

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

El pavimento flexible es una estructura que se diseña mediante la realización de varios cálculos y modelos matemáticos, pero como complemento a éstos los ensayos de laboratorio desempeñan un papel importante, pues se encargan de evaluar las propiedades de los materiales que se van a usar para el desarrollo de una estructura, y, a su vez, garantizan que se cumpla con los requisitos impuestos por las especificaciones técnicas. Una de las principales propiedades mecánicas que se evalúan en el laboratorio es la resistencia máxima que soporta una mezcla asfáltica antes de fallar, y para medirla se utiliza un método simple y representativo del comportamiento del pavimento flexible, como es el ensayo o Método Marshall.

El Filler en mezclas asfálticas aglomera los distintos elementos del árido proporcionando la cohesión necesaria para aumentar la rigidez del material. Dicho Filler (material que pasa el tamiz No 200) posee ciertas características fundamentales que influyen en su comportamiento dentro de la mezcla como su mineralogía, forma y tamaño de sus partículas. La adición de llenante mineral o filler al asfalto es una de las modificaciones que se hace para mejorar las características de éste, debido a comportamientos poco favorables en los pavimentos, su estado normal provoca en ocasiones fallas en carpetas asfálticas.

La mineralogía del Filler, como la de todos los agregados, es uno de los factores más importantes en el comportamiento de una mezcla asfáltica, es importante conocer los minerales que componen la llenante para determinar la influencia que tienen en la rigidez de las mezclas. Al igual que el tamaño y forma de las partículas de Filler, aunque por facilidad siempre se ha utilizado el suelo que pasa el tamiz N°200, es interesante saber cómo influye el cambio de tamaño y forma de las partículas de Filler, separándolas con tamices de diferentes diámetros. Este cambio puede ocasionar pequeñas alteraciones en la rigidez del asfalto que son importantes al momento de ser estudiados.

Una de las propiedades principales de las mezclas asfálticas es su capacidad para deformarse sin llegar a la rotura, absorbiendo esfuerzos elevados y cíclicos. Este comportamiento de

resistencia al corte con sus dos componentes, la cohesión y la fricción, se observa en las mezclas asfálticas, siendo los áridos la estructura friccionante, y la cohesión, la mezcla de asfalto con las partículas finas o relleno mineral. La actividad del diseño de mezclas asfálticas ha evolucionado si hacemos referencia al uso de aditivos y de métodos con el fin de obtener un óptimo ligante bituminoso, para nuestro caso la modificación de un asfalto convencional.

Para la presente investigación se identifica el problema mediante la observación y análisis de una realidad de nuestra ciudad, para después establecer nuestras hipótesis y plantear nuestros objetivos. Se necesitan realizar pruebas de laboratorio, obtener resultados y analizarlos para verificar si cumplen nuestras hipótesis y también si logramos cumplir nuestros objetivos en caso los resultados sean positivos y así lograr concluir con nuestra investigación.

En este trabajo de investigación denominado “ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL LLENANTE MINERAL, GRAVILLA ARENOSA, PIEDRA CHANCADA Y NO CHANCADA EN LA RESPUESTA MECÁNICA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS” se presentan los resultados de la investigación de modificar el relleno natural de la mezcla asfáltica por cemento portland IP-30, en diferentes porcentajes juntamente con piedra chancada, no chancada y gravilla arenosa, con el objetivo de determinar su influencia en la resistencia, cohesión y adherencia, del cual se pretende hacer énfasis en la determinación de un porcentaje de vacíos óptimo, la cual permita que las características mecánicas de las mezclas asfálticas sean adecuadas y cumplan con los parámetros necesarios, utilizando materiales con los que contamos en nuestro medio.

1.2. Justificación

El conocimiento de la problemática vial del país y específicamente de los problemas que presenta el mal estado de las carreteras en varias zonas, se propone realizar una investigación sobre las modificaciones que se puede realizar a las mezclas asfálticas con cemento portland IP-30 como llenante mineral y el tipo de agregado natural, triturado y gravilla arenosa, para con esto lograr como resultado una mejor calidad de mezclas asfálticas, por ende obtener capas de rodadura de alta calidad y proveer una alternativa

útil a los profesionales que se dedican a la construcción de carreteras de pavimento en Bolivia.

Como también determinar y verificar cuales son las reacciones y el mejor comportamiento de cada una en las propiedades de la mezcla asfáltica de manera que se pueda extraer conclusiones adecuadas, para que en el proceso de investigación y construcción que se realicen se tengan los cuidados adecuados para elegir los materiales de la llenante mineral como del agregado de las mezclas asfálticas.

Esto ante la gran cantidad y diversidad de tipos de llenantes minerales, polímeros y productos especiales en las mezclas asfálticas por lo que es importante bajo una investigación que en este caso será comparativa determinar la respuesta mecánica de las propiedades de la mezcla, considerando que la mayor incidencia importante para el proyecto de carreteras es la respuesta mecánica en cuanto a la estabilidad y deformación que presenten a la compresión al tránsito vehicular, razón por la cual se quiere aportar con nueva y mejores maneras de conformar mezclas asfálticas que en un futuro permitan mejorar las vías y prolongar los tiempos de uso y duración.

1.3. Diseño teórico

1.3.1. Determinación del problema

1.3.1.1. Situación problémica

Ante la necesidad creciente de contar con productos que tengan un mejor comportamiento bajo la acción del tránsito vehicular y de los distintos factores ambientales, se han desarrollado procesos y fórmulas que permiten la fabricación de asfaltos de mayor durabilidad, mediante la adición de diferentes tipos de llenantes minerales como agregados. Los aportes de estos materiales a la mejora de las propiedades de los asfaltos han sido ampliamente estudiados. Sin embargo, cada vez que sale al mercado un nuevo producto, por lo que es fundamental tener un conocimiento de las propiedades o características que proporcionan a las mezclas asfálticas.

El problema principal es definir la influencia de un tipo de llenante mineral, y el tipo de material granular se ha de emplear en las mezclas asfálticas dependiendo de las respuestas mecánicas en sus propiedades, siendo los materiales predominantes de los pavimentos existentes, a nivel de superficie de rodadura, las cuales influyen en la resistencia al tránsito

vehicular mediano y liviano de los pavimentos y en la optimización del presupuesto de los proyectos. Actualmente no se cuenta con parámetros técnicos y económicos para la correcta elección del tipo de material a emplear en una pavimentación urbana. Por ello se pretende realizar el estudio comparativo de estos tipos de agregados minerales en las mezclas asfálticas y poder determinar cuál presenta mejor respuesta a los estudios realizados

Para la presente investigación se identifica el problema mediante la observación y análisis de una realidad de nuestra localidad, para después establecer nuestras hipótesis y plantear nuestros objetivos. Se necesitan realizar pruebas de laboratorio, obtener resultados y analizarlos para verificar si cumplen nuestras hipótesis y también si logramos cumplir nuestros objetivos en caso los resultados sean positivos y así lograr concluir con nuestra investigación.

En el diseño de una mezcla asfáltica en caliente intervienen dos materiales indispensables que son los agregados pétreos y el asfalto, los agregados por su parte son de gran importancia ya que en una mezcla asfáltica constituyen entre el 90 y el 95 por ciento en peso, y entre el 75 y 85 por ciento en volumen; es de mencionar que la calidad de la mezcla asfáltica depende de la calidad de los materiales constituyentes y la capacidad de carga de la carpeta es proporcionada esencialmente por los agregados, de esto se deriva la importancia de una adecuada selección y manejo de los materiales pétreos y llenante mineral que serán utilizados para elaborar una mezcla asfáltica, específicamente en lo que se refiere a una buena distribución granulométrica. Una pequeña variación en el porcentaje de llenante mineral puede causar cambios significativos en las propiedades de la mezcla asfáltica elaborada por lo tanto es necesario llevar un control eficiente de los agregados y llenante mineral que se está usando para la realización de la siguiente investigación.

1.3.1.2. Problema

¿Cómo afecta el tipo de llenante mineral y el agregado pétreo, en el desempeño mecánico y sus propiedades en una mezcla asfáltica?

1.3.2. Objetivos

1.3.2.1. Objetivo general

Analizar el efecto de las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica con remplazo de la llenante mineral por cemento portland IP-30 con diferentes porcentajes y el tipo de agregado utilizado para realizar los ensayos de laboratorio estandarizados para mezclas asfálticas, realizando una comparación de las variaciones de las respuestas mecánicas en sus propiedades que puedan presentar en general y determinar las reacciones de sus propiedades de las mismas.

1.3.2.2. Objetivos específicos

- Establecer la secuencia adecuada de la investigación desde los materiales utilizados hasta el procedimiento adecuado de la investigación.
- Emplear Norma ASTM y AASHTO para el muestreo de los agregados pétreos, cemento asfáltico y llenante mineral, así como para el desarrollo de los ensayos necesarios para identificar sus propiedades físicas.
- Realizar los ensayos de caracterización del agregado pétreo (piedra chancada, no chancada y gravilla arenosa), cemento asfáltico y llenante mineral que se utilizara en la elaboración de las briquetas.
- Elaborar las Mezclas de prueba en el laboratorio, de acuerdo a las proporciones de agregados (grueso y fino), cemento asfáltico, que se establecieron según las normativas técnicas empleadas, para determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico mediante la elaboración de briquetas por el método Marshall.
- Diseñar las briquetas con dimensiones estándar para proceder un ensayo de ruptura en prensa Marshall, para determinar sus propiedades mecánicas.
- Con los contenidos óptimos de cemento asfáltico de cada diseño granulométrico, elaborar briquetas con la adición de llenante mineral a diferentes porcentajes.
- Analizar la influencia de la llenante mineral en las propiedades de estabilidad, % de vacíos y densidad de la mezcla asfáltica, con adición de cemento portland y el tipo de agregado utilizado.

- Realizar la gráfica para visualizar los resultados obtenidos con los diferentes porcentajes de la llenante mineral y el tipo de agregado utilizado en la mezcla asfáltica y evaluar el comportamiento de las combinaciones.
- Analizar todos los resultados obtenidos en laboratorio para establecer las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

1.3.3. Hipótesis

En una mezcla asfáltica el tipo de llenante mineral o filler (cemento portland), en diferentes porcentajes, como el tipo de agregado (piedra chancada, natural y gravilla arenosa) tienden a afectar en la respuesta mecánica de una mezcla asfáltica al ofrecer una mejor respuesta mecánica, un mejor desempeño de la carpeta asfáltica y por consiguiente un incremento de la vida útil de la estructura total del pavimento ofreciendo un mayor nivel de estabilidad.

1.3.4. Limitaciones

Entre las limitaciones mencionaremos los siguientes:

- El tipo de cemento asfáltico a utilizar en este trabajo de investigación es un asfalto de penetración 85-100 PROBISA Chile, proporcionado por la posta municipal de Tarija ubicada en la comunidad de la Pintada.
- El agregado pétreo chancado o triturado utilizado es proporcionado por la posta municipal de Tarija ubicada en la comunidad de la Pintada, como dentro de la ciudad de Tarija en el barrio Guadalquivir.
- El agregado pétreo natural o canto rodado es procedente de la Seleccionadora de Áridos “San Blas”.
- La llenante mineral utilizado en la investigación es el cemento portland IP-30 de cemento “EL Puente” para la modificación en mezcla asfáltica.
- Los ensayos correspondientes se realizarán con el equipo disponible en los laboratorios de Hormigones y Asfaltos de la carrera Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho
- El uso de los laboratorios estará restringido a la disponibilidad de los horarios, espacio disponible y materiales.

1.3.5. Definición de variables

1.3.5.1. Variables dependientes

Propiedades físico-mecánicas que se modificaran mediante ensayos y pruebas en laboratorio para determinar las características mecánicas de la mezcla asfáltica y sus componentes como:

- Densidad.
- Porcentaje de vacíos.
- Estabilidad.
- Fluencia
- R.B.V. (Relación Betumen Vacíos)
- V.A.M. (Vacío Agregado Mineral)

1.3.5.2. Variable independiente

- Llenante mineral o Filler (cemento portland IP-30), con diferentes porcentajes, en cada tipo de agregado.

1.3.5.3. Operacionalidad

- **Variable Independiente**

Tabla 1.1: *Operacionalización de la variable independiente*

Variable Nominal	Operacionalidad		
	Dimensiones	Indicador	Valor/Acción
Llenante mineral o Filler (cemento portland)	Caracterización del material	Peso específico	g/ml
		Finura del cemento	%

Fuente: Elaboración propia.

- **Variable Dependiente**

Tabla 1.2: Operacionalización de la variable dependiente

Variable Nominal	Operacionalidad		
	Dimensiones	Indicador	Valor/Acción
Características mecánicas de la mezcla asfáltica modificada	Comportamiento mecánico	Estabilidad	Especificaciones de la norma (AASHTO, ASTM)
		Fluencia	
		Densidad	
		% de vacíos	
		R.B.V.	
		V.A.M.	

Fuente: Elaboración propia.

1.3.5.4. Conceptualización

Comportamiento mecánico. – Describe la capacidad que tienen los diferentes materiales para comprimirse, estirarse bajo la acción de sollicitaciones externas.

Mezcla asfáltica. – Combinación de agregados seleccionados, uniformemente mezclados y recubiertos por material bituminoso de características determinadas.

Cemento asfáltico. - Es un material aglomerante sólido o semisólido de color negro o pardo oscuro, que se ablanda gradualmente al calentarse y cuyos constituyentes predominantes son hidrocarburos pesados, que se obtienen de la refinación del petróleo.

Agregados pétreos. - Son materiales granulares sólidos inertes que se utilizan para la fabricación de productos artificiales resistentes, mediante su mezcla con materiales aglomerantes de activación hidráulica (cementos, calles, etc.) o con ligantes asfálticos.

Llenante mineral o Filler. - Es el material fino (Pasa No. 200) que mezclado con el asfalto conforman el mástico encargado de proporcionar cohesión, a través de este se mantiene unido el esqueleto mineral y es el principal responsable de la impermeabilidad y durabilidad de la mezcla asfáltica.

Diseño de mezcla asfáltica. - Es el proceso de seleccionar los materiales adecuados para determinar las cantidades relativas de los mismos, con el objeto de producir una mezcla asfáltica donde las propiedades mecánicas sean las más óptimas.

Método Marshall. - Es un método para determinar el control de mezclas elaboradas utilizando materiales pétreos con un tamaño máximo igual o inferior a 25 mm y cemento asfáltico en caliente, asfaltos rebajados emulsiones asfálticas que satisfagan los requisitos.

Estabilidad. – Es la carga máxima que se requiere para producir la rotura de la probeta; esta se mide en Newton (N).

Fluidez. - Es la deformación que se produce a la carga máxima de rotura de la briqueta.

Densidad. - La densidad de la mezcla compactada se define como la masa de un volumen específico de mezcla, más el volumen de los poros accesibles e inaccesibles.

Huecos en la mezcla o Vacíos de aire. - Es el volumen total de pequeñas bolsas de aire entre partículas de agregado cubiertos con asfalto, expresado como porcentaje de volumen total de mezcla compactada.

1.4. Diseño metodológico

1.4.1. Unidad de estudio y decisión muestral

1.4.1.1. Unidad de estudio

Esta investigación forma parte de las mezclas asfálticas que es una combinación de asfalto y agregados, minerales pétreos en proporciones exactas que se utiliza para construir firmes.

En el trabajo de investigación la unidad de estudio se centrará en el efecto que tendrá la llenante mineral o filler con el tipo de agregado en una mezcla asfáltica, para de esta manera determinar la influencia en el comportamiento mecánico de la misma.

1.4.1.2. Población

Para el presente estudio de investigación la población usada dentro de la unidad de estudio y análisis de desempeño es la mezcla asfáltica conjuntamente con todos los elementos como, el llenante mineral, material pétreo (grueso y fino) y cemento asfáltico, donde se deben realizar cuerpos de prueba para cada tipo de material granular y llenante mineral en la mezcla asfáltica, con el fin de realizar los ensayos necesarios, tanto para diseño como para la determinación del desempeño que tienen cada una de ellas.

1.4.1.3. Muestra

Llenante mineral o filler (cemento portland), con diferentes porcentajes para el diseño de la mezcla asfáltica y el tipo de agregado utilizado en la misma, estos deben ser caracterizados considerando sus propiedades, así como otras características y propiedades de los llenantes minerales, agregados minerales pétreos y cemento asfáltico.

1.4.1.4. Muestreo

El estudio se inició con la caracterización de los materiales (agregados o material granular, asfaltos y filler), seguido de la determinación del porcentaje óptimo de asfalto mediante el método Marshall por la cual se hará mención de las características y propiedades más importantes del asfalto, su composición y como todos estos parámetros influyen en las propiedades de la mezcla; así como también los ensayos básicos que se realizan para comprobar el grado de desempeño en la respuesta mecánica y sus propiedades que presentan.

1.4.2. Métodos y técnicas empleadas

1.4.2.1. Definición, selección y/o elaboración de los métodos y técnicas

El método la cual se utilizará para la siguiente investigación, será la experimentación porque este método se basa en la experimentación mediante ensayos de laboratorio, donde se analizará como afecta la llenante mineral y el tipo de agregado en una mezcla asfáltica.

1.4.2.2. Técnica de muestreo

La técnica utilizada para este trabajo de investigación será planteada como experimental; en la cual, las variables a analizar son las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica, se determinarán mediante los ensayos respectivos en laboratorio para la caracterización de los materiales de una mezcla asfáltica y el efecto de la llenante mineral en determinado agregado pétreo de una mezcla asfáltica, para poder mejorar sus propiedades mecánicas. Se realizan ensayos de caracterización a todos los materiales, tales como:

Ensayos a realizarse para el cemento asfáltico:

- Ensayo para determinar la ductilidad 25 °C (ASTM D-113, AASHTO T 51-00)
- Ensayo de penetración 25 °C (ASTM D-5, AASHTO T 49-97)
- Ensayo para determinar el peso específico (ASTM D-70, AASHTO T-43)
- Ensayo para determinar el punto de inflamación mediante la copa abierta de Cleveland (ASTM D 1310-01, AASHTO T 79-96)
- Ensayo de película delgada (ASTM D-1754, AASHTO T 179-94)
- Ensayo de punto de ablandamiento (ASTM D-36, AASHTO T 53-96)

Ensayos a realizarse para los agregados

- Método para determinar la granulometría (ASTM C-136, AASHTO T-27)
- Método para determinar equivalente de arena (ASTM D-2419, AASHTO T-176)
- Método para determinar el desgaste mediante de la Máquina de los Ángeles (ASTM C-131, AASHTO T-96)
- Método para determinar el peso específico y absorción de agua en agregados gruesos (ASTM C-127, AASHTO T-85)
- Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos finos (ASTM C-128, AASHTO T-84)
- Método de peso unitario (ASTM C-29, AASHTO T-19)

Ensayos a realizarse en el Filler o llenante mineral (cemento portland).

- Peso específico del cemento (ASTM C-188)
- Determinación de la finura del cemento (ASTM C-204)

Ensayos Método Marshall (ASTM D-1559)

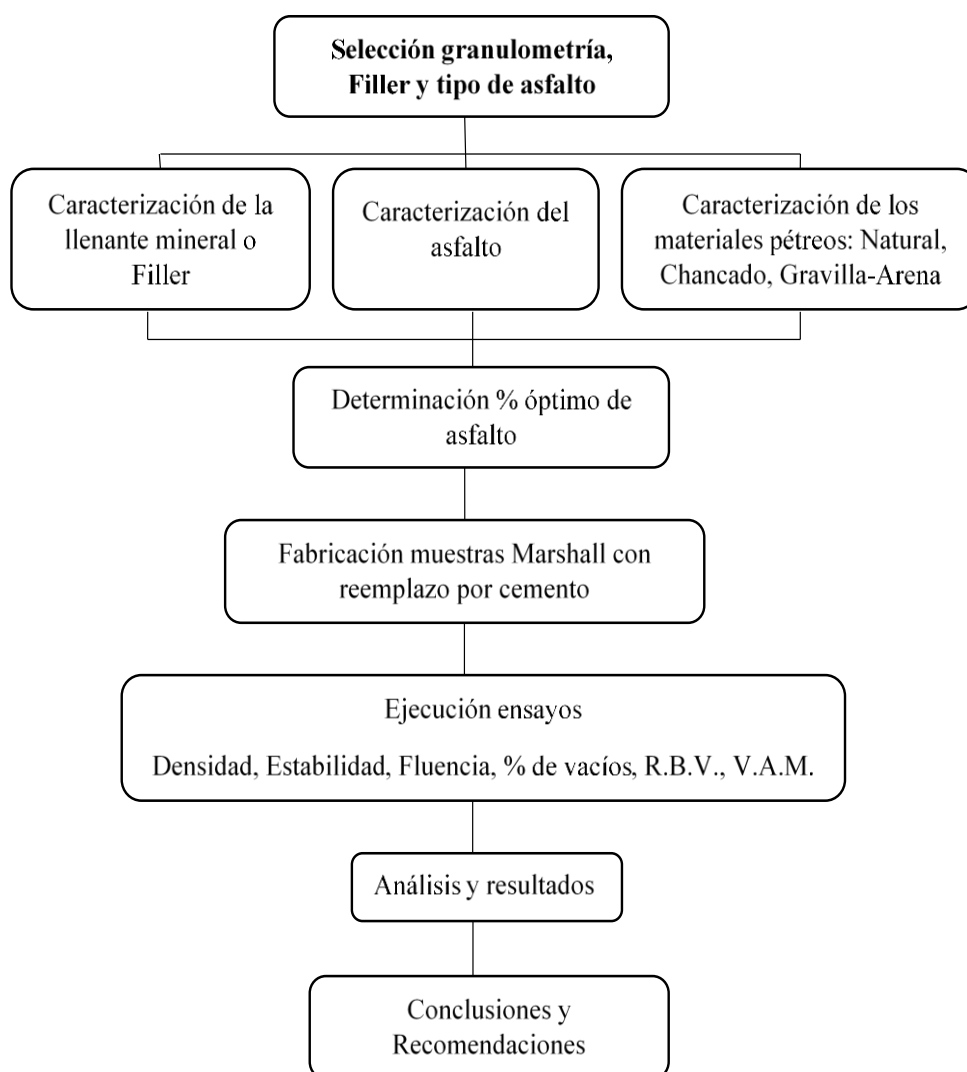
- Ensayo de estabilidad y fluencia
- Porcentaje de vacíos
- Densidad
- R.B.V. (Relación Betumen Vacíos)
- V.A.M. (Vacío Agregado Mineral)

Todos estos métodos aplicados en este trabajo de investigación estarán detallados debidamente.

De todos los instrumentos y materiales a utilizar se tomará en cuenta los errores personales o del instrumento que se pueden presentar en la obtención de datos.

1.4.2.3. Procedimiento de aplicación

Gráfica 1.1: Esquema de la metodología usada en la investigación.



Fuente: Elaboración propia.

En las siguientes tablas se detalla el número de ensayos a realizar:

Tabla 1.3: *Caracterización del material pétreo*

Caracterización del material pétreos	
Ensayos	N°
Granulometría agregado grueso y fino	3
Determinación del equivalente de arena	3
Determinación del peso unitario de los agregados	3
Determinación del desgaste del agregado grueso con la máquina de los ángeles	1
Determinación del peso específico y absorción del agregado grueso	3
Determinación del peso específico y absorción del agregado fino	3

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1.4: *Caracterización del cemento asfáltico*

Caracterización del C.A. 85-100 PROBISA Chile	
Ensayos	N°
Punto de ablandamiento	2
Penetración	3
Ductilidad	3
Punto de inflamación	3
Peso específico	3
Ensayo en horno de película delgada	3

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1.5: *Caracterización de la llenante mineral*

Caracterización de la llenante mineral (cemento portland IP-30 El Puente)	
Ensayos	N°
Peso específico del cemento	3
Determinación de finura del cemento	3

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1.6: *Detalle del número de briquetas para determinar óptimos*

Briquetas a realizar			
Briquetas		Porcentajes	N°
Porcentajes para el contenido óptimo de cemento asfáltico sin llenante mineral para cada tipo de agregado pétreo		4.5%; 5%; 5.5%; 6%; 6.5%	45
Con C.A. óptimo y adición de llenante mineral	Agregado Natural (Sel. Áridos San Blas)	0%; 2%; 4%; 5%; 6%; 8%	18
	Agregado Chancada (Posta Mpal. de Tarija)	0%; 2%; 4%; 5%; 6%; 8%	18
	Gravilla-Arenosa (Posta Mpal. de Tarija)	0%; 2%; 4%; 5%; 6%; 8%	18
Total, de briquetas a realizar con C.A. óptimo y llenante mineral óptimo			54

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1.7: *Detalle del número de briquetas para el estudio estadístico final*

Briquetas a realizar			
Briquetas		Porcentaje	N°
Con C.A. óptimo y adición de llenante mineral óptimo	Agregado Natural (Sel. Áridos San Blas)	% óptimos	10
	Agregado Chancada (Posta Mpal. de Tarija)	% óptimos	10
	Gravilla-Arenosa (Posta Mpal. de Tarija)	% óptimos	10
Total, de briquetas a realizar con C.A. óptimo y llenante mineral óptimo			30
Total, de briquetas a realizar			129

Fuente: Elaboración propia.

1.4.2.4. Metodología de la práctica

El estudio se iniciará con la caracterización de los materiales (agregados, asfaltos, cemento), seguido de la determinación del porcentaje óptimo de asfalto mediante el método Marshall.

El propósito del Método Marshall es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. El método también provee información sobre propiedades de la mezcla asfáltica en caliente, y establece densidades y contenidos

óptimos de vació que deben ser cumplidos durante la elaboración de la mezcla. El método original de Marshall, sólo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1 pulg) o menor. El método puede ser usado para el diseño en laboratorio, como para el control de campo de mezclas asfálticas en caliente.

Cuando se desarrolla una mezcla de diseño, es necesario hacer varias mezclas de prueba para encontrar una que cumpla con todos los criterios de diseño. Cada una de las mezclas de prueba sirve como una guía para evaluar y ajustar las pruebas siguientes. Para diseño de mezclas preliminares o exploratorias, es aconsejable comenzar con una graduación de agregado que se acerque a la media de los límites establecidos. Las mezclas de prueba iniciales sirven para establecer la fórmula de trabajo y verificar que la graduación del agregado este dentro de los límites especificados.

Una vez obtenidos los contenidos óptimos de las mezclas asfálticas, con los tipos de agregados, se procede a la elaboración de briquetas con la adición de cemento portland como llenante mineral a diferentes porcentajes de 0, 2, 4, 5, 6 y 8, mediante el método Marshall, para luego realizar un comparación en laboratorio analizando las variaciones de las respuestas mecánicas de estabilidad, deformación en sus propiedades que puedan presentar la llenante mineral en el tipo de agregado en las mezclas asfálticas en general y ver las reacciones de las mismas.

Esto ante la gran cantidad y diversidad de tipos de llenantes minerales, en las mezclas asfálticas por lo que es importante bajo una investigación comparativa y analítica determinar la respuesta mecánica de las propiedades de la mezcla, considerando que la mayor incidencia importante para el proyecto de una carretera es la respuesta mecánica en cuanto a la estabilidad y deformación.

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

1.5.1. Análisis estadístico

Para la obtención de los cálculos que se requieren mostrar en la investigación nos ayudamos de fórmulas estadísticas como:

Media aritmética. -Que, en un conjunto finito de números, es el valor característico de una serie de datos cuantitativos que son objeto de estudio que parte del principio de la esperanza matemática o valor esperado, es decir: es el valor obtenido al sumar todos los datos y dividir el resultado entre el número total de datos.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{N}$$

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{N}$$

Donde:

\bar{X} = Valor de la media aritmética

X_1, X_2, X_3 = Valores de muestras obtenidas

N = Número de muestras

Desviación Estándar. -También se utilizará la desviación estándar que es una medida de dispersión usada en estadística que nos dice cuánto tienden a alejarse los valores concretos del promedio en una distribución. De hecho, específicamente, el cuadrado de la desviación estándar es “el promedio del cuadrado de la distancia de cada punto respecto del promedio”

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

Donde

x_i = Valor de cada muestra de observación

\bar{x} = Valor de la media aritmética

n = Número de muestras

1.6. Alcance

Uno de los alcances del proyecto de investigación, es conocer el comportamiento de la mezcla asfáltica modificada con un tipo de llenante mineral (cemento portland), como el

tipo de agregado utilizado y determinar por medio de ensayos de laboratorio su comportamiento, basándose en: bibliografía específica (ensayo Marshall), artículos de investigación e investigaciones anteriores.

Determinar que, para todos los reemplazos de relleno natural por cemento, la deformación de las mezclas sufre cambios en sus propiedades dependiendo del porcentaje de reemplazo. Es importante resaltar que, con este estudio de investigación podremos verificar que puede existir un incremento como una disminución en resistencia muy significativo con la sustitución, la capacidad para soportar deformaciones presentara una influencia en la mecánica de las mezclas asfálticas en forma sustancial al introducirle cemento y el tipo de agregado.

En el primer capítulo, se describe de manera general de lo se trata de determinar bajo una investigación comparativa y analítica, donde se plantea el problema, objetivos y las justificaciones por la cual está siendo desarrollada el tema e investigación.

En el segundo capítulo, comprende todo lo referido a la fundamentación teórica que abarca el tema de investigación, la cual se basa en las mezclas asfálticas, los materiales utilizados (tipo de agregado, cemento asfáltico y llenante mineral), y el método Marshall.

En el tercer capítulo, se describe las caracterizaciones de los materiales de la mezcla asfáltica (tipo de agregado, cemento asfáltico y llenante mineral), mediante ensayos regidos bajo normas establecidas, también se describe el diseño de briquetas con el método Marshall, para obtener el contenido óptimo de cemento asfáltico para el tipo de agregado utilizado en la mezcla asfáltica.

En el cuarto capítulo, se realiza una evaluación de las mezclas asfálticas con la adición de la llenante mineral mediante la elaboración de briquetas a distintos porcentajes, con el método Marshall, para luego ser analizado mediante la comparación y determinar las variaciones de las respuestas mecánicas presentes en las distintas mezclas asfálticas.

En el quinto capítulo, se establecen las conclusiones a partir de lo planteado en los objetivos, dando a conocer los valores o resultados finales analizadas mediante las comparaciones que se tendrán de las distintas mezclas asfálticas realizadas, con diferentes tipos de agregado y la adición de la llenante mineral y las recomendaciones para una correcta aplicación y ejecución de este trabajo de investigación.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. Pavimento

Se llama pavimento al conjunto de capas de material seleccionado que reciben en forma directa las cargas del tránsito y las transmiten a los estratos inferiores en forma disipada, proporcionando una superficie de rodamiento, la cual debe funcionar eficientemente. Las condiciones necesarias para un adecuado funcionamiento son las siguientes: anchura, trazo horizontal y vertical, resistencia adecuada a las cargas para evitar las fallas y los agrietamientos, además de una adherencia adecuada entre el vehículo y el pavimento aun en condiciones húmedas. Deberá presentar una resistencia adecuada a los esfuerzos destructivos del tránsito, de la intemperie y del agua. Debe tener una adecuada visibilidad y contar con un paisaje agradable para no provocar fatigas.

Puesto que los esfuerzos en un pavimento decrecen con la profundidad, se deberán colocar los materiales de mayor capacidad de carga en las capas superiores, siendo de menor calidad los que se colocan en las terracerías además de que son los materiales que más comúnmente se encuentran en la naturaleza, y por consecuencia resultan los más económicos.

La división en capas que se hace en un pavimento obedece a un factor económico, ya que cuando determinamos el espesor de una capa el objetivo es darle el grosor mínimo que reduzca los esfuerzos sobre la capa inmediata inferior. La resistencia de las diferentes capas no solo dependerá del material que la constituye, también resulta de gran influencia el procedimiento constructivo; siendo dos factores importantes la compactación y la humedad, ya que cuando un material no se acomoda adecuadamente, éste se consolida por efecto de las cargas y es cuando se producen deformaciones permanentes.

2.1.1. Funciones de un pavimento

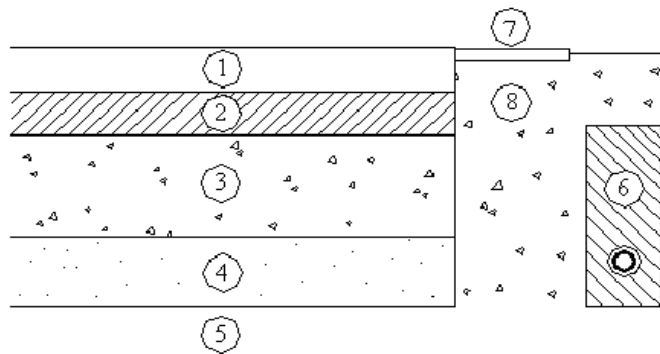
Un pavimento de una estructura, asentado sobre una fundación apropiada, tiene por finalidad proporcionar una superficie de rodamiento que permita el tráfico seguro y confiable de vehículos, a velocidades operacionales deseadas y bajo cualquier condición climática. Hay una gran diversidad de tipos de pavimento, dependiendo del tipo de vehículos que transitan y del volumen de tráfico.

La Ingeniería de Pavimentos tiene por objetivo el proyecto, la construcción, el mantenimiento y la gerencia de pavimentos, de tal modo que las funciones sean desempeñadas con el menor costo para la sociedad. Tratándose, esencialmente, de una actividad multidisciplinaria, donde estén involucrados conceptos y técnicas de las Ingenierías: Geotecnia, de Estructuras, de Materiales, de Transportes y de Sistemas, en vista de la importancia se debe estimar y efectuar el mantenimiento de pavimentos existentes.

2.1.2. Componentes de un pavimento

En la Figura 2.1 se muestra esquemáticamente, los componentes principales de un pavimento asfáltico. Se puede considerar que la estructura de un pavimento está formada por una superestructura encima de una fundación, esta última debe ser el resultado de un estudio geotécnico adecuado. En los pavimentos camineros, la superestructura está constituida por la capa de revestimiento y la capa base; la fundación está formada por las capas de subbase y suelo compactado.

Figura 2.1: Componentes principales de un pavimento asfáltico



Fuente: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Ingeniería de Pavimentos, Brasil. 2000.

- | | |
|---------------------|-------------------------------|
| 1. Capa de Rodadura | 5. Subrasante |
| 2. Capa Base | 6. Subdrenaje longitudinal |
| 3. Capa Subbase | 7. Revestimiento de Hombreras |
| 4. Suelo Compactado | 8. Sub -base de Hombreras |

La capa de rodadura o revestimiento asfáltico tiene las siguientes funciones:

- Impermeabilizar el pavimento, para que las subyacentes puedan mantener su capacidad de soporte.
- Proveer una superficie resistente al deslizamiento, incluso en una pista húmeda.
- Reducir las tensiones verticales que la carga por eje ejerce sobre la capa base, para poder controlar la acumulación de deformaciones plásticas en dicha capa.

La capa base tiene las siguientes funciones:

- Reducir las tensiones verticales que las cargas por eje ejercen sobre las capas subbase y suelo natural.
- Reducir las deformaciones de tracción de tracción que las cargas por eje ejercen a la capa de revestimiento asfáltico.
- Permitir el drenaje del agua que se infiltra en el pavimento, a través de drenajes laterales longitudinales (Figura 2.1).

La capa subbase está constituida por un material de capacidad de soporte superior a la del suelo compactado y se utiliza para permitir la reducción del espesor de la capa base.

La capa de suelo reforzado puede estar presente en una estructura de pavimento, para poder reducir el espesor de la capa subbase.

El suelo compactado, es el mismo suelo del terraplén, que está escarificado y compactado una cierta profundidad dependiendo de su naturaleza o de las especificaciones del proyecto.

