

CAPITULO I
GENERALIDADES

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1 Introducción

Los pavimentos flexibles son una solución comúnmente empleada en carreteras y vías de tránsito debido a su capacidad para soportar cargas dinámicas y distribuir las a través de varias capas de material. Sin embargo, con el aumento constante del tráfico vehicular y las cambiantes condiciones ambientales, se requiere una mejora continua en los métodos de diseño y construcción de pavimentos para asegurar su rendimiento a largo plazo.

En la última década, la investigación en el campo de la ingeniería de pavimentos ha destacado la importancia del refuerzo de la capa superior para enfrentar los desafíos asociados con el deterioro prematuro, la fatiga y la deformación plástica. El refuerzo puede ser implementado mediante diversos materiales y técnicas, como geotextiles, geomallas, fibras de refuerzo y modificadores de asfalto, entre otros. Estos métodos buscan fortalecer la estructura del pavimento y reducir los efectos adversos de las cargas repetitivas y las condiciones climáticas adversas.

A pesar de los avances en este campo, existe una necesidad continua de investigar y desarrollar soluciones específicas para cada tramo vial y contexto geográfico. El tramo vial San Mateo - Sella Méndez, presenta particularidades que requieren una evaluación detallada de las condiciones del suelo, el tráfico y el clima local para determinar la mejor estrategia de refuerzo.

Este estudio se sitúa en la intersección de la ingeniería de pavimentos y la optimización estructural, buscando proporcionar una comprensión más profunda de cómo el refuerzo adecuado en la capa superior de un pavimento flexible puede mejorar su rendimiento en el tramo vial San Mateo - Sella Méndez. A través de la revisión de la literatura, la recopilación de datos y el análisis exhaustivo, esta investigación contribuirá al conocimiento existente en el campo y ofrecerá recomendaciones prácticas para el diseño y mantenimiento de pavimentos flexibles en contextos similares.

El autor propone estudiar las formas de refuerzo de pavimentos flexibles con el fin de obtener alternativas de solución y selección óptima bajo parámetros de calidad y costo.

Mediante la aplicación de un refuerzo, los esfuerzos de tracción se reducen y la reflexión de grietas se retrasa o incluso se impide.

La teoría que respalda esta investigación está basada en los tipos de refuerzo para la capa superior de los pavimentos flexibles con el fin de conocer y obtener un estudio de las opciones de refuerzo más adecuado para el tramo y ofrecer mayor seguridad y comodidad al usuario con una buena superficie de rodamiento y mejor calidad de servicio.

1.2 Situación problemática

En los caminos urbanos de la provincia de Eustaquio Méndez, se observa un estado deficiente debido a la mala elaboración y selección de los materiales componentes, así como a las condiciones climatológicas características de la zona. Las fallas más comunes incluyen deformaciones y fisuras que afectan principalmente a la capa de rodadura. Estos deterioros no reciben un mantenimiento adecuado, y las reparaciones temporales realizadas a menudo resultan insuficientes, ya que los problemas reaparecen con mayor magnitud con el tiempo.

Una selección inadecuada del tipo de refuerzo puede resultar contraproducente, ocasionando no solo un aumento en los costos económicos sino también una pérdida significativa de tiempo. Por tanto, es necesario realizar un análisis detallado del tipo de refuerzo, teniendo en cuenta parámetros de calidad y costo, para asegurar una solución efectiva y duradera.

Ante esta problemática, es necesario implementar soluciones efectivas y duraderas, como el refuerzo de la capa superior del pavimento. Sin embargo, la selección del tipo de refuerzo debe realizarse de manera cuidadosa, considerando las características específicas del tramo y los factores que influyen en su deterioro. Mayor consumo de combustible, desgaste prematuro de neumáticos y componentes mecánicos

La implementación de refuerzos en la capa superior de pavimentos flexibles es una estrategia prometedora para alargar la vida útil y mejorar el rendimiento de las carreteras existentes. Sin embargo, la selección del tipo de refuerzo debe realizarse cuidadosamente, considerando todas las alternativas posibles para elegir la opción más óptima.

1.2.1 Problema

¿Cómo se puede mejorar la durabilidad de los pavimentos en la provincia Méndez mediante implementación del tipo de refuerzo óptimo para la capa superior del pavimento flexible, considerando la estabilidad Marshall?

1.2.2 Relevancia y factibilidad del proyecto

Se han utilizado diversos tipos de refuerzos para mejorar el comportamiento de los pavimentos. Aunque existe evidencia sólida sobre las ventajas de utilizar refuerzos, las condiciones y mecanismos específicos que rigen su efectividad son, en gran medida, poco claros y no se han cuantificado adecuadamente. Este estudio busca determinar el tipo de refuerzo óptimo para pavimentos flexibles en el tramo vial San Mateo - Sella Méndez, evaluando parámetros de costo y calidad.

La relevancia de este proyecto radica en su potencial para proporcionar soluciones específicas y efectivas que puedan mejorar significativamente la durabilidad de los pavimentos en esta área. Al identificar y cuantificar los mecanismos de refuerzo más eficaces, esta investigación no solo contribuirá al conocimiento existente en el campo de la ingeniería de pavimentos, sino que también ofrecerá recomendaciones prácticas para las autoridades locales y los ingenieros encargados del mantenimiento vial.

La factibilidad del proyecto está respaldada por la disponibilidad de tecnología y metodologías modernas para la elaboración de pavimentos, así como por el acceso a los materiales de refuerzo necesarios.

Este proyecto no solo es relevante por su impacto práctico, sino también factible debido a la estructura de investigación bien planificada y los recursos disponibles para su ejecución. Con la aplicación de un refuerzo adecuado, se espera mejorar la calidad del servicio en el tramo vial San Mateo - Sella Méndez, reduciendo los costos de mantenimiento a largo plazo y proporcionando una mayor seguridad y comodidad a los usuarios. Innovando la mezcla asfáltica con refuerzo así tener base para futuras investigaciones adecuados a los materiales pétreos.

1.3 Justificación

Los pavimentos son fundamentales para la movilidad tanto en vías urbanas como rurales, por lo que su conservación y adecuado mantenimiento son de vital importancia. Estos esfuerzos garantizan la seguridad, la comodidad de los usuarios y la economía en términos de costos de mantenimiento.

Una superficie de rodamiento terminada debe ser lo más plana y libre de irregularidades posible, ofreciendo excelentes características superficiales en términos de rugosidad y textura. Estas condiciones son esenciales para asegurar un tránsito eficiente y seguro, además de prolongar la vida útil del pavimento.

La presente investigación se justifica por la necesidad de identificar alternativas de diseño de refuerzo para el pavimento del tramo carretero San Mateo - Sella Méndez, ubicado en el departamento de Tarija. Este tramo presenta deficiencias significativas en su estructura, lo que afecta su rendimiento y durabilidad. Mediante el estudio y análisis de diversas opciones de refuerzo, este proyecto tiene como objetivo determinar la solución óptima que pueda ser aplicada para mejorar la calidad y la vida útil del pavimento en este tramo específico.

Al abordar estas deficiencias y proponer soluciones efectivas, la investigación no solo contribuirá al conocimiento técnico en el campo de la ingeniería de pavimentos, sino que también proporcionará beneficios prácticos directos. Estos beneficios incluyen una reducción en los costos de mantenimiento a largo plazo, una mayor seguridad y comodidad para los usuarios, y una mejor eficiencia en el tránsito vehicular en la región.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Estudiar la mezcla asfáltica caliente con la incorporación de refuerzos, fibra de vidrio, aditivo ZycoTherm y geomalla triaxial, para la capa superior del pavimento flexible en el tramo San Mateo - Sella Méndez, con el fin de estudiar su propiedad mecánica estabilidad Marshall.

1.4.2 Objetivos Específicos

Recopilar la bibliografía necesaria sobre refuerzos de mezcla asfáltica caliente para la capa superior de pavimentos flexibles.

Caracterizar los materiales pétreos y cemento asfáltico para identificar sus propiedades físicas y mecánicas.

Dosificar la mezcla asfáltica densa caliente mediante la metodología Marshall con la curva granulométrica para elaborar briquetas encontrando el contenido óptimo de cemento asfáltico.

Elaborar briquetas con incorporación de refuerzo, haciendo variar el refuerzo en porcentajes, encontrando el punto óptimo de cada refuerzo.

Recopilar datos de la evaluación superficial del tramo San Mateo – Sella Méndez para realizar un análisis de deterioro.

Analizar los resultados obtenidos de las mezclas con sus refuerzos mediante estadística descriptiva para comparar sus propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica densa caliente sin refuerzo y con refuerzo, con los datos obtenidos para validar la hipótesis.

1.5 Hipótesis

Si incorporamos refuerzos en mezclas asfálticas calientes para la capa superior del pavimento flexible en el tramo San Mateo - Sella Méndez entonces la mezcla asfáltica convencional tendrá un incremento en su propiedad estabilidad Marshall, en comparación a una mezcla sin refuerzo.

1.6 Determinación de las variables

1.6.1 Variable Independiente

El tipo de refuerzo en la mezcla asfáltica.

1.6.2 Variable Dependiente

Estabilidad Marshall de la mezcla asfáltica.

1.6.3 Conceptualización y Operacionalización de las variables

1.6.3.1 Conceptualización de las variables

La optimización bajo parámetros de propiedades mecánicas.

- Tipo de refuerzo fibra de vidrio
- Tipo de refuerzo con aditivo Zycotherm
- Tipo de refuerzo con geomalla triaxial

1.6.4 Operacionalización de las variables

1.6.4.1 Variable independiente

Tabla 1. Variable independiente

| Variable | | Dimensión | Indicador | Valor /Acción |
|------------------|----------------------|---------------|------------------------------------|--|
| Tipo de refuerzo | fibra de vidrio | % de refuerzo | Dosificación, diferentes puntos | 75 golpes martillo estándar, por cara de briquea. |
| | aditivo | | | |
| | geomalla triaxial | | | |

Fuente: Elaboración propia

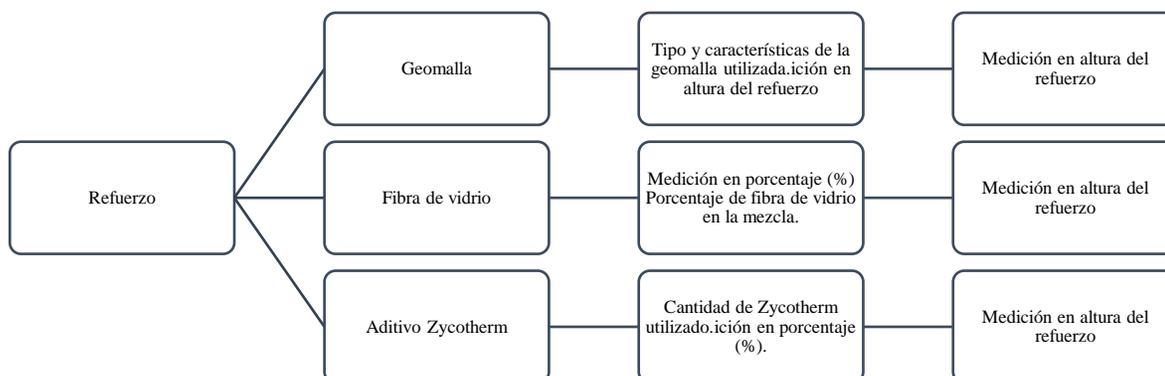
1.6.4.2 Variable dependiente

Tabla 2. Variable dependiente

| Variable | Dimensión | Indicador | Valor /Acción |
|-------------|--------------|--------------------|-----------------------------------|
| Estabilidad | [lib] | 1800 [lib] | Contenido cemento asfáltico |
| fluencia | [0.1 pulg] | 8 -14 [0.1 pulg] | |

Fuente: Elaboración propia

1.6.4.3 Operacionalización de variables



Fuente: Elaboración propia

1.7 Identificación del tipo del diseño de investigación

El tipo de diseño obedece al diseño experimental tipo descriptivo, la variable independiente se controla al determinar el tipo de refuerzo que se aplicara al tramo.

1.8 Alcance de la investigación

La investigación tiene un alcance correlacional descriptivo, como objetivo identificar el refuerzo óptimo para la capa superior del pavimento flexible en el tramo vial San Mateo - Sella Méndez.

Se llevará a cabo la elaboración de mezclas asfálticas de refuerzo con distintos porcentajes de fibra, geomalla y aditivo. Estas mezclas serán sometidas a pruebas de estabilidad utilizando el ensayo Marshall para comparar su capacidad de refuerzo.

La investigación se centrará en determinar la relación causal entre el tipo de refuerzo aplicado (variable independiente) y la estabilidad del pavimento flexible (variable dependiente), adoptando un enfoque causal descriptivo.

Dado que la investigación se realizará en condiciones controladas y no se manipularán todas las variables, se clasificará como cuasi experimental. Se explorarán alternativas de refuerzo para la capa superior del pavimento flexible y se identificará la mezcla óptima de refuerzo.

Es fundamental destacar que el alcance de esta investigación se limitará al tramo vial San Mateo - Sella Méndez y se evaluará la viabilidad de aplicar el método de refuerzo seleccionado en este contexto específico. Con este enfoque, se espera obtener información relevante sobre las características de diferentes tipos de refuerzo en pavimentos flexibles, con implicaciones directas para el diseño de mezclas asfálticas en el tramo mencionado.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEORICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEORICO

2.1 Marco conceptual

2.1.1 Definición de pavimento

Se conoce como pavimento al conjunto de varias capas de material seleccionado que se coloca sobre en el terreno acondicionado que reciben de forma directa las cargas del tránsito.

Se debe considerar que el pavimento debe tener la capacidad de ser resistente frente a todas las condiciones y cambios climáticos en sus diferentes etapas y que está diseñado principalmente para brindar una superficie adecuada para el rodamiento del tránsito en cualquier circunstancia.

2.1.2 Clasificación de pavimentos

El pavimento se divide en pavimentos rígidos y flexibles y la diferencia que existe entre los pavimentos rígidos y flexibles, es en cómo están conformados cada uno y la distribución de carga que soportan.

2.1.3 Pavimentos flexibles

Como en su nombre mismo este tipo de pavimento va a tener una base semirrígida o flexible, sobre la cuál va a estar una capa base y sub-base; que por lo general está constituida por una mezcla de material granular y betún formando una mezcla bituminosa (Roble, 2015; Morales & Chávez, 2009).

Es la estructura generalmente integrada por la sub-base, base y carpeta de rodadura, construyéndose sobre una terracería debidamente compactada, para poder soportar cargas de tránsito de acuerdo al diseño, impidiendo la acumulación o penetración de humedad, disponiendo de una superficie tersa, resistente al deslizamiento, y con un mantenimiento preventivo adecuado, al deterioro en general.

En la figura 1 se muestra el corte transversal de la estructura de un pavimento flexible, se puede claramente identificar las capas de base, sub-base que descansan sobre el suelo compactado denominado subrasante.

Figura 1. Pavimento flexible vista en corte



Fuente: (Giordani & Leonel. 2009)

El tiempo de duración los pavimentos flexibles oscilan entre 10 y 15 años, aunque constantemente necesita mantenimiento, siendo ésta la principal desventaja (Romero, 2008).

Ya que comúnmente los gobiernos seccionales destinan muy poco presupuesto para el mantenimiento de las vías, cuando estas ya se encuentran deterioradas siendo muy evidente el daño de las mismas y es cuando se considera la reparación generando gastos altos ya que para este entonces los daños no son solo superficiales si no estructurales.

Cabe mencionar que este tipo de pavimento en algunas ocasiones es sometido a varios ensayos con condiciones más rígidas impuestas por el clima y tráfico.

2.1.4 Estructura del pavimento

Esta consta de cuatro capas que van ordenadas de acuerdo al nivel de carga que van a ser sometidos; donde las capas de mayor resistencia van a estar arriba. En la actualidad el espesor que se recomienda es de 12 cm en la capa base, mientras que el espesor mínimo para la subbase debe ser de 10 cm (Clavijo, 2017).

Subrasante. Frecuentemente esta capa corresponde al terreno natural sobre la cual se asienta la estructura del pavimento, pero no es considerada como parte de la estructura en sí; esta debe cumplir ciertas características para que los materiales que se asienten sobre ella puedan ser distribuidos de forma uniforme; por lo que la resistencia de esta capa es determinante a la hora de seleccionar el espesor total de las capas subsiguientes.

Las peculiaridades con las que debe desempeñar son: expansión máxima del 5%, f máximo de 3", grado de compactación mínimo del 95%; espesor mínimo de 30cm para caminos de bajo tránsito y de 50cm en caminos con un TPDA > de 2000 Vehículos (Giordani & Leone, 2009; Clavijo, 2017)

Sub-base. Es la capa intermedia que se encuentra entre la base y subrasante, donde el material que se emplea debe ser de mayor calidad para minorar el espesor y proteger la base, evitando que el material de la capa subrasante puede ingresar a la capa base y produzca desniveles al variar las condiciones de humedad en la capa (Morales C., 2008).

En gran medida controla o elimina en lo posible cambios de volumen, elasticidad y plasticidad perjudiciales que pudiera tener el material de la subrasante, además, controlar la ascensión capilar del agua provenientes de las capas freáticas cercanas protegiendo así al pavimento contra los hinchamientos que se producen en épocas de helada. Este hinchamiento es causado por el congelamiento del agua capilar, fenómeno que se observa especialmente en los suelos limosos donde la ascensión capilar del agua es considerable.

Base. Se encuentra bajo la superficie de rodamiento y sobre la sub-base, los materiales con los que se edifica deben ser de mejor calidad en relación a los de la subbase, ya que después de la capa superficial que es la capa de rodadura esta es la que recibe la carga del tráfico, y si los materiales no son de la calidad adecuada generara desgaste del pavimento mucho antes del tiempo para el que fue construida.

Su función principal es mantener la resistencia estructural para soportar las presiones transmitidas por los vehículos (Romero, 2008). Se construye con materiales granulares procesados en planta con estándares de calidad que garantice que el agua que logra infiltrar a través de la capa de rodamiento llegue a la sub-base (Morales & Chávez, 2009).

Capa de rodadura. Es la capa externa la cual está en contacto con las cargas del tráfico, está compuesta por material pétreo al que se le añade producto asfáltico que sirve como aglutinante, (Morales C., 2008).

Su función principal es servir de protección al resto de las capas protegiéndolas de filtraciones de aguas, además ayuda en el soporte del pavimento teniendo en cuenta que para que cumpla esta función su espesor debe ser calculado y diseñado para que así de

esta forma pueda evitar que las capas inferiores estén expuestas y se genere la desintegración de éstas.

2.1.5 Definición de asfalto

El asfalto es un material viscoso, negro y pegajoso que se encuentra naturalmente en depósitos de petróleo. Es utilizado extensamente en la construcción de carreteras como un aglomerante en las mezclas asfálticas. Se caracteriza por su capacidad para unirse y adherirse a los agregados, proporcionando una superficie resistente y flexible. ("Asphalt Materials Science and Technology" (Ciencia y Tecnología de Materiales Asfálticos), Autor: Speight, James G.)

2.1.5.1 Cemento asfáltico 85/100

El cemento asfáltico 85/100, es un material asfáltico de uso vial. Es una combinación de compuestos orgánicos e hidrocarburos de alto peso molecular (>C 25), con cierto contenido de metales como Hierro, Níquel y Vanado, así como presencia de Azufre, Oxígeno y Nitrógeno. Se obtienen a partir de un proceso de desasfaltización por Propano a partir del Destilado Pesado de Petróleo. (YPFB , 2014, págs. 1-2)

2.1.5.2 Aplicación

Se aplica por dilución al agregado para la producción de pavimentos asfálticos de uso vial, aunque su aplicación por otros métodos como emulsionado, es también viable.

Es un producto de excelentes calidades de penetración, adherencia y resistencia para climas fríos y templados. (YPFB , 2014, págs. 1-2)

2.1.6 Serviciabilidad de los pavimentos

La serviciabilidad de un pavimento es la capacidad que tiene un pavimento para servir al tipo de tráfico que lo va a utilizar. Se mide en una escala del 0 al 5, donde 0 significa un pavimento intransitable y 5 un pavimento excelente.

La serviciabilidad se define como la habilidad del pavimento de proporcionar una superficie de rodamiento que brinde un nivel adecuado de comodidad, seguridad y eficiencia al usuario. Este concepto fue desarrollado por primera vez en los Estados Unidos en la década de 1960, y desde entonces se ha adoptado en todo el mundo. (AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 9th Edition, 2016)

La serviciabilidad de un pavimento se ve afectada por una serie de factores, incluyendo:

- El tipo de tráfico que circula por el pavimento
- El clima
- La calidad de los materiales y la construcción del pavimento
- El mantenimiento que se le da al pavimento

La evaluación de la serviciabilidad de un pavimento se puede realizar de forma subjetiva u objetiva. La evaluación subjetiva se basa en la opinión de los usuarios del pavimento, mientras que la evaluación objetiva se basa en mediciones físicas de la superficie del pavimento. (Manual de Pavimentos, Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Perú, 2013)

2.1.6.1 Ejemplos de serviciabilidad

- Un pavimento con una serviciabilidad de 4 se considera aceptable para el tráfico normal.
- Un pavimento con una serviciabilidad de 3 requiere mantenimiento rutinario para mantener su condición.
- Un pavimento con una serviciabilidad de 2 requiere mantenimiento mayor para evitar que se deteriore.
- Un pavimento con una serviciabilidad de 1 es intransitable y debe ser reconstruido.

2.1.7 2.3. Evaluación de pavimentos

Los pavimentos son estructuras diseñadas para entregar al usuario seguridad y comodidad al conducir, esto significa que el camino debe entregar un nivel de servicio acorde a la demanda solicitada.

La evaluación de pavimentos consiste en un informe, en el cual se presenta el estado en el que se halla la superficie del mismo, para de esta manera poder adoptar las medidas adecuadas de reparación y mantenimiento, con las cuales se pretende prolongar la vida útil de los pavimentos, es así, que es de suma importancia elegir y realizar una evaluación que sea objetiva y acorde al medio en que se encuentre.

2.1.7.1 Importancia de la evaluación de pavimentos

La evaluación de pavimentos es importante, pues esta nos permitirá conocer a tiempo los deterioros presentes en la superficie, y de esta manera realizar las correcciones, consiguiendo con ello brindar al usuario una serviciabilidad óptima.

Con la realización de una evaluación periódica del pavimento, se podrá predecir el nivel de vida de una red o un proyecto.

La evaluación de pavimentos, también permitirá optimizar los costos de rehabilitación, pues si se trata de un deterioro de forma temprana se prolonga su vida de servicio ahorrando de esta manera gastos mayores o innecesarios.

2.1.8 Componentes de la evaluación de pavimentos

La evaluación de pavimentos tiene dos componentes como ser: evaluación superficial y evaluación estructural.

2.1.8.1 Evaluación superficial

Con la evaluación superficial se busca reflejar el estado del pavimento a través de sus características superficiales, presentes en el momento de la evaluación.

2.1.8.2 Evaluación estructural

A través de la evaluación estructural se obtienen respuestas sobre el comportamiento del pavimento como estructura, sometida a las sollicitaciones impuestas por las cargas generadas por el tráfico de vehículos y la acción de los agentes ambientales, como la temperatura, humedad, etc.

Esos dos componentes se complementan mutuamente, para permitir la obtención de resultados, aplicables a la planificación de obras de mantenimiento, proyectos de mejoramiento, elección de técnicas de reparación, control de calidad de mantenimiento y verificación de la capacidad portante de la estructura. (Cálculo del índice de condición de pavimento flexible en la av. Luis Montero, distrito de Castilla, Edgar Daniel Rodríguez Velásquez, octubre 2009, pág. 11)

2.1.9 Fallas en pavimentos flexibles

Las fallas son el resultado de interacciones complejas de diseño, materiales, construcción, tránsito vehicular y medio ambiente, situación que se agrava, al no darle un mantenimiento adecuado a la vía.

En pavimentos la palabra falla se utiliza tanto para verdaderos colapsos, como para deterioros simples, el concepto de deterioro o falla está asociado al nivel de servicio que depende de la exigencia del consumidor, una falla es algo que aparta de lo que se considera perfecto.

Existen dos tipos de fallas: estructurales y fallas de superficie.

2.1.9.1 Fallas estructurales

Son las que originan un deterioro en el paquete estructural del pavimento, disminuyendo la cohesión de las capas y afectando su comportamiento frente a cargas externas.

Comprende los defectos de la superficie de rodamiento, cuyo origen es una falla en la estructura del pavimento, es decir, de una o más capas constitutivas que deben resistir el complejo juego de sollicitaciones que imponen el tránsito y el conjunto de factores climáticos.

Para corregir este tipo de fallas, es necesario un refuerzo sobre el pavimento existente, para que el paquete estructural responda a las exigencias del tránsito presente y futuro estimado.

2.1.9.2 Fallas de superficie

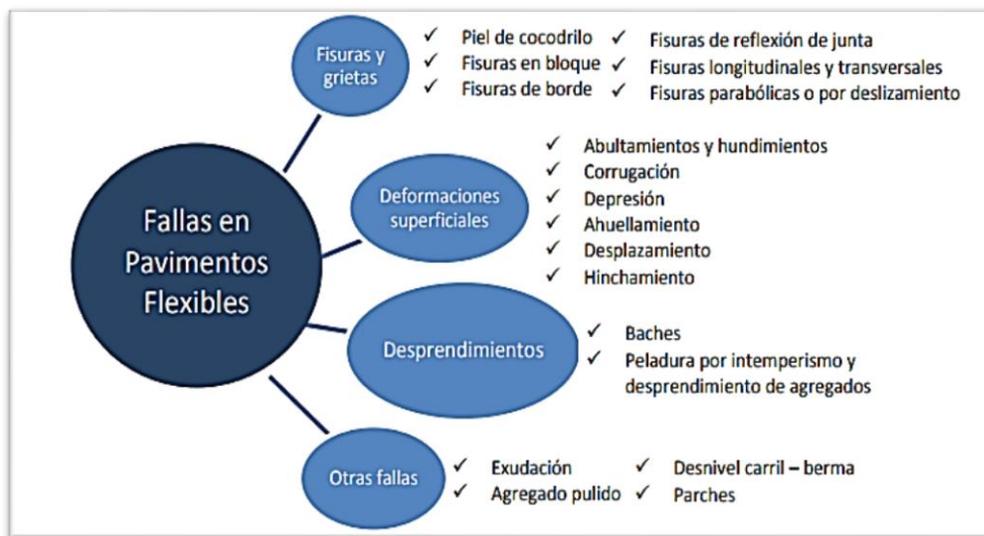
Las fallas funcionales, en cambio, afectan la transitabilidad, es decir, la calidad aceptable de la superficie de rodadura, la estética de la pista y la seguridad que brinda al usuario.

La corrección de estas fallas se efectúa con solo regularizar su superficie y conferirle la necesaria impermeabilidad y rugosidad.

Las fallas de superficie se pueden jerarquizar de acuerdo con la prioridad de la reparación y con su efecto sobre la comodidad y seguridad para el usuario y sobre el estado del pavimento, lo cual permite planificar los recursos y las soluciones. Para pavimentos flexibles, los daños pueden ser agrupados en 4 categorías: fisuras y grietas, deformaciones

superficiales, desintegración de pavimento o desprendimientos y afloramientos y otras fallas. En el manual del “Método de evaluación de pavimentos PCI” existen 19 tipos de falla comúnmente encontrados en pavimentos que son los siguientes.

Figura 2 Resumen de fallas en pavimentos flexibles



Fuente: pirhua.udep.edu.pe

Las fallas en los pavimentos informan sobre su condición y las causas posibles de la misma. El inventario de los daños de un pavimento representa una información fundamental en el proceso de la evaluación del estado del pavimento. (Cálculo del índice de condición de pavimento flexible en la av. Luis Montero, distrito de Castilla, Edgar Daniel Rodríguez Velásquez, octubre 2009, pág. 11)

2.1.10 Causas que generan el deterioro prematuro del asfalto

Las causas que ocasionan el deterioro del pavimento o asfalto antes del tiempo previsto para el cual fue construido que con el pasar del tiempo y el uso dado por el rodaje continuo sobre este, generan que su vida útil y eficiente disminuya hasta lograr deteriorarse ocasionando malestar, inseguridad e incomodidad a los usuarios que transitan diariamente sobre éste.

2.1.10.1 Ineficiente mantenimiento del asfalto

Esta es una problemática de la mayoría de los países sub desarrollados donde sus presupuestos tienen alcances para obras de construcción y no de mantenimiento, creando una problemática a largo plazo y de difícil solución ya que a pesar de las reconstrucciones que pueden darse por lo general estas son solo momentáneas y no definitivas.

2.1.10.2 Aumento del tránsito por encima del que fue considerado antes de su construcción

La falta de estudios técnicos apropiados antes del inicio de las construcciones de las vías y la ausencia de la perspectiva y proyecciones a largo plazo generaran que la carga del tránsito aumente con el pasar de los años ocasionando el daño prematuro de las diversas capas de la estructura de pavimento y que las fallas en la capa de rodadura, vayan progresando y que finalmente esto dé como resultado que la vía no cumpla con su tiempo de vida útil.

2.1.10.3 Baja calidad de los materiales que fueron utilizados durante la construcción para abaratar costos

En muchas ocasiones no se colocan durante las construcciones de las carreteras los materiales adecuados con fines de ahorro, o por falta o ausencia de una buena fiscalización que haga cumplir a cabalidad los proyectos como son ofertados al inicio, y que pueda verificar en cantidad y calidad los materiales que se usaran.

2.1.10.4 Cambios climáticos extremos

Se está expuesto en los últimos años a cambios climáticos extremos para los cuales no estamos preparados, esto ocasionaría el calentamiento de la capa asfáltica o en su lado opuesto humedad excesiva, debido a las lluvias extraordinarias que muchas veces son imprevista, ambos modificadores indirectos influyen de manera negativa a la vida útil para la que fueron creados los pavimentos. Insuficiente sistema de recolección de las aguas lluvias.

Esto se debe a la ausencia de un sistema de drenaje adecuado o que este se encuentre deteriorado, pudiendo ser otra causante una pendiente de bombeo mal calculado en las capas de la estructura del pavimento.

2.1.10.5 Inadecuado diseño de la estructura del pavimento a construirse

Bajo este contexto se describe a la falta de estudios planificados por personal técnicamente capacitado bajo conceptos modernos unidos a la tecnología actual, donde se pueda diseñar los pavimentos pensando en el futuro útil de los mismos.

2.1.11 Refuerzo para la capa superior de pavimento flexible

2.1.11.1 Definición de refuerzo

En ingeniería, el término "refuerzo" se refiere al proceso o técnica de fortalecer o mejorar la capacidad de carga, resistencia o durabilidad de una estructura o material. Puede implicar la adición de materiales, cambios en el diseño estructural o la implementación de técnicas específicas para mejorar el rendimiento y la integridad de un componente o sistema. "Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design" (Compuestos Reforzados con Fibras: Materiales, Fabricación y Diseño), Autor: P.K. Mallick

2.1.11.2 Tipo de refuerzo con fibra de vidrio

La fibra de vidrio como refuerzo en la mezcla asfáltica es una práctica en la ingeniería de pavimentos que implica la incorporación de fibras de vidrio en la mezcla asfáltica para mejorar la resistencia a la fatiga, la durabilidad y la capacidad de carga del pavimento. Estas fibras actúan como refuerzo estructural, ayudando a prevenir el agrietamiento y a mejorar las propiedades mecánicas del pavimento. "Fiber Reinforced Asphalt Mixtures" (Mezclas Asfálticas Reforzadas con Fibras), Autor: H. Zbib, S. Tighe

- **Fibra de vidrio**

Este material se compone de varios filamentos muy finos de vidrios acumulados con algunas resinas que, al trenzarse dan como resultado a una estructura suficiente fuerte para ser empleada como refuerzo de estructuras de otros materiales. Cuando se integre a productos sintéticos tienen una reacción como el hierro y el cemento donde se obtiene una dureza y resistencia muy similar o incluso superior a los del metal, pero aún se conserva la flexión molecular la fibra de vidrio no se descompone o deteriora como otros materiales dado que es resistente a muchos ácidos, por ello viene a ser usado en distintas aplicaciones. (Coronado&Maguina, 2019, p.9)

- **Propiedades de la fibra de vidrio**

Resistencia química. ESCOM (2016), define “la resina es un componente de la fibra de vidrio que la hace resistente a la erosión química y del medio ambiente. Por tanto, la fibra de vidrio no se pudre ni se deteriora, ya que es resistente a la mayoría de los ácidos” (Web).

Peso ligero. El peso específico accede que sea de fácil manipulación e instalación.

Bajo mantenimiento. ESCOM (2016), destaca que “gracias a las características intrínsecas de la fibra de vidrio, los compuestos no necesitan ningún mantenimiento especial, incluso después de muchos años de uso en aplicaciones externas” (Web).

Aislamiento eléctrico. La fibra de vidrio no conduce la electricidad, por lo que es ideal para aplicaciones donde se busque el aislamiento eléctrico de ciertas instalaciones.

Versatilidad. Se trata de un producto muy versátil: amplia gama de filamentos, tamaños, tipos de fibra, etc.

Excelente aislante térmico. La fibra de vidrio tiene un bajo coeficiente de expansión térmica y conductividad térmica relativamente alta. Esto hace que disipe el calor de forma más rápida y sea perfecto para usarlo como aislante térmico. Por tanto, es ideal para instalaciones en el exterior, ya que no tendremos que preocuparnos de que se deteriore por estar expuesto al sol durante mucho tiempo. (ESCOM, 2016).

2.1.11.3 Tipo de refuerzo con aditivo Zycotherm

El Zycotherm es un aditivo que se utiliza comúnmente en la industria del asfalto para mejorar las propiedades de las mezclas asfálticas. Este aditivo es conocido por su capacidad para reducir la temperatura de mezcla y mejorar la trabajabilidad del asfalto, lo que tiene varios beneficios en términos de sostenibilidad y eficiencia en la construcción de carreteras.

El Zycotherm, es un compuesto a base de nanotecnología (organosilanos) en la conformación de la capa bituminosa, que logra un comportamiento mecánico con mejores características físicas proporcionando mayor durabilidad ante el paso del tiempo, con lo cual, genera mejoras apreciables en el proceso de fabricación, extensión y compactación.

Además, el Zycotherm es amigable al medio ambiente ya que es orgánico cuyo componente principal es el silano y es soluble en agua, generando un comportamiento de adherencia óptimo ante temperaturas bajas, produciendo mezclas asfálticas tibias las cuales tienen el mismo comportamiento que una mezcla asfáltica caliente.

Además, los organosilanos son moléculas reactivas que alteran de forma permanente la superficie del agregado pétreo en una superficie compatible con el asfalto que se unen mediante un enlace químico. La nueva interacción química expulsa el aire formando una unión total entre el asfalto y el agregado, evitando que el vapor de agua pueda laminar.

Tabla 3. Características físicas Aditivo Zycotherm

| Características Físicas | |
|-------------------------|-----------------------------|
| Solubilidad | Soluble en agua (10% conc.) |
| Viscosidad a 25°C | Menor a 300 Cp s |
| Punto de Inflamación | 80 °C |
| Punto de Congelación | 5 -7 °C |
| Densidad | 1,01 g/ml |
| Viscosidad a 30°C | 700 ± 300 Cp s |
| Apariencia | Líquido amarillo pálido |

Fuente: Ficha Técnica –Zycotherm

Tabla 4. Dosificación Aditivo-Zycotherm

| Dosificación | | |
|--------------|---------------|-------------|
| Ligante | 100% | 1000 kg |
| Zycotherm | 0,025 - 0,1 % | 0,250 -1 kg |

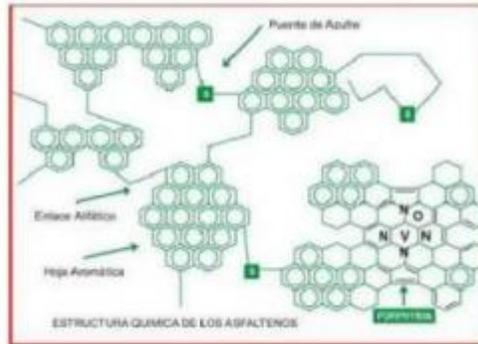
Fuente: Ficha Técnica -Zycotherm

El Zycotherm presenta diferentes comportamientos, ante la secuencia de producción:

Fase 1: En base de ligante

El betún como base ligante a trabajar, se clasifica en dos clases diferentes. Los asfáltenos que son compuestos polares y los máltenos que carecen de polaridad. Los máltenos son compuestos hidro carbonosos (Aceites y Resinas) provenientes de las parafinas que conforman el asfalto en la fase discontinua y que genera propiedades elásticas. Ver figura 3.

Figura 3. Estructura química de los asfáltenos

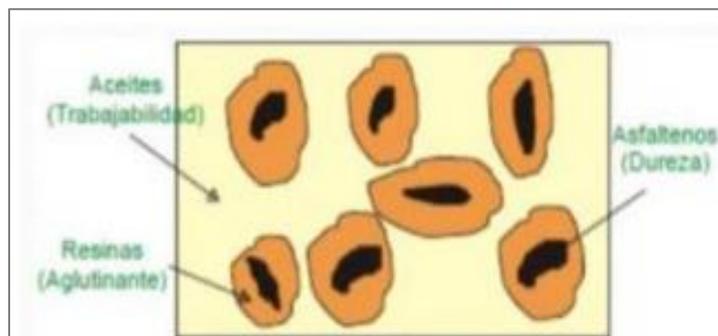


Fuente: Cartilla de asfaltos - OSAPAC

Según investigaciones realizadas, las moléculas poseen una parte orgánica ligada con los máltenos y por otro lado una parte polar. Al añadir el aditivo en la composición asfáltica, se genera un comportamiento mecánico de micelación, que produce un recubrimiento completo entre el agregado y el betún más aditivo, por una combinación de moléculas denominada organosilanos.

