

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

La comparación de agregados de diferentes materiales para mezclas asfálticas, conlleva a poder conseguir mejores resultados de mejoramiento de las mezclas asfálticas.

El uso de filler mejora la estabilidad e impermeabilidad de una mezcla asfáltica, este trabajo está relacionado con la búsqueda de una mezcla asfáltica que cumpla o mejore las condiciones y parámetros más óptimos de esta y así poder comparar con una mezcla convencional.

La construcción de carreteras en Bolivia es una actividad que se ha venido desarrollando con mayor impulso en los últimos años con el objetivo de mejorar la conectividad y los medios de transporte de bienes y servicios, lo cual se ve directamente reflejado en la competitividad del país. Esto se traduce en políticas de inversión para la construcción de nuevas vías y el mejoramiento y mantenimiento de las carreteras existentes, ya sea con la intervención directa del estado o a través de concesiones como la ABC.

En línea con el desarrollo de las obras de las carreteras, se debe buscar el desarrollo de materiales alternativos que permitan obtener beneficios en términos de costos, vida útil o impactos ambientales.

Específicamente en el área de los pavimentos y de las mezclas asfálticas, en los años recientes se han incorporado materiales nuevos como los asfaltos modificados con polímeros o con otros materiales como el grano de caucho, cuya aplicación ya se encuentra registrada en investigaciones ya realizadas, los cuales tienen por objeto mejorar el comportamiento mecánico de las mezclas, aumentar la vida útil o generar impactos ambientales positivos. Por lo tanto, resulta valioso explorar materiales alternativos que puedan generar ese tipo de resultados y para el caso, siguiendo líneas de investigación definidas en el ámbito académico, se toma el material denominado Pastina para evaluar si

puede ser utilizado dentro de las mezclas asfálticas obteniendo comportamientos favorables.

Este trabajo de investigación es el de realzar una comparación del comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica utilizando como filler polvo de pastina esto para poder observar las diferencias paramétricas entre la mezcla asfáltica convencional, y así poder llegar a un resultado comparativo como investigación.

El uso de polvo de pastina como filler será un agregado novedoso, el polvo de pastina es un perfecto multipropósito debido a sus propiedades adherentes, impermeables, resistentes y de alta dureza, van de la mano con el cemento portland debido a la similitud de propiedades.

1.2. Situación problemática

Muchas capas de rodadura fallan debido al desgaste por las sollicitaciones de los vehículos y es por este motivo que se trata de realizar una mezcla óptima para cada sollicitación del mismo.

Frente a esta problemática se han intentado soluciones en el diseño que consisten frecuentemente en aumentar el contenido de asfalto en las mezclas para lograr una película de ligante de mayor espesor envolviendo a los áridos y reducir el porcentaje de vacíos.

Por otro lado, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación de asfalto; una condición en donde el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie.

El impacto de la aparición temprana de estas patologías sobre la infraestructura y los costos de mantenimiento asociados, generan un especial interés por el estudio de las causas, que se asocian principalmente con la calidad de los agregados, la calidad del asfalto, los procesos de producción y construcción, y en menor medida, con la calidad de los diseños estructurales. Dentro de este sin fin de posibilidades, la calidad de los agregados y del asfalto, así como la calidad de las mezclas obtenidas a partir de estos, cobran importancia y se hace necesario identificar con mayor precisión su influencia en

el desempeño de las capas flexibles, al igual que conllevan a la búsqueda de alternativas para mejorar el comportamiento durante la vida útil de las estructuras de pavimento que involucran este tipo de materiales.

Sin embargo, esta práctica se ve cada día más limitada teniendo en cuenta que la disponibilidad de fuentes de materiales se reduce con el paso del tiempo y se presentan impactos ambientales importantes asociados con su explotación. Por esta razón, en los años recientes, las prácticas constructivas han estado buscando la inclusión de materiales alternativos en las mezclas asfálticas que permitan obtener comportamientos mecánicos similares al de las mezclas convencionales con un menor consumo de agregados.

Esto nos lleva a pensar e investigar otros tipos de materiales a ser utilizados como filler y a variar de manera correcta los porcentajes a utilizarse, para mejorar el comportamiento mecánico y darle mayor durabilidad a la mezcla asfáltica.

1.2.1. Problema

¿Cuál es el comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica usando como filler el polvo de pastina, comparada con el comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica convencional?

1.3. Justificación

La constante búsqueda del hombre por mejorar las condiciones de transitabilidad por las vías hace que se planteen la colocación de carpetas de rodadura que sean resistentes y duraderas tanto a los agentes de intemperismo como a los esfuerzos transmitidos por las cargas del tránsito, Es por ello que la composición de los materiales y la calidad de los mismos juega un papel importante para que se puedan conseguir las características deseadas del pavimento: seguridad, comodidad y resistencia. De esta forma y conoedores de las constantes variaciones en los factores climáticos, se espera a través de esta investigación la obtención de una mezcla asfáltica con mejor comportamiento mecánico a través de la variación de las características granulométricas.

De hecho, además del empleo de asfaltos modificados y de áridos de buena calidad, la adición de un filler apropiado ha sido otra de las razones del avance tecnológico de las

mezclas con granulometría discontinua, que ganaron confiabilidad con el transcurso de los años.

Lo que se pretende obtener es que las propiedades de la mezcla asfáltica no sean menores al utilizar diferentes porcentajes de filler de polvo de pastina y si estas propiedades llegasen a subir en que porcentaje seria para dar una recomendación sobre su utilización.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

- Comparar del comportamiento de una mezcla asfáltica considerando sus propiedades físico-mecánicas modificadas con la adición de polvo de pastina como filler, a través de la metodología Marshall para mejorar las propiedades de la mezcla asfáltica en función de su densidad y resistencia mecánica.

1.4.2. Objetivos específicos

- Construir un plan de dosificación y distribución del material de adición: pastina en forma de polvo, dentro de la mezcla asfáltica y construir un plan de ensayos.
- Estudiar los parámetros más relevantes para el uso y tratamiento en mezclas asfálticas.
- Caracterizar los materiales que serán los componentes de las mezclas asfálticas a ser estudiadas, incluyendo la caracterización del material que será utilizado como adición para la mezcla asfáltica: pastina.
- Analizar los resultados obtenidos y determinar la variación del comportamiento de las mezclas con la adición de pastina.

1.5. Hipótesis

Si, al incorporar polvo de pastina como filler a una mezcla asfáltica en reemplazo de una fracción granulométrica, se puede lograr un aumento en el comportamiento mecánico en comparación de una mezcla convencional, si se tiene en cuenta las temperaturas requeridas en el proceso de producción de la mezcla, la pastina puede generar un efecto de refuerzo por la eventual interconexión que se logra entre las fibras dentro de la mezcla.

1.6. Definición de variables

1.6.1. Variable independiente

Dosificación de filler (% de polvo de pastina)

1.6.2. Variable dependiente

Comportamiento mecánico de la mezcla: Estabilidad y fluencia.

1.7. Identificación del tipo de investigación

Para la investigación el diseño de investigación será de tipo de INVESTIGACIÓN CAUSAL. Debido a que se ha identificado una relación causa (propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas) y efecto (comportamiento deficiente del asfalto convencional).

1.8. Unidades de estudio y decisión muestral

En la investigación su unidad de estudio forma parte de las mezclas asfálticas, debido a que se centra en el comportamiento y cuál será el efecto que tendrá el filler de pastina dentro de la mezcla asfáltica y de esta manera conocer la influencia en el comportamiento mecánico de la mezcla.

1.8.1. Población

Para la evaluación de las mezclas asfálticas con la incorporación de pastina como un filler, su población es cada tipo de los elementos que componen una mezcla asfáltica, entre ellos los agregados gruesos, agregados finos y el cemento asfáltico.

1.8.2. Muestra

Si se tiene en cuenta que en el medio hay diferentes tipos de pastina y en diferentes marcas que se pueden utilizar como un filler en la mezcla asfáltica, se debe tomar en cuenta sus respectivas propiedades y características.

1.9. Métodos y técnicas empleadas

1.9.1. Métodos

Método Inductivo

Se utiliza el método inductivo partiendo de casos particulares para llegar a una proposición general.

El uso del razonamiento inductivo fue y es de gran importancia en el trabajo científico en general, ya que consiste en la recolección de datos sobre casos específicos y su análisis para generar conclusiones generales.

1.9.2. Técnicas

El diseño experimental es un método estadístico que se aplica en investigaciones experimentales de ciencia. Permite conocer mejor las variables involucradas en un proceso; para ello es necesario definir las variables de entrada y variables desconocidas y luego de un proceso de dichas variables permitirá generar una variable resultada ar teorías o hipótesis.

1.10. Procesamiento de la información

Plan de procesamiento de información

Revisión crítica y definida de la información recolectada.

Tabulación de datos de acuerdo a la hipótesis y sus variables.

Representación numérica y gráfica de los resultados.

Plan de análisis

Analizar e interpretar los resultados obtenidos haciendo referencia a los objetivos y la hipótesis.

Determinación de las conclusiones y recomendaciones y verificación de la hipótesis.

1.11. Alcance de la investigación

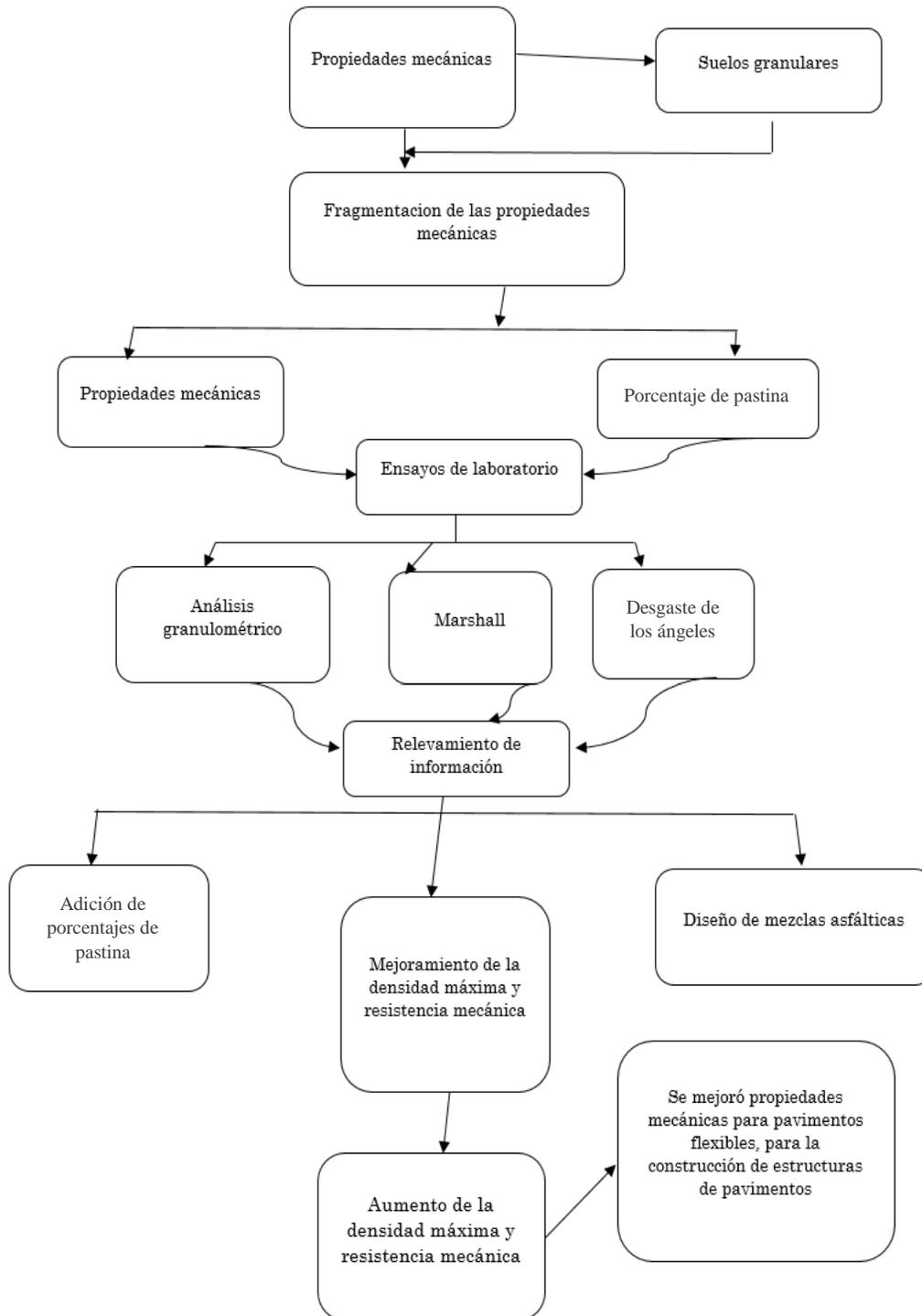
El alcance de la investigación se refleja en el trabajo de laboratorio, debido a que se evaluará la variación de las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente al aplicar diferentes porcentajes de polvo de pastina clásica klaukol.

El cemento asfáltico que se utilizó en el de penetración 85-100 es de procedencia brasileña marca Stratura.

La incorporación se hizo a través de vía seca en reemplazo de los agregados, mismos que son de la planta de Charaja.

1.11.1. Esquema de actividades en función a procedimiento definido por la perspectiva

Gráfico N° 1 Esquema de actividades



Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO II

ASPECTOS GENERALES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

2.1. Mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonado. Se producen en centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y compactan. Se usan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros. Sin olvidar que se utilizan en las capas inferiores de los pavimentos para tráficos pesados intensos.

Figura N° 1 Muestra de mezcla asfáltica



Fuente: Da Motta, 2008.

Están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Estos son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.

Generalmente una mezcla es el resultado de la combinación de cemento asfáltico y agregados pétreos en unas proporciones exactas y predeterminadas; se pueden fabricar en caliente o en frío, siendo más usuales las mezclas densas en caliente que serán parte de la investigación. Se conocen una serie de procedimientos para calcular las cantidades de cada material en la mezcla en caliente, siendo el procedimiento Marshall uno de los métodos más usados y confiables.

Sirve como agente cementante que fija los agregados en la posición adecuada para transmitir las cargas aplicado a las capas inferiores. Los agregados son por lo general piedra partida, grava, arenas, etc.

2.1.1. Mezclas asfálticas en caliente

Es el producto resultante de la mezcla en caliente y en una planta adecuada, de uno o más agregados pétreos y cemento asfáltico tradicional o modificado, el cual se esparce y compacta en caliente.

El proceso de fabricación implica calentar el agregado pétreo y el ligante a alta temperatura, muy superior a la ambiental. Enseguida esta mezcla es colocada en la obra. Puede ser colocada como capa de base o de rodadura; esta última capa tiene la responsabilidad de brindar durabilidad, comodidad y seguridad de los usuarios y además es la que va a soportar de manera completa las cargas aplicadas tanto verticales como horizontales. Dependiendo de la granulometría del agregado empleado, pueden ser mezclas de graduación densa o graduación abierta. Los distintos tipos de mezcla que conforman un pavimento, las que pueden ir por separado o en combinación.

Para que las mezclas sean de alta calidad deben tener drenabilidad, buena adherencia, agregado o ligante, buena resistencia a la deformación plástica y homogeneidad. Cada capa de rodadura debe cumplir con las funciones de eliminar las vibraciones molestas a elevadas velocidades.

Las mezclas asfálticas en caliente son las más empleadas en muchas partes del mundo, debido a su flexibilidad, duración, uniformidad, resistencia a la fatiga y economía entre otras características generando, por ende, investigaciones y desarrollos para mejorar sus propiedades mecánicas y dinámicas.

2.1.2. Diseño de mezclas asfálticas

El comportamiento de la mezcla depende de circunstancias externas a ellas mismas, tales como el tiempo de aplicación de la carga y de la temperatura. Por esta causa sus propiedades tienen que estar vinculadas a estos factores, temperatura y duración de la carga, lo que implica la necesidad del conocimiento de la reología del material.

Actualmente la reología de las mezclas está bien estudiada tanto desde el punto de vista experimental como del teórico, con una consecuencia práctica inmediata: la mejor adaptación de las fórmulas de trabajo y de los materiales a las condiciones reales de cada pavimento.

Selección del diseño de una mezcla:

- Análisis de las condiciones en las que va a trabajar la mezcla.
- Determinación de las propiedades de la mezcla.
- Materiales disponibles, elección de los agregados pétreos.
- Elección del tipo de ligante.
- Dosificación o determinación del contenido óptimo de asfalto ligante.

Otros factores a tener en cuenta en el diseño y selección de una mezcla asfáltica son los siguientes: Exigencias de seguridad vial, estructura del pavimento, técnicas de diseño y ejecución, sitio de construcción del pavimento (topografía, temperatura, terreno, periodo de lluvias trazado de la vía, entre otros), condiciones de drenaje y consideraciones económicas. (Asphalt Institute SP-1, 1996).

2.1.3. Métodos de diseño de mezclas asfálticas caliente en laboratorio

Existen diferentes métodos de diseño. Pero mayormente se usa el método Marshall y método de Superpave.

- Método Marshall: Basado en estabilidad y contenido de vacíos, fluencia de mezcla asfáltica.
- Método Superpave: Basado en el contenido de vacíos.

2.1.4. Características y comportamiento de la mezcla

Una muestra de mezcla de pavimentación preparada en el laboratorio puede ser analizada para determinar su posible desempeño en la estructura del pavimento. El análisis está enfocado hacia cuatro características de la mezcla, y la influencia que estas puedan tener en el comportamiento de la mezcla. Las cuatro características son:

- Densidad de la mezcla
- Vacíos de aire, o simplemente vacíos.
- Vacíos en el agregado mineral.
- Contenido de asfalto

2.1.4.1. Densidad de la mezcla

La densidad de la mezcla compactada está definida como su peso unitario (el peso de un volumen específico de la mezcla). La densidad es una característica muy importante debido a que es esencial tener una alta densidad en el pavimento terminado para obtener un rendimiento duradero.

En las pruebas y el análisis del diseño de mezclas, la densidad de la mezcla compactada se expresa, generalmente, en kilogramos por metro cúbico. La densidad es calculada al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua (1000 kg/m³). La densidad obtenida en el laboratorio se convierte en la densidad patrón, y es usada como referencia para determinar si la densidad del pavimento terminado es o no, adecuada. Las especificaciones usualmente requieren que la densidad del pavimento sea un porcentaje de la densidad del laboratorio. Esto se debe a que rara vez la compactación in situ logra las densidades que se obtienen usando los métodos normalizados de compactación de laboratorio. (Asphalt Institute SP-1, 1996).

2.1.4.2. Vacíos de aire

Los vacíos de aire son espacios pequeños de aire, o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios adonde pueda fluir el asfalto durante su compactación adicional. El porcentaje permitido de vacíos (en muestras de laboratorio) para capas de base y capas superficiales está entre 3 y 5 por ciento, dependiendo del diseño específico.

La durabilidad de un pavimento asfáltico es función del contenido de vacíos. La razón de esto es que entre menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla. Un contenido demasiado alto de vacíos proporciona pasajes, a través de la mezcla, por los cuales puede entrar el agua y el aire, y causar deterioro. Por otro lado, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación de asfalto, una condición donde el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie.

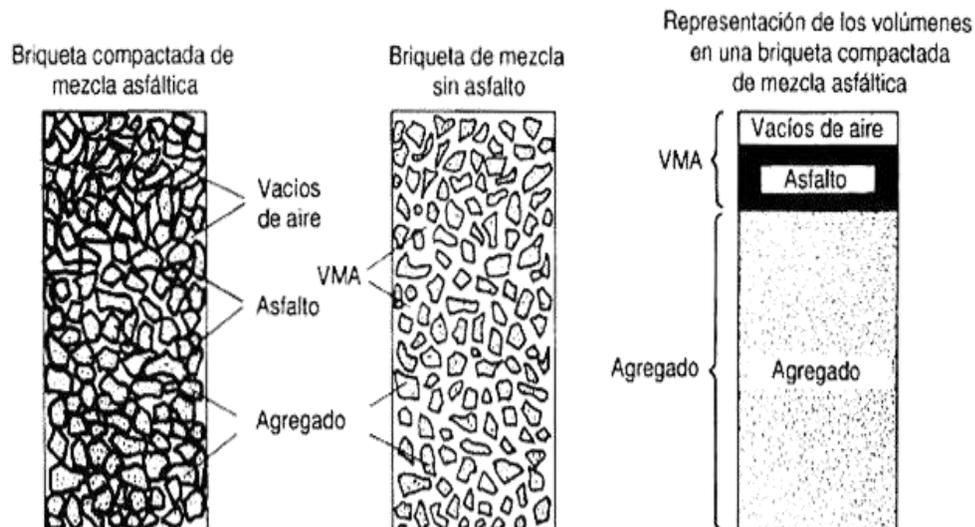
La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre más alta la densidad menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa. Las especificaciones de la obra requieren, usualmente, una densidad que permita acomodar el menor número posible (en la realidad) de vacíos: preferiblemente menos del 8 por ciento.

2.1.4.3. Vacíos en el agregado mineral

Los vacíos en el agregado mineral (V.M.A) son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado en una mezcla compactada de pavimentación, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto.

El V.M.A representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto (todo el asfalto menos la porción que se pierde en el agregado) y el volumen de vacíos necesario en la mezcla. Cuando mayor sea el V.M.A más espacio habrá disponible para las películas de asfalto.

Figura N° 2 Ilustración del V.M.A en una probeta de mezcla compactada



(Nota: para simplificar el volumen de asfalto absorbido no es mostrado)

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de mezcla asfáltica en caliente.

Asphalt Institute MS-22

Existen valores mínimos para V.M.A los cuales están recomendados y especificados como función del tamaño del agregado. Estos valores se basan en el hecho de que cuanto más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más durables será la mezcla. La fig.1. ilustra el concepto de V.M.A y la tabla 1 presenta los valores requeridos.

Tabla N° 1 Vacíos en el agregado mineral (requisitos de VMA)

Tamaño máximo en (mm) porcentaje		V.M.A mínimo, por ciento vacíos de diseño, por ciento		
mm	in	3.0	4.0	5.0
1,18	N°16	21,5	22,5	23,5
2,36	N°8	19	20	21
4,75	N°4	16	17	18
9,5	3/8.	14	15	16
12,5	1/2.	13	14	15
19	3/4.	12	13	14
25	1	11	12	13
37,5	1,5	10	11	12
50	2	9,5	10,5	11,5
63	2,5	9	10	11

1. Especificación normal para tamaños de tamices usados en pruebas, ASTM E 11 (AASHTO M 92)
2 El tamaño máximo nominal de partícula es un tamaño más grande que el primer tamiz que retiene más de 10% de material
3 Interpola el VMA mínimo para los valores de vacíos de diseño que se encuentren entre los que están citados.

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de mezcla asfáltica en caliente.

Asphalt Institute MS-22

Para que pueda lograrse un espesor durable de película de asfalto, se debe tener valores mínimos de VMA. Un aumento en la densidad de la graduación del agregado, hasta el punto donde se obtengan valores de VMA por debajo del mínimo especificado, puede resultar en películas delgadas de asfalto y en mezclas de baja durabilidad y apariencia seca. Por lo tanto, es contraproducente y perjudicial, para la calidad del pavimento, disminuir el VMA para economizar el contenido de asfalto.

2.1.4.4. Contenido de asfalto

La proporción de asfalto en la mezcla es importante y debe ser determinada exactamente en el laboratorio, y luego controlada con precisión en la obra.

El contenido de asfalto de una mezcla particular se establece usando los criterios (discutidos más adelante) dictados por el método de diseño seleccionado.

El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende, en gran parte, de las características del agregado tales como la granulometría y la capacidad de absorción. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo del asfalto. Entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor será el área superficial total, y, mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir, uniformemente, todas las partículas. Por otro lado, las mezclas más gruesas (agregados más grandes) exigen menos asfalto debido a que poseen menos área superficial total. (Cepeda, 2002).

La relación entre el área superficial del agregado y el contenido óptimo de asfalto es más pronunciada cuando hay relleno mineral (fracciones muy finas de agregado que pasan a través del tamiz de 0.075 mm (N.º 200)). Los pequeños incrementos en la cantidad de relleno mineral, pueden absorber, literalmente, gran parte del contenido de asfalto, resultando en una mezcla inestable y seca. Las pequeñas disminuciones tienen el efecto contrario: poco relleno mineral resulta en una mezcla muy rica (húmeda). Cualquier variación en el contenido o relleno mineral causa cambios en las propiedades de la mezcla, haciéndola variar de seca a húmeda. Si una mezcla contiene poco o demasiado, relleno mineral, cualquier ajuste arbitrario, para corregir la situación, probablemente la empeorará. En vez de hacer ajustes arbitrarios, se deberá efectuar un muestreo y unas pruebas apropiadas para determinar las causas de las variaciones y, si es necesario, establecer otro diseño de mezcla.

La capacidad de absorción (habilidad para absorber asfalto) del agregado usado en la mezcla es importante para determinar el contenido óptimo de asfalto. Esto se debe a que se tiene que agregar suficiente asfalto en la mezcla para permitir absorción, y para que además se puedan cubrir las partículas con una película adecuada de asfalto. Los técnicos hablan de dos tipos de asfalto cuando se refieren al asfalto absorbido y al no absorbido: contenido total de asfalto y contenido efectivo de asfalto.

El contenido total de asfalto es la cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla. El contenido efectivo de asfalto es el

volumen de asfalto no absorbido por el agregado; es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva sobre la superficie de los agregados. El contenido efectivo de asfalto se obtiene al restar la cantidad absorbida de asfalto del contenido total de asfalto.

La capacidad de absorción de un agregado es, obviamente, una característica importante en la definición del contenido de asfalto de una mezcla. Generalmente se conoce la capacidad de absorción de las fuentes comunes de agregados, pero es necesario efectuar ensayos cuidadosos cuando son usadas fuentes nuevas. (Cepeda, 2002).

2.1.5. Propiedades consideradas en el diseño de mezclas

Las buenas mezclas asfálticas en caliente trabajan bien debido a que son diseñadas, producidas y colocadas de tal manera que se logra obtener las propiedades deseadas. Hay varias propiedades que contribuyen a la buena calidad de pavimentos de mezclas en caliente. Estas incluyen la estabilidad, la durabilidad, la impermeabilidad, la trabajabilidad, la flexibilidad, la resistencia a la fatiga y la resistencia al deslizamiento.

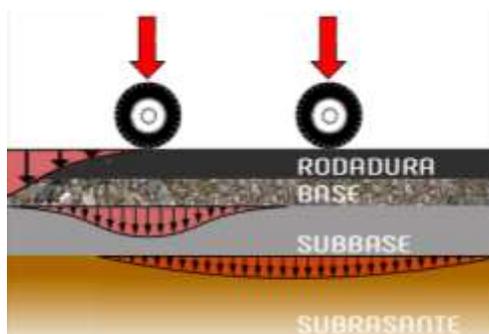
El objetivo primordial del procedimiento de diseño de mezclar es el de garantizar que la mezcla de pavimentación posea cada una de estas propiedades. Por lo tanto, hay que saber qué significa cada una de estas propiedades, cómo es evaluada, y qué representa en términos de rendimiento del pavimento.

2.1.5.1. Estabilidad

La estabilidad de un asfalto es su capacidad de resistir desplazamientos y deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y lisura bajo cargas repetidas, un pavimento inestable desarrolla ahuellamientos (canales), ondulaciones (corrugación) y otras señas que indican cambios en la mezcla.

Los requisitos de estabilidad solo pueden establecerse después de un análisis completo del tránsito, debido a que las especificaciones de estabilidad para un pavimento dependen del tránsito esperado. Las especificaciones de estabilidad deben ser lo suficientemente altas para acomodar adecuadamente el tránsito esperado, pero no más altas de lo que exijan las condiciones de tránsito.

Figura N° 3 Carga que sufre una mezcla asfáltica



Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=zd9mOkw2308>.

Valores muy altos de estabilidad producen un pavimento demasiado rígido y, por lo tanto, menos durable que lo deseado.

La estabilidad de una mezcla depende de la fricción y la cohesión interna. La fricción interna en las partículas de agregado (fricción entre partículas) está relacionada con características del agregado tales como forma y textura superficial. La cohesión resulta de la capacidad ligante del asfalto. Un grado propio de fricción y cohesión interna, en la mezcla, previene que las partículas de agregado se desplacen unas respecto a otras debido a las fuerzas ejercidas por el tráfico.

En términos generales, entre más angular sea la forma de las partículas de agregado y más áspera sea su textura superficial, más alta será la estabilidad de la mezcla. Cuando no hay agregados disponibles con características de alta fricción interna, se pueden usar mezclas más económicas, en lugares donde se espera tráfico liviano, utilizando agregados con valores menores de fricción interna.

La fuerza ligante de la cohesión aumenta con aumentos en la frecuencia de carga (tráfico). La cohesión también aumenta a medida que la viscosidad del asfalto aumenta, o a medida que la temperatura del pavimento disminuye. Adicionalmente, y hasta cierto nivel, la cohesión aumenta con aumentos en el contenido de asfalto. Cuando se sobrepasa este nivel, los aumentos en el contenido de asfalto producen una película demasiado gruesa sobre las partículas de agregado, lo cual resulta en pérdida de fricción entre partículas.

Existen muchas causas y efectos asociados con una estabilidad insuficiente en los pavimentos.

Tabla N° 2 Causas y efectos de inestabilidad en el pavimento

Causas	Efectos
Exceso de asfalto en la mezcla	Ondulaciones, ahuellamientos y afloramiento o exudación.
Exceso de arena de tamaño medio en la mezcla	Baja resistencia durante la compactación y posteriormente, durante un cierto tiempo; dificultad para la compactación.
Agregado redondeado sin, o con pocas, superficies trituradas	Ahuellamiento y canalización.

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de mezcla asfáltica en caliente.

Cap.3, pág. 61 del Asphalt Institute MS-22

2.1.5.2. Durabilidad

La durabilidad de un pavimento es su habilidad para resistir factores tales como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades de asfalto (polimerización y oxidación), y separación de las películas de asfalto. Estos factores pueden ser el resultado de la acción del clima, el tránsito, o una combinación de ambos.

Generalmente, la durabilidad de una mezcla puede ser mejorada en tres formas. Estas son: usando la mayor cantidad posible de asfalto, usando una graduación densa de agregado resistente a la separación, y diseñando y compactando la mezcla para obtener la máxima impermeabilidad. La mayor cantidad posible de asfalto aumenta la durabilidad porque las películas gruesas de asfalto no se envejecen o endurecen tan rápido como lo hacen las películas delgadas.

En consecuencia, el asfalto retiene por más tiempo sus características originales. Además, el máximo contenido posible de asfalto sella eficazmente un gran porcentaje de vacíos interconectados en el pavimento, haciendo difícil la penetración del aire y del agua. Por

supuesto, se debe dejar un cierto porcentaje de vacíos en el pavimento para permitir la expansión del asfalto en los tiempos cálidos.

Figura N° 4 Muestra de poca durabilidad de la mezcla asfáltica



Fuente: <https://es.slideshare.net/leonel321/mezclas-asfálticas-2>

Una graduación densa de agregado firme y duro a la separación, contribuye de tres maneras a la durabilidad del pavimento. Una graduación densa proporciona un contacto más cercano entre las partículas del agregado, lo cual mejora la impermeabilidad de la mezcla. Un agregado firme y duro resiste la desintegración bajo las cargas del tránsito. Un agregado resistente a la separación resiste la acción del agua y el tránsito, las cuales tienden a separar la película de asfalto de las partículas de agregado, conduciendo a la desintegración del pavimento. La resistencia de una mezcla a la separación puede ser mejorada, bajo ciertas condiciones, mediante el uso de compuestos adhesivos, o rellenos como la cal hidratada. La intrusión del aire y agua en el pavimento puede minimizarse si se diseña y compacta la mezcla para darla al pavimento el máximo de impermeabilidad posible. Existen muchas causas y efectos con una poca durabilidad del pavimento.

Tabla N° 3 Causas y efectos de una poca durabilidad

Causas	Efectos
Bajo contenido de asfaltos	Endurecimiento rápido del asfalto y desintegración por pérdida de agregado.
Alto contenido de vacíos debido al diseño o a la falta de compactación	Endurecimiento temprano del asfalto seguido por agrietamiento o desintegración.
Agregados susceptibles al agua (Hidrofilits)	Películas de asfalto se desprenden del agregado dejando un pavimento desgastado, o desintegrado.

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de mezcla asfáltica en caliente

2.1.5.3. Impermeabilidad

La impermeabilidad de un pavimento es la resistencia al paso de aire y agua hacia su interior, o a través de él. Esta característica está relacionada con el contenido de vacíos de la mezcla compactada, y es así como gran parte de las discusiones sobre vacíos en las secciones de diseño de mezcla se relaciona con impermeabilidad. Aunque el contenido de vacíos es una indicación del paso potencial de aire y agua a través de un pavimento, la naturaleza de estos vacíos es muy importante que su cantidad.

El grado de impermeabilidad está determinado por el tamaño de los vacíos, sin importar si están o no conectados, y por el acceso que tienen a la superficie del pavimento.

Figura N° 5 Extracto de mezcla asfáltica permeable

Fuente: <https://es.slideshare.net/leonel321/mezclas-asfálticas-2>

Aunque la impermeabilidad es importante para la durabilidad de las mezclas compactadas, virtualmente todas las mezclas asfálticas usadas en la construcción de carreteras tienen cierto grado de permeabilidad. Esto es aceptable, siempre y cuando la permeabilidad esté dentro de los límites especificados. (Cepeda, 2002).

Tabla N° 4 Causas y efectos de la permeabilidad

Causas	Efectos
Bajo contenido de asfalto	Las películas delgadas de asfalto causarán tempranamente, un envejecimiento y una desintegración de la mezcla.
Alto contenido de vacíos en la mezcla de diseño	El agua y el aire pueden entrar fácilmente en el pavimento, causando oxidación y desintegración de la mezcla.
Compactación inadecuada.	Resultará en vacíos altos en el pavimento, lo cual conducirá a la infiltración de agua y baja estabilidad.

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de mezcla asfáltica en caliente.

2.1.5.4. Trabajabilidad

La trabajabilidad está descrita por la facilidad con que una mezcla de pavimentación puede ser colocada y compactada. Las mezclas que poseen buena trabajabilidad son fáciles de colocar y compactar; aquellas con mala trabajabilidad son difíciles de colocar y compactar. La trabajabilidad puede ser mejorada modificando los parámetros de la mezcla, el tipo de agregado, y/o la granulometría.

Las mezclas gruesas (mezclas que contienen un alto porcentaje de agregado grueso) tienen una tendencia a segregarse durante su manejo, y también pueden ser difíciles de compactar. A través de mezclas de prueba en el laboratorio puede ser posible adicionar agregado fino, y tal vez asfalto, a una mezcla gruesa, para volverla más trabajable. En tal caso se deberá tener cierto cuidado para garantizar que la mezcla modificada cumpla con los otros criterios de diseño, tales como contenido de vacíos y estabilidad.

Un contenido demasiado alto de relleno también puede afectar la trabajabilidad. Puede ocasionar que la mezcla se vuelva muy viscosa, haciendo difícil su compactación.

Figura N° 6 Trabajabilidad de una mezcla asfáltica



Fuente: <https://es.slideshare.net/leonel321/mezclas-asfálticas-2>

La trabajabilidad es especialmente importante en sitios donde se requiere colocar y rastrear a mano cantidades considerables de mezcla, como por ejemplo alrededor de tapas de alcantarillados, curvas pronunciadas y otros obstáculos similares. Es muy importante usar mezclas trabajables en dichos sitios.

Las mezclas que son fácilmente trabajables o deformables se conocen como mezclas tiernas. Las mezclas tiernas son demasiado inestables para ser colocadas y compactadas apropiadamente. Usualmente son el producto de una falta de relleno mineral, demasiada arena de tamaño mediano., partículas lisas y redondeadas de agregado, y/o demasiada humedad en la mezcla.

Aunque el asfalto no es la principal causa de los problemas de trabajabilidad, sí tiene algún efecto sobre esta propiedad. Debido a que la temperatura de la mezcla afecta la viscosidad del asfalto, una temperatura demasiado baja hará que la mezcla sea poco trabajable, mientras que una temperatura demasiado alta podrá hacer que la mezcla se vuelva tierna. El grado y el porcentaje de asfalto también pueden afectar la trabajabilidad de la mezcla.

Tabla N° 5 Causas y efectos de problemas en la trabajabilidad

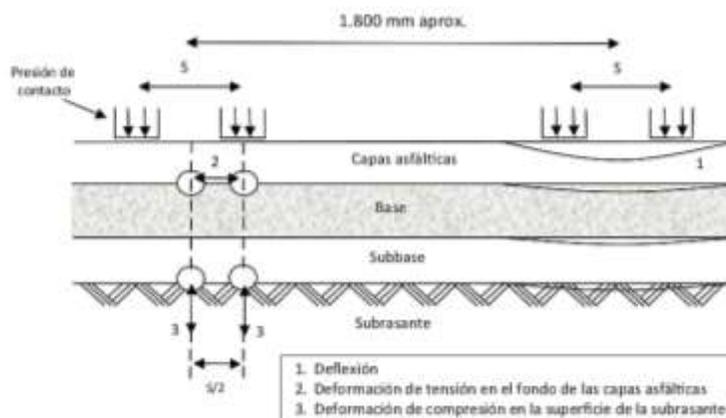
Causas	Efectos
Tamaño máximo de partícula: grande	Superficie áspera, difícil de colocar.
Demasiado agregado grueso	Puede ser difícil de compactar
Temperatura muy baja de mezcla	Agregado sin revestir, mezcla poco durable superficie áspera, difícil de compactar
Demasiada arena de tamaño medio	La mezcla se desplaza bajo la compactadora y permanece tierna o blanda.
Bajo contenido de relleno mineral	Mezcla tierna, altamente permeable
Alto contenido de relleno mineral	Mezcla muy viscosa, difícil de manejar, poco durable.

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de mezcla asfáltica en caliente.

