

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN AL TEMA

1.1.-INTRODUCCIÓN

Las mezclas asfálticas asumen un papel fundamental en los pavimentos flexibles no solo por los volúmenes requeridos en su construcción, sino porque constituyen la parte más costosa de los mismos, y la superficie por la que transitan diariamente los vehículos.

La buena calidad de un pavimento flexible, en condiciones de servicio, es el resultado de un adecuado diseño estructural del pavimento seguido por la buena calidad en los procesos constructivos y la correcta selección de los materiales que conforman el pavimento sin embargo existen pavimentos que a pesar de cumplir con estos parámetros, tienden a presentar deterioros que van acortando su vida útil, éste caso puede tener su raíz en el hecho de que no se aplica un correcto nivel de energía de compactación a las mezclas asfálticas.

Actualmente no se tiene conciencia precisa del estado de los parámetros volumétricos en las mezclas asfálticas, ni como se afectan a las propiedades mecánicas de la mezcla, debido a variaciones de los niveles de energía de compactación que pueden producir mezclas asfálticas con mayores o menores pesos volumétricos.

En esta investigación se estudiara las propiedades de las mezclas asfálticas cuando se les aplica diferentes niveles de energía de compactación, entre estas propiedades las principales son la estabilidad, y su efecto en la durabilidad, teniendo en cuenta que valores bajos de estabilidad disminuyen la capacidad de la mezcla asfáltica de resistir desplazamientos y deformaciones bajo las cargas del tránsito.

Con la investigación podremos demostrar la influencia que tienen en las propiedades de las mezclas las energías de compactación que son aplicadas máximas y mínimas con relación a la energía de compactación establecida por normas, e identificar como

cambian los valores de las propiedades mas importantes como la estabilidad y la densidad, de esta manera podremos saber la importancia de los controles en cuanto a la compactación que se deben realizar en campo para la obtención de mezclas asfálticas de buena calidad que posean las propiedades deseadas de estabilidad, densidad, porcentaje de vacíos, etc.

Esta investigación también nos permitirá generar relaciones de los niveles de energía de compactación con la estabilidad y el efecto en la durabilidad de las mezclas asfálticas y de esta manera predecir cómo se comportará una mezcla asfáltica, bajo específicas condiciones de diseño y de servicio.

1.2.- JUSTIFICACIÓN

Esta investigación se realiza debido a que en la construcción de pavimentos, se encuentra que en la mayoría de los casos aunque se tenga un buen diseño de estructura de pavimento, y un buen diseño de la mezcla asfáltica, se siguen presentando deterioros prematuros en las carpetas asfálticas, debido a la poca importancia que se le da al efecto que tienen los niveles de energía de compactación que se aplica a las mezclas asfálticas durante los procesos constructivos.

Esto ocasiona que en repetidas ocasiones sea necesaria la intervención para reparar, o reconstruir partes de la carpeta asfáltica debido a los daños que se van presentando antes del tiempo previsto. Lo que conlleva a efectos negativos para los usuarios dado que genera embotellamientos vehiculares innecesarios sin mencionar el costo que representa para la ejecución de estas labores de reparación.

1.3.- DISEÑO TEÓRICO

1.3.1.-Situación problemática

La compactación de las mezclas asfálticas es un proceso que engloba varios aspectos para disminuir el contenido de vacíos presentes en la mezcla asfáltica y aumentar la densidad que es esencial para obtener un rendimiento duradero de las mezclas asfálticas.

Cuando se presentan deterioros prematuros en los pavimentos flexibles, afectando la durabilidad en los pavimentos y reduciendo la capacidad de resistir desplazamientos y deformaciones bajo las cargas del tránsito, surgen algunas dudas sobre si la energía de compactación aplicada a las mezclas asfálticas fue la correcta.

Para ello es necesario determinar la influencia de los niveles de energía de compactación en la estabilidad y su efecto en la durabilidad de las mezclas asfálticas.

1.3.2.-Problema

¿Cuál será la influencia de variar los niveles energía de compactación, en la estabilidad y el efecto en la durabilidad de las mezclas asfálticas?

1.4.- OBJETIVOS DEL TRABAJO

1.4.1.- Objetivo general

Evaluar el comportamiento de las mezclas asfálticas cuando se les aplica diferentes niveles de energía de compactación, de tal manera que se pueda determinar su estabilidad y el efecto en la durabilidad que se presenta en las mezclas asfálticas compactadas.

1.4.2.- Objetivos específicos

- Realizar la caracterización del cemento asfáltico y de los materiales granulares pétreos de aportación para el diseño de la mezcla asfáltica.

- Realizar el diseño de la mezcla asfáltica a utilizar en los ensayos de laboratorio mediante el método Marshall.

- Elaborar briquetas con diferentes niveles de energía de compactación, para proceder a determinar su Estabilidad Marshall a cada briqueta.

- Determinar la densidad y el porcentaje de vacíos en las diferentes briquetas elaboradas a diferentes niveles de energía de compactación.
- Establecer gráficas y relaciones entre los niveles de energía de compactación y los valores obtenidos de estabilidad y densidad.
- Realizar un análisis acerca del efecto en la durabilidad de las mezclas asfálticas producida a diferentes niveles de energía de compactación, tomando como referencia la relación de los valores de estabilidad entre sí.
- Analizar e interpretar los valores de estabilidad y densidad de las mezclas asfálticas a diferentes niveles de energía de compactación.
- Realizar un análisis de la pérdida en los valores de estabilidad en las briquetas después de someterlas a las temperaturas de 70°C, 75 °C, 80 °C, por un tiempo de 5 horas, con el fin de acelerar su proceso de oxidación.

1.5.- HIPÓTESIS

Si aplicamos diferentes niveles de energías de compactación, a las mezclas asfálticas elaboradas con cemento asfáltico y agregados minerales pétreos, entonces obtendremos diferentes muestras, que serán sometidas al ensayo Marshall, donde se podrá establecer cuál será su estabilidad y el efecto en la durabilidad de las mezclas asfálticas.

1.6.- DISEÑO METODOLÓGICO

1.6.1.- Unidades de estudio y decisión muestral

Las unidades de estudio son las siguientes:

1.6.1.1.- Unidad de estudio

Compactación de las mezclas asfálticas.

1.6.1.2.- Población

Mezclas asfálticas compactadas.

1.6.1.3.- Muestra

Se utilizará una mezcla asfáltica en caliente de granulometría densa con un cemento asfáltico de tipo Betunel (85-100) y agregados triturados, de procedencia de Charaja.

1.6.1.4.- Muestreo

- Se realizará el muestreo del cemento asfáltico (85-100) para la preparación de las mezclas asfálticas, tomando la muestra de los turriles que vienen de la fábrica del tipo Bitumen, para los cuales se realizará los ensayos de consistencia y caracterización correspondientes:
 - Ensayo de penetración (AASHTO T49-97)
 - Ensayo de punto de ablandamiento aparato anillo y bola (AASHTO T53-96)
 - Ensayo de punto de inflamación (AASHTO T79-96)
 - Ensayo de ductilidad (AASHTO T51-00)
 - Peso específico de materiales bituminosos (AASHTO T229-97)

- Para los agregados minerales pétreos de las mezclas asfálticas se utilizaran agregados resultantes de los procesos de chancado, para los cuales se realizaran sus ensayos de caracterización correspondientes:
 - Método para tamizar y determinar la granulometría (ASTM E40 AASHTO T27-99)
 - Densidad real, neta y absorción de agua en áridos Gruesos (AASHTO T85-91)
 - Densidad real, neta y absorción de agua en áridos finos (AASHTO T84-00)

- Porcentaje de caras fracturadas en agregado grueso (ASTM D 5821-95)
 - Equivalente de arenas y agregados finos (AASHTO T176-00)
 - Método para determinar el índice de lajas (AASHTO C-142)
 - Ensayo de abrasión por medio de la máquina de los ángeles (AASHTO T96-99)
- Para la compactación se utilizara el molde y martillo del método Marshall.

1.6.2.- Métodos y técnicas empleadas

1.6.2.1.- Métodos

El método que se realizará para el análisis de las mezclas asfálticas con diferentes niveles de energía de compactación, es el método Inductivo, es un método que alcanza conclusiones generales partiendo de una hipótesis, este método suele basarse en la observación y la experimentación de hechos y acciones concretas (es decir mediante la realización y observación de las pruebas de laboratorio y sus resultados podremos establecer las conclusiones del trabajo)

1.6.2.2.- Técnicas

Con los agregados y el cemento asfáltico se utilizara la técnica experimental con ensayos de laboratorio de caracterización de estos materiales, se procederá a diseñar la mezcla asfáltica haciendo variar los niveles de energía de compactación y así obtener diferentes muestras en los que se realizaran pruebas de estabilidad Marshall y otros ensayos complementarios que permitan realizar un análisis de la durabilidad de las mezclas asfálticas.

1.7.- PROCEDIMIENTO DE APLICACIÓN EN LA INVESTIGACIÓN

1.7.1.- Caracterización de los materiales a utilizar

La caracterización de los materiales consiste en evaluar las propiedades físicas del agregado pétreo y del cemento asfáltico.

1.7.1.1.- Agregado pétreo:

- Método para tamizar y determinar la granulometría (ASTM E40 AASHTO T27-99)
- Densidad real, neta y absorción de agua en áridos Gruesos (AASHTO T85-91)
- Densidad real, neta y absorción de agua en áridos finos (AASHTO T84-00)
- Porcentaje de caras fracturadas en agregado grueso (ASTM D 5821-95)
- Equivalente de arenas y agregados finos (AASHTO T176-00)
- Método para determinar el índice de lajas (AASHTO C-142)
- Ensayo de abrasión por medio de la máquina de los ángeles (AASHTO T96-99)

1.7.1.2.- Cemento asfáltico:

- Ensayo de penetración (AASHTO T49-97)
- Ensayo de punto de ablandamiento aparato anillo y bola (AASHTO T53-96)
- Ensayo de punto de inflamación (AASHTO T79-96)
- Ensayo de ductilidad (AASHTO T51-00)
- Peso específico de materiales bituminosos (AASHTO T229-97)

1.7.2.- Diseño de la mezcla asfáltica

La investigación se realizara utilizando el método de diseño de mezclas asfálticas Marshall, la compactación de los especímenes será realizado utilizando el método Marshall primero se realizará las pruebas para obtener el contenido óptimo de asfalto en la mezcla para posteriormente elaborar las briquetas aplicando diferentes niveles de energía de compactación mediante la variación del número de golpes aplicados a cada capa de las muestras, los números de golpes seleccionados para realizar esta investigación son: 25; 35; 45; 55; 65; 75; 85 y 100 golpes por cada cara.

1.7.3.- Determinación de las propiedades fundamentales de las mezclas compactadas

Se determinará los valores de estabilidad Marshall, la densidad, y el porcentaje de vacíos para las diferentes muestras compactadas y establecer como estos valores crecen o decrecen en relación con el nivel de energía de compactación aplicado.

1.7.4.- Números de ensayos a realizar

En esta investigación se elaborarán 128 briquetas, las primeras 32 briquetas serán utilizadas para determinar sus densidades y estabilidad Marshall en condiciones normales y recién elaboradas, mientras que las demás briquetas serán sometidas a las temperaturas de 70 °C, 75 °C y 80°C por un tiempo de 5 horas, con la finalidad de acelerar su proceso de oxidación y así poder comparar sus resultados de estabilidad antes y después de ese proceso de envejecimiento de las briquetas.

Todas las briquetas con 25; 35; 45; 55; 65; 75; 85 y 100 golpes por cara, se utilizarán para determinar sus densidades sus porcentajes de vacíos y las pruebas de estabilidad Marshall sacando promedio de los resultados de 4 briquetas por cada nivel de energía de compactación para obtener resultados más confiables.

1.8.-PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS Y LA INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Una vez obtenidos los resultados de la caracterización y de las pruebas de resistencia mecánica, se procede al tabulado y si es necesario corregir los resultados obtenidos de cada ensayo.

Con los ensayos de caracterización determinamos el cumplimiento de requisitos mínimos según normas, que deben tener tanto el cemento asfáltico y de los agregados minerales pétreos.

Con los ensayos de pruebas de resistencia mecánica determinamos las siguientes curvas y relaciones:

- 1) Energía de compactación vs. Estabilidad
- 2) Energía de compactación vs. Densidad
- 3) Resultados de Estabilidad por proceso convencional vs. Estabilidad de briquetas a 70 °C por un tiempo de 5 horas
- 4) Resultados de Estabilidad por proceso convencional vs. Estabilidad de briquetas a 75 °C por un tiempo de 5 horas
- 5) Resultados de Estabilidad por proceso convencional vs. Estabilidad de briquetas a 80 °C por un tiempo de 5 horas
- 6) Efecto en la durabilidad vs. Energía de compactación

De estas curvas podremos identificar las relaciones existentes entre las propiedades de las mezclas asfálticas y la variación de los niveles de energía de compactación, y de esta manera poder determinar la influencia que tiene los niveles de energía de compactación en la estabilidad y poder realizar un análisis del efecto en la durabilidad de las mezclas asfálticas en los diferentes niveles de energía de compactación.

1.9.-TRATAMIENTO ESTADÍSTICO Y ANÁLISIS DE ERROR DE LOS RESULTADOS

Se utilizan normalmente ciertas mediciones estadísticas, que nos ayudan a establecer si el método se encuentra dentro de un parámetro aceptable, normalmente se determinan las siguientes:

Media: Conocida también como media aritmética o promedio, es la cantidad total de la variable (muestra o medida) distribuida a partes iguales entre cada observación. En términos matemáticos, es igual a la suma de todos sus valores dividida entre el número de sumandos.

Desviación estándar (S): Es el promedio de lejanía de los valores obtenidos (lecturas) respecto del promedio.

Coefficiente de Variación (CV): Desviación estándar dividida por la media. También es conocida como desviación estándar relativa (RSD). El coeficiente de variación puede ser expresado en porcentaje.

Error absoluto y error relativo: El error absoluto es la diferencia entre la media y el valor verdadero de una cierta magnitud, el error absoluto nos da una medida de la desviación en términos absolutos, y el error relativo se define como el cociente entre el error absoluto y el valor verdadero.

Para realizar el análisis de error de los resultados de Estabilidad, se determinará el valor de la media aritmética más menos su desviación típica, determinando el error porcentual de los valores que más alejan del valor de la media de esta manera estableceremos los rangos dentro de los cuales están los valores de Estabilidad determinados.

1.10.- VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS

La validación de los resultados de la investigación será realizada al final de la investigación, mediante la elaboración de briquetas con diferentes números de golpes a los que se utilizarán en la investigación, para así obtener sus valores de estabilidad y poder realizar la comparación con los resultados obtenidos en la curva de Estabilidad versus energía de compactación, determinándose la desviación estándar en los valores de estabilidad, y así poder verificar que los resultados obtenidos en esta investigación son correctos.

1.11.- ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

El alcance que tendrá esta investigación de la influencia de los niveles de energía de compactación en la estabilidad y durabilidad de las mezclas asfálticas se detalla a continuación por capítulos:

En el primer capítulo, se describe de manera general de que tratará la investigación de la influencia de los niveles de energía de compactación en la estabilidad y durabilidad de las mezclas asfálticas donde se dará a conocer, una breve introducción al trabajo, la justificación de la investigación, los objetivos perseguidos, el objetivo general es de

evaluar el comportamiento de las mezclas asfálticas cuando se les aplica diferentes niveles de energía de compactación, de tal manera que se pueda determinar su estabilidad y su efecto en la durabilidad de las mezclas asfálticas.

El segundo capítulo, comprende la parte del fundamento teórico donde se detalla toda la información relevante y necesaria para la investigación, todo lo referente a las mezclas asfálticas, comprende los tipos de mezclas asfálticas, características y comportamiento de las mezclas asfálticas, los factores de composición de la mezcla y los parámetros volumétricos que influyen en su comportamiento, las características físicas de los materiales que componen las mezclas asfálticas, el procedimiento de diseño de la mezcla asfáltica para la investigación en el cual se describirá el método Marshall y todos los parámetros a considerar en esta investigación.

El tercer capítulo aplicación práctica, comprende la descripción de las pruebas de laboratorio a realizar en la investigación, así como la descripción de los ensayos de caracterización del ligante asfáltico y de los agregados basándose en las normas ASTM Y AASHTO. También en este capítulo se seleccionará la curva granulométrica para el diseño de la mezcla asfáltica, se describirá la preparación y compactación de los especímenes y la determinación y selección de los niveles de energía de compactación que se aplicará a las mezclas asfálticas.

Este capítulo también comprende la presentación y análisis de las pruebas de laboratorio, realizando gráficas de los resultados de Estabilidad Marshall. Para establecer relaciones y de esta manera ver cómo influyen los niveles de energía de compactación en la Estabilidad de las mezclas asfálticas.

También se dará a conocer un análisis acerca del efecto en la durabilidad de las mezclas asfálticas producida a diferentes niveles de energía de compactación, La durabilidad es una propiedad que establece la duración de la mezcla asfáltica a través de su vida útil soportando la carga de servicio, al no disponer de equipos calibrados para la

determinación de la durabilidad de una mezcla asfáltica en el laboratorio, es posible relacionar el comportamiento a través de la relación de estabilidades entre sí. El análisis del efecto en la durabilidad de las mezclas asfálticas será realizado en función a la relación de los valores de estabilidad entre sí, que se producen a diferentes niveles de energía de compactación, sometiendo a las briquetas a las temperaturas de 70°C, 75 °C, 80 °C, por un tiempo de 5 horas con la finalidad de acelerar su proceso de oxidación.

Para la determinación de la estabilidad se someterán las briquetas al ensayo Marshall, la estabilidad del espécimen de prueba es la máxima resistencia en N (lb) que desarrolla cuando es ensayado a una temperatura de 60° C.

Finalmente en el cuarto capítulo estableceremos las conclusiones a las que se llegaran luego de haber concluido el trabajo determinando la influencia de los niveles de energía de compactación en las propiedades de Estabilidad, densidad y efecto en la durabilidad de las mezclas asfálticas, además de especificar las posibles recomendaciones acerca de las energías de compactación adecuadas que se deben aplicar a las mezclas asfálticas, y las recomendaciones más importantes para la obtención de buenos resultados.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1.- MEZCLAS ASFÁLTICAS

2.1.1.- Definición de mezclas asfálticas¹

Las mezclas asfálticas, también reciben el nombre de aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua éste. Se fabrican en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan. (Kraemer et al., 2004).

Figura 2.1. Colocación de Mezcla asfáltica en caliente



Fuente: <http://www.ingemac.com/mezcla-asf%C3%A1ltica>

Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico.

Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto

¹ Alejandro Padilla Rodríguez; Mezclas asfálticas pág. 47 (Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-14.pdf?sequence=14>)

funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.

2.1.2.- Clasificación de mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas se clasifican de acuerdo a diferentes parámetros, entre ellos:

a) Por Fracciones del Agregado Pétreo en la Mezcla

- Masilla Asfáltica: Polvo mineral más el cemento asfáltico.
- Mortero Asfáltico: Agregado fino más masilla.
- Concreto Asfáltico: Agregado grueso más mortero.
- Macadam Asfáltico: Agregado grueso más ligante asfáltico

b) Temperatura de la Mezcla en la Puesta en Obra

- Mezclas Asfálticas en Caliente: Fabricadas con asfaltos a temperaturas elevadas, en el rango de los 150 grados centígrados, según la viscosidad del ligante, se calientan también los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos. La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores a la ambiente, pues en caso contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente.
- Mezclas Asfálticas en Frío: El ligante es una emulsión asfáltica (aunque en algunos lugares se usan los asfaltos fluidificados), y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.