Y, por último, los asfáltenos al generar un comportamiento de micelación, se reduce la atracción entre si generando una trabajabilidad con mayor fluidez y facilidad de recubrimiento.

Figura 4. Composición química del asfalto

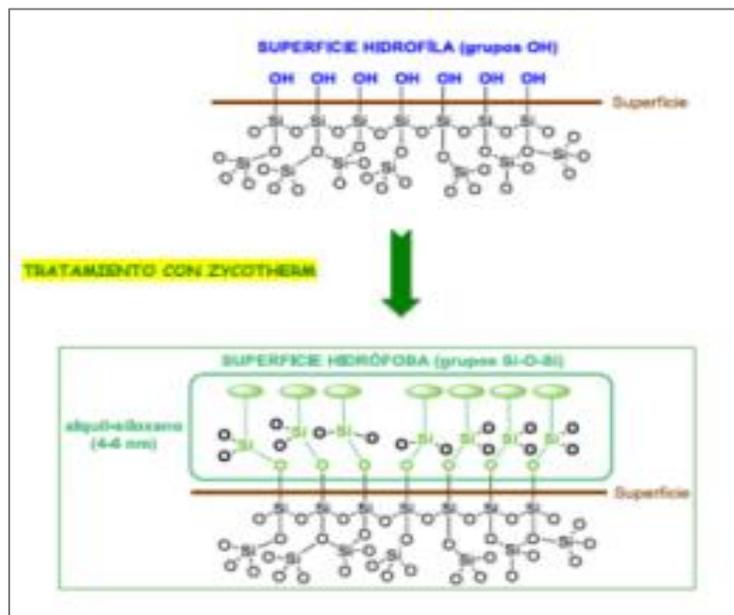


Fuente: Cartilla de asfaltos - OSAPAC

Fase 2: En contacto de árido.

El aditivo denominado como Zycotherm es un producto que genera una reacción molecular en la superficie de los agregados, conformando uniones de tipo siloxano que poseen una gran resistencia. El Zycotherm genera un cambio a nivel molecular en los áridos, lo cual genera como resultado una adherencia mayor con respecto al betún – árido. Mediante esta acción, la unión entre el agregado y el betún se genera a nivel químico, mejorando así la resistencia ante agentes externos ambientales habituales que degradan el producto final denominada como carpeta asfáltica. (Vera Moscosa & Rojas Apaza, 2018)

Figura 5. Esquema del enlace químico en superficies áridas de hidrófila a hidrófoba con el uso del Zycotherm.

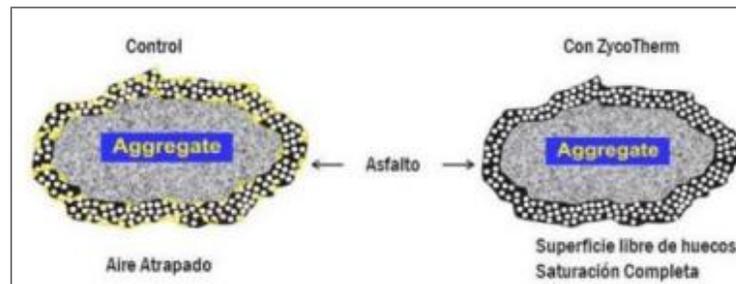


Fuente: Cartilla de asfaltos - OSAPAC

El Zycotherm, al reaccionar con el agregado a nivel molecular, genera una capa hidrófoba, la cual, convierte a los áridos en superficies apolares generando un mejor comportamiento de adherencia entre el betún. Este comportamiento produce una adherencia entre el betún y el árido de 10 a 20 veces mayor que una convencional al no incluir este compuesto. Al generar una mejor adherencia del betún al árido se produce el efecto de cáscara de naranja a cáscara de manzana, lo cual es mejor en términos de descascaramiento de la capa de asfalto pegada al agregado transformándose de una superficie polar a apolar. (Zydex Innovating for Sustainability , 2014_a) Con la adherencia del aditivo en una mezcla

asfáltica, a menor tensión superficial, el betún recubre de mejor manera a los agregados pétreos. Este proceso genera un resultado de un mejoramiento de embebido y saturación de los micro poros de los agregados, lo que genera un mejor comportamiento mecánico de la carpeta asfáltica generando menos conformación de rajaduras y baches, los cuales son resultado de cambios climáticos abruptos. (Vera Moscosa & Rojas Apaza, 2018).

Figura 6. Adherencia superior del agregado - asfalto con Zycotherm



Fuente: Zydex industries, s.a

Beneficios del Zycotherm

- Disminución considerable del uso de combustibles.
- Reducción de temperatura para mejor manejabilidad para trabajadores.
- Mayores distancias de acarreo del producto.
- Facilidad de limpieza de equipos.
- Genera un mejor comportamiento mecánico entre la interacción del asfalto y los agregados, como un recubrimiento de las partículas por debajo a 75 micras.
- Además, genera una excelente trabajabilidad con polímeros, tales como, SBS, EVA, CRMB, entre otros.

Propiedades que se benefician de una mezcla combinada

La combinación en una mezcla asfáltica convencional se logra añadiendo un material externo que mejora las propiedades mecánicas de esta combinación como las características del ligante y propiedades reológicas, para un resultado final óptimo. (Cornejo Villacis & Lamiña Asumasa , 2018)

En la elaboración de mezclas asfálticas tibias se debe considerar varios aspectos fundamentales como la rigidez. Con respecto a los polímeros o aditivos, al mezclar un

polímero en una mezcla asfáltica caliente se eleva la rigidez a temperaturas extremas altas evitando deformaciones permanentes. En cambio, a temperaturas bajas la rigidez disminuye evitando que la carpeta asfáltica se fisure, ante acciones de tráfico pesado (Fonseca, 2010).

Características Principales

- **Reducción de Temperatura**

El Zycotherm está diseñado para reducir las temperaturas de mezcla en la producción de asfalto. Esto no solo puede tener beneficios ambientales al reducir el consumo de energía, sino que también puede mejorar la seguridad y el confort del trabajador.

- **Mejora de la Trabajabilidad**

Al reducir la viscosidad del asfalto a temperaturas más bajas, el Zycotherm mejora la trabajabilidad de la mezcla. Esto facilita su colocación y compactación durante la construcción.

- **Menor Consumo de Energía**

La reducción de las temperaturas de mezcla puede resultar en un menor consumo de energía en las plantas de asfalto, contribuyendo así a la sostenibilidad y reducción de emisiones.

- **Menor Desgaste de Equipos**

Al reducir las temperaturas de producción, el aditivo Zycotherm puede ayudar a disminuir el desgaste de los equipos utilizados en la mezcla y aplicación de asfalto.

Referencias: "Adoption of Zycotherm additive for Warm Mix Asphalt (WMA) production"

Autores: M. N. Khattak, S. S. Akhtar, S. Shah, F. K. Shah

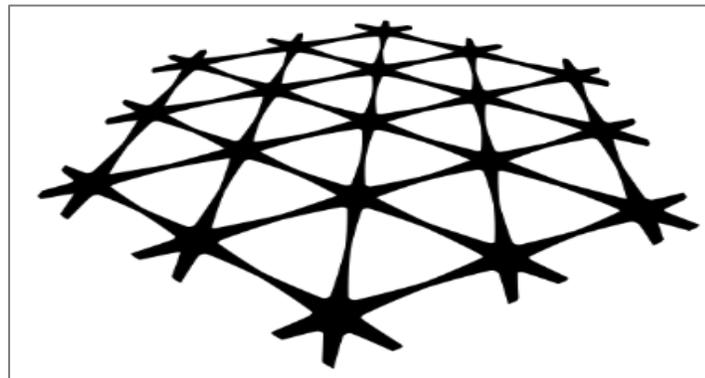
2.1.11.4 Refuerzo con geomalla triaxial

Una geomalla es un geosintético hecho de un material polimérico. Las geomallas se forman tejiendo o tejiendo costillas que se cruzan con aberturas apropiadas (espacios abiertos para que quepan las costillas). Principalmente, una geomalla se usa para

aplicaciones de refuerzo en varios tipos de proyectos de construcción, pero también se puede usar para aplicaciones de separación. Son rejillas abiertas que permiten que el suelo golpee a través de las aberturas y los dos materiales se entrelazan para dar un comportamiento compuesto. Hay una gran demanda de geomallas en la construcción porque son buenas en tensión y tienen una mayor capacidad para distribuir cargas en un área grande. Hay algunos tipos diferentes de geomallas que cumplen una función específica para la aplicación para la que se utilizan. Comprender las diferentes fortalezas que tiene cada tipo de geomalla es crucial para seleccionar la correcta para su proyecto.

Con su estructura triangular exclusiva (figura 7), las geomallasTriAx representan un avance revolucionario en la tecnología de geomallas; sus propiedades multidireccionales aprovechan la geometría triangular (una de las formas más estables de la construcción) para brindar un nuevo nivel de rigidez planar en 360 grados, ofreciendo un desempeño inigualable en aplicaciones con o sin pavimento; además de forma más económica y duradera.

Figura 7. Estructura geomalla triaxial



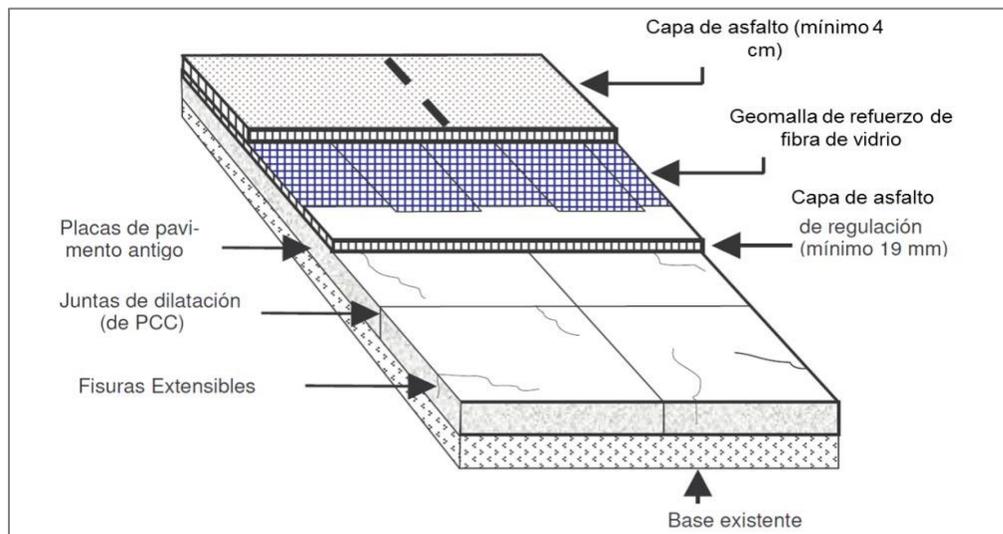
Fuente: <https://www.tensarcorp.com/es-mx/geomallas/geomallas-tensar-triax>

Beneficios de la geomalla de fibra de vidrio

- Aumentar la resistencia a la tracción de la capa asfáltica, garantizando bajo una carga vertical, la distribución uniforme de esfuerzos horizontales en una mayor superficie.

- Reducir al mínimo el agrietamiento reflexivo por esfuerzos de tensión y cambios de temperatura en las capas asfálticas.
- Aumentar la resistencia a la fatiga de pavimentos sometidos a la acción de cargas cíclicas.
- Proporcionar beneficios de costo, reduciendo el mantenimiento periódico de los pavimentos flexibles.
- Instalación rápida y fácil.
- Aplicable para rehabilitaciones de pavimentos de hormigón cuando se coloca capa asfáltica sobre estos.
- Absorbe los esfuerzos de tensión entre las capas de asfalto (de arriba hacia abajo o viceversa).
- Puede reducir el espesor de asfalto de proyecto (10-20%).

Figura 8, Aplicación geomalla en pavimento flexible



Fuente: www.interempresas.net/ObrasPublicas/Articulos/138111-Refuerzo-de-asfalto-mediante-geomallas-para-alargar-la-vida-util-de-las-carreteras.html

2.2 Marco normativo

2.2.1 Normativas para el análisis del cemento asfáltico

En la tabla 5 se muestran los datos de análisis típico de valores de producción y su normativa, pero no constituyen una especificación. (YPFB , 2014, págs. 1-2)

Tabla 5. Datos representativos de valores de producción

| Prueba | Método ASTM | Resultado | Unidad |
|---------------------------------|-------------|-----------------|---------|
| | | Asfalto 85/100 | |
| Gravedad específica 25/25°C | ASTM D-70 | 1,0000 – 1,0015 | - |
| Viscosidad a 135°C | ASTM D-2170 | mínimo 170 | seg. |
| Penetración a 25°C, 100g, 5s | ASTM D-5 | 85 – 100 | 1/10 mm |
| Índice de penetración (Pfeifer) | AASHTO | -2.00 - +1.00 | - |
| Punto de inflamación | ASTM D-92 | Mínimo 232 | °C |
| Ensayo a la mancha (20% Xileno) | ASTM D-1328 | Negativo | - |
| Solubilidad en tricloretileno | ASTM D-2042 | Mínimo 99 | % |
| Penetración retenida | ASTM D-1754 | Mínimo 47 | % |
| Ductilidad, 25°C, 5 cm/min | ASTM D-113 | Mínimo 75 | Cm |
| Punto de ablandamiento | ASTM D-36 | 41.4 a 53.2 | °C |

Fuente: Ficha técnica YPF B

2.2.2 Ensayos para la determinación de las propiedades del asfalto

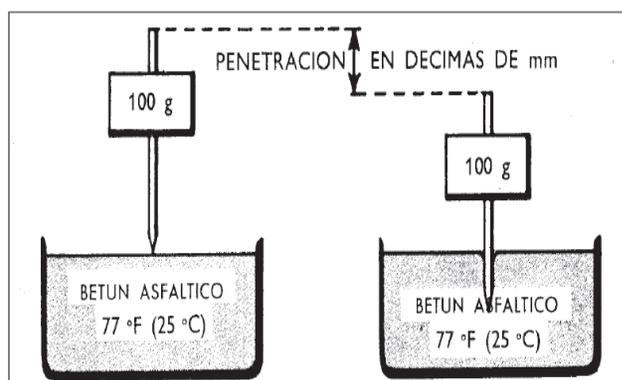
2.2.2.1 Penetración

El ensayo de penetración determina la dureza o consistencia relativa de un betún asfáltico, midiendo la distancia que una aguja normalizada penetra verticalmente en una muestra de asfalto en condiciones especificadas de temperatura, carga y tiempo. Cuando no se mencionan específicamente otras condiciones, se entiende que la medida de la penetración se hace a 25°C, que la aguja está cargada con 100g y que la carga se aplica durante 5s (véase la figura 9). La penetración determinada en estas condiciones se llama penetración normal. La unida de penetración es la décima de milímetro. Es evidente que cuanto más blando seas el betún asfáltico mayor será la cifra que indique su penetración.

Los betunes asfálticos se clasifican en grados según su dureza o consistencia por medio de la penetración.

El instituto del Asfalto ha adoptado cuatro grados de betún asfáltico para pavimentos con penetraciones comprendidas dentro de los márgenes siguientes: 60-70, 85-100, 120-150 y 200-300. Además, el instituto tiene especificaciones para el betún asfáltico de penetración comprendida en el margen 40-50, que se usa en aplicaciones especiales e industriales. Los aparatos y procedimientos para realizar el ensayo de penetración se describen en el método AASHTO T49 y en el ASTM D5. (Institute, The Asphalt, 1973, pág. 39)

Figura 9. Ensayo normal de penetración



Fuente: Manuel Velázquez, THE ASPHALT INSTITUTE

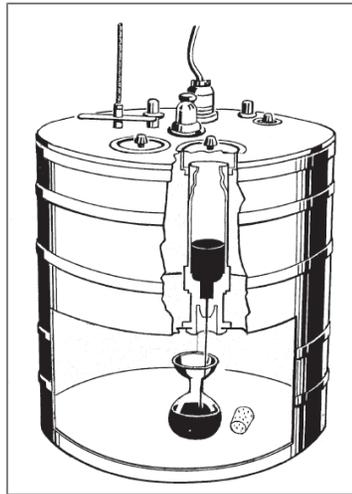
2.2.2.2 Viscosidad del asfalto

La finalidad del ensayo de viscosidad es determinar el estado de fluidez de los asfaltos a las temperaturas que se emplean durante su aplicación. La viscosidad o consistencia del betún asfáltico se mide en el ensayo de viscosidad Saybolt-Furol o en el ensayo de viscosidad cinemática.

En el ensayo de Saybolt-Furol se emplea un viscosímetro Saybolt con orificio Furol (Figura 10). Se coloca en un tubo normalizado cerrado con un tapón de corcho con una cantidad específica del betún asfáltico. Como las temperaturas a que se determina la viscosidad de los betunes asfálticos son frecuentemente superiores a los 100 °C, el baño a temperatura constante del viscosímetro se llena con algún tipo de aceite. Cuando el asfalto ha alcanzado una temperatura establecida, se quita el tapón y se mide el tiempo necesario en segundos para que pasen a través del orificio Furol 60ml del material.

Cuanto más viscoso son los materiales más tiempo es necesario para que pasen a través del orificio. La figura 10 representa el procedimiento de ensayo. Los valores obtenidos se expresan como segundos Saybolt-Furol (SSF). Los aparatos y procedimientos para la realización de este ensayo se describen detalladamente en el método ASTM E102. (Institute, The Asphalt, 1973, pág. 40)

Figura 10. Determinación de la viscosidad Saybolt-Furol.



Fuente: Manuel Velázquez, THE ASPHALT INSTITUTE

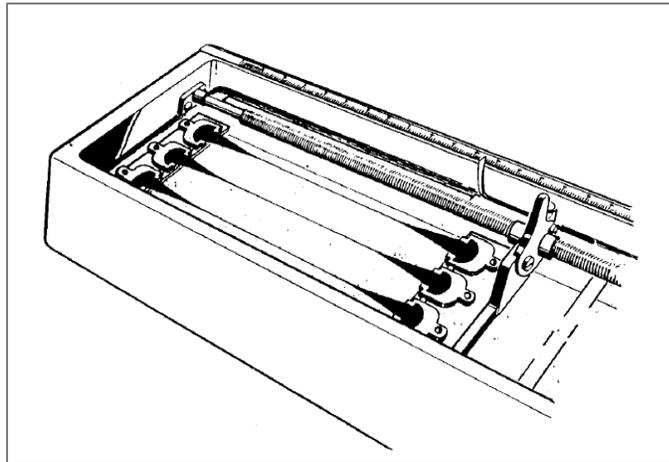
2.2.2.3 Ductilidad

La ductilidad es una característica de los betunes asfálticos importante en muchas aplicaciones. La presencia o ausencia de ductilidad, sin embargo, tiene usualmente mayor importancia que el grado de ductilidad existente. Los betunes asfálticos dúctiles tienen normalmente mejores propiedades aglomerantes que aquellos a los que les falta esta característica. Por otra parte, los betunes asfálticos con una ductilidad muy elevada son usualmente más susceptibles a los cambios de temperatura. En algunas aplicaciones, como las mezclas para pavimentación, tienen gran importancia la ductilidad y el poder aglomerante, mientras que, en otras, como la inyección bajo losas de hormigón y el relleno de grietas, la propiedad más esencial es una baja susceptibilidad a los cambios de temperatura.

La ductilidad del betún asfáltico se mide en un ensayo de extensión del tipo representado en la figura 11. En ensayo consiste en moldear con condiciones y dimensiones

normalizadas una probeta de betún asfáltico que después se somete a alargamiento con una velocidad específica hasta que el hilo que une los dos extremos rompe. La longitud (en cm) a la que el hilo de material se rompe define la ductilidad. Las condiciones normalizadas para este ensayo se determinan detalladamente en los métodos AASTHO T51 y ASTM D113. (Institute, The Asphalt, 1973, pág. 45)

Figura 11. Ensayo de ductilidad



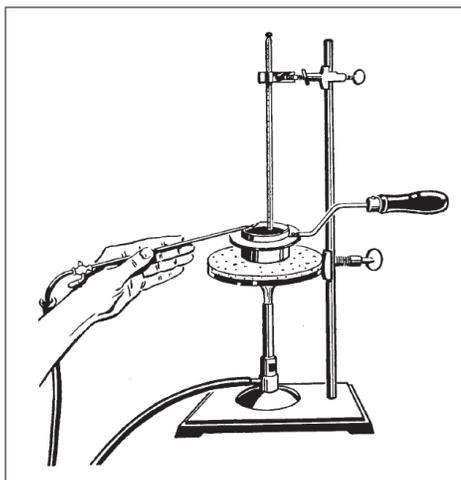
Fuente: Manuel Velázquez, THE ASPHALT INSTITUTE

2.2.2.4 Punto de ignición

El punto de ignición o punto de inflamación del betún asfáltico indica la temperatura a que se puede calentarse el material sin peligro de inflamación en presencia de llama libre. Esta temperatura es usualmente muy inferior a aquella a la que el material ardería. Esta última temperatura se llama punto de fuego, pero rara vez incluye en las especificaciones de los betunes asfálticos.

El punto de ignición de un betún asfáltico se mide por el ensayo en vaso abierto Cleveland según condiciones normalizadas prescritas en los métodos AASTHO T48 y ASTM D92. En la figura 12 se representa esquemáticamente el ensayo. Un vaso abierto de latón se llena parcialmente con betún asfáltico y se calienta a una velocidad establecida. Se hace pasar periódicamente sobre la superficie de la muestra una pequeña llama, y se define como punto de llama la temperatura a la que se han desprendido vapores suficientes para producir una llama repentina. (Institute, The Asphalt, 1973, pág. 47)

Figura 12. Ensayo de punto de ignición



Fuente: Manuel Velázquez, THE ASPHALT INSTITUTE

2.2.2.5 Punto de ablandamiento

Los asfaltos de diferentes tipos reblandecen a temperaturas diferentes. El punto de reblandecimiento se determina usualmente por el método de ensayo arbitrario de anillo y bola. Aunque este ensayo no se incluye en las especificaciones para los asfaltos de pavimentación, se emplea frecuentemente para caracterizar los materiales más duros empleados en otras aplicaciones e indica la temperatura a que estos asfaltos se hacen fluidos. Consiste en llenar de asfalto fundido un anillo de latón de dimensiones normalizadas. La muestra así preparada se suspende en un baño de agua y sobre el centro de la muestra se sitúa una bola de acero de dimensiones y peso especificados. A continuación, se calienta el baño a una velocidad determinada y se anota la temperatura en el momento en que la bola de acero toca el fondo del vaso de cristal. Esta temperatura se llama punto de reblandecimiento del asfalto.

Los procedimientos y aparatos necesarios para la realización del ensayo se describen con detalle en los métodos AASTHO T53 y ASTM D36. (Institute, The Asphalt, 1973, pág. 47)

2.2.3 Evaluación superficial

2.2.3.1 PCI (Índice de Condición del Pavimento)

El método PCI (Pavement Condition Index) es un procedimiento que consiste en la determinación de la condición del pavimento a través de inspección visual, identificando la clase, severidad y cantidad de fallas encontradas, se mide la condición del pavimento de manera indirecta. Este método fue desarrollado entre los años 1974 y 1976 por M.Y. Shanin y S.D. Khon y publicado por el cuerpo de ingenieros de la armada de los Estados Unidos, con el objetivo de obtener un sistema de administración del mantenimiento de pavimentos rígidos y flexibles.

Este método constituye el modo más completo para la evaluación y calificación objetiva de pavimentos, como procedimiento estandarizado, por agencias como, por ejemplo: el Departamento de defensa de los Estados Unidos, el APWA (American Public Work Association) y ha sido publicado por la ASTM como método de análisis y aplicación (procedimiento estándar para la inspección del índice de condición del pavimento en caminos y estacionamientos ASTM D6433-03).

El cálculo del PCI se fundamenta en los resultados de un inventario visual del estado del pavimento en el cual se establecen clase, severidad y cantidad de cada falla presente. Dada la gran cantidad de combinaciones posibles, el método introduce un factor de ponderación, llamado “valor deducido”, para indicar en qué grado afecta a la condición del pavimento cada combinación de deterioro, nivel de severidad y densidad (cantidad).

El PCI se desarrolló para obtener un índice de la integridad estructural del pavimento y de la condición operacional de la superficie, un valor que cuantifique el estado en que se encuentra el pavimento para su respectivo tratamiento y mantenimiento.

Los objetivos que se esperan con la aplicación del método PCI son:

- Determinar el estado en que se encuentra el pavimento en términos de su integridad estructural y del nivel de servicio que ofrece al usuario. El método permite la cuantificación de la integridad estructural de manera indirecta, a través del índice

de condición del pavimento (ya que no se realizan mediciones que permiten calcular directamente esta integridad).

- Cuando se habla de integridad estructural, se hace referencia a la capacidad que tiene el paquete estructural de soportar solicitaciones externas, como cargas de tránsito o condiciones ambientales. En cambio, el nivel de servicio es la capacidad del pavimento para brindar un uso confortable y seguro al conductor.
- Obtener un buen indicador que permita comparar, con un criterio uniforme la condición y comportamiento del pavimento y de esta manera justificar la programación de obras de mantenimiento y rehabilitación, seleccionando la técnica de reparación más adecuada al estado del pavimento en estudio.

Rangos de calificación del PCI

El PCI es un índice que varía desde cero (0), para un pavimento en mal estado (fallado), hasta cien (100) para un pavimento en perfecto estado (excelente), en la siguiente tabla (tabla 7) se presenta los rangos del PCI con la correspondiente descripción cualitativa de la condición del pavimento.

Tabla 6. Rangos de calificación del PCI

| Rango | Clasificación |
|----------|---------------|
| 100 – 85 | Excelente |
| 85 – 70 | Muy bueno |
| 70 – 55 | Bueno |
| 55 – 40 | Regular |
| 40 – 25 | Malo |
| 20 – 10 | Muy malo |
| 10 – 0 | Fallado |

Fuente: Manual de pavimentos PCI (M.Y. shahin, S.D. Khon)

El cálculo del PCI se fundamenta en los resultados de una encuesta visual de la condición de pavimento en el cual se establecen su tipo, severidad y cantidad que presenta cada daño.

Procedimiento de evaluación de la condición del pavimento

La primera etapa corresponde al trabajo de campo en el cual se identifican cuidadosamente los daños teniendo en cuenta la clase, severidad y extensión de los mismos. Esta

información se registra en formatos adecuados para tal fin. En la tabla 8, se muestra el formato adoptado para la realización de la primera etapa, y una segunda etapa que será el cálculo.

Para la evaluación de pavimentos, la clase, está relacionada con el tipo de degradación que se presenta en la superficie de un pavimento, entre las que tenemos, piel de cocodrilo, exudación, agrietamiento en bloque, elevaciones, entre otros, cada uno de ellos se describe según cada tipo de falla.

La severidad, representa la criticidad del deterioro en términos de su progresión; entre más severo sea el daño, mas importantes deberán ser las medidas para su corrección. De esta manera, se deberá valorar la calidad del viaje, la percepción que tiene el usuario al transitar en un vehículo a velocidad normas; es así que se describe una guía general de ayuda para establecer el grado de severidad de la calidad de tránsito.

Bajo (L): se perciben vibraciones en el vehículo (por ejemplo, por corrugaciones), pero no es necesaria la reducción de la velocidad en aras de la comodidad o la seguridad. Las elevaciones y hundimientos individuales causan un ligero rebote del vehículo, pero no provoca incomodidad.

Medio (M): las vibraciones del vehículo son significativas y se requiere una reducción de la velocidad en aras de la comodidad y la seguridad; las elevaciones o hundimientos individuales causan un rebote significativo creando incomodidad.

Alto (H): las vibraciones en el vehículo son tan excesivas que debe reducirse la velocidad de forma considerable en aras de la comodidad y la seguridad; las elevaciones o hundimientos individuales causan un excesivo rebote del vehículo creando una incomodidad importante o un alto potencial de peligro o daño severo al vehículo. (Cálculo del índice de condición de pavimento flexible en la av. Luis Montero, distrito de Castilla, Edgar Daniel Rodríguez Velásquez, octubre 2009).

Tabla 7. Hoja de registro para el PCI

| PCI-02. CARRETERAS CON SUPERFICIE EN CONCRETO HIDRAULICO | | | | | | | | | | |
|--|----------------------------|-----------|----------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------|---|---|-----|
| EXPLORACIÓN DE LA CONDICIÓN POR UNIDAD DE MUESTREO | | | | | | | | | | |
| ZONA | | | ABSCISA INICIAL | | | UNIDAD DE MUESTREO | | | | |
| <input type="text"/> | | | <input type="text"/> | | | <input type="text"/> | | | | |
| CÓDIGO VÍA | | | ABSCISA FINAL | | | NÚMERO DE LOSAS | | | | |
| <input type="text"/> | | | <input type="text"/> | | | <input type="text"/> | | | | |
| INSPECCIONADA POR | | | | | FECHA | | | | | |
| <input type="text"/> | | | | | <input type="text"/> | | | | | |
| No. | Daño | | No. | Daño | | No. | Daño | | | |
| 21 | Blow up / Buckling. | | 27 | Desnivel Carril / Berma. | | 34 | Punzonamiento. | | | |
| 22 | Grieta de esquina. | | 28 | Grieta lineal. | | 35 | Cruce de vía férrea | | | |
| 23 | Losas dividida. | | 29 | Parcheo (grande). | | 36 | Desconchamiento | | | |
| 24 | Grieta de durabilidad "D". | | 30 | Parcheo (pequeño) | | 37 | Retracción | | | |
| 25 | Escala. | | 31 | Pulimento de agregados | | 38 | Descascaramiento de esquina | | | |
| 26 | Sello de junta. | | 32 | Popouts | | 39 | Descascaramiento de junta | | | |
| | | | 33 | Bombeo | | | | | | |
| Daño | Severidad | No. Losas | Densidad (%) | Valor deducido | ESQUEMA | | | | | |
| | | | | | o | o | o | o | o | |
| | | | | | | | | | | 10 |
| | | | | | o | o | o | o | o | |
| | | | | | | | | | | 9 |
| | | | | | o | o | o | o | o | |
| | | | | | | | | | | 8 |
| | | | | | o | o | o | o | o | |
| | | | | | | | | | | ... |
| | | | | | o | o | o | o | o | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |

Fuente: Procedimiento estándar para la inspección del índice de condición del pavimento en caminos y estacionamientos ASTM D6433-03

2.2.3.2 División del pavimento en unidades de muestra

Se divide la vía en secciones “unidades de muestreo”, cuyas dimensiones varían de acuerdo con los tipos de vía y de capa de rodadura.

Carreteras con capa de rodadura asfáltica y ancho menor que 7,30 m el área de la unidad de muestreo debe estar en el rango de $230 \pm 93 \text{ m}^2$. En la tabla 5 se muestran algunas relaciones longitud-ancho de calzada pavimentada.

Tabla 8. Longitudes de unidades de muestreo

| Ancho de calzada (m) | Longitud de muestreo asfaltico |
|----------------------|-----------------------------------|
| 5,00 | 46,00 |
| 5,50 | 41,80 |
| 6,00 | 38,30 |
| 6,50 | 35,40 |
| 7,30 (máx.) | 31,50 |

Fuente: Pavement condition index (PCI) para pavimentos asfalticos y de concretos en carreteras, traducido por el ing. Luis Ricardo Vásquez, abril 2006

Se recomienda tomar el valor medio de los rangos y en ningún caso definir unidades por fuera de aquellos. Para cada pavimento inspeccionado se sugiere la elaboración de esquemas que muestren el tamaño y la localización de las unidades, ya que servirá para referencia futura.

No todas las unidades de muestra requieren tener el mismo tamaño de muestra, pero deben ser similares patrones para asegurar la exactitud para el cálculo. (Pavement condition index para pavimentos asfalticos y de concretos en carreteras, traducido por el ing. Luis Ricardo Vásquez, abril 2006)

Determinación de las unidades de muestreo para la evaluación

En la evaluación de una red vial, pueden tenerse un número muy grande de unidades de muestreo, cuya inspección demandara tiempo y recursos considerables, por lo tanto, es necesario aplicar un proceso de muestreo.

En la evaluación de un proyecto, se deben inspeccionar todas las unidades, sin embargo, de no ser posible, el número de unidades de muestreo que deben evaluarse se obtiene mediante la ecuación del número mínimo de unidades a evaluar. La cual produce un estimado del PCI del promedio verdadero con una confiabilidad del 95%.

2.2.3.3 Evaluación de un proyecto

El muestreo se lleva a cabo siguiendo el procedimiento detallado con diferentes usos detallado a continuación.

Identificar tramos o áreas en el pavimento con diferentes usos en el plano de distribución de la red, tales como caminos y estacionamientos.

Dividir cada tramo en secciones basándose en criterios como el diseño del pavimento, historia de construcción, tráfico y condición del mismo.

Dividir las secciones establecidas del pavimento en unidades de muestra.

Identificar las unidades de muestras individuales a ser inspeccionadas de tal manera que permita a los inspectores, localizarlas fácilmente sobre la superficie del pavimento.

Es necesario que las unidades de muestra sean fácilmente reubicables, a fin que sea posible la verificación de la información de fallas existentes, la examinación de variaciones de la unidad de muestra con el tiempo y las inspecciones futuras de la misma unidad de muestra si fuera necesario.

Seleccionar las unidades de muestra a ser inspeccionadas. El número de unidades de muestra a inspeccionar puede variar de la siguiente manera: considerando todas las unidades de muestra de la sección, considerando un número de unidades de muestras que nos garantice un nivel de confiabilidad del 95% o considerando un número menor de unidades de muestra.

Todas las unidades de muestra de la sección pueden ser inspeccionadas para determinar el valor de PCI promedio en la sección. Este tipo de análisis es ideal para una mejor estimación del mantenimiento y reparaciones necesarias.

El número mínimo de unidades de muestra “n” a ser inspeccionadas en una sección dada, para obtener un valor estadísticamente adecuado (95% de confiabilidad), es calculado empleando la ecuación siguiente y redondeando el valor obtenido de “n” al próximo número entero mayor.

$$n = \frac{N * \sigma^2}{\frac{e^2}{4} * (N - 1) + \sigma^2}$$

Donde:

n= Número mínimo de unidades a evaluar.

N= Número total de unidades de muestreo en sección del pavimento.

e= Error admisible en el estimativo del PCI de la sección (e= ±5%)

σ= Desviación estándar del PCI entre las unidades.

Durante la inspección inicial se asume una desviación estándar (σ) del PCI de 10 para pavimento asfáltico (rango PCI de 25) y para pavimento de concreto de 15 (rango PCI de 35). En inspecciones subsecuentes se usará la desviación estándar real (o el rango PCI) de la inspección previa en la determinación del número mínimo de unidades que debe evaluarse.

Cuando el número mínimo de unidades a evaluar es menor que cinco (<5), todas las unidades deberán evaluarse. (Pavement condition index para pavimentos asfálticos y de concretos en carreteras, traducido por el ing. Luis Ricardo Vásquez, abril 2006)

- **Selección de las unidades de muestreo para la inspección**

Se recomienda que las unidades de muestreo elegidas estén igualmente espaciadas a lo largo de la sección del pavimento y que la primera de ellas se elija al azar de la siguiente manera:

$$i = \frac{N}{n}$$

Donde:

N= Número total de unidades de muestreo disponible.

n= Número mínimo de unidades a evaluar.

i= Intervalo de muestreo, se redondea al número entero inferior.

La unidad de muestreo inicial se selecciona al azar entre la unidad de muestreo y el intervalo de muestreo (i). Así si i=3, la unidad de muestreo a inspeccionar puede estar entre 1 y 3.

Las unidades de muestreo para evaluación se identifican como (S), (S+1), (S+2), etc. Siguiendo con el ejemplo, si la unidad inicial de muestreo para la inspección

seleccionada es 3 y de muestreo (i) es igual a 4, las siguientes unidades de muestreo a inspeccionar serían 7, 11, 15, etc.

- **Selección de las unidades de muestreo adicionales**

Una ventaja del método aleatorio es que en algunos casos excluye de la evaluación algunas unidades de muestreo en muy mal estado, también puede darse que queden excluidas unidades de muestreo que presenten fallas que se encuentren solo una vez, por ejemplo, cruce de rieles. Para evitar este tipo de situación, la inspección deberá establecer cualquier unidad de muestreo inusual e inspeccionarla como a una “unidad adicional” en lugar de una “unidad representativa” o aleatoria.

Cuando se incluyen unidades de muestreo adicionales, el PCI es ligeramente modificado para evitar la extrapolación en las condiciones inusuales en toda la sección.

Las unidades de muestra adicionales deben ser inspeccionadas cuando se observan fallas no representativas. Estas unidades de muestra son escogidas por el usuario.

Sin embargo, si se requieren cantidades de daño exactas para pliegos de licitación, todas y cada una de las unidades de muestreo deberán ser inspeccionadas.

- **Materiales e instrumentos para determinar el PCI**

El procedimiento varía de acuerdo al tipo de pavimento que se inspeccione, en este caso estudiaremos el procedimiento para pavimentos flexibles. Debe seguirse estrictamente la definición de los daños del manual de valuación para obtener un valor del PCI confiable. La evaluación de condición incluye los siguientes aspectos:

Equipo

Huinchas de 50 m para medir las longitudes y las áreas de los daños.