2.1.3. Características que debe reunir un pavimento

Un pavimento para cumplir adecuadamente sus funciones debe reunir los siguientes requisitos:

- Ser resistente a la acción de las cargas impuestas por el tránsito.
- Ser resistente ante los agentes de intemperismo.
- Presentar una textura superficial adaptada a las velocidades previstas de circulación de los vehículos, por cuanto ella tiene una decisiva influencia en la seguridad vial. Además, debe ser resistente ante el desgaste producido por el efecto abrasivo de las llantas de los vehículos.
- Debe presentar una regularidad superficial, tanto transversal como longitudinal, que permitan una adecuada comodidad a los usuarios en función de las longitudes de onda de las deformaciones y de las velocidades de circulación.
- Debe ser durable.
- Presentar condiciones adecuadas respecto al drenaje.
- El ruido de rodadura, en el interior de los vehículos que afectan al usuario, así como en el exterior, que influye en el entorno, debe ser adecuadamente moderado.
- Debe ser económico.
- Debe poseer el color adecuado para evitar reflejos y deslumbramientos, y ofrecer una adecuada seguridad al tránsito.

2.2. Clasificación de pavimentos

2.2.1. Pavimentos semirrígidos

Aunque este tipo de pavimentos guarda básicamente la misma estructura de un pavimento flexible, una de sus capas se encuentra rigidizada artificialmente con un aditivo que puede ser: asfalto, emulsión, cemento, cal y químicos. El empleo de estos aditivos tiene la

finalidad básica de corregir o modificar las propiedades mecánicas de los materiales locales que no son aptos para la construcción de las capas del pavimento, teniendo en cuenta que los adecuados se encuentran a distancias tales que encarecerían notablemente los costos de construcción.

2.2.2. Pavimentos articulados

Los pavimentos articulados están compuestos por una capa de rodadura que está elaborada con bloques de concretos prefabricados, llamados adoquines, de espesor uniforme e igual entre sí. Esta puede ir sobre una capa delgada de arena la cual, a su vez, se apoya sobre una capa de base granular o directamente sobre la subrasante, dependiendo de la calidad de esta y de la magnitud y frecuencia de las cargas que circularan por dicho pavimento.

Figura 2.2: *Sección típica y vista de un pavimento articulado*



Fuente: MANUAL DE CARRETERAS: Suelos, geología, geotecnia y pavimentos 2014/MTC.

2.2.2.1. Funciones de las capas de un pavimento articulado

- **La base**
Es la capa colocada entre la subrasante y la capa de rodadura. Esta capa le da mayor espesor y capacidad estructural al pavimento. Puede estar compuesta por dos o más capas de materiales seleccionados.
- **Capa de arena**
Es una capa de poco espesor, de arena gruesa y limpia que se coloca directamente sobre la base; sirve de asiento a los adoquines y como filtro para que el agua que eventualmente pueda penetrar por las juntas entre éstos.

- **Adoquines**

Deben tener una resistencia adecuada para soportar las cargas del tránsito y en especial, el desgaste producido por este.

- **Sello de arena**

Está constituido por arena fina que se coloca como llénate de las juntas entre adoquines; sirve como sello de las mismas y contribuye al funcionamiento como un todo, de los elementos de la capa de rodadura.

2.2.3. Pavimentos rígidos

Son aquellos que fundamentalmente están constituidos por una losa de concreto hidráulico, apoyada sobre la subrasante o sobre una capa, de material seleccionado, a cuál se denomina subbase del pavimento rígido (ver Figura 2.2). Debido a la alta rigidez del concreto hidráulico, así como de su elevado coeficiente de elasticidad, la distribución de los esfuerzos se produce en una zona muy amplia. Además, como el concreto es capaz de resistir, en cierto grado, esfuerzos a la tensión, el comportamiento de un pavimento rígido es suficientemente satisfactorio aun cuando existan zonas débiles en la resistencia de las losas y, por lo tanto, el apoyo de las capas subyacentes ejerce poca influencia en el diseño del espesor del pavimento.

Figura 2.3: *Sección típica y vista de un pavimento rígido*



Fuente: MANUAL DE CARRETERAS: Suelos, geología, geotecnia y pavimentos 2014/MTC.

2.2.3.1. Funciones de las capas de un pavimento rígido

La subbase

- La función más importante es impedir la acción de bombeo en las juntas, grietas y extremos del pavimento. Se entiende por bombeo a la fluencia de material fino con agua fuera de la estructura del pavimento, debido a la infiltración de agua por las juntas de las losas. El agua que penetra a través de las juntas licua el suelo fino de la subrasante facilitando así su evacuación a la superficie bajo la presión ejercida por las cargas circulantes a través de las losas.
- Servir como capa de transición y suministrar un apoyo uniforme, estable y permanente del pavimento.
- Facilitar los trabajos de pavimentación.
- Mejorar el drenaje y reducir por tanto al mínimo la acumulación de agua bajo el pavimento.
- Ayudar a controlar los cambios volumétricos de la subrasante y disminuir al mínimo la acción superficial de tales cambios volumétricos sobre el pavimento.
- Mejorar en parte la capacidad de soporte del suelo de la subrasante.

Losa de concreto

Las funciones de la losa en el pavimento rígido son las mismas de la carpeta en el flexible, más la función estructural de soportar y transmitir en nivel adecuado los esfuerzos que lo apliquen.

2.2.4. Pavimentos flexibles

Este tipo de pavimento está formado por una carpeta bituminosa apoyada generalmente sobre dos capas no rígidas, la base y la subbase. No obstante, puede prescindirse de cualquier de estas capas dependiendo de las necesidades particulares de cada obra.

Figura 2.4: *Sección típica y vista de un pavimento flexible*



Fuente: MANUAL DE CARRETERAS: Suelos, geología, geotecnia y pavimentos 2014/MTC.

2.2.4.1. Funciones de las capas de un pavimento flexible

La subbase granular

- **Función económica.** Una de las principales funciones de esta capa es netamente económica; en efecto, el espesor total que se requiere para que el nivel de esfuerzos en la subrasante sea igual o menor que su propia resistencia, puede ser construido con materiales de alta calidad; sin embargo, es preferible distribuir las capas más calificadas en la parte superior y colocar en la parte inferior del pavimento la capa de menor calidad la cual es frecuentemente la más barata. Esta solución puede traer consigo un aumento en el espesor total del pavimento y, no obstante, resultar más económica.
- **Capa de transición.** La subbase bien diseñada impide la penetración de los materiales que constituyen la base con los de la subrasante y, por otra parte, actúa como filtro de la base impidiendo que los finos de la subrasante la contaminen menoscabando su calidad.
- **Disminución de las deformaciones.** Algunos cambios volumétricos de la capa subrasante, generalmente asociados a cambios en su contenido de agua (expansiones), o a cambios extremos de temperatura (heladas), pueden absorberse con la capa subbase, impidiendo que dichas deformaciones se refieren en la subrasante.

- **Resistencia.** La subbase debe soportar los esfuerzos transmitidos por las cargas de los vehículos a través de las capas superiores y transmitidas a un nivel adecuado a la subrasante.
- **Drenaje.** En muchos casos la subbase debe drenar el agua, que se introduzca a través de la carpeta o por las bermas, así como impedir la ascensión capilar.

La base granular

- **Resistencia.** La función fundamental de la base granular de un pavimento consiste en proporcionar un elemento resistente que transmita a la subbase y a la subrasante los esfuerzos producidos por el tránsito en una intensidad apropiada.
- **Función económica.** Respecto a la carpeta asfáltica, la base tiene una función económica análoga a la que tiene la subbase respecto a la base.

Carpeta

- **Superficie de rodamiento.** La carpeta debe proporcionar una superficie uniforme y estable al tránsito, de textura y color conveniente y resistir los efectos abrasivos del tránsito.
- **Impermeabilidad.** Hasta donde sea posible, debe impedir el paso del agua al interior del pavimento.
- **Resistencia.** Su resistencia a la tensión complementa la capacidad estructural del pavimento.

2.3. Mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas son utilizadas en la construcción de pavimentos ya sea en capas de rodadura o capas inferiores y su función es proporcionar una superficie cómoda, segura y económica en las vías para facilitar la circulación de vehículos sobre ésta. También se conoce como concreto asfáltico que es la combinación del agregado y cemento asfáltico mezclados mientras se mantiene una temperatura determinada, aproximadamente de 135°C a 185°C, que garantice la máxima adherencia de asfalto con las partículas de agregado. Las mezclas asfálticas en caliente son diseñadas actualmente por medio de

procedimientos empíricos de laboratorio, por lo que se requiere años de experiencia para correlacionar el comportamiento del pavimento con los trabajos de laboratorio.

2.3.1. Mezclas asfálticas en caliente (M.A.C.)

Las Mezclas Asfálticas en Caliente (MAC) o concreto asfáltico, es un material vial compuesto de ligante asfáltico y agregado mineral. El ligante puede ser de cemento asfáltico o cemento asfáltico modificado, el cual actúa como un ligante que aglutina las partículas en una masa cohesiva. Debido a que el cemento asfáltico es altamente impermeable al agua, este también impermeabiliza la mezcla.

Por otra parte, el agregado mineral actúa como en esqueleto pétreo que aporta resistencia y rigidez a la mezcla.

Dado que la MAC contiene ambos materiales, su comportamiento se ve afectado por las propiedades individuales de cada uno de ellos, así como por la interrelación de los demás componentes dentro del sistema.

2.3.2. 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.

2.3.3. Características y comportamiento de la mezcla asfáltica

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.

2.3.3.1. 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. 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 (1000kg/m³). La densidad obtenida en el laboratorio se convierte 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.

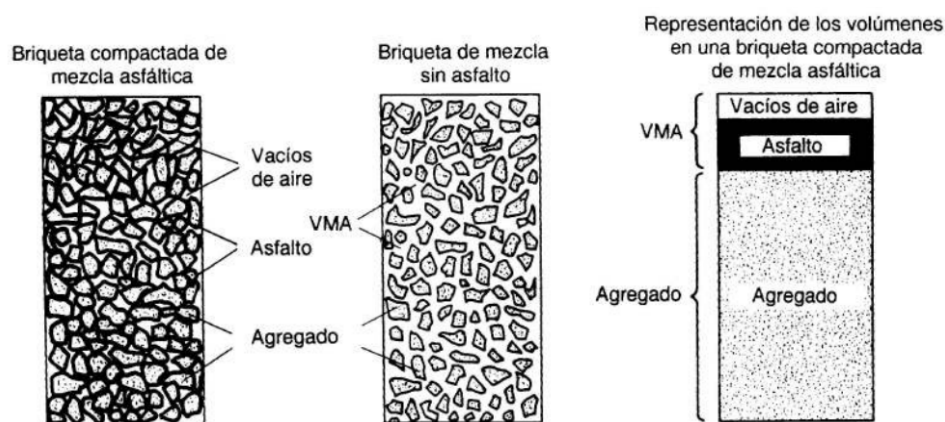
2.3.3.2. Vacíos de aire (o simplemente vacíos)

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 en 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 %.

2.3.3.3. Vacíos en el agregado mineral

Los vacíos en el agregado mineral (VAM) 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 VAM 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 VAM más espacio habrá disponible para las películas de asfalto. Existen valores mínimos para VAM los cuales están recomendados y especificados como función del tamaño del agregado (tabla N°2.1). Estos valores se basan en el hecho de que cuanto más gruesa sea la película del asfalto que cubre las partículas de agregado, más durable será la mezcla. Para que pueda lograrse un espesor durable de película de asfalto, se debe tener valores mínimos de VAM. Un aumento en la densidad de la graduación del agregado, hasta el punto donde se obtengan valores de VAM 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 VAM para economizar el contenido de asfalto.

Figura 2.5: Ilustración del V.A.M. en una probeta de mezcla compactada



Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Cap.3, pág. 59 del Asphalt Institute MS-22.

Tabla 2.1: Vacíos en el agregado mineral (requisitos de VAM)

Tamaño máximo en mm		VAM mínimo, por ciento		
%		Vacíos de diseño, por ciento ³		
mm	inc.	3.0	4.0	5.0
1.18	N° 16	21.5	22.5	23.5
2.36	N° 8	19.0	20.0	21.0
4.75	N° 4	16.0	17.0	18.0
9.5	3/8	14.0	15.0	16.0
12.5	1/2	13.0	14.0	15.0
19.0	3/4	12.0	13.0	14.0
25.0	1.0	11.0	12.0	13.0
37.5	1.5	10.0	11.0	12.0
50	2.0	9.5	10.5	11.5
63	2.5	9.0	10.0	11.0

¹ Especificaciones Normal para Tamices usados en pruebas ASTM E 11

² El tamaño máx. Nominal de partículas es un tamaño más grande que el primer tamiz que retiene más de 10 % del material.

³ Interpole el VAM min. 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. Cap.3, pág. 59 del Asphalt Institute MS-22.

2.3.3.4. Contenido de asfalto

La proporción de asfalto en una mezcla es importante, y debe ser determinada lo más exactamente posible en laboratorio y luego controlada en obra. El contenido óptimo de asfalto está determinado en gran medida por el agregado de la mezcla asociados a dos características fundamentales, granulometría y capacidad de absorción.

El contenido de asfalto dependerá de la granulometría del agregado, ya que a medida que la mezcla contenga mayor proporción de agregados finos, requerirá una cantidad de asfalto mayor que la que se necesitaría para agregados más gruesos. Esta situación está asociada al concepto de superficie específica de los agregados, esta superficie es mayor cuanto más fino es el agregado y por lo tanto para que la película de asfalto recubra toda la superficie de las partículas, es necesaria una dotación mayor del mismo.

Esto tiene mayor importancia, cuando la mezcla incorpora en su granulometría, material fino bajo tamiz N°200, al que llamaremos relleno mineral o filler. Las pequeñas

variaciones de este relleno mineral, tendrán efectos importantes en el contenido de asfalto y posteriormente en el comportamiento de la mezcla.

El aumento del contenido de filler, puede absorber parte del contenido de asfalto y dar como resultado, una mezcla inestable y seca. Por el contrario, la disminución del relleno mineral podría traducirse en una mezcla húmeda.

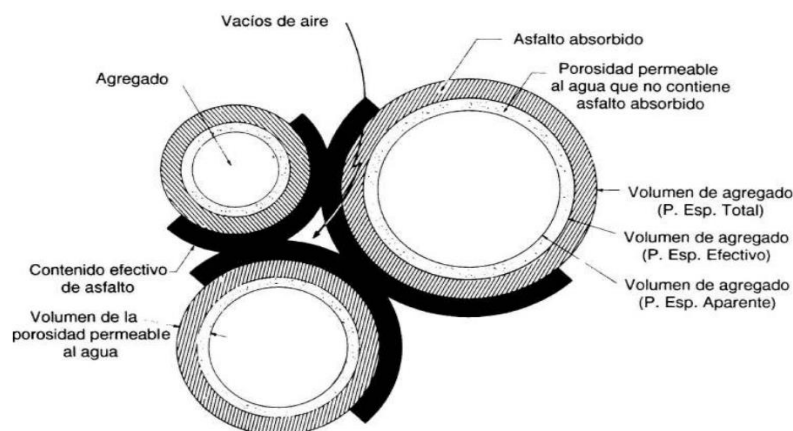
La capacidad de absorción del agregado, determina que un cierto volumen de asfalto sea absorbido por los poros del mismo, esto significa que se debe agregar a la mezcla asfalto suficiente para poder formar una adecuada película de ligante.

Se definen entonces los siguientes conceptos:

- asfalto absorbido (asfalto absorbido por el agregado).
- asfalto efectivo (asfalto de constituye la película ligante).
- asfalto total (la suma de los anteriores).

Por lo tanto, se deberá conocer el poder de absorción de los agregados, a los efectos de poder determinar las cantidades reales de asfalto necesarias. Se deberá hacer el ensayo de absorción, fundamentalmente cuando se trabaje con agregados provenientes de canteras o yacimientos no conocidos.

Figura 2.6: *Distintos pesos específicos de agregados*



Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Cap.3, pág. 59 del Asphalt Institute MS-22.

2.3.4. Propiedades consideradas en el diseño de mezclas asfálticas

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 que significa cada una de estas propiedades, cómo es evaluada, y que representa en términos de rendimiento del pavimento.

2.3.4.1. 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 suficiente altas para acomodar adecuadamente el tránsito esperado, pero no más altas de lo que exijan las condiciones de tránsito. 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 espere 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 el pavimento.

Tabla 2.2: *Causas y efectos de inestabilidad en el pavimento*

Causas	Efectos
Exceso de asfalto en la mezcla	Ondulaciones, ahuellamientos y 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: Serie de manuales N°22: Principios de Construcción de Pavimentos de Mezclas Asfálticas en Caliente. 1992.

2.3.4.2. 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 desagregado resistente a la separación, y diseñando y compactando la mezcla para obtenerla 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.

Una graduación densa de agregado firme, 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, cemento o arena de médano.

La intrusión del aire y agua en el pavimento puede minimizarse si se diseña y compacta la mezcla para darla al pavimento la máxima impermeabilidad posible. Existen muchas causas y efectos con una poca durabilidad del pavimento.

Tabla 2.3: *Causas y efectos de la poca durabilidad*

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

Fuente: Serie de manuales N°22: Principios de Construcción de Pavimentos de Mezclas Asfálticas en Caliente. 1992.

2.3.4.3. 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.

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.

Tabla 2.4: *Causas y efectos de la permeabilidad*

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

Fuente: Serie de manuales N°22: Principios de Construcción de Pavimentos de Mezclas Asfálticas en Caliente. 1992.

2.3.4.4. 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. La trabajabilidad es especialmente importante en sitios donde se requiere colocar y rastrillar 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, si tienen algún efecto sobre esta propiedad. Debido a que la temperatura de la mezcla afecta la viscosidad el 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 2.5: *Causas y efectos de problemas en la trabajabilidad*

Causas	Efectos
Tamaño máximo de partículas, grande	Superficie áspera, déficit 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 compactación y permanece tierna o blanda.

Bajo contenido de relleno mineral	Mezcla tierna, altamente permeable.
Alto contenido de relleno mineral	Mezcla muy viscosa, déficit de manejar poco durable.

Fuente: Serie de manuales N°22: Principios de Construcción de Pavimentos de Mezclas Asfálticas en Caliente. 1992.

2.3.4.5. 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). Una mezcla de granulometría abierta con alto contenido de asfalto es, generalmente, más flexible que una mezcla densamente graduada e 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.

2.3.4.6. 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.

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 2.6: *Causas y efectos de una mala resistencia a la fatiga*

Causas	Efectos
Bajo contenido de asfalto	Agrietamiento por fatiga
Vacos 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: Serie de manuales N°22: Principios de Construcción de Pavimentos de Mezclas Asfálticas en Caliente. 1992.

2.3.4.7. 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 esta 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 2.7: *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 hidropilado
Agregado pulido en la mezcla	Poca resistencia al deslizamiento

Fuente: Serie de manuales N°22: Principios de Construcción de Pavimentos de Mezclas Asfálticas en Caliente. 1992.

2.4. Componentes de las mezclas asfálticas

2.4.1. Cemento asfáltico

El cemento asfáltico es un material aglomerante sólido o semisólido de color negro o pardo oscuro, que se ablanda gradualmente al calentarse y cuyos constituyentes predominantes son hidrocarburos pesados, que se obtienen de la refinación del petróleo.

Esté ha sido utilizado con éxito en la pavimentación de vías debido principalmente a que es un material altamente cementante, termoplástico, repelente al agua y es resistente al ataque de la mayoría de los ácidos, álcalis y sales, que posee alta elasticidad a altas temperaturas, suficiente ductilidad a bajas temperaturas, baja susceptibilidad al cambio de temperatura, buena adhesión y cohesión y bajo contenido de parafina (alta resistencia al envejecimiento), por lo que:

- Proporciona una buena unión y cohesión entre agregados, incrementando por ello la resistencia con la adición de espesores relativamente pequeños
- Resiste la acción mecánica de disgregación producida por las cargas aplicadas, gracias a la flexibilidad dada a la estructura.
- Impermeabiliza la estructura del pavimento, haciéndolo poco sensible a la humedad y eficaz contra penetración del agua proveniente de las precipitaciones.

2.4.1.1. Características o propiedades del cemento asfáltico

Para los estudios técnicos y la construcción hay tres propiedades del asfalto:

- **Consistencia:** Para caracterizar a los asfaltos es necesario conocer su consistencia a distintas temperaturas, puesto que son materiales termoplásticos que se licúan gradualmente al calentarlos. Consistencia es el término usado para describir el grado de fluidez o plasticidad del asfalto a cualquier temperatura dada. Para poder comparar la consistencia de un cemento asfáltico con la de otro, es necesario fijar una temperatura de referencia.

Comúnmente, para especificar y medir la consistencia de un asfalto para pavimento, se usan ensayos de viscosidad o de penetración.

- **Pureza:** El cemento asfáltico se compone casi enteramente de betunes, los cuales, por definición, son solubles en bisulfuro de carbono. Los asaltos refinados son, generalmente, más del 99,5 % solubles en bisulfuro de carbono y, por lo tanto, casi betunes puros. Las impurezas son inertes o insolubles, si existieran. Normalmente el cemento asfáltico, cuando sale de la refinería, está libre de humedad, pero puede haberla en los tanques de transporte. Si hay agua inadvertida, ésta provoca espumas cuando se calienta por encima de los 100 °C (212 °F).
- **Seguridad:** La espuma puede constituir un riesgo para la seguridad, por lo tanto, las normas requieren que el asfalto no forme espuma hasta temperaturas de 175 °C (347 °F). El cemento asfáltico, si se les somete a temperaturas suficientemente elevadas, despiden vapores que arden en presencia de una chispa o llama. La temperatura a que esto ocurre, normalmente es más elevada que la de trabajo en obras de pavimentación.

2.4.1.2. Ensayos realizados al asfalto para determinar sus propiedades

2.4.1.2.1. Ductilidad (ASTM D 113, AASHTO T 51-00)

La ductilidad de un material bituminoso es la longitud, medida en cm., a la cual se alarga (elonga) antes de romperse cuando dos extremos de una briqueta, confeccionada con una muestra y de la forma descrita en 1 se traccionan a la velocidad y temperatura especificadas. A menos que otra condición se especifique, el ensaye se efectúa a una

temperatura de $25 \pm 0,5$ °C y a una velocidad de 5 cm/min \pm 5%. Para otras temperaturas deberá especificarse la velocidad.

2.4.1.2.2. Penetración (ASTM D 5, AASHTO T 49-97)

Este método describe un procedimiento para determinar la dureza, mediante penetración, de materiales bituminosos sólidos y semisólidos.

El ensayo de penetración se usa como una medida de consistencia; valores altos de penetración indican consistencias más blandas.

2.4.1.2.3. Punto de inflamación (ASTM D 1310-01, AASHTO T 79-96)

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

Emplee el método del Punto de Inflamación mediante la Copa Abierta Tag (Método A0401) si el Punto de Inflamación está por debajo de 79°C.

2.4.1.2.4. Película delgada (ASTM D 1754, AASHTO T 179-05)

Este método describe un ensayo para determinar el efecto del calor y aire sobre materiales asfálticos semisólidos. Los efectos de este tratamiento son determinados para la medida de las propiedades asfálticas antes y después del ensayo (AASHTO T179-94).

Este método indica la susceptibilidad aproximada de la dureza o pérdida de la ductilidad del cemento asfáltico, durante el mezclado en una mezcladora a una temperatura cercana a los 150°C. Si esta temperatura es apreciablemente menor que 150°C, el endurecimiento en el mezclador y el cambio en la ductilidad, deben ser menores que el cambio en el horno; si se usa una mayor temperatura de mezclado, cambios mayores pueden ocurrir en la dureza y ductilidad.

2.4.1.2.5. Peso específico (ASTM D 70, AASHTO T 43)

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 compactadas. 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.

2.4.1.2.6. Punto de ablandamiento (ASTM D 36, AASHTO T 53-96)

Este método describe un procedimiento para determinar el punto de ablandamiento de materiales asfálticos, cuyo valor se encuentra en el rango de 30 a 200°C, por medio del aparato de anillo y bola.

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 que estos asfaltos se hacen fluidos.

2.4.1.3. Especificaciones técnicas del cemento asfáltico clasificado por penetración.

El cemento asfáltico convencional también puede clasificarse por su penetración AASHTO M 20; a continuación, se presenta la tabla de clasificación por penetración del cemento asfáltico convencional (véase anexo B).

Tabla 2.8: Especificaciones chilenas según el grado de penetración norma NCH 2440

Ensayos	Norma	40/60		60/80		80/100		100/120		120/150		200/300	
	AASHTO	mín.	máx.	mín.	máx.	mín.	máx.	mín.	máx.	mín.	máx.	mín.	máx.
Penetración 25°C, 100g, 5s, (0,1 mm)	T - 49	40	60	60	80	80	100	100	120	120	150	200	300
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min, cm	T - 51	100		100		100		100		100			
Punto de inflamación, copa abierta Cleveland(°C)	T - 48	232		232		232		232		218		177	
Solubilidad en Tricloroetileno	T - 44												Min. 99 para todos los grados
Mancha Heptano-Xilol (1% xilol)	T - 102												Negativo para todos los grados para 20 % máximo de xilol
Índice de Penetración, IP													± 1 para todos los grados
Perdida por calentamiento, (%)	T - 179		0,8		0,8		1,0		1,1		1,3		1,5
Penetración del residuo (%del original)	T - 49	58		54		50		48		46		40	
Ductilidad del residuo a 25°C, cm/min, cm													Mínimo 100 para todos los grados
Índice de durabilidad, ID													Máximo 3,5 para todos los grados

Fuente: Enciclopedia de pavimentos aplicables en Bolivia, Mendieta, La Paz, Bolivia, 2011.

2.4.2. Agregados Pétreos

Son materiales granulares sólidos inertes que se emplean en los firmes de las carreteras con o sin adición de elementos activos y con granulometrías adecuadas; se utilizan para la fabricación de productos artificiales resistentes, mediante su mezcla con materiales aglomerantes de activación hidráulica (cementos, cales, etc.) o con ligantes asfálticos. (Smith M. R. and L. Collins, 1994).

2.4.2.1. Tipos de agregados pétreos

El tipo de agregado pétreo se puede determinar, de acuerdo a la procedencia y a la técnica empleada para su aprovechamiento, se pueden clasificar en los siguientes tipos:

a) Agregados naturales

Son aquellos que se utilizan solamente después de una modificación de su distribución de tamaño para adaptarse a las exigencias según su disposición final.

Los agregados naturales son aquellos que son usados en su forma natural, con muy poco o ningún procesamiento. Ellos están constituidos por partículas producidas mediante procesos naturales de erosión y degradación, tales como la acción del viento, el agua y los químicos. La forma de las partículas individuales es un producto de los agentes que actúan sobre ellas, por ejemplo. Los glaciares, el movimiento del hielo usualmente producen rocas y guijarros redondeados. Así mismos, las corrientes de agua producen partículas lisas y redondeadas. Los principales tipos de agregado natural usados en la construcción de pavimento son la grava y la arena. La grava se define usualmente, como partículas de un tamaño igual o mayor que 6.35 mm (1/4 pulgada). La arena se define como partículas de un tamaño menor que 6.35 mm (1/4 pulgada) pero mayor que 0.075 mm (N° 200). Las partículas de un tamaño menor que 0.075 mm (N° 200) son conocidas como relleno mineral (filler), el cual consiste principalmente de limo y arcilla.

b) Agregados de trituración

Son aquellos que se obtienen de la trituración de diferentes rocas de cantera o de las granulometrías de rechazo de los agregados naturales. Se incluyen todos los materiales de canteras cuyas propiedades físicas sean adecuadas.

Los agregados procesados son aquellos que han sido triturados y tamizados antes de ser usados. Existen dos fuentes principales de agregados procesados: gravas naturales que son trituradas para volverlas más apropiadas para pavimento de mezcla asfáltica, y fragmentos de lecho de roca y de piedras grandes que deben ser reducidos en tamaño antes de ser usados en la pavimentación. La roca es triturada por tres razones: para cambiar la textura superficial de las partículas de lisa a rugosa, para cambiar la forma de la partícula de redonda a angular, y para reducir y mejorar la distribución y el rango (graduación) de los tamaños de las partículas. El propósito principal de la trituración, en el caso de los fragmentos de lechos de roca y de piedras grandes, es reducir las piedras a un tamaño que

sea manejable. Sin embargo, los cambios en la textura superficial, y en la forma de las partículas, son también muy importantes.

c) Agregados artificiales

Son los subproductos de procesos industriales, como ciertas escorias o materiales procedentes de demoliciones, utilizables y reciclables.

d) Agregados marginales

Los agregados marginales engloban a todos los materiales que no cumplen alguna de las especificaciones vigentes.

2.4.2.2. Propiedades de los agregados utilizados en M. A. C.

En un pavimento densamente graduado de mezcla asfáltica en caliente, el agregado conforma el 90 a 95 por ciento, en peso, de la mezcla de pavimentación. Esto hace que la calidad del agregado usado sea un factor crítico en el comportamiento del pavimento. Sin embargo, además de la calidad, se aplican otros criterios que forman parte de la selección de un agregado en una obra de pavimentación.

Estos criterios incluyen el costo y la disponibilidad del agregado. Aún más, un agregado que cumple con los requisitos de costo y disponibilidad deberá poseer también ciertas propiedades para poder ser considerado apropiado para pavimento asfáltico de buena calidad. Estas propiedades son:

- Graduación y tamaño máximo de partícula.
- Limpieza.
- Dureza.
- Forma de la partícula.
- Textura de la superficie.
- Capacidad de absorción.
- Afinidad con el asfalto.

2.4.2.3. Ensayos realizados al agregado para determinar sus propiedades

2.4.2.3.1. Granulometría (ASTM C-136)

Este método establece el procedimiento para tamizar y determinar la granulometría de los áridos. Es aplicable a los áridos que se emplean en la elaboración de morteros, hormigones, tratamientos superficiales y mezclas asfálticas.

Tabla 2.9: *Serie de tamices escogidos y designados*

Tamaños nominales de abertura		
mm	ASTM	
75	(3")	
63	(2 ½")	
50	(2")	
37,5	(1 ½")	
25	(1")	
19	(¾")	Para agregados gruesos
12,5	(½")	
9,5	(⅜")	
6,3	(¼")	
4,75	(N° 4)	
<hr/>		
2,36	(N° 8)	
2,0	(N° 10)	
1,18	(N° 16)	
0,6	(N° 30)	Para agregados finos
0,3	(N° 50)	
0,15	(N° 100)	
0,075	(N° 200)	

Fuente: NB. Manual de ensayos de suelo y materiales, asfaltos. Manual de carreteras vol. IV

Tabla 2.10: *Tamaño de muestra del agregado fino.*

Tamiz	% Retenido	Masa mínima de la muestra (g)
4,75 mm	≤ 5 %	500
2,36 mm	≤ 5 %	100

Fuente: NB. Manual de ensayos de suelo y materiales, asfaltos. Manual de carreteras vol. IV.

Tabla 2.11: *Tamaño de muestra del agregado grueso*

Absoluto Tamaño máximo Da (mm)	Masa mínima de la muestra (kg)
75	32
63	25
50	20
37,5	16
25	10
19	8
12,5	5
9,5	4

Fuente: NB. Manual de ensayos de suelo y materiales, asfaltos. Manual de carreteras vol. IV.

2.4.2.3.2. Equivalente de arena (ASTM D-2419, AASHTO T-176)

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

2.4.2.3.3. Desgaste con la máquina de Los Ángeles (AASHTO T-96, ASTM C-131)

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

Tabla 2.12: *Masa de la carga abrasiva*

Granulometría	Numero de esferas	Mas de la carga abrasiva (g)
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25
C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15

Fuente: Manual de Ensayos para Laboratorio: Agregados (AG) para mezclas asfálticas.

Tabla 2.13: Grados de ensayo (definidos por sus rangos de tamaño, en mm)

Gradación		A	B	C	D
Diámetro		Cantidad de material a emplear (gr)			
Pasa	Retenido				
1 1/2"	1"	1250±25			
1"	3/4"	1250±25			
3/4"	1/2"	1250±10	2500±10		
1/2"	3/8"	1250±10	2500±10		
3/8"	1/4"			2500±10	
1/4"	Nº4			2500±10	
Nº4	Nº8				5000±10
Peso total		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
Numero de esferas		12	11	8	6
Nº de revoluciones		500	500	500	500

Fuente: NB. Manual de ensayos de suelo y materiales, asfaltos. Manual de carreteras vol. IV.

2.4.2.3.4. Peso específico de agregado grueso (AASHTO T-85, ASTM C-127)

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.

Tabla 2.14: Cantidad mínima de muestra según tamaño máximo nominal del árido

Tamaño máximo nominal (mm)	Cantidad mínima de muestra (g)
12,5	2.000
19	3.000
25	4.000
37,5	5.000
50	8.000

Fuente: NB. Manual de ensayos de suelo y materiales, asfaltos. Manual de carreteras vol. IV.

2.4.2.3.5. Peso específico de agregado fino (AASHTO T-84, ASTM C-128)

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.

2.4.2.3.6. Ensayo de peso unitario agregados (AASHTO T-19, 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.

2.4.2.4. Especificaciones para agregados en mezclas asfálticas en caliente (M.A.C.)

- **Especificaciones especiales:** Son el complemento y/o revisión de las especificaciones generales, que abarcan las condiciones peculiares de una obra individual.
- **Especificaciones técnicas:** Son aquellas que se utilizan para establecer los requisitos de calidad de los materiales pétreos que son utilizados para la elaboración del esqueleto de una carpeta asfáltica.

2.4.2.5. Requisitos que deben cumplir los agregados.

Agregados gruesos:

Es el retenido en la malla de 4.75 milímetros. Este material debe consistir en piedra o grava de buena calidad triturada y mezclada de manera que el producto obtenido corresponda a uno de los tipos de granulometría estipulados y llene los requisitos siguientes.

Tabla 2.15: Requisitos del agregado grueso

Requisitos	
Abrasión de los Ángeles, AASHTO T 96	40 % máx.
Disgregabilidad en sulfato de sodio, AASTHO T 104	12 % máx.
Caras fracturadas, AASTHO T 507	75 % máx.
Índice de durabilidad (agregado grueso) AASTHO T 210	35 % máx.

Fuente: Norma AASHTO M 29.

Tabla 2.16: Rangos requeridos, granulometría de agregados para M.A.C.

Malla mm	Porcentaje por peso que pasa la malla estándar (AASHTO T 27 Y AASHTO T 11)					
	Designación de la Granulometría					
	A	B	C	D	E	F
37.5	100	-	-	-	-	-
25	97 - 100	100	100	-	-	-
19	-	97-100	97-100	100	100	-
12.5	-	76-88(±5)	*(±5)	97-100	97-100	-
9.5	53-70 (±6)	-	*(±6)	-	*(±5)	100
4.75	40-52 (±6)	49-59(±7)	*(±7)	57-69(±6)	*(±6)	33-47(±6)
2.36	25-39 (±4)	36-45(±5)	*(±5)	41-49(±6)	*(±6)	7-13(±4)
600 µm	12-22 (±4)	20-28(±4)	*(±4)	22-30(±4)	*(±4)	-
300 µm	8-16 (±3)	13-21(±3)	*(±3)	13-21(±3)	*(±3)	-
75 µm	3-8 (±2)	3-7(±2)	3-8(±2)	3-8(±2)	3-8(±2)	2-4(±2)

Notas: * El Contratante especifica el valor del rango y límites.

() Desviación permisible

(±) del rango de valores.

Fuente: Manual Centroamericano de Especificaciones para la Construcción de Carreteras y Puentes Regionales, Edición 2004, tabla 703-8.