Figura 2.2. Mezcla asfáltica elaborada en caliente



Fuente:

<http://padegua.com/productos/mezclas-en-caliente/>

c) Proporción de Vacíos en la Mezcla Asfáltica

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

- Mezclas Cerradas o Densas: contienen cantidades de agregados en proporciones adecuadas de todos los tamaños, de grueso a fino, incluyendo filler, proporcionados de tal forma de obtener una mezcla densa con pocos vacíos. La proporción de vacíos no supera el 5 %. Las mezclas densamente graduadas tienen un gran número de puntos de contacto entre las partículas, que pueden dar una alta resistencia friccional y reducir la posibilidad de trituración de las partículas en los puntos de contacto. Como el contenido de vacíos es bajo son poco permeables. En las mezclas asfálticas en caliente, deben preferirse agregados con granulometría densa, o muy cercana a la densa.
- Mezclas Semi-cerradas o Semi-densas: La proporción de vacíos está entre el 5 % y el 10%.
- Mezclas Abiertas: La proporción de vacíos supera el 12 %.
- Mezclas Porosas o Drenantes: Mezclas asfálticas utilizadas como carpeta de rodadura, que se caracteriza por tener un elevado porcentaje de huecos

interconectados entre si. Permitiendo el paso del agua a través de la mezcla y su rápida evacuación hacia las zonas laterales fuera de las calzadas. La proporción de vacíos es superior al 20 %.

Tabla 2.1: Clasificación de las mezclas asfálticas de acuerdo a su granulometría

Tipo de Graduación	Porcentaje que pasa tamiz Nº8
Abierta	5 - 20
Gruesa	20 - 35
Semi Densa	28 - 42
Densa	35 - 50
Fina	> 50

Fuente: Rosa Zúñiga c., mezcla asfáltica en caliente, laboratorio nacional de vialidad

d) Por el Tamaño máximo del agregado

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

e) Por la estructura del agregado

- Mezclas con Esqueleto mineral: Poseen un esqueleto mineral resistente, su componente de resistencia debida al rozamiento interno de los agregados es notable. Ejemplo, las mezclas abiertas y los que genéricamente se denominan concretos asfálticos, aunque también una parte de la resistencia de estos últimos, se debe a la masilla.

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

f) Por la Granulometría.

- Mezclas Continuas: Una cantidad muy distribuida de diferentes tamaños de agregado en el uso granulométrico (Zona comprendida entre dos curvas granulométricas).
- Mezclas Discontinuas: Una cantidad muy limitada de tamaños de agregado en el huso granulométrico.

2.1.3.- Características y comportamientos de las mezclas asfálticas²

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

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

2.1.3.1.-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

² Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Asphalt institute; Cap.3, pág. 57

multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua (1000 kg/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. Esto se debe a que rara vez la compactación in situ logra las densidades que se obtienen usando los métodos normalizados de compactación de laboratorio.

2.1.3.2.-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.

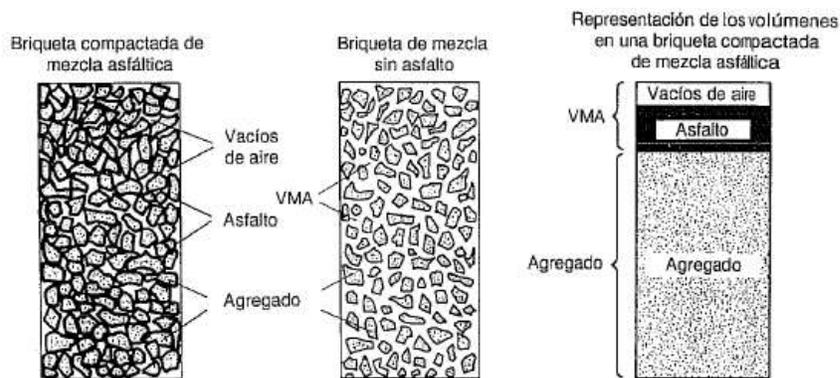
La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre más alta la densidad menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa. Las especificaciones de la obra requieren, usualmente, una densidad que permita acomodar el menor número posible (en la realidad) de vacíos: preferiblemente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

2.1.3.3.-Vacios en el agregado mineral

Los vacíos en el agregado mineral (VMA) 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 VMA 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 VMA más espacio habrá disponible para las películas de asfalto. Existen valores mínimos para VMA los cuales están recomendados y especificados como función del tamaño del agregado. Estos valores se basan en el hecho de que cuanto más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más durables será la mezcla.

Figura 2.3. Ilustración del VMA en una probeta de Mezcla compactada



Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Asphalt institute

Para que pueda lograrse un espesor durable de película de asfalto, se debe tener valores mínimos de VMA. Un aumento en la densidad de la graduación del agregado, hasta el punto donde se obtengan valores de VMA por debajo del mínimo especificado, puede resultar en películas delgadas de asfalto y en mezclas de baja durabilidad y apariencia seca.

Por lo tanto, es contraproducente y perjudicial, para la calidad del pavimento, disminuir el VMA para economizar el contenido de asfalto.

Figura 2.4. Porcentaje mínimo de VMA

Tamaño Máximo en mm Porcentaje		VMA mínimo, por ciento		
		Vacíos de Diseño, por ciento ³		
mm	in.	3.0	4.0	5.0
1.18	No. 16	21.5	22.5	23.5
2.36	No. 8	19.0	20.0	21.0
4.75	No. 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 Especificación Normal para Tamaños de Tamices usados en Pruebas, ASTM E 11 (AASHTO M 92)

² El tamaño máximo nominal de partícula es un tamaño mas grande que el primer tamiz que retiene mas de 10 por ciento del material.

³ Interpola el VMA mínimo para los valores de vacíos de diseño que se encuentren entre los que están citados.

Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Asphalt institute

2.1.3.4.-Contenido de asfalto

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

La relación entre el área superficial del agregado y el contenido óptimo de asfalto es más pronunciada cuando hay relleno mineral (fracciones muy finas de agregado que pasan a través del tamiz de 0.075 mm (Nº 200). Los pequeños incrementos en la cantidad de relleno mineral, pueden absorber, literalmente, gran parte el contenido de

asfalto, resultando en una mezcla inestable y seca. Las pequeñas disminuciones tienen el efecto contrario: poco relleno mineral resulta en una mezcla muy rica (húmeda).

Cualquier variación en el contenido o relleno mineral causa cambios en las propiedades de la mezcla, haciéndola variar de seca a húmeda. Si una mezcla contiene poco o demasiado, relleno mineral, cualquier ajuste arbitrario, para corregir la situación, probablemente la empeorará.

2.1.4.-Propiedades consideradas en el diseño de mezclas asfálticas³

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.

2.1.4.1-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.

³ Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Asphalt institute; Cap.3, pág. 60

La estabilidad de una mezcla también 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.

Cuando no hay agregados disponibles con características de alta fricción interna, se pueden usar mezclas mas económicas, en lugares donde se espere tráfico liviano, utilizando agregados con valores menores de fricción interna.

Figura 2.5. Criterios del instituto del asfalto (U.S.A.) Para el diseño Marshall

Criterios para Mezcla del Metodo Marshall	Transito Liviano Carpeta y Base		Transito Mediano Carpeta y Base		Transito Pesado Carpeta y Base	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Compactacion, numero de golpes en cada cara de la probeta	35		50		75	
Estabilidad, N (lb.)	3336 (750)	—	5338 (1200)	—	8006 (1800)	—
Flujo, 0.25 mm (0.01 pulgadas)	8	18	8	16	8	14
Porcentaje de Vacios	3	5	3	5	3	5
Porcentaje de Vacios en el Agregado Mineral (VMA)	<i>Ver Figura 3.20</i>					
Porcentaje de Vacios llenos de Asfalto (VFA)	70	80	65	78	65	75

NOTAS

¹ Todos los criterios y no solo estabilidad, deben ser considerados al diseñar una mezcla asfáltica de pavimentación. Las mezclas asfálticas en caliente de base que no cumplan estos criterios, cuando se ensayen a 60°C, se consideraran satisfactorias si cumplen los criterios cuando se ensayen a 38°C, y si se colocan a 100 mm o mas por debajo de la superficie. Esta recomendación se aplica solamente a las regiones que tengan una variedad de condiciones climáticas similar a la que prevalece en casi todas las regiones de Estados Unidos. En las regiones que tengan condiciones climáticas mas extremas puede ser necesario usar temperaturas mas bajas de ensayo.

² Clasificaciones del Transito
 Liviano Condiciones de transito que resultan en un EAL de diseño < 104
 Mediano Condiciones de transito que resultan en un EAL de diseño entre 104 y 106
 Pesado Condiciones de transito que resultan en un EAL de diseño > 106

³ Los esfuerzos de compactación en el laboratorio deberán aproximarse a la densidad máxima obtenida en el pavimento bajo el transito.

⁴ Los valores de fluencia se refieren al punto en donde la carga comienza a disminuir.

⁵ Cuando se este calculando el porcentaje de vacios, deberá permitirse cierta tolerancia en la porción de cemento asfáltico perdida por absorción en las partículas de agregado

⁶ El porcentaje de vacios en el agregado mineral debe ser calculado con base en el peso especifico total ASTM del agregado.

Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Asphalt institute

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.

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.

Tabla 2.2: Causas y efectos de inestabilidad en pavimentos

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

Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Asphalt institute

2.1.4.2.-Durabilidad

La durabilidad de un pavimento es su habilidad para mantener sus propiedades mecánicas y físicas a lo largo del tiempo, resistiendo factores tales como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades de asfalto (polimerización y oxidación) y separación de las películas de asfalto.

Generalmente, la durabilidad de una mezcla puede ser mejorada en tres formas. Estas son: usando la mayor cantidad posible de asfalto, usando una graduación densa de agregado resistente a la separación, y diseñando y compactando la mezcla para obtener la máxima impermeabilidad.

La mayor cantidad posible de asfalto aumenta la durabilidad porque las películas gruesas de asfalto no se envejecen o endurecen tan rápido como lo hacen las películas delgadas. En consecuencia, el asfalto retiene, por mas tiempo, sus características originales. Además el máximo contenido posible de asfalto sella eficazmente un gran porcentaje de vacíos interconectados en el pavimento, haciendo difícil la penetración del aire y del agua. Por supuesto, se debe dejar un cierto porcentaje de vacíos en el pavimento para permitir la expansión del asfalto en los tiempos cálidos.

Figura 2.6. Pavimento asfáltico deteriorado



Fuente: Elaboración Propia

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.

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

Tabla 2.3: Causas y efectos de una poca durabilidad

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

Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Asphalt institute

2.1.4.3.-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 esta 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.

2.1.4.4.-Trabajabilidad

La trabajabilidad esta 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.

Tabla 2.4: Causas y efectos de problemas trabajabilidad

CAUSAS	EFFECTOS
Tamaño máximo de partícula: grande	Superficie áspera, difícil de compactar
Demasiado agregado grueso	Puede ser difícil de compactar
Demasiada arena de tamaño medio	La mezcla se desplaza bajo la compactadora y permanece tierna o blanda.
Bajo contenido de relleno mineral	Mezcla tierna, altamente permeable
Alto contenido de relleno mineral	Mezcla muy viscosa, difícil de manera, poco durable.

Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Asphalt institute

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.

2.1.4.5.-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.

2.1.4.6.-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.

Tabla 2.5: Causas y efectos de una mala resistencia a la fatiga

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

Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Asphalt institute

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.

2.1.4.7.-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 este 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).

Tabla 2.6: 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 hidroplaneo.
Agregado pulido en la mezcla	Poca resistencia al deslizamiento

Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Asphalt institute

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 (38 pulgadas) a 12.5 mm (1/2 pulgada). Además de tener una superficie áspera, los agregados debe 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.

2.2.- COMPORTAMIENTO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA⁴

Como se mencionó, la mezcla asfáltica está compuesta por agregados pétreos y asfalto; por tanto, el comportamiento de la mezcla asfáltica se ve afectado tanto por las propiedades individuales del agregado mineral y del asfalto, como por la interrelación

⁴ Paul Garnica Anguas; Mayra Flores Flores; José Antonio Gómez López; Horacio Delgado Alamilla. 2005. Caracterización geomecánica de las mezclas asfálticas.

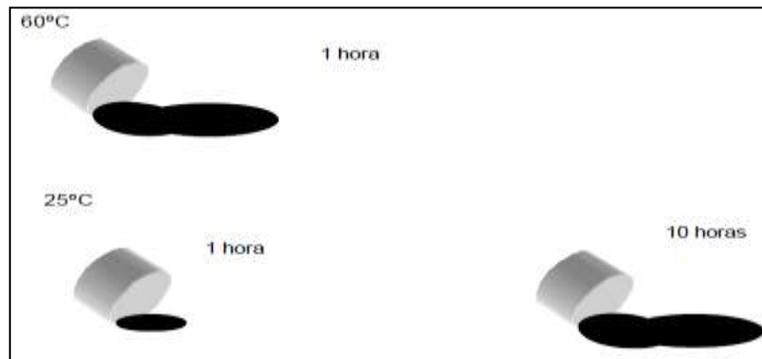
de ambos componentes dentro del sistema. En los siguientes párrafos se explica brevemente el comportamiento de cada uno de los componentes de la mezcla, así como su comportamiento en conjunto.

2.2.1.-Comportamiento del cemento asfáltico

Con respecto al comportamiento de la mezcla asfáltica, las características más importantes del cemento asfáltico son: la susceptibilidad a la temperatura, la viscoelasticidad, y el envejecimiento. De las tres anteriores, la que sobresale es la susceptibilidad a la temperatura, ya que sus propiedades mensurables dependen de ésta.

La cantidad de asfalto que fluye podría ser la misma para una hora a 60 °C o 10 horas a 25 °C. En otras palabras, los efectos del tiempo y la temperatura están relacionados; el comportamiento a temperaturas altas en periodos de corto tiempo, es equivalente al que ocurre a temperaturas bajas y duraciones largas.

Figura 2.7. Comportamiento del flujo del asfalto



Fuente: Paul Garnica Anguias, Caracterización Geomecánica de mezclas asfálticas

A altas temperaturas (>100 °C), o bajo carga sostenida (por ejemplo , movimientos lentos, o estacionamiento de camiones), el cemento asfáltico actúa como un líquido viscoso, es decir, tiene un comportamiento plástico. La viscosidad es la característica física del material usada para describir la resistencia de un líquido a fluir, y también se emplea para expresar la diferencia entre las fuerzas resistentes y la velocidad relativa con que fluye una capa con respecto a otra en el cemento asfáltico caliente.

A bajas temperaturas ($<0\text{ }^{\circ}\text{C}$) o bajo cargas aplicadas rápidamente (por ejemplo, movimiento rápido de camiones), el cemento asfáltico se comporta como un sólido elástico; cuando es cargado se deforma y cuando es descargado regresa a su forma original.

Aunque el cemento asfáltico es un sólido elástico a bajas temperaturas, éste puede llegar a ser muy frágil y agrietarse cuando es cargado excesivamente. Por esta razón, el agrietamiento a bajas temperaturas, algunas veces ocurre durante el invierno.

En el pavimento en servicio, la temperatura que se presenta normalmente es intermedia respecto a los extremos mencionados previamente. En este rango de temperaturas, el asfalto presenta ambas características, las de un fluido viscoso y las de un sólido elástico. Debido a esta amplitud de comportamiento, el asfalto es un excelente material adhesivo en la pavimentación.

Después de que se enfría, el asfalto actúa como un pegamento que mantiene al agregado junto en una matriz sólida. En esta etapa, el comportamiento se conoce como viscoelástico; tiene ambas características, dependiendo de la temperatura y la velocidad de la carga.

Otra característica importante del asfalto es su composición química, pues debido a que está compuesto por moléculas orgánicas, reacciona con el oxígeno del medio ambiente produciéndose la oxidación, y cambia la estructura y composición de las moléculas del asfalto. Al reaccionar con el oxígeno, la estructura del asfalto se vuelve más dura y frágil, y da origen al término endurecimiento por oxidación, o endurecimiento por envejecimiento.

La oxidación se produce más rápidamente a altas temperaturas. Es por ello que parte del endurecimiento ocurre durante el proceso de producción, cuando es necesario calentar el cemento asfáltico para el mezclado y la compactación. Esta propiedad explica el por qué la oxidación es más crítica en cementos asfálticos utilizados en pavimentos que se construyen en lugares con climas cálidos y desérticos.

Otra forma de endurecimiento es la volatilización y el endurecimiento físico. La

volatilización ocurre durante el mezclado y la construcción, cuando los componentes volátiles del asfalto tienden a evaporarse. El endurecimiento físico se presenta cuando el cemento asfáltico se expone a bajas temperaturas por periodos largos. Cuando la temperatura se estabiliza a un valor bajo constante, el cemento asfáltico continúa contrayéndose y endureciéndose. El endurecimiento físico es más notable a temperaturas menores a 0 °C (Asphalt Institute SP-1, 1996).

2.2.2.-Comportamiento del agregado mineral

Los agregados minerales para elaborar la mezcla asfáltica pueden ser naturales, triturados o sintéticos. Los naturales se extraen de depósitos fluviales o glaciares, y utilizados sin ningún procesamiento para elaborar la mezcla asfáltica. Los agregados triturados se explotan en canteras, y reducidos a los tamaños deseados mediante trituración mecánica; mientras que el agregado sintético es un subproducto industrial, como la escoria de altos hornos.

Figura 2.8. Agregados pétreos de trituración



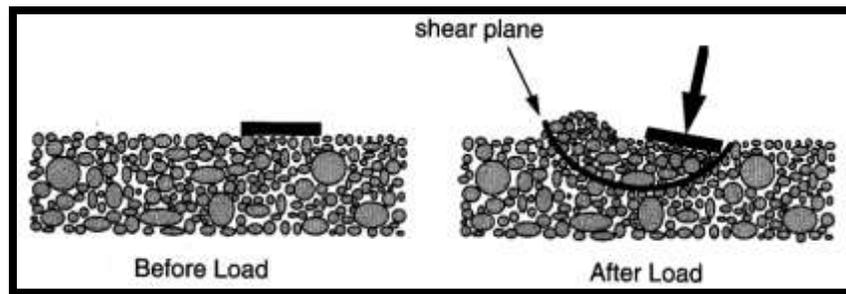
Fuente: Elaboración Propia

Independientemente de la fuente; en los métodos de procesamiento o mineralogía, se espera que el agregado provea un fuerte esqueleto pétreo para resistir aplicaciones de carga repetidas.

Los agregados de textura rugosa, equidimensionales, producen mayor resistencia que los redondeados y de textura lisa. Aunque una pieza de agregado redondeado podría poseer la misma resistencia interna que una pieza angular, las partículas angulares tienden a cerrarse más apretadamente, resultando una masa más compacta de material.

Las partículas redondeadas, en vez de trabarse tienden a deslizarse unas sobre otras. Cuando una masa de agregados es cargada, puede generarse dentro de la masa un plano por el que las partículas se deslicen o cizallen unas respecto de las otras (Figura 2.9) lo cual resulta en una deformación permanente de la masa. Es en este plano donde las tensiones de corte exceden a la resistencia al corte de la masa de agregados. La resistencia al corte del agregado es de especial importancia en la mezcla asfáltica.

Figura 2.9. Comportamiento del agregado sometido a carga de corte



Fuente: Paul Garnica Anguias, Caracterización Geomecánica de mezclas asfálticas

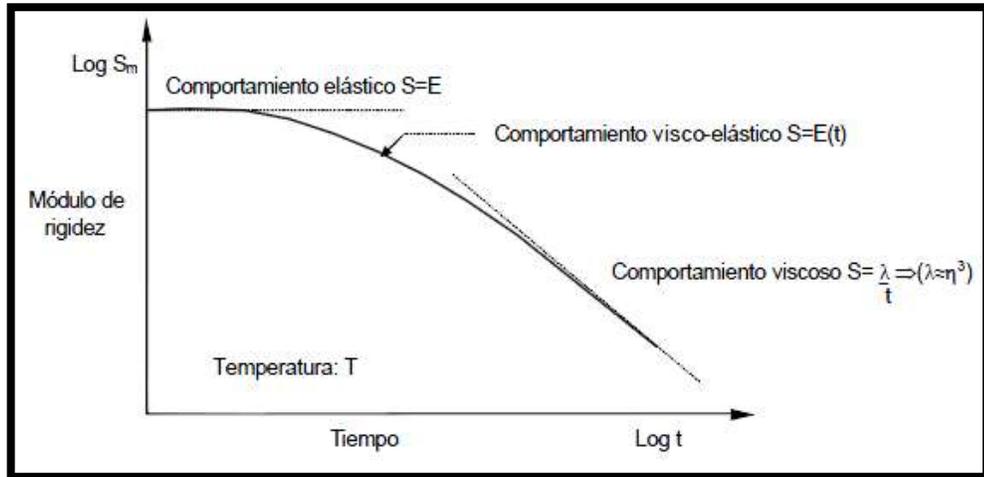
Por otro lado, al someter una masa de agregado a tensiones de corte, las partículas deben fracturarse o arrastrarse unas sobre otras si se produce un desplazamiento. Este fenómeno se llama dilatancia, pues resulta en una expansión o incremento de volumen de la masa de agregados. Los materiales resistentes, con una mayor densificación y alto ángulo de fricción interna, tienden a dilatarse más que los materiales más débiles (Asphalt Insitute SP-2, 1996).