2.1.5.5. Flexibilidad

Flexibilidad es la capacidad de un pavimento asfáltico para acomodarse, sin que se agriete, a movimientos y asentamientos graduales de la subrasante. La flexibilidad es una característica deseable en todo pavimento asfáltico debido a que virtualmente todas las subrasantes se asientan (bajo cargas) o se expanden (por expansión del suelo).

Figura N° 7 Efecto de la flexibilidad en la mezcla asfáltica



Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=zd9mOkw2308>.

Una mezcla de granulometría abierta con alto contenido de asfalto es, generalmente, más flexible que una mezcla densamente graduada y bajo contenido de asfalto. Algunas veces los requerimientos de flexibilidad entran en conflicto con los requisitos de estabilidad, de tal manera que se debe buscar el equilibrio de los mismos.

2.1.5.6. Resistencia a la fatiga

La resistencia a la fatiga de un pavimento es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito. Se ha demostrado, por medio de la investigación, que los vacíos (relacionados con el contenido de asfalto) y la viscosidad del asfalto tienen un efecto considerable sobre la resistencia a la fatiga. A medida que el porcentaje de vacíos en un pavimento aumenta, ya sea por diseño o por falta de compactación, la resistencia a la fatiga del pavimento. (El periodo de tiempo durante el cual un pavimento en servicio es adecuadamente resistente a la fatiga) disminuye. Así mismo, un pavimento que contiene asfalto que se ha envejecido y endurecido considerablemente tiene menor resistencia a la fatiga. (Forigua, 2014).

Figura N° 8 Efecto de la poca resistencia a la fatiga de la mezcla asfáltica



Fuente: <https://www.google.com/search?q=propiedades+de+resistencia+ala+fatiga+de+mezclas+asf%C3%A1ltica>

Las características de resistencia y espesor de un pavimento, y la capacidad de soporte de la subrasante, tienen mucho que ver con la vida del pavimento y con la prevención del agrietamiento asociado con cargas de tránsito. Los pavimentos de gran espesor sobre subrasantes resistentes no se flexionan tanto, bajo las cargas, como los pavimentos delgados o aquellos que se encuentran sobre subrasantes débiles.

Tabla N° 6 Causas y efectos de una mala resistencia a la fatiga

Causas	Efectos
Bajo contenido de asfalto	Agrietamiento por fatiga
Vacíos altos de diseño	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga.
Falta de compactación	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga.
Espesor inadecuado de pavimento	Demasiada flexión seguida por agrietamiento por fatiga.

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de mezcla asfáltica en caliente.

2.1.5.7. Resistencia al deslizamiento

Resistencia al deslizamiento es la habilidad de una superficie de pavimento de minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie está mojada. Para obtener buena resistencia al deslizamiento, el neumático debe ser capaz de mantener contacto con las partículas de agregado en vez de rodar sobre una película de agua en la superficie del pavimento (hidroplaneo). La resistencia al deslizamiento se mide en terreno con una rueda normalizada bajo condiciones controladas de humedad en la superficie del pavimento, y a una velocidad de 65 km/hr (40 mi/hr).

Una superficie áspera y rugosa de pavimento tendrá mayor resistencia al deslizamiento que una superficie lisa. La mejor resistencia al deslizamiento se obtiene con un agregado de textura áspera, en una mezcla de gradación abierta y con tamaño máximo de 9.5 mm (3/8 pulgadas) a 12.5 mm (1/2 pulgada). Además de tener una superficie áspera, los agregados deben resistir el pulimiento (alisamiento) bajo el tránsito. Los agregados calcáreos son más susceptibles al pulimiento que los agregados silíceos. Las mezclas inestables que tienden a deformarse o a exudar (flujo de asfalto a la superficie) presentan problemas graves de resistencia al deslizamiento.

Tabla N° 7 Causas y efectos de poca resistencia al deslizamiento

Causas	Efectos
Exceso de asfalto	Exudación, poca resistencia al deslizamiento
Agregado mal graduado o con mala textura	Pavimento liso, posibilidad de hidropneumático
Agregado pulido en la mezcla	Poca resistencia al deslizamiento

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de mezcla asfáltica en caliente.

2.1.6. Propiedades físicas de los agregados

Los agregados para mezclas asfálticas en caliente son usualmente clasificados por tamaños en agregados gruesos, agregados finos, o filler mineral. ASTM define a los agregados gruesos como las partículas retenidas en la malla N°4; y filler mineral como el material que pasa la malla N°200 en un porcentaje mínimo de 70%.

Las especificaciones de agregados gruesos, finos, y filler mineral se dan en ASTM D-692, D-1073 y D-242, respectivamente. Los agregados adecuados para su uso en mezclas asfálticas en caliente se determinan evaluándolos para las siguientes características mecánicas:

- Tamaño y gradación.
- Limpieza / materiales deletéreos.
- Tenacidad / dureza.
- Durabilidad / resistencia.
- Textura superficial.
- Forma de partículas.
- Absorción.
- Afinidad por el asfalto

2.2. Método de diseño Marshall

El concepto del método Marshall para diseño de mezclas de pavimentación fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del departamento de autopistas del estado de

Mississippi. El cuerpo de ingenieros de Estados Unidos, a través de una extensiva investigación y estudios de correlación, mejoró y adicionó ciertos aspectos al procedimiento de prueba Marshall y desarrolló un criterio de diseño de mezclas.

El método Marshall usa muestras de ensayo (probetas) de 64mm. (2,5pulg.) de espesor por 102mm. (4pulg.) de diámetro. Una serie de muestras de ensayo, cada una con la misma combinación de agregados, pero con diferentes contenidos de asfalto, es preparada usando un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar la mezcla asfáltica.

Solo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1”) o menor. El método modificado se desarrolló para tamaños máximos arriba de 38 mm (1.5”). Está pensado para diseño en laboratorio y control de campo de mezclas asfálticas en caliente con graduación densa.

Debido a que la prueba de estabilidad es de naturaleza empírica, la importancia de los resultados en términos de estimar el comportamiento en campo se pierde cuando se realizan modificaciones a los procedimientos estándar. El método Marshall utiliza especímenes de prueba estándar de una altura de 64 mm (2 ½”) y 102 mm (4”) de diámetro. Se preparan mediante un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar mezclas de asfalto-agregado. (ASTM D1559).

Los dos aspectos principales del método de diseño son, la densidad-análisis de vacíos y la prueba de estabilidad y flujo de los especímenes compactados. La estabilidad del espécimen de prueba es la máxima resistencia en N (lb) que un espécimen estándar desarrollará a 60 ° C cuando es ensayado. El valor de flujo es el movimiento total o deformación, en unidades de 0.25 mm (1/100”), que ocurre en el espécimen entre estar sin carga y el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad. (Forigua, 2014).

La selección del contenido óptimo de asfalto depende de muchos criterios que se discutirán a continuación. Por ejemplo, el rango de vacíos de aire es de 3% al 5%. Todas las propiedades medidas y calculadas bajo este contenido de asfalto deberán ser evaluadas comparándolas con los criterios para el diseño de mezclas. Si todos los criterios se cumplen, entonces se tendrá el diseño preliminar de la mezcla asfáltica, en caso de que un criterio no se cumpla, se necesitará hacer ajustes, o rediseñar la mezcla.

2.2.1. Criterios para determinar el contenido óptimo de asfalto

El contenido óptimo de asfalto se determina a partir de los datos descritos anteriormente, considerando los resultados de las curvas correspondientes a Estabilidad, Peso Unitario y Porcentaje de Vacíos, en las cuales se determina el contenido de asfalto para conseguir:

- a. Estabilidad máxima.
- b. Peso unitario máximo.
- c. El valor medio del porcentaje de vacíos.

El contenido óptimo de asfalto será el promedio numérico de los contenidos de asfalto indicados anteriormente.

Los criterios recomendados por el Instituto del Asfalto (The Asphalt Institute's, Manual (MS-2).), para la adopción de un diseño de mezcla de concreto asfáltico, se resumen en la siguiente Tabla:

Tabla N° 8 Criterios mínimos y máximos de las propiedades Marshall

Especificaciones del método Marshall	Tráfico Liviano		Tráfico Mediano		Tráfico Pesado	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
N° de golpes	35		50		75	
Estabilidad Newtons	3336		5338		8006	
Libras	750		1200		1800	
Fluencia 0,25 mm (0,01")	8	18	8	16	8	
% de Vacíos	3	5	3	5	3	5

Fuente: The Asphalt Institute's, Manual (MS-2).

Una buena mezcla asfáltica en caliente trabaja bien debido a que son producidas de manera que logren obtener las propiedades mecánicas deseadas; estas propiedades están directamente relacionadas con la calidad de la mezcla asfáltica. Dentro de las propiedades mecánicas más relevantes tenemos a la estabilidad, vacíos y el flujo.

2.2.2. Propiedades método Marshall

Es una característica mensurable capaz de calificar un comportamiento o una respuesta del mismo a sollicitaciones externas.

2.2.2.1. Fluencia

Es la deformación total expresada en mm que experimenta la probeta desde el comienzo de la aplicación de la carga en el ensayo de estabilidad, hasta el instante de producirse la falla.

Se mide en centésimas de pulgada y representa la deformación de la briqueta; está definida por la disminución del diámetro vertical de la briqueta.

Las mezclas que tienen valores bajos de flujo y valores altos de estabilidad son consideradas muy frágiles y se consideran rígidas; por el contrario, las mezclas que tienen valores muy altos de flujo y valores bajos de estabilidad son consideradas muy flexibles.

Para la medición de la estabilidad como el flujo se requiere de la prueba Marshall la cual ayudará a medir la resistencia a la deformación de la mezcla (estabilidad) y la deformación, bajo carga, que ocurre en la mezcla.

2.2.2.2. Estabilidad

Esta propiedad se refiere a la capacidad de la mezcla asfáltica para resistir la deformación y el desplazamiento, debido a las cargas que resultan del tránsito vehicular. Un pavimento es estable cuando conserva su forma y es inestable cuando desarrolla deformaciones permanentes, corrugaciones y otros signos de desplazamiento de la mezcla.

La estabilidad depende, sobre todo de la fricción interna y la cohesión. La fricción interna depende de la textura superficial, forma de la partícula, y granulometría del agregado; así como de la densidad de la mezcla, la cantidad y el tipo de asfalto; mientras que la cohesión depende del contenido de asfalto. La cohesión se incrementa con el incremento del contenido de asfalto hasta un punto óptimo después del cual el aumento en el contenido de asfalto forma una película demasiado gruesa en las partículas de asfalto, lo que produce una pérdida de fricción entre las partículas de agregado.

El valor de la estabilidad determinado por el método Marshall es una medida de la carga bajo la cual una briqueta cede o falla totalmente durante el ensayo. Cuando la carga es aplicada lentamente, los cabezales superior e inferior se acercan y la carga sobre la

briqueta aumenta al igual que la lectura, una vez alcanzado el punto de fallo se suspende la carga y se toma lectura de la prensa.

Los valores de estabilidad Marshall de los especímenes de mezclas asfálticas en caliente compactadas varían de acuerdo a la gradación del agregado y al contenido de asfalto de la mezcla.

2.2.2.3. Porcentaje de vacíos de la mezcla

El porcentaje de vacíos óptimo de diseño de una mezcla asfáltica debe estar entre el 3% y 5%, los contenidos de vacíos menores a 3% para el porcentaje óptimo del ligante pueden originar que la mezcla exude y se produzca ahuellamientos a altas temperaturas.

Los vacíos son pequeñas bolsas de aire que se encuentran atrapadas entre las partículas de la mezcla; este porcentaje de vacíos se calcula a partir del peso específico de cada probeta compactada y del peso específico teórico de la mezcla sin vacíos.

Este parámetro es muy importante para que no se produzcan deformaciones plásticas con el paso de las cargas y/o por variaciones térmicas.

Los valores de % de vacíos de un espécimen de mezcla asfáltica compactada debe estar entre 5,00% y 3,00%; ya que al tener valores inferiores al 5,00% se logra asegurar la impermeabilidad de la mezcla asfáltica y con valores superiores al 3,00% se asegura que hay suficiente espacio de vacíos en la mezcla para la compactación adicional que recibe la mezcla asfáltica durante el tiempo de vida útil en la obra.

2.2.2.4. Porcentaje de vacíos del agregado mineral (v.a.m)

Otro parámetro relacionado con el ahuellamiento y la exudación, que está relacionado al contenido de vacíos. el v.a.m. es una propiedad que depende de las propiedades de los agregados de la granulometría y del contenido de asfalto.

2.2.2.5. Densidad

La densidad de la mezcla compactada está definida como su peso unitario (el peso de un volumen específico de la mezcla). La densidad es una característica muy importante

debido a que es esencial tener una alta densidad en el pavimento terminado para obtener un rendimiento duradero.

2.3. Pastina

Pastina Klaukol Clásica 1-4 mm es un mortero en polvo basado en cementos áridos de granulometría seleccionada y aditivos especiales, que producen en el mortero la virtud de mejorar la relación agua-cemento y provocar plasticidad y penetración aún con consistencias no típicamente usadas, lográndose de esta forma una prestación final. Su innovadora fórmula posibilita su fácil mezclado y extensión, ya que es más liviana que las pastinas comunes. Este producto por poseer aditivos fungicidas, reduce la formación de esporas fungicidas del tipo penicillium, aureobasidium y aspergilus otorgando un plus protector altamente eficaz contra hongos y levaduras reduciendo el deterioro estético a largo plazo.

Figura N° 9 Pastina Klaukol Clásica 1-4 mm



Fuente: <https://www.morales.com.bo/pastina-klaukol-bruma-normal-1kg/p>

2.4. Filler

De acuerdo con ASTM (American Society of Testing and Materials), standard D-242, 70 % o más de las partículas del filler mineral pasan la malla N° 200 (75 μ m).

El “filler” empleado en mezclas asfálticas es un material finamente molido o pulverizado, cuyo tamaño de partículas pasa por el tamiz número 200 (0.075 mm). El término “filler”

proviene del inglés y significa “rellenador o llenante”, debido a que inicialmente se consideraba a este material únicamente como un material de relleno de vacíos. Este concepto ha evolucionado y actualmente se considera al filler no simplemente como un material inerte relleno sino como un material que al mezclarse íntimamente con el asfalto desempeña cierta actividad que modifica algunas de las propiedades del sistema.

Comúnmente el filler es considerado como parte del sistema de agregados. Sin embargo, es claro que el filler realmente está embebido en el ligante asfáltico, de tal forma que el “mástico” (Sistema filler-asfalto) está fijando o aglomerando los agregados gruesos (relativamente más grandes). Además, la naturaleza y cantidad de filler en la mezcla asfáltica es especialmente importante en ciertos tipos de mezclas asfálticas como las SMA (Stone Mastic Asphalt), en las cuales el filler mineral contribuye significativamente a la compactabilidad, impermeabilidad, durabilidad y desempeño en campo.

2.4.1. Tipos y características de los fillers

Los fillers son sustancias finamente divididas las cuales son insolubles en asfalto pero que pueden ser dispersadas en él, como un medio de modificar sus propiedades mecánicas y consistencia. Sus sustancias minerales pueden ser materiales orgánicos tales como madera o corcho (raramente se utilizan), los típicos fillers minerales son: cal, cemento, polvo de tiza, cenizas de combustible pulverizada, talco, sílice, etc.

Cuando se trata de un producto comercial, se garantiza perfectamente su control y se conocen sus propiedades tanto físicas como químicas y su futuro comportamiento en la mezcla. En cambio, cuando se utiliza filler de recuperación, es decir, aquél procedente de la propia trituración de los áridos, no se puede asegurar con certeza y de forma continua sus características y comportamiento en la mezcla, y se debe determinar previamente su adecuación para el empleo en la mezcla bituminosa.

2.4.1.1. Fillers minerales

También llamado agregado mineral, ha sido cubierto con asfalto, adquiere características diferentes, por ejemplo, la facilidad con la cual puede compactarse es completamente diferente. Su capacidad de repeler el agua se incrementa de acuerdo al espesor de la película de asfalto. En consecuencia, hay solamente una forma segura de diseñar una

mezcla asfáltica, mediante la preparación de mezclas en laboratorio, y la verificación en sitio de que las características físicas establecidas en laboratorio se cumplan en la obra, para garantizar el comportamiento del pavimento.

los fillers minerales más comunes son: cal, cemento, polvo de tiza, cenizas de combustible pulverizada, talco, sílice, etc. La calidad de las mezclas asfálticas para pavimentación se puede resumir en tres propiedades principales que son: Resistencia ante la deformación, flexibilidad y durabilidad, en las cuales el filler tiene una influencia importante, ya que su inclusión permite:

- ✓ **Mejorar el cerrado de la mezcla sin el empleo exagerado de asfalto.** - Esto debido a que el filler actúa como rellenedor de vacíos, lo cual permite disminuir espacios libres existentes entre agregados mayores.
- ✓ **Incrementar la resistencia a la deformación de la mezcla asfáltica.** - Esto debido a que el filler aumenta de manera importante la viscosidad del asfalto, mejor dicho, la combinación filler-asfalto o “mástico” es un sistema de alta viscosidad el cual participa de manera importante en la resistencia ante la deformación.
- ✓ **Incrementar la durabilidad de la mezcla.** - Esto debido a que el filler actúa como rellenedor de vacíos, lo cual permite disminuir la porosidad dificultando la entrada de agentes agresivos como agua y aire; Además de que es el principal aglomerante dentro de la mezcla asfáltica y mantiene unidos a los agregados gruesos.

En el momento de aplicación del filler deberá estar seco y exento de grumos. El material que pasa el tamiz N°200 sea el polvo mineral deberá cumplir con la siguiente regla: más del 50% deberá hacerlo por tamizado en seco con relación a la vía húmeda. El polvo mineral deberá ser no plástico o de baja plasticidad.

- Fillers de asbestos no son adecuados para aplicaciones en la cual la mezcla es utilizada como sellante o un protector en continuo contacto con un líquido, debido a que las fibras de asbesto pueden transportar el líquido a través del asfalto.
- Fillers que pueden absorber agua no deben ser utilizados cuando el asfalto está en contacto con el agua.
- Si el asfalto va ser utilizado como un proyectivo resistente a los ácidos, los fillers deben ser sílices.

- El uso de cal como filler mejora la adhesión del asfalto a las superficies minerales (piedra, vidrio, etc.) en presencia de agua.

2.4.1.2. Efecto del filler como componente de las mezclas asfálticas

- Uno de los principales efectos que tiene la llenante mineral sobre los pavimentos es el aumento considerable de la durabilidad debido a que se reduce el contenido de vacíos y disminuye la penetración del agua a las capas.
- Al incrementarse el contenido de llenante aumenta la estabilidad de la mezcla hasta unos valores máximo, perdiendo luego la estabilidad gradualmente.
- Un aumento excesivo de llenante es la mezcla asfáltica también genera problemas en su comportamiento, consigue que el pavimento se endurezca demasiado y consecuentemente se vuelva frágil ocasionando fisuras en la capa asfáltica.
- En la caracterización físico-química del filler, el factor más significativo es la intensidad de absorción, esta depende del tipo de filler principalmente, sus características como la composición mineralógica, características estructurales, textura entre otras.

Además, el filler mineral tiene un papel fundamental en el comportamiento de las mezclas asfálticas debido a que:

- Forma parte del esqueleto mineral y soporta las tensiones por rozamiento interno o por contacto entre partículas.
- Rellena los vacíos del esqueleto de agregados gruesos y finos, por lo tanto impermeabiliza y densifica el esqueleto.
- Sustituye parte del asfalto que de otra manera sería necesario para conseguir unos vacíos en mezcla suficientemente bajos.
- Proporciona puntos de contacto entre agregados de mayor tamaño y los encaja limitando sus movimientos, aumentando así la estabilidad del conjunto.
- Facilita la compactación, actuando a modo de rodamiento entre los agregados más gruesos.

2.4.2. Elección del filler adecuado

En el momento de aplicación el filler deberá estar seco y exento de grumos. El material que pasa el tamiz N°200 sea el polvo mineral deberá cumplir con la siguiente regla: más

del 50% deberá hacerlo por tamizado en seco con relación a la vía húmeda. El polvo mineral deberá ser no plástico o de baja plasticidad.

- Fillers de asbestos no son adecuados para aplicaciones en las cuales, la mezcla es utilizada como sellante o un protector en continuo contacto con un líquido, debido a que las fibras de asbestos pueden transportar el líquido a través del asfalto.
- Fillers que pueden absorber agua no deben ser utilizados cuando el asfalto está en contacto con el agua.
- Si el asfalto va a ser utilizado como un proyectivo resistente a los ácidos, los fillers deben ser sílices.
- El uso de cal como filler mejora la adhesión del asfalto a las superficies minerales (piedra, vidrio, etc.) en presencia de agua.

2.4.3. Influencia del filler en las propiedades de las mezclas asfálticas

La calidad de las mezclas asfálticas para pavimentación se puede resumir en tres propiedades principales que son: Resistencia ante la deformación, flexibilidad y durabilidad, en las cuales el filler tiene una influencia importante ya que su inclusión permite:

- **Mejorar el cerrado de la mezcla sin el empleo exagerado de asfalto**

Esto debido a que el filler actúa como rellenedor de vacíos, lo cual permite disminuir espacios libres existentes entre agregados mayores. Esta actividad además depende de los vacíos de la mezcla, ya que cuando el agregado está bien graduado y la forma de sus partículas permiten una ajustada distribución, entonces la necesidad de agregar filler es menor, incluso puede llegar a ser inconveniente por disminuir exageradamente espacios libres que deben ser ocupados parcialmente por asfalto y en consecuencia se obtendrían mezclas pobres en ligante de menor durabilidad.

- **Incrementar la resistencia a la deformación de la mezcla asfáltica**

Esto debido a que el filler aumenta de manera importante la viscosidad del asfalto, mejor dicho, la combinación filler-asfalto o “mástico” es un sistema de alta viscosidad el cual participa de manera importante en la resistencia ante la deformación.

- **Incrementar la durabilidad de la mezcla**

Esto debido a que el filler actúa como rellenedor de vacíos, lo cual permite disminuir la porosidad dificultando la entrada de agentes agresivos como agua y aire; además que es el principal aglomerante dentro de la mezcla asfáltica y mantiene unidos a los agregados gruesos. (Forigua, 2014).

2.5. Análisis de datos cuantitativos

La estadística es una ciencia que estudia los métodos científicos, para reunir, organizar, resumir y analizar datos, así como para sacar conclusiones y tomar decisiones sobre la base de tales análisis.

Básicamente la estadística se clasifica de dos ramas, las cuales son estadística descriptiva y estadística inferencial.

2.5.1. Estadística descriptiva

La estadística descriptiva es la ciencia que estudia a los métodos para reunir, clasificar, presentar y describir un conjunto de datos. Se considera que el estudio de un conjunto de datos es descriptivo, cuando simplemente se describen o analizan los datos.

2.5.1.1. Distribución de frecuencias

Las distribuciones de frecuencia se exponen, por lo general al inicio del estudio de los métodos estadísticos, debido a que proveen un método de organización de los datos que facilitan su comprensión y una base para simplificar el cálculo de medidas representativas de la población.

Una distribución de frecuencias consiste en la agrupación en diversas categorías o clases de las observaciones tomadas de una población, indicando el número de elementos que pertenecen a cada clase, así como la porción del total de datos que le corresponde a cada una de esas clases. Esta agrupación de los datos permite realizar un mejor análisis del comportamiento de los mismos e inclusive permite llegar a conclusiones sobre su distribución.

La distribución de frecuencias puede ser Discreta o Continua, según la variable sea cuantitativa discreta o cuantitativa continua.

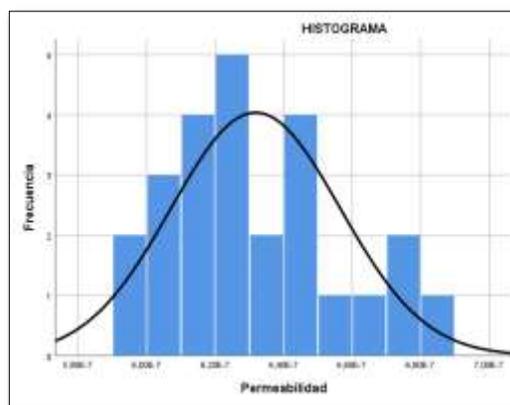
La representación gráfica de una distribución de frecuencias depende del tipo de datos que la constituya. Los datos agrupados en intervalos correspondientes a un carácter cuantitativo, pueden ser representados mediante un histograma.

Se llama histograma a una representación de rectángulos sobre un sistema de ejes coordenados XY. La altura de los rectángulos será proporcional a la frecuencia de clase. El ancho será proporcional a la amplitud de clase. Los rectángulos deben estar unidos entre sí.

Entonces sobre el eje de ordenadas (OY) se indica la frecuencia de clase, sobre el eje de abscisas (OX) se sitúan las marcas de clases, en la parte central de las bases de los rectángulos.

Se emplean los histogramas para representar a una clasificación de datos que es como usualmente se expresan los datos de variable continua, o también a una gran cantidad de datos de variable discreta.

Figura N° 10 Histograma de frecuencias



Fuente: Elaboración propia

2.5.1.2. Medidas estadísticas

Deben su nombre a la característica de que sus valores tienden a ocupar posiciones centrales o intermedias entre el menor y mayor valor del conjunto de datos. Por lo tanto, brindan información sobre el centro de la distribución. Las más usuales son: la media aritmética, la mediana, la media geométrica, la media armónica y la media cuadrática.

Media. - Se define media aritmética de una serie de valores como el resultado producido al sumar todos ellos y dividir la suma por el número total de valores.

Mediana. - Dado un conjunto de valores ordenados, su mediana se define como un valor numérico tal que se encuentra en el centro de la serie, con igual número de valores superiores a él que inferiores. Normalmente, la mediana se expresa como Me.

Moda. - En una serie de valores a los que se asocia una frecuencia, se define moda como el valor de la variable que posee una frecuencia mayor que los restantes. La moda se simboliza normalmente por Mo.

2.5.1.3. Medidas de variabilidad

Indican cuan dispersos o concentrados están los datos. Los más usuales son las que indican la concentración de los valores del conjunto de datos alrededor del valor medio, los más importantes son la desviación media, varianza, la desviación estándar, el coeficiente de variación y el recuento estándar.

Rango: El rango de un conjunto de datos es la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo.

Desviación estándar: Esta medida nos permite determinar el promedio aritmético de fluctuación de los datos respecto a su punto central o media. La desviación estándar nos da como resultado un valor numérico que representa el promedio de diferencia que hay entre los datos y la media. Para calcular la desviación estándar basta con hallar la raíz cuadrada de la varianza

Varianza: Se define como la media de las diferencias cuadráticas de n puntuaciones con respecto a su media aritmética.

2.5.1.4. Asimetría y curtosis

➤ Asimetría

Es una medida de forma de una distribución que permite identificar y describir la manera como los datos tiende a reunirse de acuerdo con la frecuencia con que se hallen dentro de la distribución. Permite identificar las características de la distribución de datos sin necesidad de generar el gráfico. Compara la simetría de una curva de frecuencias, respecto a la curva normal.

Tipos de asimetría:

Asimetría Negativa o a la Izquierda: Se da cuando en una distribución la minoría de los datos está en la parte izquierda de la media. Este tipo de distribución presenta un alargamiento o sesgo hacia la izquierda.

Simétrica: Se da cuando en una distribución se distribuyen aproximadamente la misma cantidad de los datos a ambos lados de la media aritmética. No tiene alargamiento o sesgo.

Asimetría Positiva o a la Derecha: Se da cuando en una distribución la minoría de los datos está en la parte derecha de la media aritmética. Este tipo de distribución presenta un alargamiento o sesgo hacia la derecha.

➤ Curtosis

La curtosis mide el grado de agudeza o achatamiento de una distribución con relación a la distribución normal, es decir, mide cuán puntiaguda es una distribución. Compara el perfil de una curva de frecuencia, respecto a la curva normal.

Tipos de curtosis:

Leptocúrtica: Existe una gran concentración.

Mesocúrtica: Existe una concentración normal.

Platicúrtica: Existe una baja concentración.

2.5.2. Confiabilidad

Bajo la denominación genérica de confiabilidad se agrupan todo un conjunto de métodos y técnicas utilizadas por los investigadores para estimar el grado de precisión con el que están midiendo sus variables; “la confiabilidad indica la consistencia del proceso de medición o de los resultados. Por lo tanto, no es correcto hablar de la confiabilidad de la una prueba o instrumento” (Bonilla, 2006; p. 1).

2.5.2.1. Referentes conceptuales

Hace más de cuarenta años, Robert L. Thorndike (en Muñiz, 1998) empezaba su famoso trabajo sobre confiabilidad con estas palabras: “Cuando medimos algo, bien sea en el campo de la física, de la biología o de las ciencias sociales, esa medición contiene una cierta cantidad de error aleatorio. La cantidad de error puede ser grande o pequeña, pero está siempre presente en cierto grado” (p. 6). Sus palabras siguen vigentes en la actualidad, pues en lo esencial los problemas de la medición cambian poco, aunque los instrumentos de medida vayan y vengan.

Se refiere al grado en que la aplicación repetida del instrumento (a las mismas unidades de estudio en idénticas condiciones), produce iguales resultados. Implica precisión en la medición. Cuanto mayor en la diferencia entre medidas de las mismas características, realizadas en diferentes momentos, menos es la confiabilidad del instrumento. (Magnusson, 1975)

A partir de estas consideraciones, los autores definen la confiabilidad como la ausencia relativa de errores de medición en un instrumento de medida. (Magnusson, 1978).

Diversas definiciones de la confiabilidad son dadas partiendo de ciertas características del instrumento de medición. Sin embargo, una característica común a varios de ellos es la de considerar que mientras la validez se refiere a que se mide lo que se desea medir, la confiabilidad se refiere a la exactitud con que un instrumento de medida mide lo que mide (Magnusson, 1978). Tan solo denota algo que es consistente, no necesariamente consistentemente bueno o malo, sino tan solo consistente (Cohen y Swerdlik, 2001).

En otras palabras, grado en que una prueba, un experimento o un instrumento de medición entrega los mismos resultados cada vez.

Factores que pueden afectar la confiabilidad

- La improvisación. - Algunas personas creen que elegir un instrumento de medición o desarrollar uno es algo fácil y que no requiere de supervisión alguna. Para poder construir un instrumento se requiere conocer muy bien la variable que se pretende medir y la teoría que la sustenta.
- El no estar validados en el contexto donde se aplican. - Traducir un instrumento, aun cuando adaptemos los términos a nuestro lenguaje no es ni remotamente validarlo. Es simplemente un primer paso ya que validar un instrumento implica realizar una investigación extensa y compleja. Los grupos, las personas cambian y tienen valores diferentes de acuerdo a la cultura. Por lo tanto, se deben aplicar instrumentos ya validados en el contexto.
- El instrumento e inadecuado o no es empático. - Hay instrumentos que tienen un lenguaje muy elevado para el entrevistado o no toma en cuenta diferencias de sexo, edad nivel ocupacional y educativo; todo esto puede resultar en errores de validez y confiabilidad del instrumento de medición
- Condiciones en que se aplica el instrumento. – Que esté instalado de manera correcta, segura y con estabilidad.
- Aspectos mecánicos. - Que el instrumento tenga instrucciones precisas.

Técnicas para medir la confiabilidad

Cuando un investigador aplica un ensayo, prueba, o cualquier otro instrumento de medida, obtiene información, datos. Pero como saber, ¿cuánto error entrega los resultados de ese instrumento?

Responder estas preguntas es el objetivo de la confiabilidad, para tal propósito se han creado un conjunto de estrategias con este propósito, entre las que destacan:

- La correlación entre dos formas paralelas del test.

- La correlación entre dos mitades aleatorias del test corregida mediante la fórmula de Spearman-Brown.
- La correlación entre dos aplicaciones del mismo test a una muestra.

De manera simultánea a estas estrategias se desarrollaron un conjunto de fórmulas para medir la consistencia interna de la prueba, por lo que se estableció un nuevo rubro de la confiabilidad centrada en la consistencia interna. Entre las fórmulas más conocidas tenemos el coeficiente KR20 y KR21 (Kuder y Richardson), o el popular Coeficiente Alfa de Cronbach.

Aunque existen distintas formas de evaluar la confiabilidad de la medición realizada por el instrumento, se puede afirmar que las estrategias test-retest y las de consistencia interna suelen ser las más utilizadas (Muñiz, 1996 y 2003).

La estrategia test-retest consiste en la aplicación de un mismo instrumento a una misma muestra al menos dos momentos diferentes. No existe un criterio único respecto de cuál debe ser el lapso adecuado entre la primera y segunda aplicación. Este se establece en función de los fines del instrumento o la investigación (Muñiz, 1996).

Por su parte, las estrategias de consistencia interna permiten aplicar el instrumento tan sólo una vez. Las dos estrategias más utilizadas son la confiabilidad por mitades y el coeficiente alfa de cronbach.

El procedimiento más utilizado (Muñiz, 1996 y 2003) para evaluar la consistencia interna de una prueba es el coeficiente Alfa de Cronbach.

La confiabilidad en Alfa de Cronbach es una generalización de las fórmulas KR para ítems de alternativas múltiples. El Alfa de Cronbach, cuyo cálculo emplea el promedio de todas las correlaciones existentes entre los ítems del instrumento que tributan al concepto latente que se pretende medir.

2.5.3. Análisis estadístico inferencial

2.5.3.1. Estadística inferencial

La estadística inferencial es la ciencia que estudia a los métodos que permiten generalizar o tomar decisiones en base a la información particular o parcial que presenta la estadística descriptiva. Se considera que el estudio de datos es inferencial, cuando se trata de inferir o predecir conclusiones de tal conjunto de datos. Sin embargo, cualquier generalización o predicción no será absoluta, estando su validez restringida por cierta probabilidad.

Entonces, la estadística inferencial se utiliza fundamentalmente para dos procedimientos vinculados:

- a) Probar hipótesis poblacionales
- b) Estimar parámetros

2.5.3.2. Distribución muestral

Una distribución muestral es un conjunto de valores sobre una estadística calculada de todas las muestras posibles de determinado tamaño de una población. Las distribuciones muestrales de medias son probablemente las más conocidas.

Generalmente nos interesa conocer una o más de las siguientes características de la distribución muestral.

- 1.- Su forma funcional (como aparece en su representación gráfica).
- 2.- Su media.
- 3.- Su desviación estándar (error estándar)

2.5.3.3. Nivel de significancia o significación

Es un nivel de la probabilidad de equivocarse y se fija antes de probar hipótesis inferenciales.

Existen dos niveles convenidos en las ciencias:

El nivel de significancia de 0,05, el cual implica que el investigador tiene 95% de seguridad para generalizar sin equivocarse y solo el 5% en contra. En términos de probabilidad, 0,95 y 0,05, respectivamente, ambos suman la unidad.

El nivel de significancia de 0,01, el cual implica que el investigador tiene 99% en su favor y 1% en contra para generalizar sin temor. Muy utilizado cuando las generalizaciones implican riesgos vitales para las personas.

2.5.3.4. Relación entre distribución muestral y el nivel de significancia

El nivel de significancia o significación se expresa en términos de probabilidad y la distribución muestral también como probabilidad.

Para ver si existe o no confianza al generalizar acudimos a la distribución muestral, con una probabilidad adecuada para la investigación. Dicho nivel se toma como un área bajo la distribución muestral. Es decir, que el valor estimado en la muestra no se encuentre en el área de riesgo y este lejos del valor de la distribución muestral.

El nivel de significación representa áreas de riesgo o confianza en la distribución muestral.

2.5.3.5. Prueba de hipótesis

Hay dos tipos de análisis estadísticos que pueden realizarse para probar hipótesis: los análisis paramétricos y los no paramétricos. Cada tipo posee sus características y presuposiciones que lo sustentan; la elección de qué clase de análisis efectuar depende de los supuestos. De igual forma, cabe destacar que en una misma investigación es posible llevar a cabo análisis paramétricos para algunas hipótesis y variables, y análisis no paramétricos para otras. Asimismo, los análisis a realizar dependen del planteamiento, tipo de hipótesis y el nivel de medición de las variables que las conforman.

CAPÍTULO III

CARACTERIZACIÓN Y DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

3.1. Técnicas de muestreo

El muestreo es por conveniencia, no aleatorio, no probabilístico porque se realiza la investigación con muestras de agregados del banco Charaja de la ciudad de Tarija.

La Pastina Klaukol Clásica es la que se utilizó, se adjunta ficha técnica en Anexos.

3.1.1. Criterios para determinar los porcentajes de pastina

La determinación de los porcentajes de pastina que serán determinados, se basa en los rangos mínimo y máximo de la norma ASTM D 3515, que establece el filler como material que para pasar el tamiz N°200 debe estar entre 2% a 8%.

Por lo tanto, a partir de estos porcentajes, se determinan los porcentajes de filler, es decir al 0%, 2%, 4%, 5%, 6% y 7%, siendo un total de 6 variaciones de porcentajes.

Estos porcentajes de pastina son incrementados para el banco de agregado seleccionado.

3.2. Selección de materiales

Para realizar un diseño de mezclas asfálticas con pastina es necesario conocer los criterios de selección de materiales y sus componentes, los criterios para determinar el número de ensayos a realizar y sus características propias físico-mecánicas de la pastina como filler, de los agregados, y del cemento asfáltico, como se detalla a continuación.

3.2.1. Criterios para determinar el banco de agregados

Se aplicó el método de conveniencia, que permite analizar muestras a propósito del banco seleccionado de la ciudad de Tarija.

Los agregados: grava, gravilla arena y filler convencional son muestreados de la planta asfáltadora ubicada en la comunidad de Charaja perteneciente al Servicio Departamental de Caminos (SEDECA).

3.2.2. Criterios de selección de agregados pétreos

En nuestro medio, en la ciudad de Tarija, se cuenta con varias plantas chancadoras de materiales pétreos. Siendo el criterio de ubicar bancos que son utilizados para el diseño de mezclas asfálticas, se decidió utilizar material proveniente de la planta chancadora del servicio departamental de caminos (SEDECA) por lo cual el material provino de la comunidad de Charaja y según los estudios previos se ha demostrado tener muy buenas características y condiciones para el diseño de mezclas asfálticas.

Figura N° 11 Muestra de agregado pétreo



Fuente: Da Motta, 2008.

