la propiedad de la mezcla asfáltica que describe su capacidad para resistir los efectos perjudiciales del aire, agua, temperatura y tránsito que pueden provocar envejecimiento del asfalto, desintegración del agregado y desprendimiento de la película de asfalto del agregado. Una buena mezcla asfáltica no debe sufrir envejecimiento excesivo durante la vida en servicio. Esta propiedad se relaciona con el espesor de la película de asfalto, y con los vacíos de aire.

c) Flexibilidad

Es la capacidad de la mezcla asfáltica para amoldarse, sin sufrir agrietamiento o fisuración, a los asentamientos y movimientos graduales de la base y la subrasante. En ocasiones esta propiedad presenta conflictos con los requerimientos de estabilidad.

d) Resistencia a la fatiga

Es la capacidad de la mezcla asfáltica para resistir cargas repetidas causadas por el paso de los vehículos. El agrietamiento por fatiga está relacionado con el contenido y la rigidez del asfalto. Por su parte, los contenidos de asfalto muy altos harán que la mezcla tienda más a deformarse elásticamente (o a deformarse menos) que a fracturarse bajo carga repetida. Aunque también debe señalarse que la resistencia a la fatiga depende en gran medida de la relación entre el espesor estructural de la capa y la carga.

e) Resistencia al fracturamiento por baja temperatura

Es la capacidad de la mezcla asfáltica para no agrietarse en condiciones de bajas temperaturas. Depende principalmente de la rigidez del asfalto a bajas temperaturas.

f) Resistencia al daño por humedad o impermeabilidad

Es la resistencia al paso de agua y aire hacia el interior, o a través de la mezcla asfáltica. La resistencia al daño por humedad se relaciona con las propiedades químicas del

agregado mineral y el contenido de vacíos de aire en la mezcla compactada, y por tanto con los procesos de oxidación del asfalto, su adherencia y el drenaje del pavimento.

g) Resistencia al deslizamiento

Es la capacidad de la mezcla asfáltica para no perder adherencia entre el neumático y la superficie de rodamiento, en particular cuando está húmeda. Una resistencia al deslizamiento baja se relaciona generalmente con las características del agregado y el contenido de asfalto. (Cepeda,2002).

h) Trabajabilidad

Es la propiedad relacionada con la facilidad con que la mezcla asfáltica es colocada y compactada in situ. Una buena mezcla debe ser capaz de permitir su colocación y compactación, sin que se requiera un esfuerzo demasiado grande. Esta propiedad, generalmente depende de uno, o una combinación, de los siguientes factores: características del agregado, la granulometría, el contenido, y la viscosidad del asfalto (Cepeda,2002).

2.1.7 Deterioros en mezclas asfálticas

Cuando una mezcla asfáltica se incorpora a un pavimento como carpeta, está sujeta a múltiples acciones que afectan su vida útil. Estas acciones se relacionan principalmente con el paso de los vehículos y el medio ambiente; y contribuyen en diferente medida al daño de la mezcla. Los principales deterioros en la mezcla asfáltica son: las deformaciones permanentes, el agrietamiento por fatiga, y el agrietamiento por baja temperatura. A continuación, se describen dichos deterioros.

2.1.8 Deformación permanente

Basándose en los resultados de pruebas de caminos e investigaciones del fenómeno de la deformación permanente realizadas por la AASHTO (American Association of State and Highway Officials) en Estados Unidos, algunos investigadores han concordado en que ésta se puede definir como un canal longitudinal, o depresión, que se forma en las huellas

debido a la compresión, movimiento lateral, o ambos, en una o más de las capas que forman el pavimento, como resultado de la aplicación de las cargas del tránsito.

Figura 2. Deformación permanente

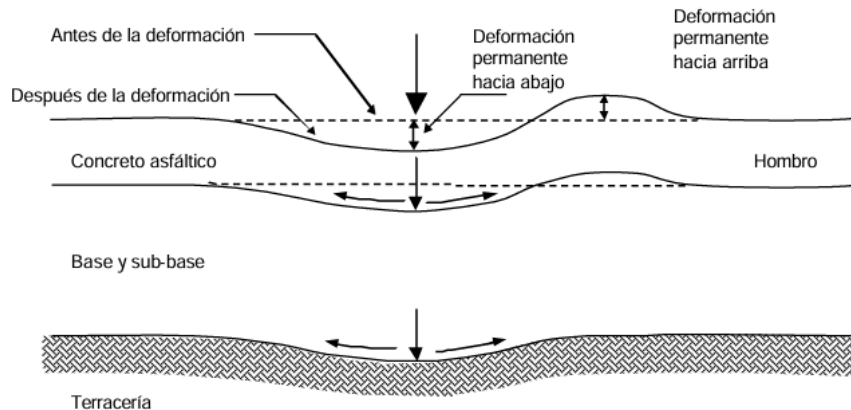


Figura 1.1
Mecanismo típico de deformación permanente en la
travectoria de la rueda externa

Fuente: (Garnica Anguas, 2005)

2.1.9 Asfalto modificado

Está plenamente probado que los asfaltos convencionales poseen propiedades satisfactorias tanto mecánicas como de adhesión en una amplia gama de aplicaciones y bajo distintas condiciones climáticas y de tránsito. sin embargo, el creciente incremento de volumen del tránsito y la magnitud de las cargas, y la necesidad de optimizar las inversiones, provoca que, en algunos casos, las propiedades de los asfaltos convencionales resulten insuficientes. Por ejemplo, con los asfaltos convencionales, aun con los grados más duros, no es posible eliminar el problema de las deformaciones producidas por el tránsito canalizado (ahuellamiento), especialmente cuando se deben afrontar condiciones de alta temperatura. Además, con la simple adopción de asfaltos mas duros se corre el riesgo de fisuraciones por efectos térmicos cuando las temperaturas son muy bajas. (E-asfalto, 2023)

Los asfaltos modificados son el producto de la disolución o incorporación de un aditivo modificador (polímero o no polímero), que son sustancias estables en el tiempo y a cambios de temperatura que se le añaden al material asfáltico para modificar sus propiedades como: susceptibilidad a la temperatura, intervalo de plasticidad, cohesión, respuesta elástica, resistencia al agua y al envejecimiento.

2.1.10 Beneficios de la Modificación del Asfalto

Los principales beneficios que se persiguen con la modificación del asfalto:

- Aumentar la rigidez a altas temperaturas de servicio mejorando la resistencia de las mezclas a la deformación permanente.
- Reducir la rigidez a bajas temperaturas, previniendo la fisuración térmica.
- Aumentar la resistencia a fatiga de las mezclas.
- Mejorar la adhesión con los agregados pétreos.
- Mejorar la cohesión, brindando mejor retención de los agregados en la vida inicial de los tratamientos superficiales.
- Reducir el endurecimiento en servicio, brindando una vida superior a la mezcla, debido a la retención de sus ventajas iniciales.
- Disminuir la susceptibilidad térmica en el rango de temperatura de servicio
- Aumentar la viscosidad a bajas velocidades de corte, permitiendo mejores espesores de película en el agregado de las mezclas abiertas y reduciendo la exudación en tratamientos superficiales.
- Existe una variedad de aditivos que pueden ser exitosos en la mejora de cuando menos una de las propiedades del asfalto, pero. es necesario tener en cuenta que no existe un aditivo que mejore todas las propiedades antes descritas.

(Menéndez Acurio, 2009)

2.1.11 Polímeros

Existen diferentes tipos de polímeros: naturales y artificiales. Algunos de estos materiales son: el almidón, las proteínas, la celulosa, el algodón, las pieles, las fibras sintéticas, los plásticos, los cauchos, las pinturas, los adhesivos, los icopores, etc. En el año de 1926

Herman Staundinger presentó en una reunión anual de físicos y ambientalistas alemanes sus descubrimientos sobre algunos de estos materiales. Su obtención se inició por la deshidrogenación del caucho natural. Staundinger atribuyó el alto peso molecular de estas sustancias a su constitución por cadenas largas de átomos unidas por enlaces covalentes. A estas pequeñas unidades las designó monómeros, y a la estructura resultante polímero. El mayor desarrollo de los polímeros se llevó a cabo durante la Segunda Guerra Mundial. Fue en este momento cuando se obtuvo el caucho sintético. La vulcanización del caucho natural llevada a cabo en América y Asia, y la realizada para la fabricación de las llantas de los vehículos, eran conocidas en el mundo entero, pero su acceso a Alemania durante la guerra presentaba serias dificultades y fue este el motivo principal para el desarrollo de nuevas tecnologías por parte de los alemanes. Carothers había obtenido en Estados Unidos un caucho sintético a partir del Cloropreno (2-cloro 1,3 butadieno). En 1956 Ziegler y Natta recibieron el premio Nobel de Química por la obtención del polipropileno isotáctico, de altísima comercialización en el mundo actual. Los siguientes años desarrollaron materiales como polietileno, polipropileno, policloruro de vinilo o poliestireno y sus copolímeros (Figuerola & Reyes, 2005)

2.1.12 Métodos de diseño

El diseño de mezclas asfálticas en caliente se realiza mediante pruebas de estabilidad, utilizando uno de los siguientes métodos:

- Método Marshall
- Método de Nottingham
- Método Triaxial de Smith
- Investigaciones SHRP (“Strategic Highway Research Program”)

2.1.13 Método Marshall

2.1.13.1 consideraciones preliminares

El Método de dosificación Marshall desarrollado por el Ing. Bruce Marshall, inicialmente fue utilizado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército Norteamericano, actualmente es el método más utilizado para la elaboración de fórmulas de mezcla.

El criterio para conseguir una mezcla satisfactoria está basado en requisitos mínimos de estabilidad, fluencia, densidad y porcentaje de vacíos.

Este método determina el procedimiento para realizar los ensayos de estabilidad y fluencia de mezclas asfálticas preparadas en caliente, utilizando el equipo Marshall, determina características físicas de las mezclas y analiza los parámetros que definen el contenido de asfalto. La estabilidad se determina empleando el principio de corte en compresión semi-confinada, sometiendo a la muestra a esfuerzos de compresión diametral a una temperatura de 60 °C (140 °F). La aplicación de esfuerzos y la rotura de las muestras se consiguen con un dispositivo especialmente proyectado para las prueba de estabilidad.

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

El contenido óptimo de asfalto se determina, de acuerdo a recomendación del Instituto del Asfalto (Institute, 2014).

- La máxima estabilidad,
- La máxima densidad de la mezcla y
- Al volumen de vacíos de aire especificado.

Esta media debe ser verificada en relación al valor de la Fluencia y a los vacíos del agregado mineral (VAM), a fin de asegurar que la mezcla contenga un volumen de asfalto (Vb) suficiente, sin que el volumen de vacíos de aire (Vv) sea reducido a un valor inaceptable. Si no se cumplen las especificaciones, la granulometría del agregado debe ser modificada.

2.1.13.2 Criterios para el proyecto de una mezcla asfáltica

Se debe establecer los criterios que se van a considerar para la preparación de la mezcla, de acuerdo a las especificaciones técnicas que regirán el proyecto:

- ☐ Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla total
- ☐ Porcentaje de vacíos llenados con el asfalto
- ☐ Porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral
- ☐ Valor mínimo de la estabilidad
- ☐ Rango de valores límite de fluencia

Estos criterios se deben ajustar a los valores de proyecto, correspondientes al nivel de tráfico establecido (liviano, mediano y pesado).

- Tráfico liviano ESALs > 104
- Tráfico mediano ESALs de 104 a 106
- Tráfico Pesado ESALs > 106

Es conveniente, en forma previa, analizar la susceptibilidad de la mezcla al agua, para determinar su comportamiento con relación al desplazamiento de la película de ligante por el agua (“stripping”), que depende del porcentaje de vacíos de aire, a través de los cuales la humedad debe ser secada. (Institute, 2014)

2.1.13.3 Equipo

Entre los elementos más importantes del equipo necesario para la elaboración de los núcleos de prueba, se pueden citar los siguientes:

- Horno y placa calentadora eléctrica, para calentar los materiales, Horno aireador para el curado de las mezclas.
- Termómetro blindado de vidrio o dial con varilla para lecturas entre 50 °F (10°C) y 450 °F (232°C).
- Balanza de 2 kg de capacidad, con aproximación a 0,1 g. Balanza de 5 kg con aproximación a 1 g.
- Pedestal para compactación, sobre el cual descansa una placa de acero de 12” x 12” x 1” (305 x 305 x 25 mm).
- Molde de compactación que consta de una base, molde encofrado y collar de extensión. El molde tiene un diámetro interior de 4” (101,6 mm) y una altura aproximadamente 3” (76 mm). La base y el collar están diseñados para intercambiarse ya sea a uno u otro lado del molde.
- Martillo de compactación, que consta de una barra achatada que cae deslizándose sobre una guía y un pisón de cara circular de 3 7/8” (98,4 mm). La barra pesa 10 libras (4,5 kg) y tiene una caída (guía) de 18” de altura.
- Soporte del molde, que consta de un dispositivo de tensión elástica, diseñado para acoplar el molde sobre el pedestal de compactación.
- Extractor de muestra o prensa para extraer la muestra (briqueta) ya compactada.
- Accesorios como cucharas, espátula, baño de agua hirviendo, etc.

2.1.13.4 Descripción del método Marshall

- El método Marshall usa muestras de prueba normalizadas (briquetas) de 2 y ½” de espesor por 4” de diámetro (64 x 102 mm).
- Se selecciona el agregado que cumpla con las especificaciones requeridas. El tipo y grado del asfalto, de acuerdo al tipo de agregado y las condiciones climáticas.
- Para determinar el contenido óptimo de asfalto se preparan y compactan una serie de muestras de prueba (briquetas), con distintos porcentajes de asfalto cuyo rango de variación no debe ser mayor a 0,5%. Como mínimo se debe incluir dos porcentajes por encima y dos por debajo del óptimo de contenido de asfalto estimado.
- En la práctica se observa que el contenido óptimo de asfalto se encuentra alrededor del 5% - 6%, con referencia al peso de los agregados pétreos. Mayores porcentajes deben conducir a una verificación cuidadosa del diseño de la mezcla.
- Para verificar la idoneidad de los datos se deben hacer tres muestras (briquetas) por cada contenido de asfalto. Generalmente para un diseño, se deben tomar 6 porcentajes de asfalto diferentes, por lo cual se requerirán 18 briquetas. Aproximadamente para cada briqueta, se necesitan 1200 g de agregados, por lo cual la cantidad representativa de los agregados, debe tener un peso mínimo de 29 kg (65 lb). Además, se requerirá aproximadamente un galón de asfalto.

2.1.13.5 Preparación de las muestras para ensayo

Número de muestras: Por lo menos 3 para cada contenido de asfalto. Chequeo y preparación de agregados:

- Determinar la gradación de los agregados propuestos, de acuerdo a los métodos de ensayo C-117 y C-136 de la ASTM.
- Determinar el peso específico Bulk y el aparente de los agregados, de acuerdo a los métodos de ensayo C-127 y C-128 de la ASTM.
- Seleccionar la dosificación de agregados que cumpla con la curva de densidad máxima para el tamaño máximo de partículas, además que cumpla el requisito del porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral.

- Calcular los pesos específicos Bulk y aparente de la combinación de agregados elegida.
- Determinación de la temperatura de mezclado y de compactación:

2.1.14 Preparación de las mezclas

Pesar por separado en bandejas, para cada muestra de ensayo, la cantidad adecuada de cada fracción que produzca una bacheada que de como resultado una muestra compactada de $2,5 \pm 0,1$ ” de espesor ($63,5 \pm 1,3$ mm)

Calentar el asfalto a una temperatura lo suficientemente alta para que fluya fácilmente, pero sin que ésta sea mayor que la de mezclado.

Colocar la bandeja de mezclado y su contenido en la balanza y pesar agregando el asfalto necesario. Luego se coloca el palustre en la bandeja y se determina el peso total de los componentes de la mezcla más el equipo de mezclado con aproximación a 0,2 g.

Se mezclan los agregados y el asfalto con el palustre hasta obtener una mezcla homogénea.

2.1.14.1 Compactación de los núcleos de prueba

Colocar toda la mezcla preparada dentro del molde, emparejando la mezcla con la espátula, unas 15 veces alrededor del perímetro y 10 veces en la parte central. Se quita el collar y se alisa suavemente la superficie, hasta obtener una forma ligeramente redondeada. Inmediatamente antes del proceso de compactación la temperatura de la mezcla debe estar muy cercana a los límites de la temperatura de compactación establecida.

Colocar nuevamente el collar de extensión, y ubicarlo en el pedestal de compactación.

Se aplican 75 (35 ó 50) golpes con el martillo, según lo especificado para la categoría de tráfico. Se quitan la base y el collar se le da vuelta y se vuelve a armar el conjunto. Se aplica el mismo número de golpes a la cara opuesta de la muestra. Después de la compactación, se quita la base del molde y se expone la muestra a la temperatura ambiente dentro del molde. Se saca la muestra del molde por medio de un extractor.

2.1.15 Ensayo Marshall

El ensayo debe efectuarse después de transcurridas 16 horas de la compactación.

2.1.15.1 Procedimiento de ensayo

Para complementar el diseño de la mezcla, se deben efectuar los siguientes ensayos y análisis:

- En la muestra compactada:
Peso Específico Bulk.
Análisis de densidad y Vacíos.
Estabilidad y flujo

2.1.15.2 Equipo requerido

Máquina de ensayo Marshall, con dispositivo eléctrico, diseñada para aplicar las cargas a las muestras por medio de pesas de ensayo semicirculares, está equipada con un calibrador provisto de anillo para determinar la carga de ensayo, de un marco de carga para el ensayo de estabilidad y un medidor de flujo, para establecer la deformación bajo la carga máxima de ensayo. Baño de agua con una profundidad mínima de 15 cm (6”), provisto de un termostato para mantener una temperatura de $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.1.16 Pruebas de estabilidad y fluencia

Después de obtenido el Peso Específico Bulk de la mezcla compactada, se procede a la ejecución de los ensayos de estabilidad y fluencia, de la siguiente manera:

- Calibrar el cero del flujómetro, previamente montado sobre uno de los guidores, y luego de insertar la mordaza de 4” debajo del pivote.
- Sumergir la briqueta en baño de agua a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($140\text{ }^{\circ}\text{F}$), durante 30 a 40 minutos.
- Limpiar las guías y la superficie interior del anillo de prueba y lubricar las guías para garantizar que el segmento superior del anillo se deslice libremente sobre ellas. La temperatura de la mordaza debe mantenerse a una temperatura de 21 a $37,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (70 a 100°F), utilizando el baño de agua, si fuese necesario.
- Se saca la muestra del baño de agua, se coloca en la parte inferior de la mordaza, luego se inserta la parte superior de la misma. Se centra el conjunto en el

dispositivo de carga y se coloca el medidor de flujo sobre el guiador superior de la mordaza.

- Aplicar la carga de ensayo a la muestra a una velocidad de deformación constante de 51 mm/min (2 pulg/min), hasta que ocurra la falla. El punto de falla se define como la carga máxima obtenida en el ensayo. El número total de Newtons (libras) necesario para producir la falla de la muestra se define como el valor de la estabilidad Marshall. La deformación vertical del espécimen producida por la carga, es el valor del Flujo (fluencia).
- Durante el ensayo de estabilidad, sujétese firmemente el medidor de flujo en su posición sobre el guiador, y retírese en el instante mismo que la carga empieza a decrecer, se anota el valor de flujo en unidades de 0,25 mm (0.01"). Por ejemplo si la muestra se deforma 3,8 mm (0,15"), su fluencia será 15.
- Se promedian los valores de estabilidad y flujo para todas las muestras con cada contenido de ligante.

Las pruebas de estabilidad y fluencia, a partir de la extracción de los núcleos del baño, no deben durar un tiempo mayor a 30 segundos.

2.1.17 Presentación de resultados

Los valores de estabilidad, flujo y porcentaje de vacíos en la mezcla, se procesan como se indica a continuación:

- a. Promediar los valores de flujo y estabilidad para todas las muestras de un porcentaje de asfalto dado. Valores errados en comparación con los otros, no se incluirán en el promedio.
- b. Se elaboran gráficos, para presentar las relaciones entre los siguientes valores:
 - Estabilidad vs. Porcentaje de Asfalto
 - Porcentaje de Vacíos en la Mezcla vs. Porcentaje de Asfalto
 - Densidad vs. Porcentaje de Asfalto

(Facultad de Ciencias y Tecnología, 2004)

2.1.18 Microfibras

Las microfibras son fibras de tamaño muy reducido que se utilizan como refuerzo secundario en diversos materiales de construcción. Pueden estar compuestas por materiales sintéticos (como polímeros) o naturales (como celulosa o fibras vegetales), y su función principal es mejorar las propiedades mecánicas del material matriz. Al distribuirse de forma tridimensional, ayudan a controlar la formación de fisuras, aumentar la resistencia al impacto, reducir la deformación plástica y prolongar la durabilidad de las estructuras, especialmente frente a condiciones de carga, humedad o temperatura extremas.

2.1.18.1 Cómo funcionan las microfibras

Las microfibras actúan como pequeños refuerzos dispersos dentro del hormigón o el mortero. A medida que el material fragua, las fibras se entrelazan y anclan, formando una red tridimensional que distribuye uniformemente las cargas y resiste las tensiones. (Reyes Ortiz, Troncoso Rivera, & Alberto, 2005)

2.1.18.2 Qué beneficios aportan las microfibras

Las microfibras sintéticas ofrecen una amplia gama de beneficios en la construcción, incluyendo:

Reducción de la fisuración: Las microfibras controlan y minimizan la formación de grietas en el hormigón, especialmente en las primeras etapas de fraguado y endurecimiento. Esto se traduce en una mayor resistencia a la rotura y al agrietamiento por contracción, flexión o impacto.

Mejora de la ductilidad: Las microfibras aumentan la capacidad del material para deformarse sin romperse, lo que lo hace más resistente a los golpes, vibraciones y movimientos sísmicos.

Incremento de la resistencia a la abrasión: Las microfibras refuerzan la superficie del material haciéndola más resistente al desgaste y la erosión. Esto es especialmente útil en

pavimentos, suelos industriales y otras aplicaciones donde el material está expuesto a un alto tráfico o roce continuo.

Mejora de la trabajabilidad: Las microfibras mejoran la fluidez y trabajabilidad de la mezcla de hormigón, facilitando su colocación y compactación.

Aumento de la durabilidad: Las microfibras prolongan la vida útil de las estructuras de hormigón al retrasar la aparición de daños y la necesidad de reparaciones.

2.1.18.3 Microfibras sintéticas Fibermesh 150

Las microfibras sintéticas Fibermesh 150 son un aditivo innovador empleado en la formulación de hormigones y morteros, diseñado para optimizar el desempeño estructural y prolongar la vida útil de las construcciones. Estas fibras, elaboradas a partir de un polímero termoplástico virgen de origen sintético, destacan por su alta resistencia química y capacidad para integrarse eficazmente en la matriz cementicia. Con longitudes que oscilan entre los 12 y 18 mm y un diámetro ultrafino (inferior a 50 micras), su diseño permite una dispersión homogénea durante el mezclado, generando una red tridimensional multifuncional que actúa desde la etapa plástica del hormigón hasta su estado endurecido.

2.1.18.4 Uso de las fibras

Las fibras son utilizadas regularmente como refuerzo secundario en concretos, controlando la fisuración del material, mejorando la resistencia de impacto y controlando de manera acertada la retracción de los concretos; entre las virtudes que se conocen de las fibras en concretos se referencia la de Alfes (2000): “Los concretos reforzados con fibras van adquirido mayor importancia en los últimos años. Fibras con bajo módulo elástico como las fibras sintéticas, son una ventaja en concretos jóvenes cuando se trata de evitar el agrietamiento por contracción temprana”. En mezclas asfálticas no se han desarrollado estudios en los cuales se evalué el comportamiento de estas fibras frente al comportamiento dinámico de la estructura del pavimento, es por esto que se plantea esta investigación para tener una referencia del comportamiento del agregado, fibras y asfalto.

Figura 3. Bolsa de microfibras sintéticas Fibermesh 150



Fuente: Elaboración propia

2.1.18.5 Información del producto

Base Química Polipropileno

Empaques

Bolsas hidrosolubles de 0.6 kg, 20 bolsas por caja.

Bolsas hidrosolubles de 0.75 kg, 18 bolsas por caja.

Vida útil

Por la naturaleza del empaque (hidrosoluble) se recomienda darle uso dentro de los 5 años a partir de la fecha de fabricación.

Condiciones de Almacenamiento Sika® Fibermesh®-150

se debe almacenar en un ambiente seco, en su envase original y cerrado.

Evitar contacto directo con la intemperie.

Apariencia / Color Microfibra sintética monofilamento de color blanco.

Dimensiones ▪ Longitud: Entre 12.7 mm y 19 mm

Diámetro: entre 0,03 - 0,05 mm.

Densidad 0.91 g/cm³

Punto de Fusión -172 °C

Información técnica

Specific tensile strength 165 MPa

Módulo de Elasticidad 1.4 GPa

Elongación de Rotura > 250%

Absorción de Agua No tiene absorción.

Resistencia a la Alcalinidad Alta

Figura 4. Micro fibras sintéticas Fibermesh 150



Fuente: Elaboración propia

2.1.18.6 Información de aplicación

Dosificación Recomendada La dosis de Sika® Fibermesh®-150 varía según el tipo de aplicación y los requisitos de rendimiento y desempeño. La proporción de dosis recomendada estándar para hormigón está entre 0,5 - 0,9 kg/m³ para reducir la fisuración por contracciones plásticas. Al menos 0.9kg/m³ para mejorar la resistencia al impacto y entre 1 - 2 kg/m³ para mejorar la resistencia al fuego.

2.2 Marco referencial

Gonzáles Seijas, Maria Julia, Universidad Ricardo Palma, 2019, “Evaluación del comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica en caliente mejorada con fibra acrílica respecto a la mezcla asfáltica convencional”

En conclusión, la incorporación de fibra acrílica en las mezclas asfálticas se presenta como una alternativa innovadora y efectiva para mejorar el rendimiento y la durabilidad de los pavimentos. Los beneficios en términos de resistencia al agua, a la deformación, durabilidad, trabajabilidad, reducción del agrietamiento y mejora de la adherencia hacen de esta tecnología una opción atractiva para el futuro de la construcción vial.

Anllyla Grey Chavez Hernandez, Universidad Católica Sedes Sapientiae, 2023 “Determinación de la influencia de fibras en las propiedades físico mecánicas de diseño, para rehabilitación de pavimento flexible”

La investigación demostró que la adición de fibras de polietileno a las mezclas asfálticas mejora significativamente sus propiedades físicas y mecánicas, particularmente la resistencia a la estabilidad, la cual aumenta exponencialmente con mayores porcentajes de fibra.