2.2.3.-Comportamiento de mezclas asfálticas

Como resultado de la naturaleza de la integración de los comportamientos de sus componentes, las mezclas asfálticas presentan un comportamiento visco-elasto-plástico (Figura 2.10). Por un lado, el agregado pétreo tiene un comportamiento elastoplástico y por el otro, el mástico (asfalto mas polvo mineral) tiene un comportamiento viscoelástico. Por tanto, las mezclas asfálticas poseen un comportamiento que se puede llamar visco-elástico-plástico (Cepeda, 2002).

Figura 2.10. Variación del comportamiento de una mezcla asfáltica en función del tiempo de

aplicación de una carga (curva experimental)



Fuente: Paul Garnica Anguias, Caracterización Geomecánica de mezclas asfálticas

2.3.- DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

El objetivo principal del diseño mezclas asfálticas de pavimentación, consiste en determinar una combinación y graduación económica de asfalto y agregados (dentro de los límites de las especificaciones del proyecto) que produzcan una mezcla con:

- Suficiente asfalto para proporcionar un pavimento durable.
- Buena estabilidad para satisfacer las demandas de tránsito sin producir deformaciones o desplazamientos.
- Suficiente trabajabilidad para evitar la segregación al momento de colocación.
- Un contenido de vacíos lo suficientemente alto, para permitir una ligera cantidad de compactación adicional bajo las cargas producidas por el paso de vehículos sin que se produzca exudación.

El diseño de mezcla adecuado, es generalmente el más económico y que cumple satisfactoriamente los criterios mencionados anteriormente.

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 que por su accesibilidad a los equipos y por ser el más usado en el país.

2.3.1.- Demanda de asfalto para la combinación de agregados

Puede determinarse por el ensayo CKE (equivalente centrífugo de kerosene) o estimarse con la fórmula empírica:

$$Pc = 0.035 a + 0.045 b + K c + F$$

Donde:

Pc = Porcentaje de asfalto por peso de la mezcla total.

a = Porcentaje de agregado, mayor a 2.36 mm(Nº8).

b = Porcentaje de material entre 2.36 mm y 75µm (Nº8 y Nº 200).

c = Porcentaje de partículas menores a 75µm (Nº 200).

K = 0.15 si el porcentaje inferior a 75 µm está entre 11 y 15; 0.18 si su porcentaje está entre 6 y 10; 0.20 si es menor o igual a 5.

F = Varía entre 0 y 2 % de acuerdo a la absorción del agregado. La fórmula se basa en un peso específico promedio de 2.60 a 2.70. Si no se dispone información, se puede tomar un valor de 0.7 a 1.0, rango dentro del cual se encuentran la mayoría de los casos.

2.3.2.- Porcentaje de asfalto nuevo en la mezcla

La cantidad de asfalto nuevo por adicionar en las mezclas recicladas es igual a la demanda total, menos el porcentaje de asfalto del pavimento asfáltico recuperado.

$$Pr = Pc - Pa * \frac{Pp}{100}$$

Donde:

Pr = Porcentaje de asfalto nuevo en la mezcla reciclada.

P_c = Porcentaje de asfalto por peso de la mezcla.

P_a = Porcentaje de asfalto en la mezcla recuperada del pavimento.

P_p = Porcentaje en que interviene el pavimento asfáltico recuperado dentro de la mezcla reciclada.

Si se requiere expresar el porcentaje de asfalto como porcentaje con respecto al peso de los agregados:

$$P_a = \frac{100 * P_r}{100 - P_r}$$

2.3.3.- Tanteos de diseño de la mezcla y selección de la fórmula de trabajo

Se hacen tanteos utilizando el método Marshall. El contenido de asfalto se puede ajustar cambiando la cantidad de asfalto nuevo, hasta llegar a una mezcla que cumpla con el criterio del procedimiento de diseño utilizado.

2.3.4.- Método de diseño Marshall

El concepto del método Marshall fue desarrollado por Bruce Marshall, ex-ingeniero de bitúmenes del departamento de carreteras del estado de Mississippi.

El ensayo Marshall, surgió de una investigación iniciada por el cuerpo de ingenieros del ejército de los estados unidos en 1943. Varios métodos para el diseño de mezclas asfálticas fueron comparados y evaluados para desarrollar un método simple.

Dicho cuerpo de ingenieros decidió adoptar el método Marshall, y desarrollarlo y adaptarlo para diseño y control de mezclas de pavimento bituminoso en el campo, debido en parte a que el método utilizaba equipo portátil. A través de una extensa investigación de pruebas de tránsito y de estudios de correlación, en el laboratorio, el cuerpo de ingenieros mejoro y agrego ciertos detalles al procedimiento del ensayo Marshall y posteriormente desarrollo criterios de diseño de mezclas.

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 vacío que deben ser cumplidos durante la construcción del pavimento.

El método Marshall, solo se aplica a mezclas asfálticas en caliente de pavimentación que usan cemento asfáltico clasificado con viscosidad o penetración y que contienen agregados con tamaños máximos de 25.00 mm o menos. El método puede ser usado para el diseño en laboratorio, como para el control de campo de mezclas asfálticas (en caliente) de pavimentación.

El ensayo Marshall usa probetas de dimensiones normalizadas de 4" (10 cm) de diámetro por 2.5" (6.3 cm) de altura. Sobre esta muestra se hace un análisis de densidad-vacíos y estabilidad-flujo. La máxima resistencia que la muestra puede desarrollar a 60 C es la estabilidad Marshall. El movimiento total, medido en 0.25 mm de incremento, que ocurre entre la carga cero y la carga máxima es el flujo de la mezcla. Se aceptan como mínimo estabilidades de 500 lbs (227 kg o 2.22 KN). El contenido de vacíos oscila entre 3% a 5 %.⁵

A continuación se presenta una descripción general de los procedimientos seguidos en el diseño Marshall.

2.3.4.1- Preparación para efectuar los procedimientos Marshall AASHTO T 245⁶

Diferentes agregados y asfaltos presentan diferentes características. Estas características tienen un impacto directo sobre la naturaleza misma del pavimento. El primer paso en el método de diseño entonces, es determinar las cualidades (estabilidad, durabilidad, trabajabilidad, resistencia al deslizamiento, etc.) que debe de tener la mezcla asfáltica de pavimentación, y seleccionar un tipo compatible de asfalto que puedan combinarse para producir esas cualidades. Una vez efectuado lo anterior, se procede con la preparación de ensayos.

⁵ Diseño de pavimentos (AASHTO-93) Y DIPAV-2, instituto Boliviano del cemento y el hormigón; Cap. 5, Pág. 95

⁶ Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Asphalt institute; Cap.3, pág. 71

2.3.4.2.-Selección de las muestras de material

La primera preparación para los ensayos consta de reunir muestras de asfalto y del agregado que van a ser usados en la mezcla de pavimentación. Es importante que las muestras de asfalto tengan características idénticas a las de asfalto que va a ser usado en la mezcla final. Lo mismo debe ocurrir con las muestras de agregado. La razón es simple: los datos extraídos de los procedimientos de diseño de mezclas determinan la fórmula para la mezcla de pavimentación. La receta será extraída solamente si los ingredientes ensayados en el laboratorio tienen características idénticas a los ingredientes usados en el producto final.

Una amplia variedad de problemas graves, que van desde una mala trabajabilidad de la mezcla hasta una falla prematura del pavimento, son el resultado histórico de variaciones ocurridas entre los materiales ensayados en el laboratorio y los materiales usados en la realidad.

2.3.4.3.-Preparación del agregado

La relación del cemento asfáltico que va a ser usado debe ser ya conocida para poder establecer las temperaturas del mezclado y compactación en el laboratorio. En consecuencia, los procedimientos preliminares se enfocan hacia el agregado con el propósito de identificar exactamente sus características. Estos procedimientos incluyen secar el agregado, determinar su peso específico, y efectuar un análisis granulométrico por lavado.

- Secado del agregado

El método Marshall requiere de que los agregados ensayados estén libres de humedad, tan práctico como sea posible. Esto evita que la humedad afecte los resultados de los ensayos. Una muestra de cada agregado a ser ensayado se coloca en una bandeja, por separado, y se calienta en un horno a temperatura de 110 °C (230 °F). Después de cierto tiempo, la muestra caliente se pesa, y se registra su valor.

La muestra se calienta por segunda vez, y se vuelve a pesar y a registrar su valor. Este procedimiento se repite hasta que el peso de la muestra permanezca constante después

de dos calentamientos consecutivos, lo cual indica que la mayor cantidad posible de humedad se ha evaporado de la muestra.

- Análisis granulométrico por vía húmeda

El análisis granulométrico por vía húmeda es un procedimiento usado para identificar las proporciones de partículas de tamaño diferente en las muestras del agregado. Esta información es importante porque las especificaciones de la mezcla deben estipular las proporciones necesarias de partículas de agregado de tamaño diferente, para producir una mezcla en caliente final con las características deseadas.

El análisis granulométrico por vía húmeda consta de los siguientes pasos:

- 1) Cada muestra de agregado es secada y pesada.
- 2) Luego cada muestra es lavada a través de un tamiz de 0.075 mm (No. 200), para remover cualquier polvo mineral que este cubriendo el agregado.
- 3) Las muestras lavadas son secadas siguiendo el procedimiento de calentado y pesado descrito anteriormente.
- 4) El peso seco de cada muestra es registrada. La cantidad de polvo mineral puede ser determinada si se comparan los pesos registrados de las muestras antes y después del lavado.

- Determinación del peso específico

El peso específico de una sustancia es la proporción peso-volumen de una unidad de esta sustancia comparada con la proporción peso-volumen de una unidad igual de agua. El peso específico de una muestra de agregado es determinado al comparar el peso de un volumen dado de agregado con el peso de un volumen igual de agua, a la misma temperatura. El peso específico del agregado se expresa en múltiplos peso específico del agua (la cual siempre tiene un valor de 1). Por ejemplo una muestra de agregado que pese dos y media veces más que un volumen igual de agua tiene un peso específico de 2.5.

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 agregados, asfalto, y vacíos que van a usarse en los métodos de diseño.

2.3.4.4.-Preparación de las muestras (probetas) de ensayo⁷

Las probetas de ensayo de las posibles mezclas de pavimentación son preparadas haciendo que cada una contenga una ligera cantidad diferente de asfalto. El margen de contenido de asfalto usado en las briquetas de ensayo está determinado con base en experiencia previa con los agregados de la mezcla. Este margen le da al laboratorio un punto de partida para determinar el contenido exacto de asfalto en la mezcla final. La proporción de agregado en las mezclas está formulada por los resultados del análisis granulométrico.

Las mezclas se preparan de la siguiente manera:

- 1) El asfalto y el agregado se calientan y mezclan completamente hasta que todas las partículas de agregado estén revestidas esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta.
- 2) Las mezclas asfálticas calientes se colocan en los moldes pre-calentados Marshall como preparación para la compactación, en donde se usa el martillo Marshall de compactación, el cual también es calentado para que no se enfríe la superficie de mezcla al golpearla.
- 3) Las briquetas son compactadas mediante golpes del martillo Marshall de compactación. El número de golpes del martillo (35, 50, o 75) depende de la cantidad de tránsito para la cual está siendo diseñada. Ambas caras de cada biqueta reciben el mismo número de golpes. Así una probeta Marshall de 35 golpes recibe, realmente un total de 70 golpes. Una probeta de 50 golpes recibe 100 impactos. Después de completar la compactación las probetas son enfriadas y extraídas de los moldes.

⁷ Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Asphalt institute; Cap.3, pág.74

2.3.4.5.-Procedimiento del ensayo Marshall⁸

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

2.3.4.6.-Determinación del peso específico total (AASHTO T 166)

El peso específico total de cada probeta se determina tan pronto como las probetas recién compactadas se hayan enfriado a la temperatura ambiente. Esta medición de peso específico es esencial para un análisis preciso de densidad-vacíos.

2.3.4.7.-Ensayos de estabilidad y fluencia

El ensayo de estabilidad está dirigido a medir la resistencia a la deformación de la mezcla. La fluencia mide la deformación, bajo carga, que ocurre en la mezcla.

El procedimiento de los ensayos es el siguiente:

- 1) Las probetas son calentadas en un baño agua a 60 °C (140 °F). esta temperatura representa, normalmente, la temperatura más caliente que un pavimento en servicio va a experimentar.
- 2) La probeta es removida del baño, secada, y colocada rápidamente en el aparato Marshall. El aparato consiste en un dispositivo que aplica una carga sobre la probeta, y de unos medidores de carga y deformación (fluencia).
- 3) La carga del ensayo es aplicada a la probeta a una velocidad constante de 51 mm por minuto hasta que la muestra falle. La falla está definida como la carga máxima que la briqueta puede resistir.
- 4) La carga falla se registra como el valor de estabilidad Marshall y la lectura del medidor de fluencia se registra como la fluencia.

2.3.4.8.-Valor de estabilidad Marshall

El valor de estabilidad Marshall es una medida de la carga bajo la cual una probeta

⁸ Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Asphalt institute; Cap.3, pág. 75

cede o falla totalmente. Durante un ensayo, cuando la carga es aplicada lentamente, los cabezales superior e inferior del aparato se acercan, y la carga sobre la briqueta aumenta al igual que la lectura en el indicador de cuadrante. Luego se suspende la carga una vez que se obtiene la carga máxima. La carga máxima indicada por el medidor es el valor de estabilidad Marshall.

Debido a que la estabilidad indica la resistencia de una mezcla a la deformación, existe una tendencia a pensar que si un valor de estabilidad es bueno, entonces un valor más alto será mucho mejor.

Para muchos materiales de ingeniería, la resistencia del material es, frecuentemente, una medida de su calidad; sin embargo, este no es necesariamente el caso de las mezclas asfálticas en caliente. Las estabilidades extremadamente altas se obtienen a costa de durabilidad.

2.3.4.9.-Valor de fluencia Marshall

La fluencia Marshall, medida en centésimas de pulgada, representa la deformación de la briqueta. La deformación está indicada por la disminución en el diámetro vertical de la briqueta.

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

2.3.4.10.-Análisis de densidad y vacíos

Una vez que se completan los ensayos de estabilidad y de fluencia, se procede a efectuar un análisis de densidad y vacíos para cada serie de probetas de prueba. El propósito del análisis es el de determinar el porcentaje de vacíos en la mezcla compactada.

2.3.4.11.-Análisis de vacíos

Los vacíos son las pequeñas bolsas de aire que se encuentran entre las partículas de agregado revestidas de asfalto. El porcentaje de vacíos se calcula a partir del peso específico total de cada probeta compactada y del peso específico teórico de la mezcla de pavimentación (sin vacíos). Este último puede ser calculado a partir de los pesos específicos del asfalto y el agregado de la mezcla, con un margen apropiado para tener en cuenta la cantidad de asfalto absorbido por el agregado, o directamente mediante un ensayo normalizado (AASHTO T 209) efectuado sobre la muestra de mezcla sin compactar. El peso específico total de las probetas compactadas se determina pesando las probetas en aire y en agua.

- **Análisis de Peso Unitario**

El peso unitario promedio para cada muestra se determina multiplicando el peso específico total de la mezcla por 1000 Kg/m^3 (62.4 lb/ft^3).

- **Análisis de VMA**

Los vacíos en el agregado mineral, VMA, está definidos por el espacio intergranular de vacíos que se encuentra entre las partículas de agregado de la mezcla de pavimentación compactada, incluyendo los vacíos de aire y el contenido efectivo de asfalto, y se expresan como un porcentaje del volumen total de la mezcla. El VMA es calculado con base en el peso específico total del agregado y se expresa como un porcentaje del volumen total de la mezcla compactada. Por lo tanto, el VMA puede ser calculado al restar el volumen de agregado (determinado mediante el peso específico total del agregado) del volumen total de la mezcla compactada.

- **Análisis de VFA**

Los vacíos llenos de asfalto, VFA, son el porcentaje de vacíos intergranulares entre las partículas de agregado (VMA) que se encuentran llenos de asfalto. El VMA abarca asfalto y aire, y por lo tanto, el VFA se calcula al restar los vacíos de aire de VMA, y luego dividiendo por el VMA, y expresando el valor final como un porcentaje.

2.4.- CRITERIOS DE DISEÑO NORMALIZADO

Para el diseño de mezclas asfálticas, deben cumplir con la caracterización mediante ensayos establecidos por las normas AASHTO y ASTM, como se muestra en las siguientes tablas:

Tabla 2.7 Ensayos de laboratorio Normalizados para Agregados

Ensayo de laboratorio para AGREGADOS	Norma	Propósito
Granulometría	AASHTO T 27 ASTM C 136	La determinación de la composición granulométrica de un material pétreo que se pretende emplear en la elaboración de la carpeta asfáltica es de primordial importancia porque en función de ellas se conoce de ante mano qué clase de textura tendrá la carpeta.
Desgaste	AASHTO T 96 ASTM C 131	EL objeto es conocer la calidad del material pétreo desde el punto de vista de su desgaste, ya sea por el grado de alteración del agregado, o por la presencia de planos débiles y aristas de fácil desgaste. Esta característica es esencial cuando el agregado va a estar sujeto a desgaste por abrasión como en el caso de los pavimentos. Es la medida de dureza de los agregados y nos da una idea de la forma en la que se comportarán los agregados, bajo los efectos de la abrasión causada por el tráfico además de la idea del grado de intemperismo que poseen los agregados.
Sanidad usando Sulfato de Sodio	AASHTO T 104 ASTM C 88	Permite obtener la información de estabilidad de un agregado bajo la acción de agentes atmosféricos. Los agregados inestables (se disgregan ante la presencia de condiciones atmosféricas desfavorables) resultan evidentemente insatisfactorios como agregados para mezcla en rodadura en pavimentos, especialmente cuando éstos tendrán una gran porción de su superficie expuesta a los agentes atmosféricos, el valor del error permisible no debe ser mayor de 0.5%.
Equivalente de Arena	AASHTO T 176 ASTM D 2419	Descubre el exceso de arcilla en los agregados, ya que es un medio rápido para separar las partículas más finas (arcillosas) de los granos más gruesos o de la arena.
Cubicidad de Partículas	ASTM D 692	Se utiliza para determinar valores como el índice de laja y la cubicidad de las partículas que componen el material pétreo. Las partículas de los agregados, deben ser limpias, duras, resistentes y durables por lo que debe evitarse partículas débiles quebradizas o laminadas ya que son perjudiciales.
Gravedad específica y absorción del agregado gruesos y finos	AASHTO T 84 AASHTO T 85 ASTM C - 127 ASTM C - 128	La gravedad específica aparente se refiere a la densidad relativa del material sólido de las partículas constituyente, no se incluye aquí los espacios vacíos (poros accesibles) que contienen las partículas los cuales son accesibles al agua. El valor de absorción es usado para calcular el cambio en el peso de un agregado provocado por el agua absorbida en los poros accesibles de las partículas que constituyen el material comparado con la condición seca cuando se evalúa el comportamiento del agregado con el agua durante un periodo largo tal, que se logre alcanzar el valor potencial de absorción del mismo.
Peso Unitario y Vacío	AASHTO T 19 ASTM C 29M	En la práctica el valor de peso unitario es muy utilizado para realizar conversiones de volúmenes a pesos de los agregados a utilizar en las mezclas de concreto asfáltico. La dosificación óptima de mezclas de agregados para mezclas de superficie en pavimentos puede realizarse utilizando el método de pesos unitarios, el cual consiste en elaborar una gráfica (parecida a la del Proctor) en la cual se grafica las proporciones de los agregados en las abscisas y los pesos unitarios en las ordenadas.

Fuente: The Asphalt Institute.