3.2.3. Criterios de selección de cemento asfáltico

El asfalto utilizado en la investigación es el Stratura-Brasil 85-100, siendo un asfalto que se utiliza en la ciudad de Tarija para la pavimentación, el cual es utilizado por el Servicio Departamental de Caminos (SEDECA), y se encontraba guardado en su depósito el cual queda ubicado en la comunidad de Charaja; posteriormente fueron realizados los estudios previos pudiendo demostrar que tiene buenas características y es óptimo para la realización de dicha investigación.

Figura N° 12 Cemento asfáltico



Fuente: Da Motta, 2008.

3.2.4. Criterios de selección de pastina

La selección de la pastina, se utilizó Pastina Klaukol Clásica.

Para luego realizar el reemplazo del filler natural con cada porcentaje de pastina y poder determinar de qué manera influye o afecta a cada una de las mezclas asfálticas.

Figura N° 13 Pastina Klaukol Clásica.



Fuente: <https://www.morales.com.bo/pastina-klaukol-bruma-normal-1kg/p>

3.3. Criterios para determinar del número de ensayos

Se desglosan los diferentes ensayos y el número de los mismos a ejecutarse.

3.3.1. Criterio del número de ensayos para la caracterización de los agregados

- Granulometría. - 3 ensayos para los agregados arena, grava 3/4" y gravilla 3/8".

- Abrasión del agregado grueso máquina de los Ángeles. - 1 ensayo de los agregados de grava 3/4" y gravilla 3/8".
- Peso específico y absorción del agregado grueso. - 3 ensayos de peso específico y absorción del agregado grueso de los agregados de grava 3/4" y gravilla 3/8" y se sacará su promedio.
- Peso específico del agregado fino. - 3 ensayos del agregado fino y se sacará su promedio.
- Peso unitario. - 3 ensayos por cada agregado arena, grava 3/4" y gravilla 3/8".
- Equivalente de la arena. - 3 ensayos de equivalente de la arena, de los cuales se saca un promedio.
- Porcentaje de caras fracturadas. 1 ensayo para el agregado de grava 3/4" y gravilla 3/8".
- Determinación de partículas largas y achatadas. - 1 ensayo para el agregado de grava 3/4" y gravilla 3/8".

Tabla N° 9 Número de ensayos de los agregados pétreos

Ensayo	Cantidad de ensayos a realizar
Granulometría	3
Desgaste mediante la máquina de los Ángeles	1
Peso específico y absorción de agua en agregados gruesos	3
Peso específico y absorción de agua en agregados finos	3
Peso unitario	3
Equivalente de arena	3
Porcentaje de caras fracturadas	1
Determinación de partículas largas y achatadas	1

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2. Criterio del número de ensayos para el cemento asfáltico

- Ensayo de penetración. - 3 ensayos de peso específico del cemento asfáltico 85-100 del cual se obtendrá su promedio.

- Ensayo de punto de inflamación. - 3 ensayos del punto de inflamación del cemento asfáltico 85-100 del cual se obtendrá su promedio.
- Ensayo de peso específico. - 3 ensayos de peso específico del cemento asfáltico 85-100 del cual se obtendrá su promedio.
- Ensayo de punto de ablandamiento. - 3 ensayos de punto de ablandamiento del cemento asfáltico 85-100 y luego se obtendrá su promedio.
- Ensayo de ductilidad. - 3 ensayos de ductilidad del cemento asfáltico 85-100 y luego se obtendrá su promedio.

Tabla N° 10 Número de ensayos del cemento asfáltico

Ensayo	Cantidad de ensayos a realizar
Penetración	3
Punto de ablandamiento	3
Punto de inflamación	3
Peso específico	3
Ductilidad	3

Fuente: Elaboración propia.

3.3.3. Criterios del número de briquetas

El criterio para determinar el número de briquetas, se basa en un esquema de ensayos para el banco, según el porcentaje de pastina.

Se inicia determinando el contenido óptimo de cemento asfáltico para cada porcentaje de pastina, con previa dosificación, a partir del banco convencional.

Tabla N° 11 Número de briquetas para el contenido óptimo de cemento asfáltico

Banco	Porcentajes de filler según norma	N° de briquetas para determinar el óptimo de C.A.	N° de briquetas con el óptimo de C.A.	N° de briquetas para tratamiento estadístico	Total
	0%	15	5		20
Banco Charaja	2%	15	5		20
	4%	15	5		20
	5%	15	5		20
	6%	15	5		20
	7%	15	5		20
Total briquetas =		90	30	30	150

Fuente: Elaboración propia.

3.4. Levantamiento de información

3.4.1. Ubicación de la fuente de los materiales a utilizarse

Los materiales pétreos son de la planta chancadora del Servicio Departamental de Caminos (SEDECA).

Se toma en cuenta como agregado pétreo a los materiales:

- Grava 3/4”.
- Gravilla 3/8”
- Arena triturada.
- Filler natural.

Figura N° 14 Ubicación de la obtención del agregado grueso



Fuente: Elaboración propia.

Coordenadas:

Tabla N° 12 Coordenadas de la ubicación del agregado pétreo

Coordenadas	
Geográficas	Latitud: 21°46'54.72" S Longitud: 64°46'14.57" O
U.T.M	Este: 316925.95 Norte: 7590267.05
Altitud	1833 msnm

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.1. Cemento asfáltico

El cemento asfáltico a utilizarse es el Stratura 85-100 cuyo distribuidor es una empresa de Brasil, el cual fue obtenido por Servicio Departamental de Caminos (SEDECA) para poder realizar esta investigación.

3.4.2. Caracterización de los agregados.

3.4.2.1. Ensayo de granulometría (ASTM C-136)

La prueba de granulometría sirve para determinar el porcentaje en peso de los áridos de diferentes tamaños.

Este método consiste en la determinación por tamices de la distribución del tamaño de las partículas de agregados finos y gruesos. Para una gradación óptima, los agregados se separan mediante el tamizado, en dos o tres grupos de diferentes tamaños para las arenas, y en varios grupos de diferentes tamaños para los gruesos.

Se procedió a realizar el análisis granulométrico tanto del material grueso como del material fino de acuerdo a la Norma (ASTM C-136).

Figura N° 15 Proceso del tamizado



Fuente: Elaboración propia.

Después del trabajo en laboratorios, se tabularon los datos y se obtuvieron las siguientes tablas granulométricas:

Tabla N° 13 Datos de las granulometrías de la grava 3/4"

Grava 3/4"				
N° Ensayo	1	2	3	Promedio
Peso total seco	5000,00 gr	5000,00 gr	5000,00 gr	5000,00 gr
Tamiz N°	Peso retenido (gr)			
1"	0,00	0,00	0,00	0,00
3/4"	160,00	149,70	80,30	130,00
1/2"	2685,10	2818,80	2596,10	2700,00
3/8"	1430,00	1185,50	1554,50	1390,00
N°4	719,90	840,80	764,30	775,00
N°8	5,00	5,20	4,80	5,00
N°16	0,00	0,00	0,00	0,00
N°30	0,00	0,00	0,00	0,00
N°50	0,00	0,00	0,00	0,00
N°100	0,00	0,00	0,00	0,00
N°200	0,00	0,00	0,00	0,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 14 Datos de las granulometrías de la gravilla 3/8"

Gravilla 3/8"				
N° Ensayo	1	2	3	Promedio
Peso total seco	5000,00 gr	5000,00 gr	5000,00 gr	5000,00 gr
Tamiz N°	Peso retenido (gr)			
1"	0,00	0,00	0,00	0,00
3/4"	0,00	0,00	0,00	0,00
1/2"	30,40	14,50	12,10	19,00
3/8"	95,00	26,80	34,80	52,20
N°4	3598,50	3638,90	3587,6	3675,00
N°8	1041,70	1303,90	1353,70	1233,10
N°16	34,40	15,90	11,80	20,70
N°30	0,00	0,00	0,00	0,00
N°50	0,00	0,00	0,00	0,00
N°100	0,00	0,00	0,00	0,00
N°200	0,00	0,00	0,00	0,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 15 Datos de las granulometrías de la arena

Arena				
N° Ensayo	1	2	3	Promedio
Peso total seco	500,00 gr	500,00 gr	500,00 gr	500,00 gr
Tamiz N°	Peso retenido (gr)			
1"	0,00	0,00	0,00	0,00
3/4"	0,00	0,00	0,00	0,00
1/2"	0,00	0,00	0,00	0,00
3/8"	0,00	0,00	0,00	0,00
N°4	0,87	1,26	0,57	0,90
N°8	93,54	102,95	86,14	94,21
N°16	131,46	143,42	117,70	130,86
N°30	109,34	108,64	110,04	109,34
N°50	91,14	79,76	104,89	91,93
N°100	49,81	46,00	53,47	49,76
N°200	23,84	17,97	27,19	23,00

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo de porcentajes que pasan cada uno de los tamices.

$$\% \text{ Que Pasa} = 100 - \left(\frac{\text{Peso Ret.}}{\text{Peso total seco}} * 100 \right)$$

$$\% \text{ Que Pasa} = 100 - \left(\frac{130,00}{5000} * 100 \right)$$

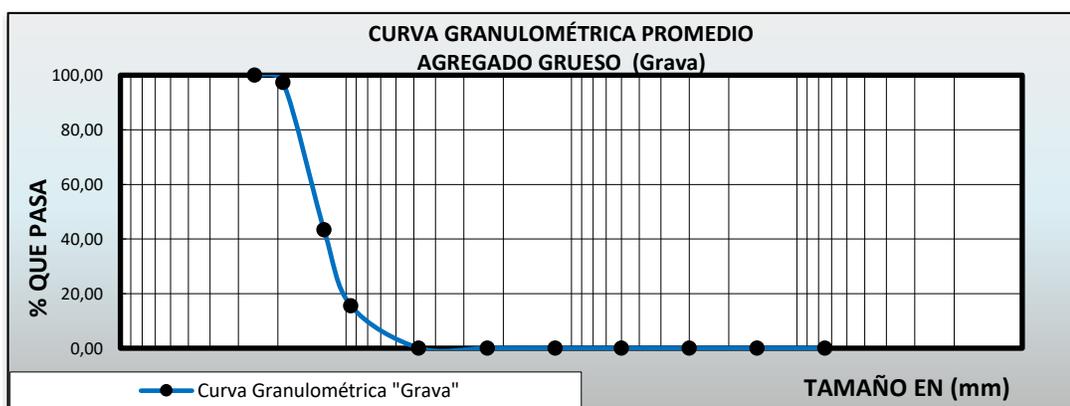
$$\% \text{ Que Pasa} = 97,40\%$$

Tabla N° 16 Planilla de resultados de las granulometrías promedio

Granulometría - agregado grueso (grava 3/4").					
Tamices	Tamaño	Peso ret.	Ret. acum.	% ret.	% que pasa del total
N°	(mm)	(gr)	(gr)		
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,00	130,00	130,00	2,60	97,40
1/2"	12,50	2700,00	2830,00	56,60	43,40
3/8"	9,50	1390,00	4220,00	84,40	15,60
N°4	4,75	775,00	4995,00	99,90	0,10
N°8	2,36	5,00	5000,00	100,00	0,00
N°16	1,18	0,00	5000,00	100,00	0,00
N°30	0,60	0,00	5000,00	100,00	0,00
N°50	0,30	0,00	5000,00	100,00	0,00
N°100	0,15	0,00	5000,00	100,00	0,00
N°200	0,075	0,00	5000,00	100,00	0,00
Base	-	0,00	5000,00	100,00	0,00

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N° 2 Curva granulométrica - grava



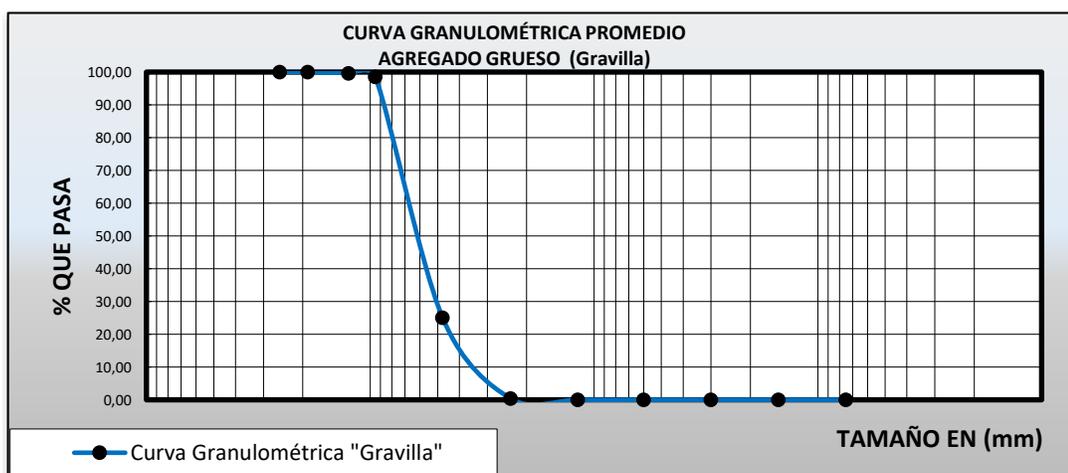
Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 17 Planilla de resultados de las granulometrías promedio

Granulometría - agregado grueso (gravilla 3/8").					
Tamices	Tamaño	Peso ret.	Ret. acum.	% ret.	% que pasa del total
N°	(mm)	(gr)	(gr)		
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,00	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,50	19,00	19,00	0,38	99,62
3/8"	9,50	52,20	71,20	1,42	98,58
N°4	4,75	3675,00	3746,20	74,92	25,08
N°8	2,36	1233,10	4979,30	99,59	0,41
N°16	1,18	20,70	5000,00	100,00	0,00
N°30	0,60	0,00	5000,00	100,00	0,00
N°50	0,30	0,00	5000,00	100,00	0,00
N°100	0,15	0,00	5000,00	100,00	0,00
N°200	0,075	0,00	5000,00	100,00	0,00
Base	-	0,00	5000,00	100,00	0,00

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N° 3 Curva granulométrica - gravilla



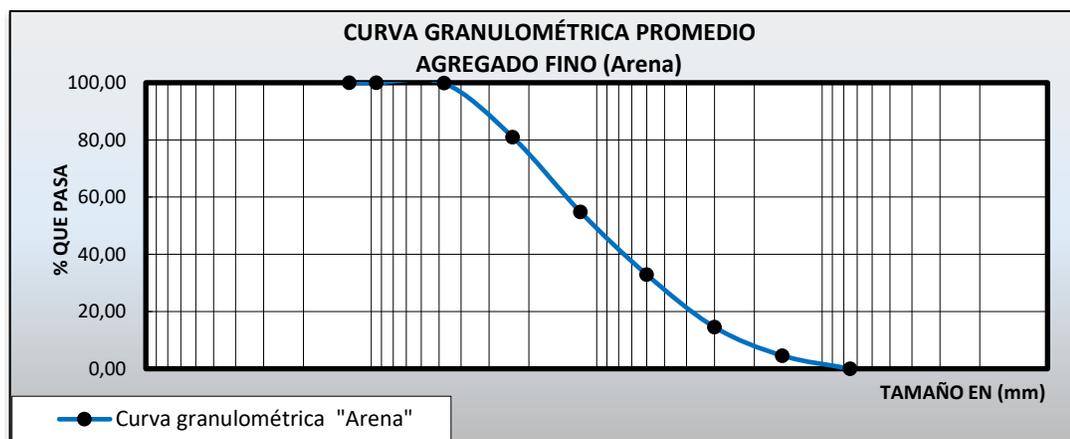
Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 18 Planilla de resultados de las granulometrías promedio

Granulometría - agregado fino (arena).					
Tamices N°	Tamaño (mm)	Peso ret. (gr)	Ret. acum. (gr)	% ret.	% que pasa del total
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,00	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,50	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00
N°4	4,75	0,90	0,90	0,18	99,82
N°8	2,36	94,21	95,11	19,02	80,98
N°16	1,18	130,86	225,97	45,19	54,81
N°30	0,60	109,34	335,31	67,06	32,94
N°50	0,30	91,93	427,24	85,45	14,55
N°100	0,15	49,76	477,00	95,40	4,60
N°200	0,075	23,00	500,00	100,00	0,00
Base	-	0,00	500,00	100,00	0,00

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N° 4 Curva granulométrica- agregado fino



Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.2. Peso específico del agregado grueso ASTM C-127 (grava, gravilla)

El cálculo del peso específico de la muestra seca de agregado establece un punto de referencia para medir los pesos específicos necesarios en la determinación de las proporciones agregadas, asfalto, y vacíos que van a usarse en los métodos de diseño. Para ello se realizó el ensayo con tres muestras, cada una de 5 Kg, tanto de grava como de gravilla.

Procedimiento del ensayo:

Para realizar el ensayo se deberá realizar:

- Cuartear el agregado grueso más o menos 5kg lavados y retenidos en la malla N°4 (4,75mm), se secan a peso constante.
- La muestra seca se sumerge por 24 horas en agua.
- Los agregados se sacan del agua.
- Se obtiene el peso de la muestra en su condición superficialmente seca.
- La muestra saturada superficialmente seca se coloca en una cesta de alambre y se determina el peso sumergido en agua.
- La muestra se seca al horno hasta obtener peso constante.

Para este ensayo se realizó la medición del peso específico tanto para la grava 3/4" como para la gravilla 3/8".

Figura N° 16 Agregado utilizado para el ensayo



Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 17 Obtención del peso sumergido en agua



Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 19 Datos del ensayo de peso específico para agregado grueso (grava)

Muestra N°	Peso muestra secada "A" (gr)	Peso muestra saturada con sup. seca "B" (gr)	Peso muestra saturada dentro del agua "C" (gr)
1	4947,30	5000,00	3121,00
2	4946,80	5000,00	3117,00
3	4947,90	5000,00	3118,00

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo para la grava 3/4"

$$\text{Peso específico a granel} = \frac{a}{b - c}$$

$$\text{Peso específico a granel} = \frac{4947,3}{5000 - 3121,0}$$

$$\text{Peso específico a granel} = 2,63 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right]$$

$$\text{P.E. Saturado de superficie seca} = \frac{b}{b - c}$$

$$\text{P.E. Saturado de superficie seca} = \frac{5000,00}{5000,00 - 3121,0}$$

$$\text{P.E. Saturado de superficie seca} = 2,66 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right]$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{a}{a - c}$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{4947,30}{4947,30 - 3121,0}$$

$$\text{Peso específico aparente} = 2,71 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right]$$

$$\% \text{ de absorción} = \frac{b - a}{a} * 100\%$$

$$\% \text{ de absorción} = \frac{5000 - 4947,3}{4947,3} * 100\%$$

$$\% \text{ de absorción} = 1,07\%$$

Tabla N° 20 Resultados del ensayo de peso específico para grava

Muestra N°	Peso específico a granel (gr/cm ³)	Peso específico saturado con sup. seca (gr/cm ³)	Peso específico aparente (gr/cm ³)	% de absorción
1	2,63	2,66	2,71	1,07
2	2,63	2,66	2,70	1,08
3	2,63	2,66	2,70	1,05
Promedio	2,63	2,66	2,71	1,06

Fuente: Elaboración propia.

Para la gravilla se sigue el mismo el procedimiento de cálculo que se hizo para la grava.

Tabla N° 21 Datos del ensayo de peso específico para agregado grueso (gravilla)

Muestra N°	Peso muestra secada "A" (gr)	Peso muestra saturada con sup. Seca "B" (gr)	Peso muestra saturada dentro del agua "C" (gr)
1	4943,50	5000,00	3126,00
2	4944,10	5000,00	3125,00
3	4943,60	5000,00	3126,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 22 Resultados del ensayo de peso específico para gravilla 3/8"

Muestra N°	Peso específico a granel (gr/cm ³)	Peso específico saturado con sup. seca (gr/cm ³)	Peso específico aparente (gr/cm ³)	% de absorción
1	2,64	2,67	2,72	1,14
2	2,64	2,67	2,72	1,13
3	2,64	2,67	2,72	1,14
Promedio	2,64	2,67	2,72	1,14

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.3. Peso específico del agregado fino ASTM C-128 (arena)

Mediante este ensayo podemos determinar el 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, este valor expresado en porcentaje en peso. Se define como peso específico aparente a la relación entre el peso al aire del sólido y el peso del agua correspondiente a su volumen aparente.

Figura N° 18 Secado superficial del material

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 19 Preparación del equipo para el pesado de la muestra

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 23 Datos del ensayo de peso específico para arena

Ensayos	1	2	3
Peso muestra seca al horno "A" (gr)	481,10	481,10	482,00
Peso matraz + agua "B" (gr)	677,60	736,80	721,60
Peso muestra + matraz + agua "C" (gr)	987,20	1039,10	1023,70
Peso muestra sat. Seca "S" (gr)	500,00	500,00	500,00
Peso matraz (gr)	177,60	236,80	221,60

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo de peso específico agregado fino (arena).

$$\text{Peso específico seco} = \frac{a}{(b + s) - c}$$

$$\text{Peso específico seco} = \frac{481,10}{(677,60 + 500) - 987,20}$$

$$\text{Peso específico seco} = 2,53 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right]$$

$$\text{P.E. Saturado superficial seco} = \frac{s}{(b + s) - c}$$

$$\text{P.E. Saturado superficial seco} = \frac{500}{(677,60 + 500) - 987,20}$$

$$\text{P.E. Saturado superficial seco} = 2,63 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right]$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{a}{(b + a) - c}$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{481,1}{(677,6 + 481,1) - 987,2}$$

$$\text{Peso específico aparente} = 2,81 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right]$$

$$\% \text{ de Absorción} = \frac{s - a}{a} * 100\%$$

$$\% \text{ de Absorción} = \frac{500 - 481,1}{481,1} * 100\%$$

$$\% \text{ de Absorción} = 3,93 \%$$

Tabla N° 24 Resultados del ensayo de peso específico para agregado fino

Ensayos	1	2	3	Promedio
Peso específico seco (gr/cm ³)	2,53	2,43	2,44	2,47
Peso específico S.S.S (gr/cm ³)	2,63	2,53	2,53	2,53
Peso específico aparente (gr/cm ³)	2,81	2,69	2,68	2,73
% de absorción	3,93	3,93	3,73	3,86

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.4. Equivalente de arena (ASTM D-2419)

Este método de ensayo asigna un valor empírico a la cantidad relativa, finura y características del material fino presente en una muestra de ensayo formado por suelo granular que pasa el tamiz N°4 (4.75 mm).

Para determinar el porcentaje de finos en una muestra, se incorpora una medida de suelo y solución en una probeta plástica graduada que luego de ser agitada separa el recubrimiento de finos de las partículas de arena; después de un período de tiempo, se pueden leer las alturas de arcilla y arena en la probeta. El equivalente de arena es la relación de la altura de arena respecto a la altura de arcilla, expresada en porcentaje.

Figura N° 20 Equivalente de Arena y agitación del cilindro graduado con la muestra



Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 25 Datos del ensayo equivalente de arena

Descripción	Ensayo		
	1	2	3
Lectura nivel superior (H ₁)	11,70	11,80	11,70
Lectura nivel inferior (H ₂)	9,30	9,60	9,50

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo del equivalente de arena:

$$\% \text{ de arena} = \frac{\text{Lectura nivel inferior (H}_2\text{)}}{\text{Lectura nivel superior ((H}_1\text{))}} * 100\%$$

$$\% \text{ de arena} = \frac{9,3}{11,7} * 100\%$$

$$\% \text{ de arena} = 79,49\%$$

Tabla N° 26 Resultados del ensayo equivalente de arena

Descripción	Ensayo		
	1	2	3
Equivalente de Arena (%)	79,49	81,36	81,20
Promedio (%)	80,68		

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.5. Ensayo de peso unitario agregados (ASTM C-29)

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

Procedimiento del ensayo:

Se deberá realizar de la siguiente manera:

- Para medir el peso unitario con áridos sueltos, se llena el recipiente por un procedimiento normalizado y se determina el peso de los áridos contenidos en el recipiente lleno.

- Para medir el peso compactado, se llena el recipiente en tres capas aproximadamente iguales, aplicando a cada capa determinados procedimientos de agitación o apisonado según el tamaño de los áridos empleados en el ensayo.

Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos ASTM C-29.

Figura N° 21 Peso unitario compactado del agregado 3/4”



Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 27 Datos del ensayo de peso unitario de la grava 3/4”

Peso unitario suelto				
Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm ³)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)
1	5840,00	9883,70	19535,00	13695,00
2	5840,00	9883,70	19510,00	13670,00
3	5840,00	9883,70	13690,00	13690,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 28 Datos del ensayo de peso unitario de la grava 3/4"

Peso unitario compactado				
Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm ³)	Peso recip. + muestra compactada (gr)	Peso muestra compactada (gr)
1	5840,00	9883,70	20210,00	14370,00
2	5840,00	9883,70	20185,00	14345,00
3	5840,00	9883,70	20285,00	14445,00

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo de peso unitario

$$P.U. = \frac{\text{Peso del agregado seco}}{\text{Volumen del recipiente}}$$

$$P.U. = \frac{13695,00}{9883,70}$$

$$P.U. = 1,386 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right]$$

Tabla N° 29 Resultados del ensayo de peso unitario de la grava 3/4"

Número de ensayo	Unidad	1	2	3	Promedio	P.U.
Peso unitario suelto	gr/cm ³	1,386	1,383	1,385	1,385	1,42
Peso unitario compactado	gr/cm ³	1,454	1,451	1,461	1,456	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 30 Datos del peso unitario de la gravilla 3/8"

Peso unitario suelto				
Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm ³)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)
1	5725,00	9883,70	19495,00	13770,00
2	5725,00	9883,70	19580,00	13855,00
3	5725,00	9883,70	19500,00	13775,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 31 Datos del peso unitario de la gravilla 3/8"

Peso unitario compactado				
Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm ³)	Peso recip. + muestra compactada (gr)	Peso muestra compactada (gr)
1	5725,00	9883,70	20255,00	14530,00
2	5725,00	9883,70	20295,00	14570,00
3	5725,00	9883,70	20300,00	14575,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 32 Resultados del ensayo de la gravilla 3/8"

Número de ensayo	Unidad	1	2	3	Promedio	P.U.
Peso unitario suelto	gr/cm ³	1,393	1,402	1,394	1,396	1,43
Peso unitario compactado	gr/cm ³	1,470	1,474	1,475	1,473	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 33 Datos del peso unitario suelto de la arena

Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm ³)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)
1	2600,00	2915,79	7425,00	4825,00
2	2600,00	2915,79	7425,00	4825,00
3	2600,00	2915,79	7430,00	4830,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 34 Datos del peso unitario compactado de la arena

Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm³)	Peso recip. + muestra compactada (gr)	Peso muestra compactada (gr)
1	2600,00	2915,79	7810,00	5210,00
2	2600,00	2915,79	7810,00	5210,00
3	2600,00	2915,79	7820,00	5220,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 35 Resultados del ensayo de la arena

Número de ensayo	Unidad	1	2	3	Promedio	P.U.
Peso unitario suelto	gr/cm ³	1,655	1,655	1,656	1,655	1,72
Peso unitario compactado	gr/cm ³	1,787	1,787	1,790	1,788	

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.6. Ensayo de desgaste mediante la máquina de los ángeles (ASTM C-131)

Los agregados deben ser capaces de resistir el desgaste irreversible y degradación durante la producción, colocación y compactación de las obras de pavimentación, y sobre todo durante la vida de servicio del pavimento.

Para garantizar la resistencia de los agregados se los somete al ensayo de desgaste de Los Ángeles, ASTM E 131, mide básicamente la resistencia de los puntos de contacto de un agregado al desgaste y/o abrasión.

La cantidad de material a ensayar y el número de esferas a incluir dependen de la granulometría del agregado grueso en la tabla a continuación, se muestra el método a emplear; así como la cantidad de material, número de esferas, número de revoluciones y tiempo de rotación, para cada uno de ellos. La gradación que deberá ser representativa de la gradación original suministrado.

Figura N° 22 Máquina de desgaste por abrasión y material ensayado



Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 36 Datos del ensayo de desgaste para la grava 3/4"

Datos de laboratorio					
Gradación B					
Carga abrasiva: 11 esferas a 32,5 Rpm 500 revoluciones					
N° ensayos	Pasa tamiz	Retenido tamiz	Peso retenido	Peso inicial	Peso final
1	3/4"	1/2"	2500,3 gr.	5000,5 gr.	4391,4 gr.
	1/2"	3/8"	2500,2 gr.		

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 23 Agregado grueso - grava



Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo para encontrar el % del desgaste:

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso final}}{\text{Peso inicial}} * 100$$

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{5000,5 - 4391,4}{5000,5} * 100$$

$$\% \text{ de desgaste} = 12,18\%$$

Tabla N° 37 Datos del ensayo de desgaste para la gravilla 3/8"

Datos de laboratorio					
Gradación C					
Carga abrasiva: 8 esferas a 32,5 Rpm 500 revoluciones					
N° ensayos	Pasa tamiz	Retenido tamiz	Peso retenido	Peso inicial	Peso final
1	3/8"	1/4"	2500 gr.	5000,1 gr.	4185,3 gr.
	1/4"	N°4	2500,1 gr.		

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 24 Agregado grueso – gravilla y las 8 esferas



Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo para encontrar el % del desgaste:

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso final}}{\text{Peso inicial}} * 100$$

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{5000,1 - 4185,3 \text{ gr}}{5000,1 \text{ gr}} * 100$$

$$\% \text{ de desgaste} = 16,30\%$$

3.4.2.7. Ensayo de porcentaje de caras fracturadas (ASTM D-5821)

Este método describe el procedimiento para determinar el porcentaje, en peso, del material que presente una o más caras fracturadas de las muestras tanto de grava como de gravilla.

Figura N° 25 Partículas de caras fracturadas



Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N° 38 Datos del ensayo de caras fracturadas

Descripción		Unidad	Lecturas
Grava 3/4"	Peso total de muestra	gr	1000
	Peso de caras fracturadas retenidas	gr	783,9
Gravilla 3/8"	Peso total de muestra	gr	1000
	Peso de caras fracturadas retenidas	gr	789,5
Número de ensayos		1	

Fuente: Elaboración Propia.

Proceso de cálculo:

Peso caras no fracturadas = Peso total de muestra - Peso de caras fracturadas

$$\text{Peso caras no fracturadas} = 1000 - 783,9$$

$$\text{Peso caras no fracturadas} = 216,1[\text{gr}]$$

$$\text{Porcentaje de caras fracturadas} = \frac{\text{Peso de caras fracturadas}}{\text{Peso total de muestra}} * 100\%$$

$$\text{Porcentaje de caras fracturadas} = \frac{783,9}{1000} * 100\%$$

$$\text{Porcentaje de caras fracturadas} = 78,39\%$$

Tabla N° 39 Resultados del ensayo de caras fracturadas

Descripción		Unidad	Lecturas
Grava 3/4"	Peso de caras no fracturadas	gr	216,1
	Porcentaje de caras fracturadas	%	78,4
Gravilla 3/8"	Peso de caras no fracturadas	gr	210,5
	Porcentaje de caras fracturadas	%	79,0

Fuente: Elaboración Propia.

3.4.2.8. Ensayo de determinación de partículas largas y achatadas (ASTM D-4791)

Este método describe el procedimiento que debe seguirse, para la determinación de los índices de aplanamiento y de alargamiento, de los agregados que se va a utilizar. Se define como índice de aplanamiento de una fracción del agregado, al porcentaje en peso de las partículas que la forman cuya dimensión mínima (espesor) es inferior a 3/5 de la dimensión media de la fracción.

También se define como índice de alargamiento de una fracción del agregado, al porcentaje en peso de las partículas que la forman cuya dimensión máxima (longitud) es superior a 9/5 de la dimensión media de la fracción.

Este método no es aplicable para fracciones de agregado inferior a 1/4" (6,3mm).

Para separar el material de forma aplanada de cada una de las fracciones de ensayo, se hace pasar cada partícula en el calibrador de aplanamiento por la ranura cuya abertura corresponda a la fracción que se ensaya.

Procedimiento:

- La cantidad total de partículas de cada fracción que pasa por la ranura correspondiente se pesa (Pi).

- Para separar el material de forma alargada de cada una de las fracciones de ensayo, se hace pasar cada partícula en el calibrador de alargamiento por la separación entre barras correspondiente a la fracción que se ensaya.
- La cantidad total de las partículas de cada fracción retenida entre dos barras correspondientes se pesa (Pai).

Figura N° 26 Partículas largas y achatadas



Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N° 40 Datos del ensayo partículas chatas y alargadas

Material	Peso total de la muestra (gr)	Peso retenido de partículas chatas y alargadas (gr)
3/4"	1000	61,8
3/8"	1000	42,2

Fuente: Elaboración Propia.

Proceso de cálculo del ensayo de partículas chatas y alargadas.

% Total de partículas chatas y alargadas

$$= \frac{\text{Peso retenido partículas chatas y alargadas}}{\text{Peso total de la muestra}} * 100\%$$

$$\% \text{ Total de partículas chatas y alargadas} = \frac{42,20}{1000} * 100\%$$

$$\% \text{ Total de partículas chatas y alargadas} = 4,22\%$$

Tabla N° 41 Resultados del ensayo partículas chatas y alargadas

Material	Total de partículas chatas y alargadas %
3/4"	6,18
3/8"	4,22

Fuente: Elaboración Propia.

3.4.3. Caracterización del cemento asfáltico

Para caracterizar y evaluar el comportamiento del cemento asfáltico, es necesario realizar los diversos ensayos, para conocer el comportamiento a escala real; en este capítulo realizaremos una breve descripción de los diversos ensayos sobre el cemento asfáltico.

3.4.3.1. Ensayo de penetración (ASTM D-5)

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

La consistencia de un cemento asfáltico se mide mediante un ensayo de penetración. Durante este ensayo se introduce una aguja de dimensiones específicas en una muestra de betún bajo una carga conocida (100 gr) a una temperatura fija (25 °C), durante un plazo de tiempo predeterminado (5 seg).

Se denomina penetración a la distancia hasta la cual penetra la aguja, que se mide en décimas de milímetro/dmm (0.1 mm). Por lo tanto, cuanto mayor es la penetración de la aguja, más blando es el cemento.

Figura N° 27 Realización del ensayo de penetración del cemento asfáltico

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 42 Datos del ensayo penetración del cemento asfáltico 85-100

Ensayo		Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C, 100gr. 5seg. (0,1mm) AASHTO T-49	Lectura N°1	0,1 mm	94	99	95		
	Lectura N°2	0,1 mm	93	97	98		
	Lectura N°3	0,1 mm	97	96	93		
	Promedio	0,1 mm	95	97	95		
Resultado		0,1 mm	96			85	100

Fuente: Elaboración propia.

3.4.3.2. Ensayo punto de inflamación (ASTM D-92)

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 produzca la inflamación instantánea de los vapores liberados, en presencia de una llama libre.

El ensayo más usado para medir el punto de inflamación del cemento asfáltico es el de "Vaso Abierto Cleveland" (COC), que consiste en llenar un vaso de bronce con un

determinado volumen de asfalto, y calentarlo con un aumento de temperatura normalizado. Se pasa una pequeña llama 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 instantánea.

Figura N° 28 Realización del ensayo punto de inflamación del cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 43 Datos del ensayo punto de inflamación

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Min.	Max.
Punto de inflamación AASHTO T-48	°C	282	287	293	287	>232	-

Fuente: Elaboración propia.

3.4.3.3. Ensayo peso específico del asfalto (ASTM D-70)

Aunque normalmente no se especifica, es deseable conocer el peso específico del betún asfáltico que se emplea. Este conocimiento es útil para hacer las correcciones de volumen

cuando éste se mide a temperaturas elevadas. Se emplea como uno de los factores para la determinación de los huecos en las mezclas asfálticas para pavimentación compactada.

El peso específico es la relación del peso de un volumen determinado del material al peso de igual volumen de agua, estando ambos materiales a temperaturas especificadas.

Así, un peso específico de 1,05 significa que el material pesa 1,05 veces lo que el agua a la temperatura fijada. El peso específico del betún asfáltico se determina normalmente por el método del picnómetro, descrito en los métodos AASHTO T-43 y ASTM D-70.

Figura N° 29 Realización del ensayo peso específico del cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 44 Datos del ensayo peso específico

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Peso picnómetro (a)	gr	33,7	33,6	36,5
Peso picnómetro + agua (25°C) (b)	gr	84,6	84,8	84,7
Peso picnómetro + muestra (c)	gr	57,2	57,5	53,8
Peso picnómetro + agua + muestra (d)	gr	85,6	85,4	85,2

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo:

$$\text{Peso específico cemento asfáltico} = \frac{(c-a)}{b + (c - a) - d} * e$$

$$\text{Peso específico cemento asfáltico} = \frac{(57-33,9)}{84,4 + (57 - 33,9) - 84} * 0,997077$$

$$\text{Peso específico cemento asfáltico} = 0,980 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right]$$

Tabla N° 45 Resultados del ensayo peso específico

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Especificaciones	
					Min.	Max.
Peso específico de cemento asfáltico	gr/cm ³	1,041	1,023	1,027		
Promedio	gr/cm³	1,030			1	1,05

Fuente: Elaboración propia.

3.4.3.4. Ensayo punto de ablandamiento (ASTM D-36)

Los asfaltos de diferentes tipos se ablandan a temperaturas diferentes. El punto de ablandamiento 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 la 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 ablandamiento del asfalto.

Los procedimientos y aparatos necesarios para la realización del ensayo se describen con detalle en los métodos AASHTO T-53 y ASTM D-36.

Figura N° 30 Ensayo punto de ablandamiento



Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 46 Datos y resultado del ensayo de punto de ablandamiento

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Especificaciones	
Punto de ablandamiento	°C	45,0	46,0	44,0	Min.	Max.
Promedio	°C	45			42	53

Fuente: Elaboración propia.

3.4.3.5. Ensayo ductilidad (ASTM D-113)

La ductilidad de un material bituminoso es medida por la distancia en centímetros a la cual se alargará antes de romper cuando se tiran dos extremos de un espécimen de la briqueta del material, estos extremos son separados a una velocidad especificada y a una temperatura especificada. Este ensayo consiste en armar el molde en el plato bajo, y para prevenir que el material de ensayo se pegue, cubrir la superficie del plato con glicerina. Verter el cemento asfáltico en un delgado chorro de un lado a otro, de principio a fin hasta que el material cubra el nivel lleno del molde, dejar que se enfríen por un periodo de 30 a 40 minutos y entonces poner el plato base y el molde lleno en el baño de agua a 25°C, por 30 minutos.