Regla y una cinta métrica para establecer las profundidades de los ahuellamientos o depresiones.

Manual de daños del PCI con los formatos correspondientes y en cantidad suficiente para el desarrollo de la actividad.

- **Procedimiento**

Se inspecciona una unidad de muestreo para medir el tipo, cantidad y severidad de acuerdo con el manual de daños y se registra la información en el formato correspondiente.

Se deben conocer y seguir estrictamente las definiciones y procedimientos de la medida de los daños. Teniendo como apoyo una hoja de datos de campo acompañado de un plano donde se esquematiza la red de vía que será evaluada, donde se registrará el daño, su extensión y su nivel de severidad.

(Cálculo del índice de condición de pavimento flexible en la av. Luis Montero, distrito de Castilla, Edgar Daniel Rodríguez Velásquez, octubre 2009)

- **Seguridad**

El equipo de inspección deberá implementar todas las medidas de seguridad para su desplazamiento en la vía inspeccionada, tales como dispositivos de señalización y advertencia para el vehículo acompañante y para el personal en la vía.

2.2.3.4 Metodología de cálculo PCI en vías con capa de rodadura asfáltica

Luego de culminar la inspección de campo, la información recogida se utiliza para calcular el PCI. El cálculo del PCI, está basado en los “valores deducidos” de cada daño, de acuerdo a la cantidad y severidad reportadas.

El cálculo del PCI debe realizarse con la información obtenida en la inspección de campo. El cálculo puede realizarse de manera manual o computarizada.

Paso 1. Determinación de los valores deducidos (VD):

1. a. Totalizar cada tipo y nivel de severidad de daño y registrarlo en la columna “total”, del formato inventario de daños. El daño puede medirse en área, longitud o por número según el tipo de falla.

1. b. Dividir la cantidad de cada clase de daño, en cada nivel de severidad, entre el área total de la unidad de muestreo, y exprese el resultado como porcentaje, esta es la densidad del daño, con el nivel de severidad especificado dentro de la unidad de estudio.

Paso 2. Cálculo del número máximo de valores deducidos (m)

2.a. Si ninguno o tan solo uno de los “valores deducidos” es mayor que 2, se usa el “valor deducido total” en lugar del mayor “valor deducido corregido”, CDV, obtenido en la etapa 3. De lo contrario deben seguirse los pasos 2.b y 2.c.

2.b. Listar los valores deducidos individuales de mayor a menor.

2.c. Determinar el número máximo admisible de valores deducidos (m), utilizando la siguiente ecuación:

$$m_i = 1,00 + \frac{9}{98} * (100 - HDV_i)$$

Donde:

m_i = Número máximo admisible de “valores deducidos”, incluyendo fracción, para la unidad de muestreo i .

HDV_i = Es el mayor valor deducido individual para la unidad de muestreo i .

2.d. El número de valores individuales deducidos se reduce a m , inclusive la parte fraccionaria.

Si se dispone menos valores deducidos que m se utilizan todos los que tengan.

Paso 3. Cálculo del “máximo valor corregido”, CDV.

El máximo CDV se determina mediante el siguiente proceso iterativo.

3.a. Determinar el número de valores deducidos, q , mayores que 2,0.

3.b. Determinar el “valor deducido total” sumando todos los valores deducidos individuales.

3.c. Determinar el CDV con q y el “valor deducido total” en la curva de corrección pertinente al pavimento.

3.d. Reducir a 2,0 el menor de los “valores deducidos” individuales que sea mayor que 2,0 y repetir las etapas 3.a. hasta 3.c. hasta que q sea igual a 1.

3.e. El máximo CDV es el mayor de los CDV obtenidos en el proceso.

Paso 4. Calcular el PCI de la unidad restando de 100 es máximo CDV obtenido en la etapa 3.

(Pavement condition index para pavimento asfálticos y de concretos en carreteras, traducido por el ing. Luis Ricardo Vásquez, abril 2006)

$$PCI = 100 - Max. CDV$$

Donde:

PCI= Índice de condición presente

Max. CDV= Máximo valor corregido deducido.

Tabla 9. Formato para la obtención del máximo valor deducido corregido

| # | Valor deducido | | | | | | | | | | CDT Total | q | CDV |
|---|----------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--------------|---|-----|
| 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | |

Fuente: Procedimiento estándar para la inspección del índice de condición del pavimento en caminos y estacionamientos ASTM D6433-03

2.2.3.5 Metodología de cálculo del PCI de una sección de pavimento

Una sección de pavimento abarca varias unidades de muestreo. Si todas las unidades de muestreo son inventariadas, el PCI de la sección será el promedio de los PCI calculados en las unidades de muestreo.

Si se utiliza la técnica del muestreo, se emplea otro procedimiento. Si la selección de las unidades de muestreo para inspección se hizo mediante la técnica aleatoria sistemática, o con base en la representatividad de la sección, el PCI será el promedio de los PCI de las unidades de muestreo inspeccionadas. Si se usaron unidades de muestreo adicionales, se usa un promedio ponderado calculado de la siguiente forma:

$$PCI_s = \frac{[(N - A) * PCI_R] + (A * PCI_A)}{N}$$

Donde:

PCI_s= PCI de la sección del pavimento.

PCI_R= PCI promedio de las unidades de muestreo aleatorias o representativas.

PCI_A= PCI promedio de las unidades de muestreo adicionales.

N= Número de unidades de muestreo en la sección.

A= Número de unidades de muestreo adicionales.

Criterios de inspección

A continuación, se detallan algunos criterios importantes a tomar en cuenta durante la inspección visual, que permitirán minimizar errores y aclarar interrogantes acerca de la identificación y medición de algunos tipos de fallas.

Si el agrietamiento tipo piel de cocodrilo y ahuellamiento ocurren en la misma área, cada falla es registrada por separado en su correspondiente nivel de severidad. Si la exudación es considerada, entonces el agregado pulido no será tomado en cuenta en la misma área, el agregado pulido debe ser encontrado en cantidades considerables para que la falla sea registrada.

Si una fisura no tiene un mismo nivel de severidad en toda su longitud, cada porción de la fisura con diferente nivel de severidad debe ser registrada en forma separada. Sin embargo, si los diferentes niveles de severidad en una porción de fisura no pueden ser fácilmente separados, dicha porción debe ser registrada con el mayor nivel de severidad presente.

Si alguna falla, incluyendo fisuras o baches, es encontrada en un área parchada, esta no debe ser registrada; sin embargo, su efecto en el parchado debe ser considerado en determinar el nivel de severidad de dicho parche.

Se dice que una falla está desintegrada, si el área que la rodea se encuentra fragmentada (algunas veces hasta el punto de desprendimiento de fragmentos).

2.2.4 Evaluación estructural

2.2.4.1 Viga Benkelman

Desarrollada en el road test de la AASTHO en 1952, consiste en un dispositivo sencillo que opera por medio de una palanca suspendida de un bastidor que transmite la deflexión vertical del punto de medida a un comparador (figura 13). Este equipo debe ser usado con un camión cargado, normalmente con 80 KN en un eje, con llantas duales infladas a una presión de 0,48 a 0,55 MPa (70 a 80 Psi).

Figura 13. Evaluación estructural del pavimento Viga Benkelman.



Fuente: Geofal SAC, 2019

2.2.5 Curva de deterioro

El porcentaje de deterioro de un asfalto está relacionado con su vida útil y puede variar dependiendo de diversos factores, como el tráfico, el clima y el mantenimiento. La vida útil de un pavimento asfáltico se ve afectada por el desgaste causado por el tráfico y por la acción de agentes externos como la lluvia, el sol y cambios de temperatura.

El deterioro del asfalto se puede medir mediante técnicas de evaluación visual, como la identificación de grietas, baches y deformaciones. Además, existen métodos más avanzados que utilizan tecnologías como el escaneo láser para cuantificar el grado de deterioro.

Es importante realizar un adecuado mantenimiento preventivo y correctivo para prolongar la vida útil del asfalto y reducir su deterioro. El porcentaje de deterioro puede variar en función de la calidad del asfalto, las condiciones de tráfico y la implementación de medidas de conservación.

Para determinar el porcentaje de deterioro anual de un pavimento, se puede utilizar la fórmula del Índice de Condición del Pavimento (PCI, por sus siglas en inglés). Esta fórmula toma en cuenta la condición actual del pavimento y la compara con su condición original. La fórmula general es la siguiente:

Donde:

$$PCI = (VCI / VPI) \times 100$$

PCI = Índice de Condición del Pavimento

VCI = Valor de Condición Actual

VPI = Valor de Condición Original

El valor de condición se determina a través de inspecciones visuales y mediciones de irregularidades en el pavimento. Al calcular el PCI, se puede obtener el porcentaje de deterioro anual del pavimento, lo que permite planificar su mantenimiento y rehabilitación de manera efectiva.

La fórmula para determinar el porcentaje de deterioro anual de un pavimento se puede calcular utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Porcentaje de deterioro anual} = \text{Deterioro acumulado} / \text{Vida útil del pavimento} * 100\%$$

Donde:

El "deterioro acumulado" representa la cantidad total de deterioro experimentado por el pavimento desde su construcción.

La "vida útil del pavimento" es el período de tiempo estimado durante el cual se espera que el pavimento mantenga un nivel aceptable de funcionalidad.

Esta fórmula proporciona una forma de medir el ritmo de deterioro del pavimento en términos porcentuales con respecto a su vida útil proyectada.

La vida útil de un pavimento rígido depende de varios factores, incluyendo el tipo de tráfico al que esté expuesto, la calidad de los materiales utilizados, el clima, el mantenimiento y otros aspectos. En general, se estima que la vida útil de un pavimento rígido bien diseñado y mantenido puede oscilar entre 20 y 40 años, aunque esto puede variar significativamente en función de las condiciones específicas. El seguimiento regular del estado del pavimento y la realización de mantenimiento preventivo pueden contribuir a prolongar su vida útil.

La vida útil de un pavimento flexible puede variar significativamente dependiendo de varios factores, como el diseño del pavimento, el tráfico al que está expuesto, el mantenimiento adecuado y las condiciones climáticas. En términos generales, se estima que la vida útil de un pavimento flexible bien diseñado y mantenido puede ser de 15 a 30 años. Sin embargo, es importante recordar que este es solo un estimado y que puede variar según las circunstancias específicas de cada proyecto.

Las curvas permiten tener una mejor conceptualización de las condiciones que se están presentando en un momento dado; y a la vez predecir la condición a futuro. Esto implica un aporte muy significativo en lo que al tema de administración de la infraestructura vial se refiere, ya que se podrá definir la intervención que se requiere para cada tipo de carretera.

Es por ello que uno de los objetivos del proyecto consiste en desarrollar las curvas de deterioro en pavimento flexible del tramo San Mateo-Sella Méndez, a partir de la información de la tesis Evaluación superficial y estructural del estado de pavimento flexible en el tramo San Mateo-Sella/Subia Gallardo, Loyda Heidy. Utilizando como base la norma ASTM D-6433 para las mediciones de los deterioros y el cálculo del Índice de Condición de Pavimento (PCI).

2.3 Marco referencial

En cuanto a los refuerzos propuestos en el presente trabajo se realiza el siguiente análisis en base a la bibliografía consultada:

2.3.1 Refuerzos para pavimentos flexibles

Los pavimentos flexibles son aquellos que están formados por una capa de base granular, una capa de subrasante y una capa de rodadura de asfalto o concreto asfáltico. Estos pavimentos son los más utilizados en la construcción de carreteras, calles y estacionamientos.

Una de las principales preocupaciones en el diseño y construcción de pavimentos flexibles es la durabilidad. Los pavimentos flexibles están sujetos a una serie de factores que pueden provocar su deterioro, como las cargas de tráfico, las condiciones climáticas y los cambios de temperatura.

Para mejorar la durabilidad de los pavimentos flexibles, se pueden utilizar una serie de refuerzos. Los refuerzos más comunes son los siguientes:

- **Refuerzos con fibra de vidrio:** La fibra de vidrio es un material ligero y resistente que se puede utilizar para reforzar la capa de rodadura de un pavimento flexible. Los refuerzos con fibra de vidrio aumentan la resistencia a la fatiga y la tracción del pavimento, lo que ayuda a prevenir el agrietamiento y el desprendimiento del asfalto.
- **Aditivo Zycotherm:** El aditivo Zycotherm es un polímero que se puede añadir al asfalto para mejorar sus propiedades mecánicas y térmicas. El aditivo Zycotherm aumenta la resistencia a la fatiga, la tracción y la temperatura del

asfalto, lo que ayuda a prevenir el agrietamiento y el desprendimiento del asfalto.

- **Geomalla triaxial:** La geomalla triaxial es una malla de fibra sintética que se puede utilizar para reforzar la base granular de un pavimento flexible. Las geomallas triaxiales aumentan la resistencia a la compresión y la tracción de la base granular, lo que ayuda a prevenir el hundimiento y el desprendimiento de la base.

Los refuerzos con fibra de vidrio, el aditivo Zycotherm y la geomalla triaxial son técnicas efectivas para mejorar la durabilidad de los pavimentos flexibles. Estas técnicas pueden ayudar a prolongar la vida útil de un pavimento y reducir los costos de mantenimiento.

2.3.2 Beneficios de los refuerzos para pavimentos flexibles

Los refuerzos para pavimentos flexibles ofrecen una serie de beneficios, entre los que se incluyen:

- **Mejora de la resistencia a la fatiga:** Los refuerzos ayudan a prevenir el agrietamiento y el desprendimiento del pavimento debido a las cargas de tráfico.
- **Mejora de la resistencia a la tracción:** Los refuerzos ayudan a prevenir el desprendimiento del pavimento debido a las fuerzas laterales.
- **Mejora de la resistencia a la temperatura:** Los refuerzos ayudan a prevenir el agrietamiento del pavimento debido a los cambios de temperatura.
- **Reducción de los costos de mantenimiento:** Los refuerzos pueden ayudar a prolongar la vida útil de un pavimento, lo que puede reducir los costos de mantenimiento a largo plazo.

2.3.3 Recomendaciones para el uso de refuerzos para pavimentos flexibles

El uso de refuerzos para pavimentos flexibles debe ser recomendado por un ingeniero civil. El ingeniero debe considerar los siguientes factores al recomendar el uso de refuerzos:

- **Las condiciones del tráfico:** El nivel de tráfico es un factor importante a considerar al elegir el tipo de refuerzo. Los refuerzos con fibra de vidrio son los más adecuados para carreteras con tráfico moderado a pesado. El aditivo Zycotherm y la geomalla triaxial son los más adecuados para carreteras con tráfico ligero a moderado.
- **Las condiciones climáticas:** Las condiciones climáticas también son un factor importante a considerar al elegir el tipo de refuerzo. Los refuerzos con fibra de vidrio son los más adecuados para climas cálidos. El aditivo Zycotherm y la geomalla triaxial son los más adecuados para climas fríos.
- **El tipo de pavimento:** El tipo de pavimento también es un factor importante a considerar al elegir el tipo de refuerzo. Los refuerzos con fibra de vidrio son los más adecuados para pavimentos de asfalto. El aditivo Zycotherm y la geomalla triaxial son los más adecuados para pavimentos de concreto asfáltico.

En conclusión, los refuerzos para pavimentos flexibles son una técnica eficaz para mejorar la durabilidad de estos pavimentos. Estas técnicas pueden ayudar a prolongar la vida útil de un pavimento y reducir los costos de mantenimiento.

2.4 Análisis del aporte teórico

Los refuerzos para pavimentos flexibles son una técnica eficaz para mejorar la durabilidad de estos pavimentos. Los refuerzos pueden ayudar a prevenir el agrietamiento, el desprendimiento y el hundimiento del pavimento, lo que puede prolongar su vida útil y reducir los costos de mantenimiento.

Los tres tipos de refuerzos mencionados anteriormente, los refuerzos con fibra de vidrio, el aditivo Zycotherm y la geomalla triaxial, ofrecen beneficios similares. Todos ellos ayudan a mejorar la resistencia a la fatiga, la tracción y la temperatura del pavimento.

La elección del tipo de refuerzo más adecuado dependerá de una serie de factores, entre los que se incluyen las condiciones del tráfico, las condiciones climáticas y el tipo de pavimento.

Los refuerzos con fibra de vidrio son los más adecuados para carreteras con tráfico moderado a pesado. Son resistentes a la fatiga y a la tracción, y pueden ayudar a prevenir el agrietamiento y el desprendimiento del pavimento.

El aditivo Zycotherm es un polímero que se puede añadir al asfalto para mejorar sus propiedades mecánicas y térmicas. Es resistente a la fatiga, a la tracción y a la temperatura, y puede ayudar a prevenir el agrietamiento y el desprendimiento del pavimento.

La geomalla triaxial es una malla de fibra sintética que se puede utilizar para reforzar la capa de rodadura de un pavimento flexible.

En general, los refuerzos para pavimentos flexibles son una técnica eficaz para mejorar la durabilidad de estos pavimentos. Pueden ayudar a prolongar la vida útil de un pavimento y reducir los costos de mantenimiento.

CAPÍTULO III
APLICACIÓN
PRÁCTICA

CAPITULO III

APLICACIÓN PRÁCTICA

3.1 Criterios de diseño metodológico

3.1.1 Unidad de muestra

Ensayos de laboratorio de Asfaltos.

3.1.2 Población

Todos los ensayos de laboratorio.

3.1.3 Muestra

Ensayos

- 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.

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).

3.1.4 Tamaño de la muestra

Nivel de confianza

Tabla 10. Nivel de Confianza.

| 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 |

Fuente: Elaboración propia

Tamaño de la Muestra.

$$n = \frac{\sum Ni * \sigma^2}{Ni * \left(\frac{e}{Z}\right)^2 + \frac{\sum Ni * \sigma^2}{N}}$$

$$\sigma^2 = (0.10 - 0.15)$$

$$\sigma^2 = (0.15)$$

$$e = 0.05 \%$$

$$n = \frac{21.900}{146 * \left(\frac{0.05}{1.96}\right)^2 + \left(\frac{21.900}{146}\right)}$$

$$n = 90 \text{ Ensayos}$$

Tabla 11. Planilla de muestreo

| Ensayos | Cantidad (Ni) | σ^2 | $Ni*\sigma^2$ | fi | ni | Valor adop. |
|--|---------------|------------|---------------|-------|--------|-------------|
| Caracterización del Material | | | | | | |
| Granulometría de áridos | 3 | 0.150 | 0.450 | 0.021 | 1.901 | 2 |
| Desgaste de los ángulos | 3 | 0.150 | 0.450 | 0.021 | 1.901 | 2 |
| Peso específico y absorción de agua en agregados gruesos | 3 | 0.150 | 0.450 | 0.021 | 1.901 | 2 |
| Peso específico y absorción de agua en agregados finos | 3 | 0.150 | 0.450 | 0.021 | 1.901 | 2 |
| Peso Unitario | 3 | 0.150 | 0.450 | 0.021 | 1.901 | 2 |
| Equivalente de Arena | 3 | 0.150 | 0.450 | 0.021 | 1.901 | 2 |
| Porcentaje de cara fracturada | 3 | 0.150 | 0.450 | 0.021 | 1.901 | 2 |
| Determinación de cara chata y alargada | 3 | 0.150 | 0.450 | 0.021 | 1.901 | 2 |
| | 30 | | 4.500 | | 19.014 | 20 |
| Caracterización del Cemento Asfáltico | | | | | | |
| Penetración | 3 | 0.150 | 0.450 | 0.021 | 1.849 | 2 |
| Peso Especifico | 3 | 0.150 | 0.450 | 0.021 | 1.849 | 2 |
| Punto de Ablandamiento | 3 | 0.150 | 0.450 | 0.021 | 1.849 | 2 |
| Punto de Inflamación | 3 | 0.150 | 0.450 | 0.021 | 1.849 | 2 |
| | 12 | | 1.800 | | 7.396 | 8 |
| Propiedades Mecánicas | | | | | | |
| Estabilidad | 20 | 0.150 | 3.000 | 0.141 | 12.676 | 13 |
| Fluencia | 20 | 0.150 | 3.000 | 0.141 | 12.676 | 13 |
| % de Vacíos de Aire | 20 | 0.150 | 3.000 | 0.141 | 12.676 | 13 |
| % de Vacíos de V.A.M. (vacíos de agregado mineral) | 20 | 0.150 | 3.000 | 0.141 | 12.676 | 13 |
| Peso Unitario | 20 | 0.150 | 3.000 | 0.141 | 12.676 | 13 |
| TOTAL | 142 | | 21.300 | | 90.000 | 93 |

Fuente: Elaboración propia

El Tamaño de la muestra total será de: **93 ensayos.**

3.2 Localización de obtención de agregados

Los Agregados Pétreos utilizados fueron proporcionados por la dirección de obras públicas municipales del Gobierno Autónomo Municipal de la Ciudad de Tarija y la Provincia Cercado los cuales son procedentes de la Chancadora Garzón de la comunidad San Mateo, provincia Méndez, departamento de Tarija Bolivia, la comunidad San Mateo se encuentra a 5 Kilómetros de la ciudad de Tarija con ubicación geográfica de 318568.00 E y 7624720.00 S, la chancadora Garzón se encuentra a la orilla del río.

Figura 14. Ubicación de la chancadora Garzón.



Fuente: Google Earth.

3.3 Localización de obtención del cemento asfáltico

El cemento asfáltico utilizado fue proporcionado por la dirección de obras públicas municipales del Gobierno Autónomo Municipal de la Ciudad de Tarija y la Provincia Cercado con las características de ser un betún C.A.P. 85-100 de procedencia colombiana. 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 Guadalquivir a 319713.95 E y 7618550.46 S.

Figura 15. Ubicación de la posta municipal de la provincia Cercado.



Fuente: Google Earth.

3.4 Caracterización de los Agregados Pétreos

3.4.1 Ensayo de Granulometría (AASTHO T-27) (ASTM C-136)

Este método de ensayo tiene por objeto determinar cuantitativamente la distribución de los tamaños de las partículas de agregado grueso y fino de un material, por medio de tamices de abertura cuadrada progresivamente decreciente. Por granulometría o análisis granulométrico de un agregado se entenderá todo procedimiento manual o mecánico por medio del cual se pueda separar las partículas constitutivas del agregado según tamaños, de tal manera que se puedan conocer las cantidades en peso de cada tamaño que aporta el peso total. Para separar por tamaños se utilizan las mallas de diferentes aberturas, las cuales proporcionan el tamaño máximo de agregados en cada una de ellas. En la práctica los pesos de cada tamaño se expresan como porcentaje retenidos en cada malla con respecto al total de la muestra. Estos porcentajes retenidos se calculan tanto parciales como acumulados, en cada malla, ya que con estos últimos se procede a trazar la gráfica de los valores de material.

Procedimiento

1. **Preparación de la Muestra:** Se selecciona una muestra representativa de suelo y se pesa con precisión.
2. **Selección de Tamices:** Se eligen los tamices adecuados, que tienen diferentes tamaños de malla, para separar las partículas del suelo.
3. **Tamizado:** La muestra se coloca en el tamiz superior de la serie y se somete a un movimiento de tamizado, que puede ser manual o mecánico, durante un tiempo específico.
4. **Pesaje de las Fracciones:** Después del tamizado, se pesa la cantidad de suelo retenida en cada tamiz. También se registra el peso del material que pasa a través del tamiz inferior.
5. **Cálculo de Porcentajes:** Se calculan los porcentajes de masa de cada fracción en relación con la masa total de la muestra.
6. **Elaboración de la Curva Granulométrica:** Con los datos obtenidos, se elabora una curva granulométrica que representa la distribución de tamaños de partículas.

Figura 16. Serie de Tamices para obtener la granulometría de las muestras



Fuente: Elaboración propia

Resultados de la práctica

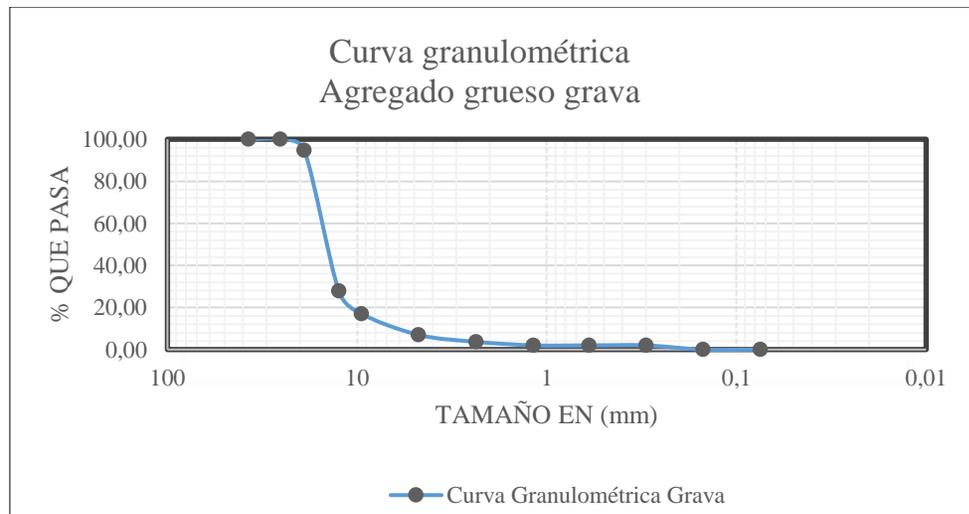
Tabla 12. Granulometría Agregado Grueso Grava.

| Peso Total (gr) = | | 3000 | | | | | |
|-------------------|------------|----------------|----------------|--------|----------------------|----------------------------|--------|
| Tamices | Tamaño(mm) | Peso Ret. (gr) | Ret. Acumulado | | % Que pasa del total | % Que pasa s/g Espec. ASTM | |
| | | | (gr) | (%) | | | |
| 1 | 63,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 3/4 | 25,40 | 155,25 | 155,25 | 5,18 | 94,83 | 95,00 | 100,00 |
| 1/2 | 19,00 | 2007,00 | 2162,25 | 72,08 | 27,93 | | |
| 3/8 | 12,50 | 327,10 | 2489,35 | 82,98 | 17,02 | - | - |
| Nº4 | 9,50 | 300,90 | 2790,25 | 93,01 | 6,99 | 0,00 | 10,00 |
| Nº8 | 4,75 | 99,52 | 2889,77 | 96,33 | 3,67 | 0,00 | 5,00 |
| Nº16 | 2,36 | 50,23 | 2940,00 | 98,00 | 2,00 | 0,00 | 0,00 |
| Nº30 | 1,18 | 0,00 | 2940,00 | 98,00 | 2,00 | | |
| BASE | | 60,00 | 3000,00 | 100,00 | 0,00 | | |
| | SUMA | 3000,00 | | | | | |
| | PERDIDAS | 0,00 | | | | | |
| | MF | 6,46 | | | | | |

TAMAÑO MAX = 3/4"

Fuente: Elaboración propia

Figura 17. Curva Granulométrica Grava.



Fuente: Elaboración propia

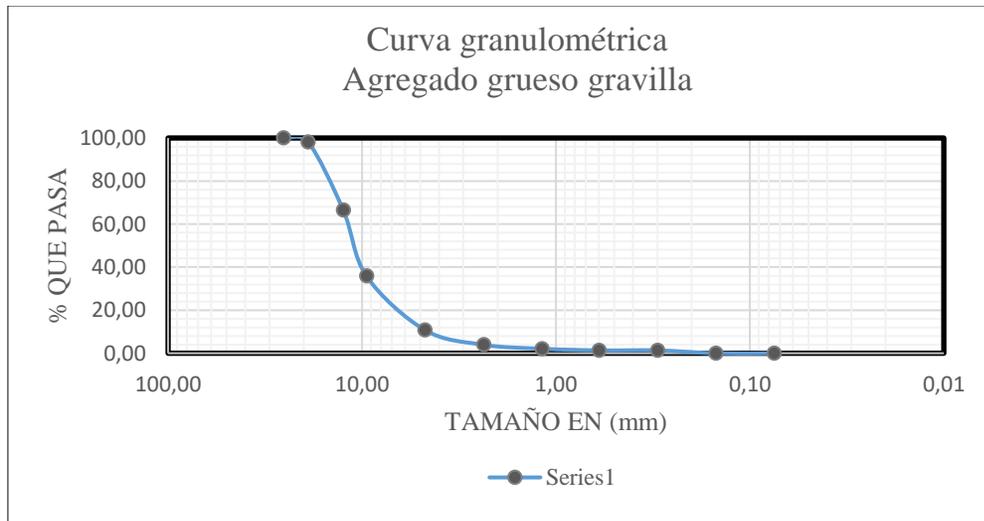
Tabla 13. Granulometría Agregado Grueso Gravilla.

| Peso Total (gr) = | | 3000 | | | | | |
|-------------------|------------|----------------|----------------|--------|----------------------|----------------------------|--------|
| Tamices | Tamaño(mm) | Peso Ret. (gr) | Ret. Acumulado | | % Que pasa del total | % Que pasa s/g Espec. ASTM | |
| | | | (gr) | (%) | | | |
| 2 1/2" | 63,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 3/4 | 19,00 | 54,00 | 54,00 | 1,80 | 98,20 | 95,00 | 100,00 |
| 1/2 | 12,50 | 950,00 | 1004,00 | 33,52 | 66,48 | - | - |
| 3/8 | 9,50 | 918,80 | 1922,80 | 64,20 | 35,80 | 0,00 | 10,00 |
| N°4 | 4,75 | 752,80 | 2675,60 | 89,34 | 10,66 | 0,00 | 5,00 |
| N°8 | 2,36 | 206,40 | 2882,00 | 96,23 | 3,77 | 0,00 | 0,00 |
| N°16 | 1,18 | 55,00 | 2937,00 | 98,06 | 1,94 | | |
| N°30 | 0,60 | 23,00 | 2960,00 | 98,83 | 1,17 | | |
| N°50 | 0,30 | 0,00 | 2960,00 | 98,83 | 1,17 | | |
| BASE | | 35,00 | 2995,00 | 100,00 | 0,00 | | |
| | SUMA | 2995,00 | | | | | |
| | PERDIDAS | 5,00 | | | | | |
| | MF | 5,81 | | | | | |

TAMAÑO MAX = 3/8"

Fuente: Elaboración propia

Figura 18. Curva Granulométrica Gravilla.



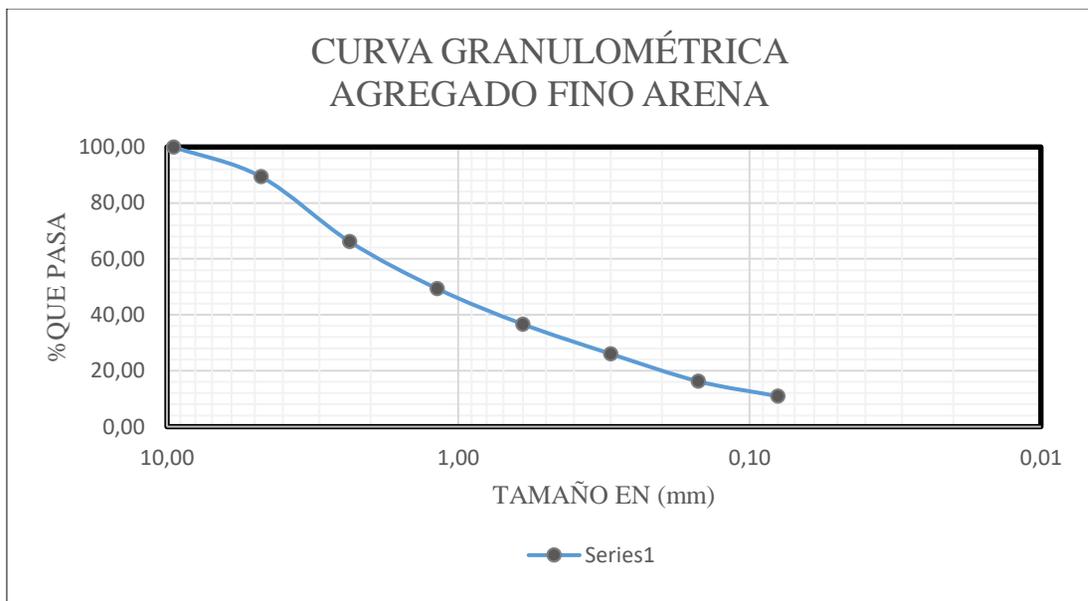
Fuente: Elaboración propia

Tabla 14. Granulometría Agregado Fino Arena.

| Peso Total (gr) = | | 1000 | | | | | |
|-------------------|------------|----------------|----------------|--------|----------------------|-------------|-----|
| Tamices | Tamaño(mm) | Peso Ret. (gr) | Ret. Acumulado | | % Que pasa del total | Espec. ASTM | |
| | | | (gr) | (%) | | | |
| 3/8 | 9,50 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | 100 | 100 |
| N°4 | 4,75 | 103,60 | 103,60 | 10,65 | 89,35 | 56 | 80 |
| N°8 | 2,36 | 225,63 | 329,23 | 33,85 | 66,15 | 35 | 65 |
| N°16 | 1,18 | 163,74 | 492,97 | 50,69 | 49,31 | 23 | 49 |
| N°30 | 0,60 | 123,24 | 616,21 | 63,36 | 36,64 | 25 | 60 |
| N°50 | 0,30 | 103,14 | 719,35 | 73,96 | 26,04 | 5 | 19 |
| N°100 | 0,15 | 95,52 | 814,87 | 83,78 | 16,22 | 2 | 10 |
| N°200 | 0,08 | 51,72 | 866,59 | 89,10 | 10,90 | 2 | 8 |
| BASE | 0,00 | 106,00 | 972,59 | 100,00 | 0,00 | 0 | 0 |
| | SUMA | 972,59 | | | | | |
| | PERDIDAS | 27,41 | | | | | |
| | MF | 3,16 | | | | | |

Fuente: Elaboración propia

Figura 19. Curva Granulométrica Arena.



Fuente: Elaboración propia

3.4.2 Ensayo de peso específico y absorción de agregados gruesos (AASTHO T-85)

Este ensayo establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos. Para este ensayo se realizó la medición del peso específico para la gravilla 3/8" y para la grava 3/4". La muestra se lava inicialmente con agua hasta eliminar completamente el polvo u otras sustancias extrañas adheridas a la superficie de las partículas; se seca a continuación en un horno a 100° - 110°C. Después se lo sumerge en agua, se seca la muestra del agua y se secan partículas redondas sobre un paño a continuación, se determina el peso de la muestra en el estado de saturación con superficie seca (S.S.S.).

A continuación, se coloca la muestra en el interior de la canastilla metálica y se determina su peso sumergido en el agua, a la temperatura de 25°C de temperatura ambiente. Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos AASTHO T-85 y ASTM C-127.

1. **Preparación de la Muestra:** Se selecciona una muestra representativa de agregados gruesos, asegurándose de que esté limpia y libre de impurezas.
2. **Pesado de la Muestra Seca:** Se pesa la muestra en estado seco, registrando el peso como W_s .
3. **Inmersión en Agua:** La muestra se sumerge completamente en agua durante un tiempo determinado (generalmente 24 horas) para permitir la absorción de agua.
4. **Pesado en Estado Saturado:** Después de la inmersión, se retira la muestra del agua, se elimina el exceso de agua en la superficie y se pesa nuevamente. Este peso se registra como W_{sat} .
5. **Pesado en Agua:** Se coloca la muestra en un recipiente con agua y se pesa, registrando este peso como W_w (peso de la muestra sumergida).
6. **Cálculo del Peso Específico:** Se utilizan las siguientes fórmulas para calcular el peso específico de los agregados:
7. **Peso específico** $\text{Peso específico} = \frac{w_s}{w_s - w_h}$
8. **Cálculo de la Absorción:** Se calcula el porcentaje de absorción utilizando la fórmula:
9. $\% \text{ de absorción} = \frac{w_s - w_h}{w_s * 100}$

Figura 20. Lavar y dejar saturar con agua por 24 hr



Fuente: Elaboración propia

Cálculos Agregado Grueso Grava

Peso específico a granel de la Grava.

$$\begin{aligned} & \text{Peso específico a granel} \\ & = \frac{\text{peso de muestra seca}}{\text{Peso de la muestra S.S.S.} - \text{Peso de la muestra sumergida en agua}} \end{aligned}$$

Peso específico S.S.S. de la Grava.

$$\text{Peso específico S.S.S.} = \frac{\text{Peso de la muestra S.S.S}}{\text{Peso de la muestra S.S.S.} - \text{Peso de la muestra sumergida en agua}}$$

Peso específico sumergido de la Grava.

$$\text{Peso específico sumergido} = \frac{\text{Peso de la muestra seca}}{\text{Peso de la muestra seca.} - \text{Peso de la muestra sumergida en agua}}$$

% absorción de la Grava.

$$\% \text{ absorción} = \frac{\text{Peso de la muestra S.S.S} - \text{peso de la muestra seca}}{\text{Peso de la muestra seca} * 100}$$

Se realizará los mismos cálculos para la gravilla.