Tabla 2.8 Ensayos de laboratorio Normalizados para Asfaltos

Ensayo de laboratorio para ASFALTOS	Norma	Propósito
Viscosidad	AASHTO 204 ASTM D 2170	En el diseño de mezclas asfálticas, las temperaturas de servicio y construcción se definen en función de la viscosidad que posee el Cemento asfáltico, ya que la trabajabilidad de una mezcla asfáltica, se ve influenciada por la trabajabilidad que el asfalto tenga dentro de este rango a una temperatura determinada de trabajo. Este ensayo se usa para clasificar los Cementos Asfálticos a Viscosidad 80. Mide la consistencia de los Cementos Asfálticos.
Penetración	AASHTO T 40 ASTM D 5	Clasifica los asfaltos en grados según su dureza o consistencia medida en décimas de milímetros. Valores altos de penetración, indican consistencias suaves.
Punto de Inflamación	AASHTO T 40 ASTM D 92	Tiene por propósito, identificar la temperatura a la cual el asfalto puede ser encendido y alcanzarlo en un período que se define. El punto de inflamación se mide por el ensayo en copa abierta Cleveland.
Densidad	AASHTO T 51 ASTM D 113	Porque de una medida de las propiedades al calentamiento de los cementos asfálticos y el valor resultante puede ser usado como criterio de aceptación del material asfáltico ensayado. Se considera la densidad como la capacidad que tiene el asfalto de resistir esfuerzos de calentamiento bajo condiciones de velocidad y temperatura especificadas.
Punto de reblandecimiento	AASHTO T 51 ASTM D 36	La temperatura determinada como de reblandecimiento, representada aquí a la cual un cemento asfáltico alcanza un determinado estado de fluidez, midiendo consecuentemente una pérdida de consistencia del mismo. El punto de reblandecimiento es una prueba de resistencia a la deformación del cemento asfáltico y además es también una prueba de la viscosidad.
Ensayo de Retención	AASHTO T 50 ASTM D 130	Este prueba caracteriza el comportamiento al flujo o consistencia de ciertos materiales bituminosos, que por su bajo grado de dureza no pueden ser ensayados utilizando el método de penetración. Este ensayo es utilizado para medir la consistencia del residuo de destilación de los asfaltos rebajados de Buzardo lento.
Stabilidad en Tracción	AASHTO T 44 ASTM D 2942	Este ensayo indica la posición de constituyentes cementantes activos en el asfalto cuando se dice se utiliza para medir la parte del asfalto. En este prueba los sales, el carbono libre y los contaminantes inorgánicos, se consideran impurezas.

Fuente: The Asphalt Institute.

Tabla 2.9 Requisitos de calidad del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa.

Característica	Valor
Densidad relativa, mínimo	2,4
Desgaste de los ángeles, %	35
Partículas alargadas y lajeadas, % máximo	40
Equivalente de arena, % mínimo	50
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua, % máximo	25

Fuente: SCT, 2003.

Tabla 2.10 Especificaciones para Graduaciones Densas

Tamiz	Mezcla Densa								
	Tamaño máximo nominal de agregados								
	2"	1 ½"	1"	¾"	½"	3/8"	Nº4	Nº8	Nº16
Gradación de agregados (grava; fino y filler si se requiere) Porcentaje en peso									
2 ½" (63mm)	100	-	-	-	-	-	-	-	-
2" (50mm)	90-100	100	-	-	-	-	-	-	-
1 ½" (37.5mm)	-	90-100	100	-	-	-	-	-	-
1" (25.0mm)	60-80	-	90-100	100	-	-	-	-	-
¾" (19.0mm)	-	56-80	-	90-100	100	-	-	-	-
1/2" (12.5mm)	35-65	-	56-80	-	90-100	100	-	-	-
3/8" (9.5mm)	-	-	-	56-80	-	90-100	100	-	-
Nº4 (4.75mm)	17-47	23-53	29-59	35-65	44-74	55-85	80-100	-	100
Nº8 (2.36mm)	10-36	15-41	19-45	23-49	28-58	32-67	65-100	-	95-100
Nº16 (1.18mm)	-	-	-	-	-	-	40-80	-	85-100
Nº30 (600µm)	-	-	-	-	-	-	25-65	-	70-95
Nº50 (300µm)	3-15	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23	7-40	-	45-75
Nº100 (150µm)	-	-	-	-	-	-	3-20	-	20-40
Nº200 (75µm)	0-5	0-6	1-7	2-8	2-10	2-10	2-10	-	9-20

Fuente: *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction*. NAPA, 1996.

Requisitos del ligante asfáltico

Tabla 2.11 Requisitos de calidad para cemento asfáltico, clasificado por viscosidad dinámica a 60°C.

Características	Clasificación			
	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30
Del cemento original	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30
Viscosidad dinámica a 60°C; Pa.s(P ^[1])	50 ± 10 (500 ± 100)	100 ± 20 (1 000 ± 200)	200 ± 40 (2 000 ± 400)	300 ± 60 (3 000 ± 600)
Viscosidad cinemática a 135°C; mm ² /s, mínimo (1 mm ² /s = 1 centistoke)	175	250	300	350
Viscosidad Saybolt-Furol a 135 °C; s, mínimo	80	110	120	150
Penetración a 25°C, 100 g, 5s; 10 ⁻¹ mm, mínimo	140	80	60	50

Fuente: SCT, 2005.

2.5.- CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES GRANULARES

Los ensayos de áridos, además de fijar las características de forma, tamaño, granulometría, resistencia mecánica y resistencia a la alterabilidad. Deben fijarse como objetivo la utilización de áridos extensos de suciedad, polvo y sobre todo finos arcillosos que rebajan extraordinariamente las características mecánicas de las mezclas.⁹

2.5.1.- Agregado grueso

Porcentaje de caras fracturadas en los agregados (ASTM D 5821-95). El propósito de este ensayo es de maximizar la resistencia al esfuerzo cortante con el incremento de la fricción entre las partículas. Otro propósito es dar estabilidad a los agregados empleados para carpeta o afirmado; y dar fricción y textura a agregados empleados en

⁹ MORILLA ABAD IGNACIO, *Control de calidad en obras de carreteras*, pág. 652

pavimentación.

La forma de las partículas de los agregados puede afectar la trabajabilidad durante su colocación; así como la cantidad de fuerza necesaria para compactarla a la densidad requerida y la resistencia de la estructura del pavimento durante su vida de servicio.

Las partículas irregulares y angulares generalmente resisten el desplazamiento en el pavimento, debido a que se entrelazan al ser compactadas. El mejor entrelazamiento se da, generalmente, con partículas de bordes puntiagudos y de forma cúbica, producidas, casi siempre por trituración.

Este ensayo describe la determinación del porcentaje, en peso, de una muestra de agregado grueso que presenta una, dos o más caras fracturadas.

El número especificado de caras fracturadas, se calcula de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$P = \left[\frac{F + Q/2}{F + Q + N} \right] * 100$$

Donde:

P = Porcentaje de partículas con el número especificado de caras fracturadas.

F = Peso o cantidad de partículas fracturadas con al menos el número especificado de caras fracturadas.

Q = Peso o cantidad de partículas cuestionables.

N = Peso o cantidad de partículas en la categoría de no fracturadas que no cumplen el criterio de fractura.

Abrasión de agregado grueso máquina de los Ángeles (ASTM-131). El método se emplea para determinar la resistencia al desgaste de agregados naturales o triturados, empleando la máquina de Los Ángeles.

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.

El resultado del ensayo se expresa en porcentaje de desgaste, calculándose como la diferencia entre el peso inicial y final de la muestra de ensayo con respecto al peso inicial.

$$\%deDesgaste = \frac{P_{inicial} - P_{final}}{P_{inicial}} * 100$$

Entre menor sea el porcentaje de desgaste obtenido en el ensayo, mayor será la resistencia de los materiales para soportar la abrasión producida por efecto de las cargas del tránsito vehicular.

Determinación del peso específico y absorción del agregado grueso (ASTM D-127).

El ensayo tiene por objeto la determinación del peso específico aparente y del peso específico “bulk”, lo mismo que la cantidad de agua que se absorbe en el agregado grueso cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas, expresada como un porcentaje en peso.

Las cantidades mínimas para ensayo se indican en la Tabla 2, en función del tamaño máximo nominal del agregado.

Tabla 2.12: Cantidades mínimas para ensayo según el tamaño nominal.

Tamaño máximo nominal		Cantidad mínima de muestra
mm	(pulg)	kg
hasta 12.5	1/2	2
19.0	3/4	3
25.0	1	4
37.5	1 1/2	5
50.0	2	8
63.0	2 1/2	12
75.0	3	18
90.0	3 1/2	25

Nota. Fuente: Maila Paucar Manuel Elías, comportamiento de una mezcla asfáltica modificada con polímero

Las ecuaciones utilizadas para calcular el peso específico y la absorción:

Peso Específico “Bulk”.

$$PE_{bulk} = \frac{A}{B - C}$$

Peso Específico Aparente.

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

Peso Específico Saturado.

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

Porcentaje de Absorción.

$$\%Absorción = \frac{B - A}{A}$$

Donde:

A = Peso del material seco en horno.

B = Peso del material saturado con superficie seca.

C = Peso del material en el agua.

Partículas planas y alargadas (ASTM D-4791).- Las partículas planas y alargadas son definidas respectivamente, como aquellas partículas cuya dimensión última es menor que 0.6 veces su dimensión promedio y aquellas que son mayores 1.8 veces la dimensión promedio. Para el propósito de esta prueba, la dimensión promedio se define como el tamaño medio entre las dos aberturas 1" a 3/4", 3/4" a 1/2", 1/2" a 3/8", etc. entre las que los agregados son retenidos al ser tamizados.

Después de haber sido cribados por la malla de abertura cuadrada y de dos mallas respectivamente, las partículas planas pueden ser separadas rápidamente pasándolas por cribas con ranuras, pero en este caso, se necesita un tipo de criba para cada tamaño. El porcentaje por peso de las partículas planas y alargadas se le designa con el nombre de índice de aplanamiento e índice de alargamiento.

Índice de Aplanamiento.

$$IAP(\%) = \frac{P_i}{W_i} * 100$$

Índice de Alargamiento.

$$IAL = \frac{Ri}{Wi} * 100$$

Donde:

Pi = Peso de las partículas que pasan por la ranura correspondiente.

Wi = Peso inicial de esa fracción.

Ri = Peso de las partículas que se retienen en la ranura correspondiente.

El valor correspondiente al índice de alargamiento e índice de aplanamiento se redondeara al inmediato entero superior.

2.5.2.- Agregado fino

Equivalente de arena (ASTM D-2419). Este método de ensayo asigna un valor empírico a la cantidad relativa, finura y características del material fino presente en una muestra de ensayo formado por suelo granular que pasa el tamiz N°4 (4.75 mm). El término “Equivalente de Arena” transmite el concepto que la mayoría de los suelos granulares y agregados finos son mezcla de partículas gruesas, arenas y generalmente finos.

Para determinar el porcentaje de finos en una muestra, se incorpora una medida de suelo y solución de cloruro de calcio (Ca Cl₂) 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.

Determinación del peso específico del agregado fino (ASTM D-128). Este ensayo tiene como objetivo la determinación del peso específico aparente, lo mismo que la cantidad de agua que se absorbe en el agregado fino cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas, expresada como un porcentaje en peso.

El peso específico aparente es la relación entre el peso al aire del sólido y el peso del agua correspondiente a su volumen aparente.

El procedimiento para realizar este ensayo es el descrito en la norma ASTM D-128.

Las ecuaciones utilizadas para calcular el peso específico y la absorción:

Peso específico Aparente.

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

Absorción.

$$\%Absorción = \frac{500 - A}{A}$$

Donde:

PE = Peso específico.

A = Peso del material seco en horno.

B = Peso del matraz lleno con agua a 20 °C.

C = Peso del matraz + agregado + agua a 20°C.

Análisis granulométrico (ASTM D-422). El análisis granulométrico tiene como objeto, que las partículas de agregado estén dentro de un cierto margen de tamaños y que cada tamaño de partículas esté presente en la mezcla de pavimentación en ciertos porcentajes.

Esta distribución de varios tamaños de partículas dentro del agregado es comúnmente llamada graduación del agregado o graduación de la mezcla.

El método utilizado para determinar la graduación de los agregados es por tamizado seco, el mismo que tiene las siguientes características:

- Las muestras para el tamizado son reducidas por medio de un “cuarteador” de muestras.
- Los materiales finos y gruesos son separados utilizando un tamiz de 2.36 mm (N°8).
- Las muestras son secadas en el horno hasta un peso constante.
- Las muestras finas y las muestras gruesas son tamizadas separadamente.
- El peso de las fracciones (porciones) retenidas en cada tamiz, y el platón que esta al final de los tamices, es registrado, así como la graduación de cada muestra (parte fina y parte gruesa).

2.6.- ENERGÍA DE COMPACTACIÓN EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

La energía de compactación es la presión aplicada a las mezclas asfálticas por unidad de volumen, generalmente aplicada por medios mecánicos por el cual se produce una densificación de las mezclas asfálticas disminuyendo su relación de vacíos.

Esta energía de compactación en laboratorio es proporcionada por la caída de un pisón (martillo) de compactación Marshall que se utiliza para compactar dinámicamente el espécimen bituminoso dentro del molde de compactación. Este martillo Consistente en un dispositivo de acero formado por una base plana circular de 98.4 mm (3 7/8”) de diámetro y un pisón deslizante de 4536 ± 9 g (10 ± 0.02 lb) de peso total, montado en forma que proporcione una altura de caída de 457.2 ± 1.524 mm (18 ± 0.06 ”), como se describe en la Figura 2.11. El martillo de compactación puede estar equipado con un protector de dedos.

Figura 2.11. Martillo de compactación del equipo Marshall



Fuente: Elaboración Propia

En el método Marshall la energía de compactación se aplica mediante una serie de golpes con el martillo Marshall sobre ambas caras de la muestra, según el propósito y tránsito esperado de la mezcla que se está diseñando, como se establece en la Tabla 2.13.

En el procedimiento Marshall las briquetas son compactadas mediante golpes del martillo Marshall de compactación. El número de golpes del martillo (35, 50 o 75) depende de la cantidad de tránsito para la cual está siendo diseñada. Ambas caras de cada briqueta reciben el mismo número de golpes. Así, una probeta Marshall de 35 golpes recibe, realmente un total de 70 golpes. Una probeta de 50 golpes recibe 100 impactos y una probeta de 75 golpes, recibe realmente 150 golpes.

Tabla 2.13: Número de golpes del martillo Marshall dependiendo del tránsito esperado según la metodología original

Condición de tránsito que resultan en un ESALs de diseño (millones):	Alto >10 hasta 30	Medio Entre 0,3 y 10	Bajo <0,3
Número de golpes en cada cara del espécimen de ensayo	75	50	35

Fuente: <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/banco-de-informacion-digital-on-line/2013/LM-PI-UMP-016-R1.pdf>

La fórmula para determinar la energía de compactación que se aplica a las diferentes probetas viene dada por la ecuación:

$$Y = \frac{n * N * P * H}{V}$$

Donde:

Y= Energía a aplicar a la muestra

n = Número de capas a ser compactadas

N = Número de golpes aplicados por cara

P = Peso del pisón

H = Altura de caída del pisón

V = Volumen del cilindro

2.7.- DETERMINACIÓN DE LA ESTABILIDAD Y ANÁLISIS DEL EFECTO EN LA DURABILIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS A DIFERENTES ENERGÍAS DE COMPACTACIÓN

2.7.1.- Determinación de la estabilidad de mezclas asfálticas en laboratorio

El ensayo de estabilidad está dirigido a medir la resistencia a la deformación de la

mezcla, bajo carga que ocurre en la mezcla.

El procedimiento de los ensayos es el siguiente:

Sumergir la briqueta en baño de agua a 60 °C (140 °F), durante 30 a 40 minutos. Limpiar las guías y la superficie interior del anillo de prueba y lubricar las guías para garantizar que el segmento superior del anillo se deslice libremente sobre ellas. La temperatura de la mordaza debe mantenerse a una temperatura de 21 a 37,8 °C (70 a 100°F), utilizando el baño de agua, si fuese necesario.

Se saca la muestra del baño de agua, se coloca en la parte inferior de la mordaza, luego se inserta la parte superior de la misma. Se centra el conjunto en el dispositivo de carga y se coloca el medidor de flujo sobre el guiador superior de la mordaza.

Figura 2.12. Equipo Marshall



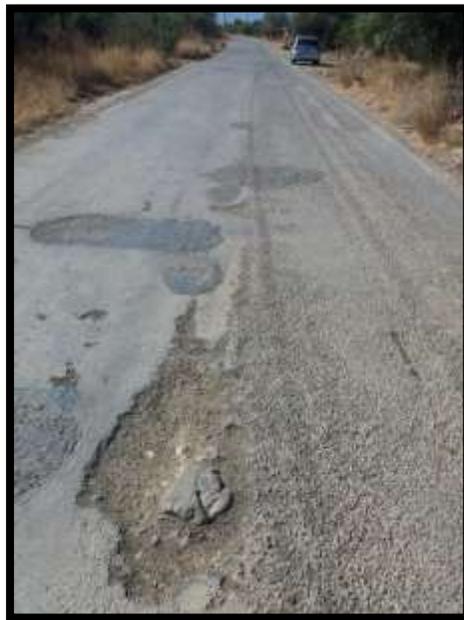
Fuente: Elaboración Propia

La carga de ensayo a la muestra a una velocidad de deformación constante de 51 mm/min (2 pulg/min), hasta que ocurra la falla. El punto de falla se define como la carga máxima obtenida en el ensayo. El número total de Newtons (libras) necesario para producir la falla de la muestra se define como el valor de la estabilidad Marshall. La deformación vertical del espécimen producida por la carga, es el valor del Flujo (fluencia)

2.7.2.- Análisis del efecto en la durabilidad de mezclas asfálticas producida por diferentes energías de compactación

La determinación del efecto de la durabilidad de una mezcla asfáltica elaborada en laboratorio no es una tarea sencilla, debido a que son muchos los factores que afectan la durabilidad de las mezclas asfálticas.

Figura 2.13. Pavimento flexible deteriorado



Fuente: Elaboración Propia

Sin embargo una de las características que afecta la durabilidad de los pavimentos es la compactación. Debido a que si se compacta adecuadamente se obtendrá la máxima 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.

El valor de la estabilidad también generara un efecto en la durabilidad de las mezclas asfálticas debido a que si una mezcla asfáltica está diseñada correctamente tendrá una estabilidad mayor y su capacidad de resistir desplazamientos y deformación bajo las cargas del tránsito aumenta. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y lisura bajo cargas repetidas, un pavimento inestable desarrollara ahuellamientos (canales), ondulaciones (corrugación) y otras señas que indican cambios en la mezcla deteriorando rápidamente al pavimento y disminuyendo se durabilidad.

La durabilidad de un pavimento asfáltico también 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.

El análisis del efecto en la durabilidad de la mezcla asfáltica, será realizado en función de la relación de los valores de estabilidad entre sí. Estos valores de estabilidad en los diferentes niveles de compactación serán determinados de manera convencional y también las briquetas serán colocadas en el horno de película delgada, a las temperaturas de 70°C, 75°C y 80°C. Con el fin de acelerar su proceso de oxidación y envejecimiento en las briquetas y así poder realizar un análisis comparativo de los valores de Estabilidad antes y después de pasar por este proceso de oxidación.

El horno debe ser eléctrico, de doble pared calentado por convección; las dimensiones laterales serán: alto 381 mm, ancho 483 mm y profundidad (con puerta cerrada) 445 ± 13 mm. La puerta debe contar con una ventana ubicada en forma simétrica, con dimensiones de 300 a 330 mm de ancho por 200 a 230 mm de alto. La ventana debe tener dos láminas de vidrio resistentes al calor y un espacio de aire; debe permitir una visión completa del interior del horno. La parte superior del elemento de calentamiento estará 25 ± 3 mm por debajo del piso interior del horno. El horno tendrá respiraderos en el tope y en el fondo; los del fondo deben estar ubicados simétricamente para suministrar aire entrante alrededor de los elementos de calentamiento. Estos tendrán una abertura de $15 \pm 0,5$ cm² de superficie. Los respiraderos del tope tendrán una distribución simétrica en la superficie superior del horno y tendrán una superficie de $9,5 \pm 0,5$ cm².