Quitar el plato base y el molde lleno del baño de agua, y con un temporizador caliente cortar el exceso del material bituminoso para que el molde simplemente esté lleno a nivel. Posteriormente quitar la briqueta del plato, despegar los pedazos laterales, e inmediatamente realizar el ensayo.

Figura N° 31 Realización del ensayo de ductilidad del cemento asfáltico

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 47 Datos y resultados del ensayo de ductilidad

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Especificaciones	
					Min.	Max.
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51	cm	98	104	108		
Promedio	cm	103			100	-

Fuente: Elaboración propia.

3.4.4. Caracterización del filler

Pastina Klaukol Clásica 1-4 mm es un mortero en polvo basado en cementos áridos de granulometría seleccionada y aditivos especiales, que producen en el mortero la virtud de mejorar la relación agua-cemento y provocar plasticidad y penetración aún con consistencias no típicamente usadas, lográndose de esta forma una prestación final. Su innovadora fórmula posibilita su fácil mezclado y extensión, ya que es más liviana que las pastinas comunes. Este producto por poseer aditivos fungicidas, reduce la formación de esporas fungicidas del tipo penicillium, aureobasidium y aspergillus otorgando un plus protector altamente eficaz contra hongos y levaduras reduciendo el deterioro estético a largo plazo.

Los beneficios que presenta son: uso interior, impermeable y antihongos

Ideal para el tomado de juntas de pisos y revestimientos cerámicos, graníticos y calcáreos de todo tipo, en interior y exterior, incluso en baños, balcones y terrazas.

Figura N° 32 Datos técnicos del filler

Datos Técnicos	
Densidad del polvo	1-1kg/L
Preparación de la mezcla	1 parte de agua por cada 2,5 de pastina
Vida útil de la mezcla	Aprox. 2 horas
Tomado de juntas después de la colocación con adhesivos	En pared 8 horas En piso 24 días
Tomado de juntas después de la colocación como mortero	En pared 2 - 3 días En piso 7 -10 días
Transitabilidad	24 horas
Tiempo de fragüe	Inicial: 2 horas - final:4 Horas
Endurecimiento final	15 días
Resistencia a la humedad	Óptima
Resistencia al envejecimiento	Óptima
Resistencia los aceites e hidrocarburos	Óptima
Resistencia a los ácidos y álcalis	Escasa
Resistencia a la temperatura	Desde- 30°C hasta 90°C
Flexibilidad	No
Absorción de agua /30 min	<2g
Absorción de agua/ 240 min	<5g
Resistencia a la flexión en Seco	>3 - 5 Mpa
Resistencia a la flexión con ciclos de congelamiento/ deshielo	>3 - 5 Mpa
Resistencia a la compresión en Seco	> 15 Mpa
Resistencia a la compresión con ciclos de congelamiento/ deshielo	> 15 Mpa
Los valores mencionados se han obtenido en ensayos realizados en condiciones estándar, por lo cual las mismas pueden variar en función de las condiciones de puesta en obra. Conforme con normas en vigencia.	

Fuente: <https://www.morales.com.bo/pastina-klaukol-bruma-normal-1kg/p>

3.5. Diseño de mezclas asfálticas

El diseño patrón de mezclas asfálticas se lo realiza con diferentes porcentajes de filler como pastina, que proporciona la chancadora Charajas, junto con los demás agregados chancados: grava gravilla y arena.

3.5.1. Diseño granulométrico

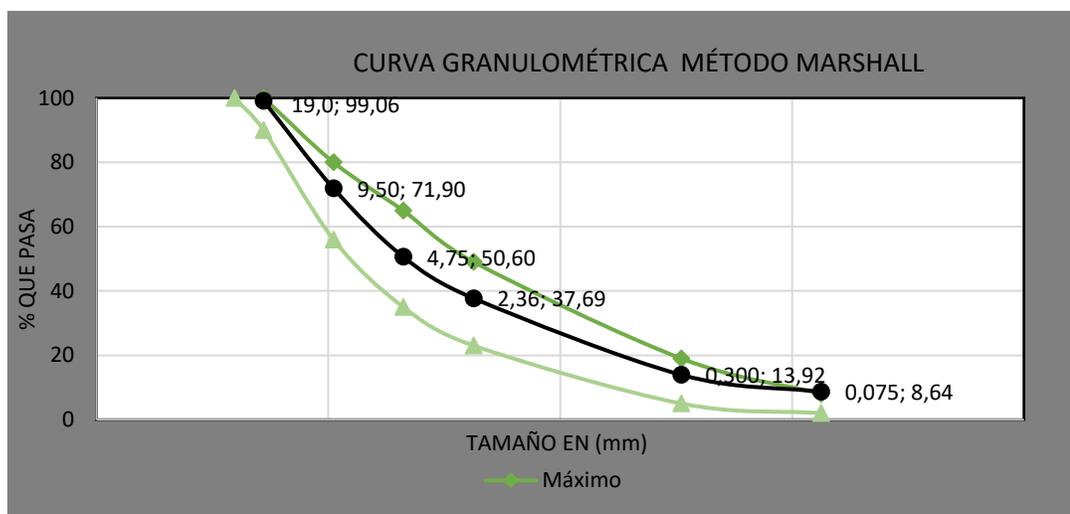
Se realiza el diseño granulométrico con la grava, gravilla, arena y pastina, caracterizados previamente, formando una curva granulométrica con diferentes porcentajes de pastina

(0%, 2%, 4%, 5%, 6% y 7%), mismos que deben estar dentro de las especificaciones de la norma ASTM D-3515 del método Marshall.

El diseño de las fajas granulométricas se utilizó los agregados que necesita la mezcla de agregados estará compuesta por el 33% de grava de 3/4", 22% de gravilla de 3/8", de 45% a 38% de arena y de 0% a 7% de pastina.

A continuación, se muestra el resumen de las granulometrías formadas a diferentes porcentajes de pastina:

Gráfico N° 5 Curva de diseño granulométrico para 0% pastina



Fuente: Elaboración propia.

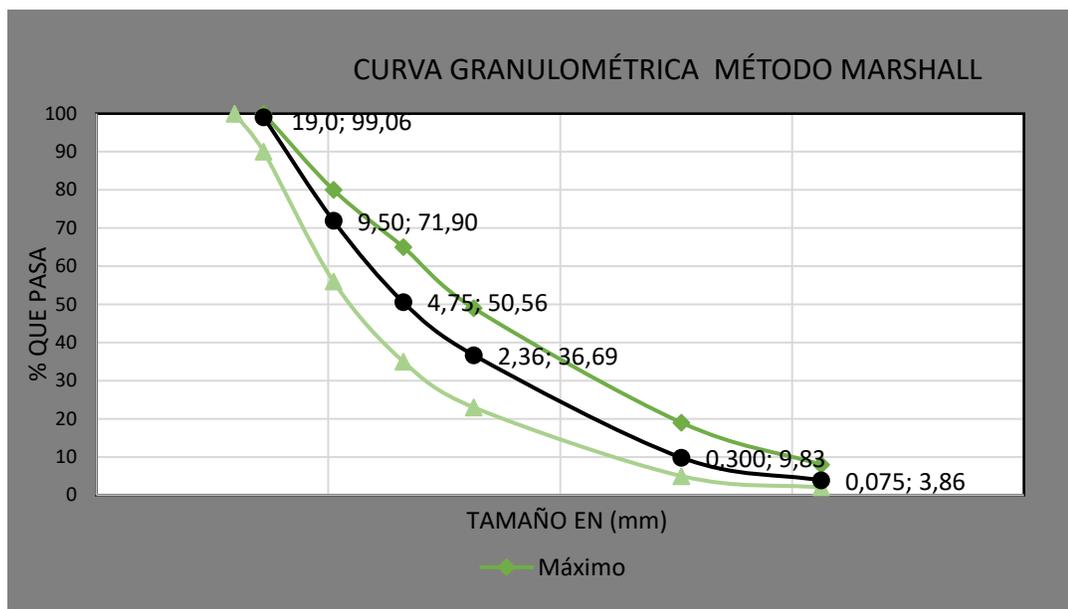
Tabla N° 48 Curva de diseño granulométrico para 0% pastina

Tamices	Tamaño (mm)	Dosificación							
		Grava Peso Ret. (gr)	Gravilla Peso Ret. (gr)	Arena Peso Ret. (gr)	Pastina Peso Ret. (gr)	Grava (%) 33,00	Gravilla (%) 22,00	Arena (%) 45,00	Pastina (%) 0,00
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3/4"	19,0	142,73	0,00	0,00	0,00	47,10	0,00	0,00	0,00
1/2"	12,5	2672,20	22,80	0,00	0,00	881,83	5,02	0,00	0,00
3/8"	9,50	1374,83	78,83	0,00	0,00	453,70	17,34	0,00	0,00
N°4	4,75	799,57	3579,37	36,43	0,00	263,86	787,46	16,40	0,00
N°8	2,36	10,67	1264,53	957,50	0,00	3,52	278,20	430,88	0,00
N°16	1,18	0,00	54,47	1290,83	0,00	0,00	11,98	580,88	0,00
N°30	0,60	0,00	0,00	989,23	0,00	0,00	0,00	445,16	0,00
N°50	0,30	0,00	0,00	816,00	0,00	0,00	0,00	367,20	0,00
N°100	0,15	0,00	0,00	412,17	0,00	0,00	0,00	185,48	0,00
N°200	0,075	0,00	0,00	282,13	0,00	0,00	0,00	126,96	0,00
Base	-	0,00	0,00	215,70	5000,00	0,00	0,00	97,07	0,00
Peso total		5000,0	5000,0	5000,0	5000,0	1650	1100,0	2250,0	0,00

Curva de dosificación				Especificaciones ASTM D3515	
Peso Ret. 100,00	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total	Mínimo	Máximo
0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
47,10	47,10	0,94	99,06	90	100
886,84	933,94	18,68	81,32	-	-
471,04	1404,98	28,10	71,90	56	80
1067,71	2472,70	49,45	50,55	35	65
712,59	3185,29	63,71	36,29	23	49
592,86	3778,15	75,56	24,44	-	-
445,16	4223,30	84,47	15,53	-	-
367,20	4590,50	91,81	8,19	5	19
185,48	4775,98	95,52	4,48	-	-
126,96	4902,94	98,06	1,94	2	8
97,07	5000,00	100,00	0,00	-	-
5000,0					

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N° 6 Curva de diseño granulométrico para 2% pastina



Fuente: Elaboración propia.

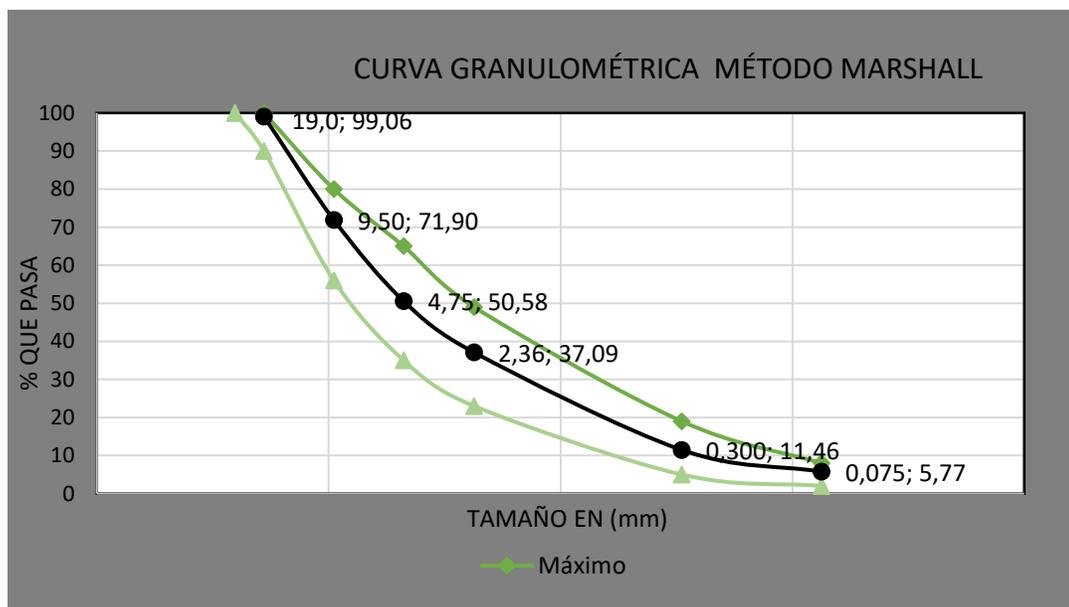
Tabla N° 49 Curva de diseño granulométrico para 2% pastina

Tamices	Tamaño (mm)	Dosificación							
		Grava Peso Ret. (gr)	Gravilla Peso Ret. (gr)	Arena Peso Ret. (gr)	Pastina Peso Ret. (gr)	Grava (%) 33,00	Gravilla (%) 22,00	Arena (%) 43,00	Pastina (%) 2,00
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3/4"	19,0	142,73	0,00	0,00	0,00	47,10	0,00	0,00	0,00
1/2"	12,5	2672,20	22,80	0,00	0,00	881,83	5,02	0,00	0,00
3/8"	9,50	1374,83	78,83	0,00	0,00	453,70	17,34	0,00	0,00
N°4	4,75	799,57	3579,37	36,43	0,00	263,86	787,46	15,67	0,00
N°8	2,36	10,67	1264,53	957,50	0,00	3,52	278,20	411,73	0,00
N°16	1,18	0,00	54,47	1290,83	0,00	0,00	11,98	555,06	0,00
N°30	0,60	0,00	0,00	989,23	0,00	0,00	0,00	425,37	0,00
N°50	0,30	0,00	0,00	816,00	0,00	0,00	0,00	350,88	0,00
N°100	0,15	0,00	0,00	412,17	0,00	0,00	0,00	177,23	0,00
N°200	0,075	0,00	0,00	282,13	0,00	0,00	0,00	121,32	0,00
Base	-	0,00	0,00	215,70	5000,00	0,00	0,00	92,75	100,00
peso total		5000,0	5000,0	5000,0	5000,0	1650,00	1100,00	2150,00	100,00

Curva de dosificación				Especificaciones	
Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total	ASTM D3515	
100,00				Mínimo	Máximo
0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
47,10	47,10	0,94	99,06	90	100
886,84	933,94	18,68	81,32	-	-
471,04	1404,98	28,10	71,90	56	80
1066,98	2471,97	49,44	50,56	35	65
693,44	3165,41	63,31	36,69	23	49
567,04	3732,45	74,65	25,35	-	-
425,37	4157,82	83,16	16,84	-	-
350,88	4508,70	90,17	9,83	5	19
177,23	4685,93	93,72	6,28	-	-
121,32	4807,25	96,14	3,86	2	8
192,75	5000,00	100,00	0,00	-	-
5000,0					

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N° 7 Curva de diseño granulométrico para 4% pastina



Fuente: Elaboración propia.

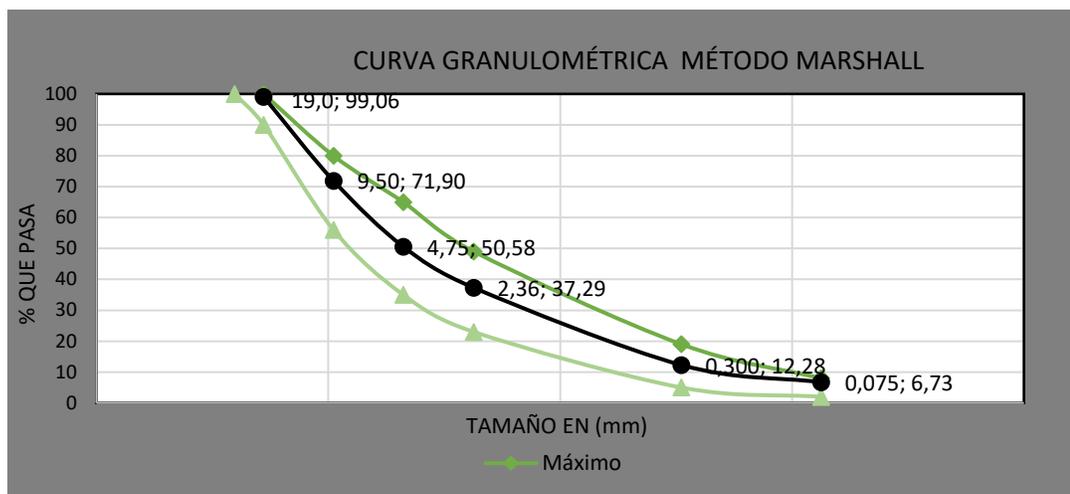
Tabla N° 50 Curva de diseño granulométrico para 4% pastina

Tamices	Tamaño (mm)	Dosificación							
		Grava Peso Ret. (gr)	Gravilla Peso Ret. (gr)	Arena Peso Ret. (gr)	Pastina Peso Ret. (gr)	Grava (%) 33,00	Gravilla (%) 22,00	Arena (%) 41,00	Pastina (%) 4,00
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3/4"	19,0	142,73	0,00	0,00	0,00	47,10	0,00	0,00	0,00
1/2"	12,5	2672,20	22,80	0,00	0,00	881,83	5,02	0,00	0,00
3/8"	9,50	1374,83	78,83	0,00	0,00	453,70	17,34	0,00	0,00
N°4	4,75	799,57	3579,37	36,43	0,00	263,86	787,46	14,94	0,00
N°8	2,36	10,67	1264,53	957,50	0,00	3,52	278,20	392,58	0,00
N°16	1,18	0,00	54,47	1290,83	0,00	0,00	11,98	529,24	0,00
N°30	0,60	0,00	0,00	989,23	0,00	0,00	0,00	405,59	0,00
N°50	0,30	0,00	0,00	816,00	0,00	0,00	0,00	334,56	0,00
N°100	0,15	0,00	0,00	412,17	0,00	0,00	0,00	168,99	0,00
N°200	0,075	0,00	0,00	282,13	0,00	0,00	0,00	115,67	0,00
Base	-	0,00	0,00	215,70	5000,00	0,00	0,00	88,44	200,00
Peso total		5000,0	5000,0	5000,0	5000,0	1650,00	1100,00	2050,00	200,00

Curva de dosificación				Especificaciones	
Peso Ret. 100,00	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total	ASTM D3515 Mínimo Máximo	
0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
47,10	47,10	0,94	99,06	90	100
886,84	933,94	18,68	81,32	-	-
471,04	1404,98	28,10	71,90	56	80
1066,26	2471,24	49,42	50,58	35	65
674,29	3145,53	62,91	37,09	23	49
541,23	3686,75	73,74	26,26	-	-
405,59	4092,34	81,85	18,15	-	-
334,56	4426,90	88,54	11,46	5	19
168,99	4595,89	91,92	8,08	-	-
115,67	4711,56	94,23	5,77	2	8
288,44	5000,00	100,00	0,00	-	-
5000,0					

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N° 8 Curva de diseño granulométrico para 5% pastina



Fuente: Elaboración propia.

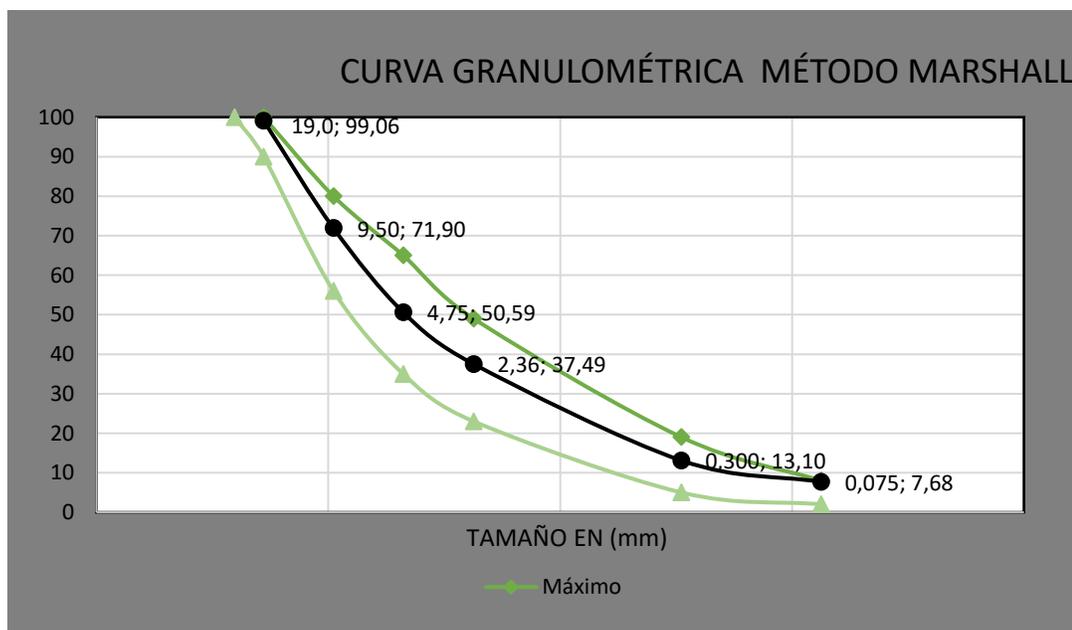
Tabla N° 51 Curva de diseño granulométrico para 5% pastina

Tamices	Tamaño (mm)	Dosificación							
		Grava *	Gravilla *	Arena *	Filler *	Grava	Gravilla	Arena	Filler
		Peso Ret. (gr)	Peso Ret. (gr)	Peso Ret. (gr)	Peso Ret. (gr)	(%)	(%)	(%)	(%)
		33,00	22,00	40,00	5,00				
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3/4"	19,0	142,73	0,00	0,00	0,00	47,10	0,00	0,00	0,00
1/2"	12,5	2672,20	22,80	0,00	0,00	881,83	5,02	0,00	0,00
3/8"	9,50	1374,83	78,83	0,00	0,00	453,70	17,34	0,00	0,00
N°4	4,75	799,57	3579,37	36,43	0,00	263,86	787,46	14,57	0,00
N°8	2,36	10,67	1264,53	957,50	0,00	3,52	278,20	383,00	0,00
N°16	1,18	0,00	54,47	1290,83	0,00	0,00	11,98	516,33	0,00
N°30	0,60	0,00	0,00	989,23	0,00	0,00	0,00	395,69	0,00
N°50	0,30	0,00	0,00	816,00	0,00	0,00	0,00	326,40	0,00
N°100	0,15	0,00	0,00	412,17	0,00	0,00	0,00	164,87	0,00
N°200	0,075	0,00	0,00	282,13	0,00	0,00	0,00	112,85	0,00
Base	-	0,00	0,00	215,70	5000,00	0,00	0,00	86,28	250,00
Peso total		5000,0	5000,0	5000,0	5000,0	1650,0	1100,00	2000,00	250,00

Curva de dosificación			
Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa
100,00			del total
0,00	0,00	0,00	100,00
47,10	47,10	0,94	99,06
886,84	933,94	18,68	81,32
471,04	1404,98	28,10	71,90
1065,89	2470,87	49,42	50,58
664,72	3135,59	62,71	37,29
528,32	3663,91	73,28	26,72
395,69	4059,60	81,19	18,81
326,40	4386,00	87,72	12,28
164,87	4550,87	91,02	8,98
112,85	4663,72	93,27	6,73
336,28	5000,00	100,00	0,00

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N° 9 Curva de diseño granulométrico para 6% pastina



Fuente: Elaboración propia.

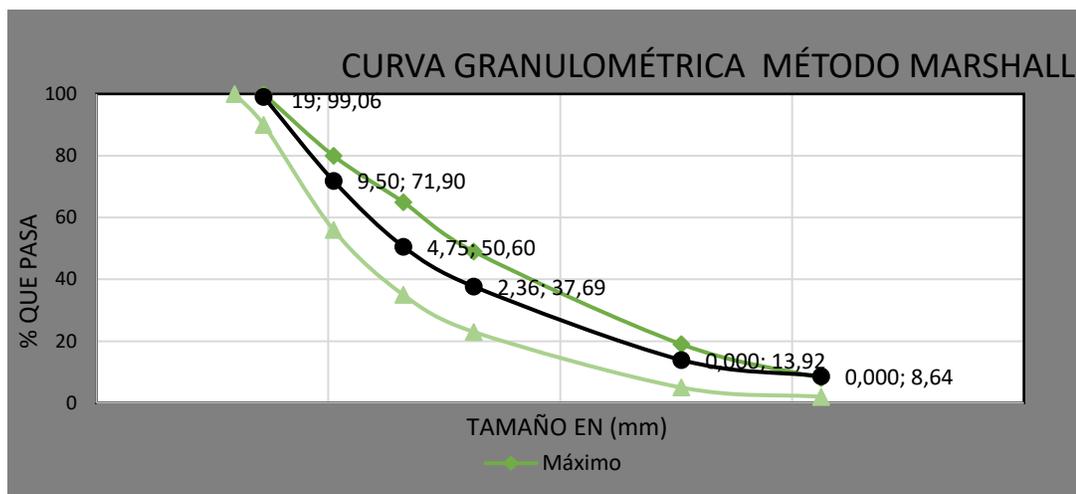
Tabla N° 52 Diseño granulométrico para 6% pastina

Tamices	Tamaño (mm)	Dosificación							
		Grava Peso Ret. (gr)	Gravilla Peso Ret. (gr)	Arena Peso Ret. (gr)	Pastina Peso Ret. (gr)	Grava (%) 33,00	Gravilla (%) 22,00	Arena (%) 39,00	Pastina (%) 6,00
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3/4"	19,0	142,73	0,00	0,00	0,00	47,10	0,00	0,00	0,00
1/2"	12,5	2672,20	22,80	0,00	0,00	881,83	5,02	0,00	0,00
3/8"	9,50	1374,83	78,83	0,00	0,00	453,70	17,34	0,00	0,00
N°4	4,75	799,57	3579,37	36,43	0,00	263,86	787,46	14,21	0,00
N°8	2,36	10,67	1264,53	957,50	0,00	3,52	278,20	373,43	0,00
N°16	1,18	0,00	54,47	1290,83	0,00	0,00	11,98	503,43	0,00
N°30	0,60	0,00	0,00	989,23	0,00	0,00	0,00	385,80	0,00
N°50	0,30	0,00	0,00	816,00	0,00	0,00	0,00	318,24	0,00
N°100	0,15	0,00	0,00	412,17	0,00	0,00	0,00	160,75	0,00
N°200	0,075	0,00	0,00	282,13	0,00	0,00	0,00	110,03	0,00
Base	-	0,00	0,00	215,70	5000,00	0,00	0,00	84,12	300,00
Peso total		5000,0	5000,0	5000,0	5000,0	1650,00	1100,00	1950,00	300,00

Curva de dosificación			
Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
100,00			
0,00	0,00	0,00	100,00
47,10	47,10	0,94	99,06
886,84	933,94	18,68	81,32
471,04	1404,98	28,10	71,90
1065,53	2470,51	49,41	50,59
655,14	3125,65	62,51	37,49
515,41	3641,06	72,82	27,18
385,80	4026,86	80,54	19,46
318,24	4345,10	86,90	13,10
160,75	4505,85	90,12	9,88
110,03	4615,88	92,32	7,68
384,12	5000,00	100,00	0,00

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N° 10 Curva de diseño granulométrico para 7% pastina



Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 53 Diseño granulométrico para 7% pastina

Tamices	Tamaño (mm)	Dosificación							
		Grava *	Gravilla *	Arena *	Filler *	Grava	Gravilla	Arena	Filler
		Peso Ret. (gr)	Peso Ret. (gr)	Peso Ret. (gr)	Peso Ret. (gr)	(%)	(%)	(%)	(%)
		33,00	22,00	38,00	7,00				
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3/4"	19,0	142,73	0,00	0,00	0,00	47,10	0,00	0,00	0,00
1/2"	12,5	2672,20	22,80	0,00	0,00	881,83	5,02	0,00	0,00
3/8"	9,50	1374,83	78,83	0,00	0,00	453,70	17,34	0,00	0,00
N°4	4,75	799,57	3579,37	36,43	0,00	263,86	787,46	13,84	0,00
N°8	2,36	10,67	1264,53	957,50	0,00	3,52	278,20	363,85	0,00
N°16	1,18	0,00	54,47	1290,83	0,00	0,00	11,98	490,52	0,00
N°30	0,60	0,00	0,00	989,23	0,00	0,00	0,00	375,91	0,00
N°50	0,30	0,00	0,00	816,00	0,00	0,00	0,00	310,08	0,00
N°100	0,15	0,00	0,00	412,17	0,00	0,00	0,00	156,62	0,00
N°200	0,075	0,00	0,00	282,13	0,00	0,00	0,00	107,21	0,00
Base	-	0,00	0,00	215,70	5000,00	0,00	0,00	81,97	350,00
Peso total		5000,0	5000,0	5000,0	5000,0	1650,00	1100,00	1900,00	350,00

Curva de dosificación			
Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa
100,00			del total
0,00	0,00	0,00	100,00
47,10	47,10	0,94	99,06
886,84	933,94	18,68	81,32
471,04	1404,98	28,10	71,90
1065,16	2470,14	49,40	50,60
645,57	3115,71	62,31	37,69
502,50	3618,21	72,36	27,64
375,91	3994,12	79,88	20,12
310,08	4304,20	86,08	13,92
156,62	4460,82	89,22	10,78
107,21	4568,03	91,36	8,64
431,97	5000,00	100,00	0,00

Fuente: Elaboración propia.

3.5.2. Dosificación de mezclas asfálticas

Con las granulometrías de los agregados se tiene una dosificación tentativa, con la cual se procederá a pesar 3 briquetas con un porcentaje de cemento asfáltico. En la siguiente tabla se muestra las cantidades:

Tabla N° 54 Variaciones del porcentaje del cemento asfáltico para obtener el porcentaje óptimo de cada diseño granulométrico

Porcentajes de cemento asfáltico	Cantidad de briquetas a realizar
5,00%	3
5,50%	3
6,00%	3
6,50%	3
7,00%	3
Total, briquetas elaboradas para cada diseño	15

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 55 Dosificación con porcentajes de cemento asfáltico para 0% pastina

	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla				
	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	7,0%
Porcentaje de Agregado (%)	95,00%	94,50%	94,00%	93,50%	93,00%
Peso del Cemento Asfáltico (gr) *	60,00	66,00	72,00	78,00	84,00
Peso de Grava (gr) *	376,20	374,22	372,24	370,26	368,28
Peso de Gravilla (gr) *	250,80	249,48	248,16	246,84	245,52
Peso de Arena (gr) *	513,00	510,30	507,60	504,90	502,20
Peso de Filler (gr) *	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Peso total de la briqueta (gr) *	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 56 Dosificación con porcentajes de cemento asfáltico para 2% pastina

	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla				
	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	7,0%
Porcentaje de Agregado (%)	95,00%	94,50%	94,00%	93,50%	93,00%
Peso del Cemento Asfáltico (gr) *	60,00	66,00	72,00	78,00	84,00
Peso de Grava (gr) *	376,20	374,22	372,24	370,26	368,28
Peso de Gravilla (gr) *	250,80	249,48	248,16	246,84	245,52
Peso de Arena (gr) *	490,20	487,62	485,04	482,46	479,88
Peso de Filler (gr) *	22,80	22,68	22,56	22,44	22,32
Peso total de la briqueta (gr) *	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 57 Dosificación con porcentajes de cemento asfáltico para 4% pastina

	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla				
	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	7,0%
Porcentaje de Agregado (%)	95,00%	94,50%	94,00%	93,50%	93,00%
Peso del Cemento Asfáltico (gr) *	60,00	66,00	72,00	78,00	84,00
Peso de Grava (gr) *	376,20	374,22	372,24	370,26	368,28
Peso de Gravilla (gr) *	250,80	249,48	248,16	246,84	245,52
Peso de Arena (gr) *	467,40	464,94	462,48	460,02	457,56
Peso de Filler (gr) *	45,60	45,36	45,12	44,88	44,64
Peso total de la briqueta (gr) *	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 58 Dosificación con porcentajes de cemento asfáltico para 5% pastina

	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla				
	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	7,0%
Porcentaje de Agregado (%)	95,00%	94,50%	94,00%	93,50%	93,00%
Peso del Cemento Asfáltico (gr) *	60,00	66,00	72,00	78,00	84,00
Peso de Grava (gr) *	376,20	374,22	372,24	370,26	368,28
Peso de Gravilla (gr) *	250,80	249,48	248,16	246,84	245,52
Peso de Arena (gr) *	456,00	453,60	451,20	448,80	446,40
Peso de Filler (gr) *	57,00	56,70	56,40	56,10	55,80
Peso total de la briqueta (gr) *	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 59 Dosificación con porcentajes de cemento asfáltico para 6% pastina

	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla				
	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	7,0%
Porcentaje de Agregado (%)	95,00%	94,50%	94,00%	93,50%	93,00%
Peso del Cemento Asfáltico (gr) *	60,00	66,00	72,00	78,00	84,00
Peso de Grava (gr) *	376,20	374,22	372,24	370,26	368,28
Peso de Gravilla (gr) *	250,80	249,48	248,16	246,84	245,52
Peso de Arena (gr) *	444,60	442,26	439,92	437,58	435,24
Peso de Filler (gr) *	68,40	68,04	67,68	67,32	66,96
Peso total de la briqueta (gr) *	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 60 Dosificación con porcentajes de cemento asfáltico para 7% pastina

	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla				
	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	7,0%
Porcentaje de Agregado (%)	95,00%	94,50%	94,00%	93,50%	93,00%
Peso del Cemento Asfáltico (gr) *	60,00	66,00	72,00	78,00	84,00
Peso de Grava (gr) *	376,20	374,22	372,24	370,26	368,28
Peso de Gravilla (gr) *	250,80	249,48	248,16	246,84	245,52
Peso de Arena (gr) *	433,20	430,92	428,64	426,36	424,08
Peso de Filler (gr) *	79,80	79,38	78,96	78,54	78,12
Peso total de la briqueta (gr) *	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

Se realizan 15 briquetas con diferentes porcentajes de cemento asfáltico 85-100 variando de 0,5% con respecto del porcentaje aproximado de cemento asfáltico calculado; de igual manera varían el porcentaje de agregados en la mezcla, de la cual se obtendrá el porcentaje óptimo de cemento asfáltico a utilizar en los cálculos.

3.5.3. Elaboración de briquetas

A partir de las dosificaciones se procede a realizar las briquetas en laboratorio de la siguiente manera.

Equipo: Martillo de compactación, dispositivo para moldear probetas, extractor de probetas, balanza $\pm 0,1$ gr, bandejas metálicas, termómetro, espátula.

Procedimiento:

Antes de preparar la mezcla, el conjunto del molde y la base de compactación se limpian y calientan a una temperatura entre 100 y 150°C. Por un lado, se pesan en bandeja separadas las diversas fracciones de áridos calculados para un grupo de briquetas, luego cada bandeja es colocada al horno para calentar a una temperatura de 170 a 190°C. Por otro lado, se calienta el cemento asfáltico a una temperatura de 120 a 140°C. Durante su calentamiento el agregado y sobre todo el asfalto deben agitarse para evitar sobrecalentamientos locales.

Se pesan luego sobre un plato las diversas fracciones de áridos de acuerdo con los pesos acumulativos. Se mezclan perfectamente los agregados y se forma un cráter en la mezcla, se coloca la bandeja sobre la balanza y se vierte sobre los agregados el asfalto caliente, hasta completar el peso total de agregados más el asfalto calculado para un porcentaje de la mezcla total.

Figura N° 33 Pesado de los materiales



Fuente: Elaboración propia.

Se mezcla el asfalto con los agregados, hasta tener una mezcla homogénea, la temperatura de la mezcla no debe ser inferior a 140°C y en ningún caso someterse a recalentamiento.

Se compacta la mezcla en un molde abierto por ambos extremos y que tienen 4" de diámetro interior y 3" de altura. La compactación se hace usando un martillo especial compuesto de: un disco circular que se fija sobre la superficie de la mezcla a compactarse; un martillo en forma de cilindro hueco que se desliza a lo largo de una guía y cae sobre el disco; el peso del martillo es de 10 libras y la altura de caída libre es de 18".

Para el diseño de esta mezcla se aplicaron 75 golpes por cada cara de la briqueta en la compactación, proyectadas para vías de tráfico pesado y se fabricaron 15 briquetas. El molde, conteniendo la briqueta se dejó enfriar a temperatura ambiente durante una media hora y luego se extrajo la briqueta mediante un gato hidráulico.

Figura N° 34 Elaboración y compactado de las briquetas



Fuente: Elaboración propia

3.5.4. Rotura de briquetas

Para la rotura de briquetas, se procede a realizar dos pasos previos, el primero para determinar las propiedades volumétricas Marshall (densidad, vacíos de la mezcla, vacíos del agregado mineral y la relación betún vacíos) y la segunda para determinar la estabilidad y fluencia de la mezcla.

Procedimiento

Una vez extraídas las briquetas de los moldes y dejado enfriar 24 horas, se procede primero a 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..

Figura N° 35 Medición de las alturas de la briqueta



Fuente: Elaboración propia.

Antes de realizar el ensayo la muestra se debe pesar en seco, saturado superficialmente seco y sumergida en agua, antes de su ruptura debe ser sumergida en baño de agua a $60^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ ($140 \pm 1,8^{\circ}\text{F}$) durante un tiempo no inferior a 30 minutos ni mayor a 40 minutos.

Figura N° 36 Briqueta sumergida en agua



Fuente: Elaboración propia.

Se limpian perfectamente las superficies interiores de las mordazas. La temperatura de las mismas se debe mantener entre 21°C y 38°C (70 a 100°F). Si es inferior, deberán calentarse en baño de agua hasta alcanzar la temperatura indicada. Se lubrican las varillas

de guía con una película delgada de aceite de tal forma que la mordaza superior se deslice fácilmente sin pegarse. Se debe verificar previamente a la aplicación de la carga que el indicador del dial del anillo de carga se encuentre en la posición correspondiente a cero.