María Rene Mendivil Velásquez, U.A.J.M.S, 2016, “Análisis técnico y económico de la adición en diferentes porcentajes de residuo de caucho en mezclas asfálticas en pavimento flexible”

Según los datos analizados, se llegó a la conclusión de que la incorporación de residuos de caucho en las mezclas asfálticas representa una alternativa viable y beneficiosa para la construcción de carreteras y pavimentos. Esta conclusión se sustenta en las mejoras significativas que aporta el caucho en las propiedades fundamentales del asfalto, como la estabilidad y la fluencia de la mezcla.

Martínez Silvia Noemí, U.A.J.M.S, 2018, “Análisis experimental sobre el diseño de pavimentos reforzado con geo sintéticos”,

Luego del análisis de los resultados obtenidos, se valida plenamente la hipótesis inicial que la utilización de geotextiles como material de refuerzo en la capa de rodadura es una alternativa viable y efectiva para prevenir la formación de grietas y extender la vida útil del pavimento.

2.3 Marco normativo

Las mezclas asfálticas en caliente son materiales ampliamente utilizados en la construcción de pavimentos debido a su versatilidad, economía y durabilidad. Sin embargo, estas mezclas presentan ciertas limitaciones que pueden afectar su rendimiento a largo plazo.

Tabla 3. Normas aplicadas en los ensayos

Normas aplicadas para los agregados, cemento asfáltico y ensayos.		
Ensayos	Norma ASTM	Noma AASTHO
Granulometría	C-136	T-27
Desgaste mediante la máquina de los ángeles	C-131	T-96
Peso específico y absorción de agua en agregados gruesos	C-130	T-85
Peso específico y absorción de agua en agregados finos	C-128	T-84
Peso unitario	C-29	T-19
Equivalente de arena	D-2419	T-176
Cemento asfáltico convencional		
Ensayos	Norma ASTM	Norma AASTHO
Penetración	D-5	T-49
Ductilidad	D-445	T-72
Punto de inflamación	D-92	T-48
Peso específico	D-70	T-43
Punto de ablandamiento	D-36	T-53

Fuente: Elaboración propia

2.4 Análisis y posición del investigador.

Fisuración, la deformación y el desgaste prematuro. La incorporación de microfibras sintéticas en las mezclas asfálticas en caliente se presenta como una alternativa innovadora para mejorar las propiedades del material y extender la vida útil de los pavimentos.

la selección del tema de mejorar las mezclas asfálticas en caliente con microfibras sintéticas se basa en su relevancia, novedad, interés personal, disponibilidad de recursos y potencial de aplicación práctica. Abordar este tema me permite contribuir al conocimiento y la práctica en el campo de la ingeniería de pavimentos, con un impacto positivo en la construcción y el mantenimiento de la infraestructura vial.

CAPÍTULO III

DISEÑO METODOLÓGICO Y

RELEVAMIENTO DE LA

INFORMACIÓN

CAPITULO III:

DISEÑO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.

3.2 Criterios de Diseño Metodológico.

3.2.1 Unidad de muestra

La unidad de muestra será cada briqueta ensayada en el laboratorio de asfaltos.

3.2.2 Población

En la presente investigación la población a tomarse en cuenta serán todos los ensayos realizados en el laboratorio

3.2.3 Muestra

La muestra que representa la población de este trabajo de investigación será:

3.2.3.1 Caracterización de los agregados:

- Granulometría de áridos
- Desgaste de los ángeles
- Peso específico y absorción de agua en agregados gruesos
- Peso específico y absorción de agua en agregados finos
- Equivalente de arena
- Porcentaje de cara fracturada
- Determinación de cara chata y alargada

3.2.3.2 Caracterización del cemento asfáltico:

- Penetración
- Peso específico
- Punto de ablandamiento
- Punto de inflamación
- Ductilidad
- Propiedades mecánicas:
- Estabilidad

- Fluencia
- Densidad máxima
- % de Vacíos de aire
- % de Vacíos de V.A.M. (vacíos de agregado mineral)
- % de Vacíos de R.B.V. (relación betún vacíos)

3.2.4 Tamaño de la muestra

Se utilizará la técnica de muestreo estratificado.

$$n = \frac{\sum_{i=1}^n N_i * \sigma^2}{N * \left(\frac{e}{Z}\right)^2 + \frac{\sum_{i=1}^n N_i * \sigma^2}{N}}$$

Fuente: Crochan (1977)

Donde:

Tamaño de muestra "n" es desconocido.

Población: N = 168 ensayos establecidos para la investigación.

Nivel de confianza NC = 95% de acuerdo a ello la variable estandarizada es $z = 1,96$

Nivel de confianza %	Valor del nivel de confianza Z
50	0.574
80	1.280
85	1.444
90	1.640
95	1.960
99	2.680

El margen de error es: $e = 0.05\%$

La varianza de $\sigma^2 = 0.15$

Tabla 4. Cálculo de muestra estratificada.

Ensayos	Cantidad	σ^2	$N \cdot \sigma^2$	fi	ni	Valor
Caracterización de los agregados pétreos						
Granulometría de áridos	9	0.15	1.35	0.083	6.128	6
Desgaste de los angeles	6	0.15	0.90	0.056	4.086	4
Pes específico y absorción de agua en agregados gruesos	6	0.15	0.90	0.056	4.086	4
Peso específico y absorción de agua en agregados finos	3	0.15	0.45	0.028	2.043	4
equivalente de arena	3	0.15	0.45	0.028	2.043	4
Porcentaje de cara fracturada	6	0.15	0.90	0.056	4.086	4
Determinación de cara chata	6	0.15	0.90	0.056	4.086	4
sumatoria	39		5.85	0.36	26.56	30
Caracterización del cemento asfáltico						
Penetración	3	0.15	0.45	0.028	2.043	2
Peso específico	3	0.15	0.45	0.028	2.043	2
Punto de ablandamiento	3	0.15	0.45	0.028	2.043	2
Punto de inflamación	3	0.15	0.45	0.028	2.043	2
Ductilidad	3	0.15	0.45	0.028	2.043	2
sumatoria	15		2.25	0.14	10.21	10
propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas						
Estabilidad y Fluencia	30	0.15	4.50	0.278	20.428	20
% de Vacíos de aire	6	0.15	0.90	0.056	4.086	4
% de Vacíos de V.A.M. (vacíos de mineral)	6	0.15	0.90	0.056	4.086	4
% de vacíos de R.B.V(relación betún vacíos)	6	0.15	0.90	0.056	4.086	4
Densidad	6	0.15	0.90	0.056	4.086	4
sumatoria	54		8	0.500	36.771	36
Totales	108		16.20		74	76

Fuente: Elaboración propia.

Remplazando en la formula se tiene

$$n = \frac{16.20}{108 * \left(\frac{0.05}{1.96}\right)^2 + \frac{16.20}{108}} = 73.54 \approx 75 \text{ ensayos}$$

3.2.5 Control y Validación Interna

Para garantizar la fiabilidad y reproducibilidad de los resultados obtenidos en los ensayos de mezclas asfálticas modificadas con microfibras Fibermesh 150, se implementaron diversas estrategias destinadas a minimizar la influencia de variables externas y asegurar la consistencia en los procedimientos experimentales:

- Selección y acopio uniforme de materiales: Se coordinó la obtención del cemento asfáltico y los agregados pétreos otorgados por la alcaldía municipal de la ciudad de Tarija y la provincia Cercado, asegurando que todos los materiales utilizados provinieran de una única fuente. Esta medida buscó mantener la homogeneidad en

las propiedades físico-mecánicas de los componentes a lo largo de todo el proceso experimental.

- Condiciones controladas de laboratorio: Los ensayos se llevaron a cabo en un ambiente cerrado, con control de temperatura y humedad, para evitar que las condiciones ambientales externas afectaran las propiedades de las mezclas asfálticas durante su preparación y ensayo.

Las principales acciones para neutralizar las variables extrañas son:

- Consistencia en equipos y metodología: Se utilizó el mismo equipo y se siguió una metodología uniforme para la elaboración de todas las briquetas, garantizando la reproducibilidad de los resultados y minimizando la variabilidad introducida por cambios en los procedimientos o instrumentos.
- Capacitación en manejo de instrumentos y técnicas de medición: Se llevó a cabo una capacitación específica en el manejo adecuado de los instrumentos y equipos de laboratorio, así como en las técnicas de medición pertinentes, para asegurar la precisión y exactitud en la obtención de datos.
- Calibración y mantenimiento de equipos: Se verificó que todos los equipos utilizados estuvieran debidamente calibrados y en óptimas condiciones de funcionamiento, conforme a las especificaciones técnicas y normativas aplicables, para garantizar la validez de las mediciones realizadas.

Estas acciones fueron fundamentales para asegurar que los resultados obtenidos reflejaran de manera precisa el efecto de la incorporación de microfibras en las mezclas asfálticas, sin la interferencia de factores externos o inconsistencias en el proceso experimental.

3.2.6 Caracterización de los materiales

3.2.6.1 Ubicación y fuente de los materiales a utilizarse

Agregados pétreos: los agregados pétreos utilizados en la presente investigación fueron suministrados por la Alcaldía Municipal de Tarija, específicamente para su uso en obras de pavimentación y bacheo. Estos materiales provienen de la Chancadora Garzón, situada en la comunidad de San Mateo, perteneciente al municipio de Cercado, en el departamento de Tarija, Bolivia.

San Mateo se encuentra aproximadamente a 5 kilómetros al norte de la ciudad de Tarija, con coordenadas geográficas de 21°28'14.98" S y 64°45'3.27" O . Esta comunidad, ubicada a una altitud de 2,139 metros sobre el nivel del mar, cuenta con una población aproximada de 1,740 habitantes y se dedica principalmente a actividades agrícolas

La Chancadora Garzón se localiza en las proximidades del río sella, lo que facilita el acceso a una abundante fuente de áridos. La elección de esta fuente de agregados se fundamenta en la necesidad de garantizar la homogeneidad y calidad de los materiales utilizados en los ensayos de laboratorio, asegurando así la validez y reproducibilidad de los resultados obtenidos

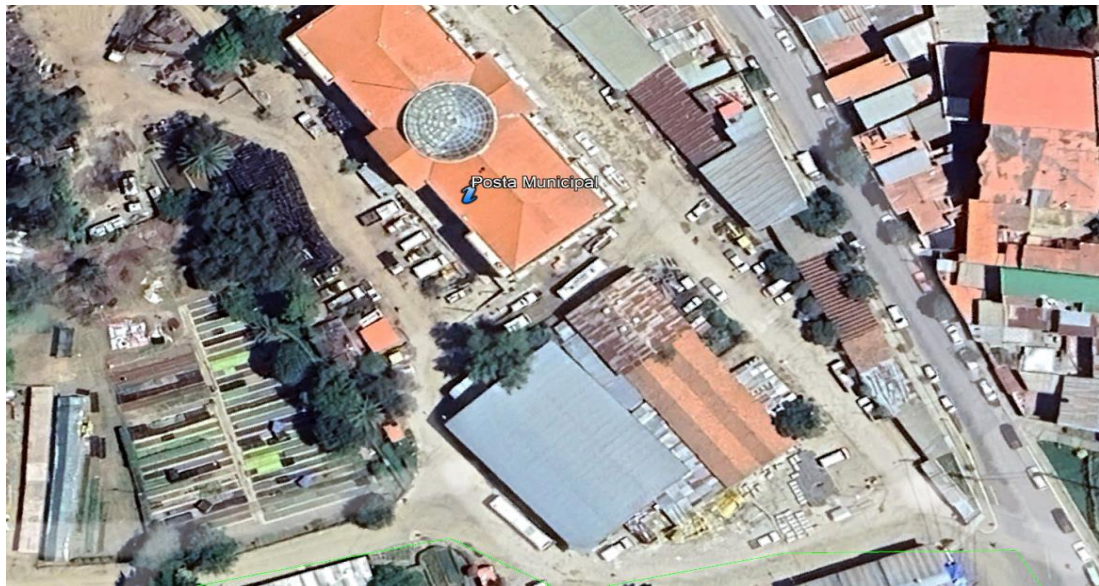
Figura 5. Imagen satelital de la de la Chancadora Garzon.



Fuente: Google Earth 2025

Cemento asfáltico.- El cemento asfáltico utilizado fue proporcionado por la alcaldía municipal de la ciudad de Tarija y la provincia Cercado con las características de ser un asfalto C.A 85-100 de procedencia peruana. Utilizado para la pavimentación de las calles de la ciudad de Tarija. La planta de calentamiento del cemento asfáltico se encuentra ubicado en la ciudad de Tarija, provincia Cercado zona barrio El Carmen a 319713,95 E y 7618550,46 S

Figura 6. Ubicación de la posta municipal de la provincia Cercado



Fuente: Google Earth 2025

Microfibra Sintética Sika Fibermesh 150.- La microfibra se la obtuvo de CONCRETAR LTDA. Distribuidor oficial de productos sika con instalaciones en el departamento de Tarija, con número de contacto: 6675500, dirección: Av. España N° 380, entre Delfín Pino y Av. Belgrano. Barrio Villa Fátima y correo electrónico: concretar.tarija@gmail.com

Figura 7. Ubicación de CONCRETAR LTDA.



Fuente: Google Earth 2025

3.2.7 Ensayo de granulometría (AASHTO T-27) (ASTM C-136).

Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos

El propósito de este proceso de tamizado es determinar la distribución granulométrica de los agregados (gruesos y finos) en una muestra seca, mediante el uso de una serie de tamices estandarizados (según normas ASTM C136 o AASHTO T27) dispuestos en orden decreciente de abertura, desde el tamiz de mayor luz de malla hasta el de menor. Este análisis es fundamental para garantizar que la gradación de los agregados cumpla con las especificaciones técnicas requeridas en la formulación de mezclas asfálticas calientes, ya que una distribución adecuada de partículas influye directamente en la compactación, resistencia mecánica y durabilidad del concreto asfáltico, especialmente al incorporar aditivos como las microfibras Sika Fibermesh 150, las cuales pueden interactuar con la matriz granular y modificar su comportamiento. Adicionalmente

Tabla 5. Datos Granulométricos de los Agregados

		GRAVA			GRAVILLA			ARENA		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Tamices		Peso Ret	Peso Ret	Peso Ret	Peso Ret	Peso Ret	Peso Ret	Peso Ret	Peso Ret	Peso Ret
(pulg)	(mm)									
1"	25.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3/4"	19	137.22	164.65	177.60	0	0	0	0	0	0
1/2"	12.5	2986.94	2884.77	2733.22	41.96	37.51	45.88	0	0	0
3/8"	9.5	1434.44	1457.26	1427.31	719.50	657.29	666.89	0	0	0
Nº4	4.75	352.10	404.42	546.21	3018.85	3022.52	3260.89	214.73	166.89	130.84
Nº8	2.36	89.30	88.90	115.66	1049.40	1083.00	834.16	1120.79	987.74	908.89
Nº10	2	0	0	0	170.29	199.69	192.19	239.20	233.13	236.73
Nº16	1.18	0	0	0	0	0	0	454.31	469.93	481.65
Nº30	0.6	0	0	0	0	0	0	472.25	531.65	538.11
Nº40	0.425	0	0	0	0	0	0	734.41	792.63	852.15
Nº50	0.3	0	0	0	0	0	0	479.08	499.03	486.94
Nº100	0.15	0	0	0	0	0	0	970.11	1015.69	1039.17
Nº200	0.075	0	0	0	0	0	0	298.04	245.99	306.99
BASE	-	0	0	0	0	0	0	17.08	57.31	18.53

Fuente: Elaboración propia

- Determinación del % Retenido Acumulado y el % Que Pasa del Total

Usando las siguientes expresiones se pudo determinar la curva granulométrica.

Retenido Acumulado

$$\text{Retenido Acumulado}_A = \text{Retenido}_A + \text{Retenido acumulado}_{A-1}$$

Donde:

Retenido acumulado [A]= Material que se encuentra retenido en un respectivo tamiz más el retenido acumulado del tamiz anterior.

Retenido [A]= Material que se encuentra retenido en el tamiz de análisis.

Retenido acumulado [A-1]= Material retenido acumulado en el tamiz anterior al tamiz de análisis.

$$\text{Retenido Acumulado (3/4")} = 137 + 0 = 137 \text{ g}$$

$$\text{Retenido Acumulado (1/2")} = 2986.94 + 137 = 3124.16 \text{ g}$$

$$\text{Retenido Acumulado (3/8")} = 1434.44 + 3124.16 = 4558.60 \text{ g}$$

$$\text{Retenido Acumulado (Nº4)} = 352.1 + 4558.60 = 4910.70 \text{ g}$$

$$\text{Retenido Acumulado (Nº8)} = 89.3 + 4910.70 = 5000 \text{ g}$$

Porcentaje retenido acumulado

$$\% \text{ Retenido acumulado} = \frac{\text{Retenido acumulado} * 100}{\text{MT}}$$

Donde:

%Retenido Acumulado= Porcentaje de material retenido acumulado en el tamiz de análisis.

Retenido acumulado= Material retenido acumulado en el tamiz de análisis.

MT= Cantidad total de material

Muestra total= 5000 g

$$\% \text{ Retenido Acumulado (3/4")} = \frac{137.22 * 100}{5000} = 2.74\%$$

$$\% \text{ Retenido Acumulado (1/2")} = \frac{3124.16 * 100}{5000} = 62.48\%$$

$$\% \text{ Retenido Acumulado (3/8")} = \frac{4558.60 * 100}{5000} = 91.17\%$$

$$\% \text{ Retenido Acumulado (Nº4)} = \frac{4910.70 * 100}{5000} = 98.21\%$$

$$\% \text{ Retenido Acumulado (Nº8)} = \frac{5000 * 100}{5000} = 100\%$$

Porcentaje que pasa

$$\% \text{ Que pasa} = 100\% - \% \text{ Retenido Acumulado}$$

Donde:

%Que pasa= Porcentaje de material que pasa por el tamiz de análisis.

%Retenido acumulado= Porcentaje del retenido acumulado en el tamiz de análisis.

$$\% \text{ Que Pasa } (3/4") = 100\% - 2.74\% = 97.26\%$$

$$\% \text{ Que Pasa } (1/2") = 100\% - 62.48\% = 37.52\%$$

$$\% \text{ Que Pasa } (3/8") = 100\% - 91.17\% = 8.83\%$$

$$\% \text{ Que Pasa } (N^{\circ}4) = 100\% - 98.21\% = 1.79\%$$

$$\% \text{ Que Pasa } (N^{\circ}8) = 100\% - 100\% = 0\%$$

Siguiendo el mismo procedimiento para todas las granulometrías de los agregados se obtuvo los siguientes resultados.

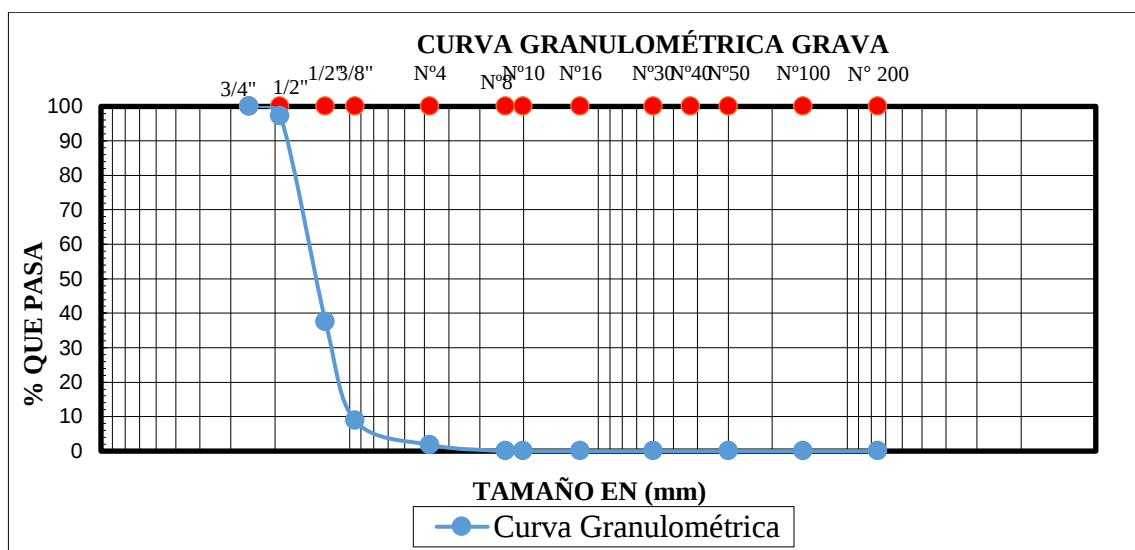
Resultados granulométricos

Tabla 6. Primer ensayo de granulometría de la grava

Tamices	tamaño [mm]	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.0	137.22	137.22	2.74	97.26
1/2"	12.5	2986.94	3124.16	62.48	37.52
3/8"	9.50	1434.44	4558.60	91.17	8.83
Nº4	4.75	352.10	4910.70	98.21	1.79
Nº8	2.36	89.30	5000.00	100.00	0.00
Nº10	2.00	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº16	1.18	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº30	0.60	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº50	0.30	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº100	0.15	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº200	0.075	0.00	5000.00	100.00	0.00
BASE	-	0.00	5000.00	100.00	0.00
SUMA		5000.000			
PÉRDIDAS		0.0			

Fuente: Elaboración propia

Figura 8. Curva granulométrica – grava.



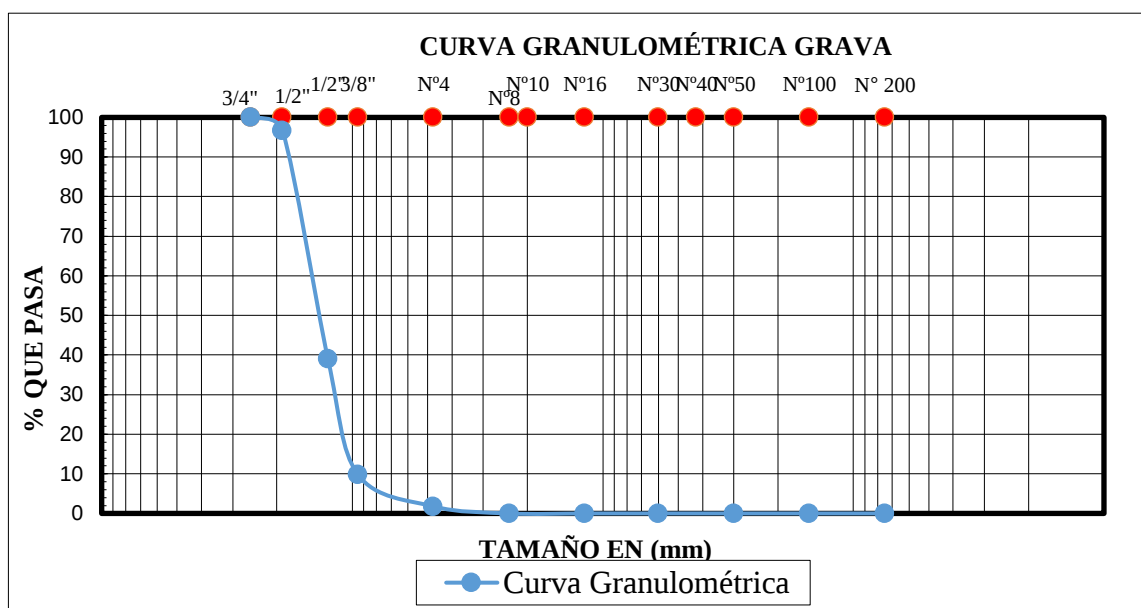
Fuente: Elaboración propia

Tabla 7. Segundo ensayo de granulometría de la grava

Tamices	tamaño [mm]	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.0	164.65	164.65	3.29	96.71
1/2"	12.5	2884.77	3049.42	60.99	39.01
3/8"	9.50	1457.26	4506.68	90.13	9.87
N°4	4.75	404.42	4911.10	98.22	1.78
N°8	2.36	88.90	5000.00	100.00	0.00
N°16	1.18	0.00	5000.00	100.00	0.00
N°30	0.60	0.00	5000.00	100.00	0.00
N°50	0.30	0.00	5000.00	100.00	0.00
N°100	0.15	0.00	5000.00	100.00	0.00
N°200	0.075	0.00	5000.00	100.00	0.00
BASE	-	0.00	5000.00	100.00	0.00
SUMA		5000.00			
PÉRDIDAS		0.0			

Fuente: Elaboración propia

Figura 9. Curva granulométrica – grava.



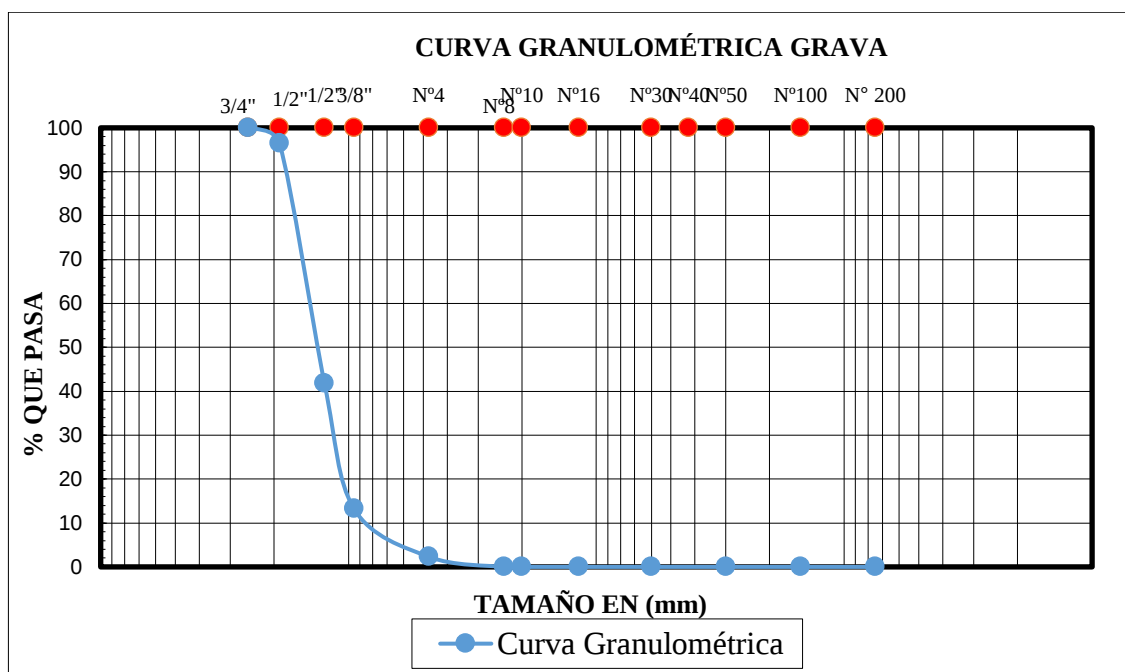
Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Tercer ensayo de granulometría de la grava

Tamices	tamaño [mm]	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.0	177.60	177.60	3.55	96.45
1/2"	12.5	2733.22	2910.82	58.22	41.78
3/8"	9.50	1427.31	4338.13	86.76	13.24
Nº4	4.75	546.21	4884.34	97.69	2.31
Nº8	2.36	115.66	5000.00	100.00	0.00
Nº10	2.00	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº16	1.18	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº30	0.60	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº50	0.30	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº100	0.15	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº200	0.075	0.00	5000.00	100.00	0.00
BASE	-	0.00	5000.00	100.00	0.00
SUMA		5000.00			
PÉRDIDAS		0.0			

Fuente: Elaboración propia.