Figura 2.14. Horno de película delgada



Fuente: Elaboración propia

El horno tendrá circulación de aire que cubra las paredes y el techo; este espacio con aire debe tener una profundidad de 38 mm desde las paredes y el techo. En el punto

medio a lo ancho del horno y a 152 mm desde la cara del portador metálico circular, se introducirá el eje de un rotor tipo jaula de abanico de 133,5 mm de diámetro por 73 mm de ancho, que debe girar a 1.725 rpm, mediante un motor montado en el exterior del horno. El rotor de jaula abanico se instalará para que el abanico gire en dirección opuesta a sus veletas. El flujo de aire, característico de un sistema de abanico plano, será succionado desde el fondo del piso del horno a través del espacio de las paredes, saliendo a través del abanico.

Las briquetas serán puestas en este horno a temperaturas de 70°C, 75 °C, 80 °C, con el fin de acelerar su proceso de oxidación y envejecimiento, para así poder evaluar su pérdida de estabilidad en las briquetas elaboradas con (25; 35; 45; 55; 65; 75; 85 y 100 golpes), y poder realizar también un análisis del efecto en la durabilidad en función de las pérdidas de estabilidad, los porcentajes de vacíos en las mezclas y sus densidades producidas a diferentes números de golpes.

2.8.-COMPACTACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CAMPO¹⁰

2.8.1.-Antecedentes

La compactación es un proceso que consiste en comprimir un volumen dado, de mezcla asfáltica en caliente, en uno más pequeño. Esto se consigue al comprimir las partículas de agregado, revestidas d asfalto, eliminando así la mayoría de los vacíos (espacios) en la mezcla y aumentando la densidad (proporción de peso a volumen) de la misma. Se considera que la compactación a sido exitosa cuando la carpeta terminada tiene contenidos óptimos d vacíos y de densidad.

La necesidad de compactar un pavimento hasta lograr su densidad óptima puede entenderse mejor si se advierten los efectos del agua, el aire, y el tránsito en una mezcla sub compactada. Los vacíos en una mezcla subcompactada tienden a estar interconectados y permiten la penetración de aire y agua a través del pavimento. El aire y el agua contienen oxígeno, el cual oxida el ligante asfáltico en la mezcla, causando que esta se vuelva frágil. En consecuencia el pavimento no podrá resistir las

¹⁰ Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Asphalt institute; Cap.6, pág.215

deformaciones repetidas causadas por el tránsito, lo cual conducirá a su falla. Por otro lado, la presencia interna de agua, a temperaturas bajo cero, puede causar una falla prematura en el pavimento como resultado de la expansión del agua congelada.

Un pavimento que no a sido compactado correctamente durante la construcción presentara huellas o surcos a causa de la canalización del tránsito. A demás, si no se dejan suficientes vacíos en la mezcla compactada, entonces el pavimento presentara afloramiento, y tendera a volverse inestable debido a la reducción del contenido de vacíos causada por el tránsito y por la expansión térmica del asfalto. El contenido óptimo de vacíos, en un pavimento recién construido, es de 8 % o menos para mezclas densamente gradadas. En este nivel, los vacíos no están, generalmente interconectados. Es una representación gráfica del efecto de los vacíos sobre la durabilidad del pavimento. Cuando el contenido de vacíos es demasiado alto, el pavimento tiende a presentar desmoronamiento y desintegración. Cuando el contenido de vacíos es demasiado bajo hay peligro que el pavimento presente afloramiento y se vuelva inestable.

La compactación logra dos objetivos importantes al comprimir las partículas de agregado. Estos son: la resistencia y la estabilidad de la mezcla. Adicionalmente, la compactación cierra los espacios a través de los cuales el agua y el aire pueden penetrar y causar un envejecimiento rápido, daños por congelación-deshielo, y desprendimiento.

2.8.2.-Descripción general

La compactación se efectúa usando cualquiera de los diferentes tipos de compactadores o aplanadores-vehículos que con su peso, o con fuerzas dinámicas, compactan la carpeta de pavimento, al transitar sobre ella en un patrón específico.

La compactación está dirigida a producir una carpeta con una densidad específica (densidad de referencia). Aunque el proceso de compactación parece ser simple y claro, es en realidad un procedimiento que requiere de la habilidad y conocimientos del operador y del inspector. Ambos deben tener un entendimiento completo de la

mecánica de la compactación y de los factores que afectan los esfuerzos de compactación.

2.8.3.-Fundamentos de la compactación

2.8.3.1.-Mecánica de la compactación

La mecánica de la compactación involucra tres tipos de fuerzas actuantes durante el proceso compactación. Estos son: las fuerzas de compresión de los rodillos, las fuerzas en la mezcla que resisten las fuerzas de los rodillos, y las fuerzas de soporte proporcionadas por la superficie que se encuentra debajo de la carpeta. La compactación y la densidad pueden obtenerse solamente cuando la mezcla logra ser confinada adecuadamente.

Figura 2.15. Compactación con rodillo liso



Fuente: <http://victoryepes.blogs.upv.es/2016/02/18/la-compactacion-de-las-mezclas-asfalticas/>

Para que ocurra la compactación la fuerza de compresión del rodillo, asociada con las fuerzas opuestas proporcionadas por la superficie debajo de la carpeta, debe vencer las fuerzas resistentes de la carpeta.

La fuerza de compresión de los rodillos proviene del peso de los rodillos, o de una combinación de peso y la energía dinámica de los rodillos.

Las fuerzas de soporte de la capa inferior provienen de la estabilidad y firmeza de la misma. Igualmente, las fuerzas resistentes de la mezcla provienen de la fricción entre partículas de agregado, y de la viscosidad del asfalto. Estas fuerzas resistentes aumentan a medida que la densidad aumenta mientras la mezcla se enfría. Cuando la densidad y la temperatura de la mezcla alcanzan el punto en donde las fuerzas resistentes de la mezcla igualan la fuerza compresiva de los rodillos y las fuerzas resistentes de la capa inferior, se logra un equilibrio y se completa el proceso de compactación.

2.8.4.-Factores que Afectan la Compactación

Los factores que afectan la compactación pueden dividirse en tres clases:

- Propiedades de la mezcla
- Condiciones ambientales
- Espesor de la capa.

2.8.4.1.-Propiedades de la Mezcla

Ciertas propiedades del asfalto y el agregado tienen un efecto pronunciado sobre la trabajabilidad de la mezcla, a diferentes temperaturas. Estas propiedades, así como la temperatura de la mezcla en la compactación, deben tenerse en cuenta cuando se selecciona un procedimiento de compactación.

- **Agregado**

La granulometría, la textura superficial, y la angulosidad del agregado, son las principales características que afectan la trabajabilidad de la mezcla. A medida que aumenta el tamaño máximo de agregado, o el porcentaje de agregados gruesos en la mezcla, la trabajabilidad disminuye, y por consiguiente se requiere un mayor esfuerzo de compactación para obtener densidad de referencia. Igualmente, una textura superficial áspera en el agregado, en vez de una textura lisa y vidriosa, resulta una mezcla más estable y requiere de un mayor esfuerzo de compactación. Las mezclas

producidas con grava son, frecuentemente, más trabajables que las producidas con piedra de cantera.

Las arenas naturales son añadidas a las mezclas, con frecuencia, para buscar económica. Una mezcla con demasiada arena, especialmente en los tamaños medianos (alrededor del tamiz de 0.60 mm (No.30)), puede resultar una con alta trabajabilidad pero poca estabilidad. Estas mezclas son fácilmente sobre esforzadas por los rodillos, como también por el exceso de pasadas de rodillo. Frecuentemente, estas mezclas son susceptibles a desgarrarse y deformarse bajo el tránsito, aun después de varias semanas de haber sido compactadas.

- **Asfalto**

A temperatura ambiente el asfalto es virtualmente sólido, mientras a temperaturas entre 120 y 150 °C (250 a 300 °F) es completamente fluido. Para que una mezcla pueda ser compactada correctamente, el asfalto debe tener suficiente fluidez para permitir que las partículas de agregado se muevan una respecto a otras. En efecto el asfalto trabaja como un lubricante durante la compactación. A medida que la mezcla se enfría el asfalto pierde su fluidez (se vuelve más viscoso). Es así como a temperatura por debajo de 85 °C (185 °F), el asfalto, en combinación con los finos de la mezcla, comienza a ligar firmemente las partículas de agregado. En consecuencia, la compactación de la mezcla se hace extremadamente difícil cuando se ha enfriado por debajo 85 °C.

La viscosidad del asfalto está determinada por el grado usado, y por la temperatura a la cual se produce la mezcla. Un asfalto de alta viscosidad puede requerir una temperatura ligeramente mayor de compactación y/o un mayor esfuerzo de compactación, siempre y cuando todos los demás factores permanezcan constantes.

La trabajabilidad también está afectada por la cantidad de asfalto en la mezcla. A medida que aumenta el contenido de asfalto, el espesor de la película de asfalto sobre las partículas de agregado también aumenta. Este aumento de espesor de película aumenta, a su vez, el efecto lubricante del asfalto a las temperaturas de compactación, y hasta cierto punto hace que la compactación sea más fácil de efectuar.

- **Temperatura de Mezclado**

La temperatura a la cual una mezcla asfáltica es producida afecta la facilidad de la compactación y el tiempo que le toma a la mezcla para enfriarse hasta 85 °C – la temperatura mínima a la cual todavía puede haber densificación. Hasta cierto nivel, entre más caliente este la mezcla, más fluido será el asfalto y menos resistente será la mezcla bajo la compactación. El límite superior para la temperatura es de aproximadamente de 163 °C (325 °F). Las temperaturas más altas pueden dañar el asfalto. La mejor temperatura para empezar a compactar la mezcla, dentro del margen de temperaturas de 163 a 85 °C (325 a 185 °F), es la máxima temperatura a la cual la mezcla puede resistir el rodillo sin desplazarse horizontalmente.

En el momento de colocación, la temperatura de la mezcla es uniforme a través espesor de la carpeta. Sin embargo, la superficies superior e inferior se enfrían mas rápido que el interior debido a están en contacto con el ambiente y la subrasante, las cuales se encuentran a una temperatura menor.

2.8.4.2.-Efectos ambientales

Como se explicó anteriormente, la velocidad a la cual se enfría la mezcla afecta la duración del tiempo durante el cual se puede, y se debe, lograr la densidad deseada. La temperatura ambiental, la humedad, el viento, la temperatura de la superficie debajo de la mezcla afecta la velocidad de enfriamiento. Las temperaturas ambientales frías, la humedad alta, los vientos fuertes, y las superficies frías acortan el tiempo durante el cual se debe efectuar la compactación. Además, estos factores pueden hacer más fácil la compactación.

2.8.4.3.-Espesor de Capa

En general, es más fácil lograr la densidad de referencia con capas gruesas de concreto asfáltico de con capas delgadas. Esto se debe a que entre mas gruesa sea la carpeta más tiempo demora en enfriarse, y por lo tanto hay mas tiempo para lograr una compactación adecuada. Este hecho puede usarse ventajosamente para colocar capas de mezclas con alta estabilidad que sean difíciles de compactar, o cuando es necesario

pavimentar bajo condiciones ambientales que causen enfriamiento rápidos en capas delgadas.

Por otro lado, un aumento en el espesor de la capa permite que las temperaturas de la mezcla sean más bajas debido a la disminución a la velocidad de enfriamiento.

2.8.5.- Compactadores

Normalmente se requieren compactadoras automotrices para la compactación de mezclas de concreto asfáltico. No se deben usar compactadoras tipo remolque, pero se pueden usar compactadoras de mano o placas vibratorias en las áreas que sean inaccesibles a las compactadoras grandes. Las compactadoras automotrices típicas abarcan los tres tipos siguientes:

- Tándem de ruedas de acero.
- Ruedas neumáticas.
- Vibratoria.

Figura 2.16. Compactadores de ruedas neumáticos



Fuente: <http://victoryepes.blogs.upv.es/2016/02/18/la-compactacion-de-las-mezclas-asfalticas/>

Todo tipo de compactadora debe ser inspeccionada antes de ser usada en la obra para verificar que se encuentre en buena condición mecánica. Cuando sea de importancia, se deben revisar los siguientes detalles:

- Peso total de la compactadora.
- Peso por unidad de ancho (para compactadora de ruedas de acero).
- Esfuerzo promedio de contacto (compactadoras neumáticas).

2.8.6.-REQUISITOS DE APROBACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL PAVIMENTO

2.8.6.1.-Requisitos de Aprobación

La calidad del pavimento terminado depende de que tanto éxito se logre en el proceso de compactación, generalmente se usan tres criterios para juzgar la aprobación de una carpeta terminada. Estos son: textura superficial, tolerancia de la superficie y densidad. Es la responsabilidad del inspector de asegurar que cada criterio sea cumplido.

2.8.6.2.-Textura Superficial

Los defectos en la textura superficial pueden ser causados por errores en le mezclado en el manejo, en la pavimentación o la compactación. Una mezcla defectuosa por causa de un mezclado, un manejo o una colocación inadecuada, deberá ser removida y reemplazada antes de la compactación. Los defectos que aparezcan durante la compactación y que no puedan ser corregidos con pasadas adicionales, deberán ser reemplazados con mezcla caliente fresca antes de que la temperatura de la carpeta que esta alrededor baje por debajo de los 85 °C. se deberá tener cuidado, en toda área reparada, de asegurar que se mantengan la rasante correcta y que la tolerancia de la superficie cumpla con las especificaciones.

2.8.6.3.-Tolerancia de la Superficie

Las variaciones en la lisura de la carpeta no deberán exceder 6 mm bajo una regla recta de 3 metros colocada perpendicularmente a la línea central, y 3 mm cuando esta sea colocada paralelamente a la línea central. En algunos casos se usa una regla recta con rodamientos, la cual mide y registra, sobre un gráfico continuo variaciones de la superficie. Las variaciones registradas son luego sumadas y reportada como aspereza de superficie en mm x km.

2.8.6.4.-Densidad

La densidad del pavimento se considera aceptable, o no, cuando se compara con la densidad de referencia establecida en el laboratorio usando una muestra de campo. La densidad del pavimento puede variar entre un porcentaje promedio, establecido por las especificaciones, respecto a la densidad de referencia.

Existen tres métodos básicos para determinar la densidad de referencia. Estos son: porcentaje de la densidad de laboratorio, densidad máxima teórica, densidad de la sección de prueba (franja de control). El objetivo de los tres métodos es el de obtener un pavimento compactado que tenga, en promedio, un contenido de vacíos de 8 por ciento, o menos.

- Porcentaje de la densidad de Laboratorio

Este método se aplica, con frecuencia a los procedimientos Marshall de compactación en aquellas obras grandes donde se dispone de laboratorios de campo. para cada lote o unidad de mezcla (usualmente la producción de un día). Se determina una densidad de referencia tomando la densidad promedio de 4 o mas probetas de laboratorio, preparadas con mezcla proveniente de los camiones que están entregando en el lugar de la obra. las probetas son compactadas en el aparato Marshall de acuerdo a la norma AASHTO T 245, son dos excepciones:

- La temperatura de la mezcla deberá aproximar la temperatura del asfaltador sin permitir un recalentamiento.
- El número de golpes de compactación (35, 50, o 75) deberá ser igual al que se utilizó en el diseño de la mezcla.

La ventaja de este procedimiento es que las densidades de referencia obtenidas serán bastante representativas de la producción real diaria de la mezcla, y compensarán las ligeras variaciones que ocurren en la mezcla de un para otro.

- Porcentaje de la densidad máxima teórica.

La densidad de referencia se determina, en este método, calculando cual sería el peso unitario de la mezcla si esta se compacta hasta un punto donde no tenga vacíos. Esta densidad se determina usando la norma AASHTO T 209.

- Densidad de la sección de prueba (tramo de control)

La densidad de referencia se determina a partir de un tramo de control de pavimento construido al comienzo de cada capa que se va a colocar en tramo de control es parte de la obra de pavimentación. Este tramo debe tener por lo menos 150 metros de longitud y estar construido con el mismo ancho y espesor que el resto de la capa que representa.

El contratista coloca y compacta el tramo de control con el equipo, el patrón de compactación, y la temperatura que propone usar en la obra.

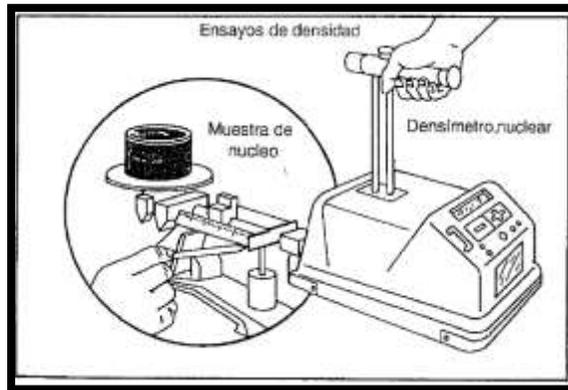
La compactación comienza tan pronto como sea posible después de que la mezcla se a colocado, y continua hasta que no se obtenga un aumento apreciable de densidad y/o hasta que la mezcla se enfríe a una temperatura 85 °C, la densidad de referencia se determinan al promediar los resultados de un numero especifico de pruebas de densidad tomadas de lugares aleatorios dentro del tramo de control.

2.8.6.5.-Requisitos de Verificación

a) Pruebas

Las pruebas para verificar la compactación pueden efectuarse usando núcleos de mezcla del pavimento terminado, o medidores nucleares de densidad. De cualquier forma, las lecturas de densidad nuclear deberán ser correlacionadas con densidades de núcleos.

Figura 2.17. Pruebas de densidad



Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Asphalt institute

Los densímetros nucleares presentan dos ventajas sobre el muestreo de núcleos. Una es que son rápidos y fácil de usar y la otra es que son no – destructivos.

Las pruebas, usando cualquier método deben ser aleatorias con un número mínimo de ensayos o núcleos para cada lote de mezcla (usualmente la producción de un día). El promedio de las densidades obtenidas en las pruebas deben satisfacer uno, o más, de los siguientes criterios dependiendo del método usado para establecer la densidad de referencia: 96 por ciento de la densidad de laboratorio 92 por ciento de la densidad máxima teórica, o 99 por ciento de la densidad de la franja de control.

b) Muestreo

Las muestras usadas para verificar densidad deben ser extraídas con una sierra de punta de diamante, o una maquina saca núcleos, con el fin de minimizar el daño que pueda ocurrir en el pavimento y en las muestras. Si el pavimento no se enfriado a la temperatura ambiente, hasta la profundidad de la muestra, entonces puede usarse hielo para acelerar el proceso.

2.9.- TRATAMIENTO ESTADÍSTICO Y ANÁLISIS DE ERROR DE LOS RESULTADOS

Para los fines de realizar un análisis de error de los resultados de estabilidad, se utilizaran ciertas mediciones estadísticas, que nos ayudan a establecer si el método se encuentra dentro de un parámetro aceptable, normalmente se determinan las siguientes:

Media Aritmética: Conocida también como media aritmética o promedio, es la cantidad total de la variable (muestra o medida) distribuida a partes iguales entre cada observación. En términos matemáticos, es igual a la suma de todos sus valores dividida entre el número de sumandos.

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Siendo:

X_i = valor de una lectura.

n = numero de lecturas

Desviación estándar (S): Es el promedio de lejanía de los valores obtenidos (lecturas) respecto del promedio.

$$S = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - X)^2}}{n - 1}$$

Siendo:

x_i = valor de una lectura.

X = promedio de la totalidad de lecturas.

n = número de lecturas

Coefficiente de Variación (CV): Desviación estándar dividida por la media. También es conocida como desviación estándar relativa (RSD). El coeficiente de variación puede ser expresado en porcentaje:

$$\%CV = \frac{S}{X} * 100$$

Siendo:

S = desviación estándar de las lecturas.

X = promedio de la totalidad de lecturas.

Error absoluto y error relativo: El error absoluto es la diferencia entre la media y el valor verdadero de una cierta magnitud, el error absoluto nos da una medida de la desviación en términos absolutos, y el error relativo se define como el cociente entre el error absoluto y el valor verdadero.

$$\Delta x = X - X_0 ; \quad \varepsilon = \frac{\Delta X}{X_0}$$

Siendo:

Δx = Error absoluto de la medición

X = El valor de la media aritmética

X_0 = Valor verdadero de la medición.

ε = Error relativo de la medición.

Análisis de Error: Para realizar el análisis de error de los resultados de Estabilidad, se determinará el valor de la media aritmética más menos su desviación típica, el valor más alejado de la media aritmética y su error porcentual respecto a la media, de esta manera estableceremos los rangos dentro de los cuales están los valores de Estabilidad determinados.