Se coloca la briqueta en las mordazas y aplica la carga, a una velocidad de deformación constante de 50,8mm por minuto hasta que se produce la rotura. El punto de rotura se define por la carga máxima obtenida. El número total de libras necesarias para producir la rotura de la muestra a 60°C (150°F) se anota como valor de estabilidad Marshall.

Mientras se realiza el ensayo de estabilidad, se mantiene firmemente el medidor de deformaciones (flujo) en posición sobre la varilla de guía y se lo quita cuando se obtiene la carga máxima; se lee y anota esta lectura como valor de flujo de la briqueta, expresado en centésimas de pulgada.

Figura N° 37 Ensayo de Estabilidad y Fluencia



Fuente: Elaboración propia.

3.5.5. Datos y resultados de propiedades Marshall

De la rotura de briquetas se obtuvieron los siguientes datos y resultados de propiedades volumétricas, estabilidad y fluencia para diferentes porcentajes de pastina, como se muestra en las siguientes tablas:

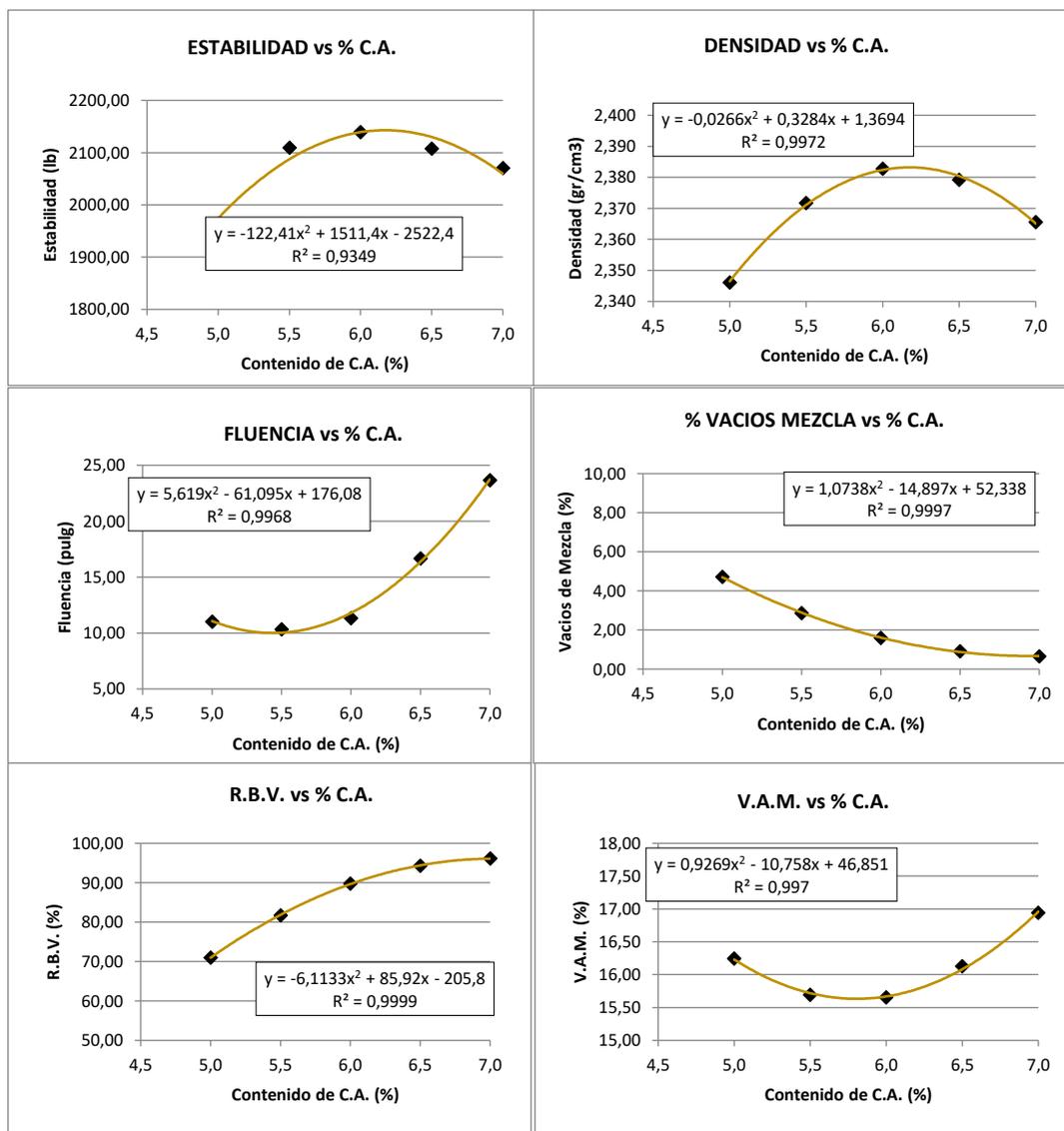
Tabla N° 61 Propiedades volumétricas de la mezcla con 0% pastina

N° de probeta	% de Asfalto		Altura promedio de probeta	Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacíos			
	Base Mezcla	Base Agregados		Seco	Sat. Sup. Seca	Sumergida en agua		Probeta	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregado)	R.B.V. (relación betumen vacíos)
1	5,00	5,26	6,01	1161,9	1164,4	666	498,9	2,33	2,35	2,51	6,38	17,77	64,10	
2			6,09	1189,4	1190,2	684	506,7	2,35						
3			6,06	1192,4	1194,0	689	504,8	2,36						
4	5,50	5,82	5,96	1175,3	1176,5	683	493,5	2,38	2,37	2,49	4,56	17,22	73,53	
5			5,90	1169,3	1171,3	677,5	493,8	2,37						
6			5,98	1187,3	1188,9	687	501,9	2,37						
7	6,00	6,38	4,44	895,9	896,5	525	371,5	2,41	2,38	2,46	3,30	17,18	80,77	
8			6,30	1256,5	1257,3	732	525,3	2,39						
9			7,21	1390,5	1392,0	799	593,0	2,34						
10	6,50	6,95	5,80	1167,7	1168,2	678	490,2	2,38	2,38	2,44	2,63	17,65	85,08	
11			6,14	1219,0	1219,5	707	512,5	2,38						
12			5,90	1174,5	1175,1	681	494,1	2,38						
13	7,00	7,53	5,90	1149,8	1151,0	665	486,0	2,37	2,37	2,42	2,37	18,45	87,16	
14			5,79	1161,2	1161,7	671	490,7	2,37						
15			5,73	1140,9	1141,5	659	482,5	2,36						
Especificaciones			Mínimo									3	13	75
			Máximo									5	-	82

N° de probeta	Estabilidad Marshall					Fluencia	
	Lectura del dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
1	710	1893,67	1,01	1910,71	1963,19	11	11,00
2	698	1861,35	1,07	1999,09		12	
3	685	1826,35	1,08	1979,76		10	
4	690	1839,81	1,12	2051,39	2109,58	11	10,33
5	710	1893,67	1,13	2147,42		11	
6	720	1920,59	1,11	2129,94		9	
7	739	1971,76	1,27	2504,13	2139,04	8	11,33
8	880	2351,44	1,01	2382,01		12	
9	698	1861,35	0,82	1530,96		14	
10	710	1893,67	1,17	2206,12	2107,77	16	16,00
11	720	1920,59	1,06	2033,91		19	
12	689	1837,12	1,13	2083,29		13	
13	705	1880,20	1,13	2132,15	2070,31	17	18,67
14	656	1748,26	1,17	2041,96		21	
15	644	1715,94	1,19	2036,82		18	
Espf.	Mínimo				1800		8
	Máximo				-		16

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N° 11 Propiedades volumétricas de la mezcla con 0% pastina



Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 62 Resumen de propiedades volumétricas de la mezcla con 0% pastina

	Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Densidad máxima (gr/cm ³)	2,38	6,09
	Estabilidad máxima (Lb)	2141,60	5,88
	Vacíos de la mezcla (%)	4,00	5,28
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%) =	5,75

Fuente: Elaboración propia.

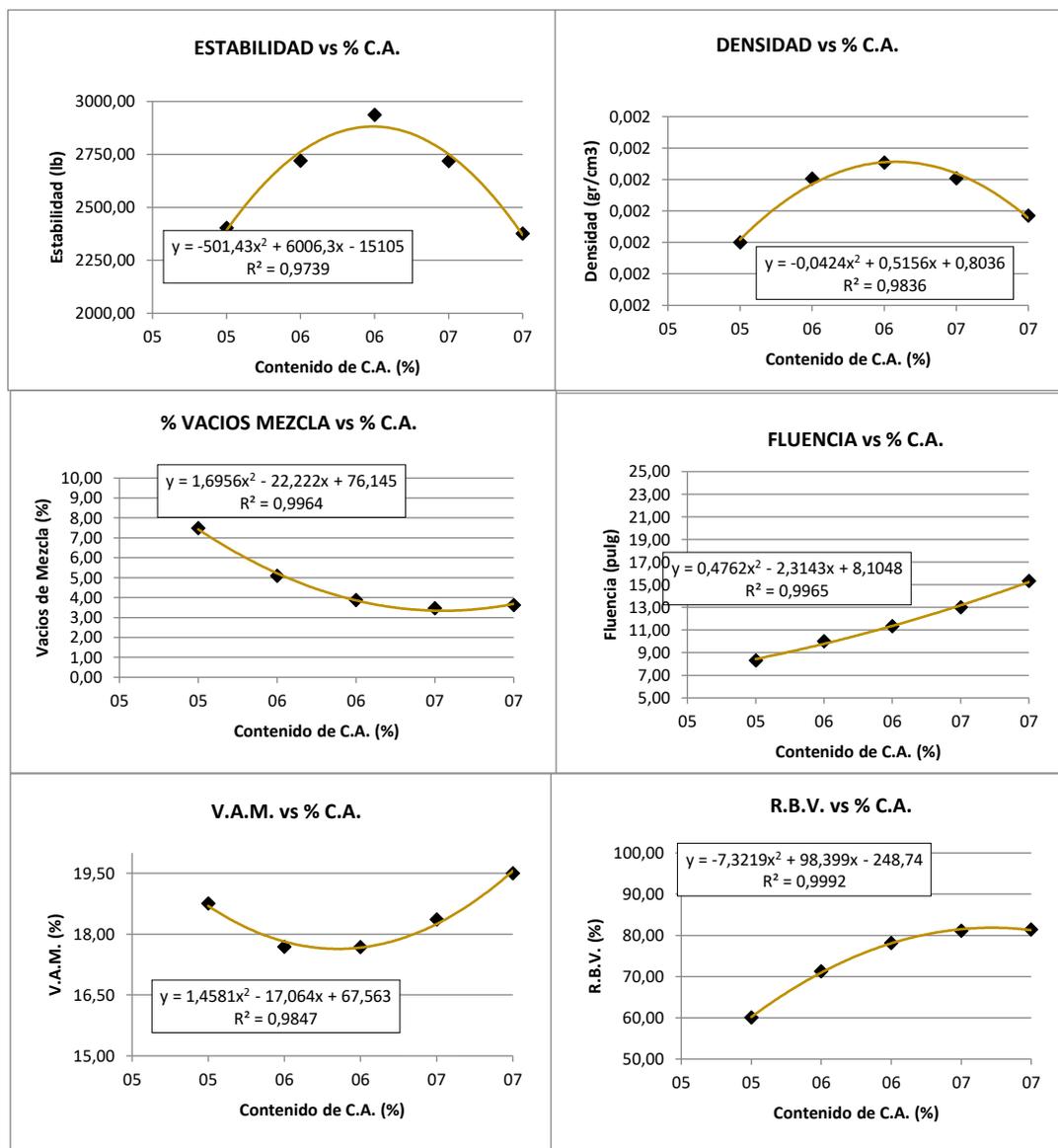
Tabla N° 63 Propiedades volumétricas de la mezcla con 2% pastina

N° de probeta	% de Asfalto		Altura promedio de probeta	Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacíos			
	Base Mezcla	Base Agregados		Seco	Sat. Sup. Seca	Sumergida en agua		Probeta	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)
	%	%												
1	5,00	5,26	6,06	1193,0	1195,2	682	513,0	2,33	2,32	2,51	7,49	18,76	60,05	
2			6,00	1174,0	1177,4	666	511,4	2,30						
3			5,98	1187,7	1188,8	681	507,8	2,34						
4	5,50	5,82	5,90	1183,0	1184,1	682	502,1	2,36	2,36	2,49	5,08	17,69	71,26	
5			5,90	1170,9	1172,2	676	496,2	2,36						
6			5,94	1173,9	1175,7	680	496,2	2,37						
7	6,00	6,38	5,80	1154,1	1155,2	675	480,2	2,40	2,37	2,47	3,87	17,68	78,11	
8			6,15	1203,3	1204,4	694	510,4	2,36						
9			6,00	1163,6	1164,9	670	494,9	2,35						
10	6,50	6,95	5,86	1161,6	1162,3	669	493,3	2,35	2,36	2,45	3,46	18,36	81,14	
11			5,80	1156,6	1157,8	672	485,8	2,38						
12			6,00	1182,9	1183,4	679	504,1	2,35						
13	7,00	7,53	5,92	1172,5	1173,6	676	497,6	2,36	2,34	2,42	3,62	19,50	81,45	
14			5,83	1168,4	1169,6	674	495,6	2,36						
15			5,85	1175,3	1176,4	673	503,4	2,33						
Especificaciones			Mínimo									3	13	75
			Máximo									5	-	82

N° de probeta	Estabilidad Marshall					Fluencia	
	Lectura del dial	Carga	Factor de corrección de altura de	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
	mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
1	945	2526,47	1,08	2738,70	2402,66	8	8,33
2	723	1928,67	1,10	2127,33		9	
3	791	2111,78	1,11	2341,97		8	
4	924	2469,93	1,13	2800,90	2720,53	9	10,00
5	904	2416,07	1,13	2739,82		10	
6	875	2337,98	1,12	2620,87		11	
7	895	2391,83	1,27	3037,63	2936,63	13	11,33
8	1017	2720,36	1,06	2872,70		10	
9	983	2628,80	1,10	2899,57		11	
10	872	2329,90	1,15	2670,07	2719,05	13	13,00
11	913	2440,31	1,17	2842,96		14	
12	897	2397,22	1,10	2644,13		12	
13	705	1880,20	1,13	2120,87	2376,25	17	15,33
14	844	2254,50	1,16	2606,20		15	
15	783	2090,24	1,15	2401,69		14	
Espf.	Mínimo				2526,47	1,08	2738,70
	Máximo				-	-	16

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N° 12 Propiedades volumétricas de la mezcla con 2% pastina



Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 64 Resumen de propiedades volumétricas de la mezcla con 2% pastina

	Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Densidad máxima (gr/cm ³)	2,38	5,98
	Estabilidad máxima (Lb)	2813,78	6,00
	Vacíos mínimo de la mezcla (%)	4,00	6,08
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%) =	6,02

Fuente: Elaboración propia.

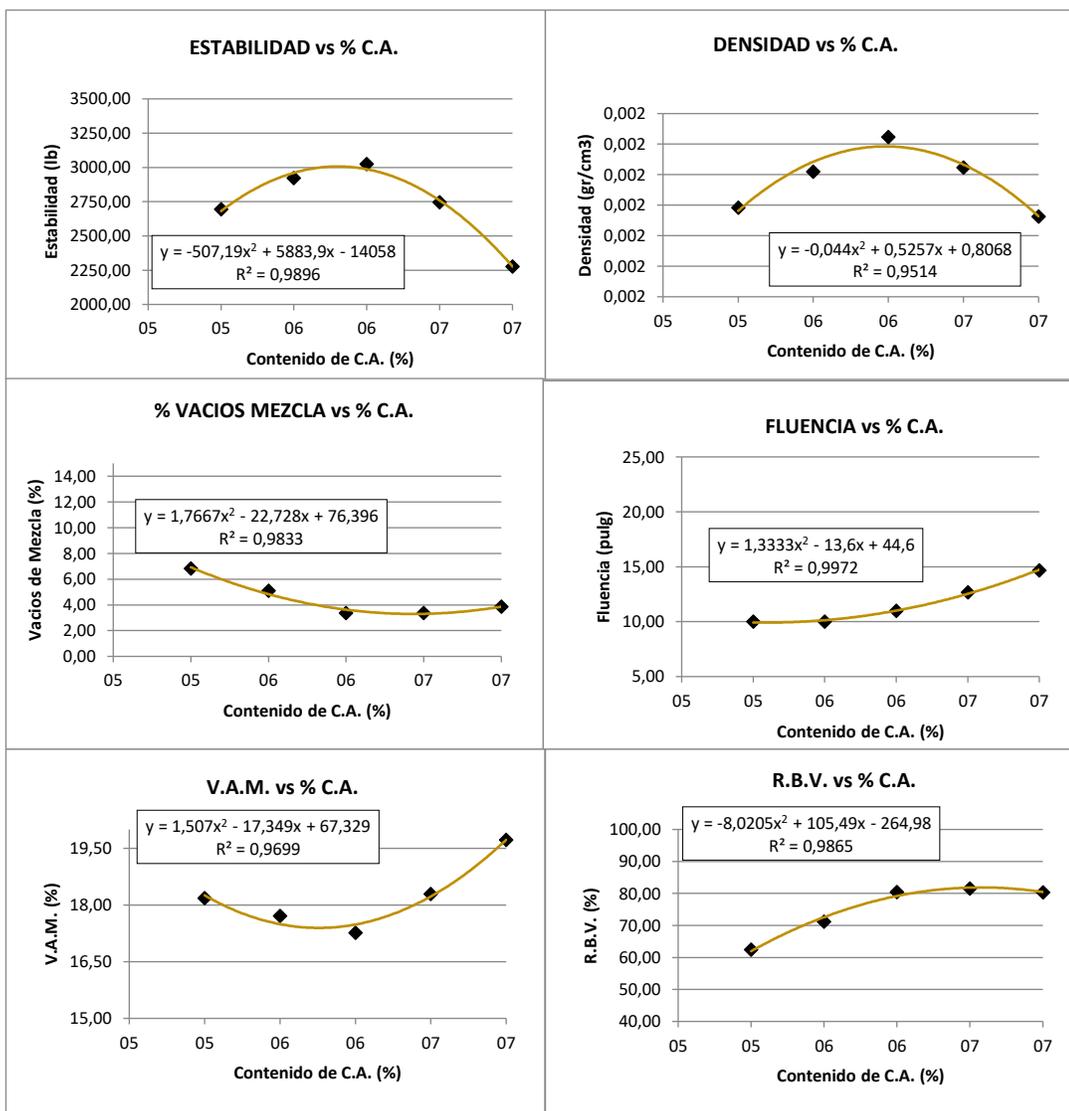
Tabla N° 65 Propiedades volumétricas de la mezcla con 4% pastina

N° de probeta	% de Asfalto		Altura promedio de probeta	Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacíos			
	Base Mezcla	Base Agregados		Seco	Sat. Sup. Seca	Sumergida en agua		Probeta	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)
1	5,00	5,26	6,13	1169,6	1170,3	680	490,5	2,38	2,34	2,51	6,83	18,18	62,43	
2			6,19	1189,6	1189,9	678	511,9	2,32						
3			6,21	1187,2	1187,6	673	514,6	2,31						
4	5,50	5,82	6,10	1181,7	1181,9	676	505,7	2,34	2,36	2,49	5,10	17,71	71,21	
5			6,03	1180,0	1181,0	687	494,0	2,39						
6			6,10	1182,2	1183,8	683	500,8	2,36						
7	6,00	6,38	6,10	1182,6	1185,5	685	500,5	2,36	2,38	2,47	3,38	17,27	80,44	
8			6,02	1180,2	1180,9	689	491,9	2,40						
9			6,05	1177,5	1178,5	686	492,3	2,39						
10	6,50	6,95	6,09	1177,0	1178,0	680	498,0	2,36	2,36	2,45	3,37	18,30	81,57	
11			6,13	1186,1	1187,3	682	505,3	2,35						
12			5,89	1137,6	1138,3	661	477,3	2,38						
13	7,00	7,53	6,02	1155,7	1178,2	673	505,2	2,29	2,33	2,43	3,87	19,73	80,36	
14			5,88	1174,3	1177,7	688	489,7	2,40						
15			5,93	1161,9	1180,5	678	502,5	2,31						
Especificaciones			Mínimo								7,53	6,02	1155,7	
			Máximo								5	-	82	

N° de probeta	Estabilidad Marshall					Fluencia		
	Lectura del dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio	
								mm
1	909	2429,53	1,06	2580,17	2694,91	9	10,00	
2	1005	2688,04	1,04	2803,63		11		
3	974	2604,57	1,04	2700,93		10		
4	1062	2841,53	1,07	3043,28	2921,44	9	10,00	
5	993	2655,73	1,09	2902,71		10		
6	984	2631,49	1,07	2818,33		11		
7	813	2171,03	1,27	2757,20	3025,73	12	11,00	
8	1056	2825,38	1,10	3096,61		10		
9	1108	2965,40	1,09	3223,39		11		
10	1011	2704,20	1,07	2904,31	2745,65	12	12,67	
11	958	2561,48	1,06	2720,29		14		
12	860	2297,59	1,14	2612,36		12		
13	714	1904,44	1,10	2087,26	2276,79	13	14,67	
14	823	2197,95	1,14	2505,67		16		
15	746	1990,61	1,12	2237,44		15		
Espf.	Mínimo					1800		8
	Máximo					-		16

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N° 13 Propiedades volumétricas de la mezcla con 4% pastina



Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 66 Resumen de propiedades volumétricas de la mezcla con 4% pastina

	Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Densidad máxima (gr/cm ³)	2,34	6,24
	Estabilidad máxima (Lb)	2986,95	5,98
	Vacíos mínimo de la mezcla (%)	4,00	5,93
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%) =	6,05

Fuente: Elaboración propia.

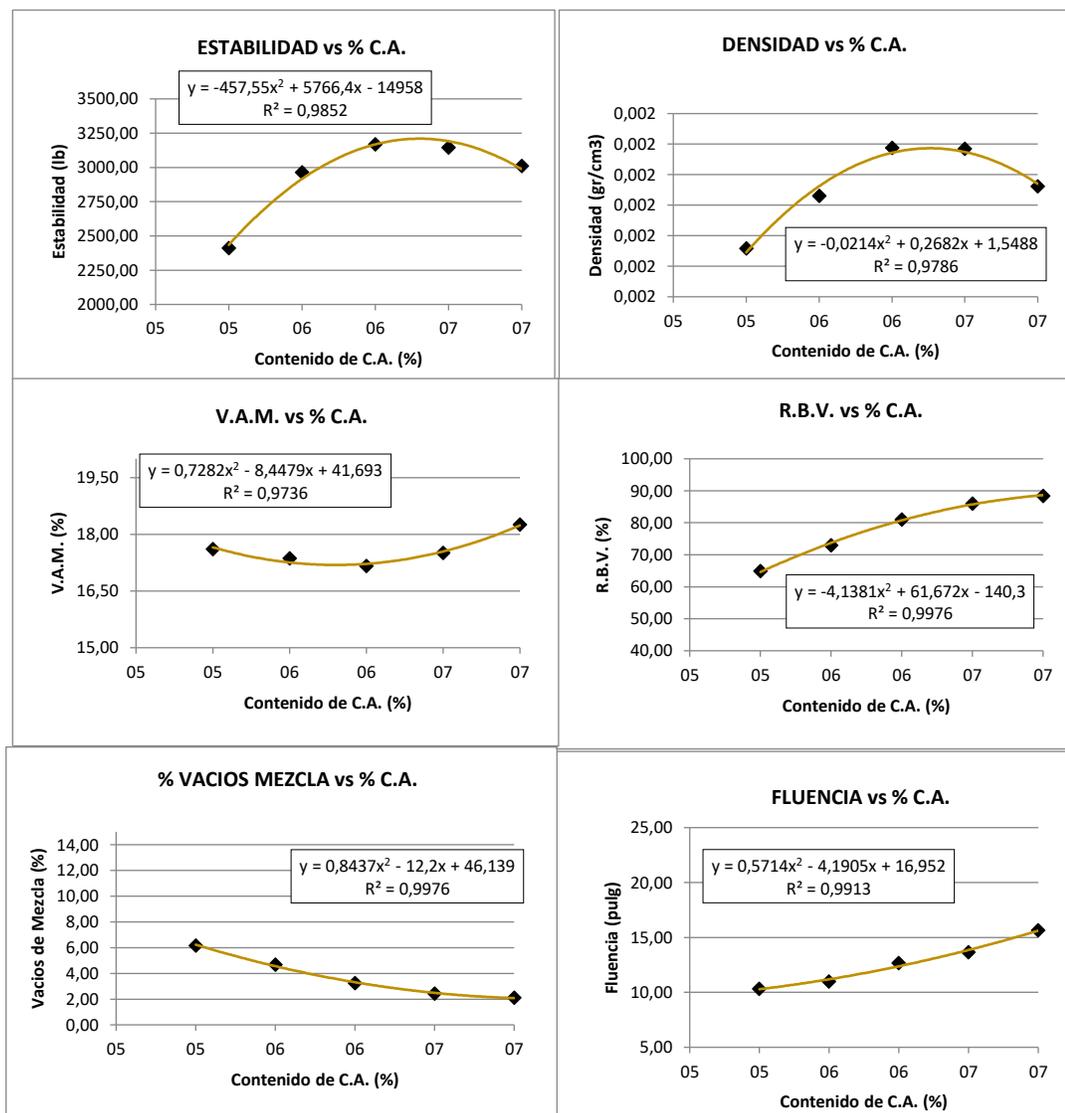
Tabla N° 67 Propiedades volumétricas de la mezcla con 5% pastina

N° de probeta	% de Asfalto		Altura promedio de probeta	Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacíos			
	Base Mezcla	Base Agregados		Seco	Sat. Sup. Seca	Sumergida en agua		Probeta	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)
	%	%		cm	grs.	grs.		grs.	cm ³	grs/cm ³	grs/cm ³	grs/cm ³	%	%
1	5,00	5,26	6,11	1163,6	1164,7	678	486,7	2,39	2,36	2,51	6,18	17,61	64,93	
2			6,18	1157,0	1157,9	668	490,4	2,36						
3			6,15	1172,6	1173,0	667	506,0	2,32						
4	5,50	5,82	6,14	1175,2	1177,0	687	489,8	2,40	2,37	2,49	4,69	17,36	72,98	
5			6,12	1180,3	1180,9	672	508,9	2,32						
6			6,09	1180,1	1181,6	690	491,6	2,40						
7	6,00	6,38	6,13	1180,6	1182,3	701	481,8	2,45	2,39	2,47	3,25	17,16	81,07	
8			6,09	1177,9	1180,5	696	485,0	2,43						
9			6,07	1221,4	1224,2	690	534,0	2,29						
10	6,50	6,95	6,05	1178,0	1180,9	683	497,9	2,37	2,39	2,45	2,44	17,51	86,06	
11			6,08	1172,0	1174,0	685	489,0	2,40						
12			6,10	1181,6	1182,8	691	491,8	2,40						
13	7,00	7,53	6,13	1183,1	1184,2	690	494,2	2,39	2,38	2,43	2,11	18,26	88,42	
14			6,05	1176,7	1177,9	685	492,9	2,39						
15			5,99	1182,6	1183,8	680	503,8	2,35						
Especificaciones			Mínimo								7,53	6,02	1155,7	
			Máximo								5	-	82	

N° de probeta	Estabilidad Marshall					Fluencia	
	Lectura del dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
	Mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
1	926	2475,31	1,07	2643,63	2411,15	9	10,33
2	892	2383,76	1,05	2493,41		11	
3	744	1985,22	1,06	2096,39		11	
4	1050	2809,22	1,06	2974,96	2963,33	12	11,00
5	1106	2960,02	1,07	3152,42		10	
6	962	2572,25	1,07	2762,60		11	
7	1009	2698,81	1,27	3427,49	3167,98	12	12,67
8	1088	2911,55	1,07	3127,00		15	
9	1020	2728,43	1,08	2949,44		11	
10	985	2634,19	1,09	2863,36	3144,48	12	13,67
11	1025	2741,90	1,08	2955,77		14	
12	1260	3374,71	1,07	3614,31		15	
13	1165	3118,89	1,06	3312,26	3010,02	14	15,67
14	915	2445,69	1,09	2658,47		18	
15	1034	2766,13	1,11	3059,34		15	
Espf.	Mínimo				1800		8
	Máximo				-		16

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N° 14 Propiedades volumétricas de la mezcla con 5% pastina



Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 68 Resumen de propiedades volumétricas de la mezcla con 5% pastina

	Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Densidad máxima (gr/cm3)	2,39	6,23
	Estabilidad máxima (Lb)	3210,16	6,30
	Vacíos mínimo de la mezcla (%)	4,00	5,72
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%) =	6,08

Fuente: Elaboración propia.

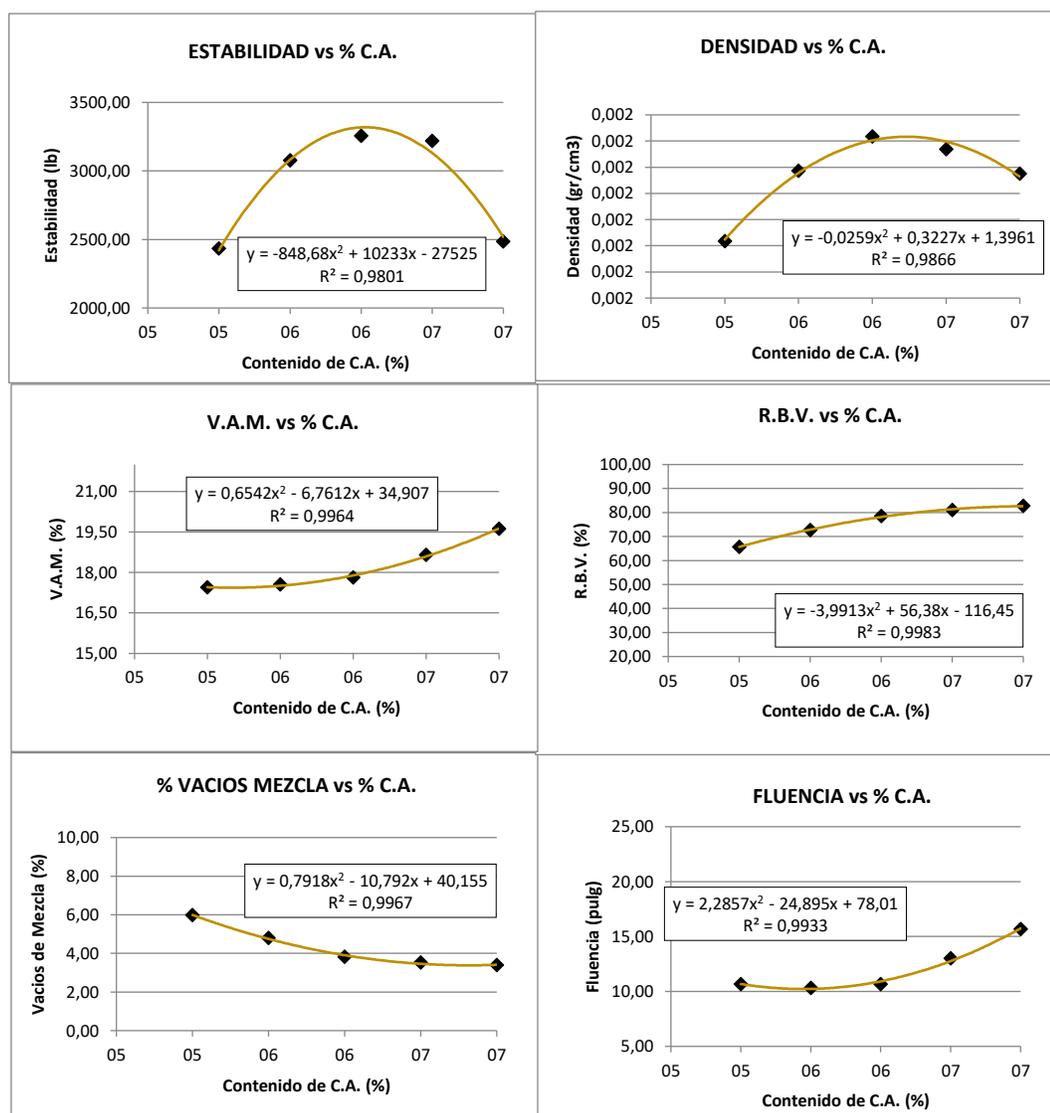
Tabla N° 69 Propiedades volumétricas de la mezcla con 6% pastina

N° de probeta	% de Asfalto		Altura promedio de probeta	Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacíos			
	Base Mezcla	Base Agregados		Seco	Sat. Sup. Seca	Sumergida en agua		Probeta	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)
1	5,00	5,26	6,40	1163,6	1164,7	672	492,7	2,36	2,36	2,51	5,98	17,45	65,72	
2			6,58	1157,0	1157,9	668	490,4	2,36						
3			6,36	1172,6	1173,0	677	496,0	2,36						
4	5,50	5,82	6,35	1175,2	1177,0	687	489,8	2,40	2,39	2,49	4,80	17,55	72,66	
5			6,36	1180,3	1180,9	682	498,9	2,37						
6			6,39	1180,1	1181,6	690	491,6	2,40						
7	6,00	6,38	6,14	1180,6	1182,3	696	486,8	2,43	2,40	2,47	3,82	17,81	78,55	
8			6,20	1177,9	1180,5	691	490,0	2,40						
9			6,49	1221,4	1224,2	710	514,0	2,38						
10	6,50	6,95	6,16	1178,0	1180,9	688	492,9	2,39	2,40	2,45	3,53	18,66	81,08	
11			6,05	1172,0	1174,0	687	487,5	2,40						
12			6,13	1181,6	1182,8	690	493,0	2,40						
13	7,00	7,53	6,14	1183,1	1184,2	685	499,2	2,37	2,39	2,43	3,39	19,62	82,72	
14			6,17	1176,7	1177,9	692	485,9	2,42						
15			6,05	1182,6	1183,8	685	498,8	2,37						
Especificaciones			Mínimo									7,53	6,02	1155,7
			Máximo									5	-	82

N° de probeta	Estabilidad Marshall					Fluencia	
	Lectura del dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
	mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
1	975	2607,26	0,99	2574,67	2433,61	11	10,67
2	893	2386,45	0,95	2259,73		10	
3	925	2472,62	1,00	2466,44		11	
4	1111	2973,48	1,00	2973,48	3077,28	9	10,33
5	1079	2887,31	1,00	2880,09		11	
6	1274	3412,41	0,99	3378,28		11	
7	1070	2863,07	1,27	3636,10	3255,50	11	10,67
8	1148	3073,11	1,04	3196,04		12	
9	1136	3040,80	0,97	2934,37		9	
10	1171	3135,05	1,05	3301,21	3217,89	16	13,00
11	1148	3073,11	1,09	3340,47		11	
12	1060	2836,15	1,06	3011,99		12	
13	855	2284,12	1,06	2418,89	2484,28	17	15,67
14	827	2208,72	1,05	2316,95		16	
15	935	2499,55	1,09	2717,01		14	
Espf.	mínimo				1800		8
	máximo				-		16

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N° 15 Propiedades volumétricas de la mezcla con 6% pastina



Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 70 Resumen de propiedades volumétricas de la mezcla con 6% pastina

	Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Densidad máxima (gr/cm3)	2,40	6,35
	Estabilidad máxima (Lb)	3321,55	6,02
	Vacíos mínimo de la mezcla (%)	4,00	5,97
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%) =	6,11

Fuente: Elaboración propia.