Figura 10. Curva granulométrica – grava.



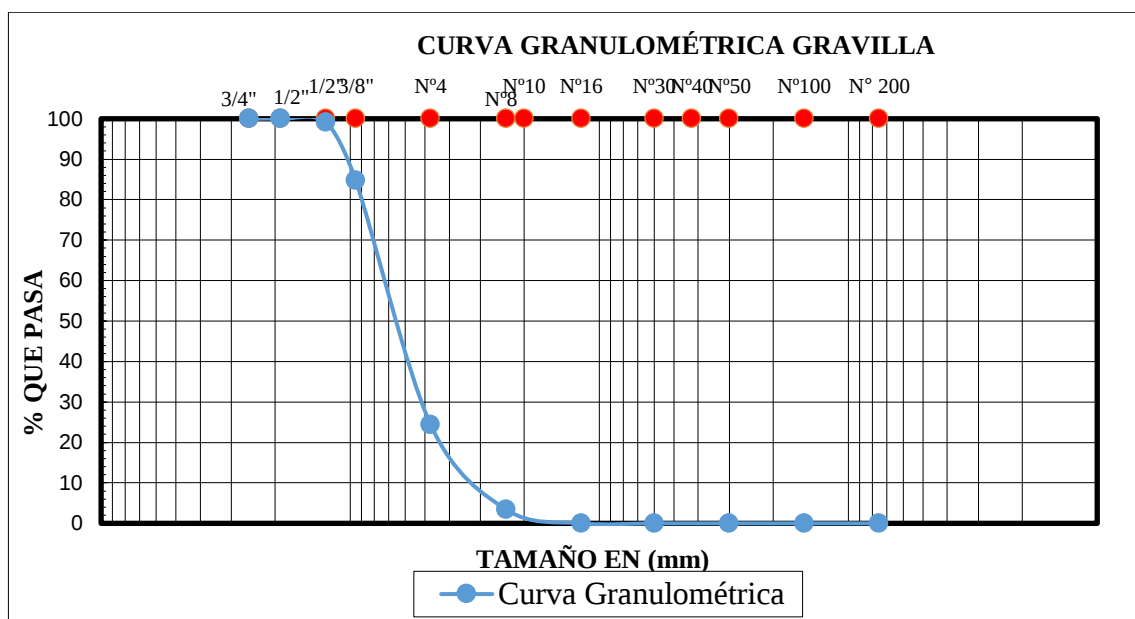
Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Primer ensayo de granulometría de la grava

Tamices	tamaño [mm]	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.0	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.5	41.96	41.96	0.84	99.16
3/8"	9.50	719.50	761.46	15.23	84.77
Nº4	4.75	3018.85	3780.31	75.61	24.39
Nº8	2.36	1049.40	4829.71	96.59	3.41
Nº16	1.18	170.29	5000.00	100.00	0.00
Nº30	0.60	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº50	0.30	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº100	0.15	0.00	5000.00	100.00	0.00
Nº200	0.075	0.00	5000.00	100.00	0.00
BASE	-	0.00	5000.00	100.00	0.00
SUMA		5000.0			
PÉRDIDAS		0.0			

Fuente: Elaboración propia.

Figura 11. Curva granulométrica – gravilla.



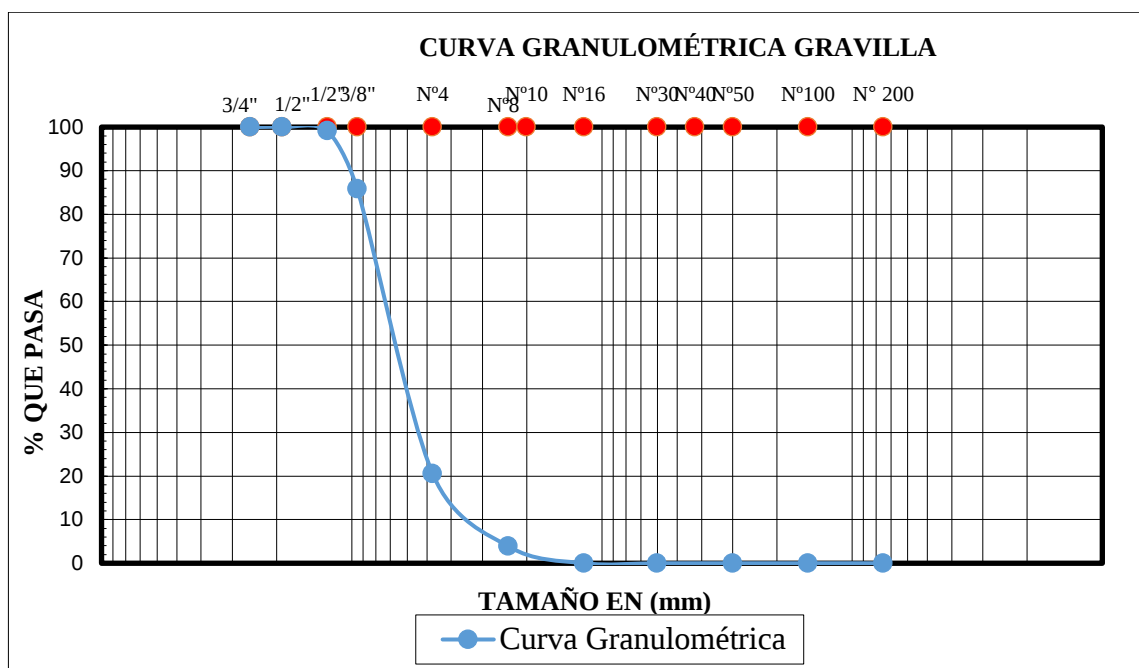
Fuente: Elaboración propia

Tabla 10. Segundo ensayo de granulometría de la gravilla

Tamices	tamaño [mm]	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.0	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.5	37.51	37.51	0.75	99.25
3/8"	9.50	657.29	694.79	13.90	86.10
N°4	4.75	3022.52	3717.31	74.35	25.65
N°8	2.36	1083.00	4800.31	96.01	3.99
N°16	1.18	199.69	5000.00	100.00	0.00
N°30	0.60	0.00	5000.00	100.00	0.00
N°50	0.30	0.00	5000.00	100.00	0.00
N°100	0.15	0.00	5000.00	100.00	0.00
N°200	0.075	0.00	5000.00	100.00	0.00
BASE	-	0.00	5000.00	100.00	0.00
SUMA		5000.0			
PÉRDIDAS		0.0			

Fuente: Elaboración propia

Figura 12. Curva granulométrica – gravilla.



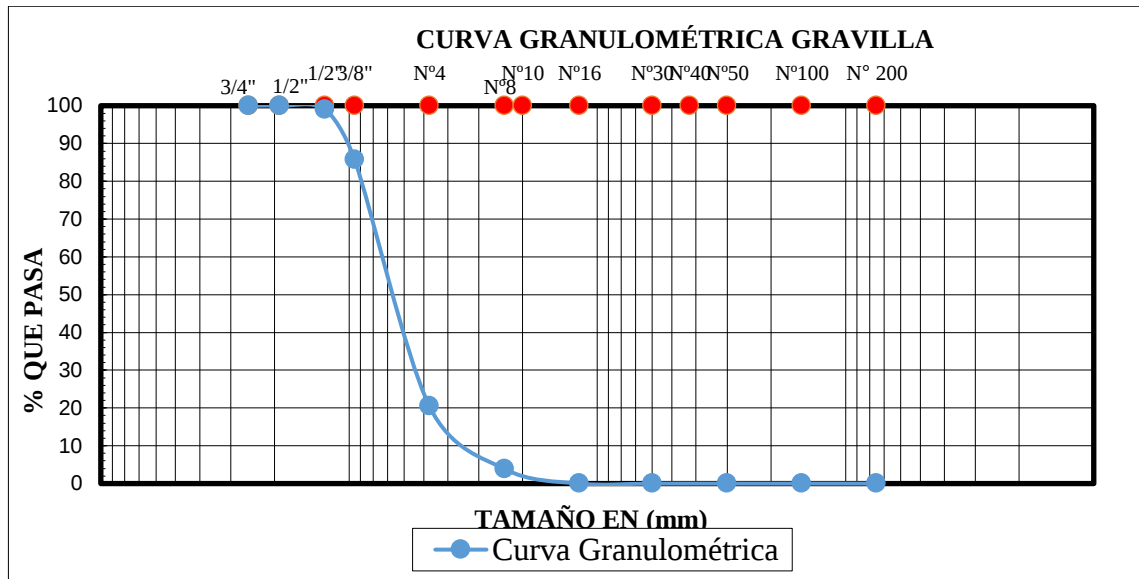
Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Tercer ensayo de granulometría de la gravilla

Tamices	tamaño [mm]	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.0	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.5	45.88	45.88	0.92	99.08
3/8"	9.50	666.89	712.76	14.26	85.74
N°4	4.75	3260.89	3973.65	79.47	20.53
N°8	2.36	834.16	4807.81	96.16	3.84
N°16	1.18	192.19	5000.00	100.00	0.00
N°30	0.60	0.00	5000.00	100.00	0.00
N°50	0.30	0.00	5000.00	100.00	0.00
N°100	0.15	0.00	5000.00	100.00	0.00
N°200	0.075	0.00	5000.00	100.00	0.00
BASE	-	0.00	5000.00	100.00	0.00
SUMA		5000.0			
PÉRDIDAS		0.0			

Fuente: Elaboración propia

Figura 13. Curva granulométrica – gravilla



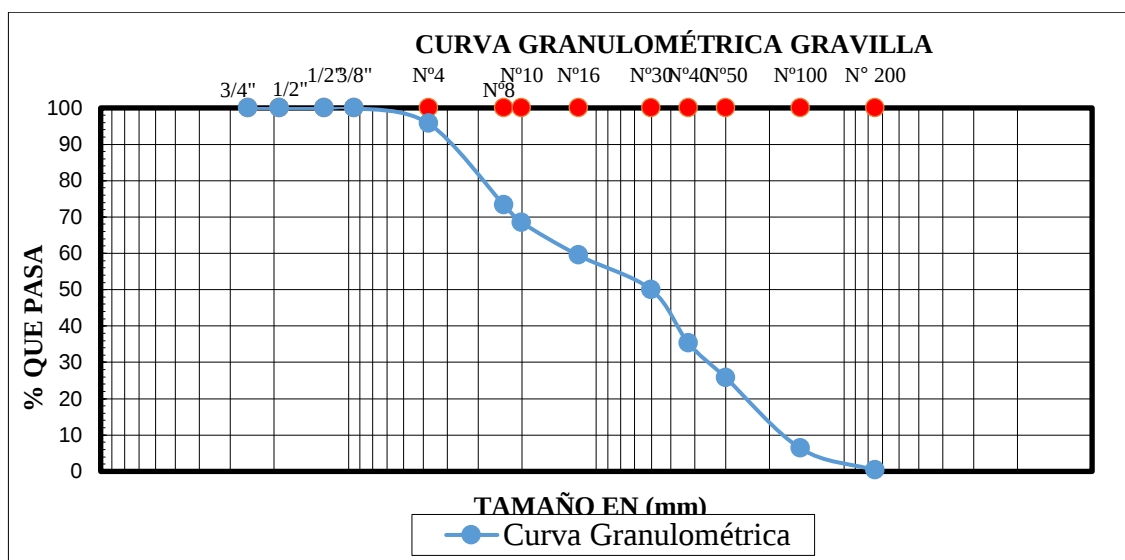
Fuente: Elaboración propia

Tabla 12. Primer ensayo de granulometría de la arena.

Tamices	tamaño [mm]	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.0	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.5	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.50	0.00	0.00	0.00	100.00
Nº4	4.75	214.73	214.73	4.29	95.71
Nº8	2.36	1120.79	1335.53	26.71	73.29
Nº10	2.00	239.20	1574.72	31.49	68.51
Nº16	1.18	454.31	2029.03	40.58	59.42
Nº30	0.60	472.25	2501.28	50.03	49.97
Nº40	0.43	734.41	3235.70	64.71	35.29
Nº50	0.30	479.08	3714.77	74.30	25.70
Nº100	0.15	970.11	4684.88	93.70	6.30
Nº200	0.075	298.04	4982.92	99.66	0.34
BASE	-	17.08	5000.00	100.00	0.00
SUMA		5000.0			
PÉRDIDAS		0.0			

Fuente: Elaboración propia

Figura 14. Curva granulométrica – arena.



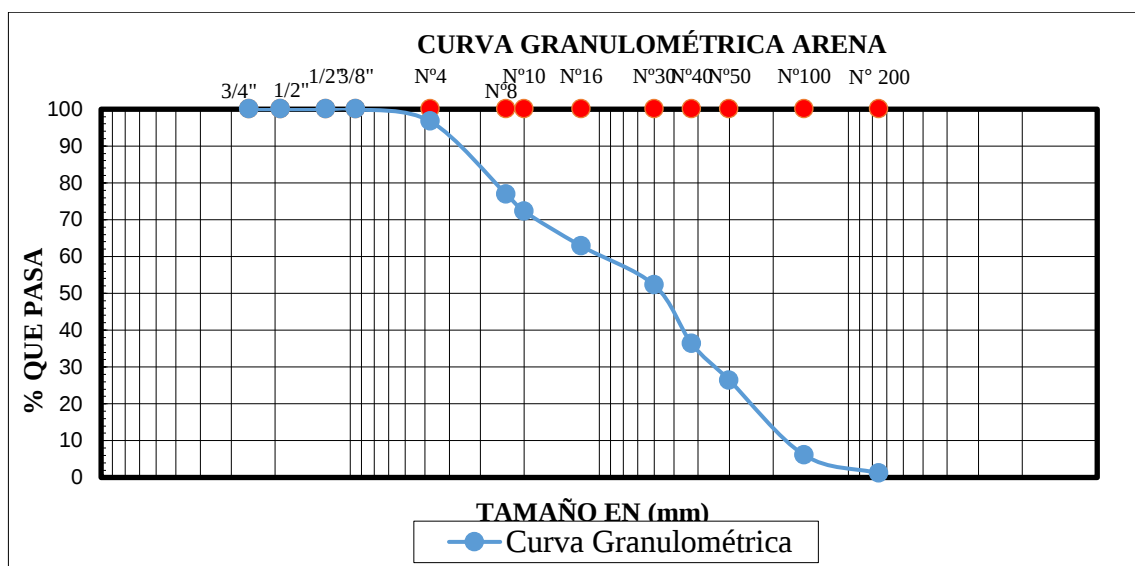
Fuente: Elaboración propia

Tabla 13. Segundo ensayo de granulometría de la arena

Tamices	tamaño [mm]	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.0	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.5	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.50	0.00	0.00	0.00	100.00
Nº4	4.75	166.89	166.89	3.34	96.66
Nº8	2.36	987.74	1154.63	23.09	76.91
Nº10	2.00	233.13	1387.76	27.76	72.24
Nº16	1.18	469.93	1857.70	37.15	62.85
Nº30	0.60	531.65	2389.35	47.79	52.21
Nº40	0.43	792.63	3181.98	63.64	36.36
Nº50	0.30	499.03	3681.01	73.62	26.38
Nº100	0.15	1015.69	4696.70	93.93	6.07
Nº200	0.075	245.99	4942.69	98.85	1.15
BASE	-	57.31	5000.00	100.00	0.00
SUMA		5000.0			
PÉRDIDAS		0.0			

Fuente: Elaboración propia

Figura 15. Curva granulométrica – arena.



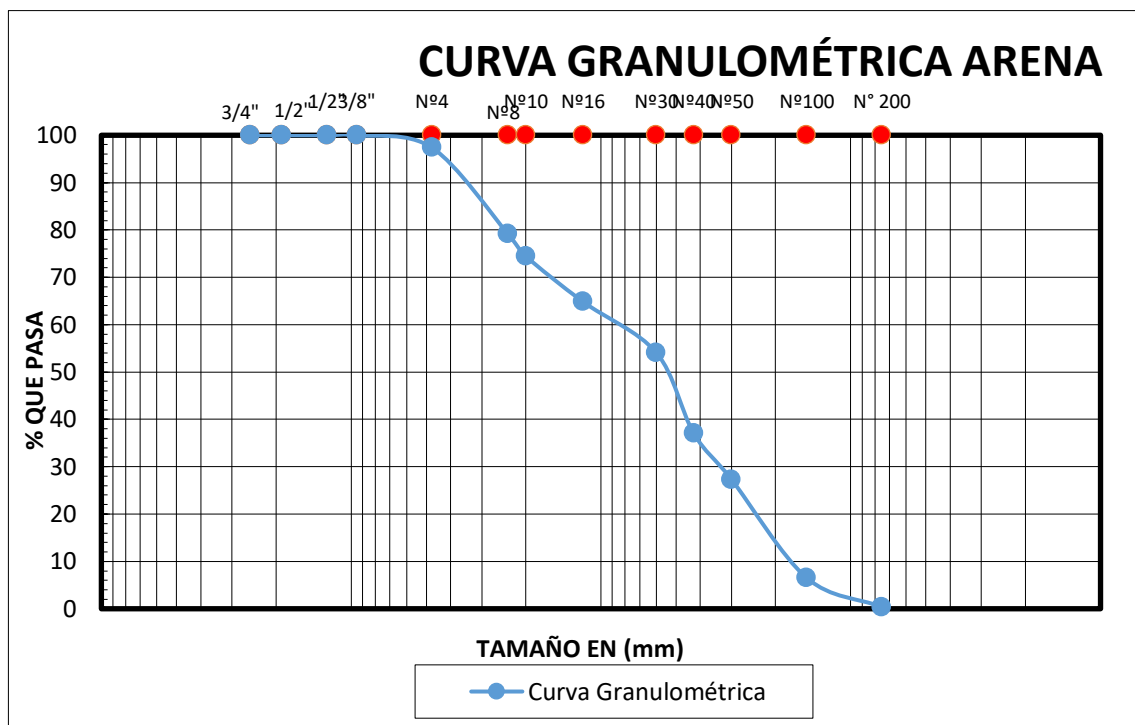
Fuente: Elaboración propia

Tabla 14. Tercer ensayo de granulometría de la arena.

Tamices	tamaño [mm]	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.0	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.5	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.50	0.00	0.00	0.00	100.00
Nº4	4.75	130.84	130.84	2.62	97.38
Nº8	2.36	908.89	1039.73	20.79	79.21
Nº10	2.00	236.73	1276.46	25.53	74.47
Nº16	1.18	481.65	1758.12	35.16	64.84
Nº30	0.60	538.11	2296.22	45.92	54.08
Nº40	0.43	852.15	3148.38	62.97	37.03
Nº50	0.30	486.94	3635.32	72.71	27.29
Nº100	0.15	1039.17	4674.49	93.49	6.51
Nº200	0.075	306.99	4981.47	99.63	0.37
BASE	-	18.53	5000.00	100.00	0.00
SUMA		5000.0			
PÉRDIDAS		0.0			

Fuente: Elaboración propia

Figura 16. Curva granulométrica – arena.



Fuente: Elaboración propia

3.2.8 Ensayo de peso específico

3.2.8.1 específico y absorción de agua en agregados gruesos (ASTM C127 AASHTO T85).

Se realizó el ensayo para la grava y la gravilla, el procedimiento es el siguiente.

- Determinación de la cantidad mínima de ensayo

En función al tamaño máximo nominal podemos determinar la cantidad mínima de ensayo.

Tabla 15. Cantidad mínima ensayo gravedad específica y absorción

Tamaño máximo nominal ^(a)		Cantidad mínima de muestra	
mm	pulg	kg	Lb
hasta 12.5	½	2	4.4
19	¾	3	6.6
25	1	4	8.8
37.5	1 ½	5	11
50	2	8	17.6
63	2 ½	12	26.4
75	3	18	39.6
90	3 ½	25	55
100	4	40	88
112	4 ½	50	110
125	5	75	165
150	6	125	275

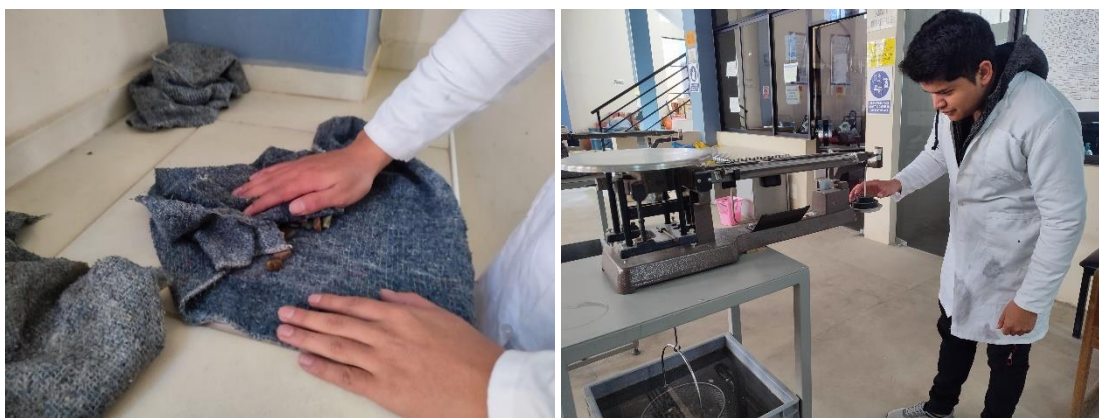
Fuente: Normativa ASTM C 127-88

Según el tamaño máximo nominal de 3/4" la masa mínima es de 3kg, donde para el ensayo se utilizó 5 kg para la grava y 3 kg para la gravilla

- Secado superficial y pesos de los agregados.

Previo ensayo se debe de remojar el material para su posterior secado superficialmente seco, para luego determinar los pesos de los agregados tanto como el peso superficialmente seco, sumergido y seco de los agregados.

Figura 17. Secado superficial y pesado sumergido



Fuente: Elaboración propia

Donde los datos son los siguientes

Tabla 16. Pesos de la grava

GRAVA 3/4"			
Muestra N°	Peso muestra seca "A" [g]	Peso muestra Sat. con sup. seca "B" [g]	Peso muestra Sat. dentro del agua "C" [g]
1	4946.30	5000.00	3104.00
2	4947.60	5000.00	3106.00
3	4947.40	5000.00	3109.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17. Pesos de la gravilla

GRAVILLA 3/8"			
Muestra N°	Peso muestra seca "A" [g]	Peso muestra Sat. con sup. seca "B" [g]	Peso muestra Sat. dentro del agua "C" [g]
1	2961.30	3000.00	1864.00
2	2961.30	3000.00	1865.00
3	2964.80	3000.00	1862.00

Fuente: Elaboración propia

- **Gravedad específica bulk.**- Es la relación entre el peso en el aire del volumen de agregado [incluyendo los vacíos permeables e impermeables de sus partículas pero no los vacíos entre partículas) a una determinada temperatura y el peso en el aire de un volumen igual de agua destilada, libre de gas, a la misma temperatura.

$$G_{sb} = \frac{A}{B - C}$$

Donde:

A= Peso seco de la muestra [g]

B= Peso de la muestra saturada con superficie seca [g]

C= Peso sumergido de la muestra [g]

$$Gsb(grava)1 = \frac{4946,30}{5000 - 3104} = 2,609$$

$$Gsb(gravilla)1 = \frac{2961,30}{3000 - 1864} = 2,606$$

- **Gravedad específica bulk aparente**, - Es la relación entre el peso en el aire del volumen de la porción impermeable del agregado a una determinada temperatura y el peso en el aire de un volumen igual de agua destilada, libre de gas, a la misma temperatura.

$$Gsa = \frac{A}{A - C}$$

Donde:

Gsa= Gravedad específica bulk aparente

A= Peso seco de la muestra [g]

C= Peso sumergido de la muestra [g]

$$Gsa(grava)1 = \frac{4946,30}{4946,30 - 3104} = 2,685$$

$$Gsa(gravilla)1 = \frac{2961,30}{2961,30 - 1864} = 2,699$$

- **Gravedad específica bulk SSS** - Es la relación entre el peso en el aire en condición saturada y superficialmente seca, incluyendo el peso del agua que ocupa los vacíos de las partículas luego inmersión durante 15 horas (pero sin incluir los vacíos entre partículas) y el peso en el aire de un volumen igual de agua destilada, libre de gas, a la misma temperatura.

$$Gsbs = \frac{B}{B - C}$$

Donde:

Gsbs= Gravedad específica bulk saturada superficialmente seca

B= Peso de la muestra saturada con superficie seca [g]

C= Peso sumergido de la muestra [g]

$$Gsb(grava)1 = \frac{5000}{5000 - 3104} = 2,685$$

$$Gsb(gravilla)1 = \frac{3000}{3000 - 1864} = 2,641$$

- **Absorción.**- Es la masa del agua que llena los poros permeables de las partículas de agregado sin incluir el agua adherida a la superficie de las mismas, expresada como porcentaje de la masa seca del agregado

$$\% \text{ Absorción} = \frac{B - A}{A} * 100$$

Donde:

%Absorción= Porcentaje de absorción de la muestra

A= Peso seco de la muestra [g]

B= Peso de la muestra saturada con superficie seca [g]

$$\% \text{ Absorción(grava)1} = \left(\frac{5000 - 4946,30}{4946,30} \right) * 100 = 1,086$$

$$\% \text{ Absorción(gravilla)1} = \left(\frac{3000 - 2961,30}{2961,30} \right) * 100 = 1,06$$

Los resultados son los siguientes:

Tabla 18. Gravedad específica y absorción de la grava

GRAVA 3/4"							
Muestra N°	Peso muestra seca "A" [g]	Peso muestra Sat. con sup. seca "B" [g]	Peso muestra Sat. dentro del agua "C" [g]	Peso específico SH [g/cm³]	Peso específico S.S.S [g/cm³]	Peso específico aparente [g/cm³]	Absorción %
1	4946.30	5000.00	3104.00	2.609	2.637	2.685	1.086
2	4947.60	5000.00	3106.00	2.61	2.64	2.69	1.06
3	4947.40	5000.00	3109.00	2.62	2.64	2.69	1.06
Promedio				2.61	2.64	2.69	1.07

Tabla 19. Gravedad específica y absorción de la gravilla

GRAVILLA 3/8"							
Muestra N°	Peso muestra seca "A" [g]	Peso muestra Sat. con sup. seca "B" [g]	Peso muestra Sat. dentro del agua "C" [g]	Peso específico SH [g/cm³]	Peso específico S.S.S [g/cm³]	Peso específico aparente [g/cm³]	Absorción %
1	2961.30	3000.00	1864.00	2.607	2.641	2.699	1.307
2	2961.30	3000.00	1865.00	2.61	2.64	2.70	1.31
3	2964.80	3000.00	1862.00	2.61	2.64	2.69	1.19
Promedio				2.61	2.64	2.70	1.27

Fuente: Elaboración propia

3.2.9 Gravedad específica y absorción de los agregados finos (ASTM C 128-97)

Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir para la determinación de gravedades específicas bulk y aparente 23 /23°C (73.4/73.4°F), así como la absorción de agregados finos.