Agregados finos:

Este material está formado por arenas naturales, arena de piedra chancada, o su combinación y deberá tener una granulometría que (material que pasa la malla 4,75 mm), al combinarse con otras fracciones en la proporción adecuada, la mezcla resultante puede

satisfacer la granulometría requerida según AASHTO M 29 incluyendo la pérdida de sulfato, y que tiene además los requisitos siguientes.

Tabla 2.17: *Especificaciones que deben cumplir el agregado fino*

Parámetro	Norma	Especificaciones
Índice de durabilidad (fino)	AASHTO T 210	35 % min.
Equivalente de arena	AASHTO T 176	45 % min.
Durabilidad, sulfato de sodio	AASHTO T 104	15 % min.

Fuente: Norma AASHTO M 29.

La graduación del agregado fino será conforme a la siguiente graduación.

Tabla 2.18: *Graduación del agregado fino*

Tamaño de tamiz	Cantidad más fina que cada tamiz (Abertura cuadrada), masa %					
	Graduación N° 1	Graduación N° 2	Graduación N° 3	Graduación N° 4	Graduación N° 5	
3/8"	9,500	100	....	....	100	100
N° 4	4,750	95 a 100	100	100	80 a 100	80 a 100
N° 8	2,360	70 a 100	75 a 100	95 a 100	65 a 100	65 a 100
N° 16	1,180	40 a 80	50 a 74	85 a 100	40 a 80	40 a 80
N° 30	0,600	20 a 65	28 a 52	65 a 90	20 a 65	20 a 65
N° 50	0,300	7 a 40	8 a 30	30 a 60	7 a 40	7 a 46
N° 100	0,150	2 a 20	0 a 12	5 a 25	2 a 20	2 a 30
N° 200	0,075	0 a 10	0 a 5	0 a 5	0 a 10	....

Fuente: Norma AASHTO M 29.

2.5. Filler (llenante mineral)

Las llenantes minerales o filler son material incorporado al ligante asfáltico con el fin de modificar sus propiedades mecánicas, consistencia y complementar la fracción

granulométrica en la mezcla asfáltica producida en caliente, para generar una mezcla bien gradada y un mejor comportamiento de esta.

Usualmente son sustancias minerales como la cal, cemento, polvo de tiza, cenizas de combustible pulverizada, talco, sílice, etc. El efecto general de la adición de filler es endurecer el asfalto. En términos prácticos significa que existirá una reducción en su deformación o fluencia producida por una carga, un incremento en su punto de ablandamiento, una reducción de su penetración y un incremento en su rigidez.

2.5.1. Influencia del filler como componente de las mezclas asfálticas

Las principales propiedades de las mezclas asfálticas que determinan su calidad se resumen en tres que son: Resistencia ante la deformación, flexibilidad y durabilidad.

- **Mejorar el cerrado de las mezclas 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 se obtendrían mezclas pobres de 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 de filler-asfalto es un sistema de alta viscosidad el cual participa de manera importante en la resistencia ante la deformación.
- **Incrementar la durabilidad de 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 el agua, aire, además de que es el principal aglomerante dentro de la mezcla asfáltica y mantiene unidos a los agregados.

2.5.2. Características del Filler

- **Finura**

Al ocupar parcialmente los espacios libres dejados por la estructura granular compactada y conformada por las partículas mayores, reduce el volumen de vacíos

de la mezcla evitando un aumento pronunciado de la cantidad de ligante asfáltico. El polvo mineral consigue cumplir con su función rellena, dependiendo del volumen de vacíos existente una vez que se haya compactado la estructura granular y en función de la granulometría y de las partículas de mayor tamaño.

La densidad aparente del polvo mineral es una medida relativa del grado de finura del polvo, cualidad muy importante para las características finales de las mezclas.

- **Modificación del comportamiento reológico**

El empleo del polvo mineral, incrementa la magnitud de la resistencia a la deformación de la mezcla, sin modificar la naturaleza viscosa del ligante, originando como consecuencia un aumento de la resistencia al corte de las mezclas asfálticas.

- **Acción estabilizante frente al agua**

Se incrementa la durabilidad de las mezclas asfálticas frente a la acción del agua debido a que se reduce parcialmente la porosidad de la estructura granular, evitando el acceso del agua al interior, por otro lado, debido a que algunos polvos minerales presentan una mayor afinidad con el ligante asfáltico, mejoran la resistencia a la acción de desplazamiento que ejerce el agua sobre el ligante asfáltico.

Las características de finura y comportamiento se hayan vinculadas el tamaño y forma de las partículas de la composición química de los rellenos minerales. Las funciones del polvo mineral no pueden apartarse del contenido y consistencia del ligante asfáltico en la mezcla.

- **Procedencia del polvo mineral**

El polvo mineral podrá proceder de los agregados, separándose de ellos por medio de los ciclones de la central de fabricación, o aportarse a la mezcla por separado como un producto comercial o especialmente preparado.

Las proporciones del polvo mineral de aportación a emplear en la mezcla deben cumplir lo que fijen las normas, debido a que es un material que se debe de utilizar en proporciones adecuadas en cada tipo de mezcla y condiciones, para obtener un resultado óptimo.

2.5.3. Ensayos del filler (cemento portland)

2.5.3.1. Granulometría del filler ASTM D 242

El método tiene por objeto el análisis, por medio de tamices, del filler empleado en materiales componentes de mezclas para pavimentos bituminosos.

El filler mineral debe ser de una marca reconocida de cemento portland o cal hidratada que se encuentre libre de terrones. El tipo y cantidad de mineral de relleno necesario será determinado por el diseño de mezcla en laboratorio y podrá ser considerado como parte de la graduación del agregado. Los rangos de uso típico son de 0 - 3%

Tabla 2.19: *Granulometría del filler de acuerdo la norma ASTM*

Tamaño del tamiz	Porcentaje pasante (%)
N° 30 (600 µm)	100
N° 50 (300 µm)	95 – 100
N° 200 (75 µm)	70 – 100

Fuente: ASTM D 242 (Standard specification for mineral filler for bituminous paving mixtures).

2.5.3.2. Finura del cemento ASTM C 204

La fineza del cemento influye en el calor de hidratación liberado y en la velocidad de hidratación. A mayor finura del cemento, mayor rapidez de hidratación de cemento y por lo tanto mayor desarrollo de resistencia. La finura del cemento se determina los siguientes ensayos:

- Ensayo Blaine de permeabilidad al aire. (ASTM C – 204)
- Ensayo tamiz N° 325 (ASTM C – 204)

Este último es el que más se asemeja a nuestro ensayo, ya que en las normas bolivianas no está establecido este ensayo.

La relación que se utiliza para determinar el porcentaje de finura es la siguiente:

Si el % F es menor al 5 %, significa que es un cemento portland de endurecimiento rápido.

Si el % F es menor que el 10 % es que es un cemento portland para uso ordinario.

2.5.3.3. Peso específico del cemento hidráulico ASTM C 188

Este método tiene por objeto establecer el método de ensayo para determinar el peso específico del cemento hidráulico. Su principal utilidad está relacionada con el diseño y control de las mezclas de hormigón.

2.5.4. Especificaciones químicas y físicas del filler (cemento portland)

Tabla 2.20: Especificaciones químicas y físicas del cemento

Fecha:	Agosto de 2019		Cemento portland El Puente	Norma Boliviana IP-30	
Especificaciones químicas		PPF	%	3.83	< 7
		SiO ₂	%	29.60	
		Al ₂ O ₃	%	5.78	
		Fe ₂ O ₃	%	2.96	
		CaO	%	51.79	
		MgO	%	3.12	< 6.0
		SO ₃	%	1.79	< 4.0
		R.I.	%	16.28	
	Cal libre	%	1.23		
Especificaciones físicas		Blaine	cm ² /g	4642	> 2600
	Tiempo de fraguado	inicial	Min.	159	> 45
		final	Hrs.	05:33	<07:00
	Expansión le chatelier		mm.	0,21	< 8
	Relación a/c		ml/g.	0,5209	
	Fluidez		%	109,77	
	Residuo en mallas	200 M	%Ret.	0,38	
		325 M	%Ret.	4,68	
	Peso específico		g/ml	3020	
	Resistencia a compresión	3 días	Mpa	23,68	> 10
7 días		Mpa	Pendiente	> 17	
28 días		Mpa	Pendiente	> 30	

Fuente: Área técnica del laboratorio de SOBOCE-ELPUENTE.

2.5.5. Cemento portland (filler o llenante mineral)

El cemento es un polvo finísimo, de color gris a gris verdoso, compuesto por materiales artificiales (silicatos y aluminatos de calcio), los cementos hidráulicos adquieren sus propiedades aglomerantes de la formación de nuevos compuestos químicos durante su fabricación. Este término hidráulico significa que puede endurecer y ganar resistencia en presencia de agua. Su estudio y conocimiento de los factores que en este influyen es de vital importancia para entender el comportamiento de los hormigones.

Figura 2.7: Planta de cemento El Puente-Tarija



Fuente: soboce.com/cemento.

La Planta de Cemento El Puente, está situada a 110 km. de la ciudad de Tarija, en la localidad de El Puente y comercializa su producto en los mercados del sur del país, específicamente los departamentos de Tarija, Potosí y Sucre.

Tabla 2.21: *Requerimiento para el filler mineral (cemento portland)*

Tamaño del tamiz	Porcentaje pasante (%)
N° 30 (600 μm)	100
N° 50 (300 μm)	95
N° 200 (75 μm)	65

Fuente: Manual de la ABC.

2.5.5.1. Materias primas

El cemento portland está formado básicamente por la molienda conjunta del producto de cocción de una mezcla de caliza y arcilla que recibe el nombre de Clinker, además de un regulador de fraguado y en algunas ocasiones de una adición.

El Clinker como componente básico del cemento está compuesto por silicatos, aluminato y ferrito aluminato de cal, por esta razón la materia prima ha de tener óxidos de sílice, aluminio, hierro y cal en proporciones adecuadas. Además de estos óxidos existen en las materias primas otros que no son tan deseables pero que se encuentran en proporciones menores que son los óxidos de magnesio, sodio, potasio, anhídrido sulfúrico y otros elementos

2.5.5.2. Tipos de cemento (según NB-011)

Los tipos de cemento están fabricados básicamente de Clinker portland, yeso y adiciones que pueden ser puzolanas naturales, cenizas volantes, humo de sílice, escorias siderúrgicas o por filler calizo. En adelante estudiaremos primero los cementos que se comercializan en Bolivia y que se clasifican en la norma boliviana NB-011. Para luego estudiar los demás cementos comercializados en el mundo.

2.5.5.2.1. Cementos portland, Tipo I

Son los cementos fabricados con Clinker portland en proporción no menor al 95% y el regulador de fraguado (normalmente yeso), en este tipo de cementos no se admiten ningún tipo de componentes adicionales por más de un 5%.

2.5.5.2.2. Cementos portland con puzolana, Tipo IP

Son los cementos que resultan de la molturación conjunta de Clinker portland en proporción no menor al 70% ni mayor al 94%, puzolana natural en proporción entre 6% y 30%, y el regulador de fraguado, no se admiten componentes adicionales por más de un 5%.

2.5.5.2.3. Cementos portland con filler calizo, Tipo IF

Estos cementos están constituidos por Clinker portland en proporción no menor al 80% ni mayor al 94%, filler calizo en proporciones entre 6% y 15%, y el regulador de fraguado. No se admiten componentes adicionales por más de un 5%.

2.5.5.2.4. Cementos puzolánicos, Tipo P

Son los cementos constituidos por Clinker portland en proporción no menor al 60%, material puzolánico (puzolanas naturales, cenizas volantes u otros) en proporción no mayor al 40%, y el regulador de fraguado. No se admiten componentes adicionales por más de un 5%.

Tabla 2.22: Clasificación y composición de los cementos

Tipos de cemento		Proporción en masa %				
		Tipo	Componentes principales			Componentes adicionales
Denominación	Designación		Clinker	Puzolana natural	Filler calizo	
	Cemento portland	I	95 a 100	.....	.....	0 a 5
Cemento Portland	Cemento portland con filler calizo	IP	70 a 94	6 a 30	.....	0 a 5
	Cemento portland con puzolana	IF	80 a 94	.....	6 a 15	0 a 5
	Cemento puzolánico	P	≥ 60	.....	.....	0 a 5

Fuente: Norma Boliviana del Cemento NB-011.

2.6. Diseño de mezclas asfálticas

El diseño de mezclas asfálticas, así como el diseño de otros materiales de ingeniería, consiste principalmente en seleccionar y proporcionar los componentes, para obtener las propiedades deseadas o especificadas en la construcción. El objetivo general para el diseño de mezclas asfálticas, es el determinar cada componente de la mezcla asfáltica, y el asfalto que resulte en una mezcla económica que tenga:

- Suficiente asfalto para asegurar durabilidad.
- Suficiente estabilidad para satisfacer las demandas de tráfico sin distorsión o desplazamientos.

- Suficiente manejabilidad para permitir la colocación de la mezcla sin segregación.
- Los materiales propuestos a usarse satisfagan los requisitos de las especificaciones del proyecto.
- Las combinaciones de agregados satisfagan la granulometría requerida en las especificaciones.
- Los pesos específicos de todos los agregados usados y el peso específico del asfalto sean determinados para poderse usar en los análisis de densidad y vacíos.

Estos requerimientos son materia de pruebas de rutina, especificaciones y técnicas de laboratorio que deben ser considerados, pero que no son técnicas para cualquier método de diseño en particular. Por lo que existen varios Métodos de Diseño de Mezclas, en nuestro caso solo hablaremos del método MARSHALL por su accesibilidad a los equipos y por ser el más usado en el país.

2.7. Método de diseño Marshall

2.7.1. Metodología

El concepto de metodología 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, mejoro y adiciono ciertos aspectos al procedimiento de prueba Marshall y desarrollo un criterio de diseño de mezclas.

El método original de Marshall, solo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación que contengan agregados con un tamaño máximo de 25mm (1”) o menor. El método modificado se desarrolló para tamaños máximo arriba de 38mm (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 64mm (2 ½”) y 103mm (4”) de diámetro. Se preparan mediante un procedimiento específico para calentar, mezclar 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 desarrollara a 60°C cuando es ensayado. El valor de flujo es el movimiento total o deformación, en unidades de 0.25mm (1/100") que ocurre en el espécimen entre estar sin carga y el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad.

2.7.2. Granulometría

La metodología Marshall utiliza una gráfica semi logarítmica para definir la granulometría permitida, en la cual en la ordenada se encuentran el porcentaje de material que pasa cierta malla, y en la abscisa las aberturas de las mallas en mm, graficadas en forma logarítmica.

La selección de una curva granulométrica para el diseño de una mezcla asfáltica cerrada o densa, está en función de dos parámetros: el tamaño máximo nominal del agregado y el de las líneas de control (superior e inferior), las líneas de control son puntos de paso obligatorio para la curva granulométrica. La tabla 2.25 presenta los tamaños máximos nominales más utilizados, así como líneas de control de acuerdo con la ASTM D3515.

Tabla 2.23: Graduaciones, propuestas para mezclas cerradas (ASTM D 3515)

Mezclas cerradas											
Tamaño máximo nominal del agregado											
Abertura de malla	2 in (50 mm)	1 1/2 in (37,5 mm)	1 in (25,0 mm)	3/4 in (19,0 mm)	1/2 in (12,5 mm)	3/8 in (9,5 mm)	Nº4 (4,75 mm)	Nº8 (2,36 mm)	Nº16 (1,18 mm)		
Graduaciones para mezclas de agregados (grueso, fino y filler)											
63 mm	100	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
50 mm	90 - 100	100	...	...	...	...	...	...	...	...	...
37,5 mm	...	90 - 100	100	...	...	...	...	...	...	...	...
25,0 mm	60 - 80	...	90 - 100	100	...	...	...	...	...	...	...
19,0 mm	...	56 - 80	...	90 - 100	100	...	...	...	...	...	...
12,5 mm	35 - 65	...	56 - 80	...	90 - 100	100	...	...	...	...	...
9,5 mm	...	...	...	56 - 80	...	90 - 100	100	...	...	...	...
4,75 mm	17 - 47	23 - 53	29 - 59	35 - 65	44 - 74	55 - 85	80 - 100	...	...	...	100
2,36 mm	10 - 36	15 - 41	19 - 45	23 - 49	28 - 58	32 - 67	65 - 100	...	...	...	95 - 100
1,18 mm	...	...	...	...	...	...	40 - 80	...	...	...	85 - 100
600 µm	...	...	...	...	...	...	35 - 65	...	...	...	70 - 95
300 µm	3 - 15	4 - 16	5 - 17	5 - 19	5 - 21	7 - 23	7 - 40	...	...	...	45 - 75
150 µm	...	...	...	...	...	...	3 - 20	...	...	...	20 - 40
75 µm	0 - 5	0 - 6	1 - 7	2 - 8	2 - 10	2 - 10	2 - 10	...	...	...	9 - 20
Asfalto, Porcentaje con respecto al paso total de la mezcla											
	2 - 7	3 - 8	3 - 9	4 - 10	4 - 11	5 - 12	6 - 12	7 - 12	8 - 12		

Fuente: The Asphalt Institut.

2.7.3. Especificaciones de la metodología

La selección del contenido óptimo de asfalto depende de muchos criterios que se discutan en este capítulo. Un punto inicial para el diseño es escoger el porcentaje de asfalto para el promedio de los límites de vacíos de aire, el cual es 4%. 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 necesitara hacer ajustes o rediseñar la mezcla

Tabla 2.24: *Criterios de diseño de mezclas Marshall*

Método Marshall	Trafico ligero Carpeta y base		Trafico ligero Carpeta y base		Trafico ligero Carpeta y base	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Compactación, numero de golpes en cada uno de los especímenes.	35		50		75	
Estabilidad (N)	3336		5338		8006	
(lb)	750	...	1200	...	1800	...
Flujo, (0,25 mm) (0,01 in)	8	18	8	16	8	14
Porcentaje de vacíos	3	5	3	5	3	5
Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto	70	80	65	78	65	75

Fuente: Serie de manuales N°22 del instituto de asfalto (MS-22).

Tabla 2.25: *Mínimo porcentaje de vacíos de agregado mineral (VAM)*

Máximo tamaño de partícula nominal		Porcentaje mínimo VAM		
		Porcentaje diseño vacíos de aire		
mm	in	3.0	4.0	5.0
1.18	N° 16	21.5	22.5	23.5
2.36	N° 8	19.0	20.0	21.0
4.75	N° 6	16.0	17.0	18.0
9.5	3/8	14.0	15.0	16.0
12.5	1/2	13.0	14.0	15.0
19	3/4	12.0	13.0	14.0
25	1.0	11.0	12.0	13.0
37.5	1.5	10.0	11.0	12.0

Fuente: Serie de manuales N°22 del instituto de asfalto (MS-22).

2.7.4. Evaluación y ajustes de una mezcla de diseño

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

Cuando las mezclas de pruebas iniciales fallan con los criterios de diseño en cualquier contenido de asfalto seleccionado, será necesario modificar, en algunos casos, rediseñar una mezcla es a cambiar la graduación de los agregados ajustando los porcentajes utilizados. Frecuentemente este ajuste es suficiente para cumplir con las especificaciones. Si el ajuste de los porcentajes no es suficiente, se deberán realizar serias consideraciones.

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

2.7.4.1. Vacíos bajos y estabilidad baja

Los vacíos pueden incrementarse en diferentes formas. Como un acercamiento general para lograr vacíos altos en el agregado mineral (en consecuencia, proveer de suficientes espacios, para una adecuada cantidad de asfalto y vacíos de aire), la graduación del agregado debe ajustarse mediante la adición de más agregado grueso o fino. Si el contenido de asfalto es más alto de lo normal y el exceso no es necesario para remplazar al absorbido por el agregado, entonces el contenido de asfalto deberá reducirse a fin de incrementar el porcentaje de vacíos, proveyendo un adecuado VMA. Se deberá recordar que disminuir el porcentaje de asfalto podrá tener a bajar la durabilidad del pavimento. Demasiada reducción en el contenido de asfalto puede ocasionar fracturación, oxidación acelerada e incremento de la permeabilidad. Si los ajustes anteriores no producen una mezcla estable, el agregado tendrá que cambiarse. Es también posible mejorar la estabilidad e incrementar el contenido de vacíos en el agregado de la mezcla, mediante el incremento del agregado grueso o reducción de la

cantidad de material que pasa la malla N°200 con la incorporación la estabilidad de la mezcla.

2.7.4.2. Vacíos bajos y estabilidad satisfactoria

Bajos contenidos de vacíos pueden eventualmente resultar en inestabilidad debido a flujo plástico o después de que el pavimento ha sido expuesto al tránsito por un periodo de tiempo ante la reorientación de las partículas y compactación adicional.

Por otra parte, insuficientes vacíos pueden ser producto de la cantidad requerida de asfalto para obtener una durabilidad alta en mezclas finas; sin embargo, la estabilidad es inicialmente satisfactoria por el tránsito específico. Una degradación de agregado pobre durante la producción de la mezcla y/o bajo la acción de tránsito puede ocasionar subsecuentemente inestabilidad y flujo si el contenido de vacíos de la mezcla no es suficiente. Por estas razones, mezclas con vacíos bajos tendrán que ajustarse por uno de los métodos dados, en el inciso anterior sin importar que la estabilidad inicial sea satisfactoria.

2.7.4.3. Vacíos satisfactorios y estabilidad baja

La baja estabilidad cuando los vacíos y la graduación del agregado son satisfactorios, puede indicar algunas deficiencias en el agregado. Se deberán tomar consideraciones para mejorar la forma de la partícula de los agregados utilizando material producto de trituración o incrementando el porcentaje de agregado grueso en la mezcla o posiblemente aumentando el tamaño máximo del agregado. Partículas de agregado contextura rugosa y superficies menos redondeadas presentan más estabilidad cuando se mantiene o incrementa el volumen de vacíos.

2.7.4.4. Vacíos altos y estabilidad satisfactoria

Altos contenidos de vacíos se asocian frecuentemente con mezclas con alta permeabilidad; al permitir la circulación de aire y agua a través del pavimento pueden ocasionar endurecimiento prematuro del asfalto, desprendimiento del agregado, o posible desprendimiento del asfalto en el agregado. Aun cuando la estabilidad es satisfactoria, se deben realizar ajustes para reducir los vacíos. Pequeñas reducciones se lograrán mediante la adición del polvo mineral a la mezcla. Podría ser necesario seleccionar o combinar agregados para lograr una graduación, la cual deberá estar cerca de la curva de máxima densidad

2.7.4.5. Vacíos altos y estabilidad baja

Se deberán en cuenta dos pasos para este tipo de condiciones; el primero es ajustar el volumen de vacíos mediante los métodos discutidos en los puntos anteriores; y en el segundo, si los ajustes no mejoran la estabilidad, deberá hacer una consideración de la calidad de los materiales.

2.7.5. Pruebas a las mezclas asfálticas compactadas

En el método Marshall se llevan a cabo tres tipos de pruebas para conocer tanto sus características volumétricas como mecánicas.

2.7.5.1. Determinación de la gravedad específica

La prueba de gravedad específica puede desarrollarse tan pronto como el espécimen se haya enfriado en un cuarto de temperatura. Esta prueba se desarrolla de acuerdo con la norma ASTM D1188, gravedad específica de mezclas asfálticas compactadas utilizando superficies saturadas de especímenes secos.

Para determinar cuál norma se debe utilizar, se realizarán pruebas de absorción a la mezcla asfáltica compactada; si la absorción es mayor al 2%, se utiliza la norma ASTM D1188, en caso contrario, se recurre a la norma ASTM D2726

2.7.5.2. Prueba de estabilidad y flujo

Después de que la gravedad específica se ha determinado, se desarrolla la prueba de estabilidad y flujo, consiste en sumergir el espécimen en un baño María a $60^{\circ}+1^{\circ}\text{C}$ ($140^{\circ}\text{F}+ 1.8^{\circ}\text{F}$) de 30 a 40 minutos antes de la prueba.

Con el equipo de prueba listo, se removerá el espécimen a una deformación constante de 51 mm (5") por minuto, hasta que ocurra la falla. El punto de falla está definido por la lectura de carga máxima obtenida. El número total de Newtons (lb) requeridos para que se produzca la falla del espécimen deberá registrarse con el valor de estabilidad Marshall.

Mientras que la prueba de estabilidad está en proceso, si no se utiliza un equipo de registro automático se deberá mantener el medidor del flujo sobre la barra guía y cuando la carga empiece a disminuir habrá que tomar la lectura y registrarla como el valor de flujo final. La diferencia entre el valor de flujo final e inicial expresado en unidades de 0.25mm (1/100") será el valor del flujo Marshall

2.7.5.3. Análisis de densidad y vacíos

Después de completar las pruebas de estabilidad y flujo, se realiza el análisis de densidad vacío para cada serie de especímenes de prueba.

Resulta conveniente determinar la gravedad específica teórica máxima (ASTM D2041) para al menos dos contenidos de asfalto, preferentemente aquellos que estén cerca del contenido óptimo asfalto. Un valor promedio de la gravedad específica del total del agregado se calcula de estos valores.

Utilizando la gravedad específica y la gravedad específica efectiva del total del agregado; el promedio de las gravedades específicas de las mezclas compactadas; la gravedad específica del asfalto y la gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica, se calcula el porcentaje de asfalto absorbido en peso del agregado seco, porcentaje de vacíos (V_a); porcentaje de vacíos llenados con asfalto (VFA) y el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA)

2.8. Marco normativo

Dentro de las normas aplicadas en la siguiente investigación, se utilizaron, principalmente, las normas ASTM (American Society for Testing and Materials), por ser una de las más completas en establecer las especificaciones técnicas para la fabricación de mezclas asfálticas en caliente y ser la de mayor aceptación, Además, también se toman en cuenta la Norma Boliviana del Cemento NB – 011, NB. Manual de ensayos de suelo y materiales, asfaltos. Manual de carreteras vol. IV.

a) Cemento asfáltico

Tabla 2.26: Normas aplicadas para el cemento asfáltico

Cemento asfáltico PROBISA 85-100		
Ensayos	Norma ASTM	Norma AASHTO
Penetración	D-5	T 49-97
Punto de inflamación	D-1310-01	T 79-96
Ductilidad	D-113	T 51-00
Película Delgada	D-1754	T 179-05
Peso específico	D-70	T-43
Punto de ablandamiento	D-36	T 53-96

Fuente: Elaboración propia.

b) Agregado pétreos

Tabla 2.27: Normas aplicadas para los agregados

Agregados grueso y fino		
Ensayos	Norma ASTM	Norma AASHTO
Granulometría	C-136	T-27
Desgaste mediante la máquina de los Ángeles	C-131	T-96
Peso específico y absorción de agua en agregados gruesos	C-127	T-85
Peso específico y absorción de agua en agregados finos	C-128	T-84
Peso unitario	C-29	T-19
Equivalente de arena	D-2419	T-176

Fuente: Elaboración propia.

c) Filler o llenante mineral (cemento portland)

Tabla 2.28: Normas Aplicadas para filler

Ensayos	Norma ASTM
Finura del cemento	C-204
Peso específico del cemento	C-188

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO III

SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN PARA DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

CAPÍTULO III

SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN PARA DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

3.1. Introducción

Para la realización del siguiente trabajo de investigación de análisis del mejor comportamiento de una mezcla asfáltica y agregando el cemento portland como filler, con una diversa composición de agregado pétreo, se establece conocer los criterios de selección de material de sus componentes, para lo cual se realizará los diversos ensayos a realizar bajo las normas establecidas propias fisicos-mecanicas que presenten térmicamente con un cambio en la composición del filler, a base de los agregados y del cemento asfaltico presentes en la investigación.

3.2. Selección de los materiales

3.2.1. Selección de agregados grueso y fino

La ciudad de Tarija cuenta con diversos bancos de materiales para la realización de mezcla asfáltica, pero el criterio asumido para escoger el banco de materiales es la accesibilidad con la que se cuenta para obtener los materiales. Los agregados pétreos que se van a utilizar en la presente investigación son piedra chancada, no chancada y gravilla arenosa, las cuales fueron proporcionados por la Posta Municipal de Tarija la misma que se encuentra ubicada en el barrio Guadalquivir la cual tiene su depósito en la zona de la Pintada y la Seleccionadora de Áridos “San Blas” ubicada a orillas del rio Guadalquivir en la zona de San Blas del cual se obtuvo el material pétreo natural.

El agregado fino o arena también es proporcionada por la Posta Municipal de Tarija ya que esta arena es seleccionada para la elaboración de mezclas asfáltica, por lo que se optó utilizar esta arena para las diversas dosificaciones en las mezclas asfálticas.

Figura 3.1: *Ubicación seleccionadora de áridos San Blas (agregado no chancado)*



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.1: *Coordenadas de la ubicación de la sel. de áridos San Blas*

Coordenadas	
Geográficas	Latitud: 21°33'35" S
	Longitud: 64°43'00" W

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.2: *Ubicación de posta municipal de Tarija (agregado chancado).*



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.2: *Coordenadas de la ubicación de la posta mpal. de Tarija*

Coordenadas	
Geográficas	Latitud: 21°31'32" S
	Longitud: 64°44'25" W

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2. Selección del cemento asfáltico

El cemento asfáltico que se usó para la investigación fue el C.A. PROBISA 85-100 de procedencia chilena, proporcionada por la Posta Municipal de Tarija la cual tiene su depósito dentro de la ciudad en el barrio Guadalquivir y en zona de La Pintada, la cual se encuentra bajo toda norma establecida para su uso.

Figura 3.3: *Planta de obtención del C.A. PROBISA 85-100 Chile*

Fuente: Elaboración propia.

3.2.3. Selección de la llenante mineral o filler (cemento portland)

La llenante mineral o Filler utilizado para la dosificación en la mezcla asfáltica es el cemento portland IP-30 “El Puente”. La Planta de Cemento El Puente, está situada a 110 km. de la ciudad de Tarija, en la localidad de El Puente y comercializa su producto en los mercados del sur del país, específicamente los departamentos de Tarija, Potosí y Sucre.

Figura 3.4: *Fábrica de cemento portland “El Puente”*



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.3: *Coordenadas de la ubicación de cemento “El Puente”*

Coordenadas	
Geográficas	Latitud: 21°14'50'' S
	Longitud: 65°12'26'' W

Fuente: Elaboración propia.

3.3. Caracterización de los materiales

3.3.1. Caracterización de los agregados pétreos gruesos y finos.

Ensayos realizados al agregado gruesos y finos para determinar sus propiedades

3.3.1.1. Granulometría ASTM C-136, AASHTO T-27

Para el análisis granulométrico tanto del material grueso y fino utilizaremos material pétreo natural, triturado y arena, 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 E 40, ASSHTO T 27-99)

Procedimiento:

- a. Seleccionar un grupo de tamices de tamaños adecuados para cumplir con las especificaciones del material que se va a ensayar.
- b. Colocar los tamices en orden, por tamaño de abertura.
- c. Limitar la cantidad de material en un tamiz dado, de tal forma que todas las partículas puedan alcanzar las aberturas del tamiz durante la operación del tamizado.
- d. Determinar el peso de la muestra retenida en cada tamiz, con una balanza, el cual se expresa como un porcentaje de la muestra original.

Figura 3.5: *Proceso de tamizado del agregado pétreo grueso y fino*



Fuente: Elaboracion propia.

Despues del trabajo en laboratorio de tamizado del agregado para su caracterizacion, se tabularon los datos y se obtubieron las siguientes tablas.

NOTA: Cabe hacer notar que se procedio a realizar la granulometria para la grava, gravilla y arena tanto para el agregado petreo chancado, no chancado y gravilla arenosa.

3.3.1.1.1. Granulometría de agregado no chancado (Sel. de Áridos “San Blas”)

Tabla 3.4: Granulometría de la grava no chancado 3/4”

Grava 3/4”			
N° Ensayo	1	2	3
Peso total seco	5000,00 gr	5000,00 gr	5000,00 gr
Tamiz N°	Peso retenido (gr)		
1”	0,00	0,00	0,00
3/4”	734,46	643,46	663,95
1/2”	2699,50	2485,43	2636,76
3/8”	1049,64	1048,37	1032,73
N°4	516,40	822,74	666,56
N°8	0,00	0,00	0,00
N°16	0,00	0,00	0,00
N°30	0,00	0,00	0,00
N°50	0,00	0,00	0,00
N°100	0,00	0,00	0,00
N°200	0,00	0,00	0,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.5: Granulometría de la gravilla no chancado 3/8”

Gravilla 3/8”			
N° Ensayo	1	2	3
Peso total seco	5000,00 gr	5000,00 gr	5000,00 gr
Tamiz N°	Peso retenido (gr)		
1”	0,00	0,00	0,00
3/4”	0,00	0,00	0,00
1/2”	695,23	832,16	776,34
3/8”	2056,46	1925,33	2028,43
N°4	2248,31	2242,51	2195,23
N°8	0,00	0,00	0,00
N°16	0,00	0,00	0,00
N°30	0,00	0,00	0,00
N°50	0,00	0,00	0,00
N°100	0,00	0,00	0,00
N°200	0,00	0,00	0,00

Fuente: Elaboración propia.

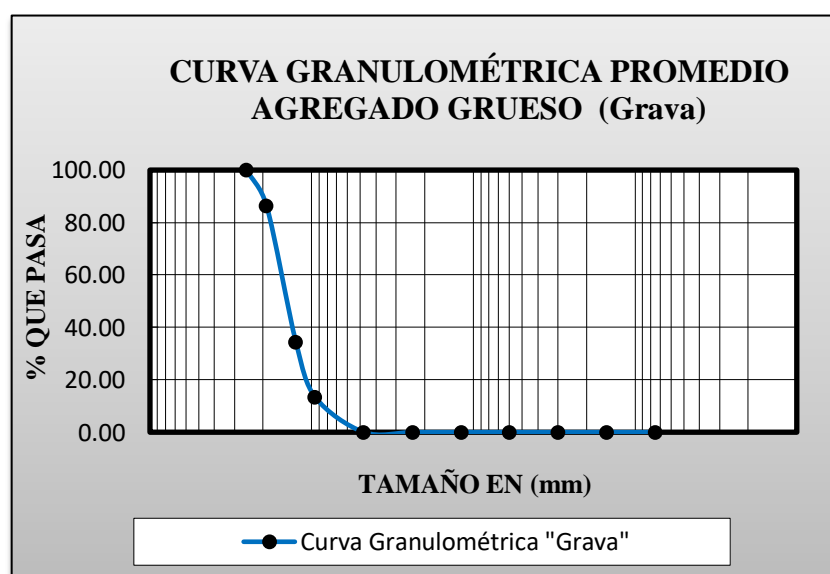
Tabla 3.6: Granulometría promedio grava no chancado 3/4''

Granulometría-Agregado grueso no chancado (grava 3/4'').

Peso Total: 5000,00 gr					
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	680,62	680,62	13,61	86,39
1/2''	12,50	2607,23	3287,85	65,76	34,24
3/8''	9,50	1043,58	4331,43	86,63	13,37
N°4	4,75	668,57	5000,00	100,00	0,00
N°8	2,36	0,00	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 3.1: Curva granulométrica grava no chancado 3/4''



Fuente: Elaboracion propia.