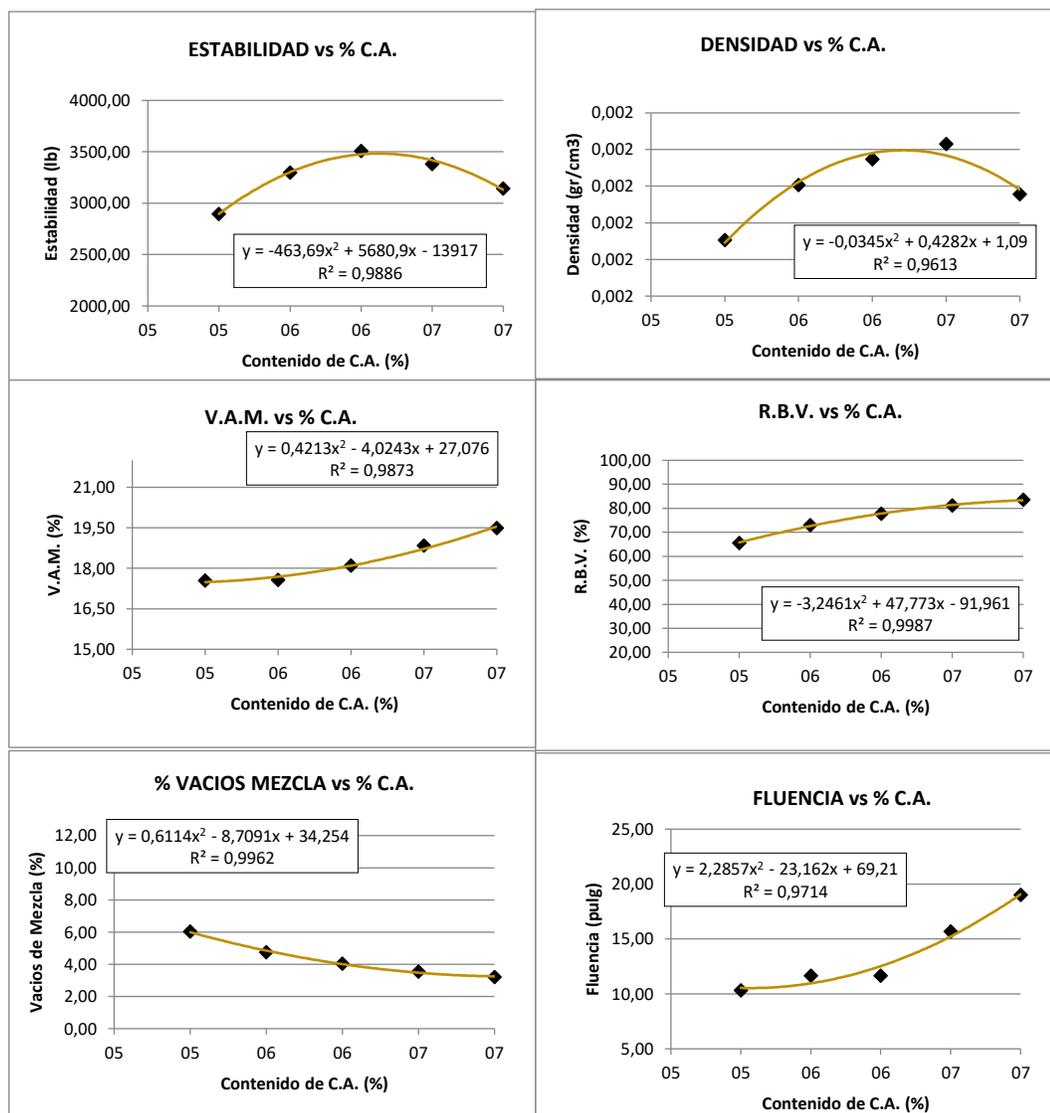
Tabla N° 71 Propiedades volumétricas de la mezcla con 7% pastina

N° de probeta	% de Asfalto		Altura promedio de probeta	Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacíos			
	Base Mezcla	Base Agregados		Seco	Sat. Sup. Seca	Sumergida en agua		Probeta	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)
1	5,00	5,26	6,23	1171,7	1174,7	678	496,7	2,36	2,37	2,51	6,04	17,55	65,58	
2			6,49	1158,0	1162,6	675	488,1	2,37						
3			6,28	1180,6	1183,0	687	496,0	2,38						
4	5,50	5,82	6,57	1175,8	1179,2	697	482,0	2,44	2,40	2,49	4,75	17,57	72,96	
5			6,44	1180,1	1187,9	692	495,9	2,38						
6			6,37	1180,8	1185,6	690	495,6	2,38						
7	6,00	6,38	6,51	1181,1	1188,3	706	482,8	2,45	2,41	2,47	4,03	18,10	77,73	
8			6,29	1185,0	1189,9	696	494,4	2,40						
9			6,33	1215,0	1220,3	714	506,1	2,40						
10	6,50	6,95	6,22	1185,3	1191,9	697	494,9	2,40	2,42	2,45	3,55	18,84	81,16	
11			6,38	1166,9	1172,0	694	478,5	2,44						
12			6,13	1180,4	1184,5	700	484,7	2,44						
13	7,00	7,53	6,25	1191,0	1196,4	699	497,4	2,39	2,40	2,43	3,21	19,49	83,53	
14			6,55	1174,3	1179,9	692	487,9	2,41						
15			6,59	1186,2	1192,3	695	497,3	2,39						
Especificaciones			Mínimo									7,53	6,02	1155,7
			Máximo									5	-	82

N° de probeta	Estabilidad Marshall					Fluencia	
	Lectura del dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
	mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
1	1013	2709,59	1,03	2796,29	2893,11	12	10,33
2	1129	3021,95	0,97	2916,18		10	
3	1088	2911,55	1,02	2966,86		9	
4	1229	3291,23	0,95	3122,72	3295,70	12	11,67
5	1304	3493,19	0,98	3414,59		11	
6	1257	3366,63	1,00	3349,80		12	
7	1293	3463,57	0,96	3325,03	3507,56	13	11,67
8	1301	3485,11	1,02	3540,87		12	
9	1358	3638,60	1,01	3656,79		10	
10	1289	3452,80	1,04	3573,65	3381,51	16	15,67
11	1195	3199,67	0,99	3175,68		14	
12	1194	3196,98	1,06	3395,19		17	
13	1038	2776,91	1,03	2851,88	3141,59	18	19,00
14	1205	3226,60	0,95	3073,34		17	
15	1382	3703,23	0,95	3499,55		22	
Espf.	Mínimo				1800		8
	Máximo				-		16

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N° 16 Propiedades volumétricas de la mezcla con 7% pastina



Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 72 Resumen de propiedades volumétricas de la mezcla con 7% pastina

	Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Densidad máxima (gr/cm3)	2,42	6,25
	Estabilidad máxima (Lb)	3482,89	6,13
	Vacios mínimo de la mezcla (%)	4,00	6,04
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%) =	6,14

Fuente: Elaboración propia.

3.5.6. Determinación de porcentaje óptimo de cemento asfáltico

Según los resultados obtenidos de las tablas de propiedades Marshall, se procede a graficar en el eje X, los porcentajes de cemento asfáltico y en el eje Y, los valores de las propiedades Marshall, para cada porcentaje de pastina, como se vio:

Con las ecuaciones de las curvas de densidad, estabilidad y % de vacíos de la mezcla se procede a calcular el porcentaje óptimo de cemento asfáltico para cada variación de pastina, cumpliendo los siguientes criterios:

- Porcentaje de cemento asfáltico que genere la densidad máxima.
- Porcentaje de cemento asfáltico que genere la estabilidad máxima.
- Porcentaje de cemento asfáltico que genere el promedio de 3 y 5 % de vacíos de la mezcla. Es decir, el contenido de asfalto que genere el 4% de vacíos de la mezcla.

Con estos tres porcentajes, se obtiene un promedio, dicho promedio es el porcentaje óptimo de cemento asfáltico como se muestra en las tablas para cada porcentaje de pastina.

Posteriormente se elaboraron briquetas con el porcentaje optimo y para 2%, 4%, 5%, 6% y 7% de pastina.

Tabla N° 73 Porcentaje óptimo de cemento asfáltico para mezcla con 0 % pastina.

N° de probeta	% de Óptimo Asfalto		Altura promedio de probeta	Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			
	Base Mezcla	Base Agregados		Seco	Sat. Sup. Seca	Sumergida en agua		Probeta	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica
	%	%		cm	gr.	gr.		gr.	cm ³	gr/cm ³	gr/cm ³
1	5,75	6,10	6,43	1153,9	1164,8	675	489,8	2,356	2,35	2,47	
2			6,34	1170,3	1181,2	689	492,2	2,378			
3			6,42	1181,5	1191,9	687	504,9	2,340			
4			6,55	1192,6	1173,1	663	510,1	2,338			
5			6,29	1197,0	1198,2	688	510,2	2,346			
Especificaciones			Mínimo								
			Máximo								

% de Vacíos			Estabilidad Marshall					Fluencia	
% 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	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
4,97	18,10	72,53	834	2227,57	0,98	2183,02	2360,45	10	11,20
			897	2397,22	1,00	2404,41		8	
			921	2461,85	0,98	2418,77		13	
			990	2647,65	0,95	2521,89		9	
			838	2238,35	1,02	2274,16		16	
3	13	75					1800		8
5	-	82					-		16

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 74 Porcentaje óptimo de cemento asfáltico para mezcla con 2 % pasta

N° de probeta	% de Óptimo Asfalto		Altura promedio de probeta	Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			
	Base Mezcla	Base Agregados		Seco	Sat. Sup. Seca	Sumergida en agua		Probeta	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica
	%	%									
1	6,02	6,41	6,18	1168,4	1195,8	705	490,8	2,381	2,37	2,47	
2			6,35	1153,0	1204,7	715	489,7	2,355			
3			6,24	1147,7	1189,4	705	484,4	2,369			
4			6,11	1168,0	1190,3	695	495,3	2,358			
5			6,38	1159,9	1210,1	720	490,1	2,367			
Especificaciones			Mínimo								
			Máximo								

% de Vacíos			Estabilidad Marshall					Fluencia	
% De vacíos mezcla total	V.A.M.(vacío agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)	Lectura del dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
%	%	%	Mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
4,03	17,86	77,42	895	2391,83	1,05	2501,86	2397,43	14	12
			922	2464,54	1,00	2464,54		10	
			839	2241,04	1,03	2306,03		11	
			922	2464,54	1,07	2632,13		9	
			786	2098,32	0,99	2082,58		16	
3	13	75					1800		8
5	-	82					-		16

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 75 Porcentaje óptimo de cemento asfáltico para mezcla con 4 % pasta

N° de probeta	% de Óptimo Asfalto		Altura promedio de probeta	Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			
	Base Mezcla	Base Agregados		Seco	Sat. Sup. Seca	Sumergida en agua		Probeta	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica
	%	%		Cm	gr.	gr.		gr.	cm ³	gr/cm ³	gr/cm ³
1	6,05	6,44	6,40	1191,2	1193,0	694	499,0	2,387	2,38	2,47	
2			6,41	1181,5	1185,1	685	500,1	2,363			
3			6,33	1176,3	1178,8	687	491,8	2,392			
4			6,37	1162,3	1166,3	676	490,3	2,371			
5			6,45	1201,2	1203,8	699	504,8	2,380			
Especificaciones			Mínimo								
			Máximo								

% de Vacíos			Estabilidad Marshall					Fluencia	
% 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	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
3,55	17,52	79,72	852	2276,04	0,99	2247,59	2480,24	14	12,80
			978	2615,34	0,99	2576,11		12	
			982	2626,11	1,01	2639,24		16	
			954	2550,71	1,00	2537,96		15	
			921	2461,85	0,98	2400,30		7	
3	13	75					1800		8
5	-	82					-		16

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 76 Porcentaje óptimo de cemento asfáltico para mezcla con 5 % pasta

N° de probeta	% de Óptimo Asfalto		Altura promedio de probeta	Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta		
	Base Mezcla	Base Agregados		Seco	Sat. Sup. Seca	Sumergida en agua		Probeta	Densidad real	Densidad promedio
	%	%		cm	gr.	gr.	gr.	cm ³	gr/cm ³	gr/cm ³
1	6,08	6,47	6,24	1189,4	1191,5	695	496,5	2,396	2,39	2,47
2			6,32	1175,6	1178,6	690	488,6	2,406		
3			6,29	1185,2	1189,3	688	501,3	2,364		
4			6,43	1197,4	1199,1	697	502,1	2,385		
5			6,21	1180,5	1184,7	688	496,7	2,377		
Especificaciones				Mínimo						
				Máximo						

% de Vacíos			Estabilidad Marshall					Fluencia	
% 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	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
3,25	17,33	81,24	975	2607,26	1,03	2682,87	2553,39	10	14,60
			966	2583,02	1,01	2603,69		15	
			889	2375,68	1,02	2413,69		17	
			935	2499,55	0,98	2449,56		15	
			944	2523,78	1,04	2617,16		16	
3	13	75					1800		8
5	-	82					-		16

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 77 Porcentaje óptimo de cemento asfáltico para mezcla con 6 % pasta

N° de probeta	% de Óptimo Asfalto		Altura promedio de probeta	Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			
	Base Mezcla	Base Agregados		Seco	Sat. Sup. Seca	Sumergida en agua		Probeta	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica
	%	%		Cm	gr.	gr.		gr.	cm ³	gr/cm ³	gr/cm ³
1	6,11	6,51	6,43	1182,8	1174,7	684	490,7	2,410	2,40	2,47	
2			6,45	1171,6	1173,3	685	488,3	2,399			
3			6,47	1181,4	1183,5	689	494,5	2,389			
4			6,46	1179,2	1180,9	690	490,9	2,402			
5			6,54	1195,7	1197,0	699	498,0	2,401			
Especificaciones				Mínimo							
				Máximo							

% de Vacíos			Estabilidad Marshall					Fluencia	
% 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	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
2,63	16,87	84,39	1202	3218,52	0,98	3154,15	2959,25	16	16,40
			1160	3105,43	0,98	3027,79		12	
			1159	3102,73	0,97	3009,65		18	
			1131	3027,34	0,97	2944,08		20	
			1042	2787,68	0,95	2660,56		16	
3	13	75					1800		8
5	-	82					-		16

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 78 Porcentaje óptimo de cemento asfáltico para mezcla con 7 % pastina

N° de probeta	% de Óptimo Asfalto		Altura promedio de probeta	Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			
	Base Mezcla	Base Agregados		Seco	Sat. Sup. Seca	Sumergida en agua		Probeta	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica
	%	%		cm	gr.	gr.		gr.	cm ³	gr/cm ³	gr/cm ³
1	6,14	6,54	6,50	1182,4	1184,7	700	484,7	2,439	2,42	2,46	
2			6,41	1180,1	1183,5	692	491,5	2,401			
3			6,46	1177,5	1180,9	697	483,9	2,433			
4			6,39	1192,1	1196,2	695	501,2	2,378			
5			6,47	1189,6	1195,0	705	490,0	2,428			
Especificaciones			Mínimo								
			Máximo								

% de Vacíos			Estabilidad Marshall					Fluencia	
% 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	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
1,79	16,38	89,06	1087	2908,85	0,96	2799,77	2911,43	17	18,20
			1124	3008,49	0,99	2963,36		19	
			1209	3237,37	0,97	3148,35		16	
			1120	2997,71	0,99	2967,74		21	
			1032	2760,75	0,97	2677,93		18	
3	13	75					1800		8
5	-	82					-		16

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, los porcentajes óptimos para cada diseño de mezcla asfáltica son los siguientes:

Tabla N° 79 Resumen porcentaje óptimos de cemento asfáltico para cada mezcla

Propiedades Marshall	Especificaciones de la norma	Porcentajes de Polvo de Pastina (%)					
		0%	2%	4%	5%	6%	7%
Contenido óptimo de asfalto (%)	-	5,75	6,02	6,05	6,08	6,11	6,14
Densidad (gr/cm ³)	Mín. 2,25	2,35	2,37	2,38	2,39	2,40	2,42
Vacíos de la mezcla (%)	3 - 5	4,97	4,03	3,55	3,25	2,63	1,79
VAM (%)	Mín 13	18,10	17,86	17,52	17,33	16,87	16,38
RBV (%)	75 - 82	72,53	77,42	79,72	81,24	84,39	89,06
Estabilidad (lb)	Mín. 1800	2360,45	2397,43	2480,24	2553,39	2959,25	2911,43
Fluencia (0,01 pulg)	8 – 16	11,20	12,00	12,80	14,60	16,40	18,20

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

4.1. Resumen de resultados de caracterización de los componentes de la mezcla asfáltica de diseño

La granulometría de los agregados es un factor muy importante en el hormigón asfáltico, ya que de este factor depende la economía, manejabilidad y la resistencia de la mezcla, los resultados de un análisis granulométrico se representan en forma gráfica y en tal caso se llaman curvas granulométricas.

Estas gráficas se representan por medio de dos ejes perpendiculares entre sí, horizontal y vertical, en donde las ordenadas representan el porcentaje que pasa y en el eje de las abscisas la abertura del tamiz cuya escala puede ser aritmética, logarítmica o en algunos casos mixta.

Las curvas granulométricas permiten visualizar mejor la distribución de tamaños dentro de una masa de agregados y permite conocer además que tan grueso o fino es.

Se empleó tres diferentes materiales granulares provenientes de la Chancadora Charaja (SEDECA) del departamento de Tarija, debido a que estos materiales deben cumplir con los requerimientos granulométricos para una mezcla asfáltica en caliente se analizó cada uno de ellos y se escogió el que mejor se acomodara a los requerimientos.

Se han establecido ciertas normas y límites tanto para el tamaño de los agregados como para su granulometría, de esta manera el proyectista puede seguir una guía o patrón al seleccionar la combinación más adecuada de sus agregados.

4.1.1. Diseño granulométrico Curva 1

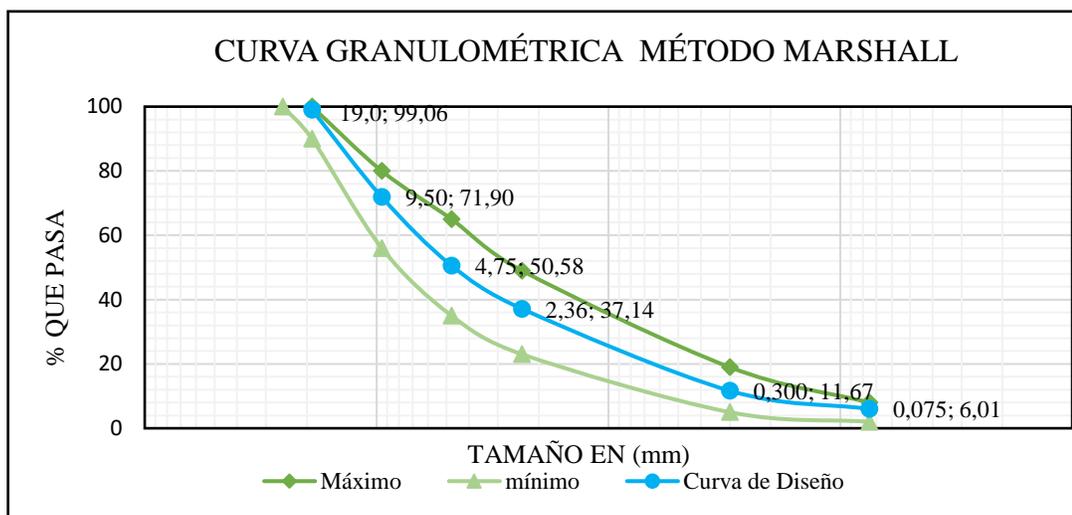
Tabla N° 80 Diseño granulométrico curva 1

Tamices	Tamaño (mm)	Dosificación							
		Grava *	Gravilla *	Arena *	Filler *	Grava	Gravilla	Arena	Filler
		Peso Ret. (gr)	Peso Ret. (gr)	Peso Ret. (gr)	Peso Ret. (gr)	(%)	(%)	(%)	(%)
						33.00	22.00	40.75	4.25
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3/4"	19,0	142,73	0,00	0,00	0,00	47,10	0,00	0,00	0,00
1/2"	12,5	2672,20	22,80	0,00	0,00	881,83	5,02	0,00	0,00
3/8"	9,50	1374,83	78,83	0,00	0,00	453,70	17,34	0,00	0,00
N°4	4,75	799,57	3579,37	36,43	0,00	263,86	787,46	14,85	0,00
N°8	2,36	10,67	1264,53	957,50	0,00	3,52	278,20	390,18	0,00
N°16	1,18	0,00	54,47	1290,83	0,00	0,00	11,98	526,01	0,00
N°30	0,60	0,00	0,00	989,23	0,00	0,00	0,00	403,11	0,00
N°50	0,30	0,00	0,00	816,00	0,00	0,00	0,00	332,52	0,00
N°100	0,15	0,00	0,00	412,17	0,00	0,00	0,00	167,96	0,00
N°200	0,075	0,00	0,00	282,13	0,00	0,00	0,00	114,97	0,00
BASE	-	0,00	0,00	215,70	5000,00	0,00	0,00	87,90	212,50
Peso total		5000,0	5000,0	5000,0	5000,0	1650,00	1100,00	2037,50	212,50

Curva de dosificación				Especificaciones ASTM D3515	
Peso Ret. 100.00	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total	Mínimo	Máximo
0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
47,10	47,10	0,94	99,06	90	100
886,84	933,94	18,68	81,32	-	-
471,04	1404,98	28,10	71,90	56	80
1066,16	2471,15	49,42	50,58	35	65
671,90	3143,04	62,86	37,14	23	49
538,00	3681,04	73,62	26,38	-	-
403,11	4084,16	81,68	18,32	-	-
332,52	4416,68	88,33	11,67	5	19
167,96	4584,63	91,69	8,31	-	-
114,97	4699,60	93,99	6,01	2	8
300,40	5000,00	100,00	0,00	-	-
5000,0					

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 17 Curva Granulométrica 1



Fuente: Elaboración propia

4.1.2. Diseño granulométrico Curva 2

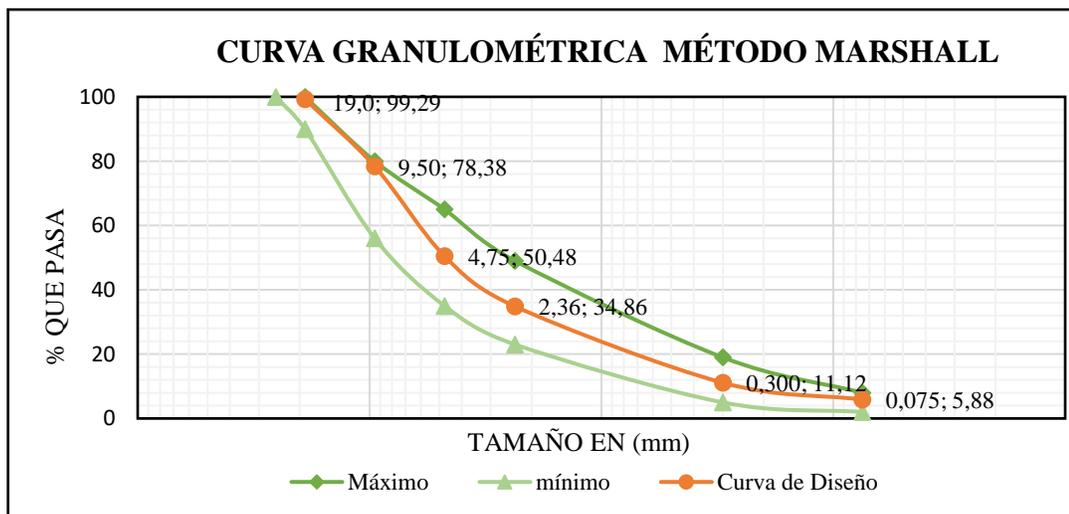
Tabla N° 81 Diseño granulométrico curva 2

Tamices	Tamaño (mm)	Grava *	Gravilla *	Arena *	Filler *	Dosificación				
						Peso Ret.	Grava	Gravilla	Arena	Filler
						(gr)	(%)	(%)	(%)	(%)
						25.00	33.00	37.75	4.25	
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
3/4"	19,0	142,73	0,00	0,00	0,00	35,68	0,00	0,00	0,00	
1/2"	12,5	2672,20	22,80	0,00	0,00	668,05	7,52	0,00	0,00	
3/8"	9,50	1374,83	78,83	0,00	0,00	343,71	26,01	0,00	0,00	
N°4	4,75	799,57	3579,37	36,43	0,00	199,89	1181,19	13,75	0,00	
N°8	2,36	10,67	1264,53	957,50	0,00	2,67	417,29	361,46	0,00	
N°16	1,18	0,00	54,47	1290,83	0,00	0,00	17,98	487,29	0,00	
N°30	0,60	0,00	0,00	989,23	0,00	0,00	0,00	373,44	0,00	
N°50	0,30	0,00	0,00	816,00	0,00	0,00	0,00	308,04	0,00	
N°100	0,15	0,00	0,00	412,17	0,00	0,00	0,00	155,59	0,00	
N°200	0,075	0,00	0,00	282,13	0,00	0,00	0,00	106,51	0,00	
BASE	-	0,00	0,00	215,70	5000,00	0,00	0,00	81,43	212,50	
Peso total		5000,0	5000,0	5000,0	5000,0	1250,00	1650,00	1887,50	212,50	

Curva de dosificación				Especificaciones ASTM D3515	
Peso Ret. 100.00	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total	Mínimo	Máximo
0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
35,68	35,68	0,71	99,29	90	100
675,57	711,26	14,23	85,77	-	-
369,72	1080,98	21,62	78,38	56	80
1394,84	2475,82	49,52	50,48	35	65
781,42	3257,23	65,14	34,86	23	49
505,26	3762,50	75,25	24,75	-	-
373,44	4135,94	82,72	17,28	-	-
308,04	4443,98	88,88	11,12	5	19
155,59	4599,57	91,99	8,01	-	-
106,51	4706,07	94,12	5,88	2	8
293,93	5000,00	100,00	0,00	-	-
5000,0					

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 18 Curva Granulométrica 2



Fuente: Elaboración propia

4.1.3. Diseño Granulométrico Curva 3

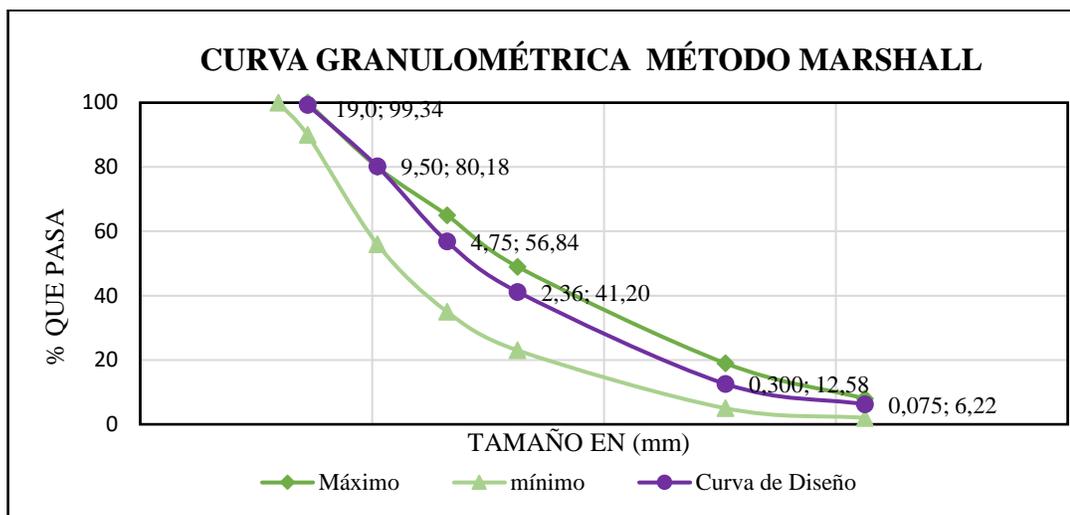
Tabla N° 82 Diseño granulométrico curva 3

Tamices	Tamaño (mm)	Dosificación							
		Grava *	Gravilla *	Arena *	Filler *	Grava	Gravilla	Arena	Filler
		Peso Ret. (gr)	Peso Ret. (gr)	Peso Ret. (gr)	Peso Ret. (gr)	(%) 23.00	(%) 27.00	(%) 45.75	(%) 4.25
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3/4"	19,0	142,73	0,00	0,00	0,00	32,83	0,00	0,00	0,00
1/2"	12,5	2672,20	22,80	0,00	0,00	614,61	6,16	0,00	0,00
3/8"	9,50	1374,83	78,83	0,00	0,00	316,21	21,28	0,00	0,00
N°4	4,75	799,57	3579,37	36,43	0,00	183,90	966,43	16,67	0,00
N°8	2,36	10,67	1264,53	957,50	0,00	2,45	341,42	438,06	0,00
N°16	1,18	0,00	54,47	1290,83	0,00	0,00	14,71	590,56	0,00
N°30	0,60	0,00	0,00	989,23	0,00	0,00	0,00	452,57	0,00
N°50	0,30	0,00	0,00	816,00	0,00	0,00	0,00	373,32	0,00
N°100	0,15	0,00	0,00	412,17	0,00	0,00	0,00	188,57	0,00
N°200	0,075	0,00	0,00	282,13	0,00	0,00	0,00	129,08	0,00
BASE	-	0,00	0,00	215,70	5000,00	0,00	0,00	98,68	212,50
Peso total		5000,0	5000,0	5000,0	5000,0	1150,00	1350,00	2287,50	212,50

Curva de dosificación				Especificaciones ASTM D3515	
Peso Ret. 100.00	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total	Mínimo	Máximo
0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
32,83	32,83	0,66	99,34	90	100
620,76	653,59	13,07	86,93	-	-
337,50	991,09	19,82	80,18	56	80
1167,00	2158,08	43,16	56,84	35	65
781,93	2940,02	58,80	41,20	23	49
605,26	3545,28	70,91	29,09	-	-
452,57	3997,86	79,96	20,04	-	-
373,32	4371,18	87,42	12,58	5	19
188,57	4559,74	91,19	8,81	-	-
129,08	4688,82	93,78	6,22	2	8
311,18	5000,00	100,00	0,00	-	-
5000,0					

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 19 Curva Granulométrica 3



Fuente: Elaboración propia

4.1.4. Selección de la mejor curva granulométrica

Las Tablas y gráficos anteriores muestran las curvas granulométricas del resultado de tres diferentes tipos de agregado usados para el análisis de la mejor granulometría a usar para elaborar la mezcla asfáltica modificada con Polvo de pastina, donde se observa los límites granulométricos exigidos por la norma ASTM D3515 de color verde; también se observa la curva granulométrica de la mezcla de los agregados ensayados que debe encontrarse dentro de los límites establecidos.

Finalmente se seleccionó la Curva 1 debido a que la curva granulométrica de la mezcla de los agregados ensayados tiende a acomodarse de forma ideal a los límites exigidos y no así mostrando puntos extremos que rozan la franja dada por la norma como es el caso de la Curva 2 y Curva 3.

4.1.5. Caracterización de los agregados pétreos y cemento asfáltico

Los resultados obtenidos de la caracterización de los agregados, el cemento asfáltico y adoptar las especificaciones de la pastina, se procedió a elaborar la mezcla asfáltica.

Tabla N° 83 Resultados de la caracterización de los agregados pétreos

Ensayo	Agregados	Especificación		Resultado	ASTM
		Mín.	Máx.		
Peso específico y absorción de agua en agregados gruesos	Grava 3/4"	-	-	2,71 gr/cm ³	C-127
	Gravilla 3/8"	-	-	2,72 gr/cm ³	
Peso específico y absorción de agua en agregados finos	Arena	-	-	2,73 gr/cm ³	C-128
Peso unitario compactado	Grava 3/4"	-	-	1,456 gr/cm ³	C-29
	Gravilla 3/8"	-	-	1,473 gr/cm ³	
	Arena	-	-	1,788 gr/cm ³	
Equivalente de arena	Arena	50%	-	80,68%	D-2419
Porcentaje de caras fracturadas	Grava 3/4"	75%	-	78,40%	D-5821
	Gravilla 3/8"	75%	-	79,00%	
Desgaste mediante la máquina de los Ángeles	Grava 3/4"	-	35%	12,18%	C-131
	Gravilla 3/8"	-	35%	16,30%	
Determinación de partículas largas y achatadas	Grava 3/4"	-	10%	6,18%	D-4791
	Gravilla 3/8"	-	10%	4,22%	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 84 Resultados de los ensayos de caracterización del cemento asfáltico

Ensayo	Especificación		Resultado	Norma
	Mínimo	Máximo		
Peso específico	1	1,05	1,030 gr/cm ³	ASTM D-70
Punto de ablandamiento	42	53	45 °C	ASTM D-36
Punto de inflamación	232	-	287 °C	ASTM D-92
Penetración	85	100	96 mm	ASTM D-5
Ductilidad	100	-	103 cm	ASTM D-102

Fuente: Elaboración propia.

4.2. Diseño de mezclas asfálticas con pastina

Al culminar el diseño de una mezcla asfáltica convencional con 0% de pastina y obtener el porcentaje óptimo de cemento asfáltico para cada porcentaje de pastina 2%, 4%, 5%, 6% y 7%, se procede a elaborar las briquetas con los porcentajes de cemento asfáltico y pastina.

El contenido óptimo de asfalto se determina a partir de los datos mostrados en el Ensayo Marshall, considerando los resultados de las curvas correspondientes a Estabilidad, Peso Unitario y Porcentaje de Vacíos, en las cuales se determina el contenido de asfalto para conseguir:

- ✓ Estabilidad máxima.
- ✓ Peso unitario máximo.

El primer paso consiste en reproducir los gráficos de la metodología Marshall, a partir de la información reportada en los informes de diseño de mezcla realizados por el laboratorio. En estos gráficos se comparan las propiedades de la mezcla asfáltica versus el contenido de asfalto y se calculan las ecuaciones de la línea de tendencia para cada parámetro según se muestra en método Marshall.

Estos gráficos permiten determinar el rango de contenido de asfalto dentro del cual los parámetros de diseño Marshall cumplen con las especificaciones.

Tabla N° 85 Resultados de las propiedades Marshall para cada porcentaje de Pastina

Propiedades Marshall	Especificaciones de la norma	Porcentajes de Polvo de Pastina (%)					
		0%	2%	4%	5%	6%	7%
Contenido óptimo de asfalto (%)	-	5,75	6,02	6,05	6,08	6,11	6,14
Densidad (gr/cm ³)	Mín. 2,25	2,35	2,37	2,38	2,39	2,40	2,42
Vacíos de la mezcla (%)	3 - 5	4,97	4,03	3,55	3,25	2,63	1,79
VAM (%)	Mín. 13	18,10	17,86	17,52	17,33	16,87	16,38
RBV (%)	75 - 82	72,53	77,42	79,72	81,24	84,39	89,06
Estabilidad (lb)	Mín. 1800	2360,45	2397,43	2480,24	2553,39	2959,25	2911,43
Fluencia (0,01 pulg)	8 - 16	11,20	12,00	12,80	14,60	16,40	18,20

Fuente: Elaboración propia

Una vez analizados los rangos del contenido de asfalto en que los parámetros de diseño cumplen o no cumplen las especificaciones, al no cumplir las especificaciones se busca mediante análisis el contenido óptimo del filler (Polvo de Pastina).

Tabla N° 86 Elección del porcentaje óptimo de polvo de pastina

Criterios para un contenido óptimo Marshall	Especificaciones de la norma	Valor	Elección del porcentaje de Polvo de Pastina
Densidad máxima (gr/cm ³)	Mín. 2,30	2,42	7
Vacíos de la mezcla dentro del rango (%)	3 – 5	4,03	2
Estabilidad máxima (lb)	Mín. 1800	2959,25	6
Fluencia promedio del rango (0,01 pulg)	8 – 16	12,00	2
Promedio			4,25

Fuente: Elaboración propia

Se elabora una tabla de resumen similar mostrada anteriormente. Esta tabla muestra el resultado del análisis, en donde se establecen los valores máximos y mínimos de cada uno de los parámetros dentro el rango de la especificación de la norma. Se puede observar que para el caso expuesto del porcentaje de Polvo de Pastina óptima del **4,25%**, existen un cumplimiento en las propiedades Marshall dadas por norma.