- Secado SSS de la arena y peso seco en horno

Previo ensayo se debe remojar la arena para su posterior secado hasta que la arena posterior ensayo en el cono sufra un desmoronamiento superficial.

Figura 18. Pesado del matraz y su desmoronamiento



Fuente: Elaboración propia

Posteriormente la muestra se vació a un matraz y se llenó con agua para determinar sus pesos e introducir al horno para el peso en seco.

Donde se obtuvieron los siguientes datos.

Tabla 20. Datos de gravedades y absorción de la arena

ARENA			
Ensayos	1	2	3
Peso muestra seca al horno "A" [g]	489.80	490.60	489.50
Peso matraz + agua "B" [g]	730.2	731.3	680.7
Peso muestra + matraz + agua "C" [g]	1033.40	1028.90	1001.10
Peso muestra Sat. Seca "S" [g]	500.00	500.00	500.00
Peso matraz [g]	236.80	237.90	186.90

Fuente: Elaboración propia

Gravedades específicas y absorción del ensayo 1.

- Gravedad específica bulk

$$Gsb = \frac{A}{B + S - C}$$

Donde:

Gsb= Gravedad específica bulk

A= Peso seco de la muestra [g]

B= Peso de matraz con agua [g]

C= Peso de matraz con muestra y agua [g]

S= Peso de la muestra saturada superficialmente seca [g]

$$Gsb = \frac{489.80}{730.20 + 500 - 1033.40} = 2,49$$

- Gravedad especifica SSS

$$Gsb\ SSS = \frac{S}{B + S - C}$$

Donde:

Gsb SSS= Gravedad especifica saturada superficialmente seca

B= Peso de matraz con agua [g]

C= Peso de matraz con muestra y agua [g]

S= Peso de la muestra saturada superficialmente seca [g]

$$Gsb\ SSS = \frac{500}{730.20 + 500 - 1033.40} = 2,54$$

- Gravedad especifica aparente

$$Gsa = \frac{A}{B + A - C}$$

Donde:

Gsa= Gravedad especifica aparente

A= Peso seco de la muestra [g]

B= Peso de matraz con agua [g]

C= Peso de matraz con muestra y agua [g]

$$Gsa = \frac{489.80}{730.20 + 489.80 - 1033.40} = 2.63$$

- % Absorción

$$\% \text{ Absorcion} = \frac{S - A}{A} * 100$$

Donde:

% Absorción= Porcentaje de absorción de la muestra.

A= Peso seco de la muestra [g]

S= Peso de la muestra saturada superficialmente seca [g]

$$\% \text{ Absorción} = \frac{500 - 489.80}{489.80} * 100 = 2.08 \%$$

- Resultados

Tabla 21. Gravedades específicas y absorción de la arena

ARENA				
Ensayos	1	2	3	Promedio
Peso específico SH [g/cm ³]	2.49	2.42	2.73	2.55
Peso específico S.S.S [g/cm ³]	2.54	2.47	2.78	2.60
Peso específico aparente [g/cm ³]	2.63	2.54	2.89	2.69
Absorción, %	2.08	1.92	2.15	2.05

Fuente: Elaboración propia

3.2.10 Peso Unitario de los Agregados (ASTM C 29M-97)

Este ensayo se realizó para el agregado grueso, intermedio y fino

Donde el procedimiento es el siguiente.

- Determinación del Peso Suelto y Compactado

En unos recipientes a medida se de 21.5 cm de diámetro y 28 cm de altura para la grava y la gravilla y de 15 cm de diámetro y 17 cm de altura para la arena.

Se introduce el material de manera suelta hasta el ras para posteriormente pesarlo y luego se introduce compactando en varias capas con un pisón y pesarlo.

Figura 19. Pesado del molde con material



Fuente: Elaboración propia

- Peso unitario suelto

$$P. U. S = \frac{P. M. S \text{ [gr]}}{V. molde \text{ [cm}^3\text{]}}$$

Donde:

P.U.S= Peso unitario suelto [g/cm³]

P.M.S= Peso de muestra suelta [g]

V.molde= Volumen del molde [cm³]

- Resultados

Tabla 22. Peso unitario suelto de los agregados.

PESO UNITARIO SUELTO GRAVA					
Muestra N°	Peso Recipiente [g]	Volumen del recipiente [cm ³]	Peso recipiente + muestra suelta [g]	Peso muestra suelta [g]	Peso unitario suelto [g/cm ³]
1	5750.00	10165.41	20160.00	14410.00	1.42
2	5750.00	10165.41	20100.00	14350.00	1.41
3	5750.00	10165.41	20130.00	14380.00	1.41
PROMEDIO					1.41

PESO UNITARIO SUELTO GRAVILLA					
Muestra N°	Peso Recipiente [g]	Volumen del recipiente [cm ³]	Peso recipiente + muestra suelta [g]	Peso muestra suelta [g]	Peso unitario suelto [g/cm ³]
1	5750.00	10165.41	20135.00	14385.00	1.42
2	5750.00	10165.41	20080.00	14330.00	1.41
3	5750.00	10165.41	20220.00	14470.00	1.42
PROMEDIO					1.42

PESO UNITARIO SUELTO ARENA					
Muestra N°	Peso Recipiente [g]	Volumen del recipiente [cm³]	Peso recipiente + muestra suelta [g]	Peso muestra suelta [g]	Peso unitario suelto [g/cm³]
1	2600.00	2994.06	7635.00	5035.00	1.68
2	2600.00	2994.06	7635.00	5035.00	1.68
3	2600.00	2994.06	7610.00	5010.00	1.67
PROMEDIO					1.68

Fuente: Elaboración propia

- Peso unitario compactado

$$P. U. C = \frac{P. M. C [gr]}{V. molde [cm^3]}$$

Donde:

P.U.C= Peso unitario compactado [g/cm³]

P.M.C= Peso de la muestra compactada [g]

V.molde= Volumen del molde [cm³]

Resultados

Tabla 23. Peso unitario compactado de los agregados

PESO UNITARIO COMPACTADO GRAVA					
Muestra N°	Peso Recipiente [g]	Volumen del recipiente [cm³]	Peso recipiente + muestra compactado [g]	Peso muestra compactado [g]	Peso unitario compactado [g/cm³]
1	5750.00	10165.41	20720.00	14970.00	1.47
2	5750.00	10165.41	20620.00	14870.00	1.46
3	5750.00	10165.41	20730.00	14980.00	1.47
Promedio					1.47

PESO UNITARIO COMPACTADO GRAVILLA					
Muestra N°	Peso Recipiente [g]	Volumen del recipiente [cm ³]	Peso recipiente + muestra compactado [g]	Peso muestra compactado [g]	Peso unitario compactado [g/cm ³]
1	5750.00	10165.41	20465.00	14715.00	1.45
2	5750.00	10165.41	20450.00	14700.00	1.45
3	5750.00	10165.41	20505.00	14755.00	1.45
Promedio					1.45

PESO UNITARIO COMPACTADO ARENA					
Muestra N°	Peso Recipiente [g]	Volumen del recipiente [cm ³]	Peso recipiente + muestra compactado [g]	Peso muestra compactado [g]	Peso unitario compactado [g/cm ³]
1	2600.00	2994.06	7895.00	5295.00	1.77
2	2600.00	2994.06	7920.00	5320.00	1.78
3	2600.00	2994.06	7890.00	5290.00	1.77
Promedio					1.77

Fuente: Elaboración propia

3.2.11 Porcentaje de caras fracturadas (ASTM D 5821-01)

Determina el porcentaje en masa o por conteo de una muestra de agregado grueso compuesta por partículas fracturadas. El procedimiento es el siguiente:

- Determinación de la masa mínima de la muestra

Tabla 24. Cantidad mínima de material para ensayo caras fracturadas.

Tamaño Máximo Nominal Abertura, mm (pulgadas)		Masa mínima de la muestra, g (lb aprox.)
9.50	(3/8)	200 (0.5)
12.5	(1/2)	500 (1.0)
19.0	(3/4)	1500 (3.0)
25.0	(1)	3000 (6.5)
37.5	(1 1/2)	7500 (16.5)
50.0	(2)	15000 (33.0)
63.0	(2 1/2)	30000 (66.0)
75.0	(3)	60000 (132.0)
90.0	(3 1/2)	90000 (198.0)

Fuente: Norma ASTM D 5821-01

Según el tamaño máximo de ¾” la masa mínima será de 1500 g, donde después se procederá a tamizar por los tamices 1 1/2”, 1”, ¾”, ½” y 3/8”

- Inspección Visual

Se realizará una inspección visual separando las caras fracturadas, las que no son fracturadas y que son cuestionables para luego contar en cantidad y pesarlas.

Figura 20. Inspección visual por tamaños



Fuente: Elaboración propia

- Determinación del % de partículas fracturadas mediante la fórmula proporcionada en el ASTM D5821 (Sección 9.1) es:

$$P = \left(\frac{F}{F + N} \right) * 100$$

Donde:

P = Porcentaje de partículas con caras fracturadas

F = Masa o número de partículas con caras fracturadas

N = Masa o número de partículas sin caras fracturadas

Los datos son los siguientes:

Tabla 25. Partículas fracturadas, cuestionables y no fracturadas.

GRAVA				
Tamiz	Peso retenido	% retenido	Peso de partículas fracturadas [F] [g]	Peso de partículas no fracturadas [N] [g]
11/2" - 1"	-	-	-	-
1" - 3/4"	100.1	4.99	65.0	35.1
3/4" - 1/2"	956.6	47.67	782.1	174.5
1/2" - 3/8"	608.5	30.32	445.3	163.2
3/8" - 1/4"	341.4	17.01	311.8	29.6
Total	2006.6		1604.181	402.419

Fuente: Elaboración propia

Fracción 1" - 3/4" Peso retenido: 100.1 g Peso fracturado [F]: 65.0 g

Peso no fracturado [N]: $100.1 - 65.0 = 35.1$ g

Fracción 3/4" - 1/2" Peso no fracturado [N]: $956.6 - 782.1 = 174.5$ g

Fracción 1/2" - 3/8" Peso no fracturado [N]: $608.5 - 445.3 = 163.2$ g

Fracción 3/8" - 1/4" Peso no fracturado [N]: $341.4 - 311.8 = 29.6$ g

$$P = \left(\frac{1604.181}{1604.181 + 402.419} \right) * 100 = \mathbf{79.95\%}$$

PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS [P]	ESPECIFICACION INVIAS
79.95	MINIMO 60 %

Tabla 26. Partículas fracturadas, cuestionables y no fracturadas.

GRAVILLA				
Tamiz	Peso retenido	% retenido	Peso de partículas fracturadas [F] [g]	Peso de partículas no fracturadas [N] [g]
1" - 3/4"	-	-	-	-
3/4" - 1/2"	4.5	0.30	4.3	0.2
1/2" - 3/8"	378.6	25.18	322.1	56.5
3/8" - 1/4"	636.6	42.34	492.6	144.0
1/4" - N°4"	483.8	32.18	402.1	81.7
Total	1503.48		1221.100	282.380

Fuente: Elaboración propia

PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS [P]	ESPECIFICACION INVIAS
81.22	MINIMO 60 %

3.2.12 Índice de Alargamiento y Aplanamiento (ASTM C 143)

Este ensayo se realizó para el agregado grueso (Grava y Gravilla), donde el procedimiento es el siguiente

- Determinar la cantidad mínima de ensayo

De acuerdo al tamaño máximo nominal podemos determinar el contenido mínimo de muestra para el ensayo.

Tabla 27. Muestra mínima para el ensayo de Índice de alargamiento y aplanamiento

Máximo Tamaño Nominal con aberturas cuadradas		Masa mínima de la muestra de ensayo
mm	(Pulg)	kg
9.5	(3/8)	1
12.5	(1/2)	2
19.0	(3/4)	5
25.0	(1)	10
37.5	(1½)	15
50.0	(2)	20
63.0	(2½)	35

Fuente: Norma ASTM C 143

Para un valor de tamaño máximo de 3/4” tenemos una muestra mínima de 5 kg, donde se tamizará en los tamices 3/4”, 1/2”, 3/8” y 1/4”

- Índice de Alargamiento

Posterior al tamizado se realiza el ensayo utilizando un calibrador de barras por donde se hará pasar el material y pesar el que pasa y lo que no pasa.

Referencia: Elaboración propia

$$\% \text{ Alargamiento} = \frac{m_i}{R_i}$$

Donde:

% Alargamiento= Porcentaje de partículas alargadas de una muestra.

m_i = Peso de las partículas que pasan [g]

R_i = Peso retenido de la muestra [g]

Figura 21. Evaluación del alargamiento del material



Fuente: Elaboración propia

Resultados

Tabla 28. Índice de alargamiento del agregado grueso “Grava”

INDICE DE ALARGAMIENTO GRAVA					
Tamiz	Peso retenido [Ri]	% retenido	Peso de partículas que pasan [mi]	Índice de alargamiento % [IAi]	Índice de alargamiento global % [IA]
11/2" - 1"		0.00			73.176
1" - 3/4"	97.8	1.96	87.53	89.47	
3/4" - 1/2"	2308.5	46.17	1880.34	81.45	
1/2" - 3/8"	1901.1	38.02	1235.67	65.00	
3/8" - 1/4"	692.6	13.85	455.25	65.74	
Total	5000		3658.80		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 29. Índice de alargamiento del agregado grueso “Gravilla”

INDICE DE ALARGAMIENTO GRAVILLA					
Tamiz	Peso retenido [Ri]	% retenido	Peso de partículas que pasan [mi]	Índice de alargamiento % [IAi]	Índice de alargamiento global % [IA]
11/2" - 1"		0.00			72.954
1" - 3/4"	151.9	3.04	137.91	90.78	
3/4" - 1/2"	2836.3	56.73	2321.86	81.86	
1/2" - 3/8"	1406.7	28.13	947.20	67.33	
3/8" - 1/4"	605.1	12.10	240.73	39.78	
Total	5000		3647.70		

Fuente: Elaboración propia

- Índice de Aplanamiento

Posterior al tamizado se realiza el ensayo utilizando un calibrador de aplanamiento por donde se hará pasar el material y pesar el que pasa y lo que no pasa.

Figura 22. Evaluación del aplanamiento del material



Fuente: Elaboración propia

$$\% \text{ Aplanamiento} = \frac{m_i}{R_i}$$

Donde:

% Aplanamiento=Porcentaje de partículas aplanadas de una muestra.

m_i = Peso de las partículas que pasan el calibrador [g]

R_i = Peso retenido de la muestra [g]

Resultados

Tabla 30. Índice de aplanamiento del agregado grueso “Grava”

INDICE DE APLANAMIENTO GRAVA					
Tamiz	Peso retenido [R _i]	% retenido	Peso de partículas que pasan [m _i]	Índice de aplanamiento % [IA _i]	Índice de aplanamiento global % [IA]
1 1/2" - 1"		0.00			30.094
1" - 3/4"	97.8	1.96	47.10	48.14	
3/4" - 1/2"	2308.5	46.17	672.40	29.13	
1/2" - 3/8"	1901.1	38.02	547.40	28.79	
3/8" - 1/4"	692.6	13.85	237.80	34.34	
Total	5000		1504.70		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 31. Índice de alargamiento del agregado grueso “Gravilla”

INDICE DE APLANAMIENTO GRAVILLA					
Tamiz	Peso retenido [Ri]	% retenido	Peso de partículas que pasan [mi]	Índice de aplanamiento % [IAi]	Índice de aplanamiento global % [IA]
11/2" - 1"		0.00			33.116
1" - 3/4"	151.9	3.04	71.20	46.87	
3/4" - 1/2"	2836.3	56.79	942.00	33.21	
1/2" - 3/8"	1406.7	29.27	491.60	34.95	
3/8" - 1/4"	605.1	12.69	151.00	24.95	
Total	5000		1655.80		

Fuente: Elaboración propia.

3.2.13 Desgaste de los Ángeles (ASTM C 131-01)

Este ensayo se emplea para determinar la resistencia al desgaste de agregados naturales o triturados. Este ensayo se realizó para el agregado grueso (Grava) y el agregado intermedio (Gravilla), donde a continuación se describirá el procedimiento.

- Determinación de la carga abrasiva y la cantidad de muestra a utilizar

Tabla 32. Granulometrías para el ensayo de Desgaste de los Ángeles

Granulometría de ensayo	Número de esferas	Masa Total g
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25
C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15

Fuente: Norma ASTM C 131-01

De acuerdo a la granulometría de los agregados tenemos:

Agregado grueso (Grava)

Muestra tipo B, necesitando 2500 de material que pasa el tamiz ¾” y retiene en el tamiz ½” y 2500 que pasa tamiz ½” y retiene en el tamiz 3/8”

Agregado Intermedio (Gravilla)

Muestra tipo C, necesitando 2500 de material que pasa el tamiz 3/8” y retiene en el tamiz ¼” y 2500 que pasa tamiz ¼” y retiene en el tamiz N°4

Tabla 33. Carga Abrasiva

Pasa tamiz		Retenido en tamiz		Masa de la muestra para ensayo (g) Granulometrías			
mm	(alt.)	mm	(alt.)	A	B	C	D
37.5	(1½")	25.0	(1")	1250 ± 25	...	...	...
25.0	(1")	19.0	(¾")	1250 ± 25	...	...	...
19.0	(¾")	12.5	(½")	1250 ± 10	2500 ± 10	...	...
12.5	(½")	9.5	(3/8")	1250 ± 10	2500 ± 10	...	...
9.5	(3/8")	6.3	(¼")	...	...	2500 ± 10	...
6.3	(¼")	4.75	(No.4)	...	...	2500 ± 10	...
4.75	(No.4)	2.36	(No.8)	...	...	...	5000 ± 10
TOTALES				5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10

Fuente: Norma ASTM C 131-01

De acuerdo a la granulometría de los agregados tenemos:

Agregado Grueso (Grava)

Granulometría tipo B donde se emplearán 11 esferas de masa total 4584 g

Agregado (Gravilla)

Granulometría tipo C donde se emplearán 8 esferas de masa total 3330 g

- Prueba del Desgaste de los Ángeles

Una vez realizado el ensayo se tamiza y se pesa el material retenido en el tamiz N° 12 por lavado.

Figura 23. Máquina de Desgaste de los Ángeles



Fuente: Elaboración propia

Peso antes del ensayo

Peso material después del ensayo

Grava = 5002.25 g

Grava = 3809 g

Gravilla = 5000.4 g

Gravilla = 3930.75 g

- Determinación del % de Desgaste

$$\% \text{ Desgaste} = \frac{P1 - P2}{P1} * 100$$

Donde:

P1= Peso de la muestra antes del ensayo

P2= Peso de la muestra posterior al ensayo

$$\% \text{ Desgaste Grava} = \frac{5000.25 - 3809}{5000.25} * 100 = \mathbf{23.82\%}$$

$$\% \text{ Desgaste Gravilla} = \frac{5000,4 - 3930.75}{5000,4} = \mathbf{21.39\%}$$

3.2.3. Equivalente de Arena (ASTM D 2419-95)

Permite determinar la proporción relativa del contenido de polvo fino nocivo o material arcilloso en los agregados finos.

El procedimiento es el siguiente.

- Primero se vació la arena en las probetas y se agregó agua destilada, Cloruro de Calcio y glicerina luego se procede a eliminar el aire presente entre las partículas.
- Posteriormente se procede a realizar a agitar manualmente las probetas, y así dejarla reposar mínimo 2 días para tomar lecturas.

Figura 24. Probeta de equivalente de arena y su agitado



Fuente: Elaboración propia

- **Determinación del % equivalente de arena**

Las lecturas que se tuvieron fueron las siguientes.

Tabla 34. Resultados de ensayo de equivalente de arena

ENSAYO	Altura Arena	Altura Arcilla	EA
1	10.40 cm	11.70 cm	88.89 %
2	10.70 cm	11.80 cm	90.68 %
3	10.10 cm	11.70 cm	86.32 %

Fuente: Elaboración propia

$$\text{Equivalente de arena (EA)} = \frac{\text{Lectura de arena}}{\text{Lectura de arcilla}} * 100$$

Donde:

Equivalente de arena (EA)=Proporción de arena de la muestra del agregado fino.

Lectura de arena= Altura de arena de la muestra del agregado fino

Lectura de arcilla= Altura de arcilla de la muestra del agregado fino.

Ensayo 1

$$\text{Equivalente de Arena (EA)} = \frac{10.40}{11.70} = 88.89\%$$

Ensayo 2

$$\text{Equivalente de Arena (EA)} = \frac{10.70}{11.80} = 90.68\%$$

Ensayo 3

$$\text{Equivalente de Arena (EA)} = \frac{10.10}{11,70} = \mathbf{86.32\%}$$

Equivalente de arena	Especificaciones
88.63 %	50% MINIMO

3.3.6 Determinación del peso específico de los suelos (ASTM D-854 AASHTO T-100).

Este método establece el procedimiento para determinar, mediante un picnómetro, la densidad de partículas sólidas de suelos compuestos por partículas menores que 5 mm. Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos AASHTO T-100 y ASTM D-854.

Proceso de cálculo:

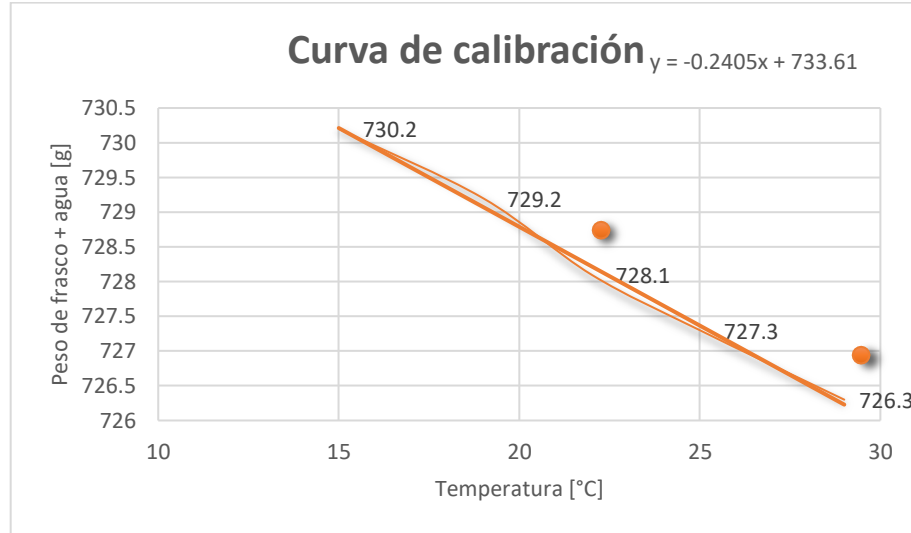
Calibración del frasco volumétrico:

Tabla 35. Datos de la calibración de frasco volumétrico.

Numero de ensayo	Wf+w [g]	T [°C]
1	726.3	29
2	727.3	25
3	728.1	22
4	729.2	19
5	730.2	15

Fuente: Elaboración propia.

Figura 25. Curva de calibración del frasco volumétrico.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 36. Datos del ensayo de peso específico del filler

Numero de ensayo	1	2	3	4
Temperatura ensayada [°C]	30	25	20	16
Peso del filler [g]	80	80	80	80
Peso del frasco + agua + filler Wfws [g]	776.46	777.21	778.27	779.01

Fuente: Elaboración propia.

Cálculos

$$\gamma_s = \frac{W_s}{W_{fw} + W_s - W_{fws}}$$

Donde:

γ_s : Peso específico del sólido.

W_s : Peso del suelo seco.

W_{fw} : Peso del frasco + agua.

W_{fws} : Peso del frasco + agua + suelo.

$$\gamma_s = \frac{80}{726.395 + 80 - 776.46} = \frac{80}{29.935} = 2.67 \text{ gr/cm}^3$$

Peso Específico Corregido

$$\gamma_{\text{corregido}} = \gamma_s * k$$

Factor de Corrección (k)

$$k = 0.99574$$

$$\gamma_{\text{corregido}} = 2.67 * 0.99574 = 2.66 \text{ g/cm}^3$$

Tabla 37. Resultados del ensayo de peso específico de filler convencional

Identificación de Frasco [g]	1	2	3	4
Temperatura ensayada [g]	30	25	20	16
Peso del filler Ws [g]	80	80	80	80
Peso del frasco más agua *Wfw [g]	726.395	727.5975	728.8	729.762
Peso del frasco + agua + filler Wfws [g]	776.46	777.21	778.27	779.01
Peso específico [g/cm ³]	2.67	2.63	2.62	2.60
Factor de corrección K**	0.99574	0.9989	1	1.0009
Peso específico corregido [g/cm ³]	2.66	2.63	2.62	2.60
Peso específico promedio [g/cm ³]	2.63			

Fuente: Elaboración propia.