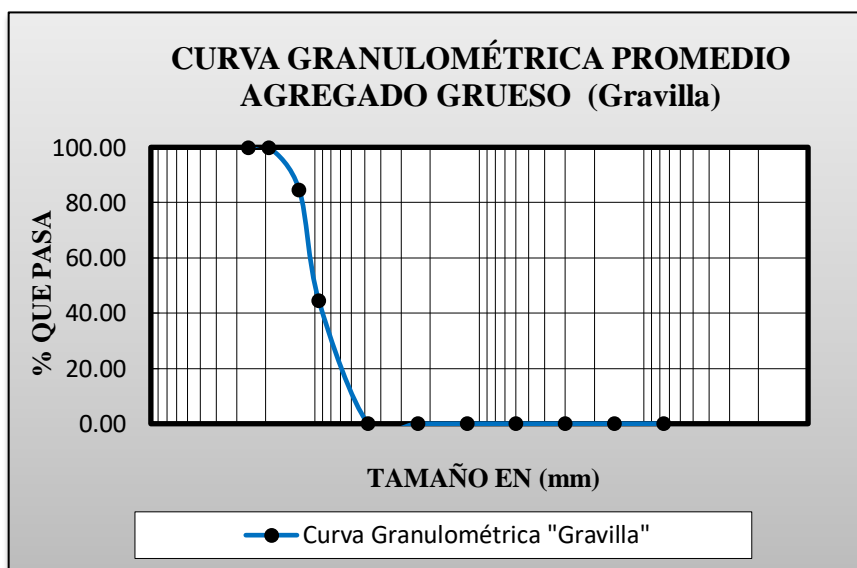
Tabla 3.7: Granulometría promedio gravilla no chancado 3/8"

Granulometría - Agregado grueso no chancado (gravilla 3/8").

Peso Total: 5000,00 gr					
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	767,91	767,91	15,36	84,64
3/8"	9,50	2003,41	2771,32	55,43	44,57
N°4	4,75	2228,68	5000,00	100,00	0,00
N°8	2,36	0,00	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 3.2: Curva granulométrica gravilla no chancado 3/8"



Fuente: Elaboracion propia.

3.3.1.1.2. Granulometría agregado chancado (posta municipal de Tarija).

Tabla 3.8: *Granulometría de la grava chancado 3/4"*

Grava 3/4"			
N° Ensayo	1	2	3
Peso total seco	5000,00 gr	5000,00 gr	5000,00 gr
Tamiz N°	Peso retenido (gr)		
1"	0,00	0,00	0,00
3/4"	153,60	219,24	148,67
1/2"	3435,43	3387,23	3419,80
3/8"	1086,54	1101,17	1088,73
N°4	324,43	292,36	342,80
N°8	0,00	0,00	0,00
N°16	0,00	0,00	0,00
N°30	0,00	0,00	0,00
N°50	0,00	0,00	0,00
N°100	0,00	0,00	0,00
N°200	0,00	0,00	0,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.9: *Granulometría de la gravilla chancado 3/8"*

Gravilla 3/8"			
N° Ensayo	1	2	3
Peso total seco	5000,00 gr	5000,00 gr	5000,00 gr
Tamiz N°	Peso retenido (gr)		
1"	0,00	0,00	0,00
3/4"	0,00	0,00	0,00
1/2"	47,52	36,95	36,63
3/8"	1178,76	1171,63	1277,16
N°4	3773,72	3791,42	3686,21
N°8	0,00	0,00	0,00
N°16	0,00	0,00	0,00
N°30	0,00	0,00	0,00
N°50	0,00	0,00	0,00
N°100	0,00	0,00	0,00
N°200	0,00	0,00	0,00

Fuente: Elaboración propia.

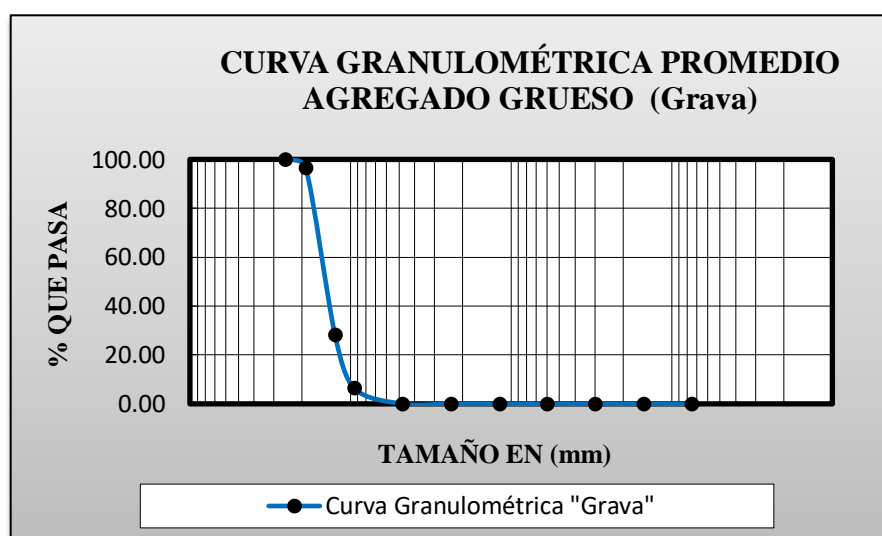
Tabla 3.10: Granulometría promedio grava chancado 3/4"

Granulometría - Agregado grueso chancado (grava 3/4").

Peso Total: 5000,00 gr					
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	173,84	173,84	3,48	96,52
1/2"	12,50	3414,15	3587,99	71,76	28,24
3/8"	9,50	1092,15	4680,14	93,60	6,40
N°4	4,75	319,86	5000,00	100,00	0,00
N°8	2,36	0,00	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 3.3: Curva granulométrica grava chancado 3/4".



Fuente: Elaboracion propia.

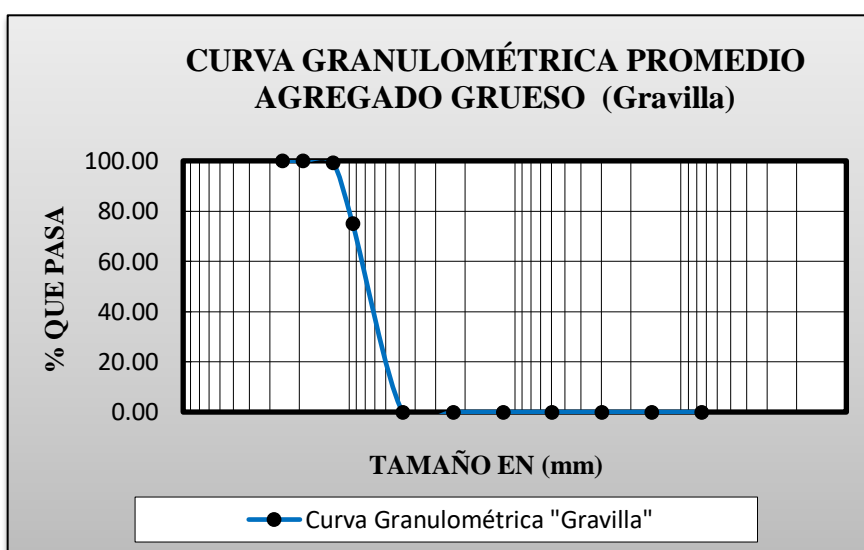
Tabla 3.11: Granulometría promedio gravilla chancado 3/8"

Granulometría - Agregado grueso chancado (gravilla 3/8").

Peso Total: 5000,00 gr					
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	40,37	40,37	0,81	99,19
3/8"	9,50	1209,18	1249,55	24,99	75,01
N°4	4,75	3750,45	5000,00	100,00	0,00
N°8	2,36	0,00	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 3.4: Curva granulométrica gravilla chancado 3/8"



Fuente: Elaboracion propia.

3.3.1.1.3. Granulometría de gravilla-arena (posta municipal de Tarija)

Tabla 3.12: *Granulometría de la gravilla chancado 3/8"*

Gravilla 3/8"			
N° Ensayo	1	2	3
Peso total seco	5000,00 gr	5000,00 gr	5000,00 gr
Tamiz N°	Peso retenido (gr)		
1"	0,00	0,00	0,00
3/4"	0,00	0,00	0,00
1/2"	47,52	36,95	36,63
3/8"	1178,76	1171,63	1277,16
N°4	3773,72	3791,42	3686,21
N°8	0,00	0,00	0,00
N°16	0,00	0,00	0,00
N°30	0,00	0,00	0,00
N°50	0,00	0,00	0,00
N°100	0,00	0,00	0,00
N°200	0,00	0,00	0,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.13: *Granulometría de la arena*

Arena			
N° Ensayo	1	2	3
Peso total seco	5000,00 gr	5000,00 gr	5000,00 gr
Tamiz N°	Peso retenido (gr)		
1"	0,00	0,00	0,00
3/4"	0,00	0,00	0,00
1/2"	0,00	0,00	0,00
3/8"	0,00	0,00	0,00
N°4	103,25	123,60	124,60
N°8	453,34	263,30	396,42
N°16	635,22	910,56	814,20
N°30	1374,00	1434,54	1164,70
N°50	1316,40	1211,25	1331,30
N°100	776,16	706,32	816,40
N°200	226,40	206,60	228,63
BASE	115,20	143,53	123,15

Fuente: Elaboración propia.

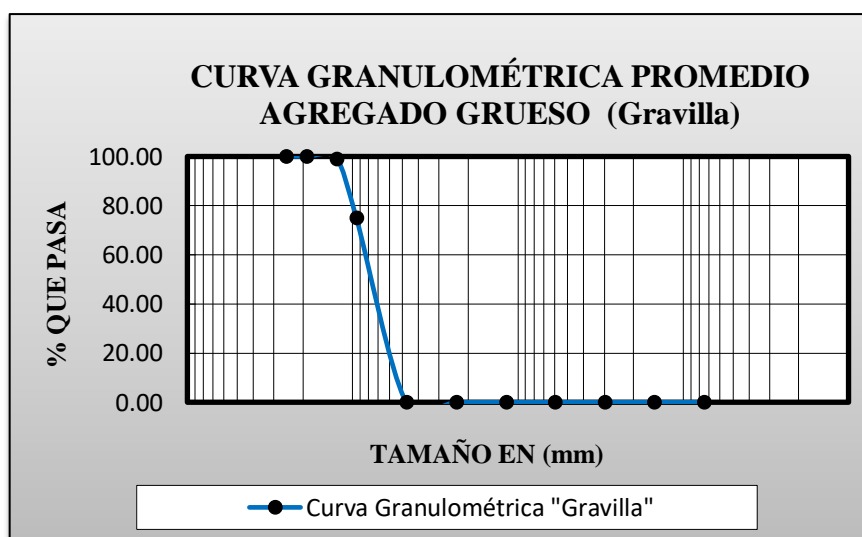
Tabla 3.14: Granulometría promedio gravilla chancado 3/8''

Granulometría - Agregado grueso chancado (gravilla 3/8'').

Peso Total: 5000,00 gr					
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	40,37	40,37	0,81	99,19
3/8"	9,50	1209,18	1249,55	24,99	75,01
N°4	4,75	3750,45	5000,00	100,00	0,00
N°8	2,36	0,00	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 3.5: Curva granulométrica gravilla chancado 3/8''



Fuente: Elaboracion propia.

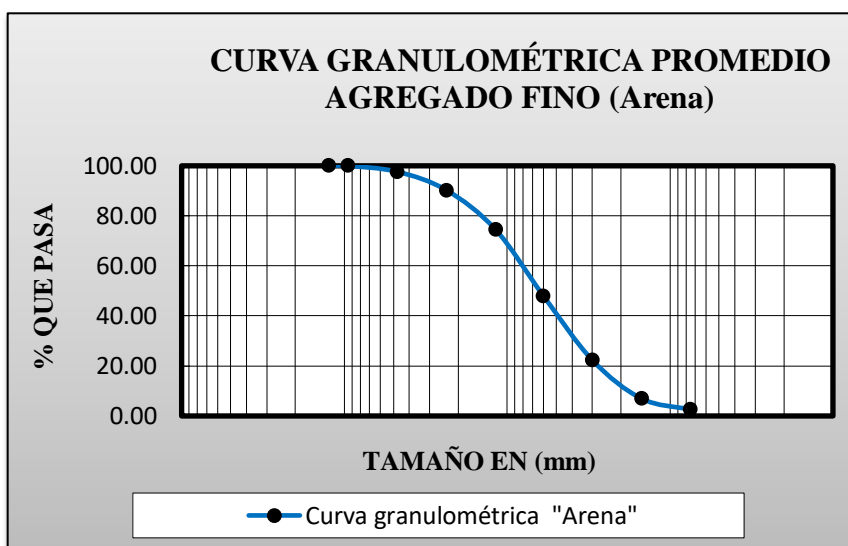
Tabla 3.15: Granulometría promedio de la arena.

Granulometría - Agregado fino (arena).

Peso Total: 5000,00 gr					
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	117,15	117,15	2,34	97,66
N°8	2,36	371,02	488,17	9,76	90,24
N°16	1,18	786,66	1274,83	25,50	74,50
N°30	0,60	1324,41	2599,24	51,98	48,02
N°50	0,30	1286,32	3885,56	77,71	22,29
N°100	0,15	766,29	4651,85	93,04	6,96
N°200	0,075	220,54	4872,40	97,45	2,55
Base	-	127,29	4999,69	99,99	0,01

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.6. Curva granulométrica agregado fino (arena)



Fuente: Elaboración propia.

3.3.1.2. Equivalente de arena (ASTM D 2419, AASHTO T 176-00)

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 de cloruro cálcico, glicerina y formaldehído en agua, 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 3.6: *Ensayo de equivalente de arena.*



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.16: *Datos del ensayo equivalente de arena.*

Descripción	Ensayo		
	1	2	3
Lectura nivel superior (H1)	11,1	11,2	11,2
Lectura nivel inferior (H2)	8,8	8,4	8,5

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo:

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

$$\% \text{ de arena} = \frac{8,8}{11,10} * 100\%$$

$$\% \text{ de arena} = 79,28 \%$$

Tabla 3.17: Resultados del ensayo equivalente de arena

Descripción	Ensayo		
	1	2	3
Arena (%)	79,28	75,00	75,89
Promedio (%)	76,72		

Fuente: Elaboración propia.

3.3.1.3. Desgaste con la máquina de los Ángeles (ASTM E 131, AASHTO T96-99)

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. La máquina que se usa en la prueba de los Ángeles consta de un cilindro de acero hueco, cerrado en ambos extremos y montado en ejes en posición horizontal.

La muestra y la carga abrasiva correspondiente se colocan en la máquina de los Ángeles, y se hace girar el cilindro a una velocidad comprendida entre 30 y 33rpm; el número total de vueltas deberá ser 500. La máquina deberá girar de manera, uniforme para mantener una velocidad constante. Una vez cumplido el número de vueltas prescrito, se descarga el material del cilindro y se procede con una separación preliminar de la muestra ensayada, en el tamiz N°12.

El material retenido en el tamiz se lava, se seca hasta alcanzar una masa constante y se pesa. Se reporta como porcentaje de desgaste la diferencia entre la masa original y la masa fina de la muestra expresada como un porcentaje de la masa original. El método T-96 de AASHTO (ASTM E-131) da un procedimiento detallado para esta prueba.

El tipo de abrasión que se efectuó es de tipo B para la grava mientras que para la gravilla se realizó del tipo C, donde se realizó un solo ensayo para cada uno de los agregados tanto natural como triturado.

Figura 3.7: *Ensayo de desgaste máquina de Los Ángeles.*



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.18: Pesos del agregado grueso y número de esferas

Gradación		A	B	C	D
Diámetro		Cantidad de material a emplear (gr)			
PASA	RETENIDO				
1 1/2"	1"	1250±25			
1"	3/4"	1250±25			
3/4"	1/2"	1250±10	2500±10		
1/2"	3/8"	1250±10	2500±10		
3/8"	1/4"			2500±10	
1/4"	Nº4			2500±10	
Nº4	Nº8				5000±10
PESO TOTAL		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
Numero De Esferas		12	11	8	6
Nº De Revoluciones		500	500	500	500

Fuente: Norma ASTM, E 131.

3.3.1.3.1. Desgaste de agregado no chancado (natural).

Tabla 3.19: Datos del ensayo de desgaste para la grava no chancado 3/4"

Datos de laboratorio		
Pasa tamiz	Retenido tamiz	Peso retenido
3/4"	1/2"	2500,0gr
1/2"	3/8"	2500,0gr
Retenido tamiz de corte Nº12 (1,7mm)		3978,8 gr
Diferencia		1021,20 gr
Número de ensayos		1
Tipo de gradación		B
Carga abrasiva		11 esferas a 32,5 rpm 500 revoluciones

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo:

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{\text{Diferencia}}{\text{Peso total}} * 100$$

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{1021,2 \text{ gr}}{5000,0 \text{ gr}} * 100$$

$$\% \text{ de desgaste} = 20,42\%$$

Tabla 3.20: *Datos del ensayo de desgaste para la gravilla no chancado 3/8"*

Datos de laboratorio		
Pasa tamiz	Retenido tamiz	Peso retenido
3/8"	1/4"	2500,0 gr
1/4"	N°4	2500,0 gr
Retenido tamiz de corte N°12 (1,7mm)		3894,8 gr
Diferencia		1105,2 gr
Número de ensayos		1
Tipo de gradación		C
Carga abrasiva		8 esferas a 32,5 rpm 500 revoluciones

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo:

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{\text{Diferencia}}{\text{Peso total}} * 100$$

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{1105,2 \text{ gr}}{5000,0 \text{ gr}} * 100$$

$$\% \text{ de desgaste} = 22,10 \%$$

3.3.1.3.2. Desgaste de agregado chancado (triturado)

Tabla 3.21: *Datos del ensayo de desgaste para la grava chancado 3/4"*

Datos de laboratorio		
Pasa tamiz	Retenido tamiz	Peso retenido
3/4"	1/2"	2500,0gr
1/2"	3/8"	2500,0gr
Retenido tamiz de corte N°12 (1,7mm)		3745,3 gr
Diferencia		1254,7 gr
Número de ensayos		1
Tipo de gradación		B
Carga abrasiva		11 esferas a 32,5 rpm 500 revoluciones

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo:

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{\text{Diferencia}}{\text{Peso total}} * 100$$

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{1254,7 \text{ gr}}{5000,0 \text{ gr}} * 100$$

$$\% \text{ de desgaste} = 25,09\%$$

Tabla 3.22: *Datos del ensayo de desgaste para la gravilla chancado 3/8”.*

Datos de laboratorio		
Pasa tamiz	Retenido tamiz	Peso retenido
3/8”	1/4”	2500,0 gr
1/4”	N°4	2500,0 gr
Retenido tamiz de corte N°12 (1,7mm)		3632,8 gr
Diferencia		1367,2 gr
Número de ensayos		1
Tipo de gradación		C
Carga abrasiva		8 esferas a 32,5 rpm 500 revoluciones

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo:

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{\text{Diferencia}}{\text{Peso total}} * 100$$

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{1367,2 \text{ gr}}{5000,0 \text{ gr}} * 100$$

$$\% \text{ de desgaste} = 27,34 \%$$

3.3.1.3.3. Desgaste de agregado gravilla-arenosa (gravilla chancado)

Tabla 3.23: Datos del ensayo de desgaste para la gravilla chancado 3/8''

Datos de laboratorio		
Pasa tamiz	Retenido tamiz	Peso retenido
3/8''	1/4''	2500,0 gr
1/4''	N°4	2500,0 gr
Retenido tamiz de corte N°12 (1,7mm)		3632,8 gr
Diferencia		1367,2 gr
Número de ensayos		1
Tipo de gradación		C
Carga abrasiva		8 esferas a 32,5 rpm 500 revoluciones

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo:

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{\text{Diferencia}}{\text{Peso total}} * 100$$

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{1367,2 \text{ gr}}{5000,0 \text{ gr}} * 100$$

$$\% \text{ de desgaste} = 27,34 \%$$

3.3.1.4. Ensayo de peso específico de agregado grueso AASHTO T-85, ASTM C-127

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.

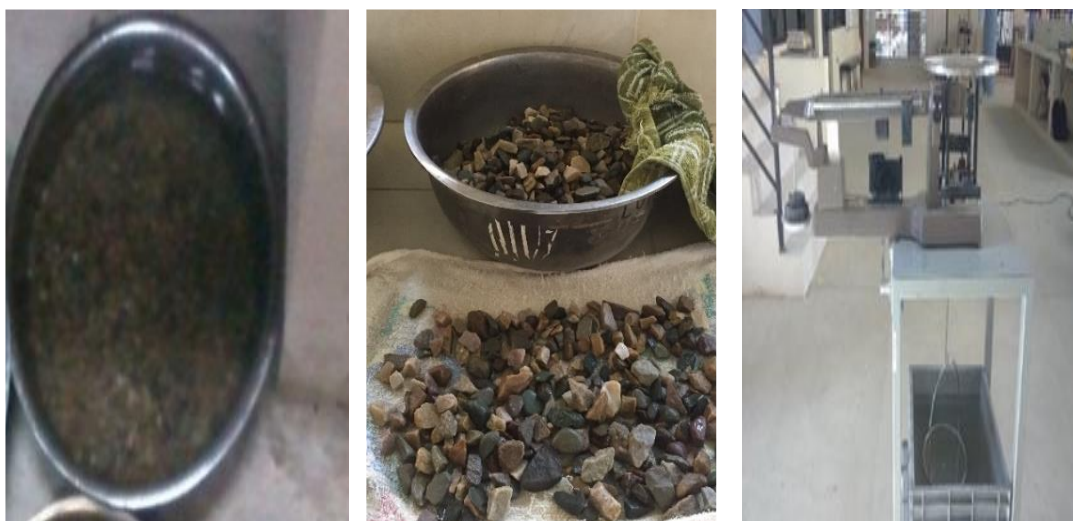
Procedimiento del ensayo:

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" natural, triturado y gravilla-arenosa.

Figura 3.8: *Ensayo determinación del peso específico en agregados gruesos*



Fuente: Elaboración propia.

3.3.1.4.1. Peso específico agregado no chancado (natural)

Tabla 3.24: Datos del ensayo de peso específico para grava no chancado 3/4”

Muestra N°	Peso muestra secada "A" (gr)	Peso muestra saturada con sup. Seca "B" (gr)	Peso muestra saturada dentro del agua "C" (gr)
1	5000,00	5065,86	3124,00
2	5000,00	5062,85	3118,00
3	5000,00	5073,32	3121,00

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo para la grava 3/4”

$$\text{Peso Específico a granel} = \frac{A}{B - C}$$

$$\text{Peso Específico a granel} = \frac{5000,00}{5065,86 - 3124,00}$$

$$\text{Peso Específico a granel} = 2,57 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right]$$

$$\text{P.E.A. Saturado de superficie seca} = \frac{B}{B - C}$$

$$\text{P.E.A. Saturado de superficie seca} = \frac{5065,86}{5065,86 - 3124,00}$$

$$\text{P.E.A. Saturado de superficie seca} = 2,61 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right]$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{A}{A - C}$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{5000,00}{5000,00 - 3124,00}$$

$$\text{Peso específico aparente} = 2,67 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right]$$

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

$$\% \text{ de absorción} = \frac{5065,86 - 5000,00}{5000,00} * 100\%$$

$$\% \text{ de absorción} = 1,32 \%$$

Tabla 3.25: Resultados del ensayo de peso específico para grava no chancado 3/4''

Muestra N°	Peso específico a granel (gr/cm3)	Peso específico saturado con sup. Seca (gr/cm3)	Peso específico aparente (gr/cm3)	% de absorción
1	2,57	2,61	2,67	1,32
2	2,57	2,60	2,66	1,26
3	2,56	2,60	2,66	1,47
Promedio	2,57	2,60	2,66	1,35

Fuente: Elaboración propia.

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

Tabla 3.26: Datos del ensayo de peso específico para gravilla no chancado 3/8''

Muestra N°	Peso muestra secada "A" (gr)	Peso muestra saturada con sup. Seca "B" (gr)	Peso muestra saturada dentro del agua "C" (gr)
1	5000,00	5056,75	3146,00
2	5000,00	5068,42	3158,00
3	5000,00	5062,74	3152,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.27: Resultados del ensayo de peso específico para gravilla no chancado 3/8”

Muestra N°	Peso específico a granel (gr/cm3)	Peso específico saturado con sup. Seca (gr/cm3)	Peso específico aparente (gr/cm3)	% de absorción
1	2,62	2,65	2,70	1,14
2	2,62	2,65	2,71	1,37
3	2,62	2,65	2,71	1,25
Promedio	2,62	2,65	2,71	1,25

Fuente: Elaboración propia.

3.3.1.4.2. Peso específico agregado chancado (triturado).

Tabla 3.28: Datos del ensayo de peso específico para grava chancado 3/4”

Muestra N°	Peso muestra secada "A" (gr)	Peso muestra saturada con sup. Seca "B" (gr)	Peso muestra saturada dentro del agua "C" (gr)
1	5000,00	5095,30	3112,00
2	5000,00	5079,40	3103,00
3	5000,00	5083,20	3105,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.29: Resultados del ensayo de peso específico para grava chancado 3/4”

Muestra N°	Peso específico a granel (gr/cm3)	Peso específico saturado con sup. Seca (gr/cm3)	Peso específico aparente (gr/cm3)	% de absorción
1	2,52	2,57	2,65	1,91
2	2,53	2,57	2,64	1,59
3	2,53	2,57	2,64	1,66
Promedio	2,53	2,57	2,64	1,72

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.30: Datos del ensayo de peso específico para gravilla chancado 3/8".

Muestra N.º	Peso muestra secada "A" (gr)	Peso muestra saturada con sup. Seca "B" (gr)	Peso muestra saturada dentro del agua "C" (gr)
1	5000,00	5061,60	3105,00
2	5000,00	5076,90	3116,00
3	5000,00	5068,50	3119,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.31: Resultados del ensayo de peso específico para gravilla chancado 3/8".

Muestra N.º	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	2,56	2,59	2,64	1,23
2	2,55	2,59	2,65	1,54
3	2,56	2,60	2,66	1,37
Promedio	2,56	2,59	2,65	1,38

Fuente: Elaboración propia.

3.3.1.4.3. Peso específico de gravilla-arenosa

En este caso al ser una mezcla solo se hizo el ensayo para la gravilla chancado, donde se sigue el mismo el procedimiento de cálculo que se hizo anteriormente.

Tabla 3.32: Datos del ensayo de peso específico para gravilla chancado 3/8".

Muestra N.º	Peso muestra secada "A" (gr)	Peso muestra saturada con sup. Seca "B" (gr)	Peso muestra saturada dentro del agua "C" (gr)
1	5000,00	5061,60	3105,00
2	5000,00	5076,90	3116,00
3	5000,00	5068,50	3119,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.33: Resultados del ensayo de peso específico para gravilla chancado 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	2,56	2,59	2,64	1,23
2	2,55	2,59	2,65	1,54
3	2,56	2,60	2,66	1,37
Promedio	2,56	2,59	2,65	1,38

Fuente: Elaboración propia.

3.3.1.5. Ensayo de peso específico de agregado fino AASHTO T-84, ASTM C-128

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.

Se realizó el ensayo según la norma, con tres muestras y se siguieron los pasos del cálculo como se muestran a continuación.

Figura 3.9: Ensayo de peso específico agregado fino.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.34: Datos del ensayo peso específico para agregado fino (arena)

Muestra N°	Peso muestra (gr)	Peso de matraz (gr)	Muestra + matraz + agua (gr)	Peso del agua agregado al matraz "W" (gr)	Peso muestra secada "A" (gr)	Volumen del matraz "V" (ml)
1	500,00	173,40	983,40	311,20	493,90	500,00
2	500,00	173,40	979,80	306,40	493,20	500,00
3	500,00	173,40	985,50	310,10	494,10	500,00

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo de peso específico agregado fino.

$$\text{Peso específico a granel} = \frac{A}{V - W}$$

$$\text{Peso específico a granel} = \frac{493,90}{(500 - 310,00)}$$

$$\text{Peso específico a granel} = 2,60 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right]$$

$$\text{P.E.A. Saturado superficial seco} = \frac{500}{V - W}$$

$$\text{P.E.A. Saturado superficial seco} = \frac{500}{500,00 - 310,00}$$

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

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{A}{(V - W) - (500 - A)}$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{493,90}{(500 - 310,00) - (500 - 493,90)}$$

$$\text{Peso específico aparente} = 2,70 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right]$$

$$\% \text{ de Absorción} = \frac{500 - A}{A} * 100$$

$$\% \text{ de Absorción} = \frac{500 - 493,90}{493,90} * 100$$

$$\% \text{ de Absorción} = 1,22 \%$$

Para el ensayo 2-3 se realizará el mismo procedimiento.

Tabla 3.35: Resultado de peso específico para agregado fino (arena)

Muestra Nº	P. E. A granel (gr/cm ³)	P. E. Saturado con sup. Seca (gr/cm ³)	P. E. Aparente (gr/cm ³)	% de absorción
1	2,62	2,65	2,70	1,22
2	2,55	2,58	2,64	1,36
3	2,60	2,63	2,69	1,18
Promedio	2,59	2,62	2,68	1,25

Fuente: Elaboración propia.

3.3.1.6. Ensayo de peso unitario agregados AASHTO T-19, 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:

- a. Se deberá realizar de la siguiente manera:
- b. 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.
- c. 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 AASHTO T-19 y ASTM C-29.

Figura 3.10: *Ensayo de peso unitario.*



Fuente: Elaboración propia.

3.3.1.6.1. Peso Unitario de agregado no chancado (natural)

Tabla 3.36: *Datos de peso unitario suelto de la grava no chancado 3/4''*

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	19784,00	14059,00
2	5725,00	9883,70	19813,00	14088,00
3	5725,00	9883,70	19785,00	14060,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.37: *Datos de peso unitario compactado de la grava no chancado 3/4''*

Peso Unitario Compactado

Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm ³)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)
1	5725,00	9883,00	20663,00	14938,00
2	5725,00	9883,00	20621,00	14896,00
3	5725,00	9883,00	20643,00	14918,00

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo de peso unitario para todos los ensayos.

$$\text{Peso unitario} = \frac{\text{Peso del agregado seco}}{\text{Volumen del recipiente}}$$

$$\text{Peso unitario} = \frac{14059,00}{9883,70}$$

$$\text{Peso unitario} = 1,422 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right]$$

Tabla 3.38: Resultados de peso unitario de la grava no chancado 3/4”

Número de ensayo	Unidad	1	2	3
Peso unitario suelto	gr/cm ³	1,422	1,425	1,423
Promedio	gr/cm ³		1,423	
Peso unitario compactado	gr/cm ³	1,511	1,507	1,509
Promedio	gr/cm ³		1,509	
Peso unitario de la grava 3/4”	gr/cm³		1,47	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.39: Datos de peso unitario suelto de la gravilla no chancado 3/8”

Peso Unitario Suelto

Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm3)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)
1	5725,00	9883,70	19456,00	13731,00
2	5725,00	9883,70	19446,00	13721,00
3	5725,00	9883,70	19347,00	13622,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.40: Datos de peso unitario compactado de la gravilla no chancado 3/8”**Peso Unitario Compactado**

Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm ³)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)
1	5725,00	9883,00	20123,00	14398,00
2	5725,00	9883,00	20125,00	14400,00
3	5725,00	9883,00	20219,00	14494,00

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo de peso unitario para todos los ensayos.

$$\text{Peso unitario} = \frac{\text{Peso del agregado seco}}{\text{Volumen del recipiente}}$$

$$\text{Peso unitario} = \frac{13731,00}{9883,70}$$

$$\text{Peso unitario} = 1,389 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right]$$

Tabla 3.41: Resultados de peso unitario de la gravilla no chancado 3/8”

Número de ensayo	Unidad	1	2	3
Peso unitario suelto	gr/cm ³	1,389	1,388	1,378
Promedio	gr/cm ³		1,385	
Peso unitario compactado	gr/cm ³	1,457	1,457	1,466
Promedio	gr/cm ³		1,460	
Peso unitario de la grava 3/4”	gr/cm³		1,42	

Fuente: Elaboración propia.

3.3.1.6.2. Peso unitario de agregado chancado (triturado)

Tabla 3.42: Datos de peso unitario suelto de la grava chancado 3/4''

Peso Unitario Suelto

Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm3)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)
1	5725,00	9883,70	20654,00	14929,00
2	5725,00	9883,70	20762,00	15037,00
3	5725,00	9883,70	20660,00	14935,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.43: Datos de peso unitario compactado de la grava chancad 3/4''

Peso Unitario Compactado

Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm3)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)
1	5725,00	9883,00	21625,00	15900,00
2	5725,00	9883,00	21548,00	15823,00
3	5725,00	9883,00	21728,00	16003,00

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo de peso unitario para todos los ensayos.

$$\text{Peso unitario} = \frac{\text{Peso del agregado seco}}{\text{Volumen del recipiente}}$$

$$\text{Peso unitario} = \frac{14929,00}{9883,70}$$

$$\text{Peso unitario} = 1,510 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right]$$

Tabla 3.44: Resultados de peso unitario de la grava chancado 3/4”

Número de ensayo	Unidad	1	2	3
Peso unitario suelto	gr/cm ³	1,510	1,521	1,511
Promedio	gr/cm ³		1,514	
Peso unitario compactado	gr/cm ³	1,609	1,601	1,619
Promedio	gr/cm ³		1,609	
Peso unitario de la grava 3/4”	gr/cm³		1,56	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.45: Datos de peso unitario suelto de la gravilla chancado 3/8”

Peso Unitario Suelto

Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm3)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)
1	5725,00	9883,70	19623,00	13898,00
2	5725,00	9883,70	19599,00	13874,00
3	5725,00	9883,70	19646,00	13921,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.46: Datos de peso unitario compactada de la gravilla chancado 3/8”

Peso Unitario Compactado

Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm3)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)
1	5725,00	9883,00	20537,00	14812,00
2	5725,00	9883,00	20554,00	14829,00
3	5725,00	9883,00	20545,00	14820,00

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo de peso unitario para todos los ensayos.

$$\text{Peso unitario} = \frac{\text{Peso del agregado seco}}{\text{Volumen del recipiente}}$$

$$\text{Peso unitario} = \frac{13898,00}{9883,70}$$

$$\text{Peso unitario} = 1,406 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right]$$

Tabla 3.47: Resultados de peso unitario de la gravilla chancado 3/8''

Número de ensayo	Unidad	1	2	3
Peso unitario suelto	gr/cm ³	1,406	1,404	1,408
Promedio	gr/cm ³		1,406	
Peso unitario compactado	gr/cm ³	1,513	1,515	1,514
Promedio	gr/cm ³		1,514	
Peso unitario de la grava 3/4''	gr/cm³		1,46	

Fuente: Elaboración propia.

3.3.1.6.3. Peso unitario de gravilla-arenosa.

Tabla 3.48: Datos de peso unitario suelto de la gravilla chancado 3/8''

Peso Unitario Suelto

Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm3)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)
1	5725,00	9883,70	19623,00	13898,00
2	5725,00	9883,70	19599,00	13874,00
3	5725,00	9883,70	19646,00	13921,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.49: Datos de peso unitario compactado de la gravilla chancado 3/8''

Peso Unitario Compactado

Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm3)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)
1	5725,00	9883,00	20537,00	14812,00
2	5725,00	9883,00	20554,00	14829,00
3	5725,00	9883,00	20545,00	14820,00

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo de peso unitario para todos los ensayos.

$$\text{Peso unitario} = \frac{\text{Peso del agregado seco}}{\text{Volumen del recipiente}}$$

$$\text{Peso unitario} = \frac{13898,00}{9883,70}$$

$$\text{Peso unitario} = 1,406 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right]$$

Tabla 3.50: Resultados de peso unitario de la gravilla chancado 3/8''

Número de ensayo	Unidad	1	2	3
Peso unitario suelto	gr/cm ³	1,406	1,404	1,408
Promedio	gr/cm ³		1,406	
Peso unitario compactado	gr/cm ³	1,513	1,515	1,514
Promedio	gr/cm ³		1,514	
Peso unitario de la grava 3/4''	gr/cm³		1,46	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.51: Datos de peso unitario suelto de la arena

Peso Unitario Suelto

Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm ³)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)
1	2605,00	2915,75	7030,00	4425,00
2	2605,00	2915,75	7065,00	4460,00
3	2605,00	2915,75	7045,00	4440,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.52: Datos de peso unitario compactado de la arena**Peso Unitario Compactado**

Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm ³)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)
1	2605,00	2915,75	7535,00	4930,00
2	2605,00	2915,75	7635,00	5030,00
3	2605,00	2915,75	7642,00	5037,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.53: Resultados de peso unitario de la arena

Número de ensayo	Unidad	1	2	3
Peso unitario suelto	gr/cm ³	1,518	1,530	1,523
Promedio	gr/cm ³		1,523	
Peso unitario compactado	gr/cm ³	1,691	1,725	1,728
Promedio	gr/cm ³		1,714	
Peso unitario de la arena	gr/cm³		1,62	

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2 Caracterización del cemento asfáltico PROBISA 85-100

Los ensayos a realizar al cemento asfáltico, PROBISA 85-100 son las siguientes:

3.3.2.1. Ensayo de ductilidad (ASTM D 113, AASHTO T51-00)

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 para 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 contemporizador caliente cortar el exceso el 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 3.11: *Ensayo de ductilidad del cemento asfáltico*



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.54: *Datos y resultado del ensayo de ductilidad del cemento asfáltico*

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Especificaciones	
					Min.	Max.
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51	cm	123	113	108	100	-
Promedio	cm	115				

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2.2. Ensayo de penetración (ASTM D 5, AASHTO T49-97)

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 asfáltico.