Tabla N° 87 Resultados de las propiedades Marshall para el porcentaje óptimo de polvo de Pastina

Propiedades Marshall	Especificaciones de la norma	Resultados	Cumplimiento
Contenido óptimo de pastina (%)	-	4.25%	✓
Contenido óptimo de asfalto (%)	-	6.08	✓
Densidad (gr/cm ³)	Mín. 2,25	2.38	SI
Vacíos de la mezcla (%)	3 – 5	3.33	SI
VAM (%)	Mín. 13	17.39	SI
RBV (%)	75 – 82	80.86	SI
Estabilidad (lb)	Mín. 1800	2520.37	SI
Fluencia (0,01 pulg)	8 – 16	12.20	SI

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 88 Dosificación con porcentajes óptimos para el porcentaje óptimo de polvo de pastina

Porcentaje óptimo de Polvo de Pastina (%)	4,25%
Contenido óptimo de cemento asfáltico	6,08%
Porcentaje de Agregado (%)	93,92%
Peso del Cemento Asfáltico (gr)	72,96
Peso de Grava (gr)	371,92
Peso de Gravilla (gr)	247,95
Peso de Arena (gr)	459,27
Peso de Polvo de pastina (gr)	47,90
Peso total de la briqueta (gr)	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

4.2.1. Resultados de propiedades Marshall con porcentaje óptimo de pastina

Los resultados de las briquetas elaboradas con el mismo procedimiento antes mencionado, se obtuvieron datos y resultados de las propiedades volumétricas, estabilidad y fluencia del método Marshall, como se muestra en las siguientes planillas:

Tabla N° 89 Propiedades volumétricas con los contenidos óptimos

Granulometría Formada	Peso Específico	% Agregado	Tipo de Cemento Asfáltico: Convencional	85/100	Agregado	P.E.	%
Mat. Retenido Tamiz N° 4	2,66	50,58	Número de golpes por cara:	75	Grava	2,63	33
Mat. Pasa Tamiz N° 4	2,71	49,42	Temperatura de mezclado (°C)	160	Gravilla	2,70	22
Peso Específico Total	2,68	100	Peso específico del ligante AASHTO T-229 (gr/cm3)	1,0300	Arena	2,69	40,75
					Filler	2,855	4,25

N° de probeta	% de Asfalto		Altura promedio de probeta	Peso Briqueta			Volumen Probeta	Densidad Briqueta		
	Base Mezcla	Base Agregados		Seco	Sat. Sup. Seca	Sumergida en agua		Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica
	%	%		grs.	grs.	grs.		grs/cm3	grs/cm3	grs/cm3
1	6,08	6,47	6,41	1180,0	1181,8	673	508,8	2,32	2,32	2,43
2	6,08	6,47	6,42	1185,6	1187,3	677	510,3	2,32	2,32	2,43

3	6,08	6,47	6,40	1190,4	1191,9	683	508,9	2,34	2,34	2,43
4	6,08	6,47	6,45	1183,7	1186,5	672	514,5	2,30	2,30	2,43
5	6,08	6,47	5,87	1085,6	1087,6	619	468,6	2,32	2,32	2,43
6	6,08	6,47	6,52	1186,9	1189,4	673	516,4	2,30	2,30	2,43
7	6,08	6,47	6,32	1190,9	1193,2	675	518,2	2,30	2,30	2,43
8	6,08	6,47	6,33	1287,4	1289,9	732	557,9	2,31	2,31	2,43
9	6,08	6,47	6,47	1195,3	1197,6	685	512,6	2,33	2,33	2,43
10	6,08	6,47	5,89	1200,6	1202,7	683	519,7	2,31	2,31	2,43
11	6,08	6,47	6,48	1191,8	1194,1	681	513,1	2,32	2,32	2,43
12	6,08	6,47	6,35	1213,9	1215,0	687	528,0	2,30	2,30	2,43
13	6,08	6,47	6,37	1228,3	1230,7	701	529,7	2,32	2,32	2,43
14	6,08	6,47	6,48	1314,2	1316,5	745	571,5	2,30	2,30	2,43
15	6,08	6,47	5,88	1250,4	1252,9	713	539,9	2,32	2,32	2,43
16	6,08	6,47	6,30	1188,2	1190,4	677	513,4	2,31	2,31	2,43
17	6,08	6,47	6,49	1143,7	1145,8	651	494,8	2,31	2,31	2,43
18	6,08	6,47	6,54	1193,4	1195,5	682	513,5	2,32	2,32	2,43
19	6,08	6,47	6,46	1207,7	1210,2	691	519,2	2,33	2,33	2,43
20	6,08	6,47	5,86	1181,5	1183,7	678	505,7	2,34	2,34	2,43
21	6,08	6,47	6,41	1194,3	1196,8	685	511,8	2,33	2,33	2,43
22	6,08	6,47	6,38	1245,8	1248,2	710	538,2	2,31	2,31	2,43
23	6,08	6,47	6,12	1174,5	1176,9	665	511,9	2,29	2,29	2,43
24	6,08	6,47	5,99	1202,1	1204,4	682	522,4	2,30	2,30	2,43
25	6,08	6,47	6,23	1232,0	1234,3	700	534,3	2,31	2,31	2,43
26	6,08	6,47	6,25	1226,8	1229,0	697	532,0	2,31	2,31	2,43
27	6,08	6,47	6,32	1159,3	1161,5	663	498,5	2,33	2,33	2,43
28	6,08	6,47	6,08	1132,6	1134,9	644	490,9	2,31	2,31	2,43
29	6,08	6,47	6,27	1166,8	1169,2	665	504,2	2,31	2,31	2,43
30	6,08	6,47	5,95	1189,2	1192,0	661	531,0	2,24	2,24	2,43

N° de probeta	% de Vacíos			Estabilidad Marshall					Fluencia	
	% 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 final	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	0,01 pulg	0,01 pulg
1	4,53	18,22	75,14	1316	3525,50	0,99	3472,62	3472,62	10	10,00
2	4,36	18,07	75,89	1204	3223,91	0,98	3167,49	3167,49	18	18,00
3	3,71	17,51	78,84	1206	3229,30	0,99	3188,93	3188,93	13	13,00
4	5,29	18,87	71,97	1063	2844,23	0,98	2773,12	2773,12	14	14,00
5	4,63	18,31	74,70	1082	2895,39	1,14	3309,43	3309,43	18	18,00
6	5,38	18,95	71,59	1345	3603,59	0,96	3452,60	3452,60	9	9,00
7	5,39	18,96	71,55	996	2663,81	1,27	3383,04	3383,04	8	8,00
8	5,01	18,63	73,13	1132	3030,03	1,01	3045,18	3045,18	12	12,00
9	4,01	17,77	77,45	1412	3784,01	0,97	3670,49	3670,49	14	14,00
10	4,90	18,54	73,57	991	2650,34	1,14	3013,44	3013,44	16	16,00
11	4,38	18,09	75,78	1228	3288,54	0,97	3181,66	3181,66	19	19,00
12	5,36	18,93	71,70	1134	3035,41	1,00	3035,41	3035,41	13	13,00
13	4,54	18,23	75,09	1008	2696,12	1,00	2682,64	2682,64	18	18,00
14	5,34	18,91	71,78	947	2531,86	0,97	2449,57	2449,57	17	17,00

15	4,66	18,33	74,58	942	2518,40	1,14	2870,97	2870,97	15	15,00
16	4,73	18,39	74,30	1026	2744,59	1,01	2780,27	2780,27	11	11,00
17	4,85	18,49	73,79	992	2653,04	0,97	2560,18	2560,18	12	12,00
18	4,33	18,05	76,02	1144	3062,34	0,95	2922,70	2922,70	10	10,00
19	4,24	17,98	76,39	1250	3347,78	0,97	3255,71	3255,71	11	11,00
20	3,82	17,61	78,30	1255	3361,24	1,15	3851,98	3851,98	11	11,00
21	3,94	17,71	77,77	1262	3380,09	0,99	3329,39	3329,39	9	9,00
22	4,71	18,37	74,36	1120	2997,71	1,27	3807,10	3807,10	8	8,00
23	5,55	19,09	70,94	1368	3665,53	1,07	3903,79	3903,79	12	12,00
24	5,27	18,86	72,04	1300	3482,42	1,11	3851,56	3851,56	14	14,00
25	5,08	18,69	72,83	1141	3054,26	1,03	3152,00	3152,00	16	16,00
26	5,07	18,68	72,86	1225	3280,46	1,03	3369,03	3369,03	14	14,00
27	4,27	17,99	76,29	1060	2836,15	1,01	2858,84	2858,84	13	13,00
28	5,02	18,64	73,06	983	2628,80	1,08	2833,85	2833,85	13	13,00
29	4,74	18,40	74,26	1210	3240,07	1,02	3308,11	3308,11	14	14,00
30	7,81	21,03	62,87	1003	2682,66	1,12	2999,21	2999,21	17	17,00
Esp.	Mín.	3	13	65			1800		8	
	Máx.	5	-	75			-		14	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 90 Resumen de propiedades volumétricas con el contenido óptimo

Propiedades Marshall	Densidad (gr/cm ³)	Vacíos de la mezcla (%)	VAM (%)	RBV (%)	Estabilidad (lb)	Fluencia (0,01 pulg)
	mín. 2,25	3 - 5	mín 13	75 - 82	mín. 1800	8 – 16
Promedio	2,38	3,33	17,39	80,86	2520,37	12,20
Mínimo	3	13	65	1800	8	
Máximo	5	-	75	-	14	

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Análisis comparativo del efecto de la incorporación de polvo de pastina como filler a la mezcla asfáltica, mediante el ensayo Marshall

Para poder determinar si el polvo de pastina (filler), proporciona mejores propiedades Marshall, es necesario realizar un análisis comparativo entre las cantidades usadas en cada caso.

las propiedades más importantes que definen el contenido óptimo de filler son varias, se tomara en cuenta las siguientes:

1. Porcentaje de filler que proporcione la densidad máxima.
2. Porcentaje de filler que proporcione la estabilidad máxima
3. Porcentaje de filler que proporcione el 4% de vacíos de la mezcla.
4. Porcentaje de filler que cumpla con las especificaciones de la norma.

Para cada porcentaje de filler agregado, se tomarán los resultados de cada propiedad con los que se trabajó en el presente proyecto, teniendo en cuenta que los porcentajes de filler (Polvo de Pastina) fueron 0%, 2%, 4%, 5%, 6% y 7% correspondientemente y el contenido de filler óptimo fue de 4,25%; con la finalidad de evaluar y analizar los resultados obtenidos y su efecto que produce al agregarse el polvo de Pastina dentro de las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica.

El análisis se lo realiza a partir de la muestra sin porcentaje de filler agregado, teniendo en cuenta que las mezclas asfálticas varían en cuanto al porcentaje de asfalto y agregados, además se evalúa de acuerdo a las normas establecidas para el diseño Marshall.

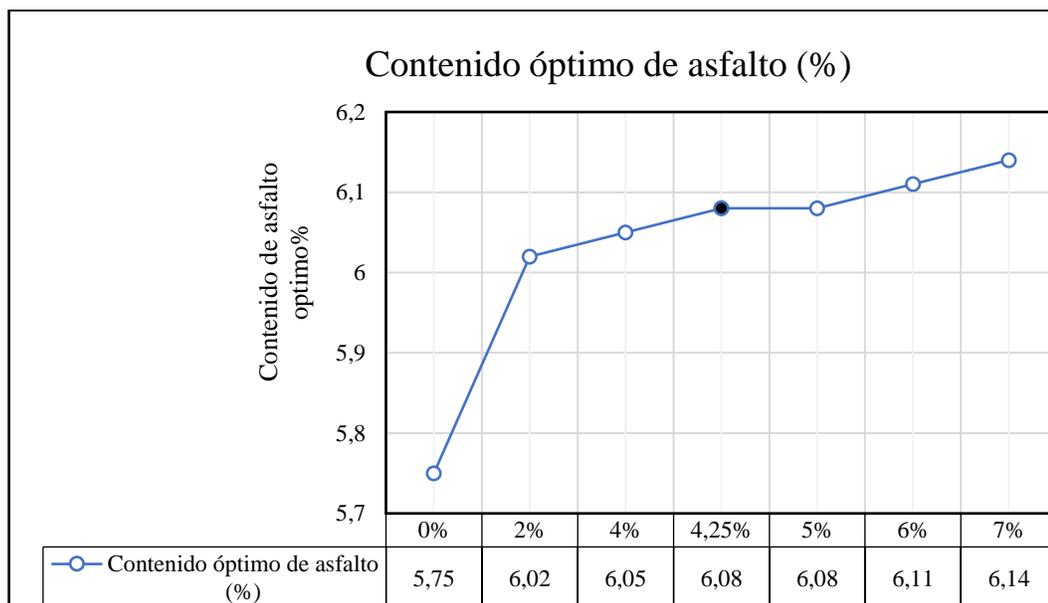
Dentro de un estudio de propiedades volumétricas Marshall es necesario observar y analizar en conjunto lo que sucede para porcentaje de filler añadido (Polvo de pastina). A continuación, se mostrará en detalle el análisis comparativo de cada propiedad volumétrica

De los resultados del Tabla “Resultados de las propiedades Marshall para cada porcentaje de Pastina”, obtenemos los siguientes gráficos:

4.3.1. Contenido óptimo de asfalto

La práctica de diseño de mezclas asfálticas ha recurrido a diferentes métodos para establecer un diseño óptimo en laboratorio; el más utilizado es el método Marshall, siendo el más común en la práctica.

El contenido óptimo de asfalto para una carpeta, es la cantidad de asfalto necesaria para formar alrededor de una partícula una membrana con espesor suficiente para resistir los elementos de intemperie.

Gráfico N° 20 Contenido óptimo de asfalto

Fuente: Elaboración propia

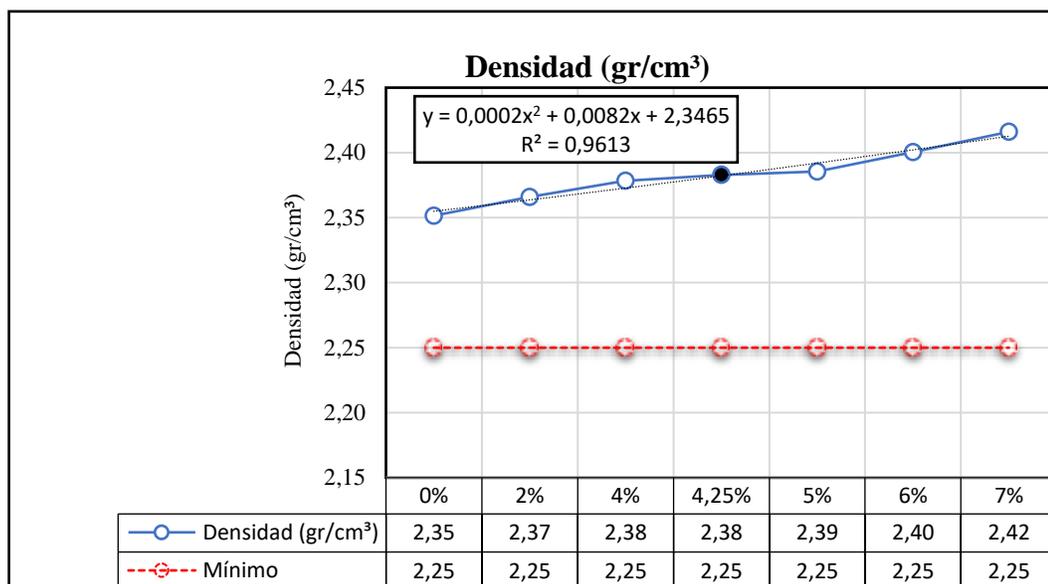
En las mezclas es importante conocer la cantidad de asfalto a emplearse lo cual depende de varios factores que se calcularon para cada porcentaje añadido de polvo de pastina, seleccionando los porcentajes que cumplen de forma adecuada las especificaciones de la norma y sacando un promedio dando como resultado un porcentaje óptimo de polvo de pastina de 4,25% con un contenido óptimo de asfalto de 6,08%.

Observando el gráfico, se puede apreciar una gran similitud en cuanto al contenido óptimo de cemento asfáltico. Por otra parte, se observa que el porcentaje óptimo de asfalto sube a medida que aumenta el porcentaje de polvo de pastina.

4.3.2. Densidad máxima

La densidad Máxima de una mezcla asfáltica es una de las propiedades más importantes y determinantes al momento de definir el contenido óptimo de cemento asfáltico, porque mientras mayor sea la densidad, mayor es su grado de resistencia a las cargas dinámicas vehiculares, por ello es necesario conocer el comportamiento que tienen al adicionarles diferentes porcentajes de Polvo de pastina.

Gráfico N° 21 Densidad máxima



Fuente: Elaboración propia

Analizando el gráfico, se observa que la densidad posee una curva de tendencia ascendente ajustada a un modelo matemático polinómico de segundo grado, cuyo coeficiente de determinación es 0,9613, lo que indica que hay una alta relación directa entre la densidad y el contenido de polvo de pastina, es decir que, a mayor porcentaje de este filler, mayor es la densidad máxima.

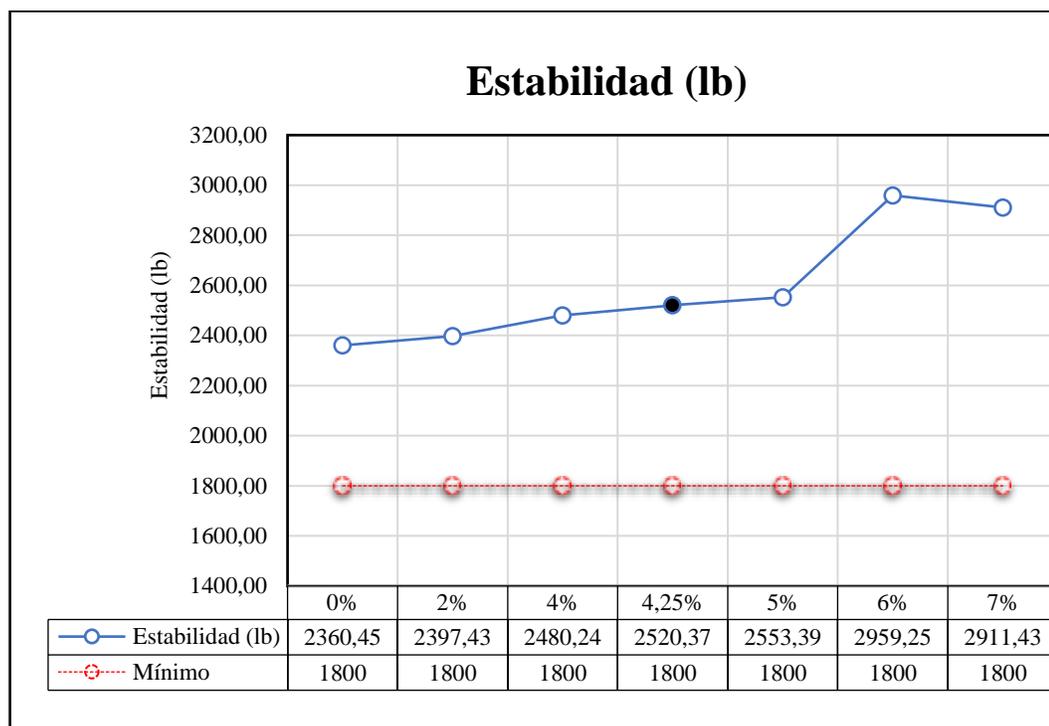
De acuerdo a este gráfico, se puede observar que para un porcentaje óptimo de polvo de pastina de 4,25 %, obtenido mediante el ensayo Marshall en la mezcla asfáltica modificada se tiene una densidad de 2,38 g/cm³. Se obtuvo un incremento de 1,40 % de la densidad en relación con la mezcla convencional sin este filler que es de 2,35 g/cm³, se pudo verificar un aumento de densidad de la mezcla modificada a comparación de la mezcla convencional. según especificaciones del método Marshall se ve que cada porcentaje cumple con la especificación que la densidad máxima debe ser mayor a 2,25 gr/cm³.

4.3.3. Estabilidad

La estabilidad es la capacidad de una mezcla asfáltica de resistir la acción del desplazamiento y deformación bajo las cargas impuestas.

Se puede observar que con la presencia de Polvo de pastina la mezcla asfáltica tiene una mejora considerable dentro de la estabilidad cumpliendo con el mínimo establecido por la norma que indica que debe ser mayor a 1800 lb.

Gráfico N° 22 Estabilidad



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico, estabilidad de Marshall, se presenta, en el eje “x”, el porcentaje de polvo de pastina añadido que se usó para la elaboración de cada ensayo y en el eje “y” se presenta el promedio de la estabilidad obtenida.

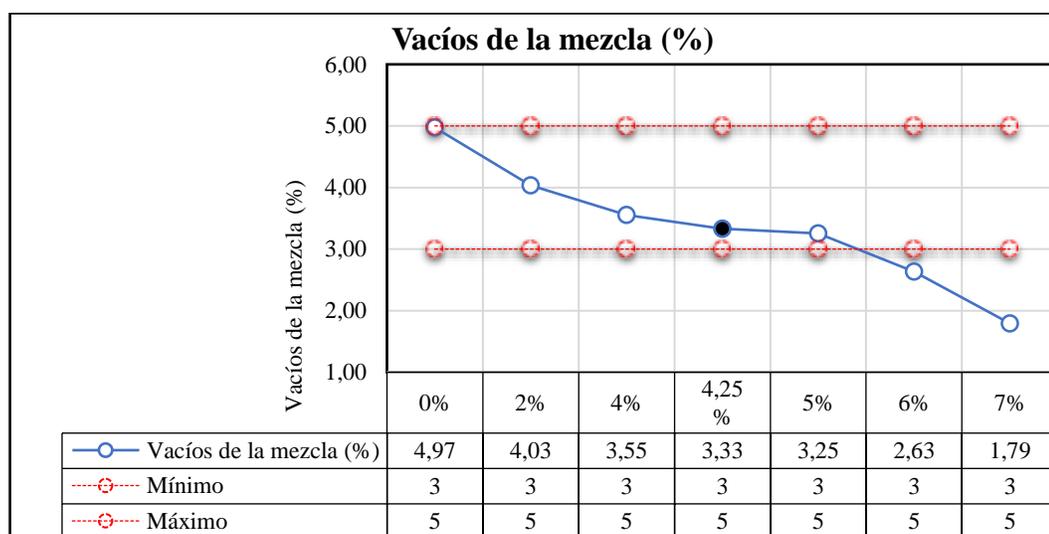
De acuerdo al gráfico mostrado anteriormente, la estabilidad mínima que se requiere según las Especificaciones de 1800 lb. representado en el gráfico por la línea horizontal entrecortada de color rojo.

De acuerdo a los resultados de estabilidad Marshall para los diferentes porcentajes de polvo de pastina de las mezclas estudiadas se puede apreciar que las diferentes mezclas asfálticas modificadas cumplen con la especificación mínima de la estabilidad.

4.3.4. Vacíos de la mezcla

Los vacíos en una mezcla asfáltica, proporciona la clasificación de la misma, que según la cantidad de vacíos puede ser densa, semi densa, semi porosa o porosa, es decir que a mayores vacíos mayor será la porosidad y a menores vacíos más densa será la mezcla asfáltica. En el presente trabajo se estudian las mezclas densas con especificaciones de 3% a 5% de vacíos de la mezcla. Sin embargo, es necesario primero analizar el comportamiento de los vacíos de la mezcla con las variaciones del polvo de pastina como filler.

Gráfico N° 23 Vacíos de la mezcla



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico, podemos ver en el eje “x” el porcentaje de polvo de pastina (filler) y en el eje “y” observamos el porcentaje de vacíos de la mezcla, el cual, según las especificaciones de la norma, debe estar comprendido entre 3,00% y 5,00%; estos límites se muestran en el grafico anterior representado por las líneas entrecortadas de color rojo.

Los especímenes que cumplen con estar dentro de los límites establecidos por la norma, son los elaborados con 0%, 2%, 4%, 5% y con el contenido óptimo de filler que es del 4,25%.

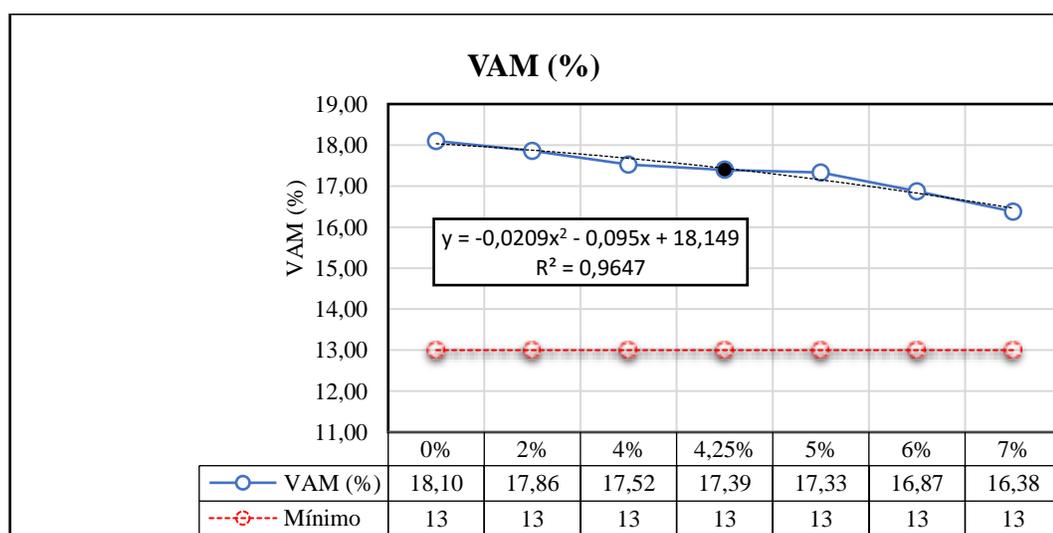
Como podemos observar en la gráfica anterior, las mezclas diseñadas con menor porcentaje de polvo de pastina presentan mayor cantidad de vacíos en la mezcla lo que puede ocasionar pasajes a través de las mezclas por los cuales puede entrar el agua y el aire, y causar deterioro

Relacionando el presente gráfico con los demás gráficos de las propiedades volumétricas Marshall, podemos determinar que el contenido óptimo de asfalto es de 6,08% correspondiente al contenido óptimo de filler de 4,25%, ya que los especímenes elaborados con este contenido de filler vienen cumpliendo con todos los requerimientos exigidos.

4.3.5. Vacíos del agregado mineral (V.A.M) y relación betún vacíos (R.B.V)

Los vacíos del agregado mineral (V.A.M.), se refiere exclusivamente a los vacíos que generan los agregados sin presencia del ligante asfáltico, y se lo determina a partir de la dosificación granulométrica y los pesos específicos de los agregados. La norma específica que una mezcla asfáltica densa debe tener mínimamente el 13% de vacíos del agregado mineral, para que el ligante asfáltico pueda ocupar fácilmente parte de ese porcentaje. Por esta razón, es necesario analizar el comportamiento de los vacíos del agregado mineral con los diferentes porcentajes de polvo de pastina.

Gráfico N° 24 V.A.M (%)



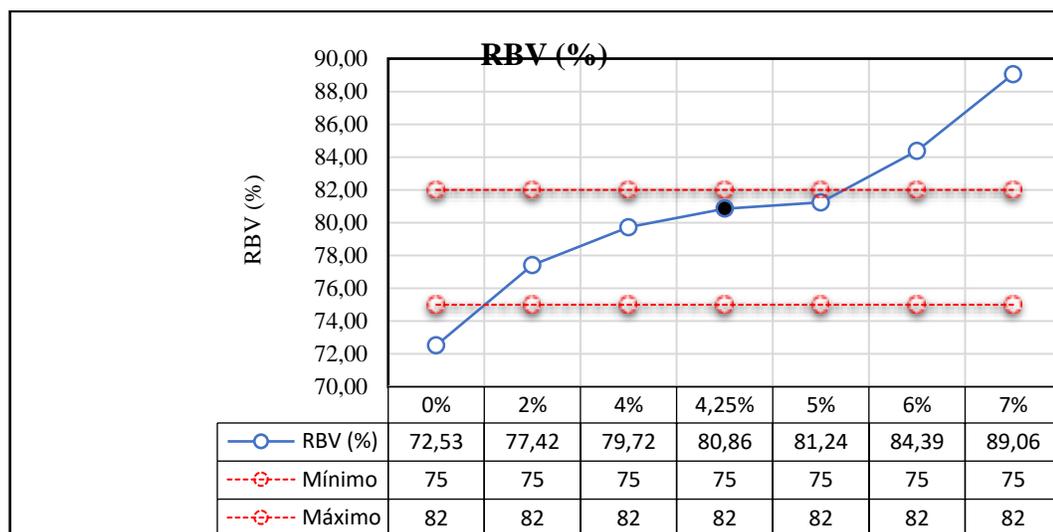
Fuente: Elaboración propia

Analizando el gráfico, se observa que los vacíos del agregado mineral tienen una tendencia descendente ajustada a una ecuación polinómica con un coeficiente de determinación de 0,9647, lo que indica que hay una buena relación inversa entre el V.A.M y el contenido de Polvo de pastina, es decir que, a mayor porcentaje de polvo de pastina, menores son los vacíos del agregado mineral.

Con los resultados que apreciamos de la gráfica se puede ver que las mezclas elaboradas con menor porcentaje de polvo de pastina tienen mayor cantidad de vacíos en agregado mineral lo que quiere decir que habrá mayor espacio para las películas del asfalto y de esta manera la mezcla será más duradera.

Así también si analizamos con las especificaciones de la norma donde indica un mínimo de 13% en el valor del V.A.M, entonces se puede decir que todas las mezclas con los diferentes porcentajes de filler añadido cumplen con las especificaciones siendo la mezcla con el 7% de polvo de pastina, la mezcla que menos vacíos del agregado mineral tiene con el 16,38% y la mezcla con mayores vacíos del agregado mineral es la mezcla al 0% de polvo de pastina.

Gráfico N° 25 R.B.V (%)



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico, se observa que los vacíos del agregado mineral tienen una curva de tendencia ascendente, lo cual demuestra que para mezclas asfálticas que se les añade como

filler el polvo de pastina, el R.B.V tendera a incrementar conforme el porcentaje de polvo de pastina aumente.

Observando la gráfica la relación existente del porcentaje de R.B.V para los diferentes contenidos de polvo de pastina, existe un aumento de los mismos a manera que se incrementa este filler, lo cual podría significar que existe menor cantidad de aire en las mezclas con menor porcentaje de polvo de pastina.

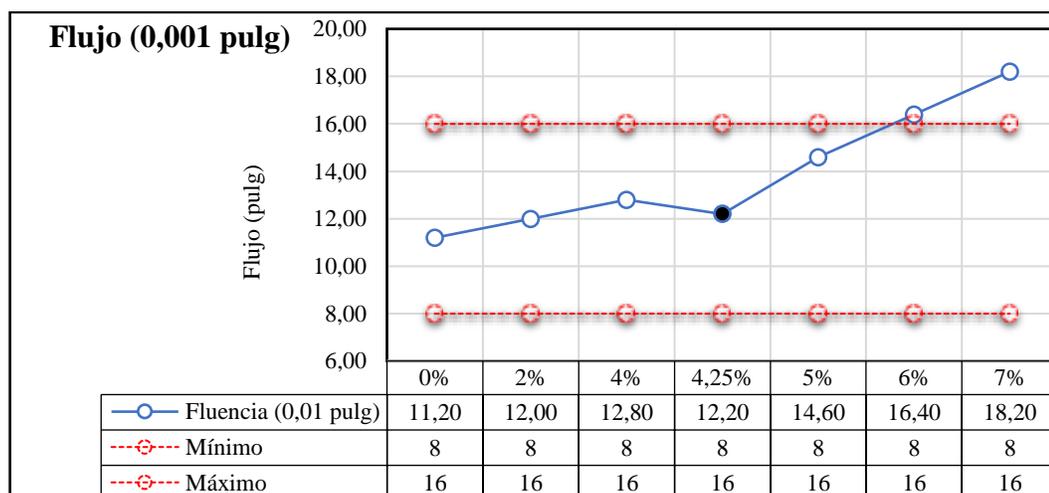
Así también si analizamos con las especificaciones de la norma donde exige un rango de 75% a 82% de relación betún vacíos, podemos observar que las mezclas con el 0%, 6% y 7% con polvo de pastina no cumplen.

4.3.6. Fluencia

La mezcla debe tener la fluidez necesaria para que pueda compactarse a la densidad exigida y producir una textura superficial adecuada. El valor del flujo representa la deformación producida en el sentido del diámetro del espécimen antes de que se produzca su fractura.

Este valor es un indicador de la tendencia para alcanzar una condición plástica y consecuentemente de la resistencia que ofrecerá la carpeta asfáltica a deformarse bajo la acción de las cargas que por ella transiten.

Gráfico N° 26 Fluencia promedio



Fuente: Elaboración propia

Con el contenido óptimo del filler polvo de pastina (4,25%) dentro de la mezcla asfáltica modificada se puede observar que el valor de la fluencia aumenta y que se encuentran dentro de lo impuesto por la norma 8-16, en donde el valor más bajo de la fluencia de la mezcla asfáltica se presenta en la mezcla asfáltica sin filler, mientras el valor más alto se reporta para el porcentaje de 7% de polvo de pastina incumpliendo la norma.

Por otro lado, analizando el flujo que presenta en las mezclas asfálticas diseñadas tanto sin filler como las mezclas asfálticas modificadas con polvo de pastina, se puede notar que mientras se aumenta el porcentaje de polvo de pastina aumenta la fluencia, y con valores de flujo dentro del rango establecido por norma considerando el porcentaje óptimo de asfalto, la cual permite una variación comprendida entre 8 a 16 centésima de pulgada.

4.4. Análisis comparativo entre distintos tipos de filler usados en mezclas asfálticas

Una vez expuestos los resultados obtenidos para la mezcla asfáltica modificada con Polvo de pastina usado como filler, se presenta a continuación el análisis de los resultados en forma comparativa entre otras mezclas asfálticas modificadas con diferentes tipos de filler.

Este tipo de análisis permite determinar si existen diferencias en las propiedades Marshall significativas entre los diferentes tipos de filler, que conduzcan a mejor las mezclas asfálticas.

Los resultados para comparar las propiedades Marshall son extraídos de las siguientes tesis:

- a) García, S., R. (2020). Análisis de la influencia en las propiedades volumétricas de mezclas asfálticas en caliente con carbón mineral. Bolivia.
- b) Portal, A., G. (2021). Análisis de la incidencia del caolín como llenante mineral en la respuesta mecánica de mezclas asfálticas cerradas. Bolivia.
- c) Soruco, C., I. (2019). Evaluación de la influencia del polvo de ladrillo como reemplazo del filler en las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas. Bolivia.
- d) Yurquina, C., P. (2017). Efecto filler laterítico en una mezcla asfáltica. Bolivia.

Tabla N° 91 Resultados de las propiedades Marshall de cada tipo de filler usados

Propiedades Marshall	Especificaciones de la norma	Filler Utilizado en la mezcla asfáltica				
		Polvo de pastina	filler de origen laterítico	Polvo de ladrillo gambote	Carbón Mineral	Caolín
Contenido de Filler (%)	-	4,00%	4,00%	4,00%	4,00%	4,00%
Contenido óptimo de asfalto (%)	-	6,05	5,61	5,93	6,05	5,9
Densidad (gr/cm ³)	Mín. 2,25	2,38	2,32	2,33	2,33	2,36
Vacíos de la mezcla (%)	3 – 5	3,55	4,21	3,39	4,09	3,20
VAM (%)	Mín. 13	17,52	17,11	12,47	17,94	---
RBV (%)	75 – 82	79,72	75,37	---	77,18	---
Estabilidad (lb)	Mín. 1800	2553,39	3790,00	4509,00	5610,57	3431,46
Fluencia (0,01 pulg)	8 – 16	12,80	8,92	12,67	10,20	16,67

Fuente: Elaboración propia

Dentro de un estudio de propiedades volumétricas Marshall es necesario observar y analizar en conjunto lo que sucede para cada contenido de cemento asfáltico y porcentaje de filler añadido. A continuación, en detalle análisis de cada propiedad volumétrica.

4.4.1. Análisis de la densidad máxima

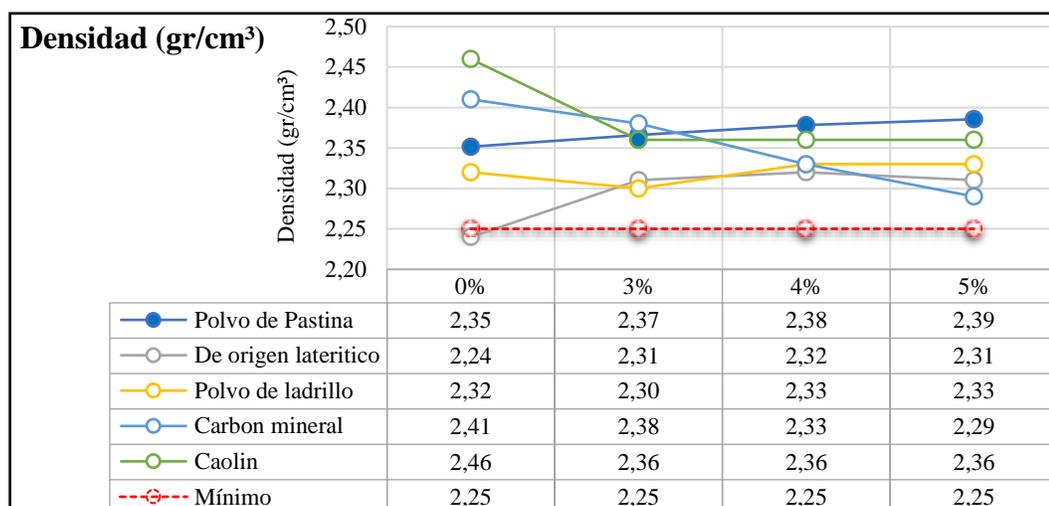
Dentro de las propiedades Marshall, la densidad máxima de una mezcla asfáltica es un valor muy importante y determinante al momento de definir el contenido óptimo de cemento asfáltico, porque mientras mayor sea la densidad, mayor es su grado de resistencia a las cargas vehiculares.

Tabla N° 92 Incremento de densidad máxima

Tipo de filler	Contenido Optimo de filler (%)	Especificaciones de la norma	Densidad (gr/cm ³)		Incremento
			Resultados sin filler	Resultados con óptimo de filler	
Polvo de pastina	4,00%	Mín. 2,25	2,35	2,38	1,28%
Filler de origen laterítico	4,00%	Mín. 2,25	2,24	2,32	3,57%
Polvo de ladrillo gambote	4,00%	Mín. 2,25	2,32	2,33	0,43%
Carbón mineral	4,00%	Mín. 2,25	2,41	2,33	-3,56%
Caolín	4,00%	Mín. 2,25	2,46	2,36	-4,07%

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 27 Tendencia de la densidad máximo



Fuente: Elaboración propia

En la Tabla anterior, se observa que la mezcla con filler de Origen laterítico proporciona el mayor incremento de densidad 3,57%, superando a la mezcla con Polvo de pastina 1,28%. Y, la mezcla con menor incremento de densidad fue con polvo de ladrillo 0,43%, entonces las mezclas modificadas con filler de origen laterítico presentaran un mayor grado de resistencia a las cargas dinámicas vehiculares.

Por otra parte, se observa que la densidad tiene un comportamiento a decaer con el caolín y el de origen laterítico respecto a las variaciones antes mencionadas, porque en el porcentaje de incremento da valores negativos de -4,07% y -3,56% respectivamente, con el colín hay mayor amplitud de decaimiento de la densidad. Por lo tanto, este filler es el menos recomendado ya que al perder densidad se reduce la resistencia a las cargas generadas por los vehículos.

4.4.2. Análisis de los vacíos en la mezcla (%)

El porcentaje de vacíos de la mezcla asfáltica compactada deberá tender al valor mínimo especificado ya que esto posibilita la disminución de la alteración del asfalto por procesos de oxidación.

Los vacíos en una mezcla asfáltica, proporciona la clasificación de la misma, que según la cantidad de vacíos puede ser densa, semi densa, semi porosa o porosa, es decir que a

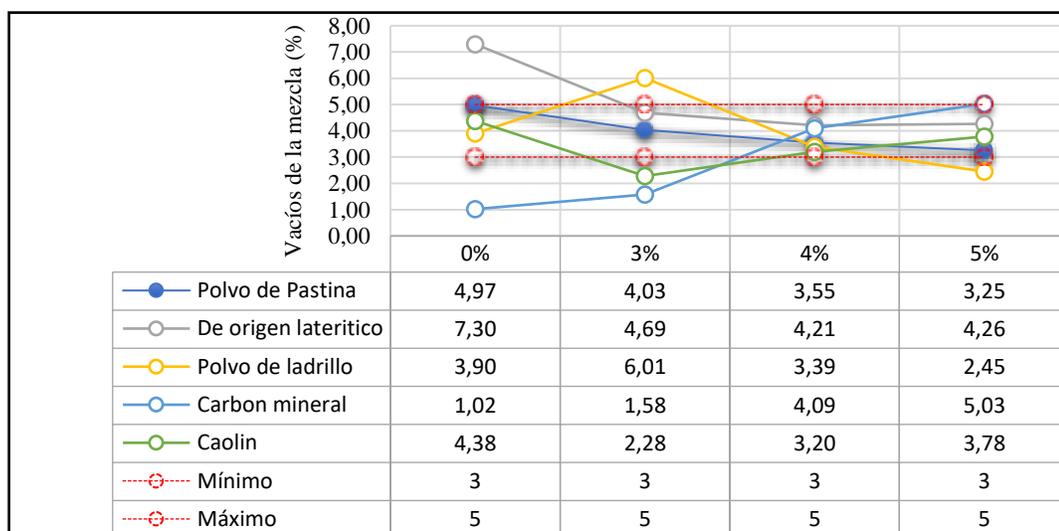
mayores vacíos mayor será la porosidad y a menores vacíos más densa será la mezcla asfáltica.