3.2.9. Resumen y evaluación de la caracterización de los agregados

Los resultados de los ensayos realizados son los siguientes:

Tabla 38. Resumen de caracterización de los agregados

Ensayo	Norma de Ensayo	Valor Obtenido
Gravedad específica del Agregado Grueso "Grava"	ASTM C 127-88	2.61 (gr/cm3)
Gravedad específica saturada superficialmente seca "Grava"		2.64 (gr/cm3)
Gravedad específica Aparente "Grava"		2.69 (gr/cm3)
% Absorción "Grava"		1.07 %
Gravilla	ASTM C 127-88	2.61 (gr/cm3)
Gravedad específica saturada superficialmente seca "Gravilla"		2.64 (gr/cm3)
Gravedad específica Aparente "Gravilla"		2.70 (gr/cm3)
% Absorción "Gravilla"		1.27 %
Gravedad específica del Agregado Fino "Arena"	ASTM C 128-97	2.55 (gr/cm3)
Gravedad específica saturada superficialmente seca "Arena"		2.60 (gr/cm3)
Gravedad específica Aparente "Arena"		2.69 (gr/cm3)
% Absorción "Arena"		2.05 %
Peso Unitario de los Agregados "Grava"	ASTM C 29	1.41 (gr/cm3)
Peso Unitario Suelto "Grava"		1.41 (gr/cm3)
Peso Unitario Compactado "Grava"		1.47 (gr/cm3)
Peso Unitario Suelto "Gravilla"		1.42 (gr/cm3)
Peso Unitario Compactado "Gravilla"		1.45 (gr/cm3)
Peso Unitario Suelto "Arena"		1.68 (gr/cm3)
Peso Unitario Compactado "Arena"		1.77 (gr/cm3)
% Caras Fracturadas "Grava"	ASTM D 5821-01	79.95 %
% Caras Fracturadas "Gravilla"		81.22 %
Índice de alargamiento "Grava"	ASTM C 143	73.176
Índice de alargamiento "Gravilla"		72.954
Índice de aplanamiento "Grava"		30.094
Índice de aplanamiento "Gravilla"		33.116
Desgaste en la máquina de los Ángeles para 500 revoluciones "	ASTM C 131-01	23.82 %
Desgaste en la máquina de los Ángeles para 500 revoluciones "		21.39 %
Equivalente de arena	ASTM D 2419-95	88.63 %
Peso específico de filler	ASTM D-854	2.63 (gr/cm3)

Fuente: Elaboración propia

Previo a la elaboración se debe comprobar que todos los materiales cumplan con las normas de calidad requeridas para la elaboración de Mezclas Asfálticas en Caliente.

3.3 Caracterización del cemento asfáltico

Se realizó la caracterización del Cemento Asfáltico 85/100, obtenido de la posta municipal cemento asfáltico REPSOL 85/100 de procedencia peruana, para así poder evaluar la calidad del cemento asfáltico según las normativas correspondientes y ver si es apto para la elaboración de Mezclas Asfálticas en Caliente.

3.3.1. Ensayo de penetración [ASTM D 5-97]

Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir para determinar la consistencia de los materiales asfálticos sólidos o semisólidos en los cuales el único o el principal componente es un asfalto.

- Primero se llenó con asfalto platitos a los cuales se realizó baño maría a 25° C por 30 min.
- Posteriormente se procedió a realizar el ensayo con el equipo de penetración manual donde se obtuvieron los siguientes resultados

Figura 26. Medición con el equipo de penetración



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 39. Penetración del cemento asfáltico

	PENTRACION 1	PENTRACION 2	PENTRACION 3
PRUEBA 1	100	105	101
PRUEBA 2	95	98	95
PRUEBA 3	91	92	92

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2. Peso específico (ASTM D 70-03)

- Se inició llenando los frascos volumétricos con agua destilada para realizarle el baño maría a 25°C para luego pesarlo llamándolo peso A
- Luego se llenó los frascos con asfalto y se realizó el baño maria a 25°C para pesarlo llamándolo peso B
- Y por último se llenó los frascos con asfalto y agua destilada para luego realizar el baño maría y pesarlo llamándolo peso C.

Figura 27. Medición de la gravedad especifica del cemento asfaltico



Fuente: Elaboración propia

$$Gsb = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)}$$

Donde:

Gsb= Gravedad especifica bulk

A= Peso del frasco volumétrico [g]

B= Peso del frasco volumétrico con agua [g]

C= Peso del frasco volumétrico con cemento asfaltico [g]

D= Peso del frasco volumétrico con cemento asfaltico y agua [g]

Resultados

Tabla 40. Gravedad específica bulk del cemento asfáltico

	1	2	3
Peso de frasco [A]	38.30 g	38.30 g	38.40 g
Peso de frasco + agua [B]	63.10 g	63.10 g	63.00 g
Peso de frasco + cemento ©	54.90 g	55.00 g	53.90 g
Peso de frasco + cemento + agua [D]	63.50 g	63.40 g	63.40 g
Peso Específico	1.025	1.018	1.026
Peso Específico promedio	1.023		

Fuente: Elaboración propia

Punto de ignición y de llama (ASTM D 92-02b)

Esta norma se deberá emplear para medir y describir las propiedades de materiales, productos o sistemas, en respuesta al calor y a la llama bajo condiciones de laboratorio controladas y no se deberá considerar ni emplear para la descripción o para la apreciación de materiales, productos o sistemas, que presenten riesgo de incendio bajo condiciones reales.

- Se inició llenando la copa Cleveland con asfalto y colocarlo en la placa de calentamiento y hacer sujetar un termómetro y medir la temperatura.
- Se hizo pasar un fosforo por la muestra hasta que se observara chispas y las llamas de ignición.

Figura 28. Equipo de punto de ignición, llama y su medición



Fuente: Elaboración propia

Donde se obtuvo los siguientes resultados.

Tabla 41. Punto de ignición y de llama del cemento asfaltico

	PUNTO DE IGNICION	PUNTO DE LLAMA
PRIMERA PRUEBA	278 °C	309 °C
SEGUNDA PRUEBA	269 °C	310 °C
TERCERA PRUEBA	275 °C	312 °C

Fuente: Elaboración propia

3.3.1 Ensayo de ablandamiento (ASTM D 36-95)

- Se inició llenando con asfalto los anillos para luego enrazarlos y someterlos al ensayo
- Se baja la temperatura de del frasco volumétrico a 5 °C y se empieza el ensayo haciendo hervir el frasco con los anillos y las esferas y agua destilada
- Se tomó lecturas de las temperaturas a las que las esferas caen de los anillos.

Resultados

Tabla 42. Punto de ablandamiento del cemento asfaltico

T° C	
PRUEBA 1	42
PRUEBA 2	44
PRUEBA 3	44

Fuente: Elaboración propia

Figura 29. Medición del ablandamiento del cemento asfaltico



Fuente: Elaboración propia

3.3.2 Ensayo de ductilidad (ASTM D 113)

- Se inició llenando los moldes de ductilidad con asfalto para posteriormente enrasarlos
- Una vez enrasado se sometió a la ductilidad a una temperatura de 25°C

Figura 30. Medición de la ductilidad del cemento asfaltico



Fuente: Elaboración propia

Resultados

Tabla 43. Ductilidad del cemento asfaltico

ROTURA	
PRUEBA 1	118.00 cm
PRUEBA 2	136.00 cm
PRUEBA 3	150.00 cm

Fuente: Elaboración propia

3.3.3 Evaluación de la caracterización del cemento asfáltico

Tabla 44. Caracterización y evaluación de la calidad del cemento asfáltico según especificaciones técnicas de calidad de betún

Ensayo	Unidad	Muestra			Resultado	Especificaciones	
		1	2	3		Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C							
(ASTM D 5-97)							
Lectura 1	0.1 mm	100	105	101			
Lectura 2	0.1 mm	95	98	95			
Lectura 3	0.1 mm	91	92	92			
Promedio	0.1 mm	95	98	96	97	85	100
Peso Específico a 25°C							
(ASTM D 70-03)							
Peso de Picnómetro	g	38.3	38.3	38.4			
Peso de Picnómetro +							
Agua	g	63.1	63.1	63			
Peso de Picnómetro +							
Muestra	g	54.9	55	53.9			
Peso de Picnómetro +							
Agua + Muestra	g	63.5	63.4	63.4			
Peso Especifico	g/cm³	1.02	1.02	1.03	1.02	1	1.05
Punto de Ignición y de							
llama (ASTM D 92-							
02b)							
Punto de Ignición	° C	278	278	278	278		
Punto de llama	° C	309	312	311	311	232	-
Punto de							
ablandamiento (ASTM							
D 36-95)							
Lectura	° C	42	44	44	43	41	53
Ductilidad a 25°C							
(ASTM D 113)							
Lectura	cm	118	136	150	135	100	-

Fuente: Elaboración propia

3.4 Graduación Granulométrica ASTM D3515

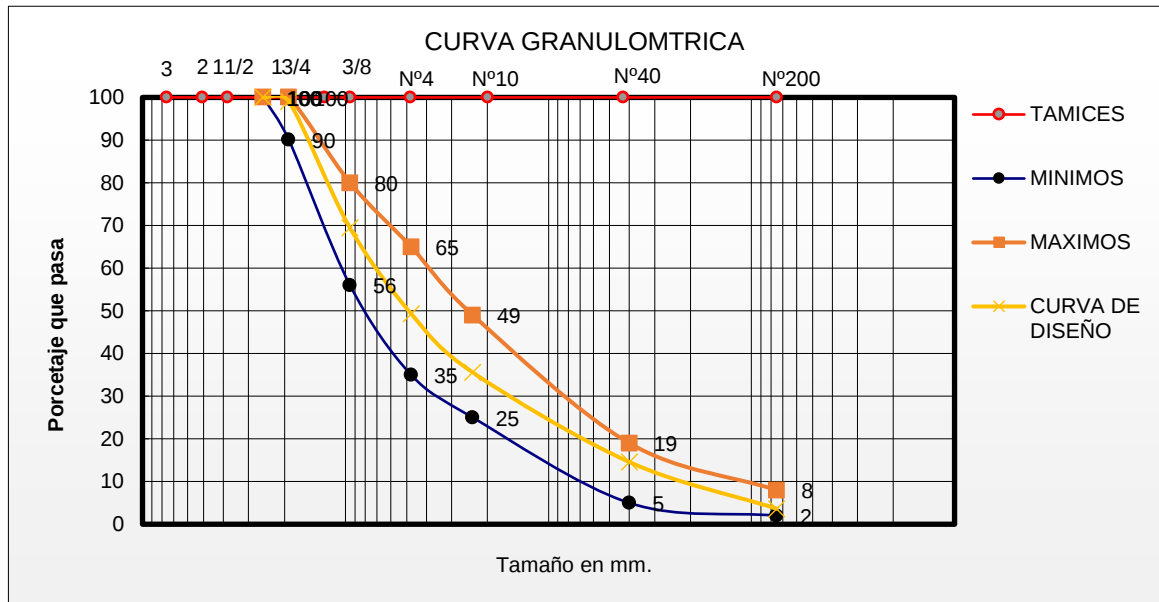
Una vez obtenido las granulometrías de los agregados se procedió a realizar la mezcla de estas para así tener una Granulometría que cumpla con los requerimientos para la elaboración de Mezclas Asfálticas en Caliente según la Norma ASTM D3515.

Tabla 45. Graduación granulométrica ASTM D3515

Tamices	Tamaño [mm]	Grava	Gravilla	Arena	Filler	Curva			Especificaciones	
		[gr.]	[gr.]	[gr.]	[gr.]	Peso ret.	%Ret	%pasa del total	ASTM D3515	
		30	26	40	4				Mínimo	Máximo
1"	25.4	0	0	0	0	0	0	100	100	100
3/4"	19	47.95	0.00	0.00	0.00	47.95	0.96	99.04	90	100
1/2"	12.5	860.49	10.86	0.00	0.00	871.35	18.39	81.61	-	-
3/8"	9.5	431.91	177.11	0.00	0.00	609.02	30.57	69.43	56	80
Nº4	4.75	130.27	806.20	68.33	0.00	1004.80	50.66	49.34	35	65
Nº8	2.36	29.39	257.10	402.32	0.00	688.81	64.44	35.56	25	49
Nº16	1.18	0.00	48.72	281.99	0.00	330.72	71.05	28.95	-	-
Nº30	0.6	0.00	0.00	205.60	0.00	205.60	75.16	24.84	-	-
Nº40	0.6	0.00	0.00	317.23	0.00	317.23	81.51	18.49	-	-
Nº50	0.4	0.00	0.00	195.34	0.00	195.34	85.42	14.58	5	19
Nº100	0.15	0.00	0.00	403.33	0.00	403.33	93.48	6.52	-	-
Nº200	0.075	0.00	0.00	113.47	30.65	144.12	96.37	3.63	2	8
BASE	-	0.00	0.00	12.39	169.35	181.74	100	0	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.5: Curva granulométrica formada.



Fuente: Elaboración propia.

3.5 Contenido mínimo de cemento asfáltico

Una vez obtenido la Granulometría formada se procedió a determinar el Contenido Mínimo de Cemento Asfáltico necesario que requiere la Granulometría Formada. Para esto se hizo uso de dos procedimientos, los cuales son los siguientes.

Procedimiento del área superficial

$$P = (0.27 * a + 0.41 * b + 2.05 * c + 15.38 * d + 53.30 * e) * I_a$$

Donde:

P= Porcentaje mínimo de cemento asfáltico

a= Porcentaje de material que pasa tamiz 1 1/2" y se retiene en 3/4"

b= Porcentaje de material que pasa tamiz 3/4" y se retiene en Nº4

c= Porcentaje de material que pasa tamiz Nº4 y se retiene en Nº40

d= Porcentaje de material que pasa tamiz Nº40 y se retiene en Nº200

e= Porcentaje de material que pasa tamiz Nº200

Ia= Índice asfáltico

Tabla 46. Índice asfáltico.

Material pétreo	Índice asfáltico n		
	Absorción 0 a 2,5 %	Absorción 2,6 a 5 %	Absorción mayor de 5 %
Grava o arena de río material redondeado.	0,0055	0,0065	0,0075
Gravas angulosas o redondeadas.	0,0065	0,0075	0,0085
Rocas trituradas (angulosas).	0,0075	0,0085	0,0100

Fuente: Asphalt Institute. (2014). MS-2 Asphalt Mix Design Methods (7th ed.)

a= 0.96 Material pasa 1 1/2" y retiene 3/4"

b= 49.70 Material pasa 3/4" y retiene N°4

c= 30.85 Material pasa malla N°4 y retiene en N°40
Material pasa N°40 y retiene en

d= 14.86 N°200

e= 3.63 Material pasa N°200

Ia= 0.008

$$P = (0.27 * 0.96 + 0.41 * 49.70 + 2.05 * 30.85 + 15.38 * 14.86 + 53.30 * 3.63) * 0.008$$

$$P = 4 \%$$

Teniendo como un contenido mínimo inicial para la determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico $C_{min} = 4 \%$

3.6 Contenido óptimo de cemento asfáltico Método Marshall

3.6.1. Determinación de la cantidad de material

Uno de los primeros pasos para obtener el contenido óptimo de cemento asfáltico es determinar la cantidad de material que será necesario para la elaboración de las briquetas para los diferentes porcentajes de cemento asfáltico.

Los porcentajes de cemento asfáltico para la elaboración de las briquetas serán los siguientes:

Cantidad mínima de C.A.	4 %
Cantidad mínima de C.A. + 0,5 %	4.5 %
Cantidad mínima de C.A. + 1 %	5 %
Cantidad mínima de C.A. – 1,5 %	5.5 %
Cantidad mínima de C.A. – 2 %	6 %

Para cada porcentaje de cemento asfáltico se procedió determinar la cantidad en peso tanto de cemento asfáltico como de los agregados.

Partiendo del dato inicial del Peso de la Briqueta de 1200 g, podemos calcular las respectivas cantidades.

Tabla 47. Dosificación de la mezcla asfáltica.

Ponderación de grava [%]	30	Porcentaje de briqueta	100%
Ponderación de gravilla [%]	26	Porcentaje de cemento asfáltico	x
Ponderación de arena [%]	40	Porcentaje de agregado	100-x
Ponderación de filler [%]	4	Peso total de briqueta[g]	1200
total	100		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 48. Dosificación de la mezcla asfáltica con variación de porcentajes de cemento asfáltico.

	Porcentaje de cemento asfáltico [%]					
	4	4.5	5	5.5	6	6.5
porcentaje de agregado [%]	96	95.5	95	94.5	94	93.5
peso del cemento asfáltico[g]	48	54	60	66	72	78
peso de Grava[g]	345.6	343.8	342	340.2	338.4	336.6
peso de Gravilla[g]	299.52	297.96	296.4	294.84	293.28	291.72
peso de Arena[g]	460.8	458.4	456	453.6	451.2	448.8
peso de Filler [g]	46.08	45.84	45.6	45.36	45.12	44.88
peso total de la briqueta [g]	1200	1200	1200	1200	1200	1200

Fuente: Elaboración propia

3.6.1 Desarrollo de la elaboración de briquetas

Equipo:

Balanza ± 0.1 g

Termómetro de 360 °C

Espátula

Moldes de compactación

Bandejas metálicas

Equipo de compactación

Equipo de desmolde

Taras

3.6.2 Preparación de la muestra de ensayo

Las muestras se preparan de la siguiente manera:

- El agregado grueso se debe lavar y secar en horno por 24 horas a una temperatura de 110 ± 5 °C, y pesar según su dosificación.
- El agregado fino se debe secar en horno por 24 horas a una temperatura de 110 ± 5 °C, y pesar según su dosificación.
- El cemento asfáltico debe calentarse y pesar en taras según su porcentaje ya calculado anteriormente.

3.6.3 Elaboración de briquetas

- El cemento asfáltico previamente pesado según su porcentaje a usar se debe calentar y mezclar con los agregados pétreos en una bandeja hasta que todas las partículas del agregado estén revestidas, la temperatura debe rondar entre los 140 a 170 °C.
- La mezcla asfáltica caliente se coloca en el molde precalentado Marshall como preparación para su compactación, el cual es calentado para que no enfrié la superficie de la mezcla al golpearla. Se coloca la muestra al molde en tres capas, cada capa se la compacta con 25 golpes manuales.
- Las briquetas son compactadas mediante golpes del martillo Marshall mecánico.

El número de golpes del martillo depende de la cantidad de tránsito para la cual está siendo diseñada, en este caso 75 golpes por cara para un tránsito pesado.

- Después de compactar la briqueta se deja enfriar alrededor de 10 a 15 minutos para su posterior extracción del molde, y dejarlas a temperatura ambiente por un periodo de 24 horas para luego continuar con el ensayo de Marshall.

3.7 Procedimiento de ensayo Marshall

Existen tres procedimientos de ensayo en el método del ensayo Marshall. Estos son: determinación del peso específico total, medición de la estabilidad Marshall, y análisis de la densidad y el contenido de vacíos de las briquetas.

3.8.1 Identificación de briquetas.

Para la identificación de briquetas se las enumero para este caso de porcentaje de cemento asfáltico de 4 % como 1, 2 y 3.

3.7.1 Método de prueba estándar para espesor o altura de la briqueta de ensayo (ASTM D-3549)

Antes de realizar el ensayo se debe determinar la altura de la briqueta la cual nos servirá para cálculos de estabilidad Marshall.

Para determinar su altura se marca la briqueta con una tiza en 4 partes iguales y con la ayuda de un vernier medimos la altura de la briqueta en las marcas de esta manera obtendremos una altura representativa de la briqueta.

Tabla 49. Alturas de cada briqueta ensayada.

% de cemento asfáltico	N° de espécimen	alturas de cada briqueta [mm]	promedio de la altura de cada briqueta [cm]
4	1	66.76	6.67
		66.57	
		66.76	
		66.83	

	2	65.94	6.61
		66.22	
		65.72	
		66.36	
	3	66.21	6.61
		65.66	
		66.27	
		66.18	

Fuente: Elaboración propia.

3.6.4 Base de mezcla y agregado.

Para la base de mezcla se toma el porcentaje de asfalto para elaborar las 3 briquetas, en este cálculo el porcentaje es de 3,31 %.

Para la base de agregados se la determina mediante el siguiente procedimiento de cálculo.

$$\text{Base del agregado} = \frac{\text{base de mezcla} * 100}{100 - \text{base de mezcla}}$$

$$\text{Base del agregado} = \frac{4 * 100}{100 - 4} = 4.17 \%$$

3.6.5 Peso de la briketa

3.6.5.1 Peso de la briketa en estado seco.

Consiste en pesar la briketa en la balanza.

Tabla 50. Peso de briquetas en estado seco

N° de probeta	Peso de la briketa [g]
1	1197.4
2	1176.3
3	1173.1

Fuente: Elaboración propia

3.6.5.2 Peso de la briqueta en estado saturado superficialmente seco.

Consiste en pesar la briqueta una vez sacada del baño maría a 25 °C y ser secada con un paño o trapo.

Tabla 51. Peso de briqueta saturada superficialmente seca (S.S.S.).

N° de probeta	Peso SSS de la briqueta [g]
1	1202.8
2	1184.0
3	1178.6

Fuente: Elaboración propia.

3.6.5.3 Peso de la briqueta sumergida en el agua.

Consiste en pesar la briqueta en una balanza hidrostática luego de estar en baño maría a 25 °C.

Tabla 52. Peso de briqueta sumergida en agua

N° de probeta	Peso Sumergido de la briqueta [g]
1	683.0
2	672.0
3	666.0

Fuente: Elaboración propia.

3.6.6 Volumen de la briqueta.

Para briqueta identificada como 1:

$$\text{Volumen de briqueta} = \text{Peso S. S. S.} - \text{Peso sumergida}$$

$$\text{Volumen de briqueta} = 1202.8 - 683$$

$$\text{Volumen de briqueta} = 519.8 \text{ g}$$

Debido a que el peso del agua y su peso específico es 1 g/cm^3 se considera:

$$\text{Volumen de briqueta} = 519.8 \text{ cm}^3$$

3.6.7 Densidad de la briqueta.

Para briqueta identificada como 1:

3.6.7.1 Densidad real de la briqueta.

$$\text{Densidad real} = \frac{\text{Peso de la briqueta en seco [g]}}{\text{Volumen de la briqueta [cm}^3\text{]}}$$

$$\text{Densidad real} = \frac{1202.8 \text{ [g]}}{519.8 \text{ [cm}^3\text{]}} = 2.30 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

3.6.7.2 Densidad máxima teórica de la briqueta.

$$\text{Densidad max} = \frac{100}{\frac{\% \text{ Base del agregado}}{\text{Peso específico asfalto}} + \frac{100 - \% \text{ Base del agregado}}{\text{Peso específico agregado grueso}}}$$

$$\text{Densidad max} = \frac{100}{\frac{4.17}{1.023} + \frac{100 - 4.17}{2.65}} = 2.49 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

3.6.8 Porcentaje de vacíos.

Para briqueta identificada como 1:

3.6.8.1 Porcentaje de vacíos de la mezcla (V_v).

$$V_v = \left(\frac{\text{Densidad max} - \text{Densidad real promedio}}{\text{Densidad max}} \right) * 100$$

$$V_v = \left(\frac{2.49 - 2.30}{2.49} \right) * 100 = 7.69 \%$$

3.6.8.2 Porcentaje de vacíos de los agregados minerales (V.A.M.).

$$V_v = \frac{\% \text{ de asfalto} + \text{Densidad real promedio}}{\text{Peso específico asfalto}} + \% \text{ de vacíos}$$

$$V_v = \frac{4 + 2.30}{1.023} + 7.69 = 16.67 \%$$

3.6.8.3 porcentaje de vacíos llenos de asfalto o relación betún en vacíos (R.B.V)

$$R. B. V. = \left(\frac{V_v - V. A. M.}{V. A. M.} \right) * 100$$

Donde:

R.B.V = Porcentaje de vacíos llenos de asfalto

V_v= Porcentaje de vacíos en el agregado mineral

V.A.M. = Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica

$$R. B. V. = \left(\frac{7.69 - 16.67}{16.67} \right) * 100 = 53.85 \%$$

3.6.9 Estabilidad y fluencia.

La estabilidad y la fluencia son propiedades medidas a partir de realizar el ensayo de la prensa Marshall.

Para determinar la estabilidad real la lectura del dial nos mide en mm, este valor se introduce a la ecuación calibrada la cual es:

$$\text{Estabilidad} = (0.012 * \text{Lectura del dial} - 0.0812) * 102 * 2.2$$

Para briqueta identificada como 1:

$$\text{Estabilidad} = (0.012 * 840 - 0.0812) * 102 * 2.2$$

$$\text{Estabilidad} = \mathbf{2243.73 \text{ libras}}$$

3.6.9.1 Corrección de la Estabilidad

La estabilidad leída debe ser corregida dependiendo de la altura de la briqueta ya que el ensayo Marshall, está definido para una altura de briqueta de 6.35 cm (2.5”) y dependiendo de la variación de la altura debe ser corregida.

$$\text{Estabilidad. C} = \text{Estabilidad. S. C} * \text{FC}$$

Donde:

Estabilidad. C= Estabilidad corregida [lb]

Estabilidad S.C= Estabilidad sin corregir [lb]

FC= Factor de corrección

Tabla 53. Factores de corrección de la estabilidad

Volumen de la muestra cm ³	Altura aproximada de la muestra cm	Factor de corrección
200-213	2.54	5.56
214-225	2.70	5.00
226-237	2.86	4.55
238-250	3.02	4.17
251-264	3.18	3.85
265-276	3.34	3.57
277-289	3.49	3.33
290-301	3.65	3.03
302-316	3.81	2.78
317-328	3.97	2.50
329-340	4.13	2.27
341-353	4.29	2.08
354-367	4.45	1.92
368-379	4.61	1.79
380-392	4.76	1.67
393-405	4.92	1.56
406-420	5.08	1.47
421-431	5.24	1.39
432-443	5.40	1.32
444-456	5.56	1.25
457-470	5.72	1.19
471-482	5.87	1.14
483-495	6.03	1.09
496-508	6.19	1.04
509-522	6.35	1.00
523-535	6.51	0.96
536-546	6.67	0.93
547-559	6.83	0.89
560-573	6.99	0.86
574-585	7.14	0.83
586-598	7.30	0.81
599-610	7.46	0.78
611-625	7.62	0.76

Fuente: Manual de Ensayos de Pavimentos, Ing. Silene Minaya Gonzales y Ing. Abel Ordoñez Huaman, Lima, 2001.

Corrección de la estabilidad del primer espécimen para un % de C.A de 2.9%

Estabilidad sin corregir = 2243.73 Lb

Factor de Corrección = 0.93

Estabilidad Corregida = $2243.73 * 0.93 = 2133.14$ Libras

3.7 Resultados Marshall

Los resultados del ensayo Marshall se muestra a continuación en la tabla, siendo estos los valores promedios, para ver la planilla ver Anexo

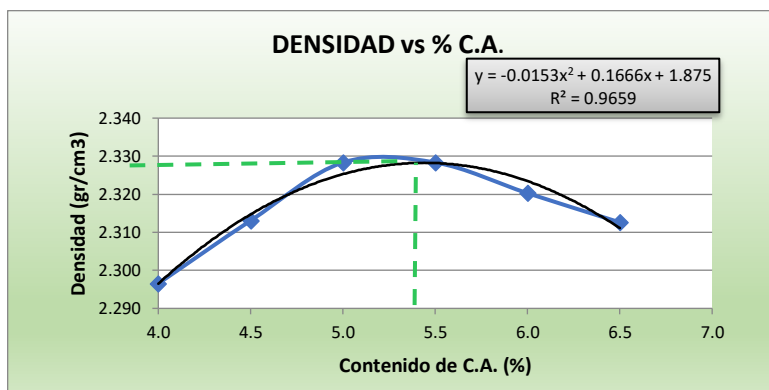
Tabla 54. Resultados del diseño de la mezcla asfáltica convencional.