El ensaye de penetración se usa como una medida de consistencia; valores altos de penetración indican consistencias más blandas.

Figura 3.12: *Ensayo de penetración del cemento asfáltico*



Fuente:Elaboracion propia

Tabla 3.55: *Datos y resultado del ensayo de penetración del cemento asfáltico*

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Especificaciones		
					Min.	Max.	
Penetración a 25°C, 100gr. 5seg (0,1 mm) AASHTO T 49-97	Lectura 1	0,1 mm	98	95	89	85	100
	Lectura 2	0,1 mm	96	89	92		
	Lectura 3	0,1 mm	97	91	87		
	Promedio	0,1 mm	97	92	89		
Resultado	0,1 mm	93					

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2.3. Ensayo de peso específico (ASTM D 70, AASHTO T 43)

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 compactadas.

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. Para este ensayo se determina el peso de los picnómetros y registrar el peso y designar a este dato la letra “A”. después llenar los picnómetros con agua destilada para posteriormente sumergirla totalmente en un vaso precipitado con agua destilada y dejar en baño María por 30 minutos para calibrar, luego una vez transcurrido el tiempo extraer los picnómetros, secar superficialmente y pesar y designar con la letra “B”. Luego verter el cemento asfáltico aproximadamente $\frac{3}{4}$ del picnómetro y dejar hasta que alcance temperatura ambiente. Posteriormente pesar los picnómetros más las muestras, designar ese dato como la letra “C”. Después llenar los picnómetros con agua destilada y sumergir también en agua destilada y dejar por 30 minutos, para luego secar, pesar y obtener el último dato, que se designa con la letra “D”, este procedimiento se la realiza para los tres ensayos.

Figura 3.13: *Ensayo de peso específico del cemento asfáltico*



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.56: Datos del ensayo peso específico del cemento asfáltico

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Peso picnómetro (A)	gr	35,4	34,8	36,2
Peso picnómetro + agua (25°C) (B)	gr	84,2	84,9	85,8
Peso picnómetro + muestra (C)	gr	61,5	64,9	62,3
Peso picnómetro + agua + muestra (D)	gr	84,9	85,7	86,5

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo:

e. = factor de corrección (0,997077)

$$\text{Peso específico cemento asfáltico} = \frac{(C - A)}{B + (C - A) - D} * e$$

$$\text{Peso específico cemento asfáltico} = \frac{(61,5 - 35,4)}{84,2 + (61,5 - 35,4) - 84,9} * 0,997077$$

$$\text{Peso específico cemento asfáltico} = 1,025 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right]$$

Tabla 3.57: Resultados del ensayo peso específico del cemento asfáltico

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Peso específico de cemento asfáltico	gr/cm ³	1,025	1,024	1,025
Promedio	gr/cm³	1,024		

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2.4 Ensayo de punto de inflamación (ASTM D 1310-01, AASHTO T 79-96)

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 3.14: *Ensayo de punto de inflamación del cemento asfáltico*



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.58: Datos y resultado de ensayo de punto de inflamación del cemento asfáltico

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Especificaciones	
					Min.	Max.
Punto de inflamación AASHTO T-79	°C	289	285	269	>232	-
Promedio	°C	281				

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2.5. Ensayo de película delgada (ASTM D 1754, AASHTO T179-05)

Este método se usa para medir el efecto de calor y aire en una película en movimiento de materiales asfálticos semisólidos en forma rutinaria, y para los otros tipos, sólo en caso de investigación. Los efectos de este tratamiento se determinan en base a mediciones de las propiedades del asfalto antes y después del ensayo.

Figura 3.15: Ensayo de película delgada en horno del cemento asfáltico

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.59: Datos y resultado de ensayo de película delgada del cemento asfáltico

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Especificaciones		
					Min.	Max.	
Película delgada en horno, 32 mm, 163°C, 5 hr.	Peso platillo vacío (W ₁)	grs.	84.6	85.3	85.3		
	P. platillo vacío+C.A. (W ₂)	grs.	134.6	135.3	135.3		
	P. platillo vacío+C.A. (W ₃)	grs.	134.2	135	134.9	-	1.0
	% de Perdida	%	0.80	0.60	0.80		
	Promedio	%		0.7			

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2.6. Ensayo de punto de ablandamiento (ASTM D 36, AASHTO T53-96)

Este método de ensayo cubre la determinación del punto de ablandamiento de betún en el rango de 30 a 157°C (86 a 315°F) usando el aparato de la anillo-y-esfera sumergido en agua destilada, glicerina USP o glicol del etileno. Consiste en cubrir la superficie de la base y los anillos un agente (glicerina). Por otro lado, poner agua destilada en el vaso de precipitación lo suficiente como para que la muestra quede totalmente bañada en el agua destilada luego verter el cemento asfáltico a los anillos y dejar reposar, enfriar durante 30 minutos. Una vez enfriado el asfalto poner los anillos junto al poseedor en el vaso con agua destilada, por fuera alrededor del vaso colocar hielo para bajar la temperatura hasta 5°C. Para acabar de armar todo el equipo, es decir colocar los anillos, con las guías de centradoras de las esferas en el poseedor y poner a calentar para hacer el ensayo.

Figura 3.16: *Ensayo punto de ablandamiento del cemento asfáltico*



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.60: *Datos y resultado de ensayo de punto de ablandamiento del cemento asfáltico*

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Especificaciones	
					Min.	Max.
Punto de ablandamiento AASHTO T 53-96	°C	46	49	48	41	53
Promedio	°C	48				

Fuente: Elaboracion propia.

3.3.3. Caracterización de la llenante mineral (Cemento portland)

3.3.3.1. Ensayo del peso específico del cemento

El peso específico del cemento es un factor de cierta relevancia en el estudio de las propiedades del mismo, aunque cabe destacar que no es un índice de su calidad, sino por el contrario es usado para el cálculo de peso y volúmenes en una mezcla de concreto y para deducir otras características del cemento, principalmente.

Se llenó un frasco con Kerosene hasta un punto entre 0 y 1 ml asegurándose de que quedó seco en el interior por encima de este nivel, esta lectura fue Lo (lectura Inicial).

Luego, se agregó 64 gramos de Cemento Portland tipo I en pequeñas cantidades, teniendo cuidado de no derramar el líquido ni untar las paredes por encima del nivel. Se colocó el frasco en baño de María, por último, se tomó la lectura final Lf.

El rango aceptable en el cual debe estar el peso específico es entre:

$$2.90[\text{gr}/\text{cm}^3] < P.E. < 3.15[\text{gr}/\text{cm}^3]$$

Figura 3.17: *Ensayo de peso específico del cemento.*



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.61: *Datos y resultado del ensayo de peso específico del cemento*

Muestra	Peso muestra	Volumen gasolina	Vol. Gasolina + volumen cemento	Volumen desplazado	Peso específico cemento
N.º	(gr)	(cm ³)	(cm ³)	(cm ³)	(gr/cm ³)
1	64.00	300.00	322.00	22.00	2.909
2	64.00	300.00	324.00	24.00	2.667
3	64.00	300.00	320.00	20.00	3.200
Promedio					2.925

Fuente: Elaboración propia.

3.3.3.2 Ensayo de finura del cemento por tamizado

Este método de ensayo tiene por objeto la determinación de la finura del cemento por medio del tamiz de malla N° 50 y N° 200. Puesto que la hidratación de los granos de cemento ocurre desde la superficie hacia el interior, el área superficial total de las partículas de cemento constituye el material de hidratación. El tamaño de los granos (finura del cemento) tiene una gran influencia sobre sus propiedades, especialmente sobre la velocidad de hidratación, desarrollo de calor, retracción y aumento de resistencia con la edad; el fraguado, los costos económicos, la trabajabilidad de la mezcla y la sensibilidad a cambios atmosféricos. Es uno de los principales índices de la calidad del cemento.

Se coloca la muestra de 50 gr. de cemento sobre el tamiz N° 50 y N° 200, limpio y seco y con tapa en el fondo, de modo que el cemento pase a través del tamiz en un proceso de tamizado con movimientos lentos de muñeca y sosteniendo el tamiz con ambas manos, hasta que haya pasado la mayor cantidad de material fino y obteniendo un residuo.

Se limpia el tamiz con una brocha o cepillo en el fondo de este, para evitar que las aberturas del tamiz se obstruyan con el paso del material fino. Para finalizar el proceso, se coloca una hoja en blanco debajo del tamiz, para observar que no caiga material sobre este, debiendo quedar solo el material grueso. Se registran los datos en la planilla de ensayo correspondiente, para el cálculo.

Figura 3.18: *Ensayo de finura del cemento*



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.62: *Datos del ensayo de finura del cemento*

Parámetros	Unidad	Observaciones		
		Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Peso retenido en tamiz N° 50 (W N° 50)	gr.	0	0	0
Peso retenido en tamiz N° 200 (W N° 200)	gr.	1,20	1,30	1,30
Peso retenido en la base (Wb)	gr.	48,80	48,70	4,70
Finura del cemento (F)	gr.	2,40	2,60	2,60
Promedio de la finura del cemento (%)		2.53		

Fuente: Elaboración propia.

3.4. Diseño de mezcla asfáltica por el Método Marshall

3.4.1. Diseño Granulométrico

En la presente investigación se realizará el diseño granulométrico con los diferentes tipos de agregados (Triturado, Natural y Gravilla-arenosa), para lo cual se determina una curva granulométrica que se encuentre dentro de los rangos requeridos de la norma ASTM D3515 del método Marshall, utilizando los resultados de las diferentes granulometrías realizadas anteriormente.

Para el diseño de las fajas granulométricas se utilizarán los materiales ya caracterizados, tanto para el material grueso y fino, con lo cual se establecerá ciertos porcentajes para cada agregado estableciendo un diseño granulométrico que se encuentre dentro de las especificaciones de dicha norma.

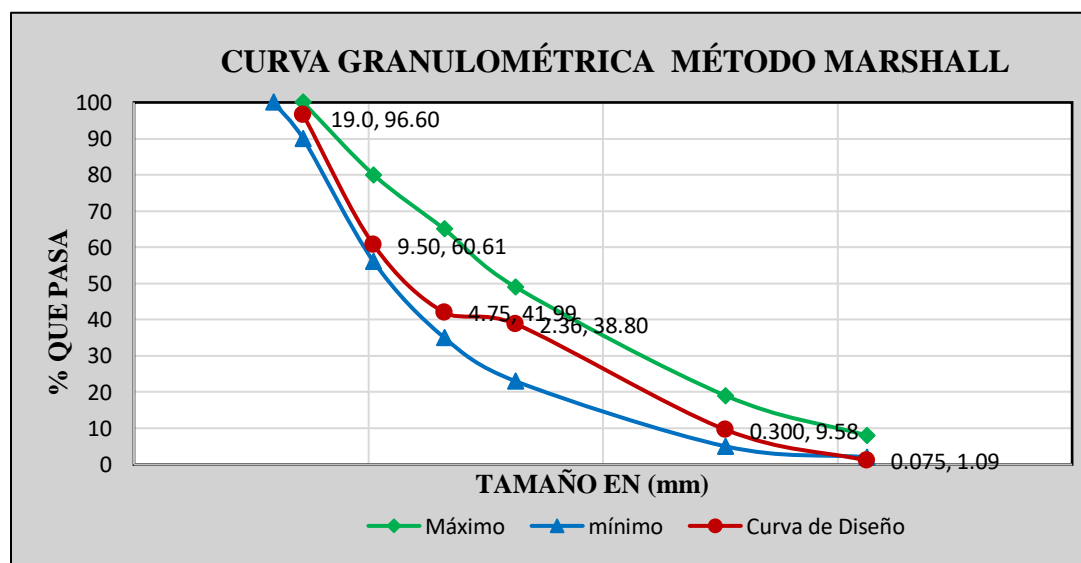
3.4.1.1. Agregado no chancado (ASTM D 3515)

Tabla 3.63: *Diseño granulométrico (agregado no chancado)*

Tamices N°	Grava 25,00 (%)	Gravilla 32,00 (%)	Arena 43,00 (%)	% retenido	% que pasa	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
1"	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4"	170,16	0,00	0,00	3,40	96,60	90	100
1/2"	651,81	245,73	0,00	21,35	78,65	-	-
3/8"	260,90	641,09	0,00	39,39	60,61	56	80
N° 4	167,14	713,18	50,37	58,01	41,99	35	65
N° 8	0,00	0,00	159,54	61,20	38,80	23	49
N° 16	0,00	0,00	338,26	67,97	32,03	-	-
N° 30	0,00	0,00	569,50	79,36	20,64	-	-
N° 50	0,00	0,00	553,12	90,42	9,58	5	19
N°100	0,00	0,00	329,50	97,01	2,99	-	-
N° 200	0,00	0,00	94,83	98,91	1,09	2	8
Base	0,00	0,00	54,73	100,00	0,00	-	-

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.7: *Curva granulométrica diseño Marshall (agregado no chancado)*



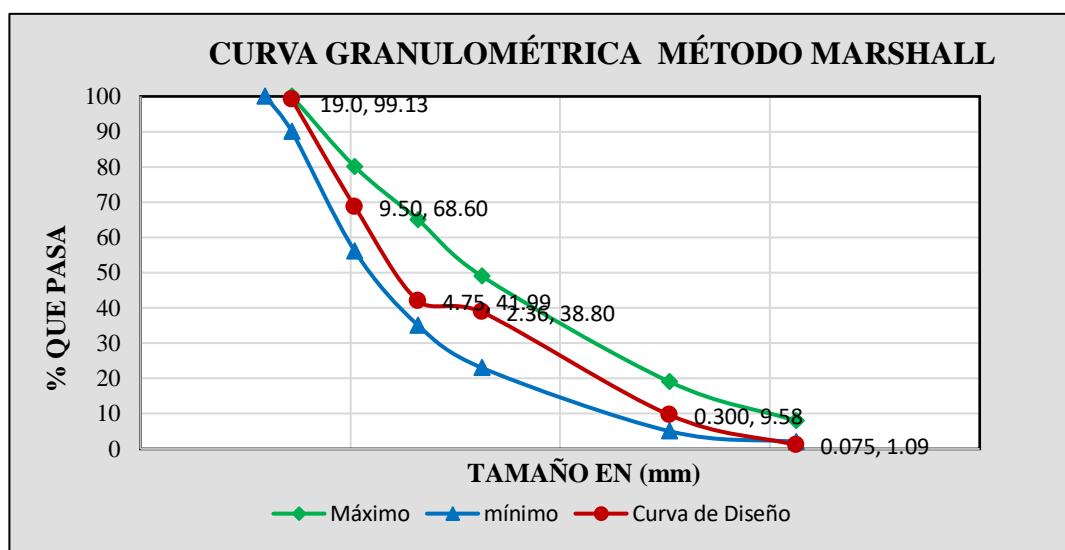
3.4.1.2. Agregado chancado (ASTM D 3515)

Tabla 3.64: Diseño granulométrico (agregado chancado)

Tamices N°	Grava 25,00 (%)	Gravilla 32,00 (%)	Arena 43,00 (%)	% retenido	% que pasa	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
1"	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4"	43,46	0,00	0,00	0,87	99,13	90	100
1/2"	853,54	12,92	0,00	18,20	81,80	-	-
3/8"	273,04	386,94	0,00	31,40	68,60	56	80
N° 4	79,97	1200,14	50,37	58,01	41,99	35	65
N° 8	0,00	0,00	159,54	61,20	38,80	23	49
N° 16	0,00	0,00	338,26	67,97	32,03	-	-
N° 30	0,00	0,00	569,50	79,36	20,64	-	-
N° 50	0,00	0,00	553,12	90,42	9,58	5	19
N° 100	0,00	0,00	329,50	97,01	2,99	-	-
N° 200	0,00	0,00	94,83	98,91	1,09	2	8
Base	0,00	0,00	54,73	100,00	0,00	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.8: Curva granulométrica formada diseño Marshall (agregado chancado)



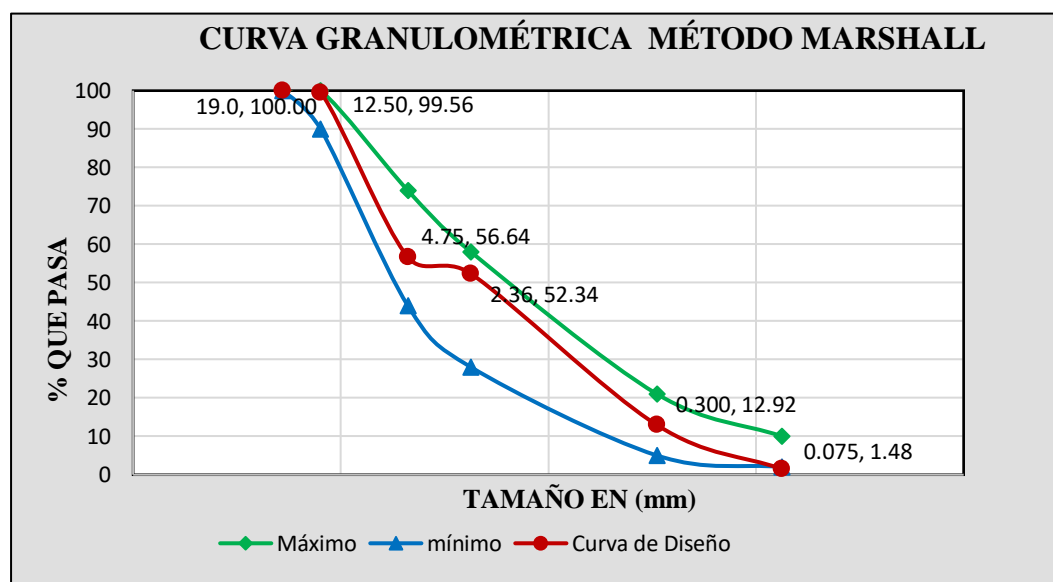
3.4.1.3. Agregado gravilla arenosa (ASTM D 3515)

Tabla 3.65: *Diseño granulométrico (agregado gravilla arenosa)*

Tamices N°	Grava 0,00 (%)	Gravilla 42,00 (%)	Arena 58,00 (%)	% retenido	% que pasa	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
1"	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	-	-
3/4"	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
1/2"	0,00	16,96	0,00	0,34	99,66	90	100
3/8"	0,00	507,86	0,00	10,50	89,50	-	-
N° 4	0,00	1575,19	67,95	43,36	56,64	44	74
N° 8	0,00	0,00	215,19	47,66	52,34	28	58
N° 16	0,00	0,00	456,26	56,79	43,21	-	-
N° 30	0,00	0,00	768,16	72,15	27,85	-	-
N° 50	0,00	0,00	746,07	87,08	12,92	5	21
N° 100	0,00	0,00	444,45	95,97	4,03	-	-
N° 200	0,00	0,00	127,91	98,52	1,48	2	10
Base	0,00	0,00	73,83	100,00	0,00	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.9: *Curva granulométrica formada diseño Marshall (gravilla arenosa)*



3.4.2. Dosificación de mezclas asfálticas.

Con la granulometría de diseño ya elaborado, con los diferentes agregados se prosigue a la dosificación, con la elaboración de briquetas con un porcentaje de cemento asfáltico en su contenido el cual determinara el porcentaje óptimo de cemento asfáltico, necesario para el diseño con el filler a diferente cantidad de porcentaje.

Para esto se fabricarán en total 15 briquetas, 3 briquetas por cada porcentaje de cemento asfáltico las cuales varían de 0,5 %, como también varían los porcentajes de agregados tanto grueso como fino en la mezcla, de la cual determinaremos y evaluaremos las variaciones en las propiedades mecánicas que presenten en base a los ensayos realizados.

3.4.2.1. Dosificación con variaciones de porcentajes del contenido de asfalto

3.4.2.1.1. Dosificación con agregado no chancado (natural)

Tabla 3.66: *Dosificación con diferentes porcentajes de c.a., con agregado no chancado*

Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla					
Porcentaje de c.a. (%)	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	6.5%
Porcentaje de agregado (%)	95.50%	95.00%	94.50%	94.00%	93.50%
Peso del cemento asfáltico (gr)	54.00	60.00	66.00	72.00	78.00
Peso de grava (gr)	286.50	285.00	283.50	282.00	280.50
Peso de gravilla (gr)	366.72	364.80	362.88	360.96	359.04
Peso de arena (gr)	492.78	490.20	487.62	485.04	482.46
Peso total de la briqueta (gr)	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.1.2. Dosificación con agregado chancado (triturado)

Tabla 3.67: *Dosificación con diferentes porcentajes de c.a., con agregado chancado*

Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla					
Porcentaje de c.a. (%)	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	6.5%
Porcentaje de agregado (%)	95.50%	95.00%	94.50%	94.00%	93.50%
Peso del cemento asfáltico (gr)	54.00	60.00	66.00	72.00	78.00
Peso de grava (gr)	286.50	285.00	283.50	282.00	280.50
Peso de gravilla (gr)	366.72	364.80	362.88	360.96	359.04
Peso de arena (gr)	492.78	490.20	487.62	485.04	482.46
Peso total de la briqueta (gr)	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.1.3. Dosificación con agregado gravilla-arenosa (combinado)

Tabla 3.68: *Dosificación con diferentes porcentajes de c.a., con gravilla-arenosa*

PORCENTAJE DE CEMENTO ASFÁLTICO EN LA MEZCLA					
Porcentaje de c.a. (%)	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	6.5%
Porcentaje de agregado (%)	95.50%	95.00%	94.50%	94.00%	93.50%
Peso del cemento asfáltico (gr)	54.00	60.00	66.00	72.00	78.00
Peso de grava (gr)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Peso de gravilla (gr)	481.32	478.80	476.28	473.76	471.24
Peso de arena (gr)	664.68	661.20	657.72	654.24	650.76
Peso total de la briqueta (gr)	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.2. Elaboración de briquetas

El siguiente procedimiento será aplicado para obtener el contenido óptimo del cemento asfáltico que será utilizado para el diseño de mezclas asfálticas en caliente, éste se realizará mediante el método Marshall de acuerdo a la Norma (ASTM D-159) que es empleado también para proyectos en laboratorio y comprobación en obra de las mezclas que contienen cemento asfáltico y áridos cuyo tamaño máximo no exceda de $\frac{3}{4}$ " pulgadas. El propósito del método de dosificación Marshall es determinar el contenido óptimo de betún para una combinación específica de áridos.

Materiales:

- Molde de compactación que consta de una base, molde encofrado y collar de extensión, el molde tiene un diámetro de 4" (101,6 mm) y una altura de 3" (76 mm). La base y el collar están diseñados para intercambiarse ya sea a uno u otro lado del molde.
- Martillo de compactación, que consta de una barra achatada que cae deslizándose sobre una guía y un pisón de cara circular de 3 $\frac{7}{8}$ " (98,4 mm). La barra pesa 10 libras (4,5 kg) y una caída (guía) de 18" de altura.
- Extractor de muestra o prensa para extraer la briketa ya compactada.
- Balanza de 2 – 5 kg de capacidad, con aproximación a 0,1 g.
- Termómetro blindado de vidrio o dial con varilla para lecturas grandes.
- Bandejas metálicas.
- Accesorios como cuchara, espátula, brocha, baño de agua hirviendo, etc.

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 calculado para un grupo de briquetas, luego cada bandeja es colocada en la placa de calentamiento para calentar su contenido a una temperatura de 175 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 asfalto calculado para un porcentaje de la mezcla total.

Figura 3.19: *Pesado de materiales para la mezcla asfáltica*



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 107°C ni 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 18 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 3.20: *Proceso de elaboración de las briquetas*



Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.3. Rotura de briquetas para la determinación de la estabilidad y fluencia.

Para la rotura de las briquetas, se debe realizar diversos ensayos para la recolección de datos necesarios para determinar las características de las mismas como ser:

Figura 3.21: *Proceso de desmolde y marcación de las briquetas*



Fuente: Elaboración propia

Desmoldadas las briquetas y dejando enfriar 24 horas, se procede a medir las alturas en cuatro puntos diferentes de la briqueta, se procede con un vernier para luego determinar una altura media la cual será corregida mediante un factor de corrección.

Figura 3.22: *Desmolde y medición de alturas de las briquetas*



Fuente: Elaboración propia

Antes de realizar el ensayo la muestra se debe pesarse en seco, saturado superficialmente seco y sumergida en agua. Este método establece densidades y contenidos óptimos de huecos que se han de cumplir durante la construcción del pavimento. Antes de su ruptura debe ser sumergidas 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 3.23: *Proceso de los diferentes pesados de las briquetas*



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 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.

Figura 3.24: *Proceso de rotura de la briqueta*



Fuente: Elaboración propia.

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.

3.4.3. Proceso de cálculo de propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica

Para la este proceso se siguieron diversos pasos, los cuales se demostrarán utilizando la briqueta con un porcentaje de cemento asfáltico de 4,5 % en una dosificación con material pétreo chancado (triturado), como referente.

3.4.3.1. Identificación de briquetas

la cual se realizará enumerando cada una de ellas que usualmente se preparan 3 briquetas para cada porcentaje de contenido de asfalto.

3.4.3.2. Altura de las briquetas

Se realiza la medición de las alturas las cuales serán en cuatro puntos diferentes que determinarán un valor promedio, la cual represente un valor significativo de las alturas, después de haber elaborado la briqueta con el porcentaje de cemento asfáltico correspondiente.

Tabla 3.69: *Alturas medidas de la briqueta*

Briqueta	Alturas (cm)				Promedio (cm)
	1	2	3	4	
1	6,85	6,86	6,83	6,84	6,85
2	6,00	6,10	6,10	6,10	6,10
3	6,10	6,10	6,15	6,20	6,14

Fuente: Elaboración propia.

3.4.3.3. Base de mezclas y agregados

Para la base de mezcla se toma el porcentaje de asfalto para elaborar las 3 briquetas en este cálculo el porcentaje de asfalto es de 4,5 %. Mientras que para la base de agregado se realiza el siguiente procedimiento de cálculo.

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

$$\text{Base de agregado} = \frac{4,5 * 100}{100 - 4,5}$$

Base de agregado = 4,712

3.4.3.4. Peso de la Briqueta en el Aire

El peso de la briqueta en el aire consiste en medir su peso una vez desmoldada la misma y limpiada en su superficie.

Tabla 3.70: *Peso al Aire de las briquetas*

Briqueta	Peso briqueta en el aire (gr)
1	1150,7
2	1182,4
3	1209,5

Fuente: Elaboración propia.

3.4.3.5. Peso de la briqueta en el aire saturado superficialmente seco (S.S.S.)

El peso de la briqueta saturado superficialmente seco consiste en medir su peso una vez secada la briqueta después de estar sumergida en agua por un lapso de 30 minutos a 25°C.

Tabla 3.71: *Peso briqueta saturada superficialmente seca (S.S.S)*

Briqueta	Peso briqueta en el aire S.S.S. (gr)
1	1153,2
2	1184,7
3	1210,5

Fuente: Elaboración propia.

3.4.3.6. Peso de la briqueta sumergida en el agua

El peso de la briqueta sumergida en agua consiste en medir su peso una vez transcurrido 30 minutos sumergida en agua a 25°C.

Tabla 3.72: *Peso briqueta sumergida en agua*

Briqueta	Peso briqueta sumergida en agua (gr)
1	659,0
2	669,0
3	681,0

Fuente: Elaboración Propia.

3.4.3.7. Volumen de la briqueta

Vol. de briqueta = Peso briqueta en el aire S.S.S - Peso de briqueta sumergida

$$\text{Vol. de briqueta} = 1153,2 - 659$$

$$\text{Vol. de briqueta} = 494,2 \text{ [gr]}$$

Debido a que el peso es del agua y su peso específico es 1 gr/cm³ se considera:

$$\text{Vol. de briqueta} = 494,2 \text{ [cm}^3\text{]}$$

3.4.3.8. Densidad de la briqueta

Este proceso de cálculo se realiza para la briqueta identificada como 1.

3.4.3.8.1. Densidad real de la briqueta

$$\text{Densidad real} = \frac{\text{Peso de la briqueta en el aire}}{\text{Volumen de la muestra}}$$

$$\text{Densidad real} = \frac{1150,7 \text{ gr}}{494,2 \text{ cm}^3}$$

$$\text{Densidad real} = 2,33 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$$

3.4.3.8.2. Densidad máxima teórica de la briqueta

$$\text{Densidad máx.} = \frac{100}{\frac{\% \text{ de asfalto}}{\text{peso específico asfalto}} + \frac{100 - \% \text{ de asfalto}}{\text{peso específico agregado grueso}}}$$

$$\text{Densidad máx.} = \frac{100}{\frac{4,5}{1,024} + \frac{100-4,5}{2,67}}$$

$$\text{Densidad máx.} = 2,48 \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right]$$

3.4.3.9. Porcentaje de vacíos

Este proceso de cálculo se realiza para la briqueta identificada como 1.

3.4.3.9.1. Porcentaje de vacíos de la mezcla (Vv)

$$V_v = \frac{\text{Densidad máx} - \text{Densidad real promedio}}{\text{Densidad máx}} * 100\%$$

$$V_v = \frac{2,48 - 2,30}{2,48} * 100\%$$

$$V_v = 7,20 \%$$

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

$$V.A.M. = \frac{\% \text{ de asfalto} * \text{Densidad real promedio}}{\text{Peso específico de asfalto}} + \% \text{ de vacíos (Vv)}$$

$$V.A.M. = \frac{4,5 * 2,30}{1,024} + 7,20$$

$$V.A.M. = 17,31 \%$$

3.4.3.9.3. Porcentaje de Vacíos Llenos de Asfalto (R.B.V.)

$$R.B.V. = \frac{VAM - V_v}{VAM} * 100$$

$$R.B.V. = \frac{17,31 - 7,20}{17,31} * 100$$

$$R.B.V. = 58,43 \%$$

3.4.3.10. Estabilidad y fluencia

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

Tabla 3.73: Datos del ensayo de estabilidad y fluencia

Briqueta	Lectura dial	
	Estabilidad (lb)	Fluencia (plg)
1	2696,12	13
2	2755,36	12
3	2685,35	15

Fuente: Elaboración propia.

Después del cálculo de estabilidad real se procede a corregir por la altura de la briqueta con la siguiente fórmula:

$$\text{Estabilidad corregida} = \text{Estabilidad} * \text{Factor corrección de altura}$$

Dónde:

Factor de correc. de altura = Es el factor de corrección de acuerdo a la altura de la briqueta según el método Marshall cuando la altura es diferente de 63,5mm.

Tabla 3.74: *Alturas promedio y factor de corrección por altura*

Briqueta	Promedio de alturas (cm)	Factor de corrección por altura	Promedio del factor de corrección
1	6,85	0,8863	
2	6,10	1,0710	1,005
3	6,14	1,0590	

Fuente: Manual de la ABC vol. 4A tabla A0608_1. Factores de corrección por altura para estabilidad Marshall (Normativa AASHTO).

Tabla 3.75: *Estabilidad corregida*

Briqueta	Estabilidad real (lb)	Promedio de factor de corrección	Estabilidad corregida (lb)
1	2696,12		2389,57
2	2755,36	1,005	2950,99
3	2685,35		2843,79

Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, se tiene los siguientes resultados:

Tabla 3.76: *Resultados de la estabilidad y fluencia*

Briqueta	Estabilidad (lb)		Fluencia	
	Corregida	Promedio	1/100"	Promedio
1	2389,57		13	
2	2950,99	2728,12	12	13,33
3	2843,79		15	

Fuente: Elaboración propia.

3.4.4. Datos y resultados de propiedades mecánicas Marshall

Del proceso de rotura de briquetas realizadas, se obtuvieron los siguientes datos y resultados de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas por el método Marshall para diferentes porcentajes de cemento asfáltico, como se muestra en las siguientes tablas:

3.4.4.1. Con agregado no chancado (natural)

Tabla 3.77: Resultados del diseño de la mezcla asfáltica (agregado no chancado)

% de asfalto	Identificación	Altura promedio (cm)	Densidad real promedio (gr/cm ³)	% Vacíos en la mezcla (V _v)	% Vacíos de agregado mineral (V.A.M)	R.B.V. (Relación betumen vacíos)	Estabilidad promedio (lb)	Fluencia 1/100" promedio
4,5	1	6,13	2,25	9,86	19,74	50,04	3132,47	15,00
	2	6,13						
	3	6,20						
5,0	4	6,15	2,29	7,51	18,68	59,80	3271,61	13,67
	5	6,15						
	6	6,10						
5,5	7	6,15	2,34	4,67	17,23	72,88	3317,36	14,00
	8	6,10						
	9	6,13						
6,0	10	6,15	2,36	3,16	16,96	81,40	3281,60	16,33
	11	6,10						
	12	6,20						
6,5	13	6,10	2,32	3,75	18,49	79,72	3167,70	20,00
	14	6,13						
	15	6,20						

Fuente: Elaboración propia.

3.4.4.2. Con agregado chancado (triturado).

Tabla 3.78: Resultados del diseño de la mezcla asfáltica (agregado chancado)

% de asfalto	Identificación	Altura promedio (cm)	Densidad real promedio (gr/cm ³)	% Vacíos en la mezcla (Vv)	% Vacíos de Agregado Mineral (V.A.M)	R.B. V. (Relación betumen vacíos)	Estabilidad promedio (lb)	Fluencia 1/100 ² promedio
4,5	1	6,85						
	2	6,10	2,30	7,20	17,31	58,43	2728,12	13,33
	3	6,14						
5,0	4	6,15						
	5	6,08	2,33	5,18	16,57	68,74	3157,89	14,00
	6	6,00						
5,5	7	6,00						
	8	6,13	2,34	4,03	16,60	75,75	3375,02	15,33
	9	6,13						
6,0	10	6,10						
	11	6,40	2,32	3,93	17,55	77,62	3346,58	17,00
	12	6,25						
6,5	13	6,10						
	14	6,20	2,29	4,64	19,17	75,80	3138,26	20,00
	15	6,20						

Fuente: Elaboración propia.