Determinado el promedio de los 3 ensayos realizados

Resultados de la práctica

Tabla 15. Resultados del peso específico de la grava.

| MUESTRA N° | PESO MUESTRA SECADA "A" (gr) | PESO MUESTRA SATURADA CON SUP. SECA "B" (gr) | PESO MUESTRA SAT. DENTRO DEL AGUA "C" (gr) | PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm ³) | PESO ESPECÍFICO S.S.S. (gr/cm ³) | PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm ³) | % DE ABS. (cm ³) |
|-----------------|--|--|--|---|---|---|---------------------------------------|
| 1 | 4955,00 | 5000,00 | 3108,00 | 2,62 | 2,64 | 2,68 | 0,91 |
| 2 | 4958,00 | 5000,00 | 3090,00 | 2,60 | 2,62 | 2,65 | 0,85 |
| 3 | 4954,00 | 5000,00 | 3108,00 | 2,62 | 2,64 | 2,68 | 0,93 |
| PROMEDIO | | | | 2,61 | 2,63 | 2,67 | 0,89 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16. Resultados del peso específico de la gravilla.

| MUESTRA N° | PESO MUESTRA SECADA "A" (gr) | PESO MUESTRA SATURADA CON SUP. SECA "B" (gr) | PESO MUESTRA SAT. DENTRO DEL AGUA "C" (gr) | PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm ³) | PESO ESPECÍFICO S.S.S. (gr/cm ³) | PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm ³) | % DE ABS. (cm ³) |
|-----------------|--|--|--|---|---|---|---------------------------------------|
| 1 | 4943,10 | 5000,00 | 3052,00 | 2,54 | 2,57 | 2,61 | 1,15 |
| 2 | 4945,30 | 5000,00 | 3065,00 | 2,56 | 2,58 | 2,63 | 1,11 |
| 3 | 4949,20 | 5000,00 | 3065,00 | 2,56 | 2,58 | 2,63 | 1,03 |
| PROMEDIO | | | | 2,55 | 2,58 | 2,62 | 1,13 |

3.4.3 Ensayo de peso específico y absorción de agregado fino (AASTHO T-84)

Este ensayo tiene como objetivo la determinación del peso específico aparente, lo mismo que la cantidad de agua que se absorbe en el agregado fino cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas, expresada como un porcentaje en peso. El peso específico aparente es la relación entre el peso del agua correspondiente a su volumen aparente, este ensayo establece

los procedimientos para Fuente: Elaboración propia determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua de los áridos finos.

Preparación de la Muestra: Se selecciona una muestra representativa de agregado fino, asegurándose de que esté limpia y libre de impurezas.

Determinación del Peso Seco: Se pesa la muestra en condiciones secas utilizando una balanza de precisión. Este peso se registra como W_s .

Inmersión en Agua: La muestra se sumerge en agua a temperatura ambiente durante un periodo de 24 horas para permitir que el agua penetre en los poros del agregado.

Retiro y Secado: Después de 24 horas, se retira la muestra del agua y se deja drenar. Luego, se seca la superficie del agregado con un paño absorbente, evitando eliminar agua de los poros.

Determinación del Peso Sumergido: Se pesa la muestra sumergida en agua, registrando este peso como W_s (peso en agua).

Cálculo del Peso Específico: Se calcula el peso específico utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Peso específico} = \frac{W_s}{W_s - W_h}$$

Determinación del Peso Saturado: Se sumerge nuevamente la muestra en agua y se pesa para obtener el peso saturado, que se registra como W_{sat} .

Cálculo de la Absorción: Se calcula el porcentaje de absorción de agua utilizando la fórmula: % de absorcion = $\frac{w_s - w_h}{w_s * 100}$

Figura 21. Peso específico agregado fino



Fuente: Elaboracion propia

Cálculos Agregado Fino Arena

Peso específico a granel de la Arena

$$\text{Peso específico a granel} = \frac{\text{peso de muestra seca}}{(\text{Peso de la muestra S. S. S.}) - (\text{agua agregada al matraz})}$$

Peso específico S.S.S. de la Arena

$$\text{Peso específico S. S. S} = \frac{\text{peso de muestra S.S.S}}{(\text{Peso de la muestra S.S.S.}) - (\text{agua agregada al matraz})}$$

Peso específico aparente de la Arena

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{\text{peso de muestra seca}}{(\text{Peso de la muestra S. S. S.} - \text{agua agregada matraz}) - (\text{Peso de la muestra S. S. S.} - \text{peso de muestra seca})}$$

% absorción de la Arena

$$\% \text{ absorción} = \frac{(\text{Peso de la muestra S. S. S} - \text{peso de la muestra seca}) * 100}{\text{peso de la muestra S. S. S}}$$

Resultados de la práctica

Tabla 17. Resultados del peso específico de la arena.

| MUESTRA N° | PESO MUESTRA (gr) | PESO MATRÁZ (gr) | MUESTRA + MATRÁZ + AGUA (gr) | AGUA AGREG. AL MATRÁZ "W" (ml) ó (gr) | PESO MUESTRA SECADA "A" (gr) | VOL. DEL MATRÁZ "V" (ml) | P. E. A GRANEL (gr/cm ³) | P. E. SAT. CON SUP. SECA (gr/cm ³) | P. E. APARENTE (gr/cm ³) | % DE ABSORC. (cm ³) |
|-----------------|-------------------------|------------------------|---|--|--|-----------------------------------|---|---|--|--|
| 1 | 500,00 | 183,60 | 993,70 | 310,10 | 489,90 | 500,00 | 2,58 | 2,63 | 2,72 | 2,02 |
| 2 | 500,00 | 185,90 | 992,30 | 306,40 | 489,60 | 500,00 | 2,53 | 2,58 | 2,67 | 2,08 |
| 3 | 500,00 | 183,10 | 979,90 | 296,80 | 489,10 | 500,00 | 2,41 | 2,46 | 2,54 | 2,18 |
| PROMEDIO | | | | | | | 2,51 | 2,56 | 2,65 | 2,09 |

Fuente: Elaboración propia

3.4.4 Ensayo de desgaste de la máquina de los ángeles (AASTHO T-96)

Los agregados deben ser capaces de resistir el desgaste irreversible y de degradación durante la producción, colocación y compactación de las obras de pavimentación, y sobre todo durante la vida de servicio del pavimento. Debido a las condiciones de esfuerzo-deformación, la carga de la rueda es transmitida a la superficie del pavimento a través de la llanta como una presión vertical aproximadamente uniforme y alta. La estructura del

pavimento distribuye los esfuerzos de la carga, de una máxima intensidad en la superficie hasta una mínima en la subrasante. Por esta razón los agregados que están en, o de la superficie, como son los materiales de base y carpetas asfálticas, deben ser más resistentes que los agregados usados en las capas inferiores, sub base, de la estructura del pavimento, la razón se debe a que las capas superficiales reciben los mayores esfuerzos y el mayor desgaste por parte de cargas del tránsito. Por otro lado, los agregados transmiten los esfuerzos a través de los puntos de contacto donde actúan presiones altas. El ensayo de Desgaste de Los Ángeles, ASTM C-131 ó AASTHO T-96, mide básicamente la resistencia de los puntos de contacto de un agregado al desgaste y/o a la abrasión. Los aparatos y procedimiento para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos AASTHO T-96 y ASTM C-131.

1. **Preparación de la Muestra:** Se selecciona una muestra representativa de agregado grueso, que debe ser limpia y libre de impurezas. La cantidad de muestra suele ser de aproximadamente 5,000 gramos.
2. **Determinación del Peso Inicial:** Se pesa la muestra en condiciones secas utilizando una balanza de precisión. Este peso se registra como W_i (peso inicial).
3. **Carga de la Máquina:** Se coloca la muestra en el tambor de la máquina de los ángeles, junto con un número específico de bolas de acero (generalmente 12).
4. **Configuración de la Máquina:** Se ajusta la máquina para que realice un número definido de revoluciones, típicamente 500 revoluciones, a una velocidad constante.
5. **Ejecutar el Ensayo:** Se enciende la máquina y se permite que la muestra gire junto con las bolas de acero durante el tiempo establecido.
6. **Detener la Máquina:** Una vez completadas las revoluciones, se apaga la máquina y se retira el contenido del tambor.
7. **Limpieza de la Muestra:** Se separan las bolas de acero de la muestra y se limpia el agregado para eliminar el polvo y los fragmentos sueltos generados durante el ensayo.
8. **Determinación del Peso Final:** Se pesa la muestra después del ensayo, registrando este peso como W_f (peso final).

9. **Cálculo de la Pérdida de Peso:** Se calcula la pérdida de peso utilizando la fórmula:

$$\text{perdida de peso} = w_i - w_f$$

10. **Cálculo del Porcentaje de Desgaste:** Se calcula el porcentaje de desgaste del agregado utilizando la fórmula:

$$\% \text{ DESGASTE} = \frac{P_{\text{INICIAL}} - P_{\text{FINAL}}}{P_{\text{INICIAL}}} * 100$$

Figura 22. Muestra luego de procesar en el equipo de desgaste de los ángeles



Fuente: Elaboración propia

Tabla 18. Desgaste de los angeles grava.

| METODO | | A | B | C | D |
|-------------------|----------|-------------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| DIAMETRO | | CANTIDAD DE MATERIAL A EMPLEAR (gr) | | | |
| PASA | RETENIDO | | | | |
| 1 1/2" | 1" | 1250±25 | | | |
| 1" | 3/4" | 1250±25 | | | |
| 3/4" | 1/2" | 1250±10 | 2500±10 | | |
| 1/2" | 3/8" | 1250±10 | 2500±10 | | |
| 3/8" | 1/4" | | | 2500±10 | |
| 1/4" | N°4 | | | 2500±10 | |
| N°4 | N°8 | | | | 5000±10 |
| PESO TOTAL | | 5000±10 | 5000±10 | 5000±10 | 5000±10 |
| N°DE REVOLUCIONES | | 500 | 500 | 500 | 500 |
| NUMERO DE ESFERAS | | 12 | 11 | 8 | 6 |
| MASA ABRASIVA | | 500±25 | 4584±20 | 3330±20 | 2500±15 |

DATOS DE LABORATORIO

| METODO A | | METODO B | | METODO C | | METODO D | |
|----------|---------------|----------|---------------|----------|---------------|----------|---------------|
| TAMIZ | PESO RETENIDO |
| 1" | 1250 | 1/2" | 2500 | 1/4" | 2500 | N°8 | 5000 |
| 3/4" | 1250 | 3/8" | 2500 | N° | 2500 | | |
| 1/2" | 1250 | | | | | | |
| 3/8" | 1250 | | | | | | |

Fuente: Norma ASTM C131

Resultados de la práctica

Ecuación para el porcentaje de Desgaste.

$$\% \text{ DESGASTE} = \frac{P_{\text{INICIAL}} - P_{\text{FINAL}}}{P_{\text{INICIAL}}} * 100$$

Tabla 19. Resultados de Desgaste de los Ángeles (Grava).

| MATERIAL | PESO INICIAL grs | PESO FINAL grs | % DE DESGASTE | ESPECIFICACION ASTM |
|-----------|---------------------|-------------------|------------------|---------------------|
| B "GRAVA" | 5000,00 | 3889,90 | 22,20 | 40% MAX |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20 Desgaste de los ángeles gravilla

| METODO | | A | B | C | D |
|-------------------|----------|-------------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| DIAMETRO | | CANTIDAD DE MATERIAL A EMPLEAR (gr) | | | |
| PASA | RETENIDO | | | | |
| 1 1/2" | 1" | 1250±25 | | | |
| 1" | 3/4" | 1250±25 | | | |
| 3/4" | 1/2" | 1250±10 | 2500±10 | | |
| 1/2" | 3/8" | 1250±10 | 2500±10 | | |
| 3/8" | 1/4" | | | 2500±10 | |
| 1/4" | N°4 | | | 2500±10 | |
| N°4 | N°8 | | | | 5000±10 |
| PESO TOTAL | | 5000±10 | 5000±10 | 5000±10 | 5000±10 |
| N°DE REVOLUCIONES | | 500 | 500 | 500 | 500 |
| NUMERO DE ESFERAS | | 12 | 11 | 8 | 6 |
| MASA ABRASIVA | | 500±25 | 4584±20 | 3330±20 | 2500±15 |

DATOS DE LABORATORIO

| METODO A | | METODO B | | METODO C | | METODO D | |
|----------|---------------|----------|---------------|----------|---------------|----------|---------------|
| TAMIZ | PESO RETENIDO |
| 1" | 1250 | 1/2" | 2500 | 1/4" | 2500 | N°8 | 5000 |
| 3/4" | 1250 | 3/8" | 2500 | N° | 2500 | | |
| 1/2" | 1250 | | | | | | |
| 3/8" | 1250 | | | | | | |

Resultados de la práctica

Ecuación para el porcentaje de Desgaste.

$$\% \text{ DESGASTE} = \frac{P_{\text{INICIAL}} - P_{\text{FINAL}}}{P_{\text{INICIAL}}} * 100$$

Tabla 21. Resultados de Desgaste de los Ángeles (Gravilla).

| MATERIAL | PESO INICIAL grs | PESO FINAL grs | % DE DESGASTE | ESPECIFICACION ASTM |
|--------------|---------------------|-------------------|---------------|---------------------|
| C "GRAVILLA" | 5000,00 | 3788,60 | 24,23 | 40% MAX |

Fuente: Elaboración propia

3.4.5 Ensayo porcentaje de caras fracturadas (ASTM D-5821-95)

Este ensayo se realiza para determinar el porcentaje de peso de la muestra que se utilizó del agregado en las diferentes caras fracturadas. Se realiza la separación de todas las muestras y se pesó cada muestra para hallar los porcentajes.

Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos ASTM D 5821-95.

1. **Preparación de la Muestra:** Se selecciona una muestra representativa de agregado grueso. La muestra debe ser limpia y libre de impurezas, y generalmente se recomienda que tenga un tamaño mínimo de 1,000 gramos.
2. **Clasificación de la Muestra:** Se clasifica la muestra en diferentes tamaños de partículas, si es necesario, utilizando tamices adecuados. Esto asegura que se evalúen las partículas en el rango correcto.
3. **Inspección Visual:** Se lleva a cabo una inspección visual de las partículas de la muestra. Se observa cada partícula para identificar las caras fracturadas.
4. **Conteo de Partículas:** Se cuentan el número total de partículas en la muestra. Este conteo se registra como N_t (número total de partículas).
5. **Identificación de Caras Fracturadas:** Se identifican y cuentan las partículas que tienen al menos dos caras fracturadas. Este conteo se registra como N_f (número de partículas con caras fracturadas).
6. **Cálculo del Porcentaje de Caras Fracturadas:** Se calcula el porcentaje de caras fracturadas utilizando la siguiente fórmula:

Porcentaje de caras fracturadas

$$\% \text{ caras fracturadas} = \frac{N_f}{N_t} * 100$$

Ecuación para el porcentaje de Caras Fracturadas.

$$\% \text{ de caras fracturadas} = \frac{\text{suma de \% de caras faracturtadas}}{\text{muestra de ensayo del material}}$$

Resultados de la práctica

Para la Grava

Tabla 22. Resultados del % de caras fracturadas (Grava).

| Tamiz | | A | B | C | D | E |
|--------------|-------------------|----------------|----------------|---------------|---------------|-----------------|
| Pasa tamiz | Retenido en tamiz | (gr) | (gr) | (B/A)*100 | (%) | (C*D) |
| 1 1/2" | 1" | 2000,00 | 1760,00 | 88,00 | 40,00 | 3520,00 |
| 1" | 3/4" | 1500,00 | 1360,00 | 90,67 | 40,00 | 3626,67 |
| 3/4" | 1/2" | 1200,00 | 820,00 | 68,33 | 30,00 | 2050,00 |
| 1/2" | 3/8" | 300,00 | 191,00 | 63,67 | 24,00 | 1528,00 |
| Total | | 5000,00 | 4131,00 | 310,67 | 134,00 | 10724,67 |

| | | |
|---------------------------------------|-------|---|
| Porcentaje de Caras Fracturadas (%) = | 80,03 | % |
|---------------------------------------|-------|---|

Fuente: Elaboración propia

Para la Gravilla

Tabla 23. Resultados del % de caras fracturadas (Gravilla).

| Tamiz | | A | B | C | D | E |
|--------------|-------------------|----------------|----------------|---------------|---------------|-----------------|
| Pasa tamiz | Retenido en tamiz | (gr) | (gr) | (B/A)*100 | (%) | (C*D) |
| 1 1/2" | 1" | 2000,00 | 1820,00 | 91,00 | 40,00 | 3640,00 |
| 1" | 3/4" | 1500,00 | 1150,00 | 76,67 | 40,00 | 3066,67 |
| 3/4" | 1/2" | 1200,00 | 876,00 | 73,00 | 30,00 | 2190,00 |
| 1/2" | 3/8" | 300,00 | 170,00 | 56,67 | 24,00 | 1360,00 |
| Total | | 5000,00 | 4016,00 | 297,33 | 134,00 | 10256,67 |

| | | |
|---------------------------------------|-------|---|
| Porcentaje de Caras Fracturadas (%) = | 76,54 | % |
|---------------------------------------|-------|---|

Fuente: Elaboración propia

3.4.6 Ensayo determinación de partículas chatas, planas y alargadas (ASTM-4791)

Este ensayo describe el procedimiento para la determinación de los porcentajes de los agregados. Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos ASTM D-4791.

1. **Preparación de la Muestra:** Se selecciona una muestra representativa de agregado grueso. La muestra debe ser limpia y libre de impurezas, y debe tener un tamaño mínimo recomendado de 1,000 gramos.
2. **Clasificación de la Muestra:** Se clasifica la muestra utilizando tamices adecuados para separar las partículas en diferentes tamaños, si es necesario.
3. **Inspección Visual Inicial:** Se realiza una inspección visual de las partículas para familiarizarse con sus formas y características.
4. **Uso de Plantillas:** Se utilizan plantillas específicas que tienen aberturas de diferentes proporciones para evaluar la forma de las partículas. Estas plantillas están diseñadas para identificar partículas chatas, planas y alargadas.
5. **Clasificación de Partículas:**
6. **Partículas Chatas:** Se colocan las partículas en la plantilla correspondiente y se determina si cumplen con el criterio de ser chatas.
7. **Partículas Planas:** Se repite el procedimiento para identificar las partículas planas.
8. **Partículas Alargadas:** Finalmente, se evalúan las partículas alargadas utilizando la plantilla adecuada.
9. **Conteo de Partículas:** Se lleva un registro del número de partículas clasificadas en cada categoría (chatas, planas y alargadas). Estos conteos se registran como N_c (número de partículas chatas), N_p (número de partículas planas) y N_a (número de partículas alargadas).
10. **Cálculo del Porcentaje:** Se calcula el porcentaje de cada tipo de partícula en relación con el número total de partículas (N_t) utilizando las siguientes fórmulas:

$$\% \text{ de partículas} = \frac{\text{numero de partículas}}{\text{numero total de partículas}} * 100$$

Resultados de la práctica Índice de Alargamiento

Para la Grava

Tabla 24. Resultados del Índice de alargamiento (Grava).

| Tamiz | Peso Retenido (gr) (Ri) | % retenido | Peso de partículas retenidas (gr) | Índice de alargamiento % (IAi) |
|-------------|-------------------------|------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| 1 1/2" - 1" | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| 1" - 3/4" | 1364,00 | 27,29 | 0,00 | 0,00 |
| 3/4" - 1/2" | 3149,30 | 63,00 | 238,00 | 7,56 |
| 1/2" - 3/8" | 444,10 | 8,88 | 16,70 | 3,76 |
| 3/8" - 1/4" | 41,50 | 0,83 | 30,80 | 74,22 |
| Base | 0 | 0,00 | - | - |
| Peso total | 4998,90 | 100,00 | 285,50 | - |

| | | |
|--|------|---|
| Índice de alargamiento global % (IA) = | 5,71 | % |
|--|------|---|

Fuente: Elaboración propia

Para la Gravilla

Tabla 25. Resultados del Índice de alargamiento (Gravilla).

| Tamiz | Peso Retenido (gr) (Ri) | % retenido | Peso de partículas retenidas (gr) | Índice de alargamiento % (IAi) |
|-------------|-------------------------|------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| 1 1/2" - 1" | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| 1" - 3/4" | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 3/4" - 1/2" | 6,70 | 0,13 | 0,00 | 0,00 |
| 1/2" - 3/8" | 164,00 | 3,28 | 15,60 | 9,51 |
| 3/8" - 1/4" | 1852,70 | 37,06 | 119,25 | 6,44 |
| Base | 976,3 | 19,53 | - | - |
| Peso total | 2999,70 | 60,01 | 134,85 | - |

| | | |
|--|------|---|
| Indice de alargamiento global % (IA) = | 4,50 | % |
|--|------|---|

Fuente: Elaboración propia

3.4.7 Ensayo equivalente de arena en agregado fino (ASTM D2419-14)

De acuerdo con ASTM (2014) haciendo referencia al método de ensayo determina: El equivalente de arena se denomina a todas aquellas partículas de diámetro menor a 0.002mm que se encuentran adheridos al agregado fino. El objetivo de este ensayo es determinar la proporción de finos con características plásticas y polvo de suelo granular. Este ensayo se realiza para los agregados finos; aquella porción pasante del tamiz No. 4 (4.75mm).

1. **Preparación de la Muestra:** Se selecciona una muestra representativa de agregado fino, que debe estar limpia y libre de impurezas. Generalmente, se requiere un peso de aproximadamente 500 gramos.
2. **Equipamiento Necesario:** Se prepara el equipo necesario, que incluye un cilindro graduado de 1 litro, un agitador, un tamiz de 0.075 mm (No. 200), y una balanza de precisión.
3. **Tamizado de la Muestra:** Se tamiza la muestra de agregado fino a través del tamiz de 0.075 mm para eliminar las partículas más finas. Se registra el peso de la fracción retenida.
4. **Preparación de la Solución:** Se prepara una solución de agua y un reactivo (generalmente, una solución de cloruro de sodio o un equivalente) en el cilindro graduado. La cantidad de reactivo debe ser suficiente para permitir que las partículas se suspendan adecuadamente.
5. **Adición de la Muestra:** Se coloca la muestra de agregado fino en el cilindro graduado que contiene la solución preparada. Se agita el contenido del cilindro para asegurar una mezcla uniforme.
6. **Dejar Reposar:** Se deja reposar la mezcla durante un período específico (generalmente 20 minutos) para permitir que las partículas se sedimenten.
7. **Medición del Nivel de Sedimento:** Después del tiempo de reposo, se mide el nivel de sedimento en el cilindro graduado. Este nivel se registra como H_s (altura del sedimento).
8. **Cálculo del Equivalente de Arena:** Se calcula el equivalente de arena utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Equivalente de Arena} = \frac{\text{lectura de nivel superior } (H_1)}{\text{lectura de nivel inferior } (H_2)} * 100$$

Figura 23. Procedimiento para determinar el equivalente de arena en agregado fino



Fuente: Elaboración propia

Ecuación para el porcentaje de Equivalente de Arena.

$$\text{Equivalente de Arena} = \frac{\text{lectura de nivel superior } (H_1)}{\text{lectura de nivel inferior } (H_2)} * 100$$

Resultados de la práctica

Tabla 26. Resultados del porcentaje de Equivalente de Arena.

| N° de Muestra | H1 | H2 | Equivalente de Arena (%) |
|---------------|------|-----------------|--------------------------|
| | (cm) | (cm) | |
| 1 | 9,80 | 9,80 | 100,00 |
| 2 | 8,70 | 9,40 | 92,55 |
| 3 | 9,60 | 9,80 | 97,96 |
| | | Promedio | 96,84 |

| Equivalente de Arena (%) | NORMA |
|--------------------------|-------|
| 96.84 | > 90% |

Fuente: Norma ASTM D-2419.

3.5 Caracterización del Cemento Asfáltico

3.5.1 Ensayo de ductilidad (ASTM D113-17)

Este método de prueba describe el procedimiento para determinar la ductilidad de un material de asfalto medido por la distancia a la que se alargará antes de romperse cuando dos extremos de una muestra de briquetas del material se separan a una velocidad especificada y a una temperatura especificada. El ensayo se realizará a una temperatura de 25 ± 0.5 ° C [77 ± 0.9 ° F] y con una velocidad de 5 cm / min $\pm 5.0\%$. A otras temperaturas, se debe especificar la velocidad.

1. **Preparación de la Muestra:** Se selecciona una muestra representativa del material a evaluar, como asfalto o betún. La muestra debe estar limpia y libre de impurezas.
2. **Calentamiento de la Muestra:** La muestra se calienta a una temperatura específica (generalmente entre 60 °C y 70 °C) hasta que se vuelva fluida y se pueda verter en el molde.
3. **Vertido en el Molde:** Se vierte la muestra caliente en un molde de ductilidad, asegurándose de que el molde esté nivelado y lleno adecuadamente.
4. **Enfriamiento:** Se deja enfriar la muestra en el molde a temperatura ambiente durante un tiempo determinado para que se endurezca.
5. **Colocación en la Máquina de Ductilidad:** Una vez que la muestra está completamente fría y sólida, se retira del molde y se coloca en la máquina de ductilidad.
6. **Ajuste de la Máquina:** Se ajusta la máquina para que las dos partes de la muestra estén sujetas y se separen a una velocidad constante (generalmente 5 cm/min).
7. **Realización de la Prueba:** Se inicia la prueba y se registra la distancia que se extiende la muestra antes de romperse. La máquina continúa separando las partes de la muestra hasta que ocurre la ruptura.

Figura 24. Moldes y equipo para medir la ductilidad del asfalto.



Fuente: Elaboración propia

Resultados de la práctica

Tabla 27. Resultados del ensayo de Ductilidad.

| Ensayo | Unidad | Ensayo 1 | Ensayo 2 | Ensayo 3 | Promedio | Especificaciones | |
|-------------------|--------|----------|----------|----------|----------|------------------|--------|
| | | | | | | Mínimo | Máximo |
| Ductilidad a 25°C | cm | 104 | 101 | 107 | 104 | >100 | - |

Fuente: Elaboración propia

3.5.2 Ensayo para la determinación del punto de ablandamiento (ASTM D36)

También conocido como el ensayo del anillo y bola, el resultado de este ensayo nos permite determinar dos cosas; asegura la uniformidad del asfalto durante su transporte, indicador de su tendencia al flujo en bajas temperaturas.

1. **Preparación de la Muestra:** Se selecciona una muestra representativa del material, como asfalto o betún, asegurándose de que esté libre de impurezas y contaminantes.
2. **Calentamiento de la Muestra:** La muestra se calienta a una temperatura específica (generalmente entre 60 °C y 70 °C) hasta que se vuelva fluida y se pueda verter en el molde.
3. **Vertido en el Molde:** Se vierte la muestra caliente en un molde de punto de ablandamiento, llenándolo hasta el borde y asegurándose de que no queden burbujas de aire.

4. **Enfriamiento:** Se deja enfriar la muestra en el molde a temperatura ambiente durante un tiempo determinado para que se endurezca adecuadamente.
5. **Colocación en el Equipo de Prueba:** Una vez que la muestra está completamente fría y sólida, se coloca el molde en el equipo de prueba diseñado para medir el punto de ablandamiento.
6. **Adición de Agua:** Se llena el recipiente de la máquina con agua destilada, asegurándose de que la temperatura del agua sea controlada y se mantenga constante.
7. **Calentamiento Controlado:** Se calienta el agua a una tasa constante (generalmente 5 °C por minuto) mientras se observa la muestra.
8. **Observación del Punto de Ablandamiento:** Se monitorea la muestra mientras se calienta. Se registra la temperatura en la que la muestra comienza a ablandarse y se deforma.
9. **Registro de Resultados:** Se anota la temperatura en la que la muestra se deforma y cae bajo su propio peso, lo que se considera el punto de ablandamiento.

Figura 25. Equipo para determinar el punto de ablandamiento del cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia

Resultados de la práctica

Tabla 28. Resultados del ensayo Punto de Ablandamiento.

| Ensayo | Unidad | Ensayo 1 | Ensayo 2 | Ensayo 3 | Promedio | Especificaciones | |
|------------------------|--------|----------|----------|----------|----------|------------------|--------|
| | | | | | | Mínimo | Máximo |
| Punto de Ablandamiento | °C | 48 | 47 | 49 | 48 | 43 | 53 |

Fuente: Elaboración propia

3.5.3 Ensayo de penetración (ASTM D5)

La consistencia de un cemento asfáltico se mide mediante el ensayo de penetración durante este ensayo se introduce una aguja de dimensiones específicas en una muestra de cemento asfáltico bajo una carga conocida a una temperatura fija durante un plazo de tiempo predeterminando.

1. **Preparación de la Muestra:** Se selecciona una muestra representativa del material, como asfalto o betún, asegurándose de que esté limpia y libre de contaminantes.
2. **Calentamiento de la Muestra:** La muestra se calienta a una temperatura específica (generalmente entre 60 °C y 70 °C) hasta que se vuelva fluida y se pueda verter en el molde.
3. **Vertido en el Molde:** Se vierte la muestra caliente en un molde de penetración, llenándolo hasta el borde y asegurándose de que no queden burbujas de aire.
4. **Enfriamiento:** Se deja enfriar la muestra en el molde a temperatura ambiente durante un tiempo determinado para que se endurezca adecuadamente.
5. **Colocación en la Máquina de Penetración:** Una vez que la muestra está completamente fría y sólida, se coloca el molde en la máquina de penetración, asegurándose de que esté nivelado.
6. **Ajuste de la Carga:** Se ajusta la carga del penetrómetro, que generalmente es de 100 gramos, y se coloca la aguja de penetración en la superficie de la muestra.

7. **Realización de la Prueba:** Se activa el mecanismo de la máquina, permitiendo que la aguja penetre en la muestra bajo la carga aplicada durante un tiempo específico (generalmente 5 segundos).
8. **Registro de la Penetración:** Se mide la profundidad de penetración de la aguja en milímetros y se registra el valor obtenido.
9. **Repetición de la Prueba:** Se repite el procedimiento en al menos dos muestras adicionales para asegurar la precisión de los resultados.

Figura 26. Proceso del ensayo de penetración.



Fuente: Elaboracion propia

Resultados de la práctica

Tabla 29. Resultados del ensayo de Penetración.

| Ensayo | | Unidad | Ensayo 1 | Ensayo 2 | Ensayo 3 | Promedio | Especificaciones | |
|--------------------|-------------|--------|----------|----------|----------|----------|------------------|--------|
| | | | | | | | Mínimo | Máximo |
| Penetración a 25°C | lectura N°1 | mm | 89 | 92 | 93 | 91 | 85 | 100 |
| | lectura N°2 | mm | 91 | 90 | 91 | | | |
| | lectura N°3 | mm | 90 | 93 | 94 | | | |
| | Promedio | mm | 90 | 92 | 93 | | | |

Fuente: Elaboración propia

3.5.4 Ensayo para determinar la densidad (ASTM D71-94 AASHTO T229-97)

La densidad relativa de un material bituminosos se define como la relación entre el peso de un volumen dado de una sustancia a 25°C y el peso de un volumen de agua a la misma temperatura.

Determinar el peso de los picnómetros y registrar el peso y designar a este dato la letra A después llenar los picnómetros con agua destilada para posteriormente sumergir totalmente en un vaso precipitado con agua destilada y dejar en baño maría por 30 minutos para calibrar después transcurrido el tiempo extraer los picnómetros secar superficialmente y pesar para designar con la letra B. Seguidamente verter el cemento asfáltico aproximadamente a $\frac{3}{4}$ del picnómetro y dejar que alcance la temperatura ambiente. Posteriormente pesar los picnómetros más las muestras designadas con la letra C. Después llenar los picnómetros con agua destilada y sumergir en la misma y dejar por 30 minutos para luego secar y pesar y obtener el último dato y designar con la letra D.

1. **Preparación de la Muestra:** Se selecciona una muestra representativa del material, como asfalto o betún, asegurándose de que esté limpia y libre de impurezas.
2. **Calentamiento de la Muestra:** La muestra se calienta a una temperatura específica (generalmente entre 60 °C y 70 °C) hasta que se vuelva fluida y se pueda verter en el recipiente de medición.
3. **Vertido en el Recipiente:** Se vierte la muestra caliente en un recipiente de medición de volumen conocido, llenándolo hasta el borde y evitando la formación de burbujas de aire.
4. **Enfriamiento:** Se deja enfriar la muestra en el recipiente a temperatura ambiente para que se solidifique adecuadamente.
5. **Pesado del Recipiente con la Muestra:** Una vez que la muestra está completamente fría y sólida, se pesa el recipiente junto con la muestra y se registra este peso como W_{total} .
6. **Pesado del Recipiente Vacío:** Se pesa el recipiente vacío y se registra este peso como $W_{vacío}$.
7. **Cálculo del Peso de la Muestra:** Se calcula el peso de la muestra restando el peso del recipiente vacío del peso total: $W_{muestra} = W_{total} - W_{vacío}$

8. **Cálculo de la Densidad:** Se calcula la densidad de la muestra utilizando la fórmula:

$$\rho_b = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)} * \rho_w$$

9. **Registro de Resultados:** Se anotan los resultados obtenidos, incluyendo el peso de la muestra y la densidad calculada

Ecuación para determinar la densidad del asfalto.

$$\rho_b = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)} * \rho_w$$

Donde:

A= Peso del picnómetro

B= Peso del picnómetro + agua

C= Peso del picnómetro + asfalto

D= Peso del picnómetro + agua + asfalto

ρ_w = Peso específico del agua

ρ_b = Peso específico del asfalto

Resultados de la práctica

Tabla 30. Resultados del ensayo de Densidad

| ENSAYO | UNIDAD | MUESTRAS | | | RESULTADO | ESPECIFICACIONES | |
|--|--------------------|----------|-------|-------|--------------|------------------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | | Mínimo | Máximo |
| Peso Específico a 25°C (AASHTO 7229-97) | | | | | | | |
| Peso Picnómetro | gr | 35,0 | 34,6 | 34,0 | 1,016 | 1 | 1,05 |
| Peso Picnómetro + Agua (25°C) | gr | 85,35 | 86,7 | 85,2 | | | |
| Peso Picnómetro + Muestra | gr | 67,1 | 69,1 | 67,1 | | | |
| Peso Picnómetro + Agua + Muestra | gr | 86,5 | 85,6 | 86,8 | | | |
| Peso Específico Promedio | gr/cm ³ | 1,034 | 0,966 | 1,048 | | | |

Fuente: Elaboración propia

3.5.5 Ensayo punto de inflamación mediante la copa de Cleveland (ASTM D1310)

El objetivo de esta práctica es determinar el punto de ignición mínimo del asfalto el cual representa las temperaturas críticas por medio de la copa abierta de Cleveland cuando se calienta un asfalto libera vapores que son combustibles el punto de inflamación es la temperatura a la cual puede ser calentado con seguridad un asfalto sin que se provoque la inflamación instantánea de los vapores liberados en presencia de una llana libre. El ensayo es el más usado para medir el punto de inflamación del cemento asfáltico es el vaso abierto de Cleveland que consiste en llamar un vaso de bronce con determinado volumen de asfalto y calentarlo con un aumento de temperatura normalizados pasa una llama instantánea sobre la superficie del asfalto a intervalos de tiempo estipulados el punto de inflamación es la temperatura a la cual se han desprendido suficientes volátiles como para provocar una inflamación. Este ensayo resulta necesario para fines prácticos de seguridad puesto que los resultados que arroja permiten conocer la temperatura a la cual el bitumen podría entrar en combustión.

1. **Preparación de la Muestra:** Se selecciona una muestra representativa del material, como un combustible líquido, asegurándose de que esté limpia y libre de contaminantes.
2. **Calentamiento de la Muestra:** La muestra se calienta a una temperatura controlada, generalmente alrededor de 25 °C, para asegurar que esté en estado líquido.
3. **Llenado de la Copa:** Se vierte la muestra en la copa de Cleveland hasta alcanzar el nivel indicado, asegurándose de no sobrepasar la marca de llenado.
4. **Colocación de la Tapa:** Se coloca la tapa de la copa de Cleveland, asegurándose de que esté bien ajustada para evitar la pérdida de vapores.
5. **Configuración del Equipo de Calentamiento:** Se coloca la copa en el equipo de calentamiento, que debe estar equipado con un termómetro para medir la temperatura de la muestra.
6. **Calentamiento Controlado:** Se calienta la muestra a una tasa constante, generalmente a razón de 5 °C por minuto, mientras se monitorea la temperatura.

7. **Prueba de Inflamación:** A intervalos regulares, se utiliza un dispositivo de ignición (como una llama) para probar si se produce inflamación. Esto se hace abriendo la tapa de la copa y acercando la llama a la superficie de la muestra.
8. **Registro de la Temperatura de Inflamación:** Se anota la temperatura en la que se observa la inflamación, que se considera el punto de inflamación del material.
9. **Repetición del Ensayo:** Se recomienda realizar el ensayo en al menos dos muestras adicionales para asegurar la precisión y consistencia de los resultados.

Figura 27. Copa de Cleveland con cemento asfáltico a ensayar.



Fuente: Elaboración propia

Resultados de la práctica

Tabla 31. Resultados del ensayo Punto de Inflamación.

| Ensayo | Unidad | Ensayo 1 | Ensayo 2 | Ensayo 3 | Promedio | Especificaciones | |
|----------------------|--------|----------|----------|----------|----------|------------------|--------|
| | | | | | | Mínimo | Máximo |
| Punto de Inflamación | °C | 270 | 282 | 275 | 276 | >232 | - |

Fuente: Elaboración propia

3.6 Resultados del levantamiento de la información

3.6.1 Resultados de la Caracterización de Agregados Pétreos

Tabla 32. Resultados de la caracterización de los Agregados.

| Ensayo | Agregado | Especificación | | Resultado | Astm |
|--|--------------|----------------|------|-------------------------|--------|
| | | Min. | Max. | | |
| Peso específico y absorción de agua en agregados gruesos | Grava 3/4 | - | - | 2.67 gr/cm ³ | C-127 |
| | Gravilla 3/8 | - | - | 2.62 gr/cm ³ | |
| Peso específico y absorción de agua en agregados finos | Arena | - | - | 2.65 gr/cm ³ | C-128 |
| Equivalente de arena | Arena | >50% | - | 96.19% | D-2419 |
| Porcentaje de cara fracturada | Grava 3/4 | 75% | - | 79.80% | D-5821 |
| | Gravilla 3/8 | 75% | - | 76.07% | |
| Determinación de partículas largas y chatas | Grava 3/4 | - | 10% | 5.71% | D-5821 |
| | Gravilla 3/8 | - | 10% | 4.21% | |
| Desgaste mediante máquina de los ángeles | Grava 3/4 | - | 40% | 22.40% | C-131 |
| | Gravilla 3/8 | - | 40% | 24.43% | |

Fuente: Elaboración propia

3.6.2 Resultados de la Caracterización del Cemento Asfáltico

Tabla 33. Resultados de la caracterización del Cemento Asfáltico.