Porcentaje de cemento asfáltico [%]	Densidad promedio [g/cm ³]	Estabilidad corregida [Libras]	Fluencia [pulg]	% de vacíos de mezcla total [%]	R.B.V. [Relación Betún Vacíos] [%]	V.A.M. [vacíos de agregado mineral] [%]
4.0	2.297	2133.14	11.67	7.69	53.85	16.67
4.5	2.313	2233.07	11.00	6.27	61.87	16.45
5.0	2.328	2300.15	10.67	4.88	69.98	16.26
5.5	2.328	2301.60	11.67	4.10	75.31	16.62
6.0	2.320	2202.62	13.33	3.65	78.85	17.26
6.5	2.313	1961.03	13.67	3.18	82.21	17.87

Fuente: Elaboración propia.

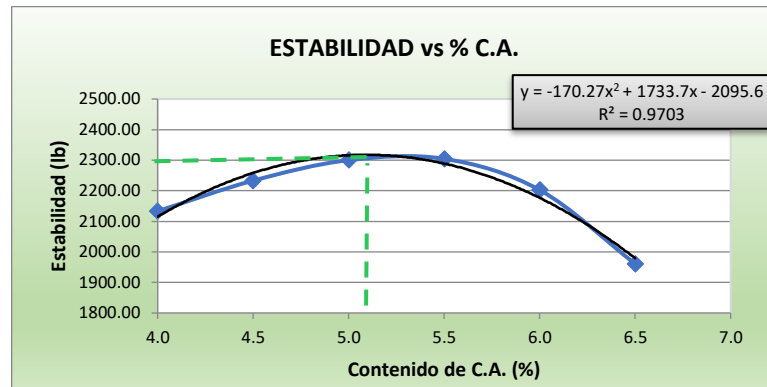
3.7.1 Gráficas Marshall

Figura 31. Porcentaje de cemento asfáltico vs densidad.



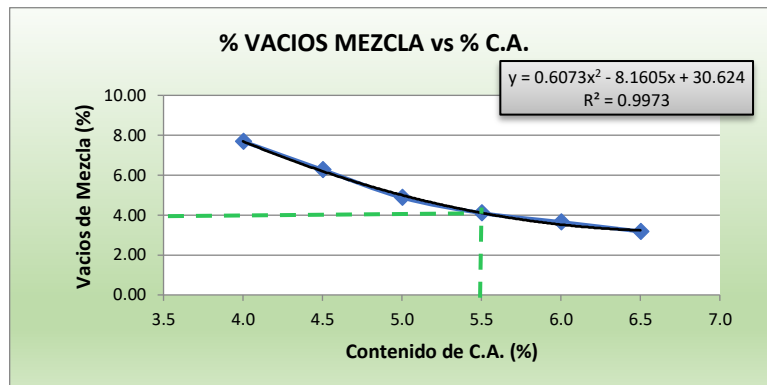
Fuente: Elaboración propia.

Figura 32. Porcentaje de cemento asfáltico vs estabilidad corregida.



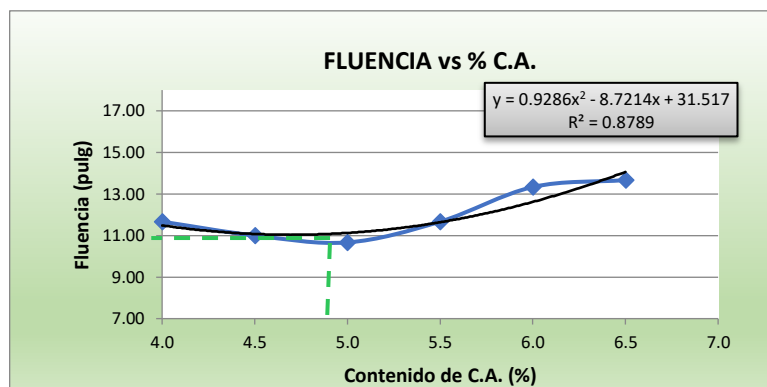
Fuente: Elaboración propia.

Figura 33. Porcentaje de cemento asfáltico vs % de vacíos respecto a la mezcla total.



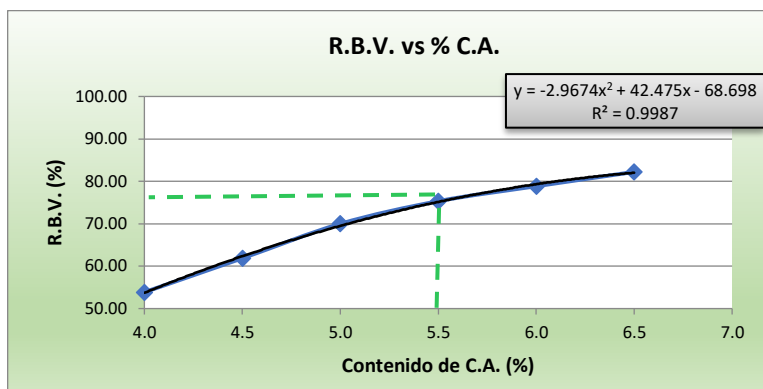
Fuente: Elaboración propia.

Figura 34. Porcentaje de cemento asfáltico vs fluencia.



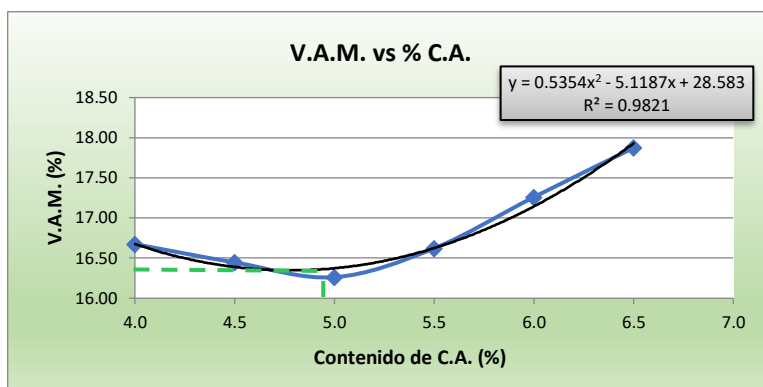
Fuente: Elaboración propia

Figura 35. Porcentaje de cemento asfáltico vs relación betumen vacíos (R.B.V.).



Fuente: Elaboración propia

Figura 36. Porcentaje de cemento asfáltico vs vacíos del agregado mineral (V.A.M.).



Fuente: Elaboración propia

3.8 Criterios para la determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico

Existen varios criterios para determinar el porcentaje óptimo de cemento asfáltico y que en algunos casos son requeridos para el diseño según varias normativas. se realiza en función a estas tres gráficas mediante los siguientes criterios:

- La densidad máxima
- La estabilidad máxima
- Porcentaje de vacíos entre 3% - 5%, para esta investigación se trabaja con el 4%

Del cual cada propiedad tendrá su contenido de cemento asfáltico, donde se sacará el promedio y este será el contenido óptimo de cemento asfáltico.

Tabla 55. Resultados de las gráficas del ensayo Marshall.

Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
Estabilidad Marshall [Lb]	2303.96	5.09
Vacíos de la mezcla [%]	4.00	5.52
Densidad máxima [g/cm ³]	2.33	5.44
% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio [%] =	5.4

Fuente: Elaboración propia.

Con el contenido óptimo de cemento asfáltico de 5.4 % se verifica en las demás propiedades si cumplen con la norma establecida.

3.9 Elaboración de briquetas con el porcentaje óptimo de cemento asfáltico y la adición de microfibras Sika Fibermesh 150.

Para la elaboración de briquetas el contenido de microfibras variará de 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.5% y 0.6%.

Tabla 56. Peso del agregado y cemento asfáltico.

porcentaje de microfibras [%]	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
porcentaje de cemento asfáltico [%]	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4
porcentaje de agregado [%]	94.6	94.6	94.6	94.6	94.6	94.6	94.6
peso del cemento asfáltico[g]	64.8	64.8	64.8	64.8	64.8	64.8	64.8
peso de Grava[g]	340.56	340.28	339.99	339.71	339.42	339.14	338.86
peso de Gravilla[g]	295.15	294.87	294.58	294.30	294.02	293.73	293.45
peso de Arena[g]	454.08	453.80	453.51	453.23	452.94	452.66	452.38
peso de Filler [g]	45.41	45.12	44.84	44.56	44.27	43.99	43.71
peso de microfibras [g]	0.00	1.14	2.27	3.41	4.54	5.68	6.81
peso total de la briqueta [g]	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200

Fuente: Elaboración propia.

Con la dosificación haciendo variar el porcentaje de microfibras se realiza la elaboración de briquetas, cinco briquetas para cada dosificación dando un total de 30 briquetas.

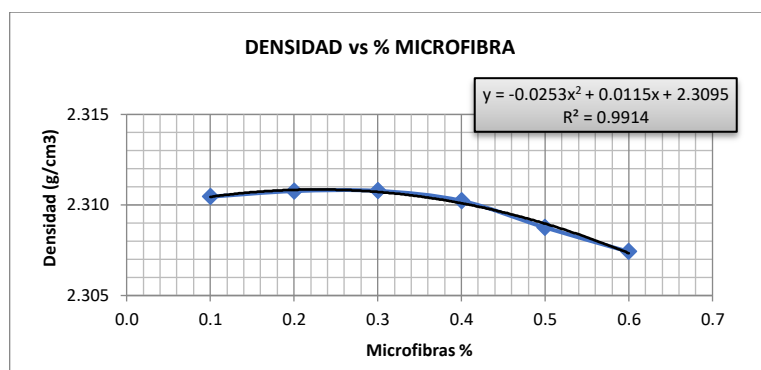
Tabla 57. Datos obtenidos de la metodología Marshall de mezclas asfálticas con diferentes porcentajes de microfibra.

N° de probeta	% de Microfibra	altura promedio de probeta	seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua	lectura del dial	lectura dial del flujo
		cm.	g	g	g	mm	0,01 pulg
1	0.1	6.79	1206.0	1214.4	693	955	13
2		6.63	1187.1	1192.1	677	868	12
3		6.67	1206.5	1212.5	691	891	11
4		6.60	1177.2	1184.1	674	871	12
5		6.74	1206.2	1211.4	690	794	15
6	0.2	6.66	1175.9	1181.6	674	865	12
7		6.66	1176.3	1182.6	675	931	11
8		6.68	1192.2	1197.2	679	876	13
9		6.69	1192.1	1196.9	681	950	10
10		6.72	1201.8	1206.6	686	909	15
11	0.3	6.88	1194.2	1199.2	682	895	12
12		6.53	1164.3	1170.7	669	898	13
13		6.65	1187.7	1192.9	678	950	11
14		6.66	1187.6	1193.9	678	886	16
15		6.43	1167.5	1172.2	668	861	9
16	0.4	6.74	1223.7	1227.6	697	884	12
17		6.48	1162.9	1168.3	668	881	13
18		6.76	1206.8	1212.1	690	928	12
19		6.71	1195.0	1201.4	682	869	16
20		6.67	1188.1	1194.7	680	861	9
21	0.5	6.70	1185.2	1191.6	677	884	12
22		6.64	1173.4	1179.5	672	881	13
23		6.64	1179.6	1185.0	674	796	11
24		6.57	1186.5	1192.1	678	847	15
25		6.74	1205.8	1211.5	690	795	12

26	0.6	6.58	1188.5	1193.1	679	757	10
27		6.77	1187.2	1192.3	678	782	16
28		6.49	1167.8	1172.4	667	793	16
29		6.66	1179.5	1184.9	673	773	13
30		6.43	1164.4	1169.8	664	782	12

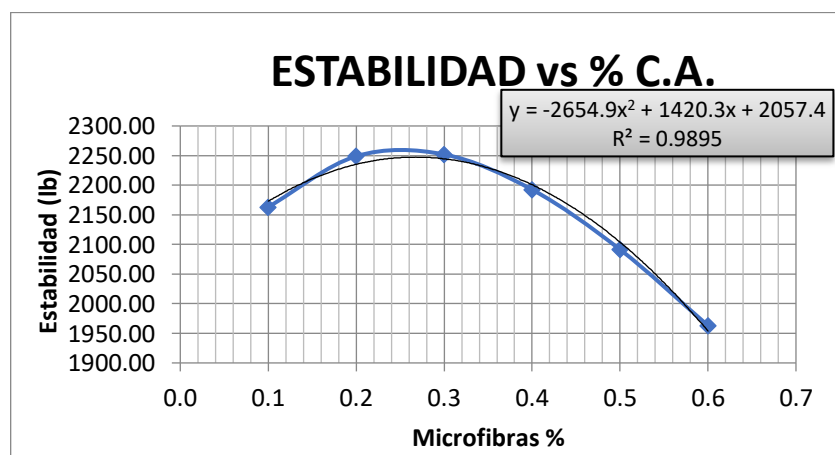
Fuente: Elaboración propia.

Figura 37. Densidad vs Microfibras.



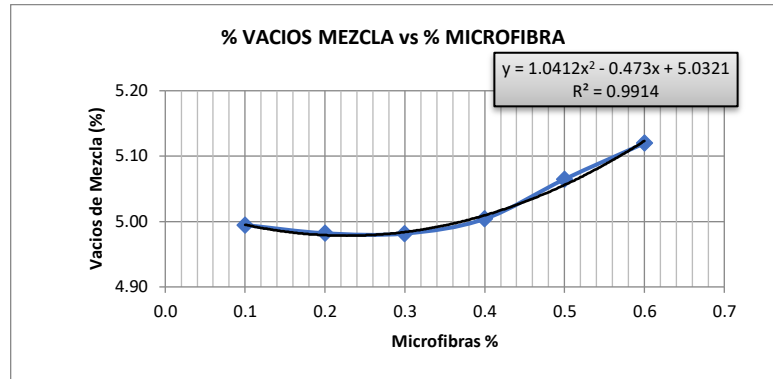
Fuente: Elaboración propia.

Figura 38. Estabilidad corregida vs Microfibras



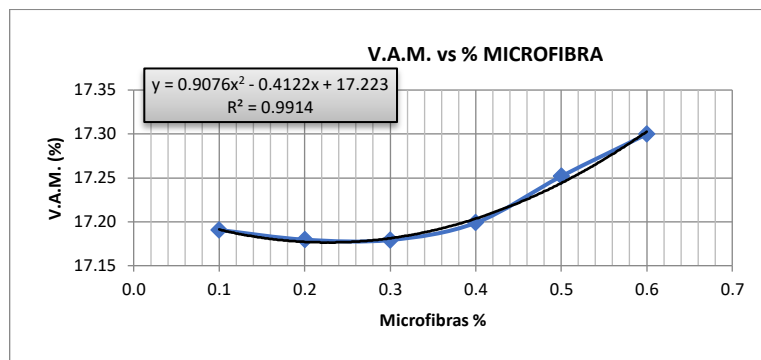
Fuente: Elaboración propia.

Figura 39. Porcentaje de vacíos de mezcla vs Microfibra.



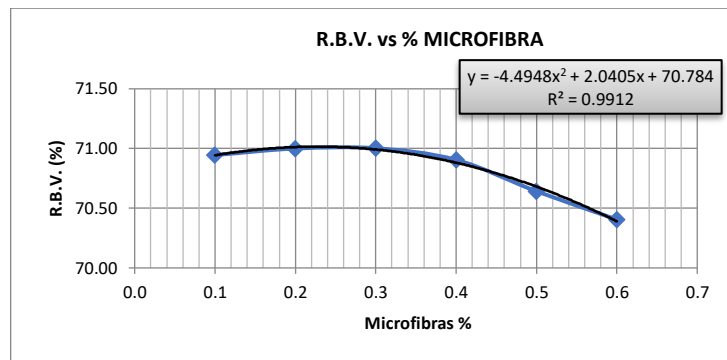
Fuente: Elaboración propia.

Figura 40. Vacíos de agregado mineral (V.A.M.) vs Microfibra.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 41. Relación betumen vacíos (R.B.V.) vs Microfibra.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 58. Resultados de las gráficas del ensayo Marshall para el contenido óptimo de Microfibra.

	Ensayo	Valor de Diseño	% de Microfibra
Determinación del porcentaje óptimo de microfibra sintética Sika Fibermesh 150	Estabilidad Marshall [Lb]	2264.19	0.27
	Densidad máxima [g/cm ³]	2.31	0.23
	Vacíos de la mezcla [%]	4.90	0.30
	% Porcentaje óptimo de microfibras Sintéticas	Promedio [%] =	0.26

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE DATOS OBSERVADOS

CAPÍTULO IV

PROCESAMIENTO Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

4.2 Análisis y resultados de una mezcla asfáltica modificada

Tabla 59. Resultados del ensayo de estabilidad con un porcentaje de 0.26% de microfibra Sika Fibermesh 150

1	2365.43
2	2244.21
3	2451.55
4	2235.29
5	2291.33
6	2329.52
7	2374.31
8	2241.93
9	2268.70
10	2356.20
11	2274.59
12	2274.27
13	2342.03
14	2313.27
15	2229.61
16	2422.93
17	2163.59
18	2196.12
19	2216.95
20	2408.30
21	2342.74
22	2360.48
23	2320.15
24	2230.48
25	2318.25
26	2274.12
27	2343.30
28	2319.11
29	2313.28
30	2257.47

Fuente: Elaboración propia

Tomando en cuenta que los grupos de datos obtenidos se las analizo en las mismas condiciones se decidió trabajar con la estadística descriptiva.

El procedimiento es el siguiente:

4.2.1 Media.

Es una medida de tendencia central, que resulta al efectuar una serie determinada de operaciones con un conjunto de números y que en determinadas condiciones puede representar por sí solo a una serie de datos.

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{N}$$

Donde:

$\bar{X}$ = Valor medio de una serie de datos

X_i = Valores de una serie de datos

N = Cantidad de valores de una serie de datos

$$\bar{X} = \frac{2365.43 + 2244.21 + 2451.55 + \dots + 2257.47}{30} = \frac{69079.51}{30} = 2302.65 \text{ lb}$$

Medidas de dispersión

4.2.2 Amplitud.

Es el rango en el cual se encuentran la serie de datos, siendo la diferencia entre el mayor y el menor valor de una serie de datos.

$$\text{Amplitud} = R_{\text{máx}} - R_{\text{mín}}$$

Donde:

$R_{\text{máx.}}$ = Mayor valor de una serie de datos.

$R_{\text{mín.}}$ = Menor valor de una serie de datos.

$$\text{Amplitud} = 2451.55 - 2163.59 = 287.96 \text{ lb}$$

4.2.3 Número de intervalos de clases.

Es la cantidad de intervalos o categorías en las que se agrupan los datos para organizarlos en una distribución de frecuencias. Su objetivo es equilibrar dos aspectos clave.

Fórmula de Sturges

La regla más utilizada para determinar el número de clases es la fórmula de Sturges:

$$\text{Numero de intervalos de clase} = 1 + 3.322\log_{10}[n]$$

donde:

n: Tamaño de la muestra (número de datos).

$\log_{10}$: Logaritmo en base 10.

$$\text{Numero de intervalos de clase} = 1 + 3.322\log_{10}(30) = 5.91$$

$$\text{Numero de intervalos de clase} \approx 6$$

4.2.4 Amplitud de intervalo de clase.

Es la medida del rango que cubre cada segmento en una distribución de frecuencias agrupadas. Representa la diferencia entre los límites superior e inferior de un intervalo y se calcula dividiendo la amplitud total de los datos entre el número de clases:

$$\text{Amplitud de intervalo de clase} = \frac{\text{Amplitud}}{\text{Numero de intervalos de clase}}$$

Donde:

Amplitud total (diferencia entre el valor máximo y mínimo).

Número de clases: (determinado por reglas como Sturges: $k \approx 1 + 3.322\log_{10}$)

$$\text{Amplitud de intervalo de clase} = \frac{282.38}{6} = 47.99 \approx 48 \text{ lb}$$

CAPÍTULO IV

PROCESAMIENTO Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

4.2 Análisis y resultados de una mezcla asfáltica modificada

Tabla 59. Resultados del ensayo de estabilidad con un porcentaje de 0.26% de microfibra Sika Fibermesh 150

1	2365.43
2	2244.21
3	2451.55
4	2235.29
5	2291.33
6	2329.52
7	2374.31
8	2241.93
9	2268.70
10	2356.20
11	2274.59
12	2274.27
13	2342.03
14	2313.27
15	2229.61
16	2422.93
17	2163.59
18	2196.12
19	2216.95
20	2408.30
21	2342.74
22	2360.48
23	2320.15
24	2230.48
25	2318.25
26	2274.12
27	2343.30
28	2319.11
29	2313.28
30	2257.47

Fuente: Elaboración propia

Tomando en cuenta que los grupos de datos obtenidos se las analizo en las mismas condiciones se decidió trabajar con la estadística descriptiva.

El procedimiento es el siguiente:

4.2.1 Media.

Es una medida de tendencia central, que resulta al efectuar una serie determinada de operaciones con un conjunto de números y que en determinadas condiciones puede representar por sí solo a una serie de datos.

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{N}$$

Donde:

$\bar{X}$ = Valor medio de una serie de datos

X_i = Valores de una serie de datos

N = Cantidad de valores de una serie de datos

$$\bar{X} = \frac{2365.43 + 2244.21 + 2451.55 + \dots + 2257.47}{30} = \frac{69079.51}{30} = 2302.65 \text{ lb}$$

Medidas de dispersión

4.2.2 Amplitud.

Es el rango en el cual se encuentran la serie de datos, siendo la diferencia entre el mayor y el menor valor de una serie de datos.

$$\text{Amplitud} = R_{\text{máx}} - R_{\text{mín}}$$

Donde:

$R_{\text{máx.}}$ = Mayor valor de una serie de datos.

$R_{\text{mín.}}$ = Menor valor de una serie de datos.

$$\text{Amplitud} = 2451.55 - 2163.59 = 287.96 \text{ lb}$$

4.2.3 Número de intervalos de clases.

Es la cantidad de intervalos o categorías en las que se agrupan los datos para organizarlos en una distribución de frecuencias. Su objetivo es equilibrar dos aspectos clave.

Fórmula de Sturges

La regla más utilizada para determinar el número de clases es la fórmula de Sturges:

$$\text{Numero de intervalos de clase} = 1 + 3.322\log_{10}[n]$$

donde:

n: Tamaño de la muestra (número de datos).

$\log_{10}$: Logaritmo en base 10.

$$\text{Numero de intervalos de clase} = 1 + 3.322\log_{10}(30) = 5.91$$

$$\text{Numero de intervalos de clase} \approx 6$$

4.2.4 Amplitud de intervalo de clase.

Es la medida del rango que cubre cada segmento en una distribución de frecuencias agrupadas. Representa la diferencia entre los límites superior e inferior de un intervalo y se calcula dividiendo la amplitud total de los datos entre el número de clases:

$$\text{Amplitud de intervalo de clase} = \frac{\text{Amplitud}}{\text{Numero de intervalos de clase}}$$

Donde:

Amplitud total (diferencia entre el valor máximo y mínimo).

Número de clases: (determinado por reglas como Sturges: $k \approx 1 + 3.322\log_{10}$)

$$\text{Amplitud de intervalo de clase} = \frac{282.38}{6} = 47.99 \approx 48 \text{ lb}$$

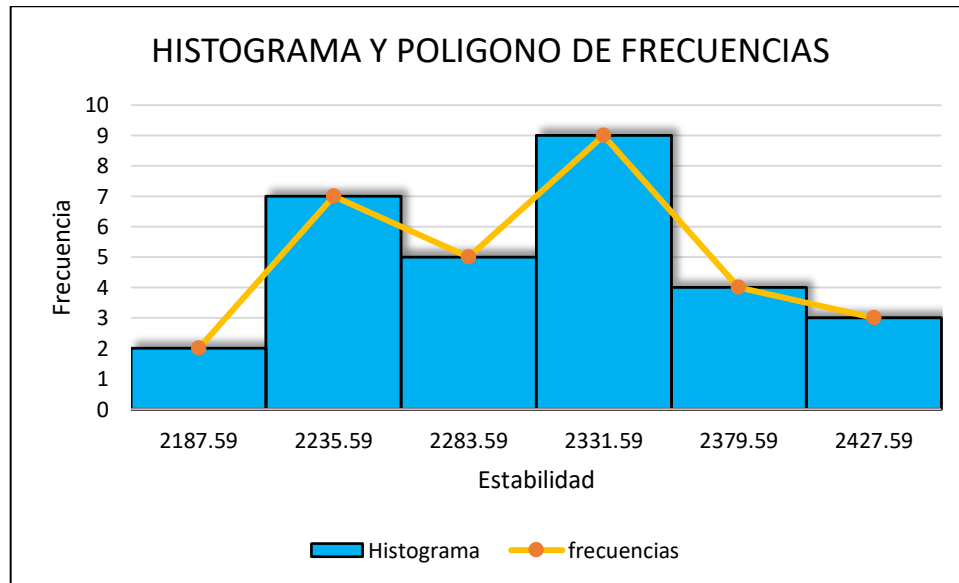
4.2.5 Cálculo de los intervalos de clase, marca de clase, frecuencia absoluta y relativa.

Tabla 60. Cálculo de frecuencia absoluta y relativa.

Intervalo	Límites de intervalos		Marcas de clase	Frecuencia absoluta	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa	Frecuencia relativa acumulada
	mínimo	máximo					
1	2163.59	2211.59	2187.59	2	2	0.067	0.067
2	2211.59	2259.59	2235.59	7	9	0.233	0.300
3	2259.59	2307.59	2283.59	5	14	0.167	0.467
4	2307.59	2355.59	2331.59	9	23	0.300	0.767
5	2355.59	2403.59	2379.59	4	27	0.133	0.900
6	2403.59	2451.59	2427.59	3	30	0.100	1.000

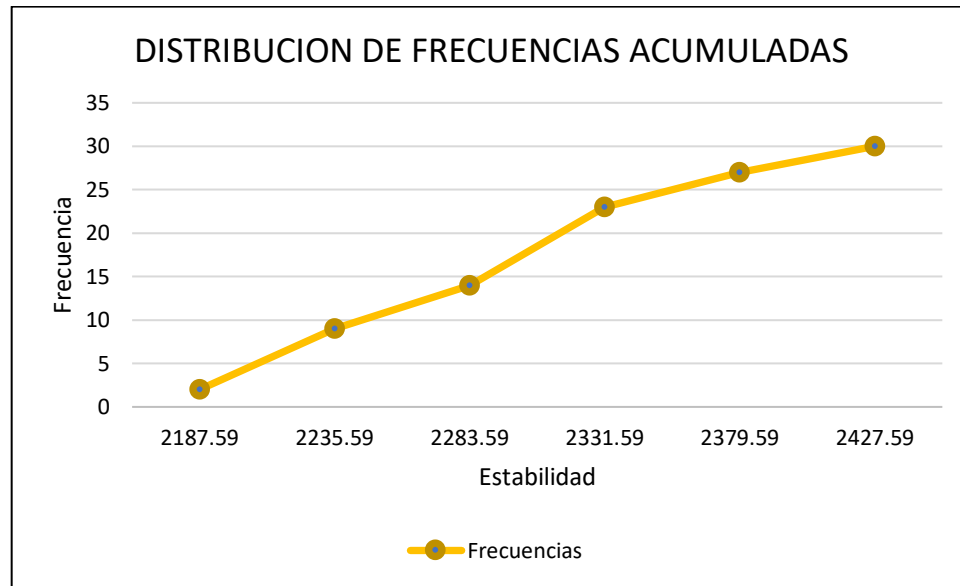
Fuente: Elaboración propia

Figura 42. Determinación del histograma y polígono de frecuencias.