2.10.- VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Se considera muy importante que cualquier proceso de investigación sea sometido a un proceso de validación de los resultados obtenidos en la investigación, se corre riesgo de que las investigaciones avancen por un sendero que diverja con el seguido por la realidad práctica, dificultando posteriormente la aplicación de los resultados y conclusiones obtenidas en la investigación.

En esta investigación la validación será realizada mediante la elaboración de briquetas con diferentes números de golpes a los que se utilizaran para la obtención de las curvas y ecuaciones de calibración, para así obtener sus valores de estabilidad y poder realizar la comparación con los resultados obtenidos en la curva de Estabilidad versus energía de compactación, determinándose la desviación estándar en los valores de estabilidad, y así poder verificar que los resultados obtenidos en esta investigación son correctos.

CAPÍTULO III

DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.- PREPARACIÓN DE LOS MATERIALES

3.1.1.- Agregados Pétreos

El material pétreo a ser utilizado en este trabajo, está situado en la comunidad de San José de Charaja Provincia Cercado, lugar donde se encuentra ubicada una planta chancadora para la provisión de material para la Institución de SEDECA de Tarija.

Figura 3.1. Planta de Sedeca Provincia Cercado Tarija



Fuente: Elaboración Propia

3.1.2.- Cemento Asfáltico

El ligante asfáltico C.A. (85-100) con nombre Betunel de procedencia Brasileira, fue proporcionado por la Alcaldía Municipal de Tarija.

Los materiales a utilizar, tanto los agregados pétreos como el ligante asfáltico, deben cumplir ciertas especificaciones de las Normas ASTM y AASHTO. Para el presente proyecto utilizamos materiales existentes en la ciudad de Tarija que se ajustan dentro de las normativas vigentes; Además de tener una disponibilidad. Siendo los mismos

analizados en laboratorio de Suelos, y Asfaltos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

3.2.- ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN EN LOS AGREGADOS

3.2.1.- Análisis granulométrico por tamizado (documento referencial AASHTO T27-99)

Objetivo del ensayo

Este método tiene por objeto determinar la granulometría de los agregados hasta el tamiz #200, mediante su división y separación con una serie de tamices en fracciones granulométricas de tamaño decreciente.

Procedimiento del ensayo:

a) Antes de realizar el ensayo se debe preparar la muestra, para lo cual se debe separar mediante cuarteo la cantidad necesaria hasta obtener una muestra representativa.

Nuestro tamaño nominal de $\frac{3}{4}$ plg tenemos alrededor de 5 Kg de material.

b) A continuación se lava el material para separar las partículas finas que pueden estar pegadas a las gruesas y para retirar la materia orgánica que puede contaminar el ensayo.

c) Verter el material lavado y secado en el juego de tamices previamente ensamblados y dispuestos, de arriba abajo, en orden decreciente de tamaños de abertura con el fondo y la tapa.

Figura 3.2. Proceso de Tamizado de la Muestra



Fuente: Elaboración Propia

Resultados de la práctica:

Tabla 3.1: Resumen de Resultados de Granulometría formada de Grava, Gravilla, Arena

Peso Total (gr.)			15000		
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,0	250,70	250,70	1,67	98,33
1/2"	12,5	3937,20	4187,90	27,93	72,07
3/8"	9,50	598,20	4786,10	31,92	68,08
N°4	4,75	4168,84	8954,94	59,72	40,28
N°8	2,36	1945,95	10900,89	72,70	27,30
N°16	1,18	1062,20	11963,09	79,78	20,22
N°30	0,60	902,74	12865,83	85,80	14,20
N°50	0,30	706,56	13572,39	90,51	9,49
N°100	0,15	591,38	14163,77	94,46	5,54
N°200	0,075	284,77	14448,54	96,36	3,64
BASE	-	546,11	14994,65	100,00	0,00
SUMA		14994,7			
PÉRDIDAS		5,3			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.2: Granulometría Formada

Tamices	tamaño (mm)	Grava	Gravilla	Arena	Grava	Gravilla	Arena	Peso Ret. 1	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
		Peso Ret.	Peso Ret.	Peso Ret.	a 15Kg 0,3	a 15Kg 0,25	a 15Kg 0,45				
		1"	25,4	0,00	0,00	0,00	0				
3/4"	19,0	250,70	0,00	0,00	752,1	0	0	225,63	225,63	1,50	98,50
1/2"	12,5	3937,20	0,00	0,00	11811,6	0	0	3543,48	3769,11	25,14	74,86
3/8"	9,50	587,60	10,60	0,00	1762,8	31,8	0	536,79	4305,90	28,72	71,28
Nº4	4,75	201,10	3877,20	90,54	603,3	11631,6	271,62	3211,12	7517,02	50,13	49,87
Nº8	2,36	1,80	1051,70	892,45	5,4	3155,1	2677,35	1995,20	9512,22	63,44	36,56
Nº16	1,18	0,30	30,41	1031,49	0,9	91,23	3094,47	1415,59	10927,81	72,88	27,12
Nº30	0,60	0,22	4,89	897,63	0,66	14,67	2692,89	1215,67	12143,48	80,99	19,01
Nº50	0,30	0,15	1,61	704,80	0,45	4,83	2114,4	952,82	13096,30	87,34	12,66
Nº100	0,15	0,80	1,14	589,44	2,4	3,42	1768,32	797,32	13893,62	92,66	7,34
Nº200	0,075	3,20	1,10	280,47	9,6	3,3	841,41	382,34	14275,96	95,21	4,79
BASE	-	15,20	19,70	511,21	45,6	59,1	1533,63	718,59	14994,55	100,00	0,00
SUMA		4998,3	4998,4	4998,0	14994,81	14995,05	14994,09	14994,5			
PÉRDIDAS		1,7					PÉRDIDAS	5,5			

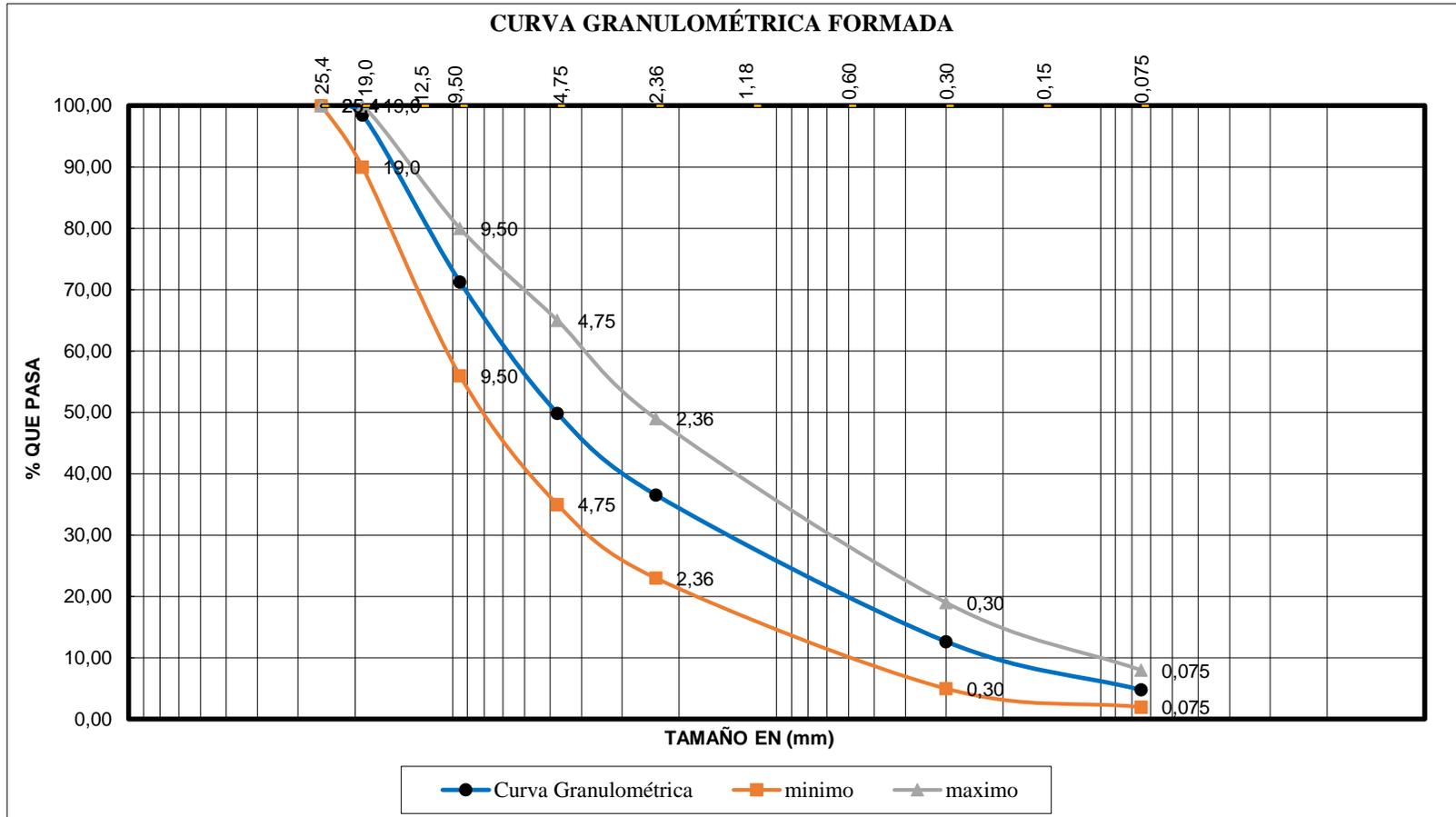
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.3: Rangos de granulometría para mezclas asfálticas densas (tamaño máx. nominal 19.00 mm)

Tamaño Tamiz	% pasa de la muestra	minimo	máximo
25,4	100,00	100	100
19,0	98,50	90	100
9,50	71,28	56	80
4,75	49,87	35	65
2,36	36,56	23	49
0,30	12,66	5	19
0,075	4,79	2	8

Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.3: Curva Granulométrica Formada



Fuente: Elaboración Propia

3.2.2.- Densidad real, densidad neta y absorción de agua en áridos finos (ASTM E 128 AASHTO T84-00)

Objetivo

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

Procedimiento del ensayo:

El método es como sigue:

1. Aproximadamente 1000 gr. de agregado fino se seca a peso constante.
2. Se sumerge el material por 24 horas en agua.

Figura 3.4: Muestra sumergida en agua por 24 hrs.



Fuente: elaboración propia

3. La muestra se extiende en una superficie plana y se expone a una corriente de aire caliente.
4. Coloque el molde cónico sujeto firmemente contra una superficie lisa, plana y no absorbente, con su diámetro mayor hacia abajo, llénelo con el árido en condición suelta en una capa y enrase.
5. Compacte suavemente con 25 golpes de pisón uniformemente distribuidos sobre la superficie.

6. En cada golpe deje caer el pisón libremente desde una altura de 5 mm sobre la superficie del árido. Dicha altura debe conservarse, ajustándola a la nueva elevación de la muestra después de cada golpe.
7. Remueva cuidadosamente todo material sobrante en la superficie. Levante el molde verticalmente. Si hay humedad libre la muestra conservará la forma del cono. En este caso elimine el exceso de humedad, repitiendo el procedimiento.
8. La condición saturada superficialmente seca se alcanza cuando el material cae al invertirse el cono en el que la muestra del material fue suavemente compactada.
9. Aproximadamente 500 gr. del material en la condición saturada superficialmente seca se colocan en un matraz que se llena con agua y se eliminan los aires atrapados.
10. El agregado se saca del matraz, se seca al horno a peso constante
11. La gravedad específica se calcula de la siguiente manera:

A= peso de la muestra seca

B =peso del matraz (picnómetro) con agua hasta la marca de calibración

C =peso del matraz (picnómetro) con la muestra más agua hasta la marca de calibración

D =Peso del material saturado superficialmente seco

$$\text{densidad neta } \rho_N = \frac{A}{B + A - C}$$

$$\text{densidad real del árido seco, } \rho_{RS} = \frac{A}{B + D - C}$$

$$\text{densidad real del árido saturado superficialmente seco } \rho_{RT} = \frac{D}{B + D - C}$$

$$\text{absorción}(\%) = \left(\frac{D - A}{A} \right) * 100$$

Figura 3.5: Peso de la muestra más agua en el matraz



Fuente: Elaboración Propia

RESULTADOS:

Tabla 3.4: Tabla de resultados de densidad del agregado fino (Arena)

MUESTRA N°	PESO DE MUESTRA (gr)	PESO DE MATRÁZ (gr)	MUESTRA + MATRAZ + AGUA (gr)	PESO DE MATRAZ + AGUA (gr)	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	VOLUMEN DEL MATRÁZ "V" (ml)	DENSIDAD REAL SECO (gr/cm3)	DENSIDAD SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm3)	DENSIDAD NETA (gr/cm3)	% DE ABSORCIÓN
1	500	173,1	989,8	673,1	494,5	500	2,7	2,73	2,78	1,1
2	500	173,1	989,7	673,1	498,2	500	2,72	2,73	2,74	0,36
3	500	173,1	989,3	673,1	498,1	500	2,71	2,72	2,74	0,38
PROMEDIO							2,71	2,72	2,75	0,61

Fuente: Elaboración Propia

3.2.3.- Densidad real, densidad neta, y la absorción de agua en áridos gruesos (ASTM E 127 AASHTO T85-91)

Objetivo

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

Procedimiento del ensayo:

La muestra a ser evaluada se satura y pesa en su condición saturada superficialmente seca:

1. Aproximadamente 5 kg. De material retenidos en la malla N°4 (4.75 mm) se lava y seca hasta que alcance peso constante.
2. La muestra seca se sumerge por 24 horas en agua.

Figura 3.6: Muestra sumergida en agua por 24 horas



Fuente: Elaboración Propia

3. Los agregados se sacan del agua y secan superficialmente con ayuda de una toalla.

Figura 3.7: Obtención del peso sumergido.



Fuente: Elaboración Propia

4. Se obtiene el peso de la muestra en su condición superficialmente seca.

la muestra en su

5. La muestra saturada superficialmente seca se coloca en una cesta de alambre y se determina el peso de la muestra sumergido en agua.

6. La muestra se seca al horno hasta obtener peso constante.

7. La gravedad específica se calcula según:

A = masa del árido seco

B = masa del agregado saturado superficialmente seco

C = masa del árido sumergida

$$\text{densidad neta } \rho_N = \frac{A}{A - C}$$

$$\text{densidad real del árido seco, } \rho_{RS} = \frac{A}{B - C}$$

$$\text{densidad real del árido saturado superficialmente seco } \rho_{RT} = \frac{B}{B - C}$$

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

RESULTADOS:

Tabla 3.5: Tabla de resultados de densidad del agregado grueso (Gravilla)

MUESTRA N°	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA CON SUP. SECA "B" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA DENTRO DEL AGUA "C" (gr)	DENSIDAD REAL SECO (gr/cm3)	DENSIDAD REAL SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm3)	DENSIDAD NETA (gr/cm3)	% DE ABSORCIÓN
1	4945,9	5041,7	3092,9	2,54	2,59	2,67	1,94
2	4930,1	5026,2	3089,9	2,55	2,6	2,68	1,95
3	4938,5	5036,1	3094,7	2,54	2,59	2,68	1,98
PROMEDIO				2,54	2,59	2,68	1,95

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.6: Tabla de resultados de densidad del agregado grueso (Grava)

MUESTRA N°	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA CON SUP. SECA "B" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA DENTRO DEL AGUA "C" (gr)	DENSIDAD REAL SECO (gr/cm3)	DENSIDAD REAL SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm3)	DENSIDAD NETA (gr/cm3)	% DE ABSORCIÓN
1	4921,3	5016,2	3095,3	2,56	2,61	2,7	1,93
2	4920,2	5005,2	3098,9	2,58	2,63	2,7	1,73
3	4919,2	5001,3	3091	2,58	2,62	2,69	1,67
PROMEDIO				2,57	2,62	2,7	1,77

Fuente: Elaboración Propia

3.2.4.- Método para determinar el índice de lajas (AASHTO C-142)

Objetivo

Este ensayo establece el procedimiento para determinar el índice de lajas de un árido, se define el índice de lajas como el porcentaje en peso de partículas que tienen un espesor (dimensión mínima) inferior a 0,6 veces la dimensión media de la fracción de árido considerada.

Procedimiento

Obtener por cuarteo una cantidad mínima de ensaye.

Hacer pasar cada una de las partículas a través de las aberturas de los tamices.

Pesar el total de partículas que pasan por cada tamiz y registre como MPi

Calcule el índice de lajas de cada fracción i (ILi), de acuerdo a la siguiente expresión:

$$IL_i = \frac{MP_i}{MT_i} * 100$$

Donde:

IL_i: Índice de lajas de la fracción i (%)

MP_i: Masa de material que pasa por la abertura del pie de metro para fracción i (gr)

MT_i: Masa total de ensaye

Resultados

Tabla 3.7: Tabla de resultados del ensayo de índice de lajas

Tamaño del tamiz Abertura	Ancho de Ranura de Tamiz	ENSAYO 1			ENSAYO 2			ENSAYO 3		
		Peso Retenido en Tamiz	Peso que Pasa Tamiz Ranurado	Peso Total	Peso Retenido en Tamiz	Peso que Pasa Tamiz Ranurado	Peso Total	Peso Retenido en Tamiz	Peso que Pasa Tamiz Ranurado	Peso Total
p/g	p/g	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	Gr
3/4-1/2	0,375	1673	140	1813	1595	110	1705	1711	197	1908
1/2-3/8	0,273	890	75	965	912	97	1009	1091	86	1177
3/8-1/4	0,184	984	65	1049	890	89	979	950	111	1061
TOTAL		3547	280	3827	3397	296	3693	3752	394	4146
ÍNDICE DE LAJAS (%)		7,32			8,02			9,50		

Fuente: Elaboración Propia

3.2.5.- Porcentaje de caras fracturadas en los agregados (ASTM D 5821-95).

Objetivo:

Este ensayo determina el porcentaje, en peso, del material que presente una o más caras fracturadas de la muestra del agregado grueso.

Procedimiento:

La muestra para ensayo será representativa de la granulometría promedio del agregado, y se obtendrá mediante un cuidadoso cuarteo del total de la muestra recibida.

Se separa por tamizado la fracción de la muestra comprendida entre los tamaños 37.5 mm y 9.5 mm (1½" y 3/8"). Descartar el resto.

Esparcir la muestra en un área suficientemente grande, para inspeccionar cada partícula.

Separar con el borde de la espátula, las partículas que tengan una o más caras fracturadas. Si una partícula de agregado redondeada presenta una fractura muy pequeña, no se clasificará como "partícula fracturada". Una partícula se considerará como fracturada cuando un 25% o más del área de la superficie aparece fracturada. Las fracturas deben ser únicamente las recientes, aquellas que no han sido producidas por la naturaleza, sino por procedimientos mecánicos.

Figura 3.8: Separando las partículas fracturadas y no fracturadas



Fuente: Elaboración Propia

Resultados:

Tabla 3.8: Tabla de resultados de porcentaje de caras fracturadas

Fuente: Elaboración Propia

3.2.6.- Ensayo de abrasión por medio de la máquina de los ángeles documento referencial (AASHTO T96-99)

Objetivo:

Este método describe el procedimiento para determinar el porcentaje de desgaste de los agregados de tamaños menores a 37.5 mm (1 ½”), por medio de la máquina de los ángeles.

Procedimiento de ensayo:

Tabla 3.9: Tabla de pesos del agregado grueso y N° de esferas para el Desgaste de los Ángeles.

	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	
PESO INICIAL	2500 gr	2501 gr	2500 gr	
PESO FRACTURADAS (F)	1620 gr	1580 gr	1770 gr	
PESO CUESTIONABLES (Q)	870 gr	880 gr	700 gr	
PESO NO FRACTURADAS (N)	10 gr	40 gr	30 gr	
%CARAS FRACTURADAS $P = \frac{F+Q/2}{F+Q+N} * 100$	82,20 %	80,8 %	84,8 %	
PROMEDIO DE CARAS FRACTURADAS	82,6 %			
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"	N°4			2500±10	
N°4	N°8				5000±10
PESO TOTAL		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
NÚMERO DE ESFERAS		12	11	8	6
N° DE REVOLUCIONES		500	500	500	500
TIEMPO DE ROTACIÓN		30	15	15	15

Fuente: Norma ASTM, C131.