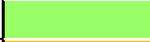
| ENSAYO | UNIDAD | MUESTRAS | | | RESULTADO | ESPECIFICACIONES | |
|--|--------|----------|-------|-------|--------------|------------------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | | Mínimo | Máximo |
| Penetración a 25°C, 100s. 5seg. (AASHTO T49-97) | | | | | | | |
| Lectura N°1 | 0,1 mm | 89 | 92 | 93 | 91 | 85 | 100 |
| Lectura N°2 | 0,1 mm | 91 | 90 | 91 | | | |
| Lectura N°3 | 0,1 mm | 90 | 93 | 94 | | | |
| Penetración Promedio | 0,1 mm | 90 | 92 | 93 | | | |
| Peso Específico a 25°C (AASHTO 7229-97) | | | | | | | |
| Peso Picnómetro | gr | 35,0 | 34,6 | 34,0 | 1,016 | 1 | 1,05 |
| Peso Picnómetro + Agua (25°C) | gr | 85,35 | 86,7 | 85,2 | | | |
| Peso Picnómetro + Muestra | gr | 67,1 | 69,1 | 67,1 | | | |
| Peso Picnómetro + Agua + Muestra | gr | 86,5 | 85,6 | 86,8 | | | |
| Peso Específico Promedio | gr/cm³ | 1,034 | 0,966 | 1,048 | | | |
| Punto de Inflamación (AASHTO T79-96) | °C | 270 | 282 | 275 | 276 | 232 | - |
| Punto de ablandamiento (AASHTO T53-96) | °C | 48,0 | 47,0 | 49,0 | 48 | 42 | 53 |
| Ductilidad a 25°C (AASHTO T51-00) | cm | 108 | 112 | 115 | 112 | 100 | - |
| Viscosidad Saybolt-Furol a 150°C | SFs | 169 | 175,0 | 177,0 | 173,7 | 85 | 400 |

Fuente: Elaboración propia

3.6.3 Curva de deterioro

A partir de los datos obtenidos en la tesis Evaluación superficial y estructural del estado de pavimento flexible en el tramo San Mateo-Sella Méndez/Subia Gallardo, Loyda Heidy se genera la siguiente curva de deterioro en función a los datos del PCI y vida útil del pavimento flexible.

Tabla 34. Rangos de calificación del PCI

| Rango | Clasificación | Simbología |
|----------|---------------|--|
| 100 – 85 | Excelente |  |
| 85 – 70 | Muy Bueno |  |
| 70 – 55 | Bueno |  |
| 55 – 40 | Regular |  |
| 40 – 25 | Malo |  |
| 25 – 10 | Muy Malo |  |
| 10 – 0 | Fallado |  |

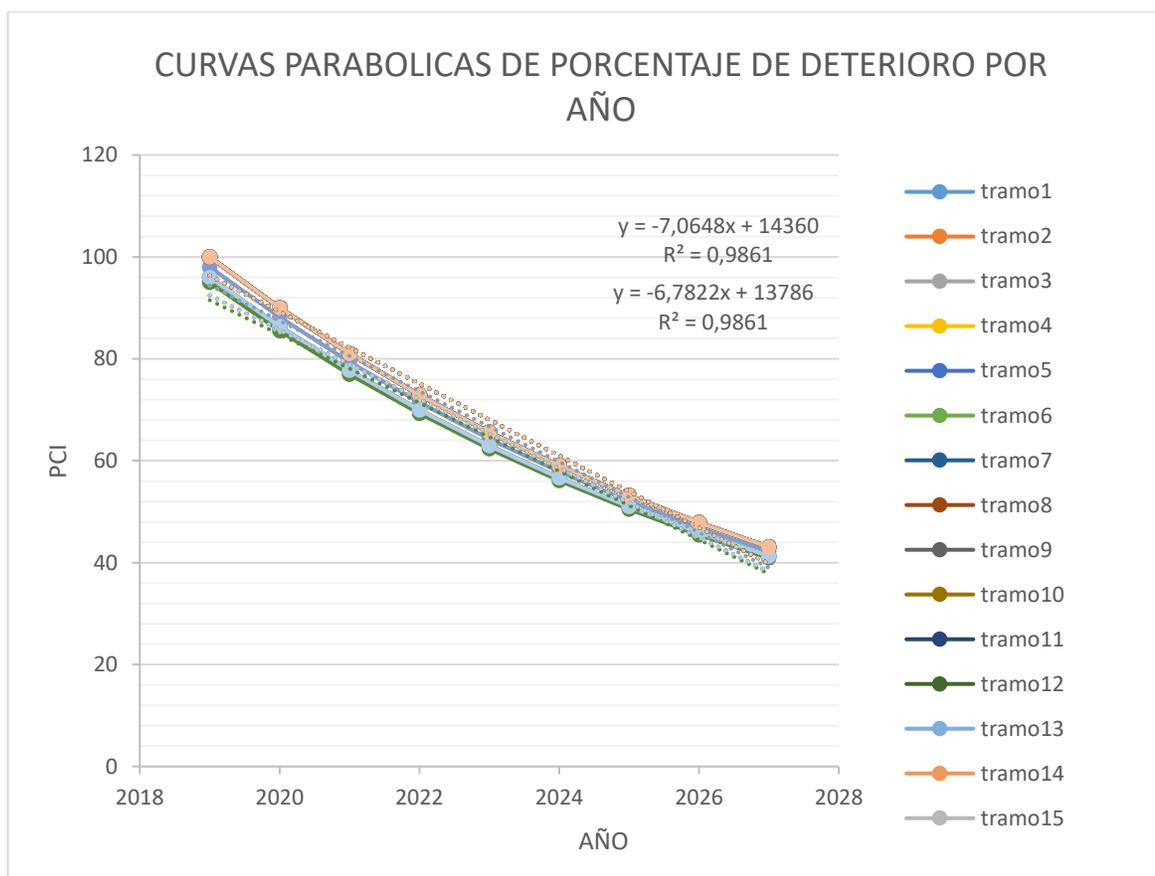
Fuente: Elaboración propia

Tabla 35. Curva de deterioro

| Descripción | Vida útil | | | | | | | | | | | | Estado |
|-------------|-----------|--------|-------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | critico 2023 | 2024 | critico 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | | |
| tramo1 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo2 | Excelente | 96,00 | 86,40 | 77,76 | 69,98 | 62,99 | 56,69 | 51,02 | 45,92 | 41,32 | 37,19 | 33,47 | Malo |
| tramo3 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo4 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo5 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo6 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo7 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo8 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo9 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo10 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo11 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo12 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo13 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo14 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo15 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo16 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo17 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo18 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo19 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo20 | Excelente | 96,00 | 86,40 | 77,76 | 69,98 | 62,99 | 56,69 | 51,02 | 45,92 | 41,32 | 37,19 | 33,47 | Malo |
| tramo21 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo22 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo23 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo24 | Excelente | 95,00 | 85,50 | 76,95 | 69,26 | 62,33 | 56,10 | 50,49 | 45,44 | 40,89 | 36,80 | 33,12 | Malo |
| tramo25 | Excelente | 96,00 | 86,40 | 77,76 | 69,98 | 62,99 | 56,69 | 51,02 | 45,92 | 41,32 | 37,19 | 33,47 | Malo |
| tramo26 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo27 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo28 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo29 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo30 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo31 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo32 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo33 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo34 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo35 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo36 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo37 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo38 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo39 | Excelente | 96,00 | 86,40 | 77,76 | 69,98 | 62,99 | 56,69 | 51,02 | 45,92 | 41,32 | 37,19 | 33,47 | Malo |
| tramo40 | Excelente | 98,00 | 88,20 | 79,38 | 71,44 | 64,30 | 57,87 | 52,08 | 46,87 | 42,19 | 37,97 | 34,17 | Malo |
| tramo41 | Excelente | 98,00 | 88,20 | 79,38 | 71,44 | 64,30 | 57,87 | 52,08 | 46,87 | 42,19 | 37,97 | 34,17 | Malo |
| tramo42 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo43 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo44 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo45 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo46 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo47 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |
| tramo48 | Excelente | 96,00 | 86,40 | 77,76 | 69,98 | 62,99 | 56,69 | 51,02 | 45,92 | 41,32 | 37,19 | 33,47 | Malo |
| tramo49 | Excelente | 96,00 | 86,40 | 77,76 | 69,98 | 62,99 | 56,69 | 51,02 | 45,92 | 41,32 | 37,19 | 33,47 | Malo |
| tramo50 | Excelente | 100,00 | 90,00 | 81,00 | 72,90 | 65,61 | 59,05 | 53,14 | 47,83 | 43,05 | 38,74 | 34,87 | Malo |

Fuente: Subia Loyda. 2018.

Figura 28. Curva de deterioro tramo San Mateo – Sella Mendez



Fuente: Fuente: Subia Loyda. 2018.

3.6.4 Diseño de mezcla asfáltica método Marshall

Tabla 36 Diseño de mezcla asfalto

| PESOS ESPECÍFICOS | | % de agregado |
|--------------------------|------|---------------|
| Mat. Retenido Tamiz N° 4 | 2,64 | 45,49 |
| Mat. Pasa Tamiz N° 4 | 2,65 | 54,51 |
| Peso Específico Total | 2,65 | 100 |

| | |
|--|--------|
| Número de golpes 75 | |
| Cemento asfáltico 85-100 | |
| Peso específico del ligante AASHTO t-228 | 1,0160 |

| Agregado | P.E. | % |
|-----------------|-------------|----------|
| Grava | 2,67 | 0,23 |
| Gravilla | 2,62 | 0,27 |
| Arena | 2,65 | 0,5 |
| Filler | 0,00 | 0 |

Fuente: Elaboración propia

Figura 29. Procedimiento Método Marshall



Fuente: Elaboración propia

Tabla 37. Planilla Marshall

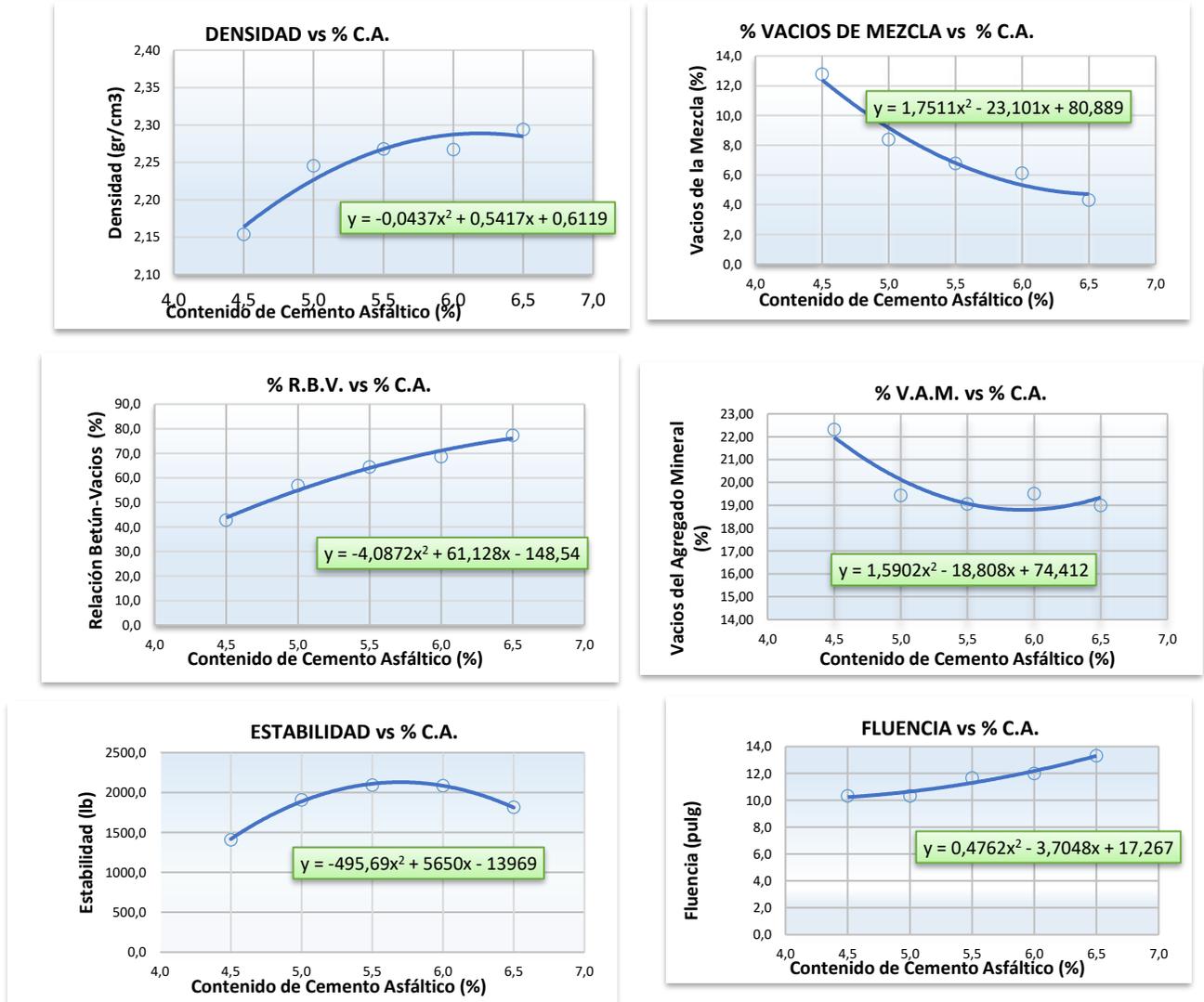
| N° de briqueta | Altura de briqueta cm | % de Asfalto | | Peso Briqueta | | | Volumen | Densidad Briqueta | | | % de Vacios | | | Estabilidad Marshall | | | | | Fluencia | |
|------------------|--------------------------|--------------|----------------|---------------|----------------|-------------------|----------|-------------------|-------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------|---------|----------------------|----------------------------|----------------------|------------------------|-------------------|
| | | Base Mezcla | Base Agregados | Seco | Sat. Sup. Seca | Sumergida en agua | Briqueta | Densidad real | Densidad promedio | Densidad maxima teorica | % de vacios mezcla total | V.A.M.(vacios aarezoado | R.B.V. (relacion betumen | Lectura del Dial | Carga | Factor de correccion | Estabilidad real corregida | Estabilidad promedio | Lectura dial del flujo | Fluencia promedio |
| | | % | % | grs. | grs. | grs. | cc | grs/cm3 | grs/cm3 | grs/cm3 | % | % | % | mm | libras | - | libras | libras | 0,01 pulg | 0,01 pulg |
| 1 | 6,65 | 4,50 | 4,71 | 1184 | 1187,0 | 665 | 522,5 | 2,27 | 2,15 | 2,47 | 12,74 | 22,28 | 42,82 | 1108 | 2965,40 | 0,93 | 2769,09 | 2554,90 | 12 | 10,33 |
| 2 | 6,67 | | | 1185,2 | 1188,4 | 585 | 603,4 | 1,96 | | | | | | 979 | 2618,03 | 0,93 | 2434,77 | | 10 | |
| 3 | 6,80 | | | 1194,1 | 1199,0 | 664 | 535,0 | 2,23 | | | | | | 1025 | 2741,90 | 0,90 | 2460,85 | | 9 | |
| 4 | 6,69 | 5,00 | 5,26 | 1186,3 | 1190,3 | 665 | 525,3 | 2,26 | 2,246 | 2,45 | 8,34 | 19,39 | 56,99 | 1079 | 2887,31 | 0,93 | 2670,76 | 2782,02 | 13 | 11,33 |
| 5 | 6,58 | | | 1154,5 | 1157,3 | 642 | 515,3 | 2,24 | | | | | | 1009 | 2698,81 | 0,95 | 2555,51 | | 11 | |
| 6 | 6,66 | | | 1180,4 | 1182,3 | 655 | 527,3 | 2,24 | | | | | | 1250 | 3347,78 | 0,93 | 3119,79 | | 10 | |
| 7 | 6,73 | 5,50 | 5,82 | 1196,7 | 1197,9 | 668 | 529,9 | 2,26 | 2,268 | 2,43 | 6,73 | 19,01 | 64,59 | 1109 | 2968,09 | 0,92 | 2715,81 | 2978,06 | 12 | 12,33 |
| 8 | 6,69 | | | 1190,9 | 1193,5 | 668 | 525,5 | 2,27 | | | | | | 1289 | 3452,80 | 0,93 | 3193,84 | | 15 | |
| 9 | 6,61 | | | 1182 | 1184,3 | 666 | 518,3 | 2,28 | | | | | | 1200 | 3213,14 | 0,94 | 3024,53 | | 10 | |
| 10 | 6,59 | 6,00 | 6,38 | 1183,6 | 1186,0 | 677 | 509,0 | 2,33 | 2,308 | 2,41 | 4,39 | 18,02 | 75,64 | 1252 | 3353,16 | 0,95 | 3168,74 | 3092,14 | 11 | 12,67 |
| 11 | 6,78 | | | 1204,9 | 1207,3 | 676 | 531,3 | 2,27 | | | | | | 1300 | 3482,42 | 0,90 | 3142,88 | | 15 | |
| 12 | 6,76 | | | 1181,5 | 1185,8 | 679 | 506,7 | 2,33 | | | | | | 1220 | 3266,99 | 0,91 | 2964,80 | | 12 | |
| 13 | 6,55 | 6,50 | 6,95 | 1175,4 | 1177,6 | 665 | 512,6 | 2,29 | 2,294 | 2,40 | 4,27 | 18,95 | 77,46 | 1250 | 3347,78 | 0,95 | 3188,76 | 2938,85 | 13 | 13,33 |
| 14 | 6,43 | | | 1158,3 | 1160,3 | 659 | 501,3 | 2,31 | | | | | | 1127 | 3016,56 | 0,98 | 2956,23 | | 14 | |
| 15 | 6,76 | | | 1183,8 | 1186,3 | 667 | 519,3 | 2,28 | | | | | | 1100 | 2943,86 | 0,91 | 2671,55 | | 13 | |
| 16 | 6,69 | 7,00 | 7,53 | 1187,1 | 1188,5 | 655 | 533,5 | 2,23 | 2,210 | 2,38 | 7,11 | 22,34 | 68,16 | 698 | 1861,35 | 0,93 | 1721,75 | 2258,26 | 15 | 15,33 |
| 17 | 6,44 | | | 1162,7 | 1164,9 | 645 | 519,9 | 2,24 | | | | | | 1067 | 2855,00 | 0,98 | 2790,76 | | 16 | |
| 18 | 6,58 | | | 1173,9 | 1176,7 | 636 | 541,2 | 2,17 | | | | | | 894 | 2389,14 | 0,95 | 2262,28 | | 15 | |
| ESPECIFICACIONES | | | | minimo | | | | | | | 3 | 13 | 75 | | | | | | 1800 | 8 |
| | | | | maximo | | | | | | | 5 | - | 82 | | | | | | - | 16 |

| DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO | Ensayo | Valor de Diseño | % de C.A. |
|--|------------------------------------|-------------------|-------------|
| | Estabilidad Marshall (Lb) | 2101,599 | 5,80 |
| | Densidad máxima (gr/cm3) | 2,301 | 6,75 |
| | Vacios de la mezcla (%) | 6,510 | 4,00 |
| | % Porcentaje óptimo de C.A. | Promedio = | 5,51 |

Fuente: Elaboración propia

Fuente: Elaboración propia

Figura 30. Curvas método Marshall determinación del porcentaje óptimo de asfalto.



Fuente: Elaboración propia

3.6.5 Dosificación con refuerzo con fibra de vidrio

Tabla 38 Dosificación fibra de vidrio

| | |
|----------|------|
| Grava | 0,23 |
| Gravilla | 0,22 |
| Arena | 0,55 |

| | |
|-----------------------------|------|
| Peso Total de Briqueta (gr) | 1200 |
| Porcentaje de Briqueta (%) | 100% |

| % FIBRA | % DE CEMENTO ASFÁLTICO | | | |
|--------------------------------|------------------------|---------|---------|---------|
| | 0,02 | 0,04 | 0,06 | 0,08 |
| | 5,6% | 5,6% | 5,6% | 5,6% |
| Porcentaje de Agregado (%) | 94,4% | 94,4% | 94,4% | 94,4% |
| Peso de Cemento Asfáltico (gr) | 67,20 | 67,20 | 67,20 | 67,20 |
| GRAVA | 260,54 | 260,54 | 260,54 | 260,54 |
| GRAVILLA | 249,22 | 249,22 | 249,22 | 249,22 |
| ARENA | 600,38 | 577,73 | 555,07 | 532,42 |
| FIBRA | 22,66 | 45,31 | 67,97 | 90,62 |
| Peso total de la briqueta (gr) | 1200,00 | 1200,00 | 1200,00 | 1200,00 |

| PESOS ESPECÍFICOS | | % de agregado |
|--------------------------|------|---------------|
| Mat. Retenido Tamiz N° 4 | 2,64 | 45,49 |
| Mat. Pasa Tamiz N° 4 | 2,65 | 54,51 |
| Peso Específico Total | 2,65 | 100 |

| | |
|--|--------|
| NÚMERO DE GOLPES 75 | |
| CEMENTO ASFÁLTICO 85-100 | |
| PESO ESPECÍFICO DEL LIGANTE AASHTO T-228 | 1,0160 |

| Agregado | P.E. | % |
|----------|------|------|
| Grava | 2,67 | 0,23 |
| Gravilla | 2,62 | 0,27 |
| Arena | 2,65 | 0,5 |
| Filler | 0,00 | 0 |

Fuente: Elaboración propia

Figura 31. Briquetas fabricadas con refuerzo fibra de vidrio



Fuente: Elaboración propia

Tabla 39. Planilla Marshall

| N° de briqueta | Altura de briqueta | % de Asfalto | | Fibra de vidrio | Peso Briqueta | | | Volumen | Densidad Briqueta | | | % de Vacios | | | Estabilidad Marshall | | | | | Fluencia | | |
|------------------|--------------------|--------------|----------------|-----------------|---------------|----------------|-------------------|----------|-------------------|-------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------|---------|---|----------------------------|----------------------|------------------------|-------------------|----|
| | | Base Mezcla | Base Agregados | | Seco | Sat. Sup. Seca | Sumergida en agua | Briqueta | Densidad real | Densidad promedio | Densidad maxima teorica | % de vacios mezcla total | V.A.M. (vacios agregado mineral) | R.B.V. (relacion betumen vacios) | Lectura del Dial | Carga | Factor de correccion de altura de probeta | Estabilidad real corregida | Estabilidad promedio | Lectura dial del flujo | Fluencia promedio | |
| | cm | % | % | | grs. | grs. | grs. | cc | grs/cm3 | grs/cm3 | grs/cm3 | % | % | % | mm | libras | - | libras | libras | 0,01 pulg | 0,01 pulg | |
| 1 | 7,17 | | | | 1176,5 | 1185,4 | 675 | 510,4 | 2,31 | | | | | | 1108 | 2965,40 | 0,83 | 2453,87 | | 12 | | |
| 2 | 7,46 | 5,60 | 5,93 | 0,02 | 1181,3 | 1189,7 | 672 | 517,7 | 2,28 | 2,31 | 2,43 | 5,00 | 17,72 | 71,78 | 979 | 2618,03 | 0,00 | 2618,03 | 2604,60 | 10 | 10,33 | |
| 3 | 7,52 | | | | 1170,7 | 1179,5 | 678 | 501,5 | 2,33 | | | | | | 1025 | 2741,90 | 0,00 | 2741,90 | | 9 | | |
| 4 | 6,87 | | | | 1156,3 | 1162,2 | 672 | 490,2 | 2,36 | | | | | | 1079 | 2887,31 | 0,88 | 2548,05 | | 13 | | |
| 5 | 7,06 | 5,60 | 5,93 | 0,04 | 1137,4 | 1145,9 | 670 | 475,9 | 2,39 | 2,345 | 2,43 | 3,44 | 16,37 | 78,97 | 661 | 1761,72 | 0,85 | 1492,00 | 2036,90 | 14 | 12,33 | |
| 6 | 7,14 | | | | 1176,1 | 1185,5 | 671 | 514,5 | 2,29 | | | | | | 931 | 2488,78 | 0,83 | 2070,66 | | 10 | | |
| 7 | 7,12 | | | | 1185,3 | 1189,2 | 681 | 508,2 | 2,33 | | | | | | 1109 | 2968,09 | 0,84 | 2480,44 | | 12 | | |
| 8 | 7,16 | 5,60 | 5,93 | 0,06 | 1181,7 | 1190,0 | 682 | 508,0 | 2,33 | 2,351 | 2,43 | 3,19 | 16,15 | 80,26 | 1071 | 2865,77 | 0,83 | 2375,15 | 2368,23 | 15 | 12,33 | |
| 9 | 7,73 | | | | 1152,6 | 1164,3 | 683 | 481,3 | 2,39 | | | | | | 842 | 2249,12 | 0,00 | 2249,12 | | 10 | | |
| ESPECIFICACIONES | | | | | mínimo | | | | | | | | 3 | 13 | 75 | | | | | | 1800 | 8 |
| | | | | | máximo | | | | | | | | 5 | - | 82 | | | | | | - | 16 |

| DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO | Ensayo | | Valor de Diseño | % de C.A. |
|--|------------------------------------|--------|-------------------|-------------|
| | Estabilidad Marshall (Lb) | | 3047,086 | 5,68 |
| | Densidad (gr/cm3) | máxima | 2,301 | 5,93 |
| | fluencia | | 12,000 | 5,00 |
| | V.A.M. | | 5,274 | 5,27 |
| | R.B.V. | | 81,350 | 5,83 |
| | Vacíos de la mezcla (%) | | 4,000 | 5,90 |
| | % Porcentaje óptimo de C.A. | | Promedio = | 5,60 |

Fuente: Elaboración propia

3.6.5 Dosificación con refuerzo con aditivo

Tabla 40 Dosificación Aditivo

| | |
|----------|------|
| Grava | 0,23 |
| Gravilla | 0,22 |
| Arena | 0,55 |

| | |
|-----------------------------|------|
| Peso Total de Briqueta (gr) | 1200 |
| Porcentaje de Briqueta (%) | 100% |

| | % DE CEMENTO ASFÁLTICO | | | |
|--------------------------------|------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 |
| % ADITIVO | 5,6% | 5,6% | 5,6% | 5,6% |
| Porcentaje de Agregado (%) | 94,4% | 94,4% | 94,4% | 94,4% |
| Peso de Cemento Asfáltico (gr) | 67,20 | 67,20 | 67,20 | 67,20 |
| GRAVA | 260,54 | 260,54 | 260,54 | 260,54 |
| GRAVILLA | 249,22 | 249,22 | 249,22 | 249,22 |
| ARENA | 623,04 | 623,04 | 623,04 | 623,04 |
| ADITIVO | 56,64 | 67,97 | 79,30 | 90,62 |
| Peso total de la briqueta (gr) | 1200,00 | 1200,00 | 1200,00 | 1200,00 |

| PESOS ESPECÍFICOS | | % de agregado |
|--------------------------|------|----------------------|
| Mat. Retenido Tamiz N° 4 | 2,64 | 45,49 |
| Mat. Pasa Tamiz N° 4 | 2,65 | 54,51 |
| Peso Específico Total | 2,65 | 100 |

| | |
|--|--------|
| NÚMERO DE GOLPES 75 | |
| CEMENTO ASFÁLTICO 85-100 | |
| PESO ESPECÍFICO DEL LIGANTE AASHTO T-228 | 1,0160 |

| Agregado | P.E. | % |
|-----------------|-------------|----------|
| Grava | 2,67 | 0,23 |
| Gravilla | 2,62 | 0,27 |
| Arena | 2,65 | 0,5 |
| Filler | 0,00 | 0 |

Figura 32. Briquetas con refuerzo de aditivos



Fuente: Elaboración propia

Tabla 41. Planilla Marshall

| N° de briqueta | Altura de briqueta | % de Asfalto | | Fibra de vidrio | Peso Briqueta | | | Volumen | Densidad Briqueta | | | % de Vacios | | | Estabilidad Marshall | | | | Fluencia | | | |
|------------------|--------------------|--------------|----------------|-----------------|---------------|----------------|--------------|---------|-------------------|---------------|-------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------|----------------------------------|------------------|-------|-------------------------|----------------------------|----------------------|------------------------|-------------------|
| | | Base Mezcla | Base Agregados | | Seco | Sat. Sup. Seca | Sumergida en | | Briqueta | Densidad real | Densidad promedio | Densidad maxima teorica | % de vacios mezcla total | V.A.M.(vacios agregado | R.B.V. (relacion betumen vacios) | Lectura del Dial | Carga | Factor de correccion de | Estabilidad real corregida | Estabilidad promedio | Lectura dial del flujo | Fluencia promedio |
| | | cm | % | | % | grs. | grs. | | grs. | cc | grs/cm3 | grs/cm3 | grs/cm3 | % | % | % | mm | libras | - | libras | libras | 0,01 pulg |
| 1 | 6,75 | 5,60 | 5,93 | 0,02 | 1184,1 | 1190,4 | 652 | 538,4 | 2,20 | 2,27 | 2,43 | 6,51 | 19,03 | 65,77 | 730 | 1947,52 | 0,91 | 1772,25 | 1598,10 | 20 | 36,67 | |
| 2 | 6,66 | | | | 1171,6 | 1176,1 | 660 | 516,1 | 2,27 | | | | | | 485 | 1287,79 | 0,93 | 1287,79 | | 40 | | |
| 3 | 6,71 | | | | 1176,9 | 1181,6 | 679 | 502,6 | 2,34 | | | | | | 651 | 1734,25 | 0,92 | 1734,25 | | 50 | | |
| 4 | 6,67 | 5,60 | 5,93 | 0,04 | 1177 | 1179,6 | 685 | 494,6 | 2,38 | 2,298 | 2,43 | 5,38 | 18,05 | 70,17 | 801 | 2137,50 | 0,93 | 1987,87 | 933,64 | 30 | 36,67 | |
| 5 | 6,77 | | | | 1182,3 | 1186,7 | 665 | 521,7 | 2,27 | | | | | | 300 | 789,89 | 0,91 | 714,85 | | 55 | | |
| 6 | 7,14 | | | | 1210,2 | 1213,5 | 675 | 538,5 | 2,25 | | | | | | 51 | 118,03 | 0,83 | 98,20 | | 25 | | |
| 7 | 6,60 | 5,60 | 5,93 | 0,06 | 1167,6 | 1170,3 | 682 | 488,3 | 2,39 | 2,356 | 2,43 | 3,00 | 15,98 | 81,25 | 506 | 1344,34 | 0,94 | 1267,98 | 1901,83 | 20 | 23,33 | |
| 8 | 6,26 | | | | 1192,4 | 1195,8 | 683 | 512,8 | 2,33 | | | | | | 800 | 2137,10 | 1,02 | 2188,39 | | 40 | | |
| 9 | 7,73 | | | | 1152,6 | 1164,3 | 674 | 490,3 | 2,35 | | | | | | 842 | 2249,12 | 0,00 | 2249,12 | | 10 | | |
| ESPECIFICACIONES | | | | | mínimo | | | | | | | 3 | 13 | 75 | | | | | 1800 | 8 | | |
| | | | | | máximo | | | | | | | 5 | - | 82 | | | | | - | 16 | | |

Fuente: Elaboración propia

| DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO | Ensayo | Valor de Diseño | % de C.A. |
|--|------------------------------------|-------------------|-------------|
| | Estabilidad Marshall (Lb) | 3047,086 | 5,68 |
| | Densidad máxima (gr/cm3) | 2,301 | 5,93 |
| | fluencia | 12,000 | 5,00 |
| | V.A.M. | 5,274 | 5,27 |
| | R.B.V. | 81,350 | 5,83 |
| | Vacíos de la mezcla (%) | 4,000 | 5,90 |
| | % Porcentaje óptimo de C.A. | Promedio = | 5,60 |

Fuente: Elaboración propia

3.6.6 Refuerzo con geomalla triaxial

| PESOS ESPECÍFICOS | | % de agregado |
|--------------------------|------|---------------|
| Mat. Retenido Tamiz N° 4 | 2,64 | 45,49 |
| Mat. Pasa Tamiz N° 4 | 2,65 | 54,51 |
| Peso Específico Total | 2,65 | 100 |

| | |
|--|--------|
| Número de golpes 75 | |
| Cemento asfáltico 85-100 | |
| Peso específico del ligante aashto t-228 | 1,0160 |

| Agregado | P.E. | % |
|----------|------|------|
| Grava | 2,67 | 0,23 |
| Gravilla | 2,62 | 0,27 |
| Arena | 2,65 | 0,5 |
| Filler | 0,00 | 0 |

Figura 33. Briquetas de ensayo fabricadas con geomalla triaxial



Fuente : Elaboración propia

Tabla 42. Planilla Marshall

| N° de briqueta | Altura de briqueta | | % de Asfalto | GEOMALLA | Peso Briqueta | | | Volumen | Densidad Briqueta | | | % de Vacíos | | | Estabilidad Marshall | | | | |
|------------------|--------------------|----------------|--------------|----------|---------------|----------------|-------------------|----------|-------------------|-------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------|---------|---|----------------------------|----------------------|
| | Base Mezcla | Base Agregados | | | Seco | Sat. Sup. Seca | Sumergida en agua | Briqueta | Densidad real | Densidad promedio | Densidad máxima teórica | % de vacíos mezcla total | V.A.M.(vacíos agregado mineral) | R.B.V. (relación betumen vacíos) | Lectura del Dial | Carga | Factor de corrección de altura de probeta | Estabilidad real corregida | Estabilidad promedio |
| | cm | % | % | | grs. | grs. | grs. | cc | grs/cm3 | grs/cm3 | grs/cm3 | % | % | % | mm | libras | - | libras | libras |
| 1 | 6,65 | | | BAJA | 1173,6 | 1176,3 | 678 | 498,3 | 2,36 | 2,32 | 2,43 | 4,34 | 17,14 | 74,69 | 1268 | 3396,25 | 0,93 | 3171,42 | 3332,08 |
| 2 | 6,61 | 5,60 | 5,93 | | 1179,6 | 1180,5 | 671 | 509,5 | 2,32 | | | | | | 1270 | 3401,63 | 0,94 | 3401,63 | |
| 3 | 6,62 | | | | 1159,6 | 1164,4 | 660 | 504,4 | 2,30 | | | | | | 1278 | 3423,18 | 0,94 | 3423,18 | |
| 4 | 6,69 | 5,60 | 5,93 | MEDIA | 1191,3 | 1193,5 | 675 | 518,5 | 2,30 | 2,311 | 2,43 | 4,83 | 17,57 | 72,51 | 910 | 2432,23 | 0,93 | 2249,81 | 2032,76 |
| 5 | 6,75 | | | | 1188 | 1191,0 | 670 | 521,0 | 2,28 | | | | | | 745 | 1987,91 | 0,91 | 1809,00 | |
| 6 | 6,71 | | | | 1187,6 | 1189,1 | 685 | 504,1 | 2,36 | | | | | | 830 | 2216,80 | 0,92 | 2039,46 | |
| 7 | 6,62 | 5,60 | 5,93 | ALTA | 1187,7 | 1191,8 | 654 | 537,8 | 2,21 | 2,305 | 2,43 | 5,10 | 17,80 | 71,37 | 610 | 1624,39 | 0,94 | 1525,95 | 1468,04 |
| 8 | 6,84 | | | | 1195 | 1198,2 | 674 | 524,2 | 2,28 | | | | | | 610 | 1624,39 | 0,89 | 1442,62 | |
| 9 | 6,67 | | | | 1161,2 | 1164,1 | 686 | 478,6 | 2,43 | | | | | | 580 | 1543,60 | 0,93 | 1435,55 | |
| 10 | 6,78 | 6,00 | 6,38 | DOBLE | 1182,5 | 1184,4 | 685 | 499,4 | 2,37 | 2,31 | 2,41 | 4,48 | 18,10 | 75,24 | 1260 | 3374,71 | 0,90 | 3045,67 | 2500,24 |
| 11 | 6,68 | | | | 1188 | 1190,1 | 675 | 515,1 | 2,31 | | | | | | 860 | 2297,59 | 0,93 | 2131,01 | |
| 12 | 6,73 | | | | 1184,2 | 1187,7 | 660 | 527,7 | 2,24 | | | | | | 950 | 2539,94 | 0,92 | 2324,04 | |
| ESPECIFICACIONES | | | | | mínimo | | | | | | 3 | 13 | 75 | | | | 1800 | | |
| | | | | | máximo | | | | | | 5 | - | 82 | | | | - | | |

| DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO | Ensayo | Valor de Diseño | % de C.A. |
|--|---------------------------|-----------------|-----------|
| | Estabilidad Marshall (Lb) | 3047,086 | 5,68 |
| | Densidad máxima (gr/cm3) | 2,301 | 5,93 |
| | VAM | 5,274 | 5,27 |
| | RVB | 81,350 | 5,83 |
| | Vacíos de la mezcla (%) | 4,000 | 5,90 |

Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO IV

PROCESAMIENTO Y

VALIDACIÓN DE RESULTADOS

CAPITULO IV

PROCESAMIENTO Y VALIDACION DE RESULTADOS

4.1 Organización de resultados

Teniendo los resultados de las propiedades mecánicas de las briquetas con diseño de mezcla asfáltica densa caliente provenientes del ensayo Marshall, se realiza el análisis comportamiento estadístico.