Fuente: Elaboración propia

Figura 43. Determinación de la curva de frecuencia acumulada.



Fuente: Elaboración propia

4.2.6 Mediana (m)

La mediana es el valor que ocupa la posición central cuando todos los datos están ordenados de menor a mayor. Es especialmente útil cuando existen valores extremos que podrían distorsionar la media.

$$Posicion = \frac{n + 1}{2} = \frac{31}{2} = 15.5 \rightarrow \text{Promedio del 15º y 16º valor}$$

$$m = \frac{213.27 + 231328}{2} = 2313.28$$

El 50% de las briquetas tienen resistencia ≤ 2313.28 libras y el otro 50% ≥ 2313.28 libras.

4.2.7 Desviación Standard o típica.

es una medida que ofrece información sobre la dispersión media de una variable.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N}}$$

Donde:

σ = Desviación estándar

X_i = Valores de una serie de datos

$\bar{X}$ = Valor medio de una serie de datos

N = Cantidad de valores de una serie de datos

Diferencias al cuadrado para los primeros 3 valores:

$$1. [2365.43 - 2302.65]^2 = [62.78]^2 = 3941.57$$

$$2. [2244.21 - 2302.65]^2 = [-58.44]^2 = 3415.23$$

$$3. [2451.55 - 2302.65]^2 = [148.90]^2 = 22,171.21$$

Suma total de diferencias al cuadrado

$$\sum (X_i - \bar{X})^2 = 135609.95$$

Desviación estándar:

$$\sigma = \sqrt{\frac{135906.95}{30}} = 67.2334$$

Las resistencias se desvían en promedio ± 67.23 libras de la media.

4.2.8 Error Estándar de la Media (Ex).

Estimación de la precisión de la media muestral ($\bar{x}$) para predecir la media.

$$Ex = \frac{S}{\sqrt{n}}$$

Donde:

S = Desviación estándar

n = Cantidad de valores de una serie de datos

$$Ex = \frac{67.23}{\sqrt{30}} = 12.27$$

La media real de las briquetas está dentro de ± 12.47 libras de la media calculada (2302.65)

4.2.9 Cálculo del intervalo de Confianza (IC).

Es un rango de valores alrededor de la media muestral que, con un nivel de confianza determinado (95%), contiene probablemente el valor real de la media poblacional.

$$\mu = \bar{x} \pm z \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Donde:

- Media muestral ($\bar{X}$): 2302.65 libras
- Desviación estándar muestral (σ): 68.39 libras
- Tamaño de muestra (n): 30
- Variable estandarizada (z)
- Nivel de confianza (NC): 95% $\rightarrow \alpha = 0.05$

Dado que n=30 (muestra grande), usamos la distribución Z:

Valor z para NC 95% (dos colas): $Z \alpha/2 = 1.96$ (de tablas Z).

- $\mu = 2302.65 + 1.96 \frac{67.23}{\sqrt{30}} = 2326.71 \text{ lb}$
- $\mu = 2302.65 - 1.96 \frac{67.23}{\sqrt{30}} = 2278.5 \text{ lb}$

Con 95% de confianza, la verdadera resistencia media poblacional (μ) de las briquetas con microfibra está entre **2278.59 y 2326.71 libras**

4.3 Interpretación de la hipótesis de investigación.

Hipótesis de investigación causal/explicativa:

*"La adición de microfibras Fibermesh 150 a una mezcla asfáltica en caliente **mejora** el comportamiento de la estabilidad Marshall."*

Formulación Estadística:

Hipótesis alternativa $\rightarrow H_1: \bar{X} > u$

Hipótesis nula $\rightarrow H_0: \bar{X} \leq u$

Datos:

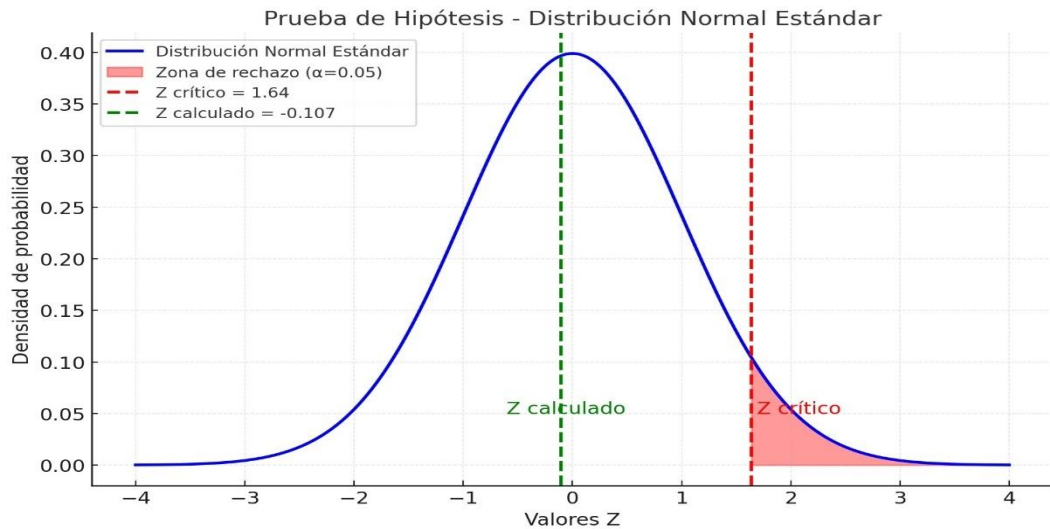
- **Hipótesis:**
 - $H_0: \mu \leq 2303.96$ (La microfibra **no mejora** la estabilidad Marshall).
 - $H_1: \mu > 2303.96$ (La microfibra **mejora** la estabilidad Marshall).
- Media muestral ($\bar{x}$): 2302.65 libras.
- Desviación estándar (σ): 67.23 libras.
- Tamaño de muestra (n): 30.
- Nivel de significancia (α): 0.05.

$$Z_c = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} = \frac{2302.65 - 2303.96}{\frac{67.23}{\sqrt{30}}} = -0.107$$

Valor Crítico (Z_α): Para $\alpha = 0.05$ (una cola derecha) = 1.64

Valor-p: ($p < 0.543$).

Figura 44. Representación gráfica de la prueba de hipótesis Z para la estabilidad Marshall



Fuente: Elaboración propia.

4.4 Decisión:

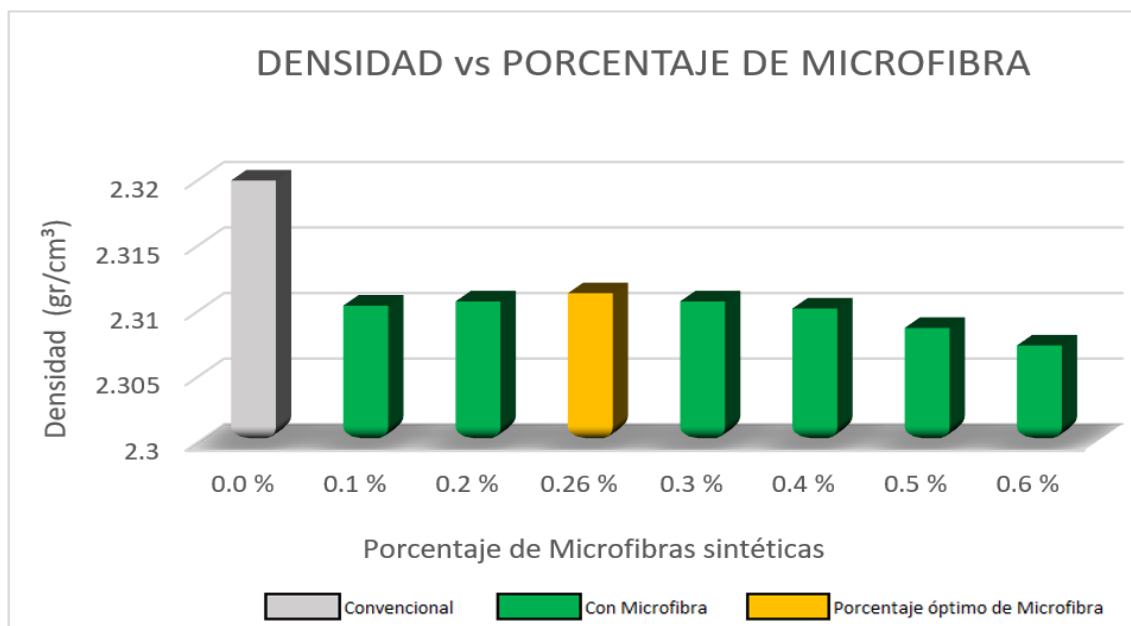
- Como $Z_c = -0.107 < Z_\alpha = 1.645$. Como el valor calculado queda fuera de la zona de rechazo, no se rechaza H_0 , lo que indica que la mezcla modificada no mejora la estabilidad Marshall según estos resultados.

4.5 Análisis y resultados de una mezcla asfáltica convencional y una modificada

Se analiza la influencia de la microfibras sintética Sika Fibermesh 150 en distintos porcentajes incluido el porcentaje óptimo en la elaboración de mezclas asfálticas en caliente, comparándola con una mezcla asfáltica convencional.

4.5.1 Densidad

Figura 45. Densidad VS Porcentaje de microfibras

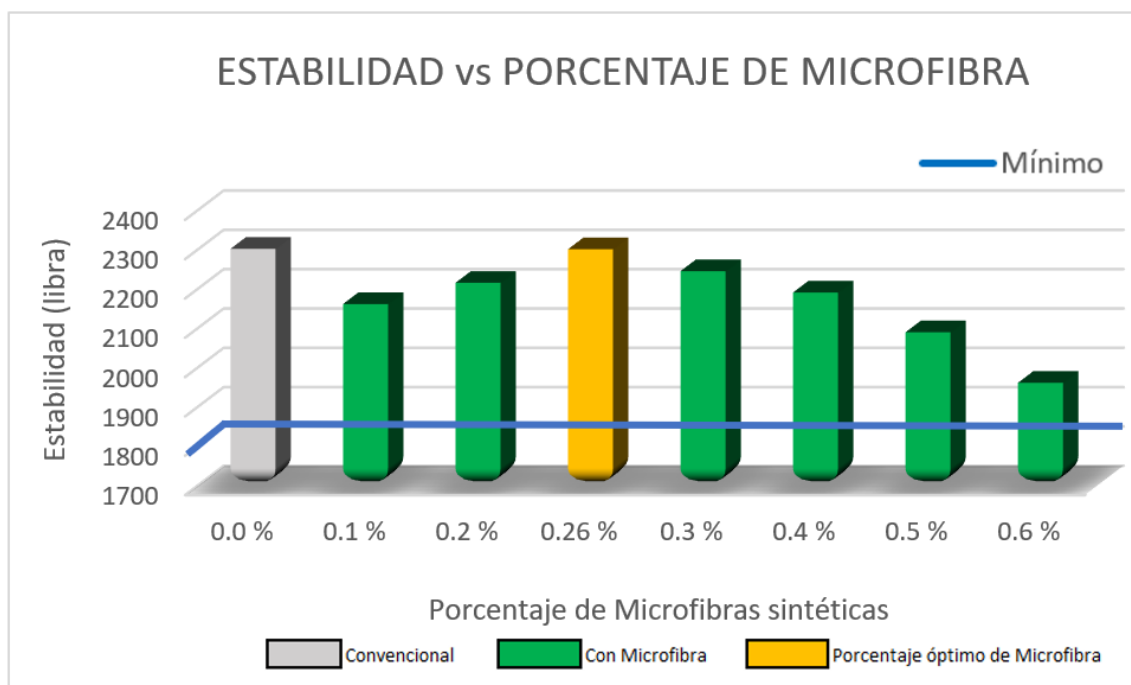


Fuente: Elaboración propia.

La densidad de la mezcla disminuye levemente al incrementar el contenido de microfibras, presentando la mezcla convencional valores ligeramente superiores a las modificadas, con las densidades más bajas en las dosificaciones más altas. La incorporación de microfibras produce una mezcla algo más liviana, con menor masa por unidad de volumen, pero favorece un mejor acoplamiento fibra-matriz cuando la distribución es homogénea, contribuyendo a una mayor tenacidad. La variación entre porcentajes es progresiva, manteniéndose la densidad cercana a la convencional en la dosificación óptima de 0.26%. Desde el punto de vista normativo, al no existir umbrales específicos para este parámetro, el análisis es comparativo respecto a la mezcla de referencia. En conclusión, la incorporación de 0.26% de microfibras no aumenta la densidad respecto a la convencional, sino que la reduce levemente, lo que representa ventajas prácticas en manejabilidad y reducción de peso sin afectar críticamente el comportamiento volumétrico de la mezcla.

4.5.2 Estabilidad (Marshall)

Figura 46. Estabilidad VS Porcentaje de microfibra

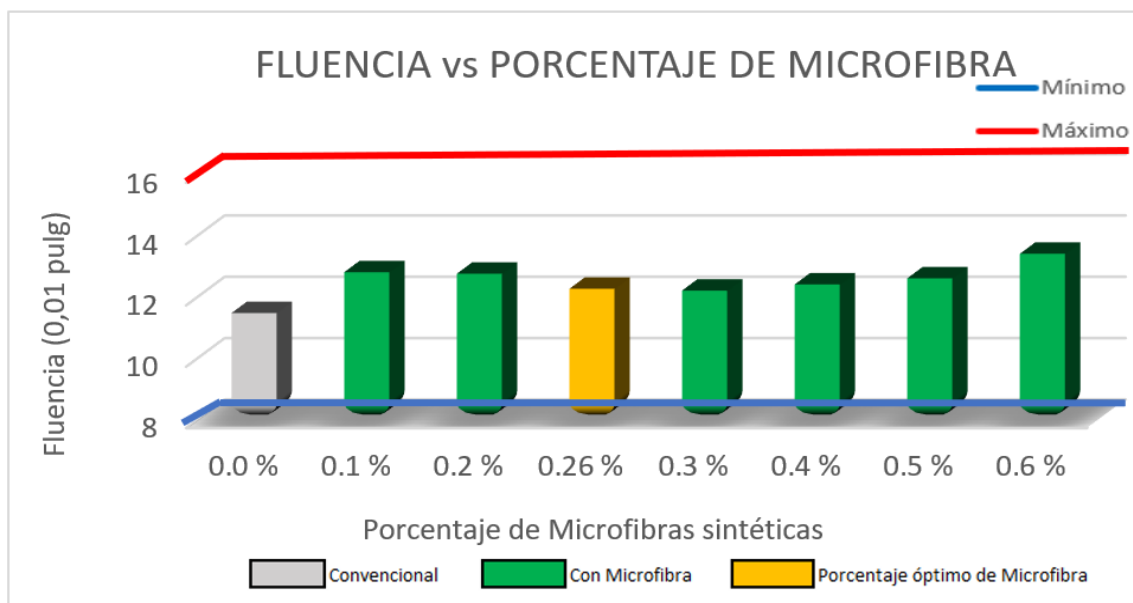


Fuente: Elaboración propia.

La estabilidad de la mezcla con microfibras en 0,26 % es prácticamente equivalente a la de la mezcla convencional, mientras que las dosificaciones mayores muestran una caída progresiva. Como ventaja interpretativa, mantener la estabilidad en niveles similares a la convencional implica que la adición de fibra no compromete la capacidad de carga última; además, todos los valores observados permanecen claramente por encima del requisito de 1800 lb establecido por la norma ASTM y el instituto de asfaltos, lo que significa que, aunque no haya una mejora visible respecto al ensayo de laboratorio convencional, la mezcla aditivada conserva margen de seguridad frente al umbral mínimo normativo. Entre los diferentes porcentajes, sólo los mayores presentan estabilidad reducida en comparación con la convencional, pero aún quedan por encima del mínimo reglamentario. Por tanto, la ventaja principal es la conservación de la resistencia estructural en la dosificación óptima, sin incremento significativo de la resistencia ni deterioro por debajo del límite normativo. Concluyendo sobre este parámetro, la microfibra en 0,26 % no mejora la estabilidad frente a la convencional, pero sí la mantiene claramente por encima del umbral exigido por las normas.

4.5.3 Fluencia

Figura 47. Fluencia VS Porcentaje de microfibra

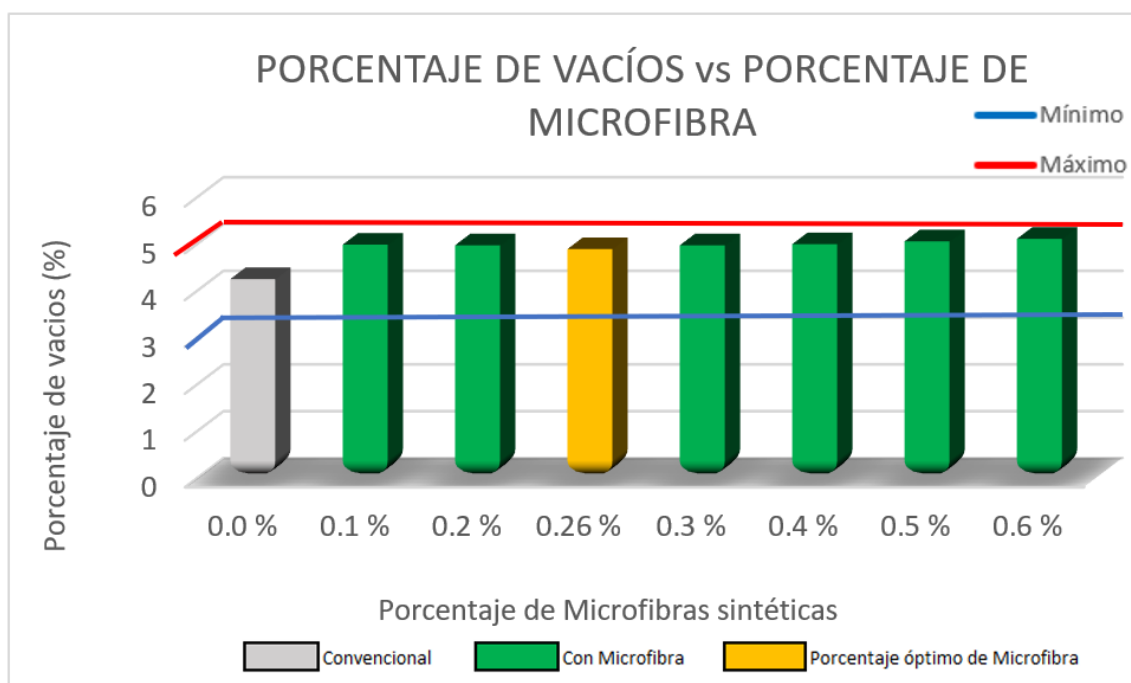


Fuente: Elaboración propia.

La fluencia aumenta de forma progresiva con la incorporación de microfibras; la mezcla con 0,26 % presenta mayor fluencia que la convencional, aunque todos los puntos analizados se mantienen dentro del rango permitido. Una ventaja de este incremento de fluencia es que la mezcla se muestra más dúctil: puede deformarse más antes de fracturarse, lo que reduce la probabilidad de rotura frágil bajo cargas puntuales o cambios térmicos severos. En términos prácticos esto puede traducirse en una mayor capacidad para absorber tensiones repetidas sin fisuración brusca, es decir, un comportamiento menos frágil, aunque más deformable. Comparando porcentajes, la fluencia crece con la dosis y la dosificación óptima representa un equilibrio donde la ductilidad aumenta, pero sin exceder los límites normativos. Respecto a la mezcla convencional, la adición en 0,26 % no mejora la fluencia en el sentido de menor deformación la incrementa, pero la ventaja es la mayor ductilidad y reducción del riesgo de fracturación repentina, manteniéndose dentro de los límites establecidos.

4.5.4 Porcentaje de vacíos (VTM)

Figura 48. Porcentaje de vacíos VS Porcentaje de microfibra

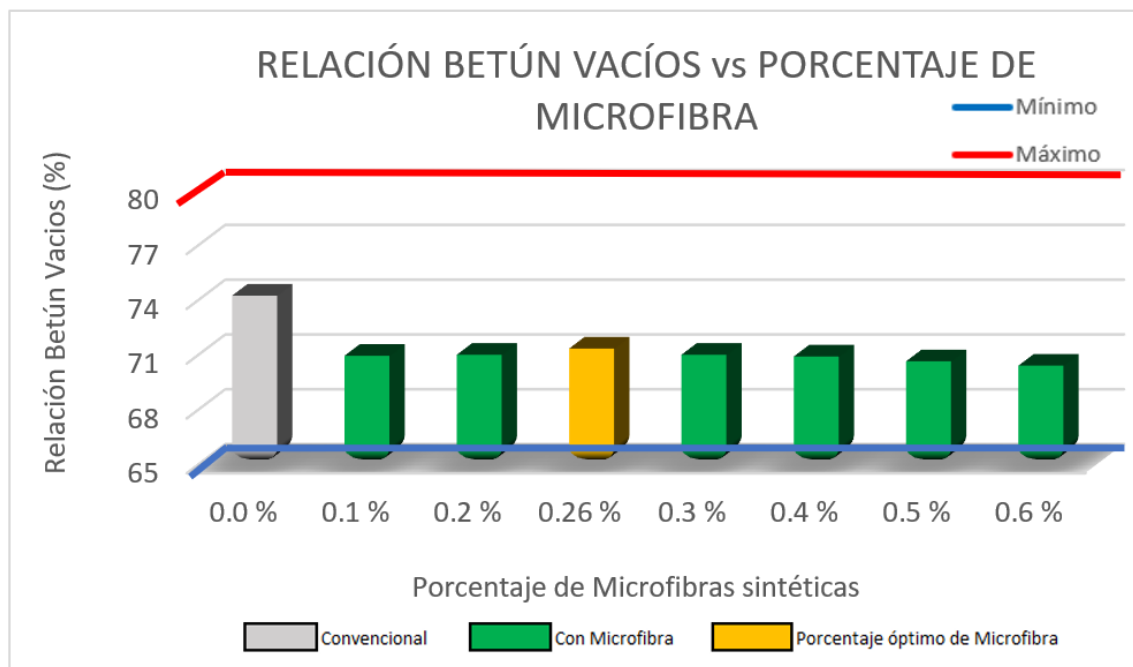


Fuente: Elaboración propia.

El porcentaje de vacíos aumenta con la adición de microfibras; la dosificación óptima eleva los vacíos respecto a la mezcla convencional pero generalmente se mantiene dentro del máximo permitido, mientras que las dosificaciones mayores pueden alcanzar o superar dicho máximo. Entre las ventajas de un ligero aumento de vacíos figura una mejor capacidad de drenaje interno y una posible reducción de la retención de agua en la matriz, lo que puede mejorar la resistencia a ciertos efectos de saturación superficial; además, vacíos controlados facilitan cierta flexibilidad en la mezcla. Comparando los distintos porcentajes, el incremento es continuo y la dosificación óptima ofrece un aumento moderado que permanece dentro de los límites normativos, mientras que las mayores dosificaciones pierden ese cumplimiento. En relación con la mezcla convencional, la adición de microfibra en 0,26 % se considera una mejora, pues indica una película de asfalto adecuada que protege el agregado lo que se traduce en una reducción del deterioro.

4.5.5 Relación Betún–Vacíos

Figura 49. Relación Betún Vacíos VS Porcentaje de microfibra

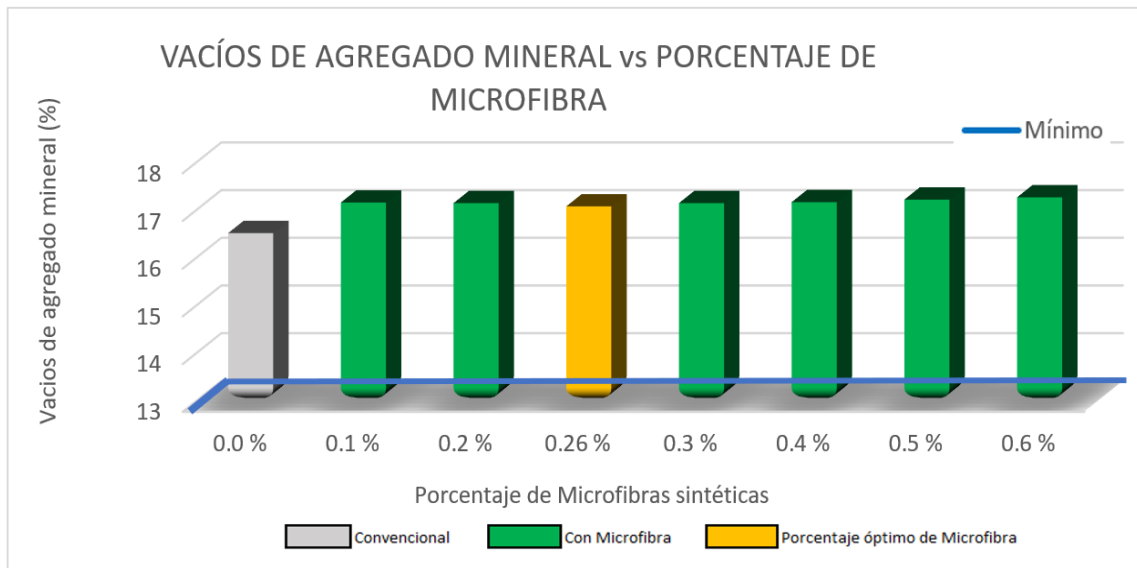


Fuente: Elaboración propia.