1. La muestra llegada al laboratorio deberá ser identificada. Para muestras cuyo tamaño máximo sea menor a 1 1/2" o mayor a 3/4" es el mismo.
2. El material deberá ser lavado y secado en horno a temperatura constante de 105-110°C, y el tamizado según las mallas que se indican. Mezclar las cantidades que el método indique según la tabla anterior.
3. Pesar la muestra precisión de 1 gr. y 5 gr. Para tamaños máximos de 1 1/2" y 3/4" respectivamente.
4. Introducir la muestra de ensayo junto con la carga abrasiva en la máquina de los ángeles, cerrar la tapa del cilindro.

Figura 3.9: Colocado de la muestra en la máquina de los ángeles



Fuente: Elaboración Propia

5. Activar la máquina, regulándose el número de revoluciones indicado por el método. Finalizado el tiempo de rotación, se retiran las cargas y el material. Se tamiza por la malla N° 12.

6. El material retenido en el tamiz N°12 se lava y seca en horno, a una temperatura constante entre 105° a 110°C. pesar la muestra seca.

Figura 3.10: Tamizado y Lavado del material retenido en el tamiz N°12



Fuente: Elaboración Propia

Resultados:

El porcentaje de desgaste es la relación entre el material que pasa el tamiz N° 12 y el peso inicial.

$$\% \text{ desgaste} = \frac{P_{inicial} - P_{final}}{P_{final}} \times 100$$

Tabla 3.10: Tabla de datos del Desgaste de los Ángeles

GRADACIÓN		MÉTODO B
DIAMETRO		CANTIDAD DE MATERIAL A EMPLEAR
PASA	RETENIDO	
3/4"	1/2"	2500 gr
1/2"	3/8"	2500 gr

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.11: Tabla de Resultados del Desgaste de los Ángeles

MATERIAL	PESO INICIAL	PESO FINAL	% DE DESGASTE	ESPECIFICACION ASTM
A				35% MAX
B	5000	4187,8 gr	16,24 %	35% MAX
C	-	-	-	35% MAX
D	-	-	-	35% MAX

Fuente: Elaboración Propia

3.2.7.- Equivalente de arenas y agregados finos (documento referencial AASHTO T176-00)

Objetivo:

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).

Procedimiento de ensayo:

1. Por el sifón verter 102±3 mm. de solución de trabajo de cloruro de calcio, en la probeta.

2. Con ayuda del embudo verter en la probeta, 85 ± 5 cm³ del suelo preparado.
3. Golpear la parte baja del cilindro varias veces con la palma de la mano para desalojar las posibles burbujas de aire y para humedecer completamente la muestra. Dejar reposar durante 10 ± 1 min.
4. Transcurridos los 10 min., tapar la probeta con un tapón; suelte el material del fondo invirtiendo parcialmente el agitado con cualquiera de los siguientes métodos:

Método manual

- Sujetar la probeta en posición horizontal y sacudirla vigorosamente de izquierda a derecha.
- Agitar el cilindro 90 ciclos en 30 segundos, usando un recorrido de 23 ± 3 cm. Un ciclo se define como el movimiento completo a la derecha seguido por otro a la izquierda. El operador deberá mover solamente los antebrazos manteniendo el cuerpo y hombros relajados.
- Concluida con la operación de agitación, colocar la probeta verticalmente sobre la mesa de trabajo y quitar el tapón.

Proceso de irrigación

- El cilindro no deberá moverse de su posición vertical y con la base en contacto con la superficie de trabajo.
- Introduzca el tubo irrigador en la parte superior de la probeta, suelte la abrazadera de la manguera y limpie el material de las paredes de la probeta mientras el irrigador baja.

El irrigador debe llegar hasta el fondo, aplicando suavemente una presión y giro mientras que la solución de trabajo fluye por la boca del irrigador, esto impulsa el material fino desde el fondo hacia arriba poniéndolo sobre las partículas gruesas de arena.

- Cuando el nivel del líquido alcance la señal de los 38 cm, levante el tubo irrigador despacio sin que deje de fluir la solución, de tal manera que el nivel se mantenga

cerca de 38 cm mientras se saca el tubo. Regule el flujo justo antes que el tubo esté completamente fuera y ajuste el nivel final a los 38 cm.

Lectura de arcilla

- Dejar reposar durante 20 min. \pm 15 s. Comience a medir el tiempo luego de retirar el tubo irrigador.
- Al término de los 20 min., leer el nivel superior de la suspensión de arcilla. Este valor se denomina lectura de arcilla. Si la línea de marca no es clara transcurridos los 20 min. Del período de sedimentación, permita que la muestra repose sin ser perturbada hasta que una lectura de arcilla pueda ser claramente obtenida; inmediatamente, lea y anote el nivel máximo de la suspensión arcillosa y el tiempo total de sedimentación. Si el período total de sedimentación excede los 30 min., efectúe nuevamente el ensayo, usando tres especímenes individuales de la misma muestra. Registre la lectura de la columna de arcilla para la muestra que requiere el menor tiempo de sedimentación como lectura de arcilla.

Lectura de arena

Después de la lectura de arcilla, introduzca en la probeta el ensamblaje del pie (conjunto del disco, varilla y sobrepeso) y baje lentamente hasta que llegue sobre la arena. No permitir que el indicador golpee la boca de la probeta mientras se baja el conjunto.

- Cuando el conjunto toque la arena con uno de los tornillos de ensamblaje hacia la línea de graduación de la probeta, lea y anote. Restar 25.4 cm. del nivel indicado en el borde superior del indicador y registrar este valor como la lectura de arena.

8. Después de tomar la lectura de arena, tenga cuidado de no presionar con el pie porque podría dar lecturas erróneas.

9. Si las lecturas de arcilla y arena están entre 2.5 mm de graduación (0.1”), registrar el nivel de graduación inmediatamente superior como lectura.

Figura 3.11: Colocado de la muestra dentro de la probeta



Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.12: Introducción del

tubo de irrigación



Fuente: Elaboración Propia

Resultados:

Calcule el equivalente de arena con aproximación a 0.1% como sigue:

$$SE = \frac{\text{Lectura arena}}{\text{lectura arcilla}} \times 100$$

Tabla 3.12: Tabla de Resultados del ensayo de Equivalente de Arena

N° de Muestra	H1	H2	Equivalente de Arena (%)
	(cm)	(cm)	
1	9,6	10,5	91,4
2	10,1	11,0	91,8
3	10,2	11,0	92,7
Promedio			92,0

Fuente: Elaboración Propia

Equivalente de Arena (%)	NORMA
92,0	> 50%

3.3.-CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO (85-100)

3.3.1.- Ensayo de penetración de materiales bituminosos. (Designación AASHTO T 49-97) (Designación ASTM D 5-86)

Objetivo:

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.

Procedimiento:

Examine el soporte de la aguja para establecer la ausencia de agua y otra materia extraña. Limpie una aguja de penetración con gasolina u otro solvente conveniente, seque con una tela limpia e inserte la aguja en el penetrómetro. A menos que por otra parte se especifique, ponga el 50 gramos de peso sobre la aguja, haciendo la carga total de $100 \text{ g} \pm 0.1 \text{ g}$ para la aguja y atadura. Si se hacen ensayos con el aparato de penetración montado en el baño, ponga el recipiente de la muestra directamente en la posición sumergida del aparato de penetración. Si se hacen ensayos con la muestra en el baño y el aparato de penetración fuera del baño, ponga los recipientes en el estante proporcionado en el baño. En los procedimientos anteriores, el recipiente debe mantenerse sumergido completamente durante las pruebas completas. Si se hacen ensayos usando el plato del traslado con el aparato de penetración fuera del baño, ponga la muestra en el plato lleno de agua del baño a una profundidad tal que cubra completamente el recipiente de la muestra. Entonces ponga el plato del traslado que contiene la muestra en el estante en el aparato de penetración y penetre inmediatamente. En cada caso, ajuste la aguja cargada con el peso especificado para hacer simplemente contacto con la superficie de la muestra. Logre esto haciendo contacto del punto de la aguja real con su imagen reflejada por la superficie de la muestra de una fuente de luz propiamente puesta. Anote la lectura del dial o ponga el indicador en cero. Entonces rápidamente se suelta la aguja por el periodo especificado de tiempo y se ajusta el instrumento para medir la distancia penetrada. Observe el recipiente de la muestra como la aguja se aplica, y si cualquier movimiento del recipiente es notado, ignore el resultado.

Haga por lo menos tres penetraciones a los puntos en la superficie de la muestra a no menos de 10 mm (3/8 in.) del lado del recipiente y no menos de 10 mm (3/8 in.) de separación. Si el plato del traslado se usa, devuelve el plato y muestra al baño de agua después de cada penetración. Antes de cada ensayo, limpie la aguja con una tela limpia humedecida con gasolina u otro solvente conveniente para quitar todo el betún adherido, y entonces limpie una tela seca limpia.

Figura 3.13: Penetración de las muestras



Fuente: Elaboración Propia

Resultados:

Tabla 3.13: Tabla de Resultados del ensayo de Penetración

MOLDE	PENETRACIÓN 1	PENETRACION 2	PENETRACION 3	PROMEDIO
MOLDE No 1	98	92	88	92,7
MOLDE No 2	95	94	91	93,3
MOLDE No 3	90	97	94	93,7
				93,2

Fuente: Elaboración Propia

3.3.2.- Ductilidad de materiales bituminosos. (Designación AASHTO T 51-00) (Designación ASTM D 113)

Objetivo:

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. A menos que por otra parte se especifique, el ensayo se hará a una temperatura de $25 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ($77 \pm 0.2^{\circ}\text{F}$) y con una velocidad de 50 mm por minuto ± 2.5 mm por minuto. A otras temperaturas la velocidad debe especificarse.

Procedimiento:

Preparación del Aparato

Arme el molde en el plato bajo, y para prevenir que el material de ensayo se pegue, cubra la superficie del plato y las superficies interiores de lados a y a' con un agente del liberado conveniente.

Especímenes del Ensayo Amoldando

Caliente la muestra con cuidado para prevenir sobrecalentamiento local hasta que se haya puesto suficientemente fluido para verter. Después del revolver completo, teniendo cuidado de que no entre en ninguna burbuja de aire, vierta el material bituminoso en el molde. Vierta el material en un delgado chorro de un lado a otro, de principio a fin hasta que el material cubra hasta el nivel lleno del molde. Llenando el molde, tenga cuidado para no descolocar las partes del molde que puedan torcer la briqueta. Permita que el molde y los volúmenes 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, mantenidos a la temperatura de la prueba especificada por 30 minutos. Quite el plato base y el molde lleno del baño de agua, y con un temporizador caliente corte el exceso el material bituminoso para que el molde simplemente esté lleno a nivel. Tenga cuidado que durante el cortado, el espécimen no se aparte del plato base o de los pedazos laterales del molde.

Especímen Guardado a Temperatura Estándar

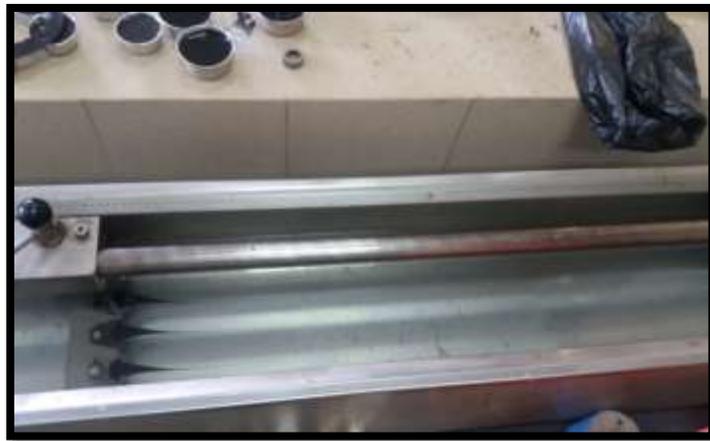
Coloque el plato base y molde, con espécimen de la briqueta, en el baño de agua o la máquina de ensayo y mantenga la temperatura especificada por un periodo de 85 a 95 minutos. Entonces quite la briqueta del plato, despegue los pedazos laterales, y

inmediatamente pruebe la briqueta.

Pruebas

En principio de la prueba, el agua en el tanque de la máquina de ensayo debe cubrir el espécimen ambos sobre y debajo de a través de 25 mm. Pegue las grapas a los alfileres o ganchos de la máquina de ensayo y tire las grapas aparte a la proporción de la especificada de velocidad hasta que la briqueta se rompa o el límite de viaje de la máquina sea alcanzado. Si necesario, use de un soluto que no interfiere con el ensayo, ajuste la gravedad específica del líquido en la máquina de ensayo para que el material bituminoso ni no venga a la superficie ni toque el fondo del baño en ningún momento durante el ensayo. Medida y graba la distancia a través de la cual las grapas se han tiradas para producir la ruptura, o graba el hecho si el espécimen no se rompiera dentro de la capacidad de la máquina.

Figura 3.14: Muestras estiradas



Fuente: Elaboración Propia

Resultados:

Tabla 3.14: Tabla de Resultados del ensayo de Ductilidad

DATO	PROBETA No. 1	PROBETA No. 2	PROBETA No. 3	PROMEDIO
	cm	cm	cm	cm
MUESTRA	110	111	114	111,7

Fuente: Elaboración Propia

3.3.3.- Punto de inflamación por el vaso abierto de cleveland. documento referencial (ASTM D1310-01 AASHTO T79-96)

Objetivo:

Este método cubre la determinación del punto de inflamación, por el Ensayo del Vaso Abierto de Cleveland, de productos de petróleo y otros líquidos, excepto los aceites de combustible y esos materiales que tienen un punto de inflamación de vaso abierto debajo de 79°C (175°F).

Procedimiento:

Llene el vaso, a cualquier temperatura conveniente que no exceda 100°C (180°F) sobre el punto de ablandamiento, para que la parte de encima del menisco esté en la línea del relleno. Para ayudar en esta operación, un Guante de Relleno Nivelado puede ser usado. Si demasiada muestra ha sido agregada al vaso, quite el exceso usando una probeta o otro dispositivo conveniente; sin embargo, si hay muestra por fuera del aparato, vacíe, limpie, y rellénelo. Destruya cualquier burbuja de aire en la superficie de la muestra.

Encienda la llama y ajústelo a un diámetro de 3.2 a 4.8 mm (0.125 a 0.188 in.).

Aplique calor inicialmente para que aumente la proporción de temperatura de la muestra de 14 a 17°C (25 a 30°F) por minuto. Cuando la temperatura de la muestra es aproximadamente 56°C (100°F) debajo del punto de destello anticipado, disminuye el calor para que la proporción de temperatura aumente de 5 a 6°C (9 a 11°F) por minuto para 28°C (50°F) antes del punto de destello.

Empezando en por lo menos 28°C (50°F) por debajo del punto de destello, aplique la llama cuando la temperatura leída en el termómetro alcanza una marca cada 2°C sucesivos. Pase la llama por el centro del vaso, en ángulos rectos al diámetro que atraviesa el termómetro. Con un movimiento liso y continuo, aplique la llama o en una línea recta o a lo largo de la circunferencia de un círculo que tiene un radio de por lo menos 150 mm (6 in.). El centro de la llama se debe mover un plano no más de 2.5

mm (0.10 in.) sobre el plano del borde superior del vaso que pasa primero en una dirección, entonces la próxima vez en la dirección opuesta. El tiempo consumido pasando la llama por el vaso será aproximadamente 1 segundo. Durante el último aumento de 17°C en la anterior temperatura al punto de destello, se debe tener cuidado para evitar alterar los vapores en el ensayo del vaso a través de movimientos descuidados o respirar cerca del vaso.

Figura 3.15: Ejecución del ensayo



Fuente: Elaboración Propia

Grabe como el punto de destello observado la temperatura leída en el termómetro cuando un destello aparece en cualquier punto en la superficie del aceite, pero no confunda el verdadero destello con el halo azulado que a veces rodea la llama.

Para determinar el punto de inflamación, continúe calentando para que la temperatura de la muestra aumente en una proporción de 5 a 6°C (9 a 11°F). Continúe la aplicación de la llama en intervalos de 2°C (5°F) hasta que el aceite se encienda y se continúe quemando durante 5 segundos por lo menos. Grabe la temperatura a este punto como el punto de inflamación del aceite.

Resultados:

Tabla 3.15: Tabla de resultados de ensayo de Punto de Inflamación

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	300	295	293	296

Fuente: Elaboración Propia

3.3.4.- Punto de ablandamiento (aparato del anillo y bola) (designación AASHTO T 53-96) (Designación ASTM D 36)

Objetivo:

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.

Procedimiento:

Caliente con cuidado la muestra, agitándola continuamente para prevenir un sobrecalentamiento local, hasta que esté suficientemente fluida para verterla. En ningún caso la temperatura de la muestra debe exceder de 110° C por sobre del punto de ablandamiento estimado. Elimine las burbujas de aire incorporadas en la muestra mediante agitación continua.

Lleve la muestra de asfalto a la temperatura de vertido, en un tiempo no mayor que 240 min; vierta la muestra caliente dentro de los dos anillos, precalentados aproximadamente a la temperatura de vertido. Mientras se llenan los anillos debe apoyarse sobre una placa de bronce, previamente recubierta con un agente desmoldante, para prevenir que el material bituminoso se adhiera a la placa. Enfríe por lo menos durante 30 min; en ningún caso deje transcurrir más de 4 h antes de terminar el ensayo. Las muestras que estén blandas a temperatura ambiente, se deben enfriar durante un mínimo de 30 min. a una temperatura mínima de 8°C por debajo del punto de ablandamiento esperado.

Ensamble el aparato con los anillos, el termómetro y la guía para centrar las bolas en posición y llene el baño con agua fresca destilada a $5 \pm 1^\circ\text{C}$ a una profundidad no menor de 100 mm ni mayor de 110mm. Mantenga la temperatura del baño a 5°C durante 15

min, colocando el recipiente del ensayo en agua helada, si es necesario. Utilizando unas pinzas, coloque una bola previamente ajustada a la misma temperatura del baño, en cada una de las guías de centrado de las bolas.

Figura 3.16: Muestra a 5°C por

25 min



Fuente: Elaboración Propia

Aplique calor de tal manera que la temperatura del líquido aumente con una velocidad uniforme de 5°C por min; evite el efecto de las corrientes de aire, utilizando protectores si es necesario.

La velocidad de aumento de temperatura deberá ser uniforme y no se promediará durante el período del ensayo. La variación máxima permisible para cualquier minuto de tiempo, después de los tres minutos, será $\pm 5^\circ\text{C}$. Elimine todos los ensayos en los que la velocidad de aumento de temperatura no esté dentro de estos límites.

Anote para cada anillo y bola la temperatura indicada por el termómetro; en el instante que la muestra que rodea la bola, toque la placa inferior. Si la diferencia entre estos dos valores excede 1°C, repita el ensayo.

Figura 3.17: Muestra en ensayo, caída de las esferas



Fuente: Elaboración Propia

Resultados:

Tabla 3.16: Tabla de resultados de ensayo de Punto de Ablandamiento

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO
Punto de ablandamiento	°C	44,0	42,0	43,0	43

Fuente: Elaboración Propia

3.3.5.- Ensayo de peso específico de materiales bituminosos semi-sólidos (Designación AASHTO T 229-97) (Designación ASTM D 71-94)

Objetivo:

Este método cubre la determinación de la gravedad específica de materiales bituminosos semi-sólidos, cementos del asfalto, y los alquitranes suaves por uso de un picnómetro.

Procedimiento:

Calibración del picnómetro.- Limpie, seque, y pese completamente el picnómetro al miligramo más cercano. Designe esta masa como A.

Llene el picnómetro de agua destilada fresca y hervida a temperatura de la prueba y ponga el tapón en el picnómetro. No permita que ninguna burbuja de aire permanezca en el picnómetro.

Permita que el picnómetro permanezca en el agua para un periodo de no menos de 30 minutos. Quite el picnómetro, inmediatamente seque la parte superior del tapón con una toalla seca de una sola pasada, entonces rápidamente seque el residuo fuera del área del picnómetro y pesa al miligramo más cercano. Designe la masa del picnómetro más agua como B.