4.2 Estadística Descriptiva

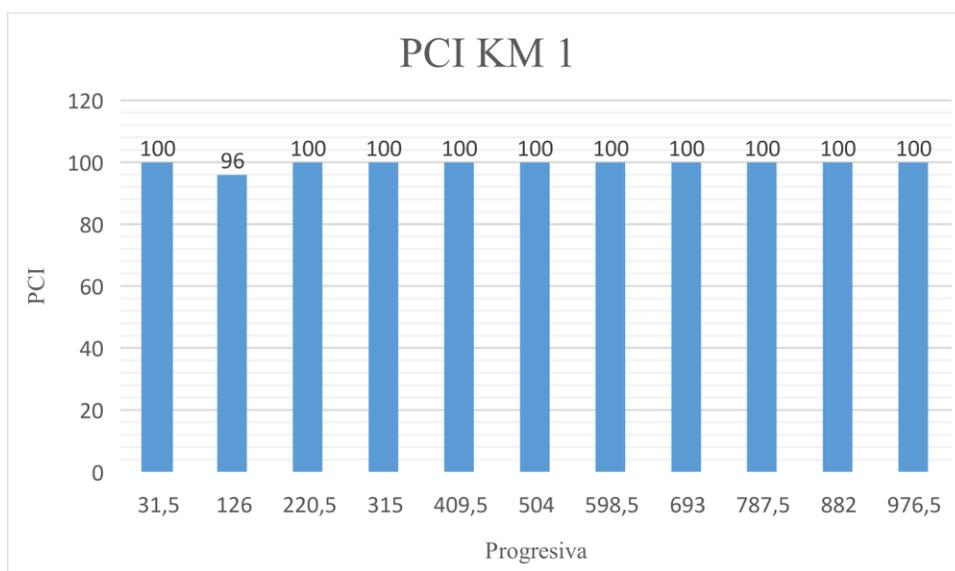
4.2.1 Resultados de la clasificación del PCI tesis .

TABLA N° 23. Resultados del Km 1.

| Progresiva | Tramo N° | Longitud | Ancho de vía | Área | PCI | Condición |
|------------|----------|----------|--------------|----------------|-----|-----------|
| | | m | m | m ² | | |
| 0+031,5 | 1 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 0+126 | 4 | 31,50 | 7,30 | 230 | 96 | Excelente |
| 0+220,5 | 7 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 0+315 | 10 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 0+409,5 | 13 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 0+504 | 16 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 0+598,5 | 19 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 0+693 | 22 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 0+787,5 | 25 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 0+882 | 28 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 0+976,5 | 31 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |

Fuente: Elaboración propia.

Figura 34. PCI vs progresiva del km 1



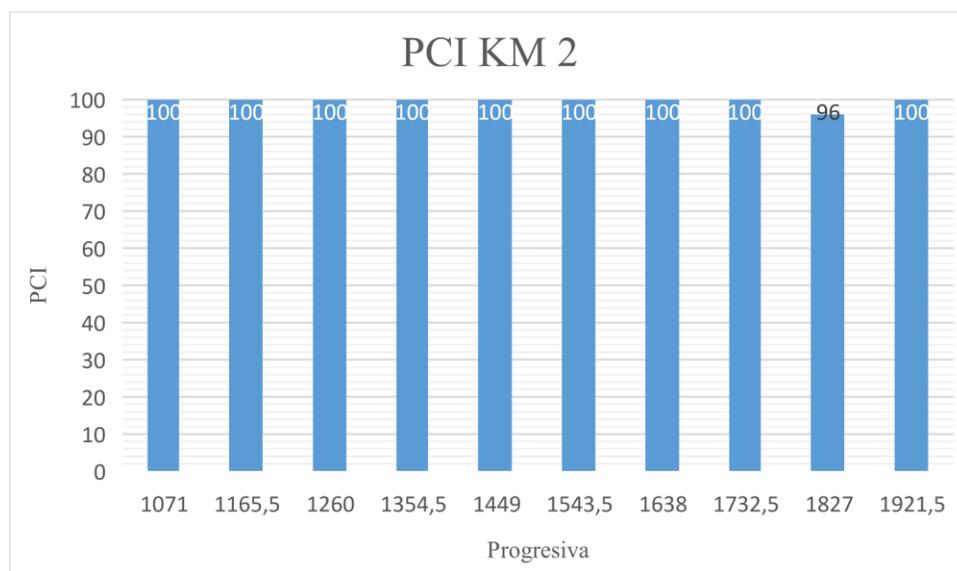
Fuente: Fuente: Subia Loyda. 2018.

TABLA N° 24. Resultados del Km 2.

| Progresiva | Tramo N° | Longitud | Ancho de vía | Área | PCI | Condición |
|------------|----------|----------|--------------|----------------|-----|-----------|
| | | m | m | m ² | | |
| 1+071 | 34 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 1+165,5 | 37 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 1+260 | 40 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 1+354,5 | 43 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 1+449 | 46 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 1+543,5 | 49 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 1+638 | 52 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 1+732,5 | 55 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 1+827 | 58 | 31,50 | 7,30 | 230 | 96 | Excelente |
| 1+921,5 | 61 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |

Fuente: Fuente: Subia Loyda. 2018.

Figura 35 PCI vs progresiva



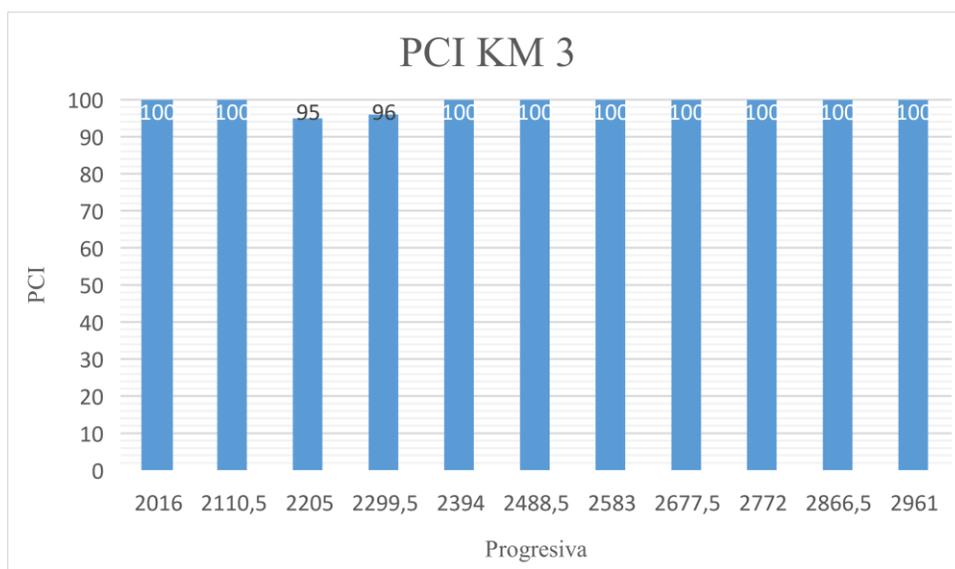
Fuente: Fuente: Subia Loyda. 2018.

TABLA N° 25. Resultados del Km 3.

| Progresiva | Tramo N° | Longitud | Ancho de vía | Área | PCI | Condición |
|------------|----------|----------|--------------|----------------|-----|-----------|
| | | m | m | m ² | | |
| 2+016 | 64 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 2+110,5 | 67 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 2+205 | 70 | 31,50 | 7,30 | 230 | 95 | Excelente |
| 2+299,5 | 73 | 31,50 | 7,30 | 230 | 96 | Excelente |
| 2+394 | 76 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 2+488,5 | 79 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 2+583 | 82 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 2+677,5 | 85 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 2+772 | 88 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 2+866,5 | 91 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 2+961 | 94 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |

Fuente: Fuente: Subia Leida. 2018.

Figura 36. PCI vs progresiva del km



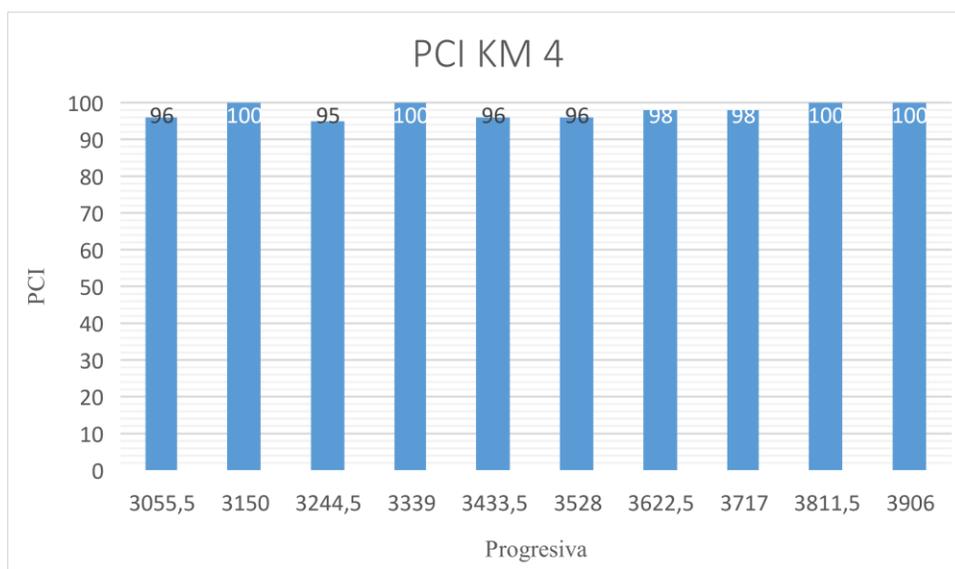
Fuente: Fuente: Subia Loyda. 2018.

TABLA N° 26. Resultados del Km 4.

| Progresiva | Tramo N° | Longitud | Ancho de vía | Área | PCI | Condición |
|------------|----------|----------|--------------|----------------|-----|-----------|
| | | m | m | m ² | | |
| 3+055,5 | 97 | 31,50 | 7,30 | 230 | 96 | Excelente |
| 3+150 | 100 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 3+244,5 | 103 | 31,50 | 7,30 | 230 | 95 | Excelente |
| 3+339 | 106 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 3+433,5 | 109 | 31,50 | 7,30 | 230 | 96 | Excelente |
| 3+528 | 112 | 31,50 | 7,30 | 230 | 96 | Excelente |
| 3+622,5 | 115 | 31,50 | 7,30 | 230 | 98 | Excelente |
| 3+717 | 118 | 31,50 | 7,30 | 230 | 98 | Excelente |
| 3+811,5 | 121 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 3+906 | 124 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |

Fuente: Fuente: Subia Loyda. 2018.

Figura 37. PCI vs progresiva del km 4.



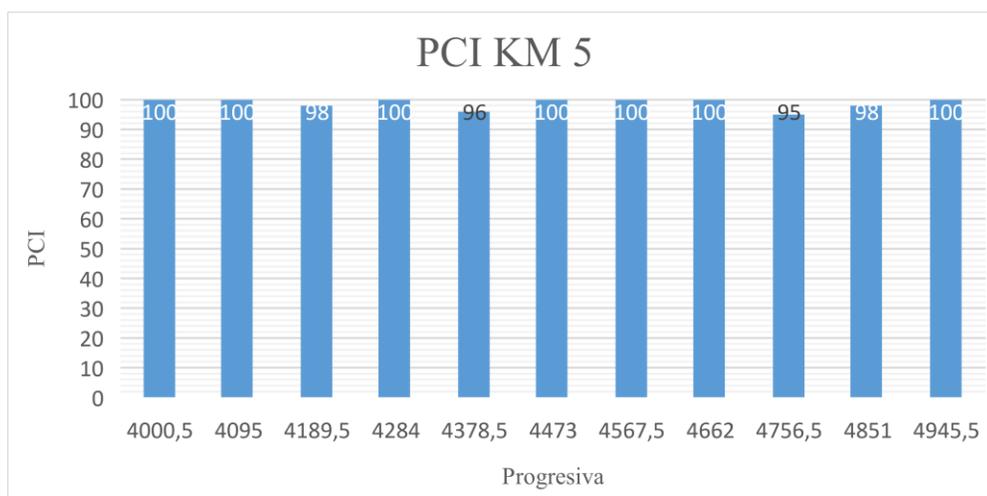
Fuente: Fuente: Subia Loyda. 2018.

TABLA N° 27. Resultados del Km 5.

| Progresiva | Tramo N° | Longitud | Ancho de vía | Área | PCI | Condición |
|------------|----------|----------|--------------|----------------|-----|-----------|
| | | m | m | m ² | | |
| 4+000,5 | 127 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 4+095 | 130 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 4+189,5 | 133 | 31,50 | 7,30 | 230 | 98 | Excelente |
| 4+284 | 136 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 4+378,5 | 139 | 31,50 | 7,30 | 230 | 96 | Excelente |
| 4+473 | 142 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 4+567,5 | 145 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 4+662 | 148 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 4+756,5 | 151 | 31,50 | 7,30 | 230 | 95 | Excelente |
| 4+851 | 154 | 31,50 | 7,30 | 230 | 98 | Excelente |
| 4+945,5 | 157 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |

Fuente: Fuente: Subia Loyda. 2018.

Figura 38. PCI vs progresiva del km



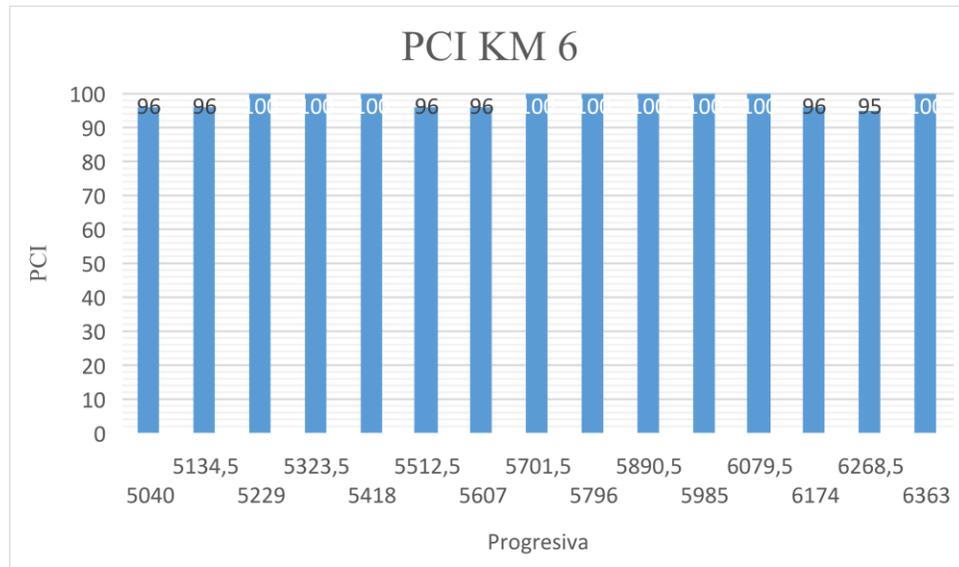
Fuente: Fuente: Subia Loyda. 2018.

TABLA N° 28. Resultados del Km 6.

| Progresiva | Tramo N° | Longitud | Ancho de vía | Área | PCI | Condición |
|------------|----------|----------|--------------|----------------|-----|-----------|
| | | m | m | m ² | | |
| 5+040 | 160 | 31,50 | 7,30 | 230 | 96 | Excelente |
| 5+134,5 | 163 | 31,50 | 7,30 | 230 | 96 | Excelente |
| 5+229 | 166 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 5+323,5 | 169 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 5+418 | 172 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 5+512,5 | 175 | 31,50 | 7,30 | 230 | 96 | Excelente |
| 5+607 | 178 | 31,50 | 7,30 | 230 | 96 | Excelente |
| 5+701,5 | 181 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 5+796 | 184 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 5+890,5 | 187 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 5+985 | 190 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 6+079,5 | 193 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |
| 6+174 | 196 | 31,50 | 7,30 | 230 | 96 | Excelente |
| 6+268,5 | 199 | 31,50 | 7,30 | 230 | 95 | Excelente |
| 6+363 | 202 | 31,50 | 7,30 | 230 | 100 | Excelente |

Fuente: Fuente: Subia Loyda. 2018.

Figura 39. PCI vs progresiva del km 6.



Fuente: Fuente: Subia Loyda. 2018.

4.2.2 Análisis de los resultados según la clasificación del PCI

Realizando el análisis según la calificación de PCI en los 6412 m de tramo se obtiene un valor de PCI de 98,88 en promedio de todo el tramo, dicho valor se encuentra calificado en una condición de pavimento EXCELENTE, notando que al relacionar las pequeñas fisuras que se encuentran en el pavimento en relación al área estudiada se vuelve casi despreciable por lo cual en la gran mayoría de los cálculos daba un PCI=100 y que al ser un pavimento nuevo se encuentra en excelente estado para transitar y no requiere reparación.

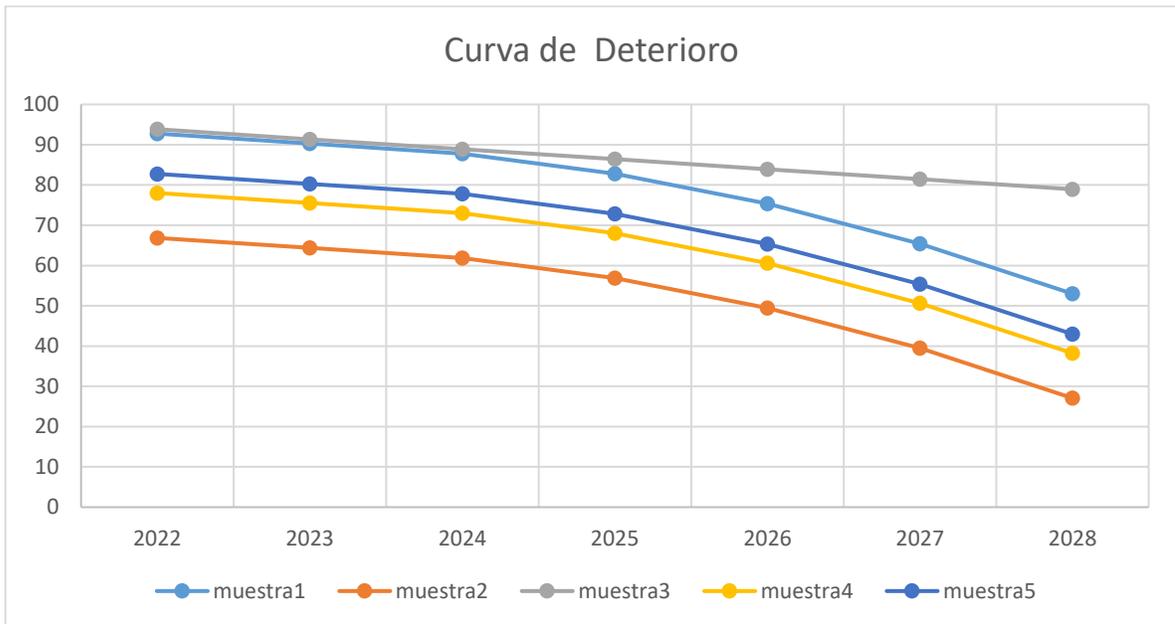
4.2.3 PCI control para validar datos

RANGOS DE CALIFICACIÓN DEL PCI

| Rango | Clasificación | Simbología |
|----------|---------------|------------|
| 100 – 85 | Excelente | |
| 85 – 70 | Muy Bueno | |
| 70 – 55 | Bueno | |
| 55 – 40 | Regular | |
| 40 – 25 | Malo | |
| 25 – 10 | Muy Malo | |
| 10 – 0 | Fallado | |

| TRAMOS DE IDA | | | |
|---------------|---------|------------|-----------|
| 1 | MAX CDV | 7,23333333 | |
| | PCI | 92,7666667 | Excelente |
| 2 | MAX CDV | 33,1448 | |
| | PCI | 66,8552 | Bueno |
| 3 | MAX CDV | 6,14950803 | |
| | PCI | 93,850492 | Excelente |
| 4 | MAX CDV | 22 | |
| | PCI | 78 | Muy bueno |
| 5 | MAX CDV | 17,25 | |
| | PCI | 82,75 | Muy bueno |

Figura 40 Curva de deterioro.



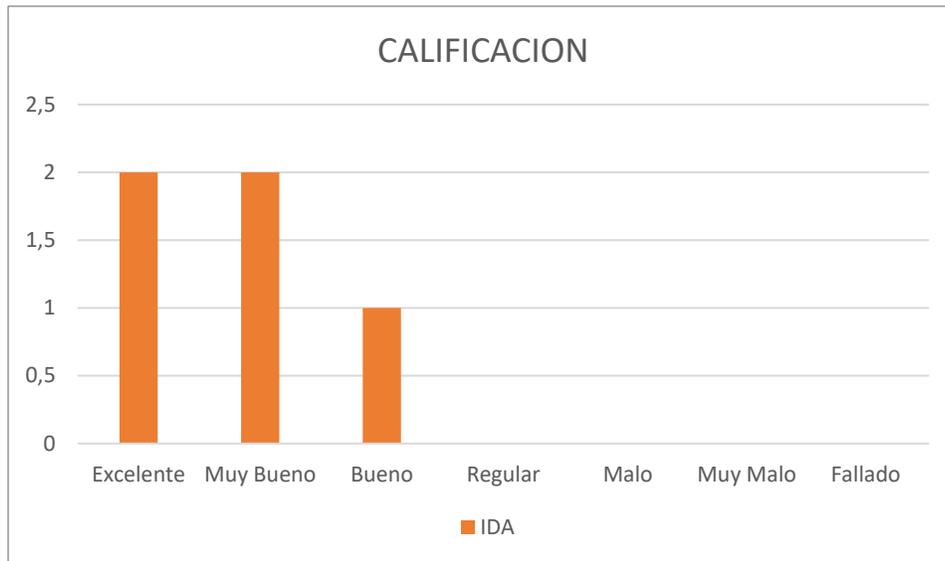
Esta imagen muestra la "Curva de Deterioro" para cinco diferentes muestras (muestra1, muestra2, muestra3, muestra4 y muestra5) a lo largo del tiempo desde el año 2022 hasta el 2028.

La curva de deterioro representa la disminución del valor o la calidad de algo a lo largo del tiempo. En este caso, se puede ver cómo el valor o la calidad de las diferentes muestras va disminuyendo progresivamente año tras año.

Cada línea de color representa una muestra diferente. Podemos observar que la muestra1 tiene el mejor desempeño y la menor tasa de deterioro, mientras que la muestra5 presenta la mayor tasa de deterioro a lo largo del tiempo.

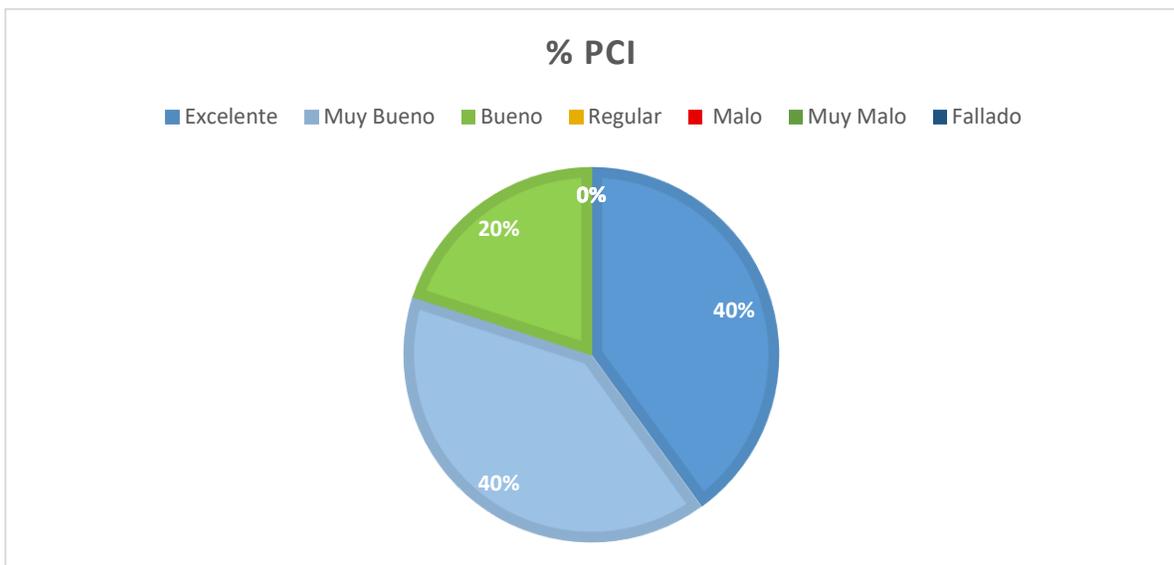
Esta gráfica puede ser útil para analizar y comparar el comportamiento y la durabilidad de diferentes muestras o elementos a lo largo del tiempo, lo cual puede ser relevante en diversos contextos como la ingeniería, la producción, el mantenimiento, entre otros.

Figura 41. PCI calificación



Fuente: Elaboración propia.

Figura 42. PCI porcentaje.



Fuente: Elaboración propia.

Esta imagen muestra un gráfico de pastel que representa la distribución de calificaciones o evaluaciones de un sistema o proceso denominado "PCI".

Las diferentes categorías de calificación son:

Excelente: 40%

Muy Bueno: 40%

Bueno: 20%

Regular: 0%

Malo: 0%

Muy Malo: 0%

Fallado: 0%

De acuerdo a los porcentajes mostrados, el 80% de las evaluaciones se encuentran en las categorías "Excelente" y "Muy Bueno", lo cual indica un buen desempeño general del sistema o proceso evaluado.

Se aprecia en las curvas obtenidas valores de PCI altos como ser excelente muy bueno y bueno, observando que para el año 2026 es oportuno mitigar el deterioro del pavimento flexible donde nos indica calificaciones bajas, para lo cual se realiza el análisis de mezclas asfálticas con refuerzo.

4.2.4 Para la Mezcla Densa Caliente fibra de vidrio

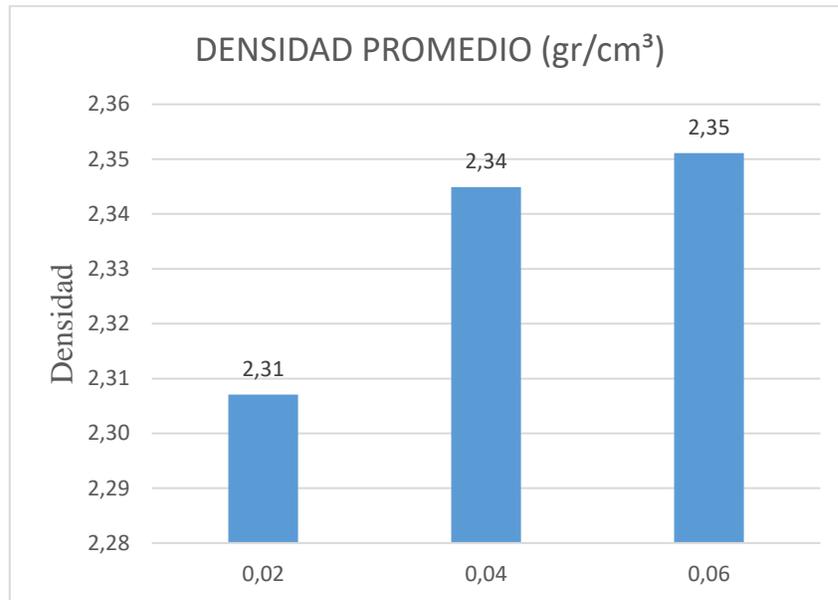
Datos de los valores observados para la mezcla densa caliente

Tabla 43. Estadística de resultados para la mezcla asfáltica con fibra de vidrio

| Briqueta | Altura de briqueta | Base Mezcla | Base Agregados | Fibra de vidrio | Densidad real | % de vacíos mezcla total | V.A.M.(vacíos agregado mineral) | R.B.V. (relación betumen vacíos) | Estabilidad real corregida | Estabilidad real corregida |
|----------|--------------------|-------------|----------------|-----------------|---------------|--------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1 | 7,17 | 5,60 | 5,93 | 0,02 | 2,31 | 5,00 | 17,72 | 71,78 | 2454 | 12 |
| 2 | 7,46 | | | | 2,28 | | | | 2618 | 10 |
| 3 | 7,52 | | | | 2,33 | | | | 2742 | 9 |
| 4 | 6,87 | 5,60 | 5,93 | 0,04 | 2,36 | 3,44 | 16,37 | 78,97 | 2548 | 13 |
| 5 | 7,06 | | | | 2,39 | | | | 1492 | 14 |
| 6 | 7,14 | | | | 2,29 | | | | 2071 | 10 |
| 7 | 7,12 | 5,60 | 5,93 | 0,06 | 2,33 | 3,19 | 16,15 | 80,26 | 2480 | 12 |
| 8 | 7,16 | | | | 2,33 | | | | 2375 | 15 |
| 9 | 7,73 | | | | 2,39 | | | | 2249 | 10 |

Fuente: Elaboración Propia

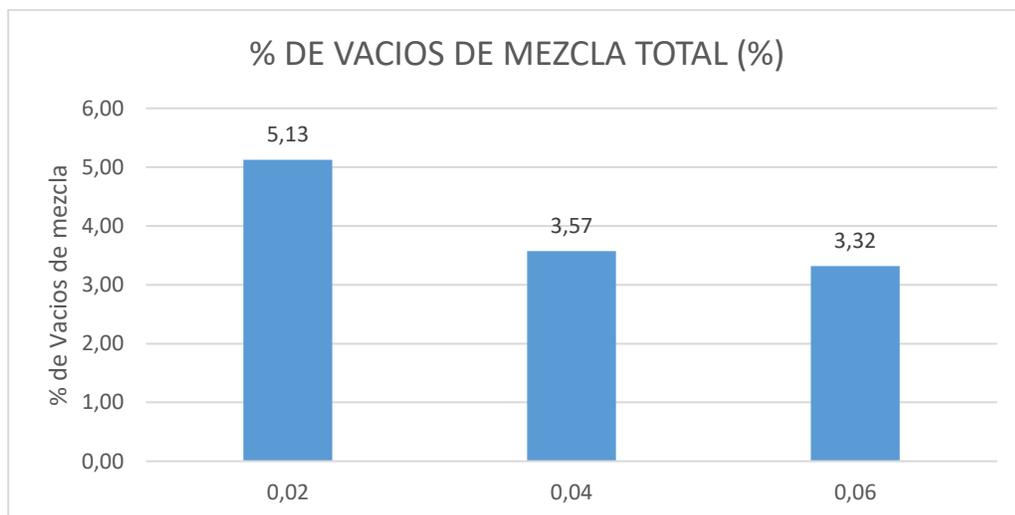
Figura 43. Densidad promedio-Refuerzo fibra de vidrio



Fuente: Elaboración propia

La densidad de la mezcla asfáltica de refuerzo con fibra de vidrio aumenta al incrementar el porcentaje de fibra.

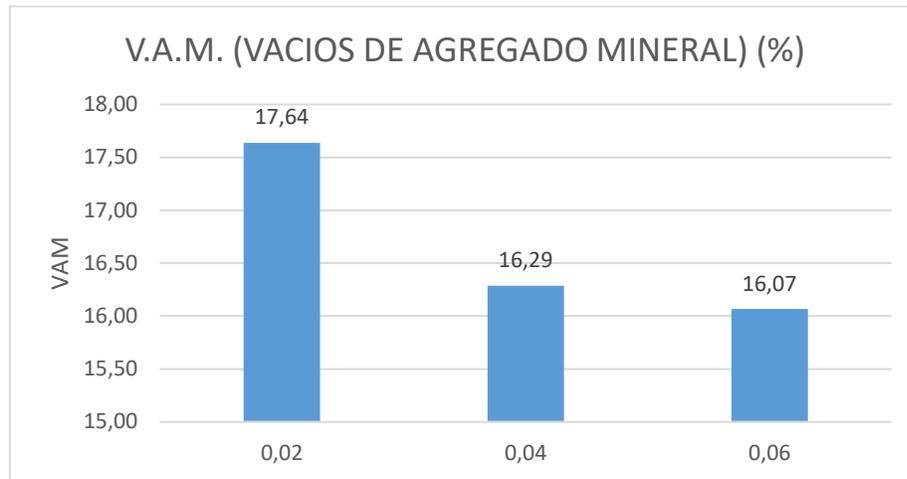
Figura 44. % de vacíos de mezcla total



Fuente: Elaboración propia

El porcentaje de vacíos de mezcla disminuye cuando se incrementa el porcentaje de fibra de vidrio

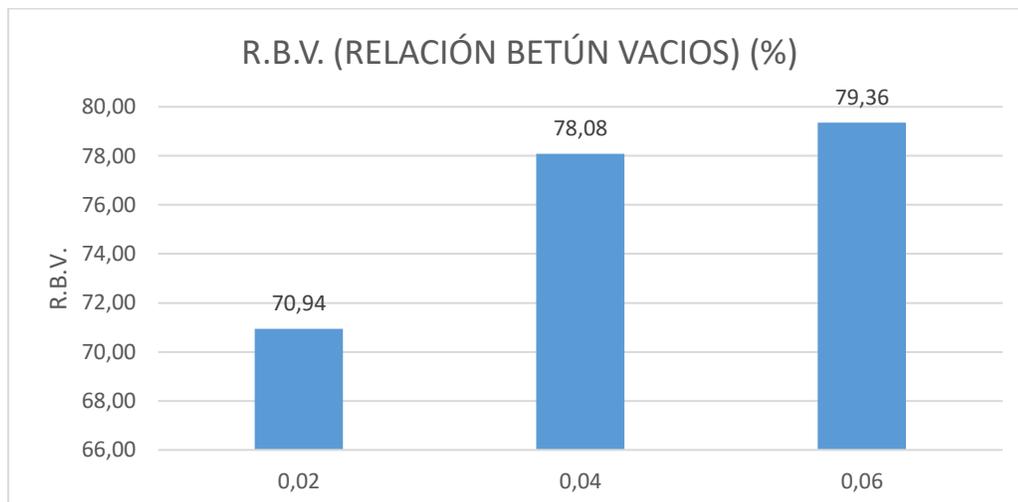
Figura 45. Vacíos de agregado mineral



Fuente: Elaboración propia

El porcentaje de vacíos de agregado mineral disminuye a medida que se aumenta el porcentaje de fibra de vidrio

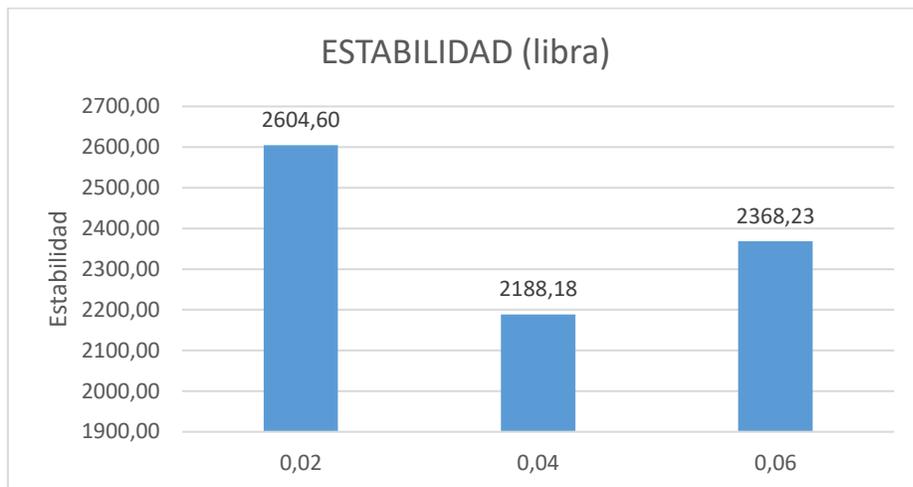
Figura 46. Relación betún vacíos



Fuente: Elaboración propia

El porcentaje de relación de Betun de vacíos incrementa a medida que se aumenta el porcentaje de fibra lo cual nos indica que si incorporamos más fibra la relación crece y se saldrá de los límites de especificación.