La relación betún–vacíos disminuye conforme se incrementa la fibra; la dosificación óptima muestra una ligera reducción frente a la convencional, aunque permanece dentro del rango aceptable definido por la normativa. Una ventaja de una disminución moderada es que puede indicar una película de betún más delgada que potencia una mayor rigidez superficial sin llegar a exponer los agregados, lo que mejora el comportamiento frente a deformaciones plásticas superficiales. Comparando porcentajes, la tendencia descendente es suave y la dosificación óptima conserva valores dentro del intervalo normativo, mientras que las adiciones superiores acentúan la caída. Respecto a la mezcla convencional, la microfibra en 0,26 % no mejora la en términos de aumento, sino que la reduce levemente; no obstante, esa reducción moderada puede asociarse a una respuesta más rígida de la superficie sin comprometer la protección del agregado dentro de los límites permitidos.

4.5.6 Vacíos de agregado mineral (VMA)

Figura 50. Vacíos de agregado mineral VS Porcentaje de microfibra



Fuente: Elaboración propia.

El VMA aumenta de forma moderada con la incorporación de microfibras; la dosificación óptima muestra un aumento respecto a la mezcla convencional, manteniéndose por encima del mínimo normativo. Como ventaja, un VMA algo mayor implica más espacio disponible para el betún y vacíos y favorecer la movilidad interna necesaria para disipar esfuerzos concentrados, aportando cierta resiliencia a nivel microestructural. Al comparar porcentajes, el VMA crece progresivamente con la dosis y la dosificación óptima representa un incremento controlado que todavía cumple con los requisitos normativos. Frente a la mezcla convencional, la adición de microfibra en 0,26 % mejora ya que un mayor VMA implica que la estructura granular deja suficiente espacio para albergar el betún, permitiendo una película adecuada de ligante. Si el VMA es muy bajo, hay riesgo de mezcla seca y frágil.

4.6 Análisis del precio de producción de la mezcla asfáltica convencional

Composición de la mezcla

Base de Cálculo

- **Densidad de la mezcla compactada:** $2.31 \text{ g/cm}^3 = 2310 \text{ kg/m}^3$
- **Peso de briqueta de referencia:** 1200 g
- **Factor de conversión a m³:** $2310 / 1.2 = 1925$
- **Dosificación óptima de cemento asfáltico:** 5.4%

Tabla 61. Composición mezcla convencional

Componente	Mezcla Convencional
Cemento Asfáltico	5.40%
Agregados Total	94.60%
Grava	30%
Gravilla	26%
Arena	40%
Filler	4%
TOTAL	100%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 62. Dosificación para 1 m³ mezcla asfáltica convencional

Componente	Peso por briqueta (g)	Peso por m ³ (kg)	Densidad (kg/m ³)	Volumen por m ³ (m ³)
Cemento asfáltico	64.8	124.7	1020	0.1223
Grava	340.6	655.7	2690	0.2438
Gravilla	295.2	568.3	2700	0.2105
Arena	454.1	874.1	2690	0.3249
Filler	45.4	87.4	2700	0.0324
Total	1200	2310	-	-

Fuente: Elaboración propia

Tabla 63. Análisis de precios unitarios de una carpeta asfáltica convencional.

ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO

DATOS GENERALES

PROYECTO : ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA ESTABILIDAD MARSHALL DE MEZCLAS ASFALTICA CALIENTES MODIFICADAS CON MICROFIBRAS SINTETICAS FIBERMESH 150

Actividad: CARPETA DE CONCRETO ASFÁLTICO (MEZCLA CONVENCIONAL)

Unitario: M3

Cantidad: 1.00

Moneda: BOLIVIANOS

Descripción	Und.	Rendimiento	Precio Productiv.	Costo Total
1.- MATERIALES				
Cemento asfáltico 85-100	Kg	124.70	13.500	1,683.45
Grava triturada 3/4"	m3	0.24	136.500	33.28
Gravilla triturada 3/8"	m3	0.32	120.000	38.99
Arena	m3	0.21	122.000	25.68
Filler	m3	0.03	120.000	3.89
TOTAL MATERIALES				1,785.29
2.- MANO DE OBRA				
Operador de equipo pesado	HR.	0.040	23.000	0.92
Operador de volqueta	HR.	0.030	16.500	0.50
Operador de planta	HR.	0.040	21.000	0.84
Mecánico de equipo pesado	HR.	0.030	22.500	0.68
Ayudante	HR.	0.060	15.000	0.90
BENEFICIOS SOCIALES - %			71.18%	2.73
IMPUESTO AL VALOR AGREGADO - %			14.94%	0.98
TOTAL MANO DE OBRA				7.54
3.- EQUIPO Y MAQUINARIA				
Planta asfáltica	HR.	0.004	3,600.000	14.40
Compactadora neumática	HR.	0.002	260.000	0.52
Compactadora de rodillo	HR.	0.005	285.000	1.43
Terminadora de asfalto	HR.	0.010	410.000	4.10
Cargador frontal 150 HP	HR.	0.003	380.000	1.14
Volqueta 6 m3	HR.	0.035	110.000	3.85
Herramientas menores	HR.	6.000	0.036	0.22
TOTAL EQUIPO Y MAQUINARIA				25.65
4.- GASTOS GENERALES				
GASTOS GENERALES - %			10.00%	180.75
TOTAL GASTOS GENERALES				180.75
5.- UTILIDAD				
UTILIDAD - %			10.00%	195.96
TOTAL UTILIDAD				195.96
6.- IT				
IMPUESTO A LAS TRANSACCIONES - %			3.09%	66.61
TOTAL IT				66.61
TOTAL PRECIO UNITARIO				2,261.79

Fuente: Elaboración propia.

4.7 Análisis del precio de producción de la mezcla asfáltica modificada

Tabla 64. Composición mezcla modificada

Componente	Mezcla Modificada con Microfibras
Cemento Asfáltico	5.40%
Microfibras	0.26%
Agregados Total	94.34%
Grava	29.93%
Gravilla	25.94%
Arena	39.91%
Filler	3.99%
TOTAL	100%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 65. Dosificación para 1 m³ mezcla asfáltica modificada

Componente	Peso por briqueta (g)	Peso por m ³ (kg)	Densidad (kg/m ³)	Volumen por m ³ (m ³)
Cemento asfáltico	64.8	124.7	1020	0.1223
Microfibras	3	5.8	1100	0.0053
Grava	339.7	653.9	2690	0.2431
Gravilla	294.3	566.5	2700	0.2098
Arena	453.5	873	2690	0.3245
Filler	44.8	86.2	2700	0.0319
Total	1200	2310	-	-

Fuente: Elaboración propia

Tabla 66. Análisis de precios unitarios de una carpeta asfáltica modificada

ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO

DATOS GENERALES

PROYECTO : ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA ESTABILIDAD MARSHALL DE MEZCLAS ASFALTICA CALIENTES MODIFICADAS CON MICROFIBRAS SINTETICAS FIBERMESH 150

Actividad: CARPETA DE CONCRETO ASFÁLTICO (MEZCLA MODIFICADA)

Unitario: M3

Cantidad: 1.00

Moneda: BOLIVIANOS

Descripción	Und.	Rendimiento	Precio Productiv.	Costo Total
1.- MATERIALES				
Cemento asfáltico 85-100	Kg	124.700	13.500	1,683.45
Microdibras Sika Fibermesh 150	Kg	5.800	50.000	290.00
Grava triturada 3/4"	m3	0.244	136.500	33.28
Gravilla triturada 3/8"	m3	0.325	120.000	38.99
Arena	m3	0.211	122.000	25.68
Filler	m3	0.032	120.000	3.89
TOTAL MATERIALES				2,075.29
2.- MANO DE OBRA				
Operador de equipo pesado	HR.	0.040	23.00	0.92
Operador de volqueta	HR.	0.030	16.50	0.50
Operador de planta	HR.	0.040	21.00	0.84
Mecánico de equipo pesado	HR.	0.030	22.50	0.68
Ayudante	HR.	0.060	15.00	0.90
BENEFICIOS SOCIALES - %			71.18%	2.73
IMPUESTO AL VALOR AGREGADO - %			14.94%	0.98
TOTAL MANO DE OBRA				7.54
3.- EQUIPO Y MAQUINARIA				
Planta asfáltica	HR.	0.004	3,600.00	14.40
Compactadora neumática	HR.	0.002	260.00	0.52
Compactadora de rodillo	HR.	0.005	285.00	1.43
Terminadora de asfalto	HR.	0.010	410.00	4.10
Cargador frontal 150 HP	HR.	0.003	380.00	1.14
Volqueta 6 m3	HR.	0.035	110.00	3.85
Herramientas menores	HR.	6.000	0.04	0.22
TOTAL EQUIPO Y MAQUINARIA				25.65
4.- GASTOS GENERALES				
GASTOS GENERALES - %			10.00%	209.75
TOTAL GASTOS GENERALES				209.75
5.- UTILIDAD				
UTILIDAD - %			10.00%	198.86
TOTAL UTILIDAD				198.86
6.- IT				
IMPUESTO A LAS TRANSACCIONES - %			3.09%	67.59
TOTAL IT				67.59
TOTAL PRECIO UNITARIO				2,584.67

Fuente: Elaboración propia

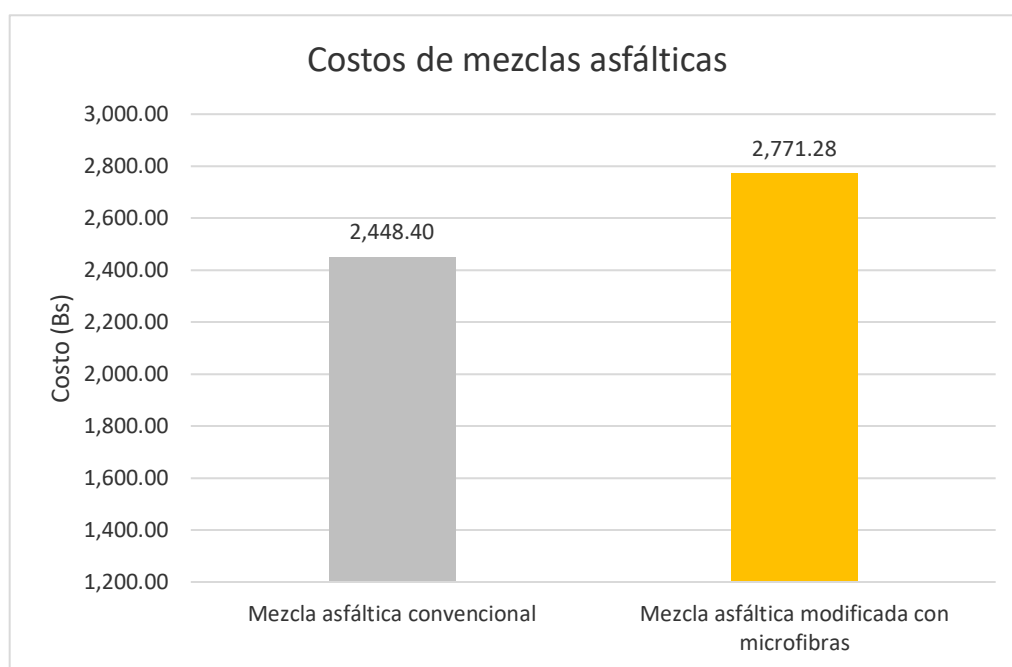
Resultados del precio unitario de producción de las mezclas asfálticas

Tabla 67. Costo de producción de las mezclas asfálticas convencional y modificada

N°	Descripción	Costo (Bs/m³)	Incremento
1	Mezcla asfáltica convencional	2,448.40	0%
2	Mezcla asfáltica modificada con microfibras	2,771.28	11.67%

Fuente: Elaboración propia

Figura 51. Comparación del costo de producción de las mezclas asfáltica



Fuente: Elaboración propia

Con un precio de Bs. 2.448,40/m³ (Presupuesto & Construcción, 2025), la mezcla asfáltica convencional es la más económica, sirviendo como nuestra referencia patrón.

La mezcla asfáltica modificada con microfibras presenta un costo de producción de 2,771.28 Bs/m³, lo que representa un incremento del 11.67% (289.71 Bs) respecto a la

mezcla convencional. Sin embargo, debido a que no se evidenció una mejora significativa en sus propiedades Marshall, este aumento en el costo no se justifica técnicamente. Por tanto, la aplicación de la mezcla modificada no resulta recomendable, ya que implica un mayor costo sin un beneficio proporcional en el desempeño del material.

4.8 Análisis comparativo entre resultados de laboratorio y datos municipales

- **Granulometría**

Al comparar la granulometría obtenida en laboratorio con la proporcionada por la alcaldía se observa que esta última utiliza una serie de tamices reducida, limitada solo a los tamices necesarios para cumplir sus procedimientos internos de control de materiales (1", ¾", ½", ⅜", N° 4, N° 8, etc.). Esta selección responde a que la alcaldía realiza controles de recepción, donde únicamente verifica si el agregado cumple los rangos exigidos en sus especificaciones municipales, sin necesidad de caracterizar todo el espectro granulométrico.

Tabla 68. Comparación del agregado grueso (grava)

Grava		Obtenido en laboratorio	Proporcionado por la alcaldía
Tamices	tamaño (mm)	% que pasa del total	% que pasa del total
1"	25.4	100.00	100
¾"	19.0	96.80	97.72
½"	12.5	39.44	44.13
⅜"	9.50	10.64	3.08
N°4	4.75	1.96	
N°8	2.36	0.00	
N°16	1.18	0.00	
N°30	0.60	0.00	
N°50	0.30	0.00	
N°100	0.15	0.00	
N°200	0.075	0.00	
BASE	-	0.00	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 69. Comparación del agregado grueso (gravilla)

Gravilla		Obtenido en laboratorio	Proporcionado por la alcaldía
Tamices	tamaño (mm)	% que pasa del total	% que pasa del total
1"	25.4	100.00	
3/4"	19.0	100.00	
1/2"	12.5	99.16	100
3/8"	9.50	85.54	93.93
Nº4	4.75	23.52	12.4
Nº8	2.36	3.75	
Nº16	1.18	0.00	
Nº30	0.60	0.00	
Nº50	0.30	0.00	
Nº100	0.15	0.00	
Nº200	0.075	0.00	
BASE	-	0.00	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 70. Comparación del agregado fino (arena)

Arena		Obtenido en laboratorio	Proporcionado por la alcaldía
Tamices	tamaño (mm)	% que pasa del total	% que pasa del total
1"	25.4	100.00	
3/4"	19.0	100.00	
1/2"	12.5	100.00	
3/8"	9.50	100.00	100
Nº4	4.75	96.58	97.63
Nº8	2.36	76.47	
Nº10	2.00	71.74	
Nº16	1.18	62.37	69.28
Nº30	0.60	52.09	
Nº40	0.43	36.23	
Nº50	0.30	26.46	21.9
Nº100	0.15	6.29	4.51
Nº200	0.075	0.62	2.94
BASE	-	0.00	

Fuente: Elaboración propia.

- **Ensayo de caras fracturadas**

En el ensayo de caras fracturadas, la diferencia entre resultados se explica por el criterio adoptado en cada caso. La alcaldía utiliza el criterio de una cara fracturada, porque su objetivo es realizar un control operativo y rápido de la calidad del agregado, verificando únicamente que el material tenga una ruptura mínima que garantice cierta angularidad para obras municipales de uso general. Este procedimiento es suficiente para controles rutinarios donde no se requiere caracterizar el agregado con profundidad. En esta investigación, en cambio, se aplicó el criterio de dos o más caras fracturadas, ya que este permite una evaluación más estricta de la angularidad y la calidad estructural del agregado, factores que influyen directamente en la estabilidad Marshall y en el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas modificadas.

Grava

Porcentaje de caras fracturadas [%]

Obtenida en laboratorio	Proporcionada por la alcaldía
79.43	92.27

Gravilla

Porcentaje de caras fracturadas [%]

Obtenida en laboratorio	Proporcionada por la alcaldía
81.03	93.7

- **Desgaste de los ángeles**

Los resultados del desgaste Los Ángeles muestran ligeras variaciones entre los valores obtenidos en laboratorio y los proporcionados por la alcaldía, atribuibles a diferencias de lote y condiciones de ensayo. Sin embargo, estos rangos son normales y no representan cambios significativos en la calidad del material. Tanto la grava como la gravilla cumplen con la especificación vigente, ya que todos los valores registrados son **menores al 40%**, confirmando que ambos agregados presentan una adecuada resistencia al desgaste.

Grava

desgaste de los ángeles [%]	Obtenida en laboratorio	Proporcionada por la alcaldía
	23.82	27.75

Gravilla

desgaste de los ángeles [%]	Obtenida en laboratorio	Proporcionada por la alcaldía
	21.39	29.62

4.9 Especificaciones Técnicas

4.9.1 Concepto del Objeto de Investigación

La presente investigación se enfoca en analizar cómo la incorporación de microfibras sintéticas Fibermesh 150 influye en el comportamiento de la estabilidad Marshall en mezclas asfálticas calientes. La hipótesis central sostiene que dicha incorporación mejora la estabilidad de las mezclas asfálticas frente a cargas de tráfico, lo que se evaluó mediante el método Marshall. Esta investigación busca comprobar, a través de pruebas de laboratorio, si la adición de microfibras genera un refuerzo efectivo, reduciendo la formación de fisuras y aumentando la durabilidad del pavimento.

4.9.2 Materiales y Equipos

4.9.2.1 Materiales utilizados

Agregados pétreos (gruesos y finos): Se emplearon agregados naturales provenientes de la chancadora Garzón, ubicada en el río Sella, suministrados por la Alcaldía Municipal de Tarija. Estos agregados fueron previamente caracterizados según las normas técnicas para determinar su granulometría, desgaste, absorción y forma.

Cemento Asfáltico 85-100: Utilizado como ligante, fue proporcionado por la empresa REPSOL de origen peruano. Su caracterización incluyó ensayos de penetración, ductilidad, punto de ablandamiento e inflamación.

Microfibras Sintéticas Fibermesh 150: Se trata de fibras cortas de polipropileno diseñadas específicamente para actuar como refuerzo en mezclas bituminosas, mejorando la cohesión interna y la resistencia a la deformación. Su uso busca distribuir las tensiones internas del pavimento y retardar la aparición de fallas.

4.9.2.2 Equipos utilizados

Molde Marshall: Dispositivo cilíndrico de acero (101.6 mm de diámetro y 150 mm de altura) utilizado para compactar y formar briquetas con el fin de evaluar su estabilidad y fluencia.

Compactador automático Marshall: Utilizado para aplicar golpes controlados que simulan las condiciones de carga.

Prensa Marshall con dial de flujo: Empleada para medir la resistencia máxima (estabilidad) de la biqueta y el desplazamiento durante la aplicación de carga (fluencia).

Balanza hidrostática: Para determinar la densidad de las briquetas, utilizando el principio de Arquímedes.

Balanza de precisión: Utilizada para pesar las muestras en condiciones seca y saturada.

Balanza analítica digital de alta sensibilidad: Utilizo esta balanza para pesar con exactitud las microfibras Fibermesh 150 en gramos, especialmente en pequeñas cantidades necesarias para cada mezcla experimental.

Vernier digital: Permite medir con precisión la altura de las briquetas antes del ensayo.

Termómetro de infrarrojos 360°: Usado para controlar que la temperatura de mezcla y compactación.

4.9.3 Procedimiento y Rango de Medición

Para la elaboración de las briquetas de ensayo, se emplea el método Marshall con el objetivo de evaluar el comportamiento de mezclas asfálticas calientes modificadas con distintos porcentajes de microfibras sintéticas Fibermesh 150. La dosificación de microfibras se realiza en proporciones crecientes del 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.5% y 0.6%, respecto al peso total de la mezcla, con el fin de identificar la proporción óptima que brinde una mejora significativa en la estabilidad y fluencia sin comprometer otras propiedades volumétricas. Las microfibras se incorporan en la fase final del proceso de

preparación de la mezcla asfáltica, agregándolas directamente sobre la mezcla homogénea compuesta por los agregados y el cemento asfáltico, justo antes de su colocación en el molde Marshall. Esta incorporación se realiza en estado seco, lo cual permite que las fibras mantengan su integridad estructural y no generen grumos ni aglomeraciones. Inmediatamente después de su adicción, luego somete a un proceso de mezclado durante unos segundos. Este paso adicional de mezclado es fundamental para lograr una dispersión uniforme de las microfibras dentro de la matriz asfáltica, lo que garantiza que el refuerzo se distribuya de manera equitativa en todo el volumen de la mezcla, mejorando la cohesión interna y la resistencia a la deformación plástica de las briquetas elaboradas. Posteriormente, con la mezcla lista, se procede al proceso de moldeo. Se utiliza el compactador Marshall con moldes cilíndricos de acero de 4 pulgadas (101.6 mm) de diámetro, donde se vierte la mezcla en caliente. Cada muestra es compactada aplicando 75 golpes por cara utilizando un pisón estandarizado, de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM D6926. Este nivel de compactación simula las condiciones de campo que se presentan en capas de rodadura sometidas a tránsito vehicular.

En total, se elaboran 30 briquetas, distribuidas en seis grupos de cinco briquetas cada uno, correspondientes a cada nivel de dosificación de microfibras. Esta cantidad permite obtener una muestra estadísticamente significativa para analizar la variación de los resultados y establecer tendencias confiables. Una vez compactadas, las briquetas son desmoldadas tras el enfriamiento natural, y luego acondicionadas a temperatura ambiente antes de ser sometidas a ensayo.

Las pruebas de laboratorio que se realizan son la estabilidad Marshall y la fluencia. La estabilidad Marshall se refiere a la carga máxima que la biqueta puede soportar antes de que ocurra una deformación plástica significativa, y se expresa comúnmente en kilogramos o libras. Por otro lado, la fluencia es una medida de la deformación total que experimenta la muestra durante el ensayo de carga, expresada en milímetros. Ambas propiedades son evaluadas utilizando una prensa Marshall equipada con un dial de flujo, conforme a la norma ASTM D6927.

El procedimiento completo permite observar cómo varía el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas calientes en función del contenido de microfibras Fibermesh 150. Los datos recolectados son luego sistematizados y sometidos a análisis estadístico para

determinar la dosificación óptima, así como la posible existencia de un umbral a partir del cual las propiedades comienzan a deteriorarse o a presentar efectos negativos como pérdida de trabajabilidad o cohesión.

4.9.4 Medición de la Variable

La variable dependiente principal en esta investigación es la estabilidad Marshall, la cual se mide en kilogramos o libras y representa la máxima carga que puede soportar una briqueta antes de alcanzar su punto de falla estructural. Esta propiedad es esencial para evaluar la resistencia de la mezcla asfáltica frente a las solicitudes del tránsito vehicular. Asimismo, se evalúa la fluencia, expresada en milímetros [mm], que indica la deformación total que experimenta la muestra durante la aplicación de la carga, lo cual proporciona una medida del comportamiento plástico de la mezcla. La variable independiente corresponde al porcentaje de microfibras sintéticas Fibermesh 150 incorporadas a la mezcla, el cual se varió sistemáticamente entre distintos niveles (0.1% a 0.6%) para analizar su influencia en el desempeño mecánico de las briquetas. Mediante el análisis estadístico de los resultados de los ensayos, se determinó que el porcentaje óptimo que mejora significativamente la estabilidad sin comprometer otras propiedades clave del pavimento es 0.26%, lo que representa un equilibrio ideal entre resistencia, trabajabilidad y cohesión de la mezcla asfáltica modificada.

4.9.5 Forma de Cubicación

Las microfibras Fibermesh 150 fueron dosificadas en porcentaje con respecto al peso total de la mezcla asfáltica. Para su manejo en laboratorio, se pesaron en gramos con balanza de precisión, ya que vienen presentadas en empaques de 600 g o más, según el proveedor. Las cantidades utilizadas en cada mezcla se calcularon previamente en función de la dosificación teórica del diseño Marshall.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.2 Conclusiones

- La estabilidad Marshall de las mezclas asfálticas modificadas con microfibras sintéticas Fibermesh 150 supera el valor mínimo exigido por la normativa ASTM y el Instituto del Asfalto, garantizando una resistencia estructural. Sin embargo, al compararlas con la mezcla convencional, no se observa un incremento en estabilidad. Por tanto, la adición de microfibras mantiene la estabilidad dentro de los parámetros óptimos normativos sin representar una mejora respecto a la mezcla convencional.
- Los agregados pétreos y el cemento asfáltico REPSOL 85-100 cumplen con las especificaciones técnicas establecidas por las normas ASTM y AASHTO. Los agregados presentan una granulometría adecuada, alta resistencia al desgaste, y una absorción moderada, lo que los hace idóneos para la elaboración de mezclas asfálticas estables y duraderas.
- La incorporación de microfibras sintéticas Sika Fibermesh 150 modifica las propiedades volumétricas y mecánicas de la mezcla. Se observa una reducción progresiva en la densidad y un aumento en la fluencia, mientras que la estabilidad Marshall se mantiene en niveles equivalentes al de la mezcla convencional, especialmente en dosificaciones bajas.
- La estabilidad Marshall de la mezcla modificada con 0.26% de microfibra (2302.65 lb) es estadísticamente equivalente a la de la mezcla convencional (2303.96 lb), con una pequeña diferencia. Este resultado demuestra que la adición de microfibras no compromete la capacidad de carga de la mezcla, manteniendo casi los mismos niveles de estabilidad.
- El porcentaje óptimo de microfibra que maximiza la estabilidad Marshall sin afectar negativamente la trabajabilidad y volumetría de la mezcla es de 0.26%. En esta dosificación, se logra un equilibrio entre estabilidad, fluencia y contenido de vacíos, cumpliendo con los criterios normativos.

5.3 Recomendaciones

- Es necesario seguir los procedimientos según las normas establecidas para cualquier ensayo siguiendo paso a paso, teniendo en cuenta tomar los pesos con exactitud, controlar la temperatura en caso del cemento asfáltico y controlar la limpieza de los materiales previo al ensayo.
- Antes de iniciar con la elaboración de las briquetas es indispensable haber terminado toda la caracterización de los materiales tanto de los agregados como del cemento asfáltico, caso contrario se corre el riesgo de elaborar mezclas asfálticas de baja calidad.
- Para garantizar una distribución homogénea de las microfibras en la mezcla asfáltica, se recomienda separar manualmente las fibras antes de su incorporación. Para después mezclar en al menos 60 segundos para lograr una dispersión uniforme en la matriz, optimizando así su efectividad como refuerzo.
- Evitar recalentar el cemento asfáltico y calentarlo solo al momento del ensayo; además, no sobrepasar la temperatura de fusión de las microfibras para evitar la pérdida de sus propiedades.
- Compactar en lo posible con el martillo Marshall automático, porque tiene velocidad constante normada, altura de caída estandarizada, mantiene su perpendicularidad, y evita que la mezcla se enfríe rápido, por lo tanto, ahorra tiempo de ejecución.
- Es importante prestar mucha atención a la hora de romper las briquetas y leer bien la estabilidad ya que se pueden obtener lecturas falladas debido a una mala observación.