3.4.4.3. Con agregado gravilla arenosa (combinación de agregado)

Tabla 3.79: Resultados del diseño de la mezcla asfáltica (gravilla arenosa)

% de asfalto	Identificación	Altura promedio (cm)	Densidad real promedio (gr/cm ³)	% Vacíos en la mezcla (Vv)	% Vacíos de Agregado Mineral (V.A.M)	R.B. V. (Relación betumen vacíos)	Estabilidad promedio (lb)	Fluencia 1/100' promedio
4,5	1	6,30	2,25	9,07	18,98	52,22	2976,47	16,33
	2	6,25						
	3	6,23						
5,0	4	6,31	2,30	6,53	17,76	63,22	3086,48	15,67
	5	6,30						
	6	6,30						
5,5	7	6,20	2,34	4,08	16,65	75,50	3112,12	14,00
	8	6,35						
	9	6,25						
6,0	10	6,35	2,34	3,45	17,14	79,86	2965,32	14,00
	11	6,25						
	12	6,30						
6,5	13	6,30	2,29	4,77	19,27	75,27	2786,08	14,67
	14	6,25						
	15	6,25						

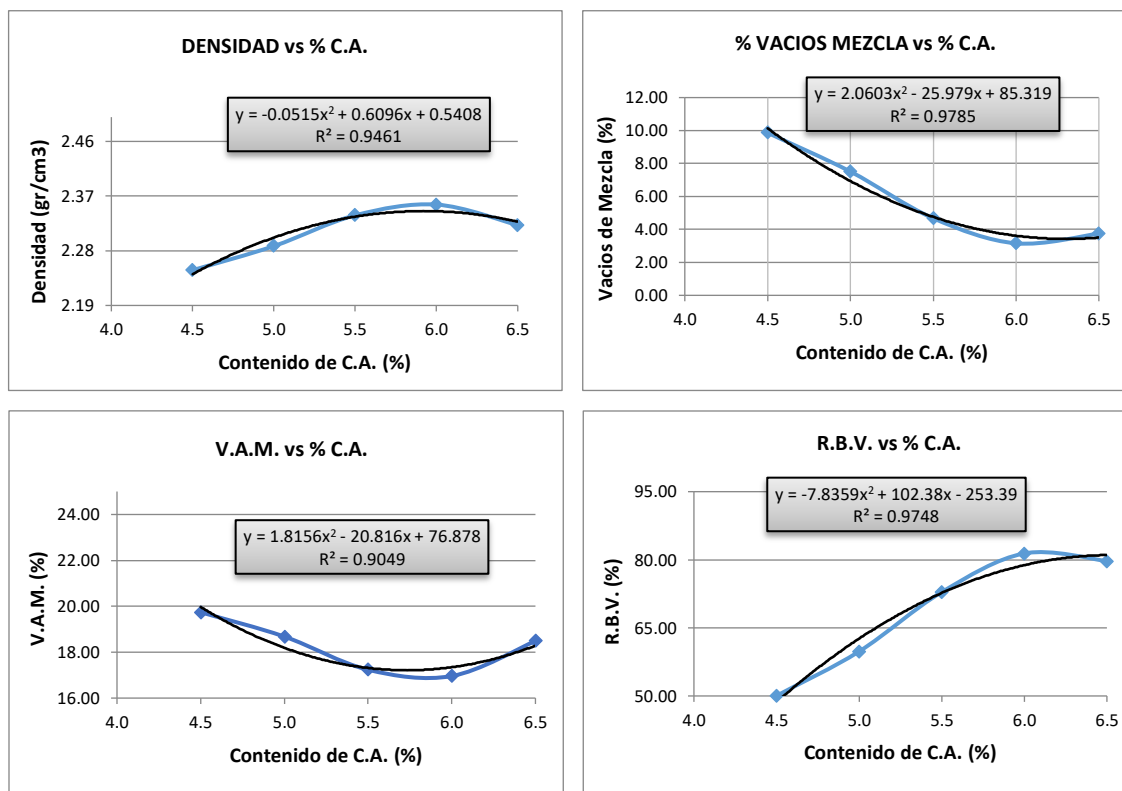
Fuente: Elaboración propia.

3.4.5. Determinación de porcentaje óptimo de cemento asfáltico

Obtenido los resultados de las tablas de las propiedades Marshall, se procede a graficar los valores en el eje X, los porcentajes del cemento asfáltico y en el eje Y, los valores de las propiedades Marshall obtenidas, para cada porcentaje de cemento asfáltico, como se muestran a continuación:

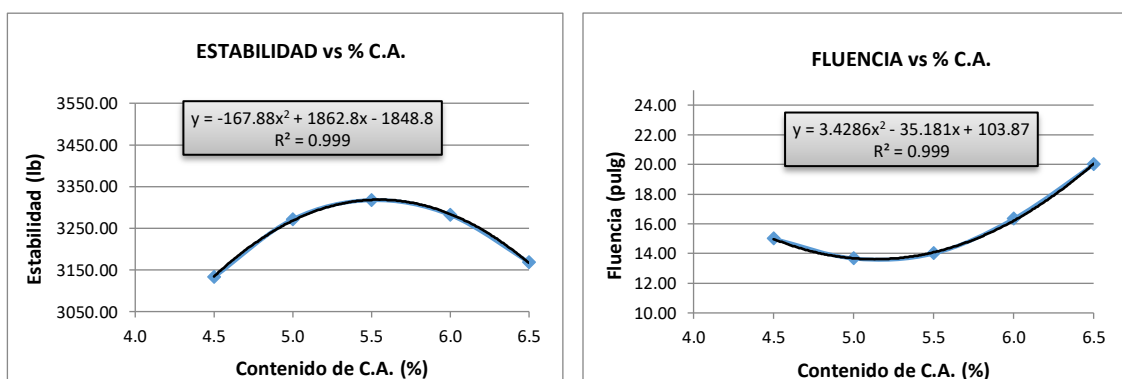
3.4.5.1. Con agregado no chancado (natural)

Gráfico 3.10: Curvas de propiedades volumétricas Marshall (agregado no chancado)



Fuente: Elaboración propia.

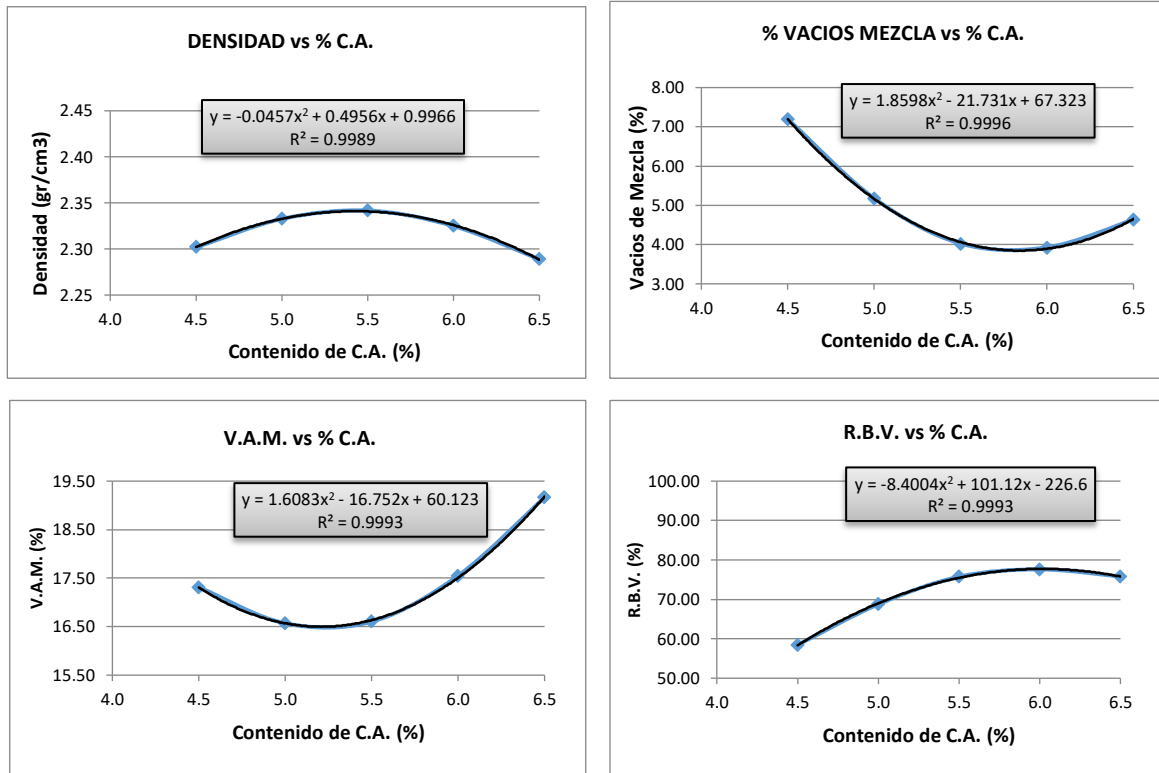
Gráfico 3.11: Curvas de estabilidad y fluencia Marshall (agregado no chancado)



Fuente: Elaboración propia.

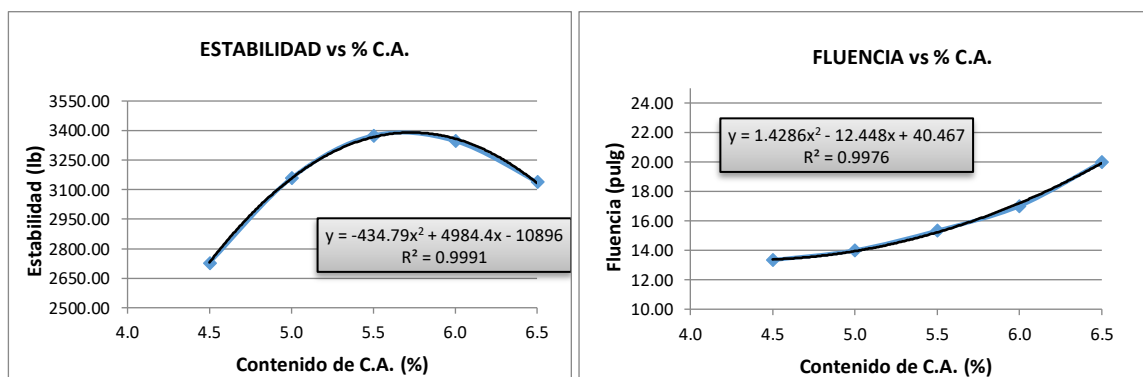
3.4.5.2. Con agregado chancado (triturado)

Gráfico 3.12: Curvas de propiedades volumétricas Marshall (agregado chancado)



Fuente: Elaboración propia.

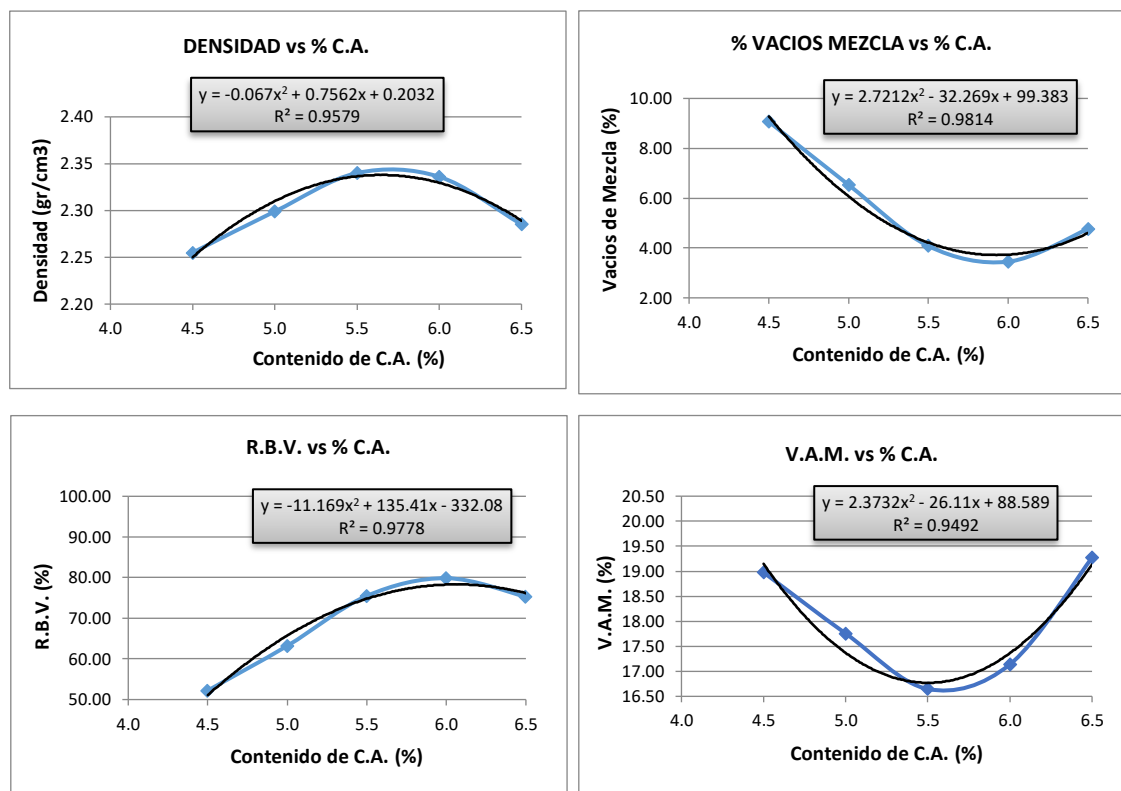
Gráfico 3.13: Curvas de estabilidad y fluencia Marshall (agregado chancado)



Fuente: Elaboración propia.

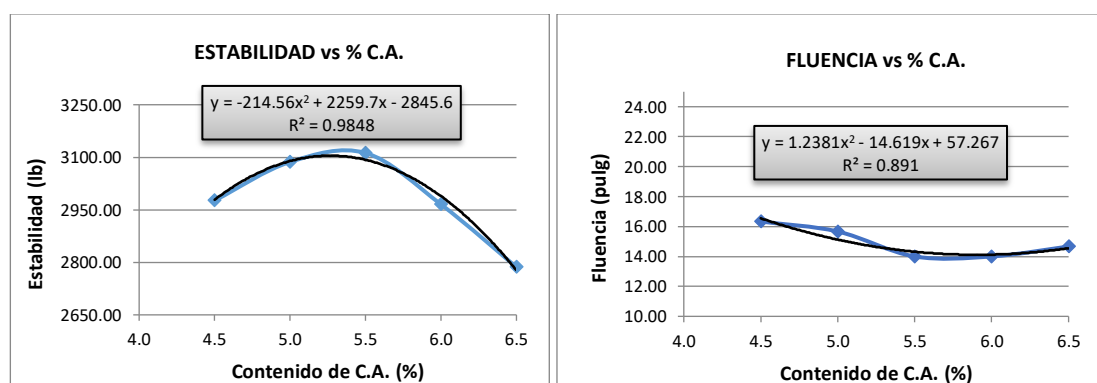
3.4.5.3. Con agregado gravilla arena (combinación de agregado)

Gráfico 3.14: Curvas de propiedades volumétricas Marshall (gravilla arenosa)



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.15: Curvas de estabilidad y fluencia Marshall (gravilla-arenosa)



Fuente: Elaboración propia.

Con las ecuaciones obtenidas de las curvas de la densidad, estabilidad y % de vacíos de las mezclas con los diferentes agregados pétreos se procede a calcular y determinar el porcentaje óptimo de cemento asfáltico, cumpliendo los siguientes criterios:

- a. Porcentaje de cemento asfáltico que genere la densidad máxima.
- b. Porcentaje de cemento asfáltico que genere la estabilidad máxima.
- c. 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 valores de porcentaje, se determina un valor promedio, el cual dicho promedio será el porcentaje óptimo de cemento asfáltico en cada mezcla asfáltica realizada, con los diferentes tipos de agregados pétreos utilizados, como se muestra en las siguientes tablas.

3.4.6. Resultados de porcentaje óptimo de cemento asfáltico PROBISA 85-100

3.4.6.1. Agregado no chancado

Tabla 3.80: Resultados de las gráficas del método Marshall (agregado no chancado)

	Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Estabilidad Marshall (Lb)	3318,62	5,55
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2,34	5,84
	Vacíos de la mezcla (%)	4,00	5,60
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%) =	5.66

Fuente: Elaboración propia.

3.4.6.2. Agregado chancado

Tabla 3.81: Resultados de las gráficas del método Marshall (agregado chancado)

	Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Estabilidad Marshall (Lb)	3386,90	5,73
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2,34	5,42
	Vacíos de la mezcla (%)	4,00	5,50
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%) =	5.55

Fuente: Elaboración propia.

3.4.6.3. Agregado gravilla-arenosa

Tabla 3.82: Resultados de las gráficas del método Marshall (agregado gravilla arenosa)

	Ensayo	Valor de Diseño	% de C.A.
Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Estabilidad Marshall (Lb)	3104,07	5,27
	Densidad máxima (gr/cm ³)	2,34	5,62
	Vacíos de la mezcla (%)	4,00	5,50
	% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%) =	5.46

Fuente: Elaboración propia.

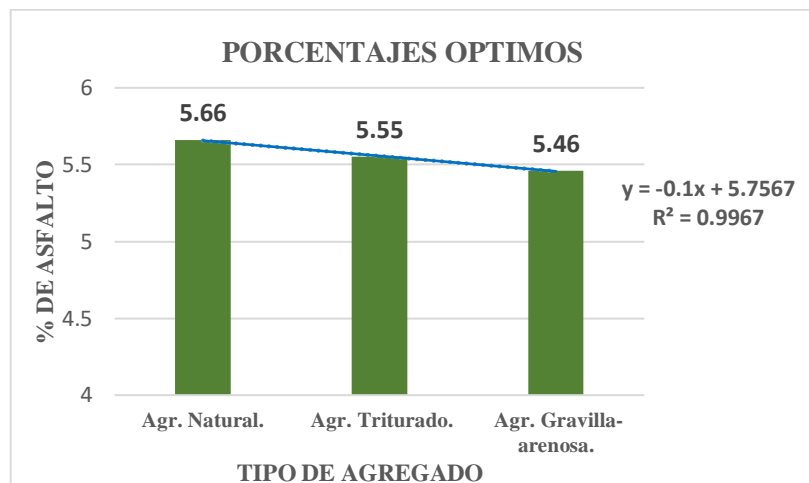
Los porcentajes óptimos de diseño de mezcla asfáltica, con el tipo de agregado son las siguientes:

Tabla 3.83: Resultado de porcentaje óptimo de c.a. para cada agregado

Diseño de mezcla según el tipo agregado	% óptimo de C.A.
Agregado no chancado	5,66
Agregado chancado	5,55
Agregado gravilla-arenosa	5,46

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.16: Resultados de porcentajes óptimos de c.a., según el tipo de agregado



Fuente: Elaboración propia.

En el siguiente gráfico 3.16, se puede observar que el comportamiento del porcentaje óptimo de asfalto para cada tipo de agregado, presenta una tendencia descendente, aunque mínima pero considerable, las cuales serán utilizadas para la realización de las mezclas con adición de la llenante mineral o filler (cemento portland), modificando los porcentajes para la elaboración de las briquetas convencionales con cemento asfáltico PROBISA 85-100.

CAPÍTULO IV

EVALUACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON ADICIÓN DE LLENANTE MINERAL O FILLER

CAPÍTULO IV

EVALUACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICA CON ADICIÓN DE LLENANTE MINERAL O FILLER

4.1. Resultados de caracterización de los componentes de las mezclas asfálticas

4.1.1. Agregados pétreos

En las siguientes tablas se presentan los resultados obtenidos de la recolección de información, de los diferentes tipos de agregados utilizados para la investigación, los mismos que son comparados con las especificaciones presentes en la norma ASTM.

Tabla 4.1: *Resultados de la caracterización de agregado no chancado*

Ensayo	Agregados	Especificación		Resultado	ASTM
		Mín.	Máx.		
Desgaste mediante la máquina de los Ángeles	Grava 3/4"	-	35 %	20,42	C-131
	Gravilla 3/8"	-	35 %	22,10	
Peso específico y absorción de agua en agregados gruesos	Grava 3/4"	-	-	2,66	C-127
	Gravilla 3/8"	-	-	2,71	
Peso específico y absorción de agua en agregados finos	Arena	-	-	2,68	C-128
	Grava 3/4"	-	-	1,47	
Peso unitario	Gravilla 3/8"	-	-	1,42	C-29
	Arena	-	-	1,62	
Equivalente de arena	-	50 %	-	76,72	D-2419

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.2: *Resultados de la caracterización de agregado chancado*

Ensayo	Agregados	Especificación		Resultado	ASTM
		Mín.	Máx.		
Desgaste mediante la máquina de los Ángeles	Grava 3/4"	-	35 %	25,09	C-131
	Gravilla 3/8"	-	35 %	27,34	
Peso específico y absorción de agua en agregados gruesos	Grava 3/4"	-	-	2,64	C-127
	Gravilla 3/8"	-	-	2,65	
Peso específico y absorción de agua en agregados finos	Arena	-	-	2,68	C-128
	Grava 3/4"	-	-	1,56	
Peso unitario	Gravilla 3/8"	-	-	1,46	C-29
	Arena	-	-	1,62	
Equivalente de arena	-	50 %	-	76,72	D-2419

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.3: Resultados de la caracterización de agregado gravilla arenosa

Ensayo	Agregados	Especificación		Resultado	ASTM
		Mín.	Máx.		
Desgaste mediante la máquina de los Ángeles	Gravilla 3/8"	-	35 %	27,34	C-131
Peso específico y absorción de agua en agregados gruesos	Gravilla 3/8"	-	-	2,65	C-127
Peso específico y absorción de agua en agregados finos	Arena	-	-	2,68	C-128
Peso unitario	Gravilla 3/8"	-	-	1,46	C-29
	Arena	-	-	1,62	
Equivalente de arena	-	50 %	-	76,72	D-2419

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2. Cemento asfáltico (PROBISA 85-100 Chile)

Se presenta los resultados obtenidos de la recolección de información, los mismos que son comparados con las especificaciones presentes en la norma ASTM.

Tabla 4.4: Resultados de caracterización del C.A. PROBISA 85-100

Ensayo	Especificación		Resultado	Norma
	Mínimo	Máximo		
Peso específico	1	1,05	1,024 gr/cm³	ASTM D-70
Película delgada	-	1,0	0,7 %	ASTM D-1754
Punto de ablandamiento	43	53	48 °C	ASTM D-36
Punto de inflamación	232	-	281 °C	ASTM D-92
Penetración	85	100	93 mm	ASTM D-5
Ductilidad	100	-	115 cm	ASTM D-113

Fuente: Elaboración propia.

4.1.3. Llenante mineral o filler (cemento portland)

Se presenta los resultados obtenidos de la recolección de información, los mismos que son comparados con las especificaciones presentes en la norma ASTM.

Tabla 4.5: Resultados de caracterización de llenante mineral (cemento)

Ensayo	Resultado	Norma
Peso específico del cemento	2,92 gr/cm³	ASTM C-188
Finura del cemento	2,53 %	ASTM C-204

Fuente: Elaboración propia.

4.2. Diseño de mezclas asfálticas con llenante mineral (cemento portland)

Después de haber realizado el diseño de una mezcla asfáltica mediante la elaboración de briquetas con variación de porcentajes de cemento asfáltico en diferentes tipos de agregados pétreos y obtener el óptimo de cemento asfáltico, se procede con este dato al diseño de mezcla asfáltica con la inclusión de llenante mineral o filler (cemento portland) a diferentes porcentajes (0%, 2%, 4%, 5%, 6%, 8%), para así poder determinar el contenido óptimo de filler con los distintos tipos de agregados utilizados en la elaboración de las briquetas.

4.3. Dosificación con cemento asfáltico óptimo y adición porcentual de filler

4.3.1 Agregado no chancado (natural)

Tabla 4.6: Dosificación con c.a., óptimo en agregado no chancado y % de filler

Porcentajes de filler (Cemento portland)						
Porcentaje de filler (%)	0.00%	2.00%	4.00%	5.00%	6.00%	8.00%
Porcentaje de c.a. (%)	5.66%	5.66%	5.66%	5.66%	5.66%	5.66%
Porcentaje de agregado (%)	94.34%	94.34%	94.34%	94.34%	94.34%	94.34%
Peso de filler (gr)	0.000	22.642	45.283	56.604	67.925	90.566
Peso de c.a. (gr)	67.92	67.92	67.92	67.92	67.92	67.92
Peso de grava (gr)	283.02	283.02	283.02	283.02	283.02	283.02
Peso de gravilla (gr)	362.27	362.27	362.27	362.27	362.27	362.27
Peso de arena (gr)	486.79	464.15	441.51	430.19	418.87	396.23
Peso total de la briqueta (gr)	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia.

4.3.2. Agregado chancado (triturado)

Tabla 4.7: *Dosificación con c.a., óptimo en agregado chancado y % de filler*

Porcentajes de filler (Cemento portland)						
Porcentaje de filler (%)	0.00%	2.00%	4.00%	5.00%	6.00%	8.00%
Porcentaje de c.a. (%)	5.55%	5.55%	5.55%	5.55%	5.55%	5.55%
Porcentaje de agregado (%)	94.45%	94.45%	94.45%	94.45%	94.45%	94.45%
Peso de filler (gr)	0.000	22.668	45.336	56.670	68.004	90.672
Peso de c.a. (gr)	66.60	66.60	66.60	66.60	66.60	66.60
Peso de grava (gr)	283.35	283.35	283.35	283.35	283.35	283.35
Peso de gravilla (gr)	362.69	362.69	362.69	362.69	362.69	362.69
Peso de arena (gr)	487.36	464.69	442.03	430.69	419.36	396.69
Peso total de la briqueta (gr)	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia.

4.3.3. Agregado gravilla-arenosa

Tabla 4.8: *Dosificación con c.a., óptimo en agregado gravilla arenosa y % de filler*

Porcentajes de filler (Cemento portland)						
Porcentaje de filler (%)	0.00%	2.00%	4.00%	5.00%	6.00%	8.00%
Porcentaje de c.a. (%)	5.46%	5.46%	5.46%	5.46%	5.46%	5.46%
Porcentaje de agregado (%)	94.54%	94.54%	94.54%	94.54%	94.54%	94.54%
Peso de filler (gr)	0.000	22.690	45.379	56.724	68.069	90.758
Peso de c.a. (gr)	65.52	65.52	65.52	65.52	65.52	65.52
Peso de grava (gr)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Peso de gravilla (gr)	476.48	476.48	476.48	476.48	476.48	476.48
Peso de arena (gr)	658.00	635.31	612.62	601.27	589.93	567.24
Peso total de la briqueta (gr)	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia.

4.4. Resultados de propiedades Marshall con adición de llenante mineral

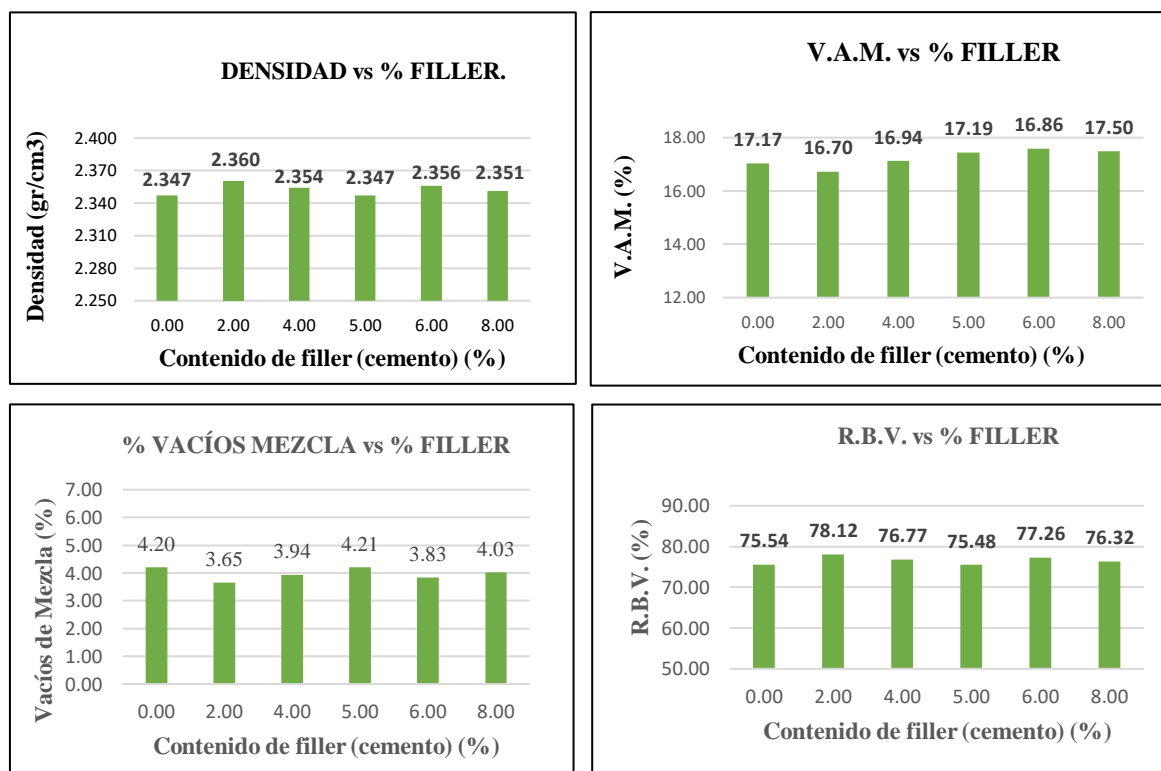
4.4.1. Agregado no chancado (natural)

Tabla 4.9: Resultado de la mezcla asfáltica con agregado no chancado y adición de filler (cemento portland) en porcentaje

% de C.A. óptimo	% del filler (cemento portland)	Identificación	Altura promedio (cm)	Densidad real promedio (gr/cm ³)	% Vacíos en la mezcla (Vv)	% Vacíos de agregado mineral (V.A.M)	Relación betumen vacíos (R.B.V.)	Estabilidad promedio (lb)	Fluencia 1/100" promedio
5,66	0,0	1	6,00						
		2	6,10	2,347	4,20	17,17	75,54	2490,49	13,67
		3	6,00						
5,66	2,0	4	5,80						
		5	5,80	2,360	3,65	16,70	78,12	2620,29	13,67
		6	5,90						
5,66	4,0	7	5,90						
		8	6,10	2,354	3,94	16,94	76,77	2520,28	12,33
		9	6,00						
5,66	5,0	10	5,80						
		11	5,80	2,347	4,21	17,19	75,48	2216,65	15,33
		12	5,90						
5,66	6,0	13	5,90						
		14	5,90	2,356	3,83	16,86	77,26	1994,02	15,33
		15	5,80						
5,66	8,0	16	6,00						
		17	6,10	2,351	4,03	17,03	76,32	2006,48	16,00
		18	5,90						
Especificaciones técnicas		Min.		-	3	13	75	1800	8
		Max.		-	5	-	82	-	16

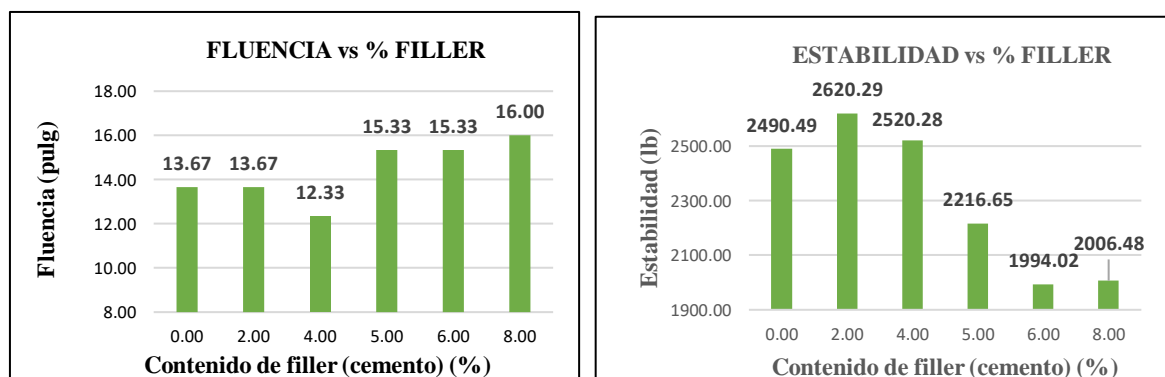
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.1: Variación de propiedades volumétricas Marshall con diferentes porcentajes de filler en agregado no chancado



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.2: Variación de propiedades de estabilidad y fluencia Marshall con diferentes porcentajes de filler en agregado no chancado



Fuente: Elaboración propia.

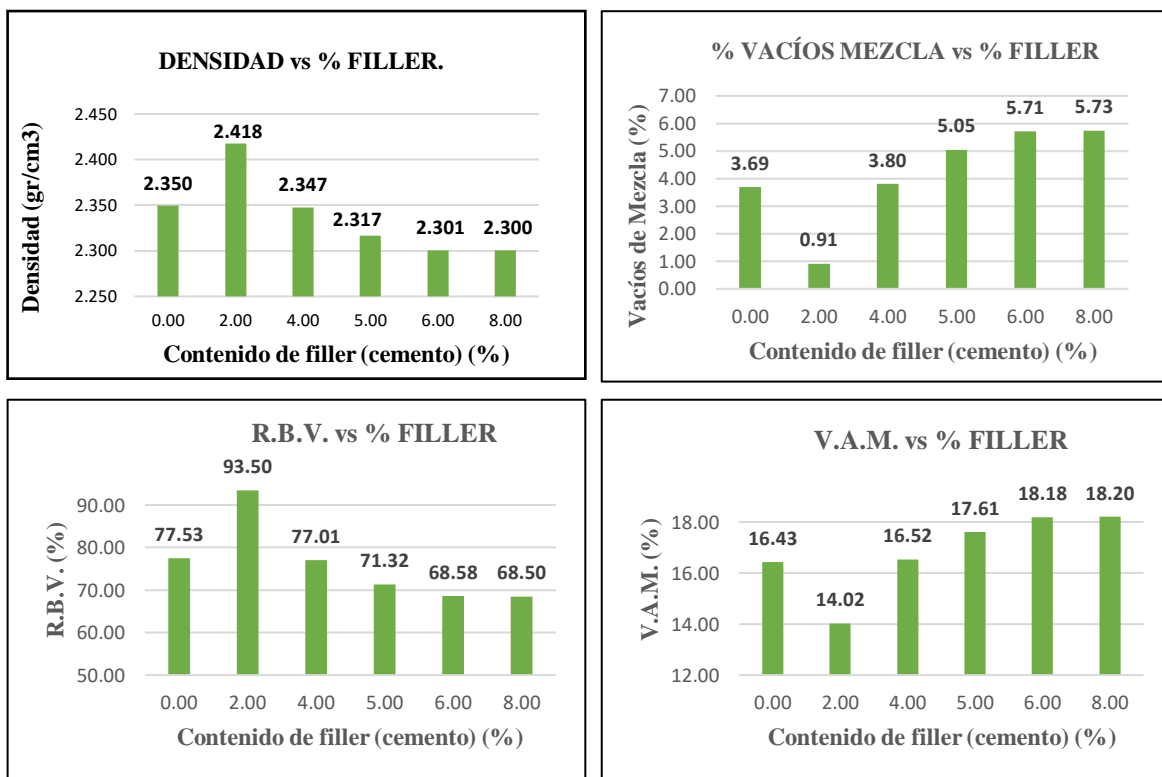
4.3.2. Agregado chancado (triturado)

Tabla 4.10: Resultado de la mezcla asfáltica con agregado chancado y adición de filler (cemento portland) en porcentaje

% de C.A. óptimo	% del filler (cemento portland)	Identificación	Altura promedio (cm)	Densidad real promedio (gr/cm ³)	% Vacíos en la mezcla (Vv)	% Vacíos de agregado mineral (V.A.M)	Relación betumen vacíos (R.B.V.)	Estabilidad promedio (lb)	Fluencia 1/100" promedio
5,55	0,0	1	5,90						
		2	5,90	2,350	3,69	16,43	77,53	3577,194	13,33
		3	5,80						
5,55	2,0	4	5,90						
		5	5,90	2,418	0,91	14,02	93,50	3835,06	11,00
		6	5,90						
5,55	4,0	7	5,90						
		8	5,80	2,347	3,80	16,52	77,01	3601,34	10,33
		9	5,90						
5,55	5,0	10	5,90						
		11	5,90	2,317	5,05	17,61	71,32	3654,57	12,33
		12	5,80						
5,55	6,0	13	5,80						
		14	5,80	2,301	5,71	18,18	68,58	4117,68	12,00
		15	5,70						
5,55	8,0	16	5,90						
		17	5,90	2,300	5,73	18,20	68,50	3812,86	13,00
		18	5,80						
Especificaciones técnicas		Min.		-	3	13	75	1800	8
		Max.		-	5	-	82	-	16

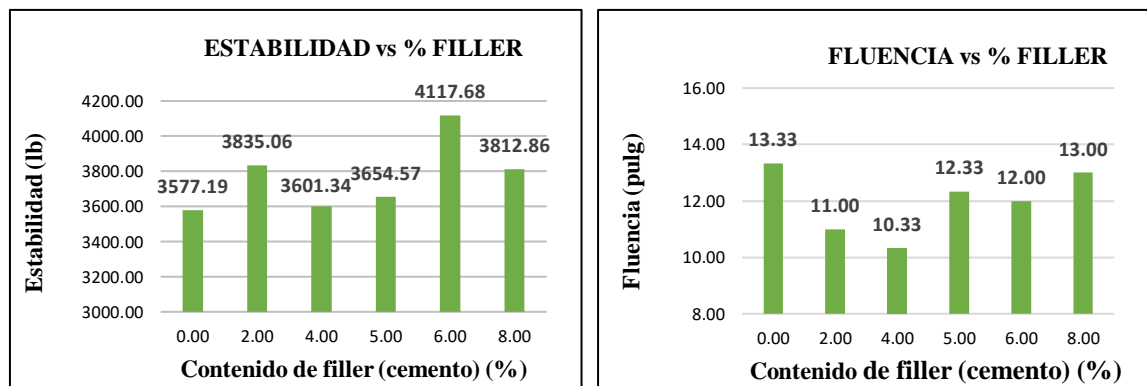
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.3: Variación de propiedades volumétricas Marshall con diferentes porcentajes de filler en agregado chancado



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.4: Variación de propiedades de estabilidad y fluencia Marshall con diferentes porcentajes de filler en agregado chancado



Fuente: Elaboración propia.