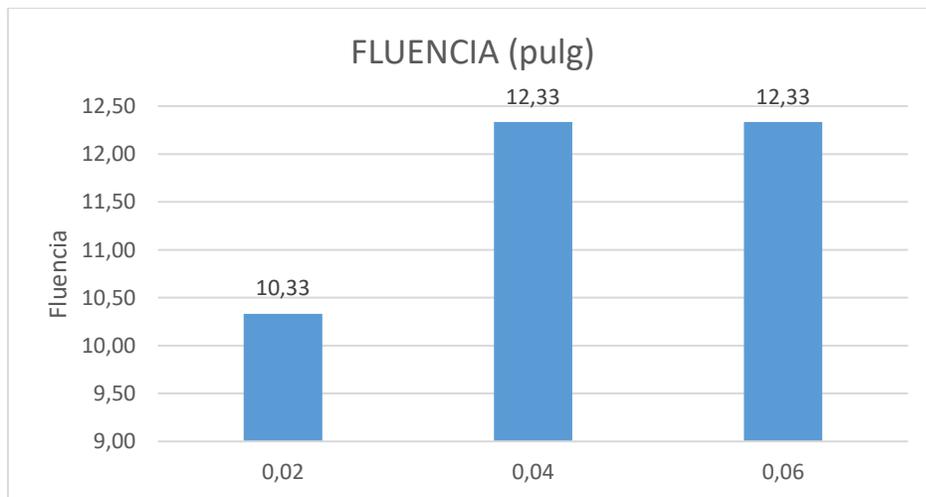
Figura 47. Estabilidad



Fuente: Elaboración propia

La estabilidad nos indica un quiebre de datos obtenidos indicándonos que la estabilidad mas alta la tiene el porcentaje de 0.02% de fibra y al incrementar la fibra se reduce la estabilidad la cual de igual manera está en los rangos promedios de diseño de mezcla.

Figura 48. Fluencia



Fuente: Elaboración propia

La fluencia actúa inversamente proporcional a la estabilidad, indicándonos que si aumentamos fibra de vidrio aumentara la fluencia.

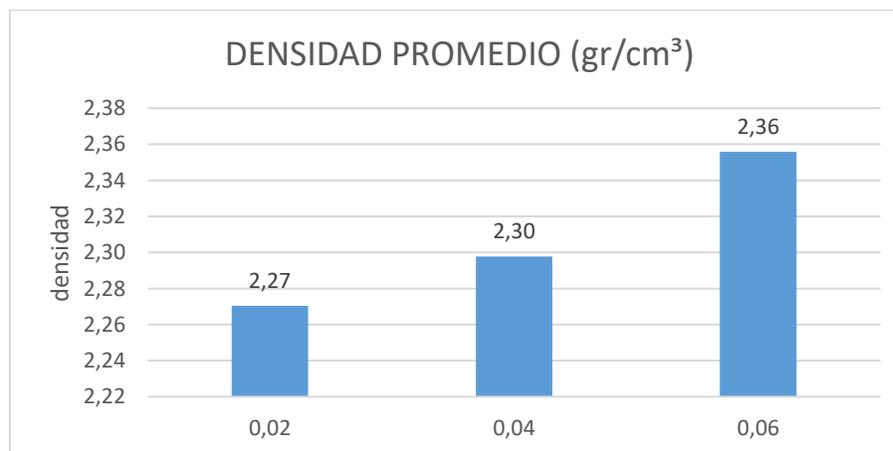
4.2.5 Refuerzo de mezcla asfáltica densa caliente con aditivo zycotherm

Tabla 44. Tabla de resultados Aditivo

| Briqueta | Altura de briqueta | Base Mezcla | Base Agregados | Aditivo | Densidad real | % de vacíos mezcla total | V.A.M.(vacíos agregado mineral) | R.B. V. (relación betumen vacíos) | Estabilidad real corregida | Estabilidad real corregida |
|----------|--------------------|-------------|----------------|---------|---------------|--------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1 | 6,75 | 5,60 | 5,93 | 0,02 | 2,20 | 6,51 | 19,03 | 65,77 | 1772 | 20 |
| 2 | 6,66 | | | | 2,27 | | | | 1288 | 40 |
| 3 | 6,71 | | | | 2,34 | | | | 1734 | 50 |
| 4 | 6,67 | 5,60 | 5,93 | 0,04 | 2,38 | 5,38 | 18,05 | 70,17 | 1988 | 30 |
| 5 | 6,77 | | | | 2,27 | | | | 715 | 55 |
| 6 | 7,14 | | | | 2,25 | | | | 98 | 25 |
| 7 | 6,60 | 5,60 | 5,93 | 0,06 | 2,39 | 3,00 | 15,98 | 81,25 | 1268 | 20 |
| 8 | 6,26 | | | | 2,33 | | | | 2188 | 40 |
| 9 | 7,73 | | | | 2,35 | | | | 2249 | 10 |

Fuente: Elaboración propia

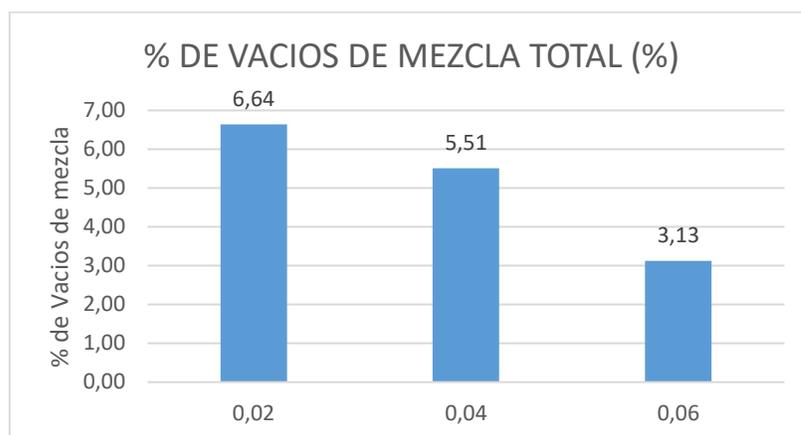
Figura 49. Densidad promedio



Fuente: Elaboración propia

La densidad aumenta a medida que el porcentaje de aditivo se incrementa, lo cual nos indica que el aditivo aumenta la densidad de la mezcla con una sinterización que se genera por la reducción de viscosidad

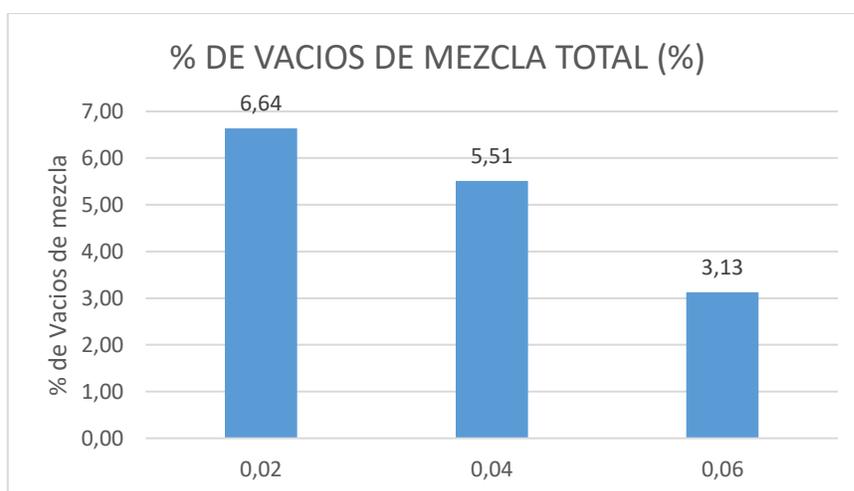
Figura 50. % de vacíos de mezcla total



Fuente: Elaboración propia

El porcentaje de vacíos de mezcla se reduce al tener mayor porcentaje de aditivo, teniendo relación con la densidad que a medida que aumenta la densidad se reduce el porcentaje de vacíos.

Figura 51. Vacíos de agregado mineral

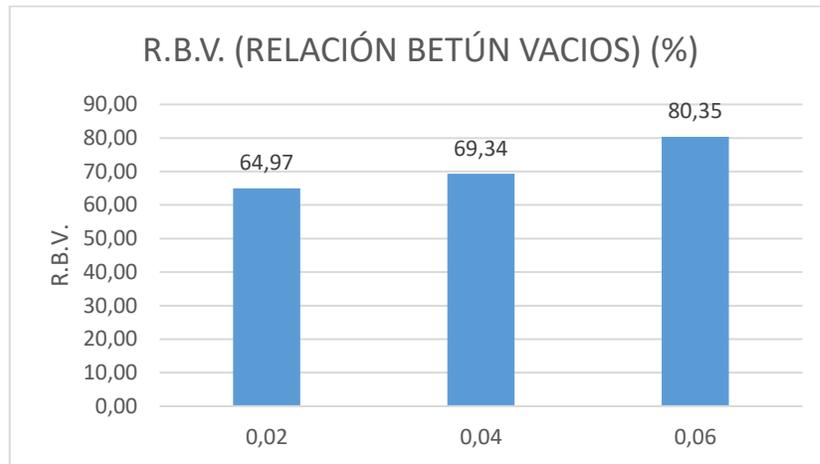


Fuente: Elaboración propia

El porcentaje de vacíos de agregado mineral en la mezcla asfáltica de refuerzo con aditivo reduce a mayor porcentaje de aditivo.

Figura 52.

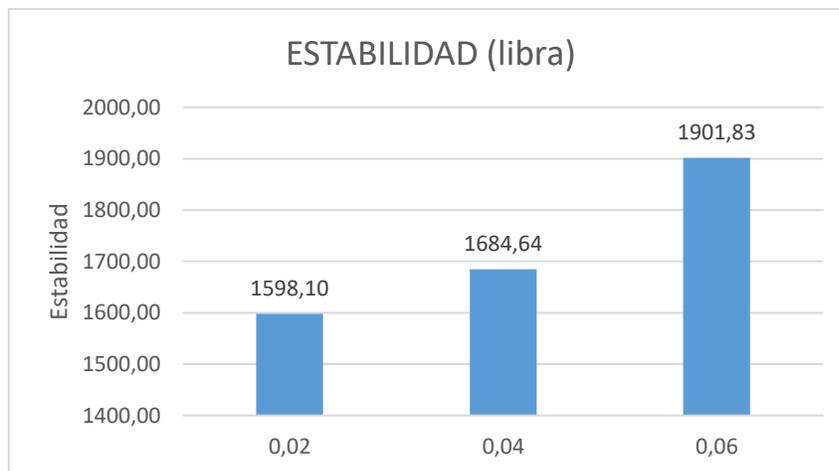
Figura 52. Relación vacíos -betún



Fuente: Elaboración propia

La relación de vacíos agregando aditivo aumenta con mayor porcentaje de aditivo por la densificación que se realiza en la mezcla asfáltica densa caliente de refuerzo

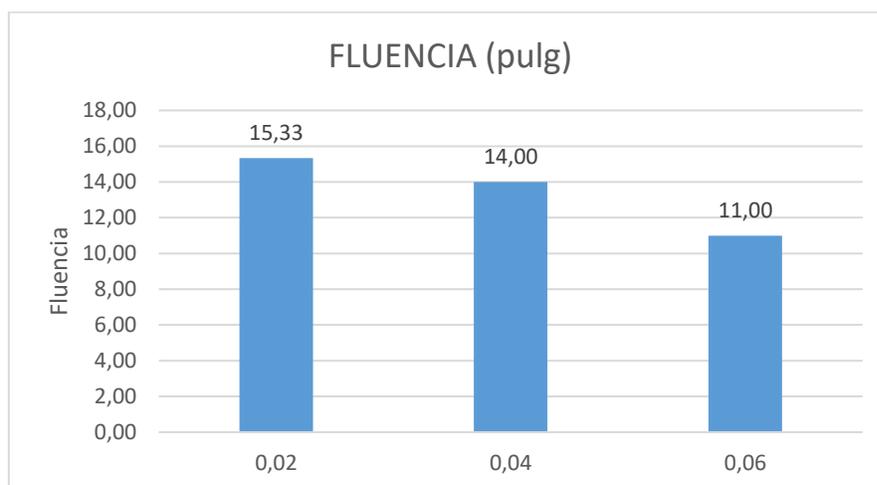
Figura 53. Estabilidad



Fuente: Elaboración propia

La estabilidad aumenta a mayor incremento de aditivo cumpliendo en todos sus porcentajes los límites de consistencia.

Figura 54. Fluencia



Fuente: Elaboración propia

La fluencia reduce a mayor incremento de porcentaje de aditivo esto es debido a que aumenta la estabilidad y se rigidiza la mezcla asfáltica

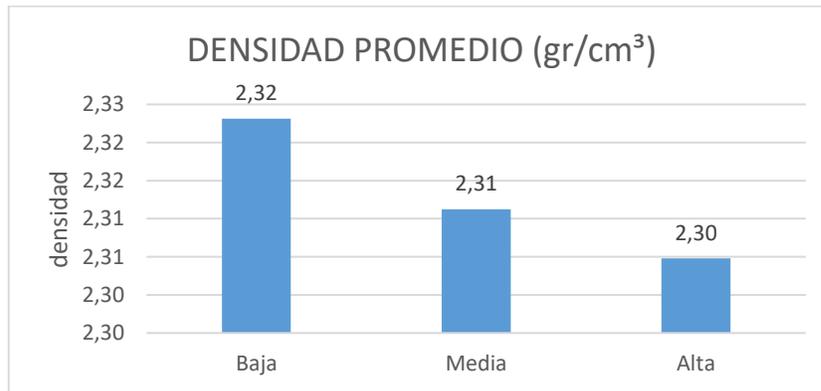
4.2.6 Resultados obtenidos de refuerzo con geomalla triaxial

Tabla 45. Resultados para la mezcla asfáltica con geomalla triaxial

| Briqueta | Altura de briqueta | Base Mezcla | Base Agregados | GEOMALLA | Densidad real | % de vacíos mezcla total | V.A.M.(vacíos agregado mineral) | R.B.V. (relacion betumen vacíos) | Estabilidad real corregida |
|----------|--------------------|-------------|----------------|----------|---------------|--------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| 1 | 6,65 | 5,60 | 5,93 | BAJA | 2,36 | 4,34 | 17,14 | 74,69 | 3171 |
| 2 | 6,61 | | | | 2,32 | | | | 3402 |
| 3 | 6,62 | | | | 2,30 | | | | 3423 |
| 4 | 6,69 | 5,60 | 5,93 | MEDIA | 2,30 | 4,83 | 17,57 | 72,51 | 2250 |
| 5 | 6,75 | | | | 2,28 | | | | 1809 |
| 6 | 6,71 | | | | 2,36 | | | | 2039 |
| 7 | 6,62 | 5,60 | 5,93 | ALTA | 2,21 | 5,10 | 17,80 | 71,37 | 1526 |
| 8 | 6,84 | | | | 2,28 | | | | 1443 |
| 9 | 6,67 | | | | 2,43 | | | | 1436 |

Fuente: Elaboración propia

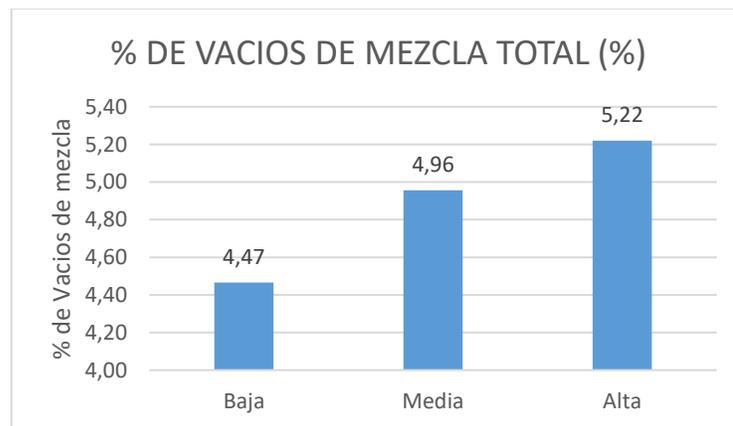
Figura 55. Densidad promedio



Fuente: Elaboración propia

La densidad reduce según la ubicación de la geomalla y de acuerdo a la cantidad de puntos de con geomalla.

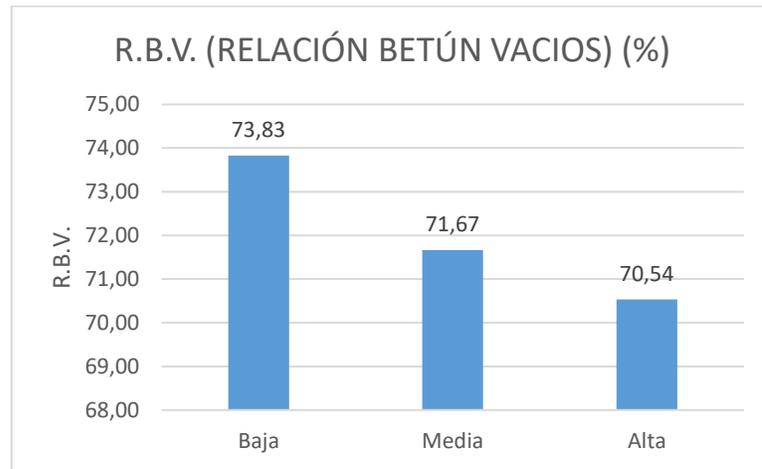
Figura 56. % de vacíos de mezcla total



Fuente: Elaboración propia

El porcentaje de vacíos incrementa por la ubicación y cantidad de geomalla en la mezcla asfáltica caliente densa de refuerzo debido al acomodo de las partículas.

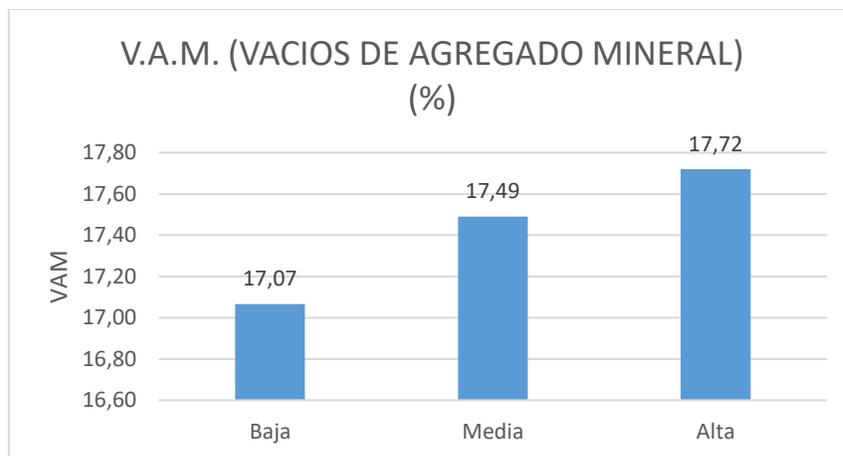
Figura 57. Relación Betún -vacíos



Fuente: Elaboración propia

La relación de vacíos incrementa por la incorporación de la geomalla a mayor refuerzo, genera un incremento de porcentaje de vacíos.

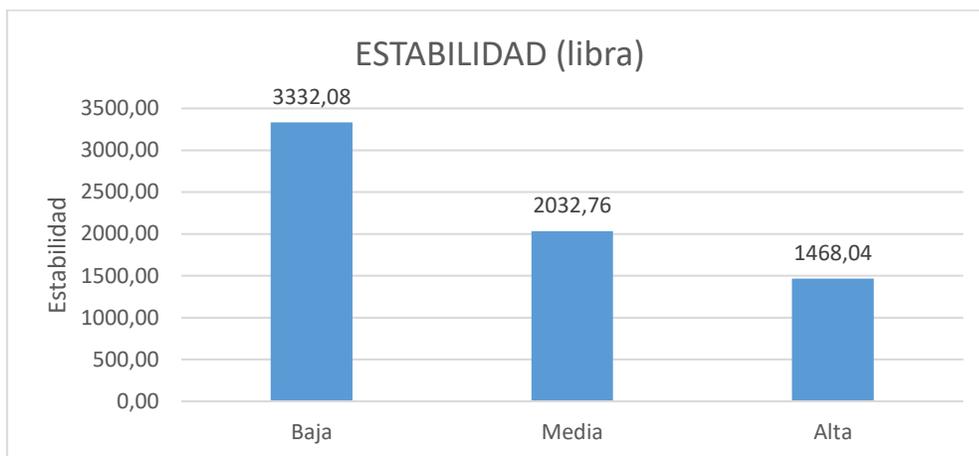
Figura 58. Vacíos de agregado mineral



Fuente: Elaboración propia

Los vacíos de agregado mineral aumentan por la incorporación de la geomalla a medida de mayor refuerzo de geomalla más porcentaje de vacíos.

Figura 59. Estabilidad

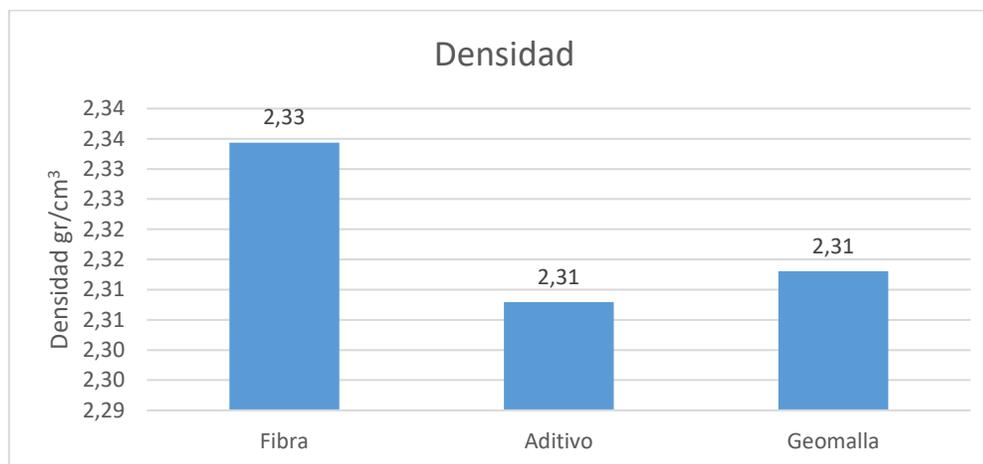


Fuente: Elaboración propia

La estabilidad disminuye según su ubicación y cantidad de refuerzo aumenta significativamente en la incorporación de geomalla.

4.2.7 Comparación y análisis

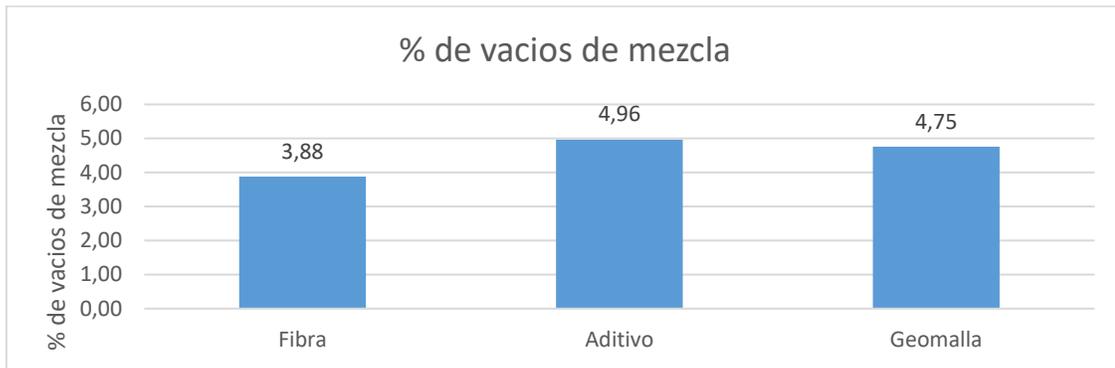
Figura 60. Comparación de Densidad



Fuente: Elaboración propia

En densidad la mezcla de refuerzo con mayor densidad es la mezcla con incorporación de fibra.

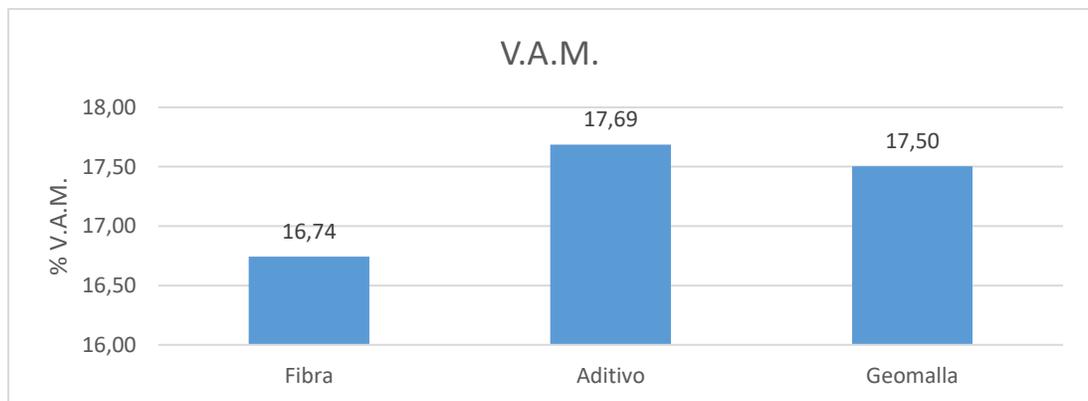
Figura 61. Comparación de % de vacíos de mezcla



Fuente: Elaboración propia

El porcentaje de vacíos más adecuado lo tiene el mezcál asfáltico con refuerzo de geomalla.

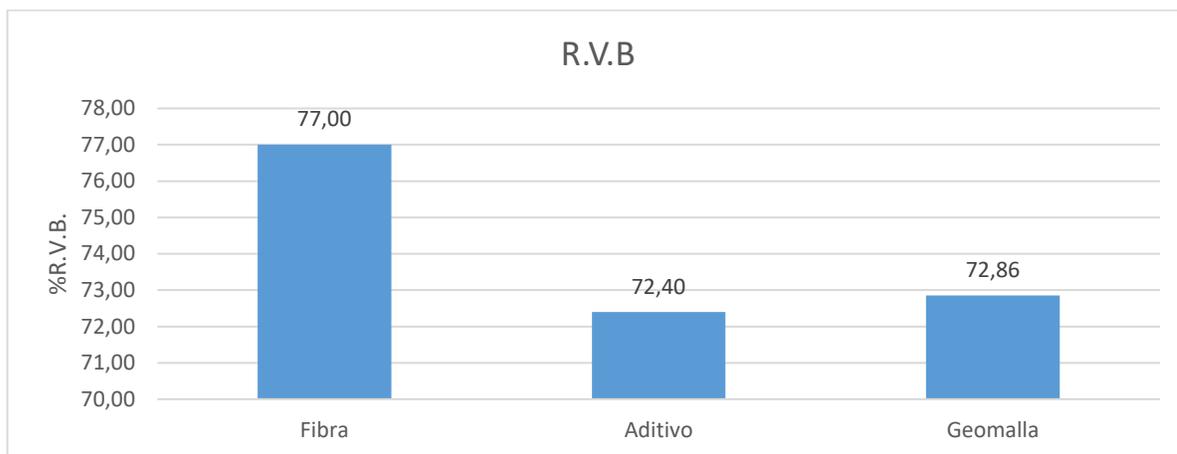
Figura 62. Comparación de vacíos de agregado mineral



Fuente: Elaboración propia

El porcentaje de vacíos más alto de mezcla mineral la tiene la mezcla asfáltica con refuerzo con aditivo.

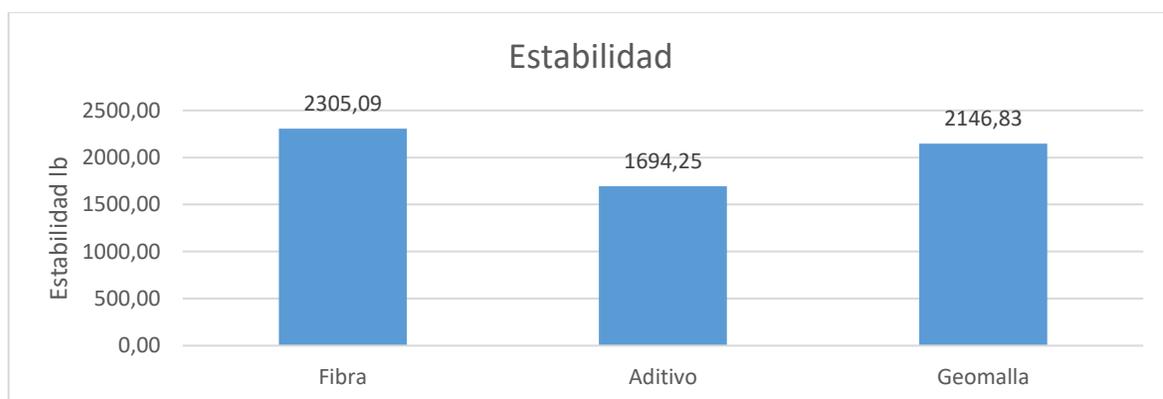
Figura 63. Comparación de Vacíos -betún



Fuente: Elaboración propia

La relación de vacíos de betún más alta, la tiene la mezcla asfáltica de refuerzo con fibra de vidrio.

Figura 64. Estabilidad

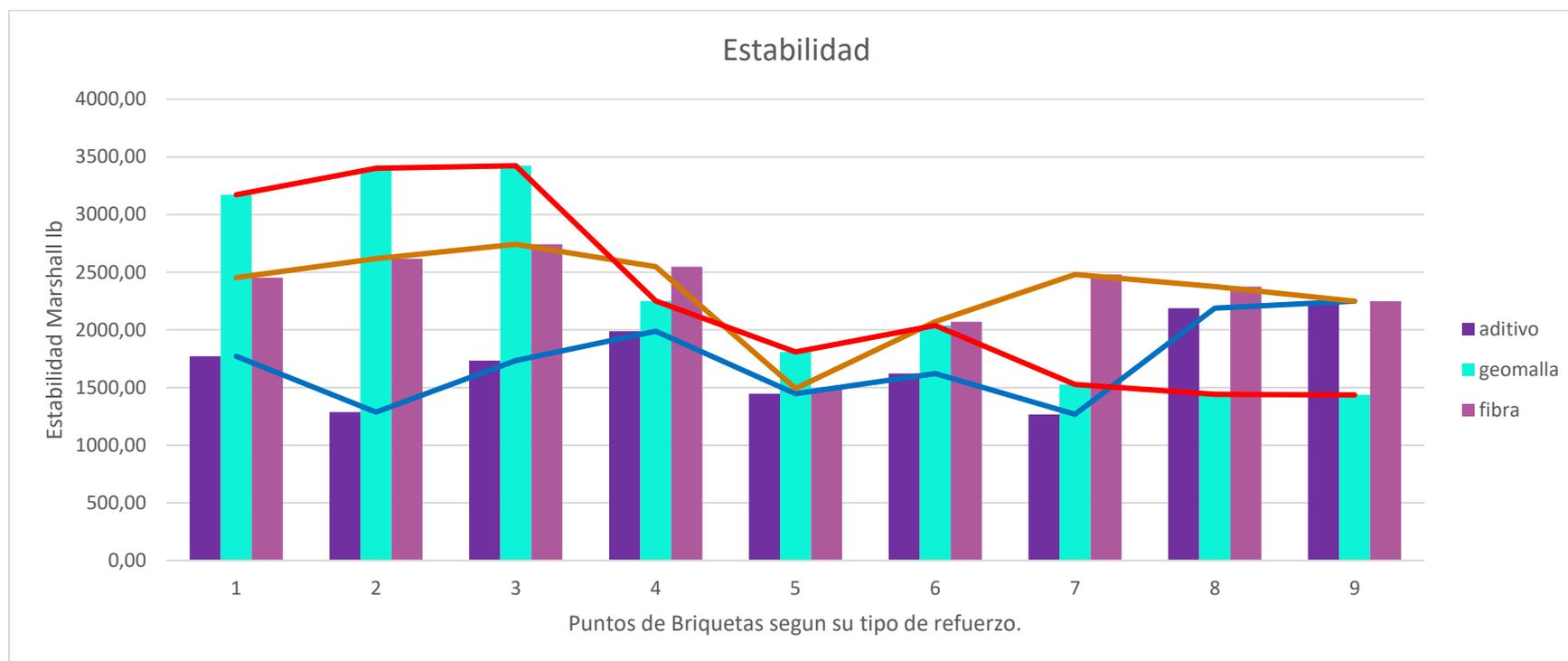


Fuente: Elaboración propia

La estabilidad más alta es de la mezcla asfáltica con refuerzo de fibra de vidrio, las tres mezclas de refuerzo tienen el rango mínimo admisible para mezclas asfálticas

Por las características que se aprecian se determinara mediante una validación de hipótesis si la mezcla asfáltica de refuerzo es mejor que la mezcla asfáltica con geomalla.

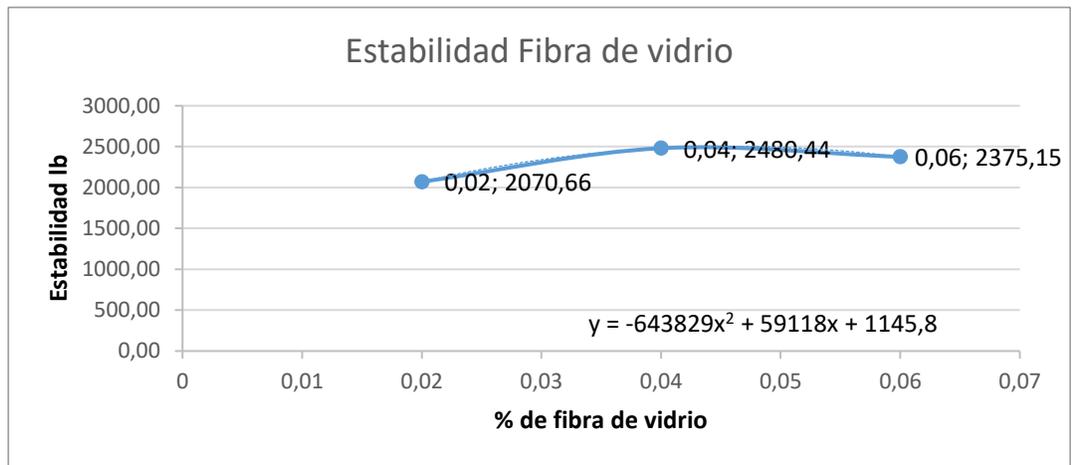
Figura 65. Estabilidad según tipo de refuerzo



Fuente: Elaboración propia

El gráfico nos muestra las estabilidades de los tres tipos de refuerzo en la mezcla asfáltica pudiendo observar fácilmente cuál de ellos es el más apropiado según las necesidades que se tenga para realizar el refuerzo oportuno para el tramo considerando las curvas de deterioro progresivas en el tiempo analizando costo beneficio del mismo.

Figura 66. Curva refuerzo de fibra



Fuente: Elaboración propia

Esta grafica muestra la curva de fibra de vidrio, donde se representa la relación entre una variable dependiente (en el eje vertical) y una variable independiente (en el eje horizontal).

La curva tiene una forma parabólica, lo que indica que la variable dependiente (posiblemente la fibra) tiene una relación cuadrática con la variable independiente.

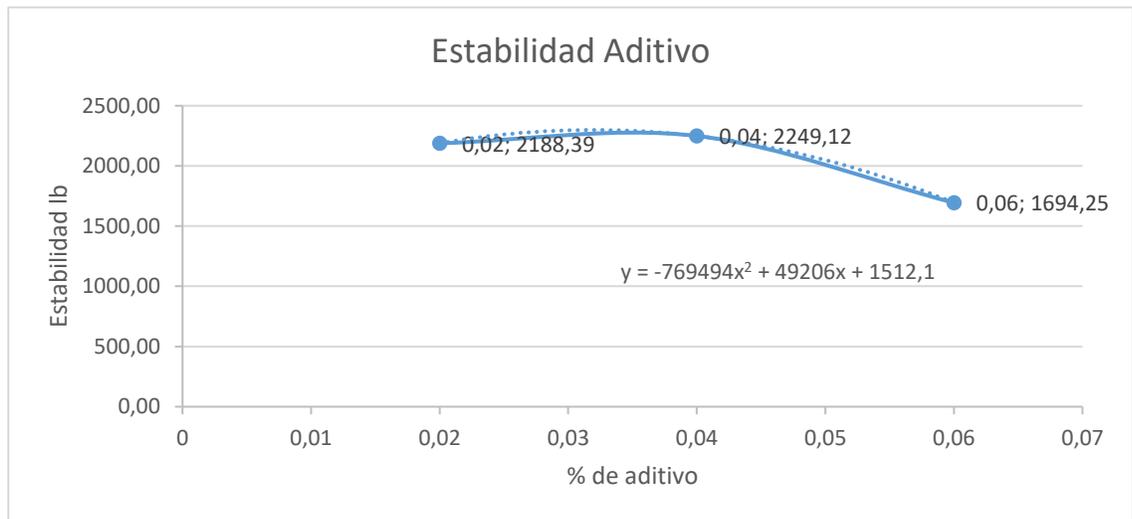
La ecuación de la curva se muestra en la parte inferior de la gráfica: $y = -257,53x^2 + 1182,4x + 1145,8$. Esta ecuación describe matemáticamente la forma de la curva.

El rango de valores de la variable independiente (eje x) va de 0 a 4, lo que sugiere que se están analizando 5 puntos de datos.

Los valores de la variable dependiente (eje y) van aproximadamente desde 1500 hasta 2500, indicando el rango de valores que toma la fibra en función de la variable independiente.

Esta gráfica permite visualizar y analizar la relación cuadrática entre la fibra y otra variable independiente. La ecuación de la curva proporciona una descripción matemática de dicha relación.

Figura 67. Curva de refuerzo de aditivo



Fuente: Elaboración propia

Esta imagen muestra la curva aditiva, que representa la relación entre una variable dependiente (en el eje vertical) y una variable independiente (en el eje horizontal).

La curva tiene una forma parabólica, lo que indica que la variable dependiente tiene una relación cuadrática con la variable independiente.