Tabla N° 93 Incremento de vacíos de la mezcla

Tipo de filler	Contenido Optimo de filler (%)	Especificaciones de la norma	Vacíos de la mezcla (%)		Incremento
			Resultados sin filler	Resultados con óptimo de filler	
Polvo de pastina	4,00%	3 – 5	4,97	3,55	-28,57%
Filler de origen laterítico	4,00%	3 – 5	7,30	4,21	-42,33%
Polvo de ladrillo gambote	4,00%	3 – 5	3,90	3,39	-13,08%
Carbón mineral	4,00%	3 – 5	1,02	4,09	300,98%
Caolín	4,00%	3 – 5	4,38	3,20	-26,94%

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 28 Tendencia de los vacíos en la mezcla asfáltica



Fuente: Elaboración propia

En esta parte se debe hacer alusión a la norma la cual nos indica que el porcentaje de vacíos debe estar entre el rango de 3 – 5%, en donde se puede observar en la tabla que, para el Caolín, filler de origen Laterítico y el Polvo de pastina el valor de vacíos se reduce, siendo el mejor y más recomendable a la hora de reducir el % de vacíos el Caolín ya que se redujo este valor en un 42,33% esto se debe a que el Caolín posee partículas que son muy finas y pueden cubrir fácilmente los espacios libres de la mezcla; sin embargo, esto no afecta el diseño, debido a que el valor se mantienen dentro de lo normado.

Al contrario de esto, el carbón mineral resulta incrementar el porcentaje de vacíos de la mezcla, el incremento de este valor resulto en un 300,98%, esto debido a que este filler posee partículas que no son finas.

4.4.3. Análisis de la estabilidad

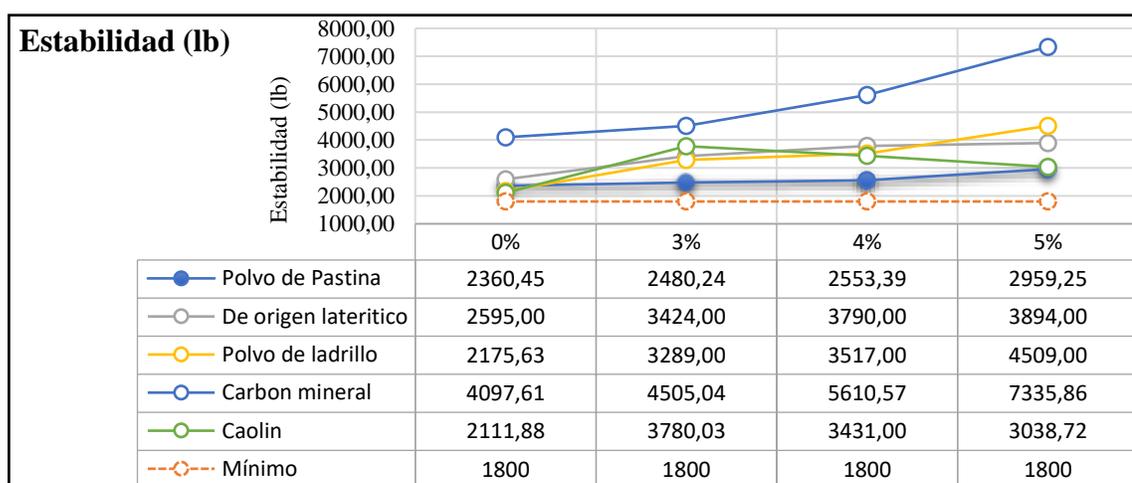
La estabilidad es la propiedad que tiene la mezcla asfáltica de resistir desplazamiento y deformación cuando se le aplican cargas de tránsito, por ello los requerimientos de estabilidad deben ser suficientemente altos como para poder resistir la carga transmitida por el tránsito. Valore muy elevados de estabilidad resultan en mezclas asfálticas rígidas y producen una vida útil menor a la deseada.

Tabla N° 94 Incremento de la estabilidad

Tipo de filler	Contenido Optimo de filler (%)	Especificaciones de la norma	Estabilidad (lb)		Incremento
			Resultados sin filler	Resultados con óptimo de filler	
Polvo de pastina	4,00%	Mín. 1800	2360,45	2553,39	5,07%
Filler de origen laterítico	4,00%	Mín. 1800	2595,00	3790,00	46,05%
Polvo de ladrillo gambote	4,00%	Mín. 1800	2175,63	4509,00	107,25%
Carbón mineral	4,00%	Mín. 1800	4097,61	5610,57	36,92%
Caolín	4,00%	Mín. 1800	2111,88	3431,00	62,46%

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 29 Tendencia de la estabilidad



Fuente: Elaboración propia

Analizando la tabla, apreciamos que la estabilidad de las briquetas comienza a subir con valores significativos con los diferentes tipos de filler, donde el incremento mayor de la estabilidad máxima se encuentra usando Polvo de ladrillo gambote dando un valor 107,25% mayor a la mezcla sin filler, pero se debe analizar también que valores muy elevados de esta propiedad Marshall resultarían perjudiciales a la mezcla asfáltica, como se dijo anteriormente produciría una vida útil menor, se podría usar una granulometría diferente ya que la estabilidad de una mezcla depende de la fricción y la cohesión interna. La fricción interna en las partículas de agregado está relacionada con las características tales como forma y textura superficial. La cohesión resulta de la capacidad ligante del cemento asfáltico empleado en la mezcla.

Y también hay que tener en cuenta que una estabilidad baja produciría efectos negativos como ser el ahuellamiento y la canalización del asfalto.

4.4.4. Fluencia

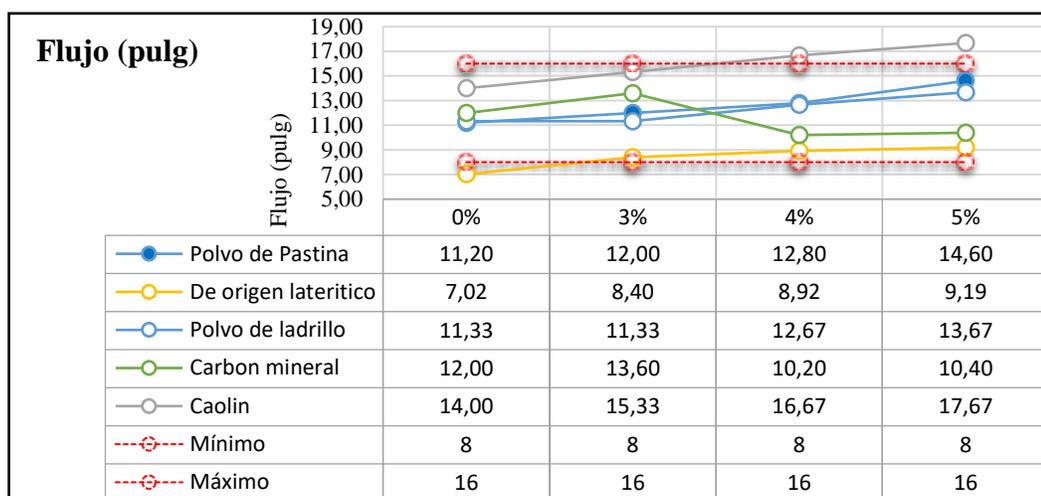
Las mezclas que contiene valores bajos de fluencia y los valores muy altos de estabilidad son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio. Aquellas que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas y tienen tendencia a deformarse fácilmente bajo las cargas del tránsito.

Tabla N° 95 Incremento de la fluencia

Tipo de filler	Contenido Optimo de filler (%)	Especificaciones de la norma	Fluencia (0,01 pulg)		Incremento
			Resultados sin filler	Resultados con óptimo de filler	
Polvo de pastina	4,00%	8 – 16	11,20	12,80	14,29%
Filler de origen laterítico	4,00%	8 – 16	7,02	8,92	27,07%
Polvo de ladrillo gambote	4,00%	8 – 16	11,33	12,67	11,83%
Carbón mineral	4,00%	8 – 16	12,00	10,20	-15,00%
Caolín	4,00%	8 – 16	14,00	16,67	19,07%

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 30 Tendencia del flujo



Fuente: Elaboración propia

Con el filler de Origen Laterítico dentro de la mezcla asfáltica se puede observar que el valor de la fluencia incrementa en un 27,07% y que se encuentran dentro de lo impuesto por la norma para tránsito pesado que es entre 8 – 16 (1/100 pulg), en donde el valor más bajo de incremento de la fluencia de la mezcla asfáltica se presenta cuando esta es modificada con Polvo de ladrillo resultando en un incremento del 11,83% en comparación a la mezcla asfáltica sin filler.

Por otra parte, la mezcla asfáltica modifica muestra un comportamiento diferente al adicionar el Carbón mineral disminuyendo su valor en un 15,00%.

4.5. Análisis técnico y de costo

Concluida la comparación de las propiedades de las mezclas diseñadas se puede resaltar que, según los datos obtenidos, la utilización del Polvo de Pastina como filler en la elaboración de una mezcla asfáltica presenta grandes ventajas para su aceptación ya que se vio que al utilizarlo como filler da las siguientes ventajas:

- Aumento de la densidad máxima, ya que es una de las propiedades más determinante al momento de definir el contenido óptimo de cemento asfáltico, porque mientras mayor sea la densidad, mayor es su grado de resistencia a las cargas dinámicas vehiculares.

- Reducción en los vacíos de mezcla asfáltica, el porcentaje de vacíos de la mezcla asfáltica compactada deberá tender al valor mínimo especificado ya que esto posibilita la disminución de la alteración del asfalto por procesos de oxidación.
- Mejoramiento en la estabilidad de la mezcla asfáltica, la estabilidad debe ser suficientemente alta como para poder resistir la carga transmitida por el tránsito, tomando en cuenta que los valores elevados de estabilidad resultan en mezclas asfálticas rígidas y producen una vida útil menor a la deseada.

Tabla N° 96 Comparación de resultados con y sin filler

Tipo de filler	Propiedades Marshall	Especificaciones de la norma	Resultados sin filler	Resultados con óptimo de filler	Incremento
Polvo de pastina	Contenido óptimo de Filler (%)		0.00%	4.25%	~
	Densidad (gr/cm ³)	mín. 2,25	2.35	2.38	1.40%
	Vacíos de la mezcla (%)	3 - 5	4.97	3.33	-33.02%
	Estabilidad (lb)	mín. 1800	2360.45	2520.37	6.77%
	Fluencia (0,01 pulg)	8 - 16	11.20	12.20	8.93%

Fuente: Elaboración propia

Tomando en cuenta lo mencionado, por consiguiente, se realizará el análisis de presupuesto para una mezcla asfáltica sin este filler y una mezcla asfáltica modificada con la incorporación del 4,25% de Polvo de Pastina al asfalto, de manera que se pueda evidenciar la factibilidad de la utilización de este tipo de filler.

4.5.1. Costo de la mezcla asfáltica sin filler y con filler

Se procedió de la siguiente manera:

- a. Se calcularon los rendimientos de cada componente de la mezcla asfáltica con y sin filler, tomando en cuenta su P.E. de cada componente para este cálculo y su dosificación según el porcentaje de filler usado (0% y 4,25%).
- b. Se calcularon las cantidades de material que entran en la mezcla de concreto asfáltico para una probeta y para 1 m² para una mezcla asfáltica sin filler con un espesor de 5 cm.
- c. Se calcularon las cantidades de material que entran en la mezcla de concreto asfáltico para una probeta y para 1 m² para una mezcla asfáltica modificada con Polvo de pastina como filler, considerando los costos adicionales del Polvo de Pastina (Pastina Klaukol Performance).

4.5.1.1. Costo de Mezcla asfáltica sin filler

Actividad: Pavimento flexible de espesor 5 cm

Tipo de ligante asfáltico: Cemento asfáltico 85/100

Unidad: m²

Cantidad: 1

Tabla N° 97 Precio unitario de la mezcla asfáltica sin filler

A	MATERIALES	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (Bs.)	Precio Total (Bs.)
-	Cemento asfáltico 85/100	Kg	9.13	7.50	68.45
-	Grava triturada clasificada 3/4"	m ³	0.018	110.00	2.00
-	Gravilla triturada clasificada 3/8"	m ³	0.012	125.00	1.52
-	Arena filler N°4	m ³	0.025	130.00	3.19
-	Diésel	Lt	0.90	3.74	3.37
D	TOTAL MATERIALES			(A)	78.54
B	MANO DE OBRA				
-	Capataz	Hr	0.050	10.00	0.50
-	Operador de planta	Hr	0.085	9.00	0.77
-	Ayudante de planta	Hr	0.085	5.00	0.43
-	Operador de equipo liviano	Hr	0.075	8.00	0.60
-	Ayudante de maquinaria y equipo	Hr	0.075	4.50	0.34
-	Chofer	Hr	0.080	8.00	0.64
E	SUBTOTAL MANO DE OBRA			(B)	3.27
F	Cargas sociales	71.18%		(E)=	2.33
O	Impuestos al valor agregado	14.94%		(E+F)=	0.84
G	TOTAL MANO DE OBRA			(E+F+O)=	6.43
C	EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
-	Terminadora de asfalto	Hr	0.0020	340.00	0.68
-	Cargador frontal de ruedas	Hr	0.0045	280.00	1.26
-	Compactador rodillo neumático	Hr	0.0090	220.00	1.98
-	Compactador rodillo liso	Hr	0.0400	250.00	10.00
-	Planta de concreto asfáltico	Hr	0.0050	1,250.00	6.25
-	Volquete 10 m ³	Hr	0.0700	150.00	10.50
	Herramientas menores		5.00%	(G)	0.32
I	TOTAL HERRAMIENTAS Y EQUIPOS			(C+H)	30.99
J	SUB TOTAL			(D+G+I)	115.96
L	GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS		15.50%	(J)	17.97
M	PARCIAL			(J+L)	133.93
N	UTILIDAD		10.00%	(M)	13.39
Q	TOTAL PRECIO UNITARIO			(M+N)	147.33
	PRECIO FINAL				147.33

Fuente: Elaboración propia

4.5.1.2. Costo de la Mezcla asfáltica con el 4,25% de polvo de pastina

Actividad: Pavimento flexible de espesor 5 cm

Tipo de ligante asfáltico: Cemento asfáltico 85/100

Unidad: m²

Cantidad: 1

Tabla N° 98 Precio unitario de la mezcla asfáltica con polvo de pastina

A	MATERIALES	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (Bs.)	Precio Total (Bs.)
-	Cemento asfáltico 85/100	Kg	9.36	7.50	70.23
-	Polvo de Pastina	Kg	0.4156	5.00	2.08
-	Grava triturada clasificada 3/4"	m ³	0.018	110.00	2.02
-	Gravilla triturada clasificada 3/8"	m ³	0.012	125.00	1.54
-	Arena filler N°4	m ³	0.022	130.00	2.92
-	Diésel	Lt	0.45	3.74	1.68
D	TOTAL MATERIALES			(A)	80.47
B	MANO DE OBRA				
-	Capataz	Hr	0.050	10.00	0.50
-	Operador de planta	Hr	0.075	9.00	0.68
-	Ayudante de planta	Hr	0.075	5.00	0.38
-	Operador de equipo liviano	Hr	0.075	8.00	0.60
-	Ayudante de maquinaria y equipo	Hr	0.075	4.50	0.34
-	Chofer	Hr	0.070	8.00	0.56
E	SUBTOTAL MANO DE OBRA			(B)	3.05
F	Cargas sociales	71.18%		(E)=	2.17
O	Impuestos al valor agregado	14.94%		(E+F)=	0.78
G	TOTAL MANO DE OBRA			(E+F+O)=	6.00
C	EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
-	Terminadora de asfalto	Hr	0.0020	340.00	0.68
-	Cargador frontal de ruedas	Hr	0.004	280.00	1.12
-	Compactador rodillo neumático	Hr	0.0085	220.00	1.87
-	Compactador rodillo liso	Hr	0.0350	250.00	8.75
-	Planta de concreto asfáltico	Hr	0.0040	1,250.00	5.00
-	Volquete 10 m ³	Hr	0.0600	150.00	9.00
	Herramientas menores		5.00%	(G)	0.30
I	TOTAL HERRAMIENTAS Y EQUIPOS			(C+H)	26.72
J	SUB TOTAL			(D+G+I)	113.19
L	GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS		15.50%	(J)	17.54
M	PARCIAL			(J+L)	130.73
N	UTILIDAD		10.00%	(M)	13.07
Q	TOTAL PRECIO UNITARIO			(M+N)	143.80
	PRECIO FINAL				143.80

Fuente: Elaboración propia

4.5.2. Análisis de costo

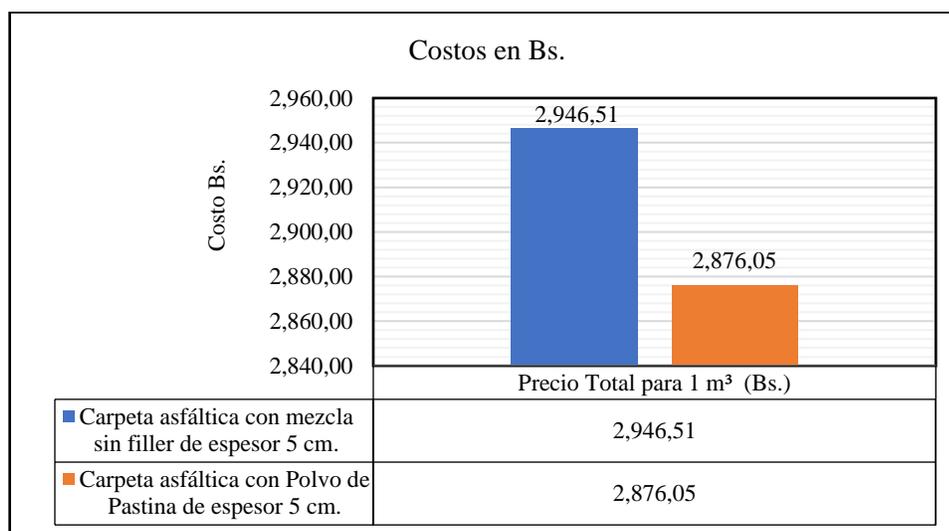
En las tablas anteriores se aprecia que la comparación económica es favorable, ya que se puede decir que los costos de la mezcla asfáltica sin filler y la modificada presentan variación entre ambas, las planillas de precios unitarios fueron elaboradas para la mezcla asfáltica sin filler y para el contenido óptimo de Polvo de pastina (4,25%).

Tabla N° 99 Tabla de balance final de costos

Descripción	Volumen de mezcla compactada para 1 m ² (m ³)	Precio Unitario para 1 m ² (Bs.)	Volumen de mezcla compactada para 1 m ³ (m ³)	Precio Total para 1 m ³ (Bs.)
Carpeta asfáltica con mezcla sin filler de espesor 5 cm.	0.05	147.33	1	2,946.51
Carpeta asfáltica con Polvo de Pastina de espesor 5 cm.	0.05	143.80	1	2,876.05

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 31 Costo de las mezclas asfálticas



Fuente: Elaboración propia

Luego de comparar los costos de producción del concreto asfáltico sin filler y modificado, se obtuvo una reducción en el costo de 2,39% por m³ en el costo de la mezcla asfáltica modificada respecto al costo de la mezcla sin Polvo de Pastina.

4.5.3. Análisis comparativo de costos con otro filler

Es preciso tener en cuenta que el costo de producción es uno de los indicadores más importantes a considerar en los proyectos de ingeniería. Por lo tanto, mientras más eficiente sea la labor de éstas, menos recursos se invertirán en su producción y, por consiguiente, menor será la cuantía de los gastos.

Uno de los factores más importantes que se debe tener en cuenta en la construcción de obras civiles es la economía.

Con la finalidad de saber el precio total de una obra, la misma que es producto de la sumatoria de los diferentes ítems componentes del presupuesto total, es necesario realizar un Análisis de Precios Unitarios de todos y cada uno de estos ítems cuyas incidencias directas e indirectas.

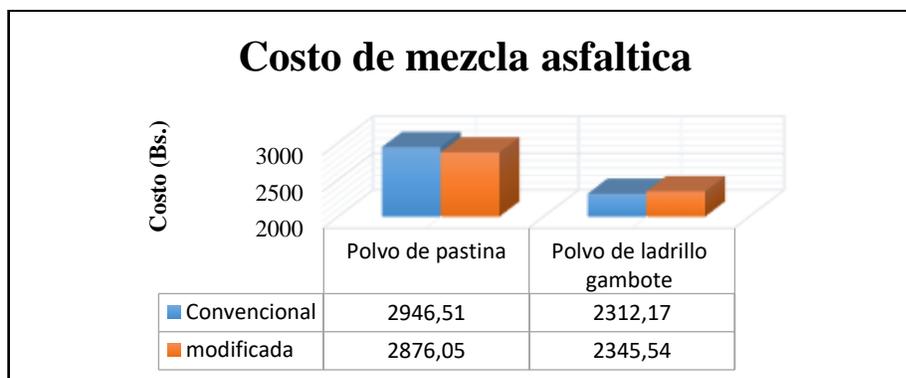
A continuación, se muestran los costos de una mezcla modificada con Polvo de Pastina y otra modificada con Polvo de ladrillo Gambote:

Tabla N° 100 Costo de producción

N°	Descripción del filler	costos (bs)	
		Convencional	modificada
1	Polvo de pastina	2946.51	2876.05
2	Polvo de ladrillo gambote	2312.17	2345.54

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 32 Costo de mezcla asfáltica convencional y modificada



Fuente: Elaboración propia

Normalmente, todas las propuestas que implican un proceso de reciclado son más económicos por cuestiones del proceso de reciclado del material a utilizar en el caso del Polvo de Pastina, sin embargo, en este caso la comparación económica no es claramente favorable para el proceso de reciclado, ya que se puede decir que los costos de la mezcla asfáltica convencional y la modificada presentan variación entre ambas en el caso del Polvo de ladrillo de gambote, aumentando su valor; se evidencia que el costo de producción de la mezcla asfáltica modificada con polvo de pastina es mayor, esto debido capaz a los agregados que se utilizaron pero se ve una reducción favorable en el uso de este filler a comparación del polvo de ladrillo que su costo de producción tiende a subir.

4.6. Tratamiento estadístico

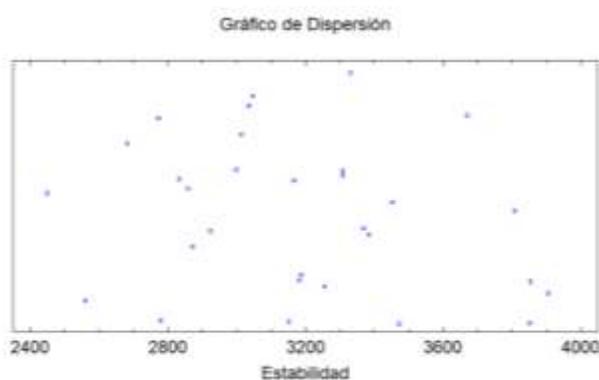
Para realizar el análisis estadístico se realizaron 30 briquetas con la pastina que mostro los mejores resultados de propiedades Marshall. Los resultados de estabildades de las 30 briquetas, por su mayor importancia, serán los datos que se considera en el tratamiento estadístico descriptivo.

4.6.1. Estadística descriptiva

La estadística descriptiva proporciona valores que permiten describir el estado de los datos a través de la estadística de las propiedades que son la estabilidad y fluencia.

Análisis de la estabilidad

Gráfico N° 33 Datos ordenados para tratamiento estadístico



Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 101 Resumen estadístico para estabilidad

Recuento	30
Promedio	3182,68
Desviación Estándar	386,575
Coefficiente de Variación	12,1462%
Mínimo	2449,57
Máximo	3903,79
Rango	1454,22
Sesgo Estandarizado	0,521257
Curtosis Estandarizada	-0,557264

Fuente: Elaboración propia.

Esta tabla muestra los estadísticos de resumen para Estabilidad. Incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. De particular interés aquí son el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden utilizarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar. En este caso, el valor del sesgo estandarizado se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes una distribución normal. El valor de curtosis estandarizada se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal.

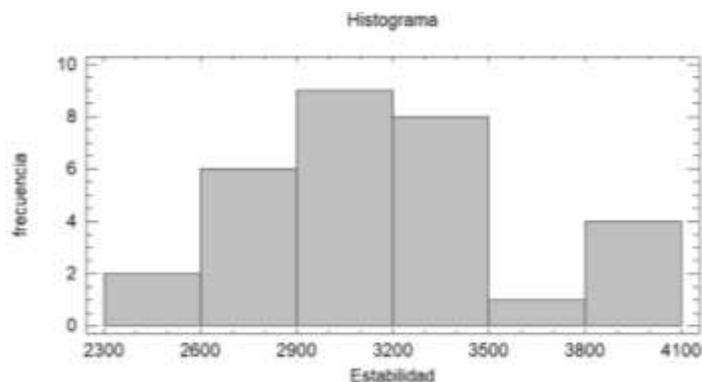
Tabla N° 102 Tabla de frecuencias para estabilidad

	Límite	Límite			Frecuencia	Frecuencia	Frecuencia
Clase	Inferior	Superior	Punto Medio	Frecuencia	Relativa	Acumulada	Rel. Acum.
	menor o igual	2300,0		0	0,0000	0	0,0000
1	2300,0	2600,0	2450,0	2	0,0667	2	0,0667
2	2600,0	2900,0	2750,0	6	0,2000	8	0,2667
3	2900,0	3200,0	3050,0	9	0,3000	17	0,5667
4	3200,0	3500,0	3350,0	8	0,2667	25	0,8333
5	3500,0	3800,0	3650,0	1	0,0333	26	0,8667
6	3800,0	4100,0	3950,0	4	0,1333	30	1,0000
	mayor de	4100,0		0	0,0000	30	1,0000

Fuente: Elaboración propia.

Media = 3182,68 Desviación Estándar = 386,575

En la tabla de frecuencias dividiendo el rango de Estabilidad en intervalos del mismo ancho, y contando el número de datos en cada intervalo. Las frecuencias muestran el número de datos en cada intervalo, mientras que las frecuencias relativas muestran las proporciones en cada intervalo.

Gráfico N° 34 Datos ordenados para tratamiento estadístico

Fuente: Elaboración propia.

Los Intervalos de Confianza para la estabilidad son:

Intervalos de confianza del 95,0% para la media: 3182,68 +/- 144,35 [3038,33; 3327,03]

Intervalos de confianza del 95,0% para la desviación estándar: [307,871; 519,678]

Estos valores muestran los intervalos de confianza del 95,0% para la media y la desviación estándar de Estabilidad. La interpretación clásica de estos intervalos es que, en muestreos repetidos, estos intervalos contendrán la media verdadera o la desviación estándar verdadera de la población de la que fueron extraídas las muestras, el 95,0% de las veces. En términos prácticos, puede establecerse con 95,0% de confianza, que la media verdadera de Estabilidad se encuentra en algún lugar entre 3038,33 y 3327,03, en tanto que la desviación estándar verdadera está en algún lugar entre 307,871 y 519,678.

Ambos intervalos asumen que la población de la cual proviene la muestra puede representarse por la distribución normal. Mientras que el intervalo de confianza para la media es bastante robusto y no muy sensible a violaciones de este supuesto, los intervalos de confianza para la desviación estándar son muy sensibles. Si los datos no provienen de una distribución normal, el intervalo para la desviación estándar puede ser incorrecto.

Prueba de hipótesis para estabilidad

Media Muestral = 3182,68

Mediana Muestral = 3174,57

Desviación Estándar de la Muestra = 386,575

Prueba t

Hipótesis Nula: media = 0,0

Alternativa: no igual

Estadístico t = 45,0941

Valor-P = 0,0

Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0,05.

Prueba chi-cuadrada

Hipótesis Nula: $\sigma = 1,0$

Alternativa: no igual

Chi-cuadrado calculado = 4,33376E6

Valor-P = 0,0

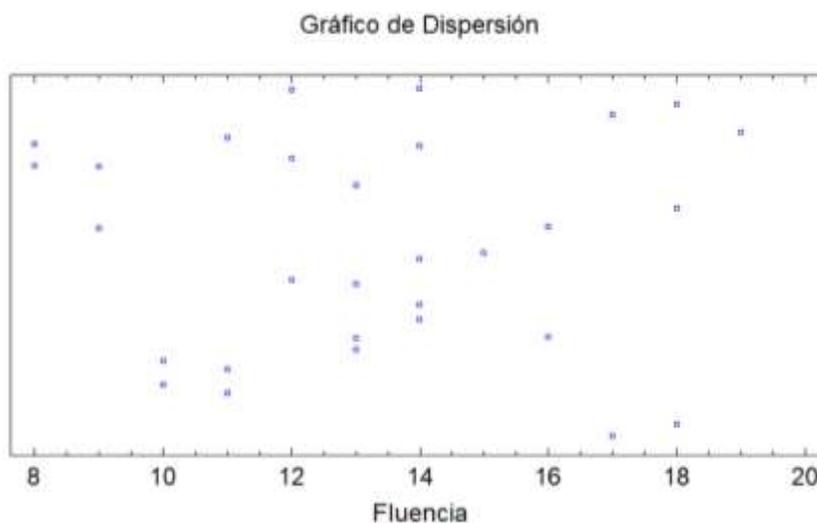
Se rechaza la hipótesis nula para $\alpha = 0,05$.

Los resultados de las pruebas relativas a la población de la cual procede la muestra de Estabilidad. La prueba-t evalúa la hipótesis de que la media de Estabilidad es igual a 0,0 versus la hipótesis alterna de que la media de Estabilidad es no igual a 0,0. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0,05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95,0% de confianza.

La prueba de chi-cuadrada evalúa la hipótesis nula de que la desviación estándar de Estabilidad es igual a 1,0 versus la hipótesis alterna de que la desviación estándar de Estabilidad es no igual a 1,0. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0,05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95,0% de confianza.

análisis de la fluencia

Gráfico N° 35 Datos ordenados para tratamiento estadístico



Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 103 Resumen estadístico para fluencia

Recuento	30
Promedio	13,3
Desviación Estándar	3,12001
Coefficiente de Variación	23,4587%
Mínimo	8,0
Máximo	19,0
Rango	11,0
Sesgo Estandarizado	0,196172
Curtosis Estandarizada	-0,927606

Fuente: Elaboración propia.

La tabla muestra los estadísticos de resumen para Fluencia. Incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. De particular interés aquí son el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden utilizarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar.

Tabla N° 104 Tabla de frecuencias para fluencia

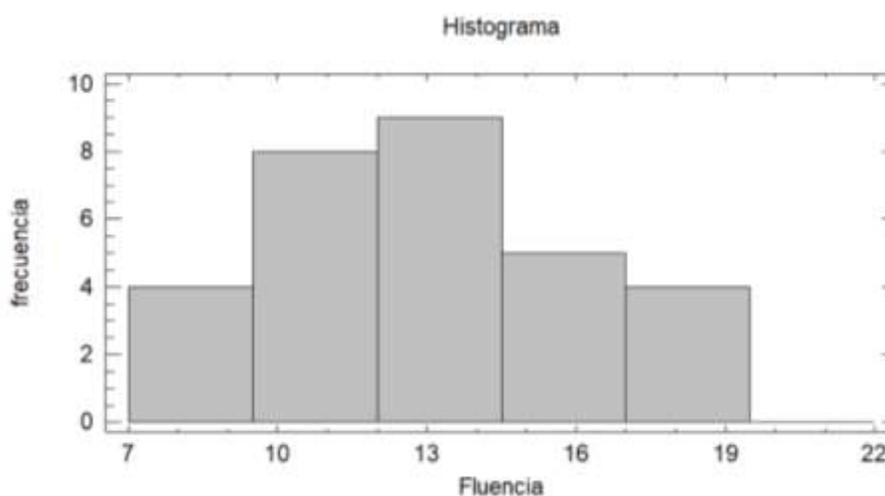
	Límite	Límite			Frecuencia	Frecuencia	Frecuencia
Clase	Inferior	Superior	Punto Medio	Frecuencia	Relativa	Acumulada	Rel. Acum.
	menor o igual	7,0		0	0,0000	0	0,0000
1	7,0	9,5	8,25	4	0,1333	4	0,1333
2	9,5	12,0	10,75	8	0,2667	12	0,4000
3	12,0	14,5	13,25	9	0,3000	21	0,7000
4	14,5	17,0	15,75	5	0,1667	26	0,8667
5	17,0	19,5	18,25	4	0,1333	30	1,0000
6	19,5	22,0	20,75	0	0,0000	30	1,0000
	mayor de	22,0		0	0,0000	30	1,0000

Fuente: Elaboración propia.

Media = 13,3 Desviación Estándar = 3,12001

La tabla de frecuencias divide el rango de Fluencia en intervalos del mismo ancho, y contando el número de datos en cada intervalo. Las frecuencias muestran el número de datos en cada intervalo, mientras que las frecuencias relativas muestran las proporciones en cada intervalo.

Gráfico N° 36 Datos ordenados para tratamiento estadístico



Fuente: Elaboración propia.

Intervalos de Confianza para Fluencia

Intervalos de confianza del 95,0% para la media: $13,3 \pm 1,16503$ [12,135; 14,465]

Intervalos de confianza del 95,0% para la desviación estándar: [2,4848; 4,19428]

Los intervalos de confianza del 95,0% para la media y la desviación estándar de Fluencia. La interpretación clásica de estos intervalos es que, en muestreos repetidos, estos intervalos contendrán la media verdadera o la desviación estándar verdadera de la población de la que fueron extraídas las muestras, el 95,0% de las veces. En términos prácticos, puede establecerse con 95,0% de confianza, que la media verdadera de Fluencia se encuentra en algún lugar entre 12,135 y 14,465, en tanto que la desviación estándar verdadera está en algún lugar entre 2,4848 y 4,19428.

Ambos intervalos asumen que la población de la cual proviene la muestra puede representarse por la distribución normal. Mientras que el intervalo de confianza para la media es bastante robusto y no muy sensible a violaciones de este supuesto, los intervalos de confianza para la desviación estándar son muy sensibles.

Prueba de hipótesis para fluencia

Media Muestral = 13,3

Mediana Muestral = 13,0

Desviación Estándar de la Muestra = 3,12001

Prueba T

Hipótesis Nula: media = 0,0 Alternativa: no igual

Estadístico t = 23,3483 Valor-P = 0,0

Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0,05.

Prueba chi-cuadrada

Hipótesis Nula: sigma = 1,0 Alternativa: no igual

Chi-cuadrado calculado = 282,3 Valor-P = 0,0

Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0,05.

Los resultados de las pruebas relativas a la población de la cual procede la muestra de Fluencia. La prueba-t evalúa la hipótesis de que la media de Fluencia es igual a 0,0 versus la hipótesis alterna de que la media de Fluencia es no igual a 0,0. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0,05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95,0% de confianza.

La prueba de chi-cuadrada evalúa la hipótesis nula de que la desviación estándar de Fluencia es igual a 1,0 versus la hipótesis alterna de que la desviación estándar de Fluencia

es no igual a 1,0. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0,05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95,0% de confianza.

Con los resultados se observa claramente que se acepta la hipótesis alterna y se rechaza la hipótesis nula. Por lo tanto, los resultados obtenidos de la investigación son aceptados con un nivel de confianza del 95%.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Una vez culminada la investigación se tienen las siguientes conclusiones:

- La investigación cumplió con los objetivos planteados, porque se logra realizar una evaluación detallada del comportamiento de la pastina en una mezcla asfáltica en caliente.
- También se logra caracterizar los componentes de la mezcla asfáltica como ser, los agregados pétreos y el cemento asfáltico 85/100 que fueron proporcionados por SEDECA, y la pastina klaukol es procandia argentina misma que se adoptó su ficha técnica.
- Los contenidos óptimos de asfalto determinados para cada porcentaje de pastina son:

Propiedades Marshall	Especificaciones de la norma	Porcentajes de Polvo de Pastina (%)					
		0%	2%	4%	5%	6%	7%
Contenido óptimo de asfalto (%)	-	5,75	6,02	6,05	6,08	6,11	6,14

- Al obtener briquetas con diferentes porcentajes de pastina, se realiza una evaluación a los resultados obtenidos de las propiedades físico-mecánicas Marshall, de acuerdo a especificaciones de la norma AASHTO, como se observa en la siguiente tabla:

Propiedades Marshall	Especificaciones de la norma	Porcentajes de Polvo de Pastina (%)					
		0%	2%	4%	5%	6%	7%
Contenido óptimo de asfalto (%)	-	5,75	6,02	6,05	6,08	6,11	6,14
Densidad (gr/cm ³)	Mín. 2,25	2,35	2,37	2,38	2,39	2,40	2,42
Vacíos de la mezcla (%)	3 - 5	4,97	4,03	3,55	3,25	2,63	1,79
VAM (%)	Mín. 13	18,10	17,86	17,52	17,33	16,87	16,38
RBV (%)	75 - 82	72,53	77,42	79,72	81,24	84,39	89,06
Estabilidad (lb)	Mín. 1800	2360,45	2397,43	2480,24	2553,39	2959,25	2911,43
Fluencia (0,01 pulg)	8 - 16	11,20	12,00	12,80	14,60	16,40	18,20

Y se concluye que la mezcla asfáltica con mejores resultados obtenidos es:

Porcentaje óptimo de polvo de Pastina					4,25 %	
Propiedades Marshall	Densidad (gr/cm ³)	Vacíos de la mezcla (%)	VAM (%)	RBV (%)	Estabilidad (lb)	Fluencia (0,01 pulg)
		2,38	3,33	17,39	80,86	2520,37

- Finalmente analizando los resultados, se concluye la pastina aporta en la estabilidad de la mezcla mejorando notablemente las propiedades volumétricas y mecánicas de las mezclas asfálticas según el método Marshall, logrando resultados favorables y aptos para mejorar la resistencia de cualquier mezcla asfáltica.

5.2. Recomendaciones

Una vez concluido el trabajo de investigación se tienen las siguientes recomendaciones:

- Cumplir la temperatura de compactado de 160°C para mezclas calientes hasta un mínimo de 140°C, para evitar el enfriamiento de la mezcla asfáltica que produce desprendimiento de los componentes de la mezcla.
- Compactar en lo posible con el martillo Marshall automático, porque tiene velocidad constante normada, altura de caída estandarizada, mantiene su perpendicularidad, y evita que la mezcla se enfríe rápido, por lo tanto, ahorra tiempo de ejecución.
- Evitar sobrecalentar varias veces el cemento asfáltico debido a que pierde sus propiedades, por lo que se debe calentar el material solo al momento de realizar los ensayos, evitando sobrepasar los 160°C.
- Para la elaboración de la mezcla asfáltica se debe contar con los equipos de protección personal adecuados, debido a que se trabaja a altas temperaturas.