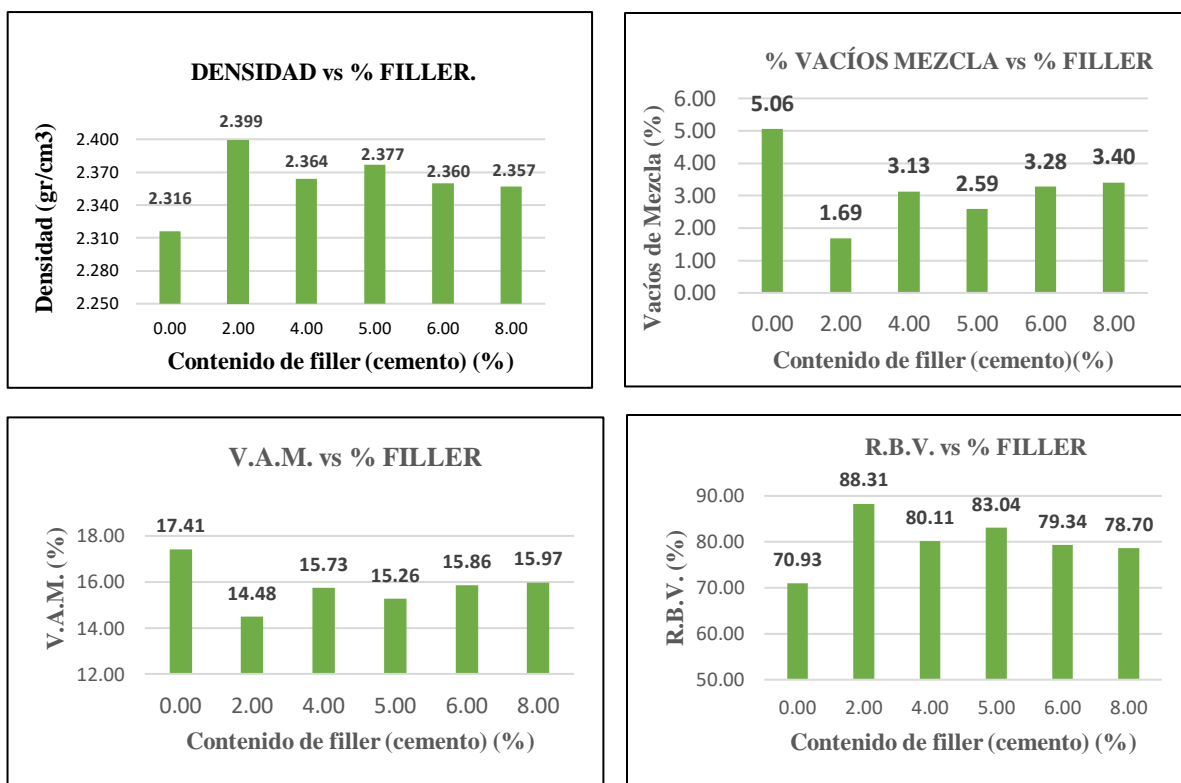
4.3.3. Agregado gravilla-arenosa

Tabla 4.11: Resultado de la mezcla asfáltica con agregado gravilla arenosa y adición de filler (cemento portland) en porcentaje

% de C.A. óptimo	% del filler (cemento portland)	Identificación	Altura promedio (cm)	Densidad real promedio (gr/cm ³)	% Vacíos en la mezcla (Vv)	% Vacíos de agregado mineral (V.A.M)	Relación betumen vacíos (R.B.V.)	Estabilidad promedio (lb)	Fluencia 1/100” promedio
5,46	0,0	1	6,10						
		2	6,30	2,316	5,06	17,41	70,93	3249,82	12,67
		3	6,30						
5,46	2,0	4	6,40						
		5	6,10	2,399	1,69	14,48	88,31	4541,19	14,67
		6	5,90						
5,46	4,0	7	5,97						
		8	6,00	2,364	3,13	15,73	80,11	5053,98	15,00
		9	6,07						
5,46	5,0	10	6,10						
		11	6,00	2,377	2,59	15,26	83,04	4739,77	14,00
		12	6,00						
5,46	6,0	13	6,10						
		14	6,00	2,360	3,28	15,86	79,34	5593,89	12,33
		15	5,80						
5,46	8,0	16	5,90						
		17	6,00	2,357	3,40	15,97	78,70	5188,76	13,33
		18	6,10						
Especificaciones técnicas		Min.		-	3	13	75	1800	8
		Max.		-	5	-	82	-	16

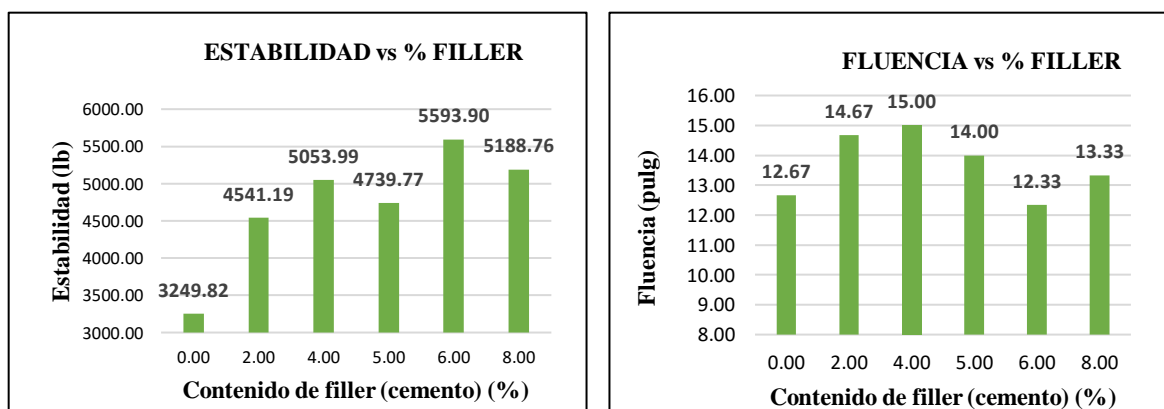
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.5: Variación de propiedades volumétricas Marshall con diferentes porcentajes de filler en agregado gravilla arenosa



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.6: Variación de propiedades de estabilidad y fluencia Marshall con diferentes porcentajes de filler en agregado gravilla arenosa



Fuente: Elaboración propia.

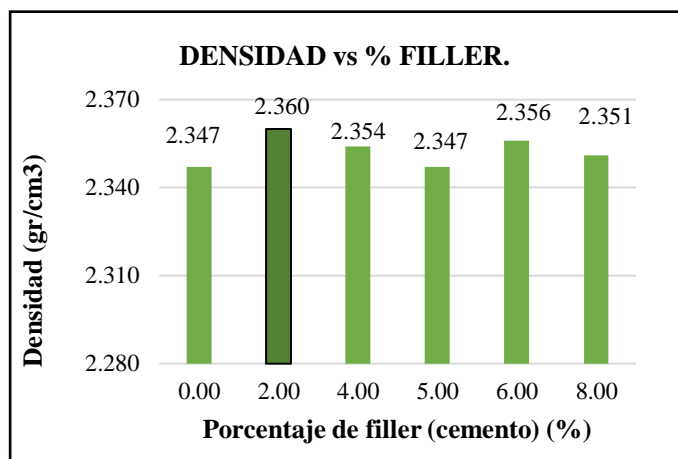
4.5. Determinación de porcentajes óptimos de llenante mineral en los distintos tipos de agregados

Para la determinación del porcentaje óptimo del filler es importante tomar en cuenta tres propiedades del diseño Marshall, las cuales definirán el contenido óptimo del filler, las cuales serán determinados mediante los rangos que debe cumplir estas propiedades, por lo que se toma el siguiente criterio:

- Densidad máxima vs Porcentaje de filler.
- Estabilidad máxima vs Porcentaje de filler.
- % de vacíos vs Porcentaje de filler.

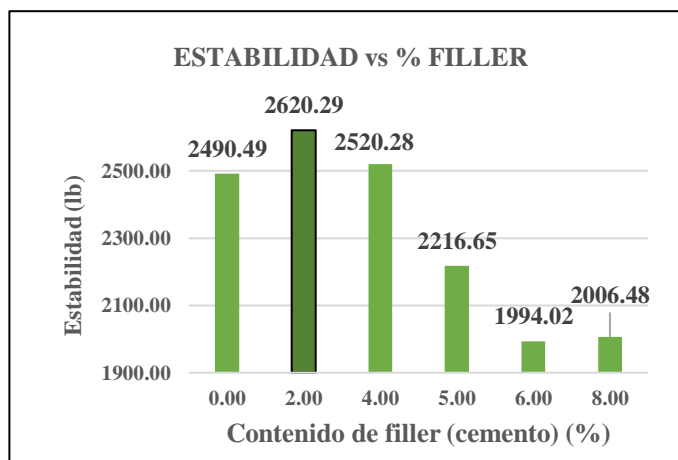
4.5.1. Agregado no chancado (natural)

Gráfico 4.7: Valores de densidad por porcentajes de filler (agregado no chancado)



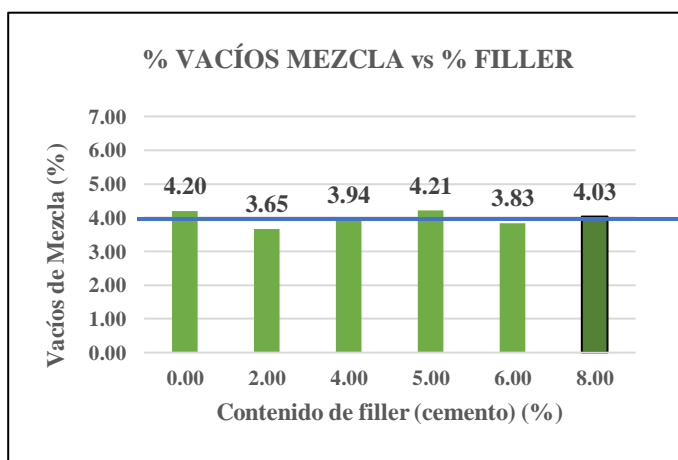
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.8: Valores de estabilidad por porcentajes de filler (agregado no chancado)



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.9: Valores de % de vacíos por porcentajes de filler (agregado no chancado)



Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en los gráficos obtenemos el porcentaje de vacíos, igual o más próximo a 4% el cual tiene el 8 % con 4,03 % de filler, también procedemos a tomar los máximos valores de la densidad como de la estabilidad para luego promediar los porcentajes de filler y obtener el contenido óptimo final de filler como se describe en la siguiente tabla:

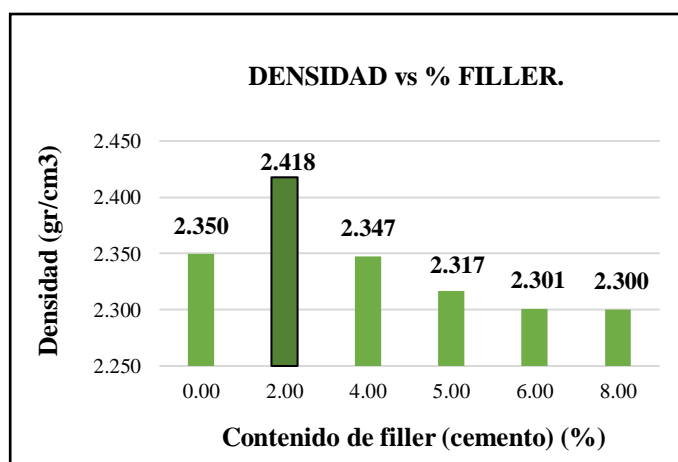
Tabla 4.12: *Contenido óptimo de filler (cemento) con agregado no chancado*

Propiedad Marshall	Valor	% Filler	Especificaciones	
			Min.	Max.
Densidad máxima (gr/cm ³)	2,360	2 %	----	-----
Estabilidad máxima (lb)	2620,29	2 %	> 1800	
Vacíos de la mezcla (%)	4,03	8 %	3	5
Promedio (%)		4 %		

Fuente: Elaboración propia.

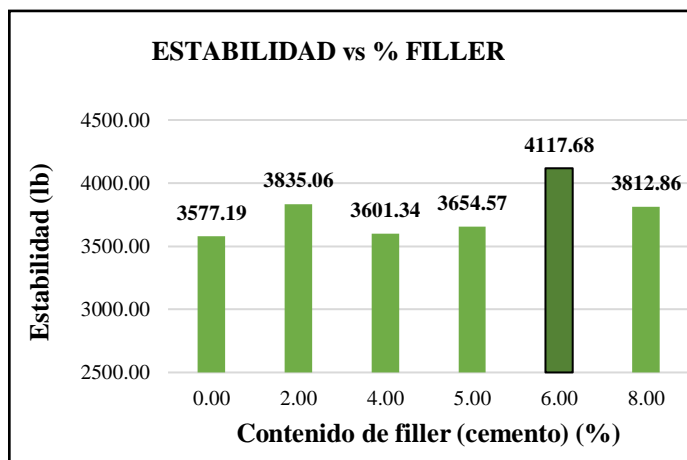
El porcentaje óptimo de filler para el agregado no chancado (natural). es igual a **4 %**, el cual es un porcentaje dentro de los rangos de estudio establecido.

4.5.2. Agregado chancado (triturado)

Gráfico 4.10: *Valores de densidad por porcentajes de filler (agregado chancado)*

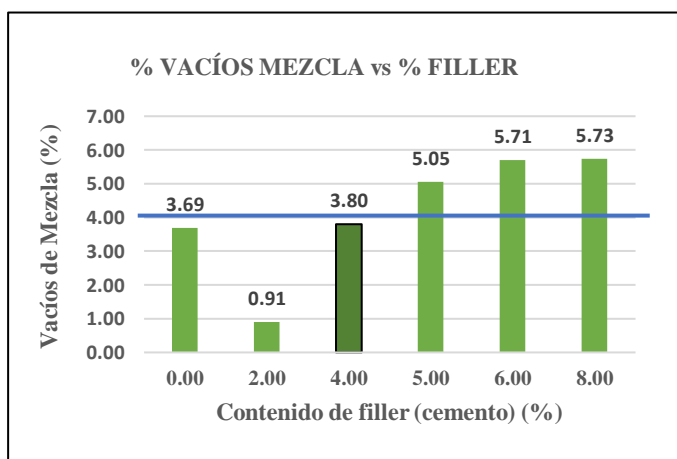
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.11: Valores de estabilidad por porcentajes de filler (agregado chancado)



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.12: Valores de % de vacíos por porcentajes de filler (agregado chancado)



Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en los gráficos obtenemos el porcentaje de vacíos igual o más próximo a 4% el cual tiene el 4% de filler, el cual tiene un valor de 3,80% próximo a 4% también procedemos a tomar los máximos valores de la densidad como de estabilidad para luego promediar los porcentajes de filler y obtener el contenido óptimo final de filler como se describe en la siguiente tabla:

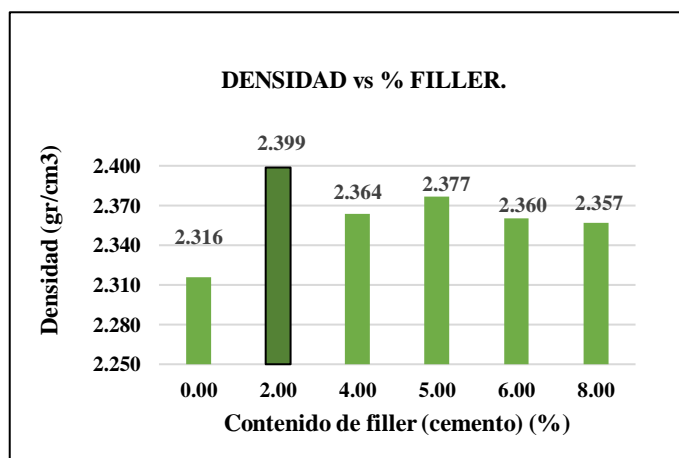
Tabla 4.13: *Contenido óptimo de filler (cemento) con agregado chancado*

Propiedad Marshall	Valor	% Filler	Especificaciones	
			Min.	Max.
Densidad máxima (gr/cm ³)	2,418	2 %	----	-----
Estabilidad máxima (lb)	4117,68	6 %	> 1800	
Vacíos de la mezcla (%)	3,80	4 %	3	5
Promedio (%)		4 %		

Fuente: Elaboración propia.

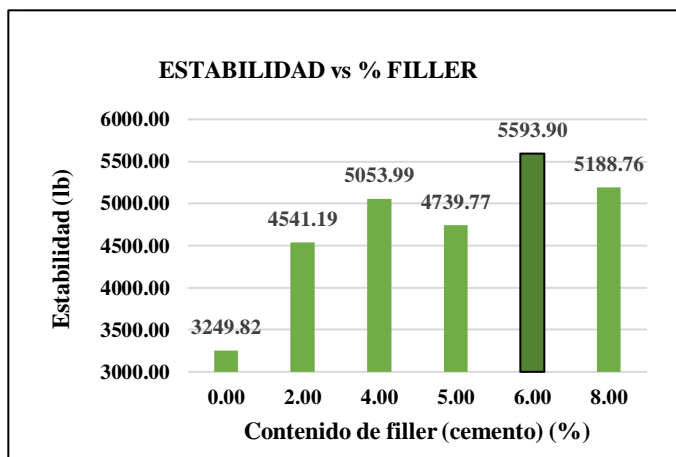
Entonces el porcentaje óptimo de filler para el agregado chancado (triturado), es igual al **4 %**, el cual es un porcentaje dentro de los rangos de estudio establecido.

4.5.3. Agregado gravilla-arenosa

Gráfico 4.13 *Valores de densidad por porcentajes de filler (gravilla arenosa)*

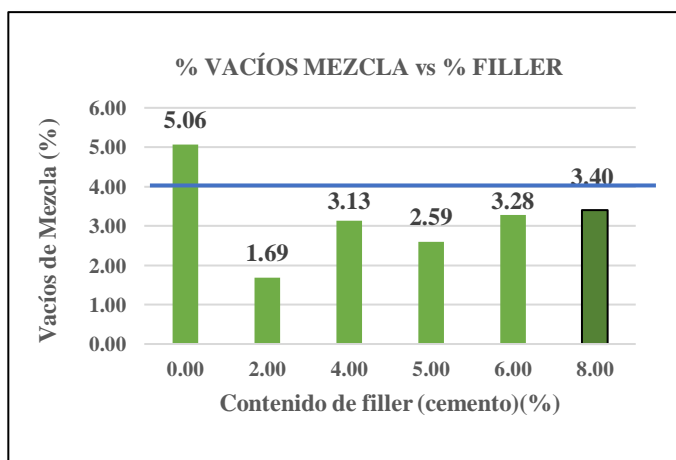
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.14: Valores de estabilidad por porcentajes de filler (gravilla arenosa)



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.15: Valores de % de vacíos por porcentajes de filler (gravilla arenosa)



Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en los gráficos obtenemos el porcentaje de vacíos igual o más próximo a 4% el cual tiene el 8 % de filler, el cual tiene un valor de 3,40% próximo a 4% también procedemos a tomar los máximos valores de la densidad como de estabilidad para luego promediar los porcentajes de filler y obtener el contenido óptimo final de filler como se describe en la siguiente tabla:

Tabla 4.14: *Contenido óptimo de filler (cemento) con agregado gravilla-arenosa*

Propiedad Marshall	Valor	% Filler	Especificaciones	
			Min.	Max.
Densidad máxima (gr/cm ³)	2,370	2 %	----	-----
Estabilidad máxima (lb)	5592,19	6 %	> 1800	
Vacíos de la mezcla (%)	3,90	8 %	3	5
Promedio (%)		5,33 %		

Fuente: Elaboración propia.

El porcentaje óptimo de filler para el agregado de gravilla arena es igual a **5,33 %**, al ser un valor medio asumimos el valor del inmediato superior que es **6 %**, el cual es un porcentaje dentro de los rangos de estudio establecido.

4.6. Resultados del porcentaje óptimo de llenante mineral para cada tipo de agregado

Después de realizar la recolección de datos y su respectivo estudio con cada mezcla asfáltica, obtenemos los resultados del contenido porcentual óptimo de llenante mineral como se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 4.15: *Resultados del contenido óptimo del filler para cada agregado*

Diseño de mezcla según el tipo agregado	% óptimo de filler.
Agregado no chancado (natural)	4 %
Agregado chancado (triturado)	4 %
Agregado gravilla-arenosa	6 %

Fuente: Elaboración propia.

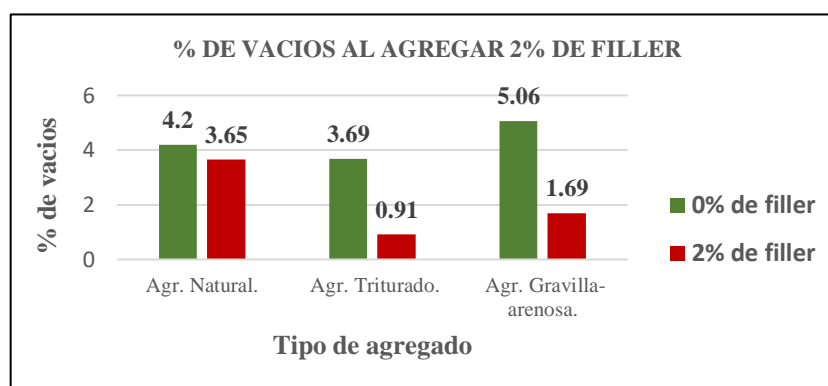
4.7. Análisis de resultados de las propiedades Marshall, con adición de llenante mineral en las mezclas asfálticas

En esta etapa se realizará un análisis de los resultados obtenidos, utilizando las gráficas donde se analizarán las propiedades mecánicas de cada tipo de mezcla asfáltica con cemento asfáltico óptimo, con la adición de llenante mineral a distintos porcentajes.

Para este estudio comparativo se tomarán los valores de las propiedades de porcentaje de vacíos, que permite determinar las proporciones de los huecos en la mezcla (porosidad), la estabilidad y flujo que es el movimiento total o deformación que ocurre en el espécimen entre estar sin carga y el punto máximo de carga prueba de estabilidad.

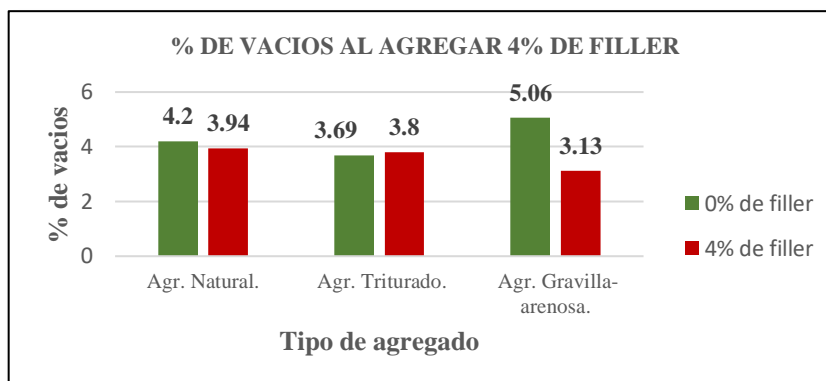
4.7.1. Porcentaje de vacíos a distintos porcentajes de llenante mineral o filler

Gráfico 4.16: Comparación de % de vacíos a 2 % de filler



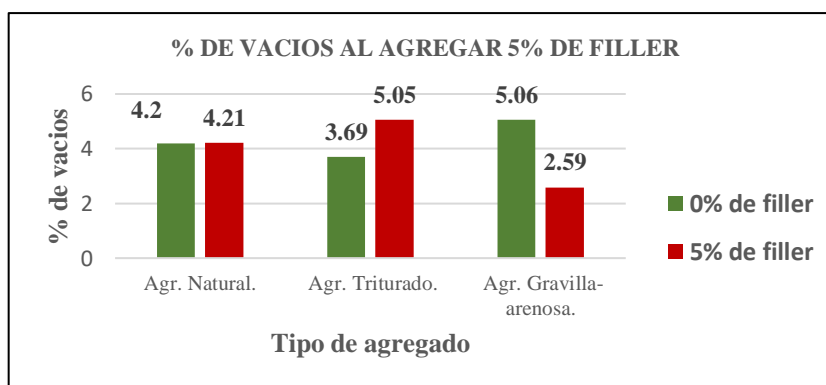
Fuente: Elaboración propia.

En este gráfico comparativo, al añadir un 2 % de filler a las distintas mezclas asfálticas, podemos observar que existe una variación dependiendo del tipo de agregado, por lo que el agregado triturado y gravilla arenosa, no está dentro de los rangos la cual representa un mayor defecto en sus propiedades mecánicas.

Gráfico 4.17: Comparación de % de vacíos a 4 % de filler

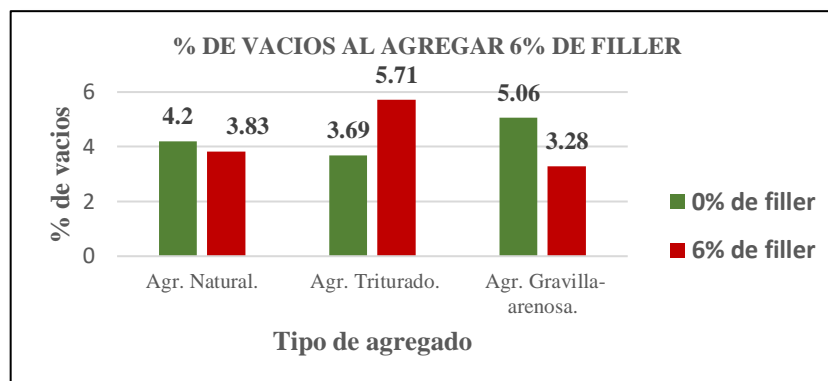
Fuente: Elaboración propia.

Al incrementar un 4 % de filler a las mezclas asfálticas se puede determinar, que existe una mayor correlación de resultados y que se encuentran dentro de los rangos de las especificaciones de la norma, por lo que este porcentaje reduce los vacíos en las mezclas, dando una porosidad aceptable en la mezcla asfáltica.

Gráfico 4.18: Comparación de % de vacíos a 5 % de filler

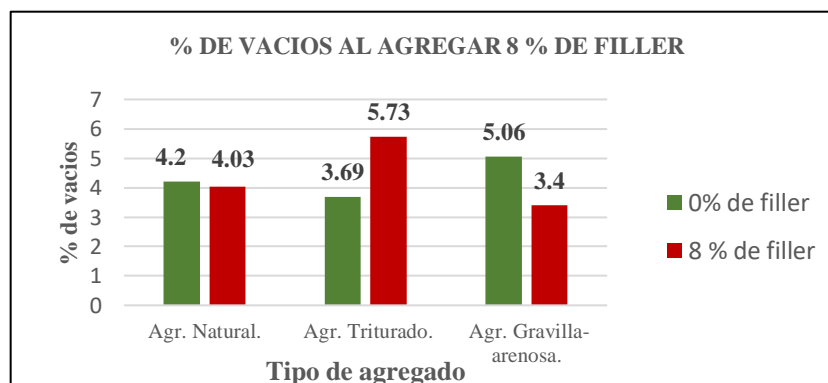
Fuente: Elaboración propia.

Al incrementar un 5 % de filler observamos que existe una variación de los valores, pero que se encuentra dentro del rango el agregado natural, excepto en los agregado triturado y gravilla arenosa adicionado con filler lo cual puede representar mayor vacío disminuyendo su resistencia y porosidad.

Gráfico 4.19: Comparación de % de vacíos a 6 % de filler

Fuente: Elaboración propia.

Al incrementar filler a 6 % observamos que los valores se encuentran dentro de los rangos establecidos en la norma, excepto el de agregado triturado y a comparación con una mezcla sin filler sus valores ascienden y desciende al contrario de una mezcla con filler, dando como resultado que una mezcla con filler mejora sus propiedades.

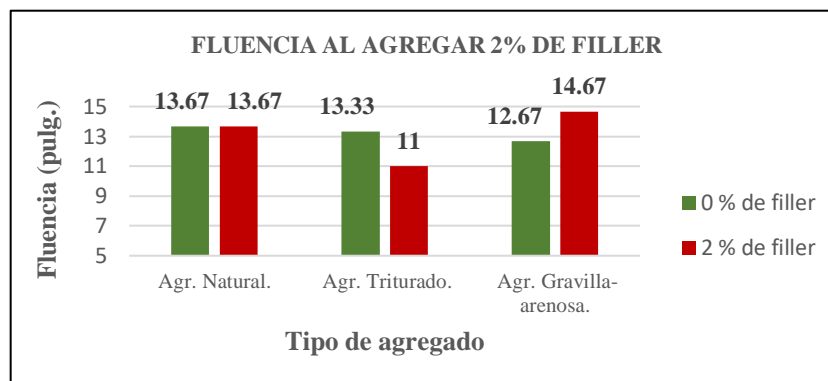
Gráfico 4.20: Comparación de % de vacíos a 8 % de filler

Fuente: Elaboración propia.

En esta grafica vemos que al incrementar este porcentaje varia considerable con agregado triturado que se encuentra fuera de los rangos disminuyendo su resistencia, presentando altos vacíos dentro de la mezcla debido a la mal diseño o mala compactación, a comparación de una mezcla sin filler la cual se encuentran dentro de los rangos establecidos en la norma.

4.7.2. Fluencia a distintos porcentajes de llenante mineral o filler

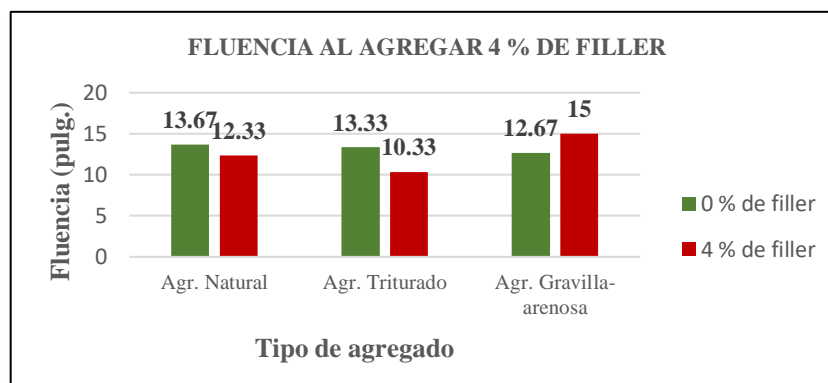
Gráfico 4.21: Comparación de fluencia a 2 % de filler



Fuente: Elaboración propia.

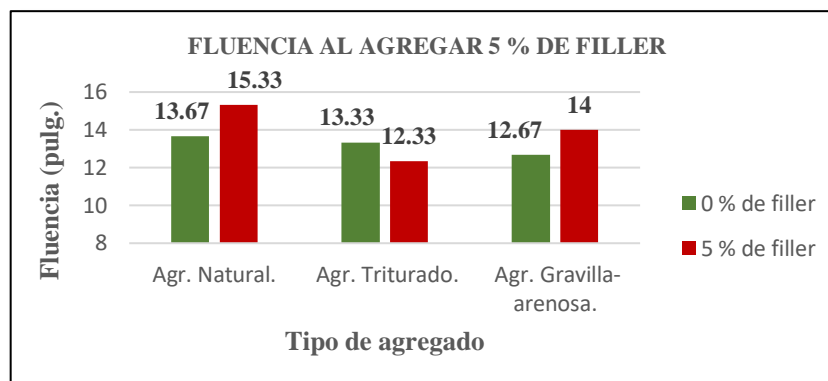
Al incrementar 2% de filler se observa que las mezclas presentan una variación, reducida más presente en el agregado triturado, el cual da como resultado una mezcla asfáltica plástica elevada que puede deformarse con las cargas de tránsito.

Gráfico 4.22: Comparación de fluencia a 4 % de filler



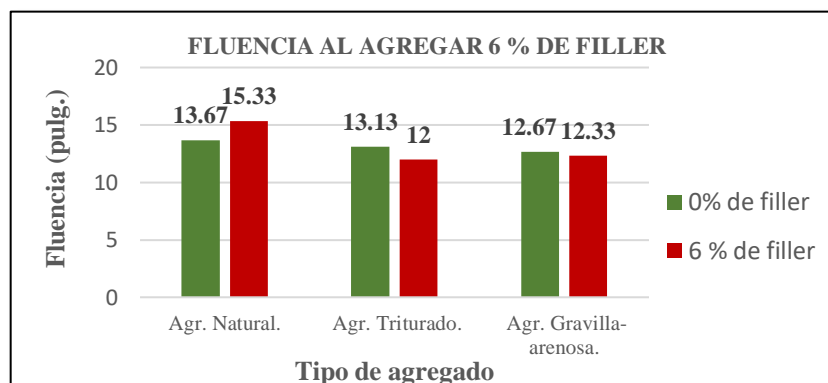
Fuente: Elaboración propia.

Al incrementar 4 % vemos cambios en los resultados las cuales varían con los rangos o el valor medio que deben cumplir, dando como resultados mezclas asfálticas plásticas no muy elevadas exceptuando la de gravilla arenosa que presente una fluencia permisible.