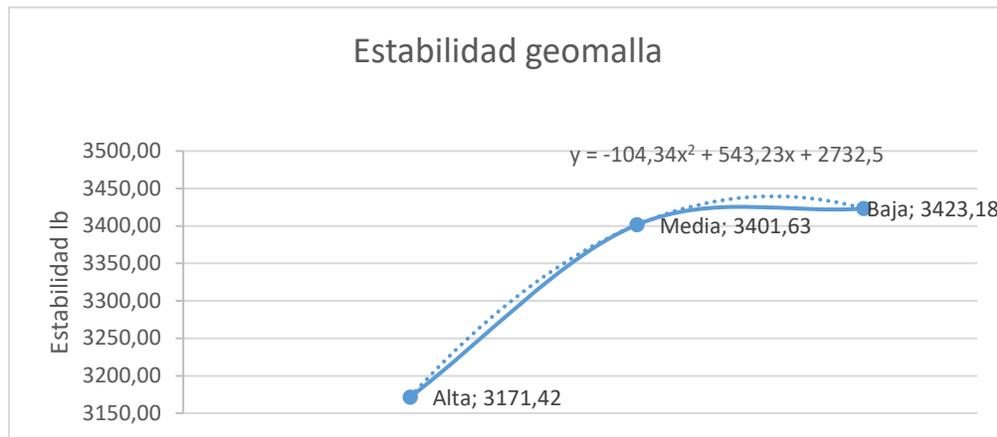
La ecuación de la curva se muestra en la parte superior de la gráfica: $y = -307,8x^2 + 984,12x + 1512,1$. Esta ecuación describe matemáticamente la forma de la curva.

El rango de valores de la variable independiente (eje x) va de 0 a 4, lo que sugiere que se están analizando 5 puntos de datos.

Los valores de la variable dependiente (eje y) van aproximadamente desde 500 hasta 2500, indicando el rango de valores que toma la variable dependiente en función de la variable independiente.

Esta gráfica permite visualizar y analizar la relación cuadrática entre la variable dependiente y la variable independiente. La ecuación de la curva proporciona una descripción matemática de dicha relación.

Figura 68. Curva de refuerzo de geomalla



Fuente: Elaboración propia

Esta grafica muestra la curva de geomalla, que representa la relación entre una variable dependiente (en el eje vertical) y una variable independiente (en el eje horizontal).

La curva tiene una forma parabólica, lo que indica que la variable dependiente tiene una relación cuadrática con la variable independiente.

La ecuación de la curva se muestra en la parte superior de la gráfica: $y = -104,34x^2 + 543,23x + 2732,5$. Esta ecuación describe matemáticamente la forma de la curva.

El rango de valores de la variable independiente (eje x) va de 0 a 4, lo que sugiere que se están analizando 5 puntos de datos.

Los valores de la variable dependiente (eje y) van aproximadamente desde 3200 hasta 3450, indicando el rango de valores que toma la variable dependiente en función de la variable independiente.

Esta gráfica permite visualizar y analizar la relación cuadrática entre la variable dependiente y la variable independiente. La ecuación de la curva proporciona una descripción matemática de dicha relación.

En estas graficas se observa el comportamiento de los refuerzos de la mezcla asfaltica.

Para la fibra de vidrio como se comportan los datos del porcentaje óptimo de fibra, indicando estabilidades de 2000lb a 2500 lb.

Para el refuerzo de aditivo la curva nos indica que la dosificación óptima establece estabilidades de 1800 lb a 2300 lb.

La curva de geomalla nos indica estabilidades 3200 lb a 3400 lb.

Tabla 46. Análisis estadístico de datos

| Briqueta | DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm ³) | ESTABILIDAD (libra) | FLUENCIA (mm) |
|-----------------------|--|---------------------|---------------|
| 1 | 2,31 | 2453,87 | 12,00 |
| 2 | 2,28 | 2618,03 | 10,00 |
| 3 | 2,33 | 2741,90 | 9,00 |
| 4 | 2,36 | 2548,05 | 13,00 |
| 5 | 2,39 | 1492,00 | 14,00 |
| 6 | 2,29 | 2070,66 | 10,00 |
| 7 | 2,33 | 2480,44 | 12,00 |
| 8 | 2,33 | 2375,15 | 15,00 |
| 9 | 2,39 | 2249,12 | 10,00 |
| Error probable | 0,04 | 373,47 | 2,06 |
| Valor máximo | 2,39 | 2741,90 | 15,00 |
| Valor mínimo | 2,28 | 1492,00 | 9,00 |
| Media | 2,33 | 2305,09 | 11,51 |
| Rango | 0,11 | 1249,90 | 6,00 |

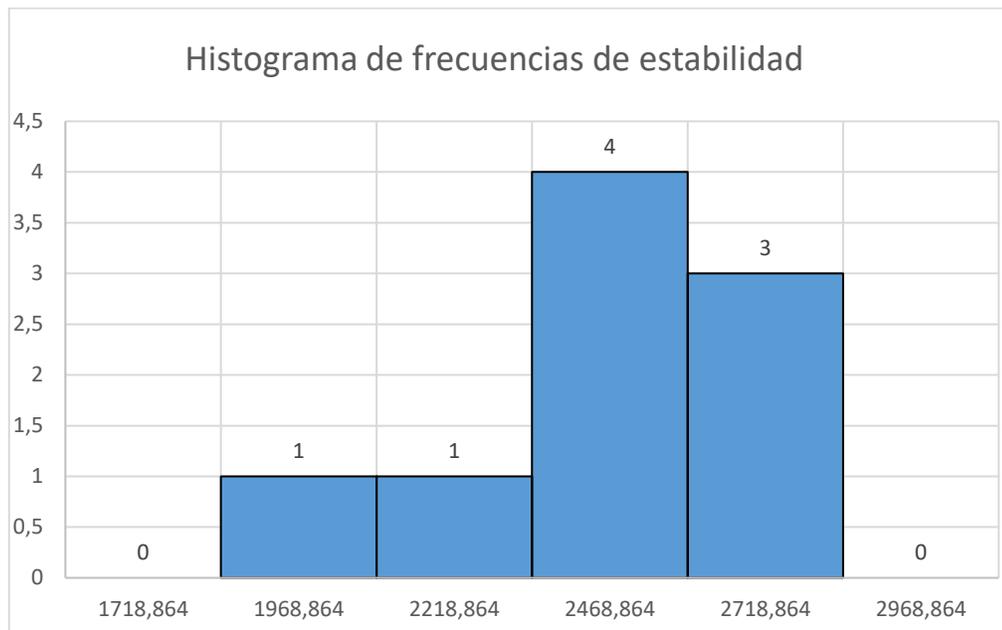
| | | | | |
|------------|--------------|-----------------|---------------|----------|
| A= | 0,11 | 1249,90 | 6,00 | |
| k= | 4,17 | entonces | k= | 5 |
| a= | 0,023 | 249,980 | 1,200 | |
| a^= | 0,03 | 250 | 0,2 | |
| A^= | 0,15 | 1250 | 1 | |
| d= | 0,037 | 0,10 | -5,00 | |
| l= | 2,263 | 1491,949 | 11,500 | |
| l= | 2,413 | 2741,949 | 12,500 | |
| c= | 1,15 | 870,97 | 5,85 | |

Fuente: Elaboración propia.

| Intervalo de clase I | M.clase C | | Frec. Abs. ni | Frec. Rel. Fi | Frec. Abs. Acum. Ni | Frec. Rel. Acum. Fi |
|----------------------|-----------|---------|---------------|---------------|---------------------|---------------------|
| 1718,864-1968,864 | 1843,864 | 250,000 | 0 | 0,000 | 0 | 0,000 |
| 1968,864-2218,864 | 2093,864 | 250,000 | 1 | 0,111 | 1 | 0,111 |
| 2218,864-2468,864 | 2343,864 | 250,000 | 1 | 0,111 | 2 | 0,222 |
| 2468,864-2718,864 | 2593,864 | 250,000 | 4 | 0,444 | 6 | 0,667 |
| 2718,864-2968,864 | 2843,864 | 250,000 | 3 | 0,333 | 9 | 1,000 |
| 2968,864-3218,864 | 3093,864 | 250,000 | 0 | 0,000 | 9 | 1,000 |

Fuente: Elaboración propia

Figura 69. Histograma de frecuencias de estabilidad



Fuente: Elaboración propia

Esta figura muestra un histograma de frecuencias de estabilidad. En el eje horizontal se presentan diferentes valores de estabilidad, mientras que en el eje vertical se indica la frecuencia o cantidad de veces que se presenta cada valor.

El valor de estabilidad más bajo representado es 1718,864, el cual tiene una frecuencia relativamente baja.

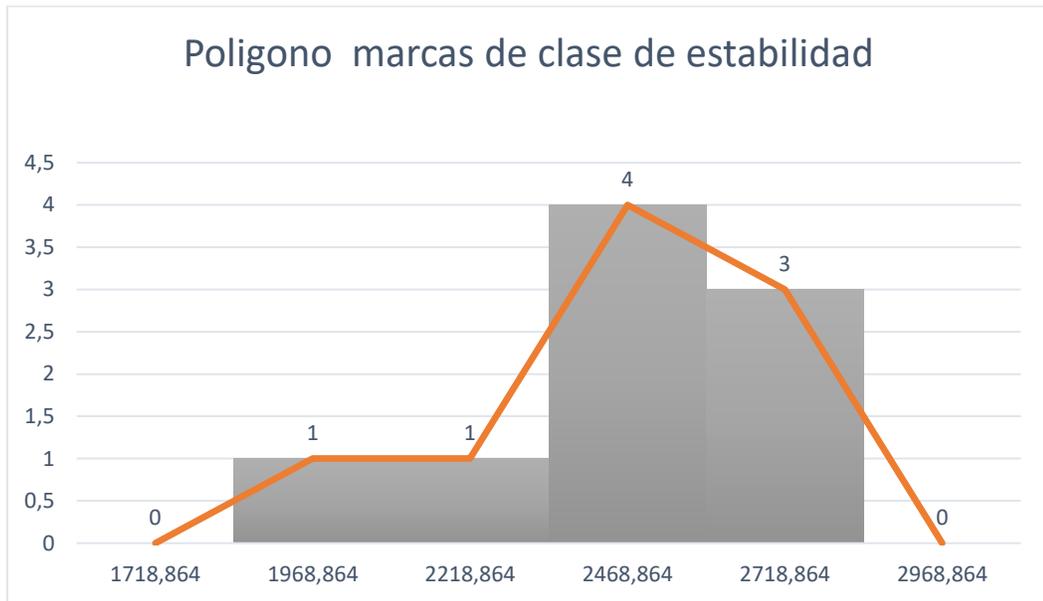
A medida que aumenta el valor de estabilidad, la frecuencia también se incrementa, alcanzando su punto más alto en 2468,864.

Después del pico en 2468,864, la frecuencia comienza a disminuir gradualmente a medida que el valor de estabilidad sigue aumentando.

Los valores más altos de estabilidad, como 2968,864, tienen una frecuencia más baja en comparación con los valores intermedios.

En resumen, este histograma nos permite visualizar la distribución de los valores de estabilidad y entender cuáles son los más frecuentes en el conjunto de datos representado.

Figura 70. Polígono marcas de clase de estabilidad



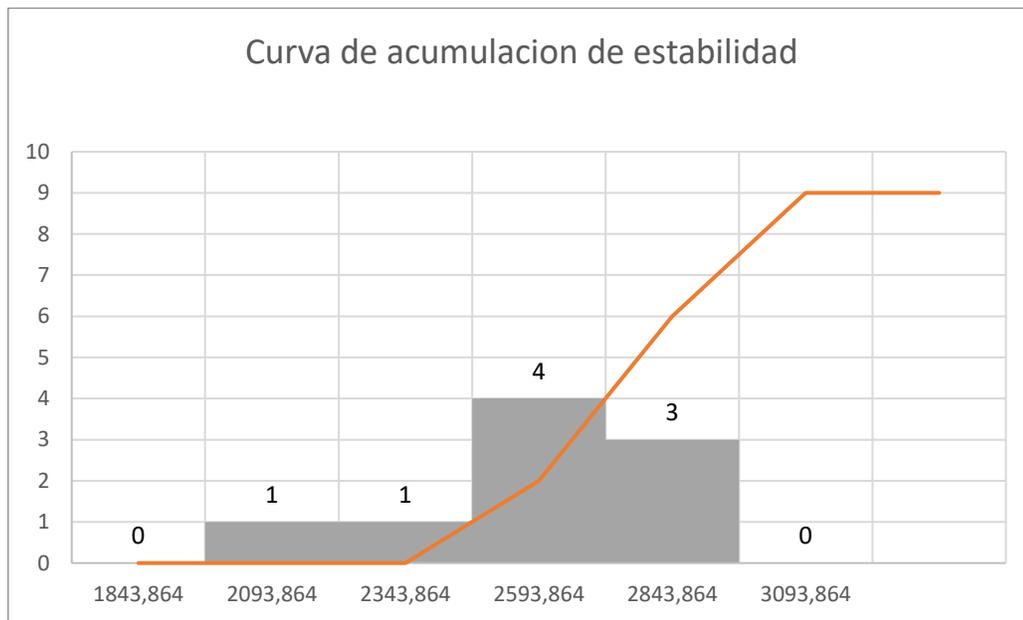
Fuente: Elaboración propia

Los valores en el eje horizontal corresponden a los años, mientras que los valores en el eje vertical representan los niveles o clases de estabilidad.

A partir de los datos proporcionados, se puede observar que el indicador de estabilidad ha ido variando a lo largo de los años, alcanzando su valor más alto en 2468,864 y su valor más bajo en 1718,864.

Esta información puede ser útil para analizar la evolución de la estabilidad de un sistema o proceso a lo largo del tiempo y detectar posibles tendencias o patrones.

Figura 71. Curva de acumulación de estabilidad



Fuente: Elaboración propia

Esta grafica muestra la curva de acumulación de estabilidad. En el eje horizontal se presentan los diferentes valores de estabilidad, mientras que en el eje vertical se indica el valor acumulado correspondiente.

El valor de estabilidad más bajo representado es 1843,864.

A medida que aumenta el valor de estabilidad, la curva se va expandiendo hacia arriba, mostrando un crecimiento gradual y constante.

La curva tiene una forma suave y continua, sin saltos bruscos, lo que indica que el incremento de la estabilidad acumulada es progresivo.

Entre los valores de estabilidad 2593,864 y 2843,864 se observa una pendiente más pronunciada, lo que sugiere un aumento más rápido de la estabilidad acumulada en ese rango.

Finalmente, la curva llega hasta un valor máximo de estabilidad acumulada de aproximadamente 9,5 en el valor de estabilidad 3093,864.

En resumen, esta gráfica nos permite visualizar la evolución y acumulación de la estabilidad a medida que aumentan los valores de estabilidad representados. Esto puede ser útil para analizar tendencias y patrones en la acumulación de estabilidad a lo largo del tiempo.

4.3 Estadística Inferencial

Serie de datos para la estabilidad

Tabla 47. Serie de Datos para la Estabilidad.

| Nro | Fibra | Geomalla |
|------------|--------------|-----------------|
| 1 | 1772,25 | 3171,42 |
| 2 | 1287,79 | 3401,63 |
| 3 | 1734,25 | 3423,18 |
| 4 | 1987,87 | 2249,81 |
| 5 | 714,85 | 1809,00 |
| 6 | 98,20 | 2039,46 |
| 7 | 1267,98 | 1525,95 |
| 8 | 2188,39 | 1442,62 |
| 9 | 2249,12 | 1435,55 |

Fuente: Elaboración propia

4.4 Prueba de hipótesis T de Student

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

Estadístico de prueba

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S_c^2}{n_1} + \frac{S_c^2}{n_2}}}$$

$$\bar{X}_1 = 1477,8548$$

$$\bar{X}_2 = 2277,6241$$

$$t = -2,178826$$

| | |
|---|-------------------------|
| Valor crítico: | $gl = (n_1+n_2-2) = 16$ |
| | $\alpha = 0,05$ |
| $t_{(1-\frac{\alpha}{2}), (n_1+n_2-2)}$ | $= 2,119905$ |

Se acepta la hipótesis de mezcla de fibra de vidrio

4.4.1 Comprobación de la hipótesis

| | |
|-------|-----------------|
| t | t(1- α) |
| -2.17 | > 2.11 |

| | |
|-----------------------|---------------|
| Estadístico de prueba | Valor Critico |
|-----------------------|---------------|

Conclusión: Se observa que en la gráfica de regiones de aceptación y de rechazo, el valor del estadístico de prueba (t) se encuentra en la región de rechazo de la hipótesis nula (Ho) muy por delante del valor límite crítico por lo tanto la hipótesis nula se rechaza.

Se rechaza la hipótesis nula aceptando la hipótesis alternativa para la Estabilidad por lo tanto se acepta la hipótesis de investigación.

4.5 Especificaciones Técnicas

4.5.1 Concepto del objeto de investigación

4.5.1.1 Mezclas asfálticas densa caliente

Las mezclas asfálticas densa caliente con incorporación de fibra de vidrio son una combinación de agregados minerales, aglomerados mediante un ligante asfáltico y mezclados de tal manera que los agregados pétreos queden cubiertos por una película uniforme de asfalto, los cuales además contienen una proporción de vacíos que no supera el 4%.

4.5.1.2 Materiales y equipos

Mezcla asfáltica densa caliente y tibia

| Materiales | Equipos |
|-------------|-------------------|
| -Moldes | -Balanza |
| -Termómetro | -Gata Hidráulica |
| -Alicate | -Prensa Marshall |
| -Martillo | -Lector dial |
| -Badilejo | -Mordaza Marshall |

- Brocha
 - Bandejas
 - fibra de vidrio
 - Aditivo Zycotherm
 - Geomalla triaxial
- Martillo Marshall

4.5.1.3 Procedimiento y rangos de medición

Para la determinación del ensayo de estabilidad y fluencia es necesario realizar lo siguiente: Primero se debe medir con un vernier las alturas en cuatro puntos de la briqueta y de esta manera determinar su altura media que será corregida mediante un factor de corrección.

Antes de realizar el ensayo la muestra se debe pesar en seco, saturado superficialmente seco y sumergido en agua, antes de su ruptura debe ser sumergida en agua a 60°C durante 30 minutos, se debe colocar cada 3 minutos, una briqueta hasta completar los 30 minutos, cumplido el tiempo se coloca las briquetas en las mordazas y aplica la carga a una velocidad de deformación constante hasta que se produzca la ruptura. El punto de ruptura se define por la carga máxima obtenida. El número total de libras necesarias para producir la rotura de la muestra a 60°C se anota como valor de estabilidad Marshall.

Mientras se realiza el ensayo de estabilidad se mantiene firmemente el lector de deformaciones (flujo) en posición sobre la varilla de guía y se lo quita cuando se obtiene la carga máxima se lee y se anota esta lectura como valor de flujo de la briqueta. La estabilidad y la fluencia son propiedades medidas a partir de realizar el ensayo en la prensa Marshall.

4.6 Procedimiento en obra

4.6.1 Refuerzo con fibra de vidrio

Preparación del material: La fibra de vidrio se presenta en forma de bolsas o rollos. Se debe verificar que el material esté en buenas condiciones y libre de daños o humedad.

Dosificación: La cantidad de fibra de vidrio a utilizar dependerá del diseño específico del pavimento. Se debe seguir cuidadosamente las instrucciones del fabricante para la dosificación y mezclado del material.

Mezclado: La fibra de vidrio se mezcla con la mezcla asfáltica en la planta de asfalto. Se debe utilizar un equipo mezclador adecuado para asegurar una distribución uniforme de las fibras en la mezcla.

Transporte y colocación: La mezcla asfáltica con fibra de vidrio se transporta al sitio de obra en camiones, volquetas. Se debe extender y compactar la mezcla de manera uniforme sobre la superficie preparada del pavimento.

4.6.2 Refuerzo con aditivo Zycotherm

Preparación del material: El aditivo Zycotherm se presenta en forma líquida. Se debe verificar que el material esté en buenas condiciones y libre de contaminantes.

Dosificación: La cantidad de aditivo Zycotherm a utilizar dependerá del diseño específico del pavimento. Se debe seguir cuidadosamente las instrucciones del fabricante para la dosificación y mezclado del material.

Mezclado: El aditivo Zycotherm se mezcla con la mezcla asfáltica en la planta de asfalto. Se debe utilizar un equipo mezclador adecuado para asegurar una dispersión uniforme del aditivo en la mezcla.

Transporte y colocación: La mezcla asfáltica con aditivo Zycotherm se transporta al sitio de obra en camiones volquetes. Se debe extender y compactar la mezcla de manera uniforme sobre la superficie preparada del pavimento.

Refuerzo con geomalla triaxial:

Preparación del material: La geomalla triaxial se presenta en rollos. Se debe verificar que el material esté en buenas condiciones y libre de daños o rasgaduras.

Despliegue: La geomalla triaxial se despliega sobre la superficie preparada del pavimento. Se debe asegurar que la malla esté extendida de manera uniforme y sin pliegues.

Colocación de la capa asfáltica: La capa asfáltica se coloca sobre la geomalla triaxial. Se debe extender y compactar la mezcla de manera uniforme para asegurar una buena adherencia entre la malla y el asfalto.

Consideraciones generales:

Se deben seguir las especificaciones técnicas del proyecto y las normas de construcción vigentes para la instalación de cada tipo de refuerzo.

Se debe contar con personal capacitado y experimentado en la instalación de los refuerzos.

Se debe utilizar equipo adecuado y en buen estado de funcionamiento para la mezcla, transporte y colocación de los materiales.

Se deben implementar medidas de seguridad durante la ejecución de los trabajos para proteger a los trabajadores y al público en general.

4.7 Dificultades puesto en obra

4.7.1 Refuerzo con fibra de vidrio

Dificultades en la mezcla: La fibra de vidrio puede dificultar el proceso de mezclado del hormigón asfáltico, especialmente si no se utiliza el equipo adecuado o si la dosificación no es precisa. Esto puede afectar la uniformidad de la mezcla y la distribución de las fibras.

Dificultades en la compactación: La presencia de fibras de vidrio puede dificultar la compactación del hormigón asfáltico, lo que puede generar áreas con baja densidad y comprometer la resistencia del pavimento. Se requiere un equipo de compactación adecuado y un mayor esfuerzo de compactación.

Control de calidad: El control de calidad de la mezcla asfáltica con fibra de vidrio puede ser más complejo debido a la dificultad para verificar la distribución uniforme de las fibras. Se requieren métodos de ensayo específicos para evaluar la calidad del material.

4.7.2 Refuerzo con aditivo Zycotherm

Sensibilidad a la temperatura: El aditivo Zycotherm puede ser sensible a las condiciones de temperatura durante el mezclado y la colocación del hormigón asfáltico. Temperaturas extremas pueden afectar la trabajabilidad de la mezcla y la adherencia del aditivo al asfalto.

Control de dosificación: Es importante controlar cuidadosamente la dosificación del aditivo Zycotherm para evitar una sobredosis o una subdosificación, lo que puede afectar negativamente las propiedades del pavimento.

Compatibilidad con otros aditivos: Se debe verificar la compatibilidad del aditivo Zycotherm con otros aditivos o modificadores que se puedan utilizar en la mezcla asfáltica.

4.7.3 Refuerzo con geomalla triaxial

Daños durante la manipulación: La geomalla triaxial puede ser susceptible a daños durante su manipulación, transporte y despliegue en obra. Se debe tener cuidado para evitar rasgaduras, perforaciones o desgarros en la malla.

Colocación precisa: Es importante colocar la geomalla triaxial de manera precisa y uniforme sobre la superficie del pavimento. Se debe evitar la formación de pliegues o superposiciones excesivas que puedan afectar el desempeño del refuerzo.

Adherencia con la capa asfáltica: Se debe asegurar una buena adherencia entre la geomalla triaxial y la capa asfáltica para garantizar la transferencia de cargas y el funcionamiento adecuado del refuerzo.

4.7.4 Recomendaciones

Selección de materiales de calidad: Es importante seleccionar materiales de alta calidad y procedentes de proveedores confiables para minimizar el riesgo de dificultades en obra.

Capacitación del personal: El personal que participe en la instalación de los refuerzos debe estar capacitado en las técnicas adecuadas de manejo, mezclado, colocación y compactación de los materiales.

Supervisión técnica: Se debe contar con la supervisión técnica de un ingeniero especializado en pavimentos durante la ejecución de los trabajos para garantizar el cumplimiento de las especificaciones técnicas y detectar cualquier problema a tiempo.

4.8 Análisis de precios unitarios

Se realiza el análisis de precio unitario del refuerzo óptimo y un análisis de precio unitario de una mezcla asfáltica convencional.

Tabla 48. Planilla precios unitarios mezcla caliente

| 1. MATERIALES | | | | | |
|--|------------------------------------|----------------|----------|------------|-----------------|
| N° | DESCRIPCION | UNIDAD | CANTIDAD | PRECIO | COSTO |
| | | | | PRODUCTIVO | TOTAL |
| 1 | Diesel | l | 25 | 3,74 | 93,5 |
| 2 | Cemento asfáltico 85-100 | kg | 133,4 | 10,42 | 1390,028 |
| 3 | Grava 3/4 | m ³ | 0,33 | 150 | 49,5 |
| 4 | Grava 3/8 | m ³ | 0,21 | 160 | 33,6 |
| 5 | Arena | m ³ | 0,25 | 180 | 45 |
| TOTAL MATERIALES | | | | | 1611,628 |
| 2.MANO DE OBRA | | | | | |
| N° | DESCRIPCION | UNIDAD | CANTIDAD | PRECIO | COSTO |
| | | | | PRODUCTIVO | TOTAL |
| 1 | Ayudante | hr | 0,07 | 10 | 0,7 |
| 2 | Capataz | hr | 1,8 | 18 | 32,4 |
| 3 | Chofer | hr | 1,5 | 18 | 27 |
| 4 | Operador camión dist. de asfaltos | hr | 1,5 | 10 | 15 |
| 5 | Operador b | hr | 0,08 | 10 | 0,8 |
| SUBTOTAL MANO DE OBRA | | | | | 75,9 |
| Cargas Sociales = (% del subtotal de la mano de obra) (55% - 71.18%) | | | | 67 | 50,853 |
| Impuestos IVA mano de obra = (% de Carga Social + Subtotal mano de obra) | | | | 14,94 | 18,94 |
| TOTAL MANO DE OBRA | | | | | 145,69 |
| 3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS | | | | | |
| N° | DESCRIPCION | UNIDAD | CANTIDAD | PRECIO | COSTO |
| | | | | PRODUCTIVO | TOTAL |
| 1 | Planta diluidora de asfalto | hr | 0,09 | 106,6 | 9,594 |
| 2 | Camion distribuidor de asfalto | hr | 1,5 | 159,9 | 239,85 |
| 3 | Cargador frontal sobre ruedas | hr | 0,05 | 317,4 | 15,87 |
| 4 | Compactador de neumáticos | hr | 0,04 | 191,9 | 7,676 |
| 5 | Compactador manual de rodillo liso | hr | 0,08 | 21,2 | 1,696 |
| 6 | terminadora de asfalto | hr | 0,5 | 200 | 100 |
| Herramientas =(% del total de mano de obra) | | | | 5 | 7,28 |
| TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS | | | | | 372,38 |
| 4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS | | | | | |
| | | | | PRECIO | COSTO |
| | | | | PRODUCTIVO | TOTAL |
| Gastos generales = % de 1+2+3 | | | | 10 | 212,97 |
| TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS | | | | | 212,97 |
| 5. UTILIDAD | | | | | |
| | | | | PRECIO | COSTO |
| | | | | PRODUCTIVO | TOTAL |
| Utilidad= % de 1+2+3+4 | | | | 8 | 187,41 |
| COSTO TOTAL UTILIDAD | | | | | 187,41 |
| 6. IMPUESTOS | | | | | |
| | | | | PRECIO | COSTO |
| | | | | PRODUCTIVO | TOTAL |
| Impuestos IT= % de 1+2+3+4+5 | | | | 3,09 | 78,18 |
| COSTO TOTAL IMPUESTOS | | | | | 78,18 |
| TOTAL PRECIO UNITARIO (1+2+3+4+5+6) = | | | | | 2608,26 |
| TOTAL PRECIO UNITARIO ADOPTADO (En Bolivianos) = | | | | | 2608,26 |

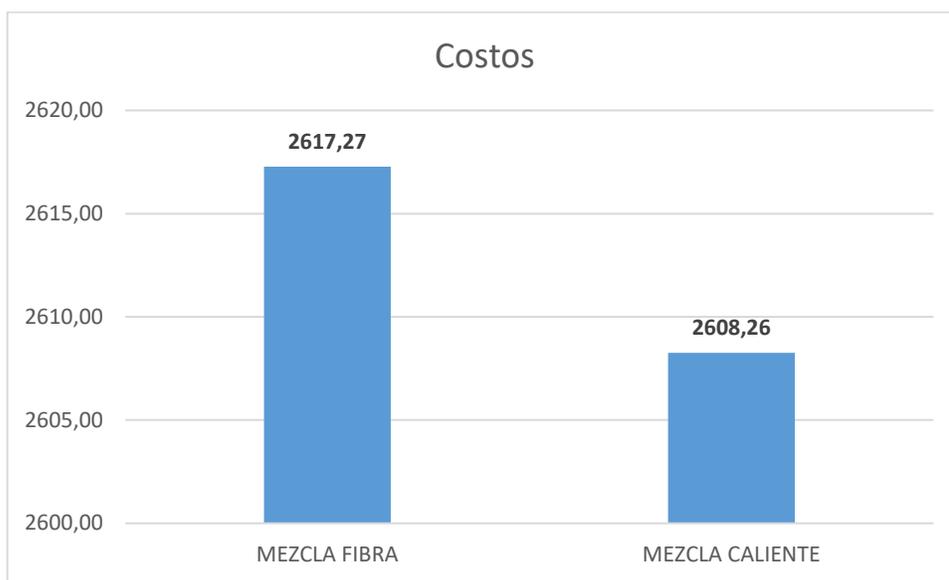
Fuente: Elaboración propia

Tabla 49. Planilla precios unitarios mezcla caliente incorporando fibra de vidrio

| 1. MATERIALES | | | | | |
|--|------------------------------------|----------------|----------|------------|----------------|
| N° | DESCRIPCION | UNIDAD | CANTIDAD | PRECIO | COSTO |
| | | | | PRODUCTIVO | TOTAL |
| 1 | Diesel | l | 18 | 3,74 | 67,32 |
| 2 | Cemento asfáltico 85-100 | kg | 133,34 | 10,42 | 1389,4028 |
| 3 | Grava 3/4 | m ³ | 0,33 | 152 | 50,16 |
| 4 | Grava 3/8 | m ³ | 0,21 | 162 | 34,02 |
| 5 | Arena | m ³ | 0,25 | 180 | 45 |
| 6 | fibra de vidrio | kg | 5 | 20 | 100 |
| TOTAL MATERIALES | | | | | 1685,9028 |
| 2.MANO DE OBRA | | | | | |
| N° | DESCRIPCION | UNIDAD | CANTIDAD | PRECIO | COSTO |
| | | | | PRODUCTIVO | TOTAL |
| 1 | Ayudante | hr | 0,07 | 10 | 0,7 |
| 2 | Capataz | hr | 1,3 | 18 | 23,4 |
| 3 | Chofer | hr | 1 | 18 | 18 |
| 4 | Operador camión dist. de asfaltos | hr | 0 | 10 | 0 |
| 5 | Operador b | hr | 0,06 | 10 | 0,6 |
| SUBTOTAL MANO DE OBRA | | | | | 42,7 |
| Cargas Sociales = (% del subtotal de la mano de obra) (55% - 71.18%) | | | | 67 | 28,609 |
| Impuestos IVA mano de obra = (% de Carga Social + Subtotal mano de obra) | | | | 14,94 | 10,65 |
| TOTAL MANO DE OBRA | | | | | 81,96 |
| 3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS | | | | | |
| N° | DESCRIPCION | UNIDAD | CANTIDAD | PRECIO | COSTO |
| | | | | PRODUCTIVO | TOTAL |
| 1 | Planta diluidora de asfalto | hr | 0,09 | 106,6 | 9,594 |
| 2 | Camión distribuidor de asfalto | hr | 1,5 | 159,9 | 239,85 |
| 3 | Cargador frontal sobre ruedas | hr | 0,05 | 317,4 | 15,87 |
| 4 | Compactador de neumáticos | hr | 0,04 | 191,9 | 7,676 |
| 5 | Compactador manual de rodillo liso | hr | 0,08 | 21,2 | 1,696 |
| 6 | terminadora de asfalto | hr | 0,5 | 200 | 100 |
| Herramientas =(% del total de mano de obra) | | | | 5 | 4,10 |
| TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS | | | | | 369,19 |
| 4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS | | | | | |
| | | | | PRECIO | COSTO |
| | | | | PRODUCTIVO | TOTAL |
| Gastos generales = % de 1+2+3 | | | | 10 | 213,71 |
| TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS | | | | | 213,71 |
| 5. UTILIDAD | | | | | |
| | | | | PRECIO | COSTO |
| | | | | PRODUCTIVO | TOTAL |
| Utilidad= % de 1+2+3+4 | | | | 8 | 188,06 |
| COSTO TOTAL UTILIDAD | | | | | 188,06 |
| 6. IMPUESTOS | | | | | |
| | | | | PRECIO | COSTO |
| | | | | PRODUCTIVO | TOTAL |
| Impuestos IT= % de 1+2+3+4+5 | | | | 3,09 | 78,45 |
| COSTO TOTAL IMPUESTOS | | | | | 78,45 |
| TOTAL PRECIO UNITARIO (1+2+3+4+5+6) = | | | | | 2617,27 |
| TOTAL PRECIO UNITARIO ADOPTADO (En Bolivianos) = | | | | | 2617,27 |

Fuente: Elaboración propia

Figura 72. Costos.



Fuente: Elaboración propia

Costo de la "mezcla asfáltica de fibra", Valor: 2617,27

Porcentaje del total: $(2617,27 / 5225,53) \times 100 = 50,1\%$ la "mezcla asfáltica de fibra" representa el 50,1% del costo total. costo de la "mezcla caliente".

Valor: 2608,26 porcentaje del total: $(2608,26 / 5225,53) \times 100 = 49,9\%$ la "mezcla caliente" representa el 49,9% del costo total, diferencia en valor: $2617,27 - 2608,26 = 9,01$, diferencia porcentual, $(9,01 / 5225,53) \times 100 = 0,17\%$ la "mezcla fibra" tiene un 0,17% más de costo que la "mezcla convencional caliente".

La "mezcla asfáltica de fibra" representa el 50,1% del costo total, mientras que la "mezcla caliente" representa el 49,9%. la diferencia porcentual entre ambas es del 0,17%, lo que indica que la "mezcla fibra" tiene un costo ligeramente más alto que la "mezcla convencional caliente".

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Al estudiar la incorporación de refuerzos en mezclas asfálticas densas calientes para la capa superior del pavimento flexible en el tramo San Mateo-Sella Méndez se validó positivamente la hipótesis de investigación teniendo mejoras significativas en la estabilidad a comparación de las mezclas asfálticas calientes sin refuerzo.

Incorporando fibra de vidrio, aditivo Zycotherm y geomalla triaxial, se determinó que el refuerzo más óptimo es la fibra de vidrio con una estabilidad que se encuentra en el rango de norma con un promedio de estabilidad de 2305 libras constituyéndose estadísticamente como la más óptima. El refuerzo con fibra de vidrio resulto ser eficaz en mejorar la estabilidad y fluencia de la capa superior del pavimento. Con una dosificación optima de 4% a 6% del total de la mezcla.

La caracterización de agregados y cemento asfaltico cumplen con los límites que establecen en la norma de mezclas asfálticas obteniendo una dosificación de mezcla de 23% grava, 27% gravilla, 50% arena con un contenido óptimo de cemento asfaltico de 5.6%.

La aplicación del aditivo Zycotherm ha marcado una diferencia notable en las temperaturas de mezcla y la trabajabilidad de las mezclas asfálticas. La reducción de viscosidad obtenida no solo tiene implicaciones positivas en términos de sostenibilidad, sino que también ha mejorado la eficiencia del proceso de producción, con estabilidades de 2000lb a 2500lb. El uso de geomalla triaxial ha demostrado ser clave para la estabilidad del pavimento, mejorando la distribución de cargas y resistiendo deformaciones permanentes. Su aplicación ha mostrado altas estabilidades de 3000 lb a 3400 lb en la ubicación baja de briquetas. Pero se necesita una tecnificación y una apropiada maquinaria lo cual es una desventaja para nuestro medio.

La implementación de la curva parabólica de PCI de pavimento ha sido fundamental para identificar momentos críticos en la vida útil del pavimento, pudiendo identificar los años 2025-2026 como críticos donde se debería realizar el refuerzo para la capa superior del pavimento flexible.

En conclusión, este estudio sienta las bases para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en el diseño y mantenimiento de pavimentos flexibles como refuerzo.

5.2 Recomendaciones

Considerar la implementación práctica de los resultados obtenidos en proyectos de pavimentación futuros. La selección del tipo de refuerzo debe basarse en las necesidades específicas de cada tramo y las condiciones del entorno.

Se recomienda realizar investigaciones adicionales para evaluar la viabilidad de fibras de vidrio específicas en distintas mezclas asfálticas. Esto puede proporcionar información más detallada sobre la dosificación óptima y los efectos en diferentes contextos.

Se sugiere realizar pruebas adicionales en diversas condiciones climáticas para evaluar la eficacia del aditivo Zycotherm en diferentes situaciones. Esto permitirá una aplicación más precisa según las variaciones ambientales.

Se recomienda explorar opciones de diseño más específicas para la aplicación de geomalla triaxial, considerando la geometría de la malla.