Gráfico 4.23: Comparación de fluencia a 5 % de filler

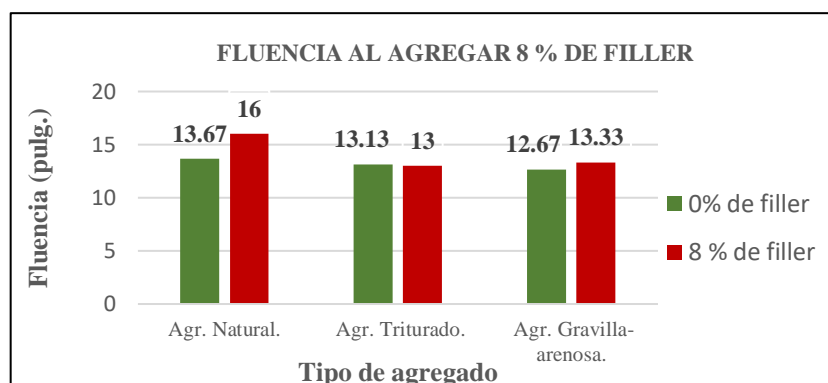
Fuente: Elaboración propia.

Al incrementar 5% se observa que existe una variación de los valores, donde el agregado de gravilla arenosa con filler presenta una mejor opción ya que se encuentra dentro de los rangos establecidos en la norma, esto debido a que presenta menos defectos en su estructura, pero una mezcla sin filler tiende a descender sus valores dependiendo del tipo de agregado.

Gráfico 4.24: Comparación de fluencia a 6 % de filler

Fuente: Elaboración propia.

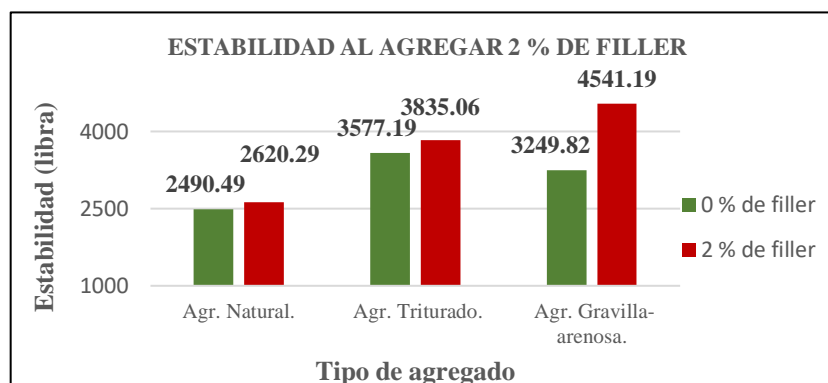
Al incrementar 6% de filler a la mezcla se puede observar que la que cumple los requisitos de diseño son la de agregado natural al presentar un valor dentro del rango de establecido en norma contrario, al de una mezcla sin filler.

Gráfico 4.25: Comparación de fluencia a 8 % de filler

Fuente: Elaboración propia.

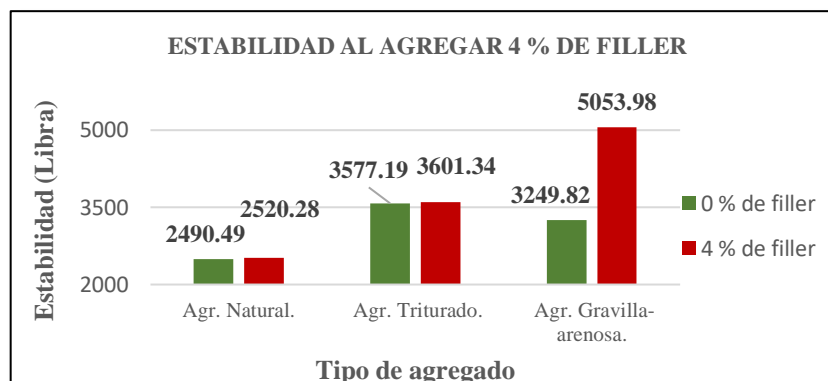
Al incrementar al 8 % de filler a la mezcla asfáltica se observa, que los niveles de fluencia se encuentran con valores aceptable, dentro de los rangos de la norma, dando como una mezcla asfáltica con una buena resistencia, al contrario, a una mezcla sin filler donde sus van descendiendo.

4.7.3. Estabilidad a distintos porcentajes de llenante mineral o filler

Gráfico 4.26: Comparación de estabilidad a 2 % de filler

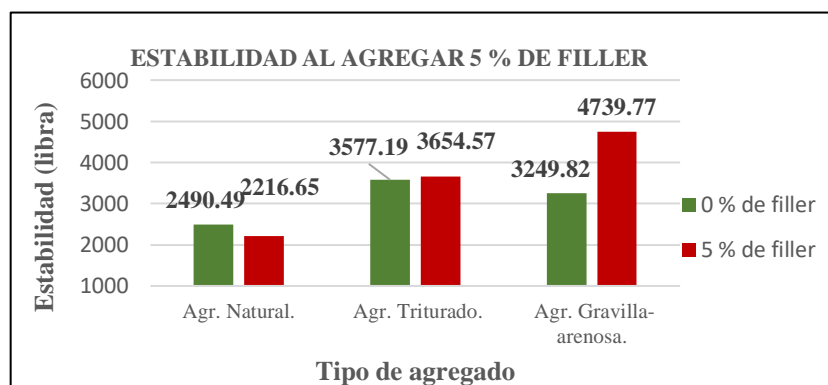
Fuente: Elaboración propia.

Al incrementar 2 % de filler la estabilidad se encuentra con poca variación, a la mezcla si filler, pero dentro del rango de las especificaciones excepto la de gravilla arenosa que representa un valor elevado el cual puede producir defectos.

Gráfico 4.27: Comparación de estabilidad a 4 % de filler.

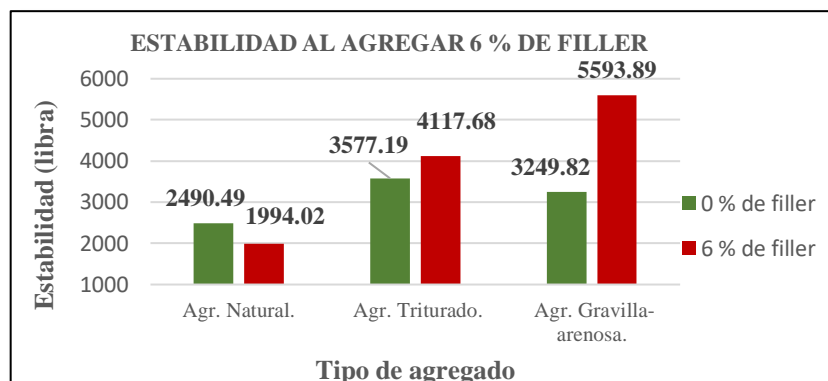
Fuente: Elaboración propia.

Al incrementar el filler a 4% se puede observar que existe una variación considerable exceptuando la de gravilla arenosa, quien presenta una estabilidad muy alta la cual puede producir defectos por su alto valor de estabilidad.

Gráfico 4.28: Comparación de estabilidad a 5 % de filler.

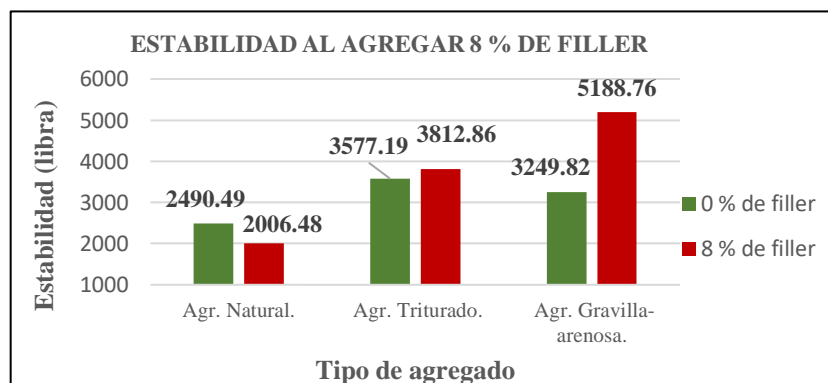
Fuente: Elaboración propia.

Al incrementar 5 % de filler a la mezcla asfáltica existe variaciones dependiendo del tipo de agregado que se utilice, del cual podemos resaltar la del agregado triturado que se encuentra dentro de los parámetros de rango de la norma dando una mejor estabilidad.

Gráfico 4.29: Comparación de estabilidad a 6 % de filler.

Fuente: Elaboración propia.

Al incrementar un 6% de filler a la mezcla las características varían dependiendo del tipo de agregado las cuales van en aumento lo cual puede producir deformaciones, dando como mejor opción un agregado triturado con y sin filler en una mezcla la cual se encuentra dentro de los rangos medios, dependiendo del tipo de tránsito a diseñar.

Gráfico 4.30: Comparación de estabilidad a 8 % de filler.

Fuente: Elaboración propia.

Al incrementar vemos que existe ciertas variaciones, pero dentro de los rangos, dependiendo del tipo de agregado utilizado en la mezcla asfáltica por lo que deducimos que una estabilidad elevada puede producir reducción en la fricción interna del pavimento, por tanto, menos durables de lo deseado, como ocurre en la gravilla arenosa y no así en las otras como en las mezclas sin filler.

4.8. Preparación de briquetas con porcentaje óptimo de filler y c.a.

Después de obtener el porcentaje óptimo del cemento asfáltico y del filler en las diferentes mezclas asfálticas, con diferentes agregados del total de las briquetas de 1200 gramos, se procede a determinar los porcentajes de los materiales de la mezcla asfáltica adjuntando los óptimos del cemento asfáltico y filler para su respectiva comparación, en la siguiente tabla se muestran los pesos repartidos de manera homogénea para la realización de briquetas modificadas con el cemento portland como filler y el cemento asfáltico 85-100 PROBISA-Chile, manteniendo la combinación de agregados utilizados anteriormente para así realizar una comparación de sus propiedades presentes con estas modificaciones.

4.8.1 Agregado no chancado (natural).

Tabla 4.16: *Dosificación con diferentes porcentajes de c.a., con agregado no chancado*

Porcentaje óptimo de c.a. (%)	5.66 %
Porcentaje óptimo de filler (%)	4 %
Porcentaje de agregado (%)	94,34
Peso del cemento asfáltico (gr)	67,92
Peso de filler (gr)	33,96
Peso de grava (gr)	283,02
Peso de gravilla (gr)	362,27
Peso de arena (gr)	452,83
Peso total de la briketa (gr)	1200.00

Fuente: Elaboración propia.

4.8.2. Agregado chancado (triturado)

Tabla 4.17: *Dosificación con diferentes porcentajes de c.a., con agregado chancado*

Porcentaje óptimo de c.a. (%)	5.55 %
Porcentaje óptimo de filler (%)	4 %
Porcentaje de agregado (%)	94,45
Peso del cemento asfáltico (gr)	66,60
Peso de filler (gr)	45,33
Peso de grava (gr)	283,35
Peso de gravilla (gr)	362,69
Peso de arena (gr)	442,03
Peso total de la briqueta (gr)	1200.00

Fuente: Elaboración propia.

4.8.3: Agregado gravilla-arenosa

Tabla 4.18: *Dosificación con diferentes porcentajes de c.a., con gravilla arenosa*

Porcentaje óptimo de c.a. (%)	5.46 %
Porcentaje óptimo de filler (%)	6 %
Porcentaje de agregado (%)	94,54
Peso del cemento asfáltico (gr)	65,52
Peso de filler (gr)	68.07
Peso de grava (gr)	0,00
Peso de gravilla (gr)	476,48
Peso de arena (gr)	589,93
Peso total de la briqueta (gr)	1200.00

Fuente: Elaboración propia.

4.9. Cálculo de las propiedades de las mezclas asfálticas con adición de porcentajes óptimos de llenante mineral y cemento asfáltico

Para el proceso de cálculo de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas con los distintos agregados se sigue el mismo procedimiento expuesto anteriormente con la adición de los contenidos óptimos tanto del cemento asfáltico 85-100 PROBISA Chile y la llenante mineral cemento portland IP-30 (Cemento El Puente). Por tanto, se presentará las siguientes tablas de los datos obtenidos y tablas de los resultados de las propiedades mecánicas de las diferentes mezclas asfálticas.

4.9.1 Agregado no chancado (natural)

Tabla 4.19: Datos con el porcentaje óptimo del filler con agregado no chancado

% del filler cemento portland	Identificación	Altura promedio (cm)	Peso seco al aire (gr)	Peso saturado superficialmente seco (gr)	Peso sumergido en agua (gr)	Lectura dial estabilidad (lb)	Lectura dial fluencia
4 %	1	5,9	1177,3	1178,9	675	776	13
	2	6,0	1197,8	1200,4	690	865	12
	3	5,9	1169,7	1174,2	679	678	14
	4	6,1	1203,3	1204,8	689	689	14
	5	6,1	1195,4	1197,7	688	639	12
	6	6,0	1178,0	1180,4	684	617	14
	7	5,9	1167,5	1170,3	672	682	13
	8	6,1	1171,0	1172,4	674	674	13
	9	6,0	1168,9	1170,2	674	689	12
	10	5,9	1170,3	1171,2	671	678	13

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.20: Resultados con el porcentaje óptimo del filler con agregado no chancado

Descripción	Propiedades mecánicas					
	Altura promedio (cm)	Densidad real (gr/cm ³)	% Vacíos en la mezcla (VV)	% Vacíos de agregado mineral (V.A.M)	Estabilidad corregida (lb)	Fluencia 1/100
1	5,9	2,33	4,98	17,65	2318,42	13
2	6,0	2,34	4,38	17,35	25,49,08	12
3	5,9	2,36	3,72	16,78	20,52,76	14
4	6,1	2,33	4,95	17,84	1852,19	14
5	6,1	2,34	4,44	17,41	1823,35	12
6	6,0	2,37	3,29	16,41	1812,49	14
7	5,9	2,34	4,54	17,49	2061,92	13
8	6,1	2,35	4,27	17,26	1924,29	13
9	6,0	2,36	4,02	17,04	2026,34	12
10	5,9	2,34	4,67	17,61	2049,70	13

Fuente: Elaboración propia.

4.9.2 Agregado chancado (triturado)

Tabla 4.21: Datos con el porcentaje óptimo del filler con agregado chancado

% del filler cemento portland	Identificación	Altura promedio (cm)	Peso seco al aire (gr)	Peso saturado superficialmente seco (gr)	Peso sumergido en agua (gr)	Lectura dial estabilidad (lb)	Lectura dial fluencia
4 %	1	5,9	1154,4	1157,9	688	1123,5	12
	2	6,1	1156,6	1157,2	683	1002,0	14
	3	5,9	1150,7	1151,8	661	1123	13
	4	5,9	1192,5	1194,3	684	1277	13
	5	6,0	1198,5	1200,3	688	1125	13
	6	6,0	1184,8	1185,6	681	1187	14
	7	6,1	1158,7	1160,2	665	1132	12
	8	6,0	1153,5	1156,2	662	1130	13
	9	6,0	1157,5	1158,4	664	1145	14
	10	6,1	1161,4	1162,8	665	1187	13

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.22: Resultados con el porcentaje óptimo del filler con agregado chancado

Descripción	Propiedades mecánicas					
	Altura promedio (cm)	Densidad real (gr/cm ³)	% Vacíos en la mezcla (VV)	% Vacíos de agregado mineral (V.A.M)	Estabilidad corregida (lb)	Fluencia 1/100
1	5,9	2,35	3,41	16,19	3410,09	12
2	6,1	2,34	4,07	16,76	2870,24	14
3	5,9	2,34	3,90	16,61	3408,57	13
4	5,9	2,34	4,22	16,88	3878,83	13
5	6,0	2,34	4,11	16,79	3321,35	13
6	6,0	2,35	7,76	16,49	350548	14
7	6,1	2,34	4,09	16,77	3245,16	12
8	6,0	2,33	4,33	16,98	3336,18	13
9	6,0	2,34	4,04	16,73	3380,73	14
10	6,1	2,33	4,37	16,02	3403,78	13

Fuente: Elaboración propia.

4.9.3 Agregado gravilla-arenosa

Tabla 4.23: Datos con el porcentaje óptimo del filler con gravilla arenosa

% del filler cemento portland	Identificación	Altura promedio (cm)	Peso seco al aire (gr)	Peso saturado superficialment e seco (gr)	Peso sumergido en agua (gr)	Lectura dial estabilidad (lb)	Lectura dial fluencia
6 %	1	6,10	1191,1	1193,5	681	1231	14
	2	6,10	1178,8	1179,2	674	1176	13
	3	5,9	1157,4	1158,3	664	1022	13
	4	5,9	1167,5	1169,2	669	1132	12
	5	6,0	1178,4	1180,2	673	1146	14
	6	6,0	1188,5	1190,3	681	1127	13
	7	6,0	1178,5	1179,3	672	1142	13
	8	5,9	1162,3	1163,3	667	1142	14
	9	5,9	1174,3	1175,3	673	1138	13
	10	6,0	1167,4	1168,5	667	1136	14

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.24: Resultados con el porcentaje óptimo del filler con gravilla arenosa

Descripción	Propiedades mecánicas					
	Altura promedio (cm)	Densidad real (gr/cm ³)	% Vacíos en la mezcla (VV)	% Vacíos de agregado mineral (V.A.M)	Estabilidad corregida (lb)	Fluencia 1/100
1	6,1	2,32	4,88	17,21	3530,67	14
2	6,1	2,33	4,50	16,94	3372,06	13
3	5,9	2,34	4,17	16,65	3100,15	13
4	5,9	2,33	4,47	16,92	3436,05	12
5	6,0	2,32	4,91	17,30	3383,70	14
6	6,0	2,33	4,49	16,93	3327,27	13
7	6,0	2,32	4,92	17,31	3371,82	13
8	5,9	2,34	4,15	16,64	3466,59	14
9	5,9	2,34	4,32	16,78	3454,37	13
10	6,0	2,33	4,73	17,14	3354,59	14

Fuente: Elaboración propia.

4.10. Resultados del estudio estadístico de las diferentes mezclas asfálticas

Una vez obtenido los datos y realizado el cálculo correspondiente, obtendremos los resultados finales de las propiedades mecánicas, mediante el método Marshall, con una leve variación de porcentajes de filler que en algunos casos se procedió a tomar el inmediato superior, donde los resultados se proceden a una evaluación estadística de las diferentes mezclas asfálticas.

Por tanto, se realizará la evaluación estadística tomando como valores principales la media aritmética, la desviación estándar de las diferentes propiedades mecánicas presentes en cada mezcla asfáltica, para su respectivo análisis y así determinar la influencia de la llenante mineral en la mezcla asfáltica con distinto agregado pétreo utilizado para su elaboración y estudio.

4.10.1. Agregado no chanado (natural)

Tabla 4.25: Resultados de la evaluación estadística (agregado no chancado)

Descripción	Propiedades mecánicas				
	Densidad real (gr/cm ³)	% Vacíos en la mezcla (Vv)	% vacíos de agregado mineral (V.A.M)	Estabilidad corregida (lb)	Fluencia 1/100
Media	2,35	4,33	17,28	2047,05	13,10
Desviación estándar	0,012	0,530	0,433	2320,01	0,738
Varianza	0,00014	0,282	0,87	53829,52	0,544
Valor máximo	2,37	4,98	17,84	2549,08	14,00
Valor mínimo	2,33	3,29	16,41	1812,49	12,00

Fuente: Elaboración propia.

4.10.2. Agregado chancado (triturado)

Tabla 4.26: Resultados de la evaluación estadística (agregado chancado)

Descripción	Propiedades mecánicas				
	Densidad real (gr/cm ³)	% Vacíos en la mezcla (Vv)	% Vacíos de agregado mineral (V.A.M)	Estabilidad corregida (lb)	Fluencia 1/100
Media	2,34	4,03	16,72	3376,04	13,10
Desviación estándar	0,0067	0,2843	0,244	247,229	0,7378
Varianza	0,0004	0,080	0,059	61122,44	0,544
Valor máximo	2,35	4,37	17,02	3878,83	14,00
Valor mínimo	2,33	3,41	16,19	2870,24	12,00

Fuente: Elaboración propia.

4.10.3. Agregado gravilla-arenosa

Tabla 4.27: Resultados de la evaluación estadística (gravilla arenosa)

Descripción	Propiedades mecánicas				
	Densidad real (gr/cm ³)	% Vacíos en la mezcla (Vv)	% Vacíos de agregado mineral (V.A.M)	Estabilidad corregida (lb)	Fluencia 1/100
Media	2,33	4,55	16,98	3379,72	13,30
Desviación estándar	0,00816	0,293	0,2498	118,83	0,6749
Varianza	0,00007	0,086	0,062	13417,70	0,456
Valor máximo	2,34	4,92	17,31	1530,67	14,00
Valor mínimo	2,32	4,15	16,64	310015	12,00

Fuente: Elaboración propia.

4.11. Análisis de resultados obtenidos

Como los resultados son muy próximos entre la media y los calculados, además teniendo en cuenta que se tiene un cierto número de datos para el porcentaje óptimo, y ver que los valores de los mismos son similares se asumirá la media aritmética para continuar con el control y la evaluación de los resultados de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas para la siguiente investigación y análisis.

En la siguiente tabla se presenta los resultados de los diseños de las mezclas asfálticas con sus respectivos contenidos óptimos de cemento asfáltico como de llenante mineral, en la cual utilizamos cemento portland como llenante mineral con distintos tipos de agregados para su respectivo diseño de mezclas asfálticas, las cuales nos brindan resultados con cierta variación, pero considerables para un diseño asfáltico y estos valores se encuentran reflejadas en la siguiente tabla:

Tabla 4.28: Resultados del análisis y evaluación estadístico de las propiedades Marshall

Descripción	% de filler optimo (Cemento Portland)	% De c.a. optimo 85-100	Densidad promedio (gr/cm ³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)	% de vacios de mezcla total (%)	V.A.M. (vacios de agregado mineral) (%)
Agregado no chancado	4 %	5,66	2,35	2047,05	13,10	4,33	17,28
Agregado chancado	4%	5,55	2,34	3376,04	13,10	4,03	16,72
Gravilla arenosa	6%	5,46	2,33	3379,72	13,30	4,55	16,98
Especificaciones	Mínimo	-	1800	8	3	13	
	Máximo	-	-	16	5	-	

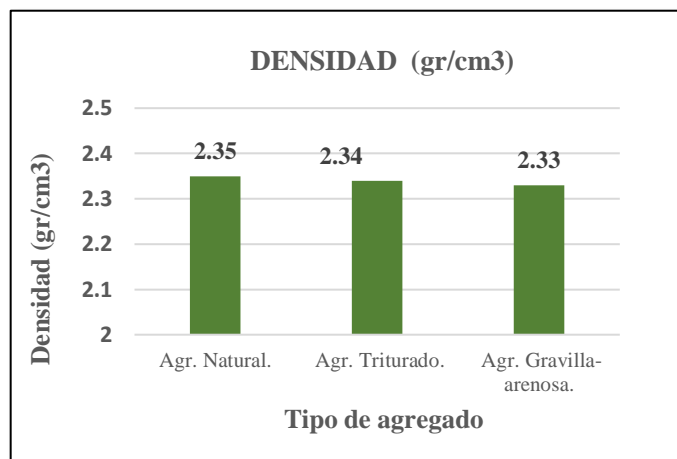
Fuente: Elaboración propia.

El análisis correspondiente y mediante los valores de los resultados obtenidos que se presentan en la tabla 4.28 se visualiza claramente que los valores de las propiedades mecánicas Marshall, se encuentran dentro de los rangos o especificaciones establecidos en la norma ASTM, esto debido a que se utilizó como referente los contenidos óptimos tanto del cemento asfáltico como de llenante mineral, en el diseño de las mezclas asfálticas con sus respectivos agregados.

Por tanto, realizando un análisis y en base a los resultados obtenidos de las diferentes mezclas con diferentes tipos de agregados y sus respectivos contenidos óptimos de filler y cemento asfáltico, se aprecia que existe una pequeña variación entre sus valores de las propiedades de Marshall presentes en los diseños pero que se encuentran dentro de las especificaciones o rangos de la norma, como ser:

4.11.1. Densidad

Gráfico 4.31: *Densidad con llenante mineral y c.a., óptimos*

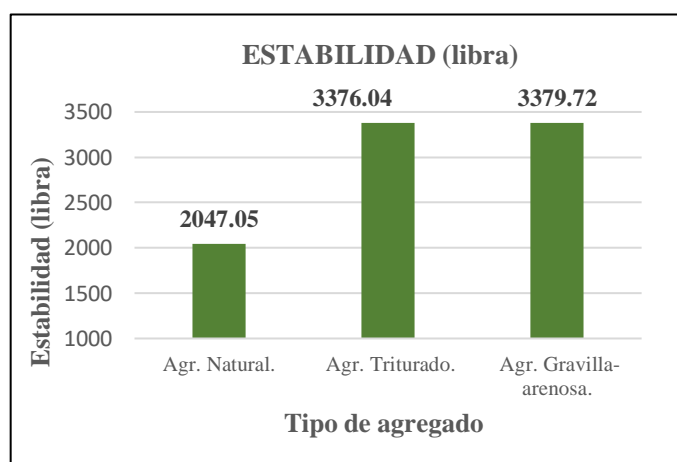


Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que esta propiedad mecánica de la mezcla asfáltica con llenante mineral óptima varía en una densidad de 0,01 gr/cm³, entre los distintos agregados la cual representa un mínimo cambio de esta propiedad, tomando como un valor promedio de los resultados la del agregado chancado como referente para un diseño asfáltico.

4.11.2. Estabilidad

Gráfico 4.32: *Estabilidad con llenante mineral y c.a., óptimos*

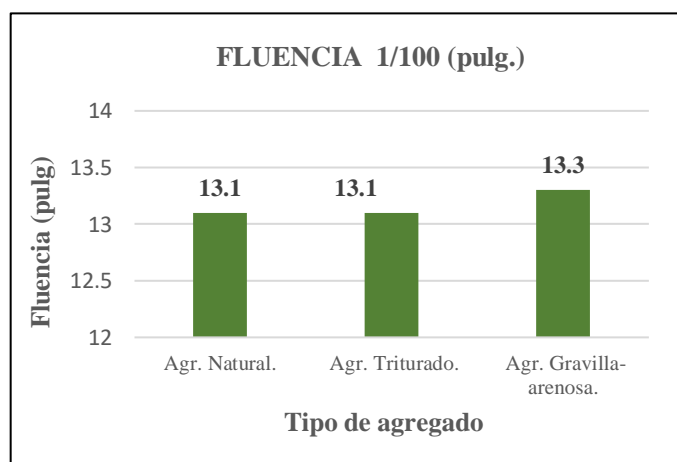


Fuente: Elaboración propia.

En este punto se puede observar que con la presencia de llenante mineral como el cemento portland y tomando como referente el valor mínimo de estabilidad, esta presenta una mejora considerable dentro de la estabilidad de la mezcla asfáltica cumpliendo con el mínimo para el tránsito establecido por norma, la cual es 1800 lb, valor mínimo de estabilidad para tránsito pesado, dando como resultado que los tres diseños están dentro de los rangos establecidos aunque con el agregado natural varía su valor a comparación a la de las otras mezclas asfálticas con sus respectivos agregados pétreos.

4.11.3. Fluencia

Gráfico 4.33: *Fluencia con llenante mineral y c.a., óptimos*

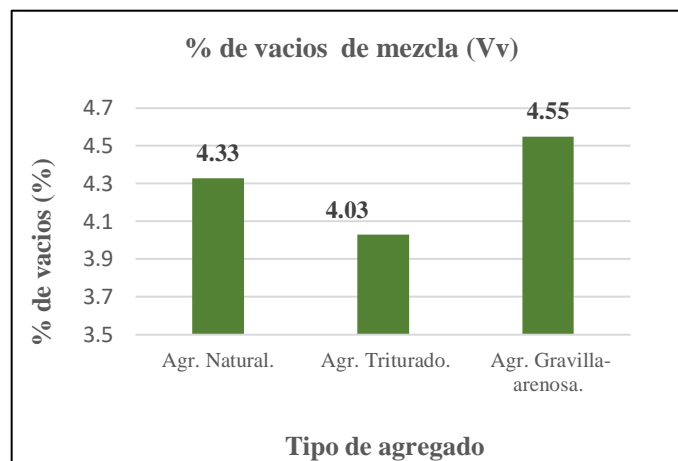


Fuente: Elaboración propia.

Con el contenido óptimo de llenante mineral dentro de la mezcla asfáltica se puede observar que el valor de la fluencia se encuentra dentro de los parámetros o rangos establecidos por norma, en las cuales las mezclas asfálticas con los distintos agregados presentan una pequeña o casi nada de variación en sus propiedades, esto debido a los porcentajes de contenido óptimo determinados en su estudio de las mezclas asfálticas y sus componentes.

4.11.4. Porcentaje de vacíos de la mezcla (Vv)

Gráfico 4.34: % de vacíos con llenante mineral y c.a., óptimos

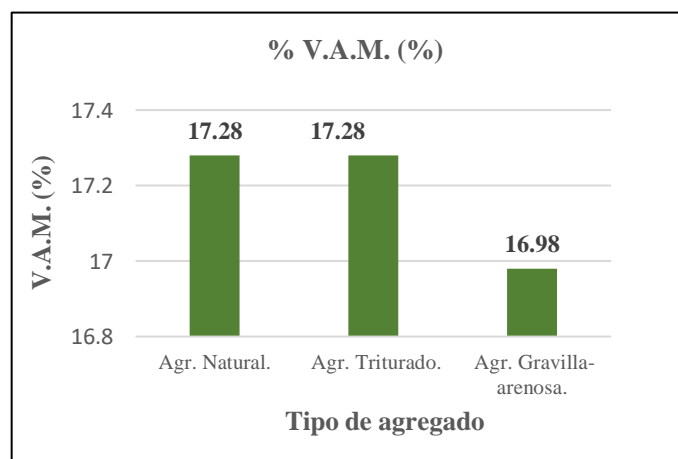


Fuente: Elaboración propia

En este análisis debemos hacer alusión a la norma la cual indica que el porcentaje de vacíos debe estar entre los rangos de 3-5 % por lo que la mezcla asfáltica con agregado chancado o triturado presenta una mejor propiedad mecánica de 4,03 % a comparación de las otras mezclas, la cual se encuentra dentro de los rangos establecidos por la ASTM.

4.11.5. Porcentaje de vacíos de agregado mineral (V.A.M.)

Gráfico 4.35: % V.A.M., con llenante mineral y c.a., óptimos



Fuente: Elaboración propia.

En este punto se puede observar que los porcentajes de agregado mineral cumplen con la especificación de la norma la cual indica un mínimo de valor de 13 %, teniendo en cuenta que el valor de % de vacíos de agregado mineral de la mezcla asfáltica convencional sin llenante mineral se encuentra entre los valores obtenidos con una leve variación la cual es considerable observando que depende del tipo de agregado a utilizar en la mezcla asfáltica convencional.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Después de realizar todo el estudio y análisis tanto mecánico como de gabinete y de los resultados obtenidos de los ensayos realizados a las muestras con los diferentes tipos de agregados y adición de cemento portland como llenante mineral o filler se tiene las siguientes conclusiones:

- En este trabajo de investigación se han cumplido los objetivos planteados debido a que se logró elaborar una mezcla asfáltica con llenante mineral como el cemento portland y se pudo llegar a saber el efecto que tiene en el comportamiento mecánico en distintos tipos de agregados.
- Analizando la adición del cemento a la mezcla asfáltica como llenante mineral o filler en todos los porcentajes estudiados, se puede observar y deducir que existe un incremento en sus propiedades de resistencia máxima, las cuales se encuentran dentro de los parámetros específicos de la norma.
- Del análisis de las propiedades mecánicas de las diferentes muestras se puede establecer que el agregado triturado o chancado presenta mejores comportamientos de sus propiedades las cuales se enmarcan con los valores que se dan las cuales se encuentran dentro de los rangos de lo establecido en la norma.
- Al analizar los resultados obtenidos entre las mezclas asfálticas adicionando el óptimo del filler como del cemento asfáltico, los valores obtenidos en la propiedad de porcentaje de vacíos presentan una leve variación, pero que se encuentra dentro de los valores aceptables de las especificaciones técnicas se deduce a que más porcentaje adicional de filler se le adicione, los vacíos se reducen considerablemente dando una mayor durabilidad al pavimento.
- El tipo de agregado juega un rol importante en las estructuras de mezclas asfálticas, ya que de ella depende la resistencia que pueda presentar el pavimento, dependiendo al tipo de tránsito para la cual se la diseñe.

- En la siguiente tabla podemos observar claramente los resultados obtenidos de las mezclas asfálticas con los distintos agregados utilizados en el estudio.

Tabla 5.1: Resultados del análisis y evaluación estadístico de las propiedades Marshall.

Descripción	% de filler óptimo (cemento portland)	% de c.a. óptimo 85-100	Densidad promedio (gr/cm ³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)	% de vacíos de mezcla total (%)	V.A.M. (Vacíos de agregado mineral) (%)
Agregado no chancado	4 %	5,66	2,35	2047,05	13,10	4,33	17,28
Agregado chancado	4%	5,55	2,34	3376,04	13,10	4,03	16,72
Gravilla arenosa	6%	5,46	2,33	3379,72	13,30	4,55	16,98
Especificaciones	Mínimo	-	1800	8	3	13	
	Máximo	-	-	16	5	-	

Fuente: Elaboración propia.

- Los valores de estabilidad determinados se encuentran dentro de lo aceptable, ya que los valores muy altos de estabilidad pueden producir un pavimento muy rígido por lo que su durabilidad será menor a la que fue diseñado.
- Los porcentajes óptimos de filler como de cemento asfáltico ayudan a que la mezcla presente una mejor cohesión en su estructura.
- El exceso de agregado fino en una mezcla asfáltica puede producir varios defectos en su estructura como baja resistencia durante la compactación, dando como resultado un pavimento inestable.
- Se puede decir que añadiendo llenante mineral o filler a las mezclas asfálticas en porcentajes de 4% y 6% en los distintos tipos y dependiendo del tipo de agregado,

se reduce los vacíos aumentando de esta manera la estabilidad de la mezcla y también la fluidez en la mezcla.

5.2. Recomendaciones

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

- Se debe seguir lo expuesto en la norma ASTM y AASHTO, que es la guía para el diseño de las mezclas asfálticas en caliente, ensayos de los agregados, relleno mineral (filler) y el cemento asfáltico.
- Se recomienda primeramente tener mucho cuidado en la utilización y manipulación de los equipos utilizados para el estudio puesto que estos tienen que estar en buen estado para tener precisión en la obtención de datos para su respectivo cálculo.
- Para facilitar la trabajabilidad al momento de realizar las briquetas, se debe realizar un previo pesaje de los agregados a utilizar en su fabricación y separarlas en recipientes, facilitando el mezclado.
- En la siguiente tabla podemos observar claramente los resultados obtenidos de las mezclas asfálticas con los distintos agregados utilizados en el estudio.
- Para la realización de las prácticas o ensayos se debe tener en cuenta que todas deben estar enmarcadas bajo norma con sus respectivas especificaciones técnicas, para así procesar y dar resultados de los ensayos aceptables.
- Para el diseño de mezclas asfálticas, tomar en cuenta la norma que se utilizará en específico para seguir como respaldo y no utilizar otras ya que cada norma presenta parámetros que el diseño asfáltico debe cumplir.
- Tener un espacio respectivo para la realización de la práctica, en el diseño de mezclas asfálticas, al ser una práctica donde se utiliza materiales de mucho cuidado, por lo que también se debe contar con equipos de seguridad de protección adecuados para cada ensayo, al ser ensayos donde se trabajó bajo temperaturas altas.

- 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 correspondientes.
- En el proceso de realización de los ensayos tener cuidado en la recolección de datos ya que de ella depende, los resultados, las cuales tendrán que estar dentro de los parámetros establecidos en las especificaciones técnicas de la norma.