Preparación de la Muestra - Caliente la muestra con cuidado y revuelve para prevenir sobrecalentamiento local, hasta que la muestra se haya puesto suficientemente fluida para verter. En ningún caso, la temperatura debe aumentarse a más de 56°C (100°F) sobre el punto de ablandamiento esperado para alquitrán, o a más de 111°C (200°F) sobre el punto de ablandamiento esperado para el asfalto. No caliente para más de 30 minutos encima de una llama o el plato caliente o para más de 2 horas en un horno, y evita incorporar burbujas de aire en la muestra.

Vierta suficiente muestra en el picnómetro limpio, seco y calentado para llenarlo cerca tres-cuarto de su capacidad. Tome precauciones para impedir al material de tocar los lados del picnómetro sobre el nivel final, y para prevenir la inclusión de burbujas de aire. Permita que el picnómetro y sus volúmenes se refresquen a temperatura del ambiente para un periodo de no menos de 40 minutos, y pese con el tapón al miligramo más cercano. Designe la masa del picnómetro más la muestra como C.

Llene el picnómetro con agua destilada, fresca y hervida a temperatura del ensayo y ponga el tapón en el picnómetro. No permita que ninguna burbuja de aire permanezca en el picnómetro.

Permita que el picnómetro permanezca en el baño de agua por un periodo de no menos de 30 minutos. Quite el picnómetro del baño. Seque y pese usando la misma técnica y tiempo como eso emplearon. Designe esta masa de picnómetro más la muestra más agua como D.

Determinación:

Calcule la gravedad específica al tercer decimal más cercano como sigue:

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

Donde:

A = la masa del picnómetro (más el tapón)

B = la masa del picnómetro lleno con agua

C = la masa del picnómetro parcialmente lleno con asfalto

D = la masa del picnómetro más el asfalto más agua.

Figura 3.18: Peso del picnómetro vacío



Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.19: Peso del picnómetro con asfalto con previo baño a 25°C



Fuente: Elaboración Propia

Resultados:

Tabla 3.17: Tabla de Resultados del ensayo de Peso Específico

ENSAYO DE PESO ESPECÍFICO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO
Peso del picnómetro con agua (B)	grs	63,95	63,92	63,93	
Peso del picnómetro solo (A)	grs	38,10	38,11	38,12	
Peso del picnómetro + cemento asfáltico (C)	grs	59,01	59,00	59,02	
Peso del picnómetro +muestra + agua para llenar el picnómetro (D)	grs	64,12	64,10	64,11	
PESO ESPECÍFICO	grs/cm3	1,0082	1,0087	1,0087	1,009

Fuente: Elaboración Propia

3.4.- DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA MÉTODO MARSHALL

Este método describe el procedimiento que debe seguirse para la determinación de la resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas para pavimentación. El procedimiento puede emplearse tanto para el proyecto de mezclas en el laboratorio como para el control en obra de las mismas.

Este método consiste en moldear briquetas con la mezcla de agregados y asfalto en caliente. Estas briquetas dispuestas en serie y cada serie con diferentes porcentajes de asfalto, se las moldea una vez que los materiales (agregados y asfalto) hayan sido aprobados según sus respectivas especificaciones de calidad, tamaño, etc.

3.4.1.- Estimación del contenido óptimo de cemento asfáltico

$$P = (0,035 * a) + (0,045 * b) + (K * c) + F$$

P= Contenido estimado de asfalto como porcentaje del peso de la mezcla.

a= Porcentaje del agregado retenido en el tamiz de 2,36 mm.

b= Porcentaje del agregado que pasa el tamiz de 2,36 mm y es retenido en el tamiz de 75µm.

c= porcentaje del agregado que pasa el tamiz de 75µm.

F= 0% a 2% de acuerdo con el porcentaje de absorción de los agregados.

valor de K	Rango de c
0,15	11%-15%
0,18	6%-10%
0,2	Menos de 5%

a= 63,44%, b= 31,77%, c=4,79%, F= 0,97%, k=0,20

$$P = (0,035 * 63,44) + (0,045 * 31,77) + (0,20 * 4,79) + 0,97$$

$$P = 5,5\%$$

Se prepararan muestras con diferentes contenidos de cemento asfáltico en incrementos de 0,5 %, debiendo elaborarse al menos dos muestras por encima y por debajo del óptimo estimado. Una muestra debe contar de al menos tres especímenes. Se prepararan las muestras con los siguientes porcentajes de asfalto: 4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0%, 6,5%, 7,0%.

3.4.2.- Preparación de las Probetas

Para determinar el contenido óptimo de asfalto se prepararán 7 grupos de briquetas para la mezcla de agregados, de forma que en las curvas que representen los resultados de los ensayos muestren un valor óptimo bien definido, cada grupo con diferente contenido de asfalto. Este contenido variara con incrementos de 0.5% de un grupo a otro grupo.

3.4.3.- Procedimiento de Ensayo

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 el horno para calentar su contenido a una temperatura de 110 a 120 °C.

Por otro lado se calienta el cemento asfáltico a una temperatura de 120 a 137°C. Durante su calentamiento el agregado y sobre todo el asfalto deben agitarse para evitar sobrecalentamientos locales.

Se pesan luego sobre una bandeja 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.

Se mezcla el asfalto con los agregados, hasta tener una mezcla homogénea, la temperatura de la mezcla no debe ser inferior a 150°C, ni en ningún caso someterse a recalentamiento.

Figura 3.20: Proceso de Mezclado de la muestra



Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.21: Verificación de la temperatura de la Mezcla Antes de Compactar



Fuente: Elaboración Propia

3.4.4.- Compactación de los especímenes

Verter la mezcla en los moldes Marshall, en tres capas, las dos primeras con 25 varilladas para el acomodo y la tercera con 75 golpes con el martillo; dar la vuelta de cara y aplicar otros 75 golpes.

Figura 3.22: Proceso de Compactación de la Mezcla



Fuente: Elaboración Propia

3.4.5.- Determinación de las propiedades fundamentales de las mezclas compactas y determinación del contenido óptimo de asfalto

Previo a los ensayos Marshall, se debe determinar la altura de las briquetas para un factor de corrección que se aplica cuando no cumple con lo establecido en la norma. Se hizo la lectura de tres alturas para promediar, ya que las briquetas no tienen una altura pareja, por desvío del martillo compactador al realizarlo manualmente.

Figura 3.23: Briquetas para la determinación del contenido óptimo de C.A.



Fuente: Elaboración Propia

3.4.5.1.- Determinación de la densidad

Para ello, se determina la masa en el aire del espécimen compactado, enseguida se deja sumergido en agua por un tiempo mínimo de 10 minutos una temperatura de 25° C, y se determina la masa en el agua; se saca del agua, se seca con la ayuda de una toalla, hasta alcanzar la condición de saturado y superficialmente seco (SSS), y se determina la masa para esta condición.

Figura 3.24: Pesaje De Las Briquetas En Estado Seco Al Aire Libre



Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.25: Pesaje De Las Briquetas En Agua Y Saturada Superficialmente Seca



Fuente: Elaboración Propia

3.4.5.2.- Determinación de la estabilidad y fluencia

Antes del ensayo, se sumerge las briquetas en baño de agua a $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($140 \pm$

1.8 °F) durante un tiempo no inferior a 30 minutos ni mayor a 40 minutos.

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 50.8 mm por minuto (2" / minuto) hasta que se produce la rotura. El punto de rotura se define por la carga máxima obtenida. El número total de libras necesarias para producir la rotura de la muestra a 60 °C (150 °F) se anota como valor de ESTABILIDAD MARSHALL.

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

Figura 3.26: Colocando las briquetas en la prensa Marshall (SEDECA)



Fuente: Elaboración Propia

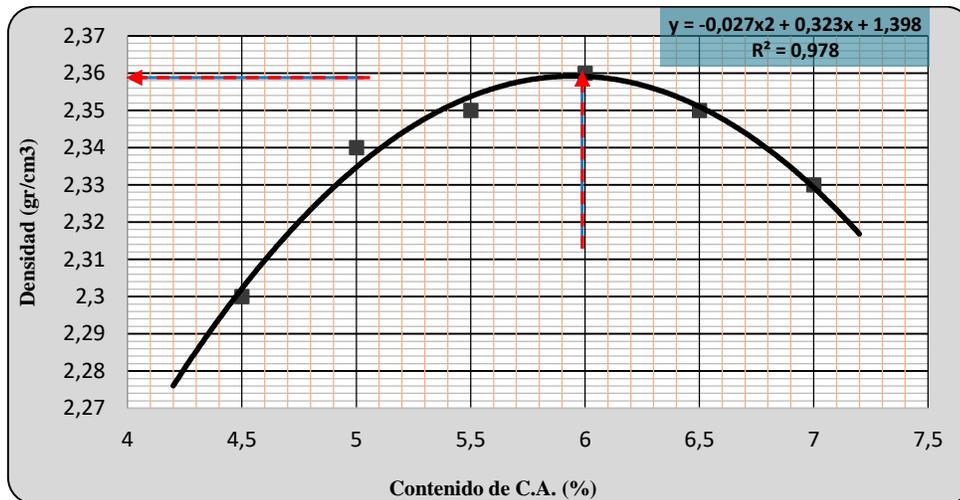
3.4.5.3.- Resultados del método Marshall

Tabla 3.18: Resumen de propiedades del diseño Marshall

		UNIVERSIDAD AUTONOMA JUAN MISAE SARACHO FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFIA Y VIAS DE COMUNICACIÓN CARRERA DE INGENIERIA CIVIL (TARJA-BOLIVIA) DISEÑO DE MEZCLAS AFALTICAS EN CALIENTE METODO MARSHALL																										
		PROYECTO: INVESTIGACIÓN : "INFLUENCIA DE LOS NIVELES DE ENERGÍA DE COMPACTACIÓN EN LA ESTABILIDAD Y DURABILIDAD DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS"																										
		CEMENTO ASFÁLTICO 85-100 AGREGADOS CHARAJA											FECHA: 05 de ABRIL 2017 LABORATORISTA: VALDEZ ARENAS FERNANDO GONZALO															
pesos especificos		% de agregado			BETUN CEMENTO ASFALTICO 85-100 PESO ESPECIFICO TOTAL AASHTO T-228									AGREGADO		%		N° de golpes 75										
Mat. Retenido Tamiz N° 4	2,69	55			1,009									Grava	2,70	30												
Mat. Pasa Tamiz N° 4	2,75	45												Gravilla	2,68	25												
peso especifico total	2,717	100												Arena	2,75	45												
N° de probeta	altura de probeta	% de Betún			Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacios			Estabilidad Marshall					Flujo								
		Inicial	Adicional	Total	seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua	probeta	densidad real	densidad promedio	densidad maxima teorica	% de vacios mezcla total	V.A.M.(vacios agregado mineral)	R.B.V. (relacion betumen vacios)	lectura del dial	Real	Media	Factor de corrección (Altura)	Media F.C.	Corregida	Lectura del dial	flujo	flujo promedio					
		%	%	%	grs.	grs.	grs.	cc	grs/cm3	grs/cm3	grs/cm3	%	%	%	mm	libras	libras	-	-	libras	-	1/100"	pulg					
1	6,51				1189,7	1192,1	675,2	516,9	2,302						1003	2211,2	2159,773	0,960		2058,2638	170	8,5						
2	6,55	4	0,5	4,5	1171,2	1172,9	658,7	514,2	2,278	2,301	2,524	8,84	19,11	53,71	959	2114,2	2159,773	0,953	0,953	2058,2638	140	7,9	8,33					
3	6,59				1175,3	1176,8	671,1	505,7	2,324						977	2153,9	2159,773	0,945		2058,2638	170	8,7						
4	6,52				1191,5	1192,4	683,4	509,0	2,341						1095	2414,0	2159,773	0,958		2058,2638	220	10,6						
5	6,51	4	1	5	1194,6	1197,2	686,7	510,5	2,340	2,336	2,505	6,72	18,30	63,27	1156	2548,5	2544,108	0,960	0,961	2444,8882	205	9,8	10,50					
6	6,49				1182,7	1184,8	676,8	508,0	2,328						1211	2669,8	2159,773	0,965		2058,2638	220	11,0						
7	6,64				1180,0	1182,1	680,7	501,4	2,353						1310	2888,0	2159,773	0,936		2058,2638	260	12,2						
8	6,49	4	1,5	5,5	1170,8	1171,8	672,1	499,7	2,343	2,354	2,485	5,30	18,13	70,76	1270	2799,8	2785,145	0,943	0,944	2629,1766	250	10,6	11,42					
9	6,51				1188,3	1188,5	685,9	502,6	2,364						1210	2667,6	2159,773	0,953		2058,2638	240	11,4						
10	6,61				1176,8	1178,2	671,4	506,8	2,322						1202	2649,9	2159,773	0,936		2058,2638	335	14,6						
11	6,49	4	2	6,0	1198,2	1198,3	692,4	505,9	2,368	2,357	2,466	4,43	18,44	75,99	1160	2557,3	2612,451	0,963	0,961	2510,5654	350	13,4	13,39					
12	6,41				1186,7	1187,7	689,2	498,5	2,381						1193	2630,1	2159,773	0,985		2058,2638	290	12,2						
13	6,42				1174,5	1175,4	670,0	505,4	2,324						1191	2625,7	2159,773	0,983		2058,2638	360	15,0						
14	6,55	4	2,5	6,5	1190,5	1192,8	688,1	504,7	2,359	2,349	2,447	4,03	19,16	78,98	1096	2416,2	2521,328	0,953	0,969	2443,1664	350	15,4	15,35					
15	6,46				1196,8	1198,1	691,8	506,3	2,364						1144	2522,1	2159,773	0,973		2058,2638	370	15,7						
16	6,45	4	3	7,0	1176,9	1178,4	665,0	513,4	2,292	2,331	2,429	3,95	20,20	80,06	1064	2345,7	2389,786	0,975	0,965	2306,1439	395	16,1	16,54					
17	6,54				1182,5	1184,1	681,5	502,6	2,353						1037	2286,2	2159,773	0,954		2058,2638	370	16,5						
18	6,49				1192,1	1192,5	684,8	507,7	2,348						1151	2537,5	2159,773	0,965		2058,2638	410	16,9						
especificacion					minimo						3			18			75						≥ 1500 Lb.			8		
					maximo						5			82												14		

Fuente: Elaboración propia

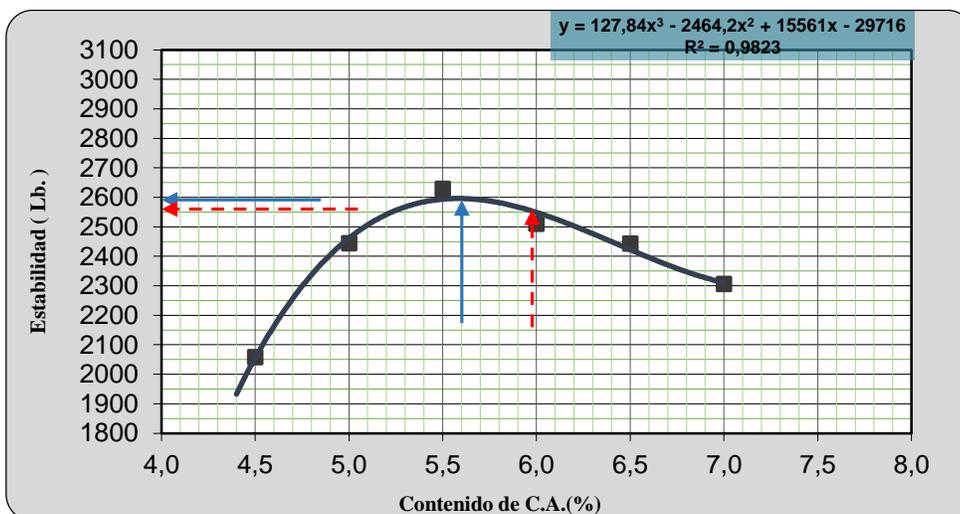
Figura 3.27: Curva Densidad vs Contenido de Cemento Asfáltico



Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico se observa que la densidad es directamente proporcional al % de Cemento asfáltico adicional, es decir que a mayor % de Betún adicional, mayor será la densidad. Pero este valor de densidad recae después de sobrepasar el 5,97 % de Cemento asfáltico en la mezcla (la línea discontinua de color rojo representa el contenido óptimo final de cemento asfáltico).

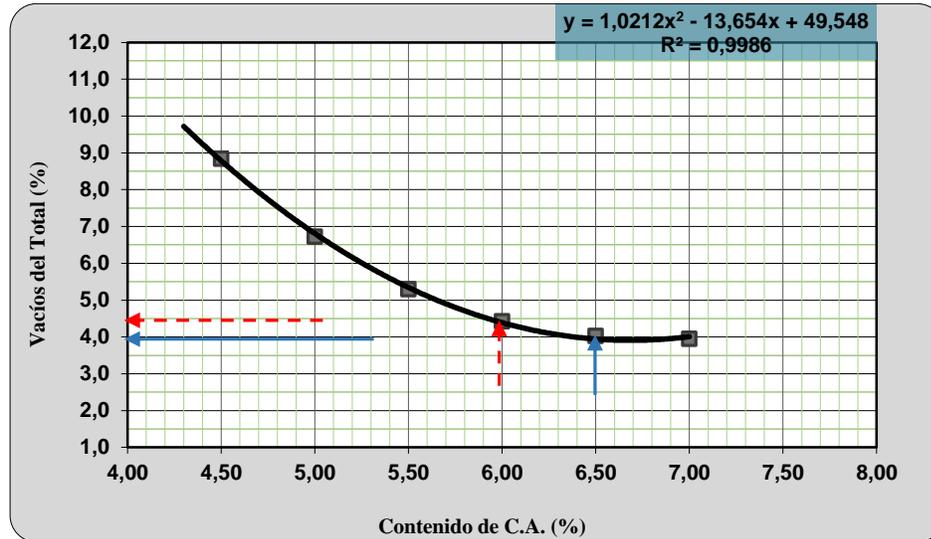
Figura 3.28: Curva de Estabilidad vs Contenido de Cemento Asfáltico



Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico se observa que el valor de la Estabilidad crece a medida que el % de Cemento asfáltico Adicional aumenta, es decir que a mayor % de cemento asfáltico adicional, mayor será la Estabilidad, que recae después de sobrepasar el 5,58 % de cemento asfáltico.

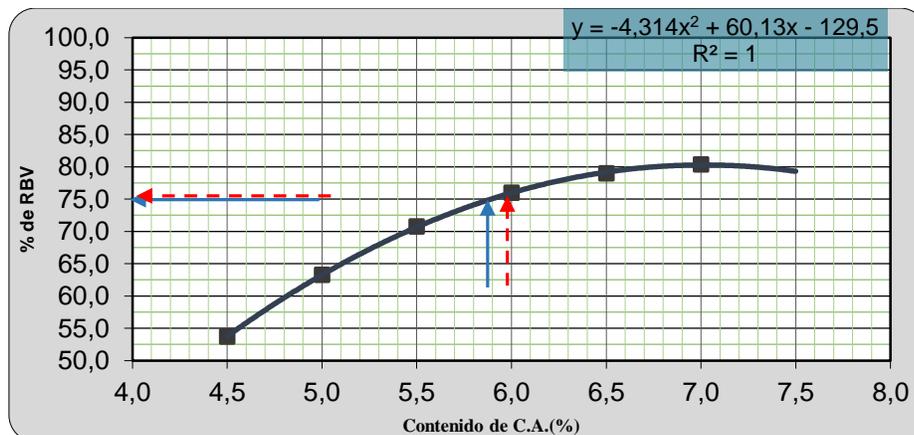
Figura 3.29: Curva de Vacíos Total en la Mezcla vs Contenido de Cemento Asfáltico



Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico se observa que el porcentaje de Vacíos total en la mezcla es inversamente proporcional al % de Cemento asfáltico Adicional, es decir que a mayor % de Betún Adicional, existiría menos Vacíos en la carpeta Asfáltica, en este caso se obtuvo un 6,48% de C.A. para un 4% de vacios en la mezcla.

Figura 3.30: Curva de RBV vs Contenido de Cemento Asfáltico



Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico se observa que la relación Betún – Vacíos es directamente proporcional al % de Betún Adicional, es decir que a mayor % de Betún Adicional, mayor será la Relación Betún – Vacíos, en este caso se obtuvo un 5,89% de C.A. para un 75% de RBV.

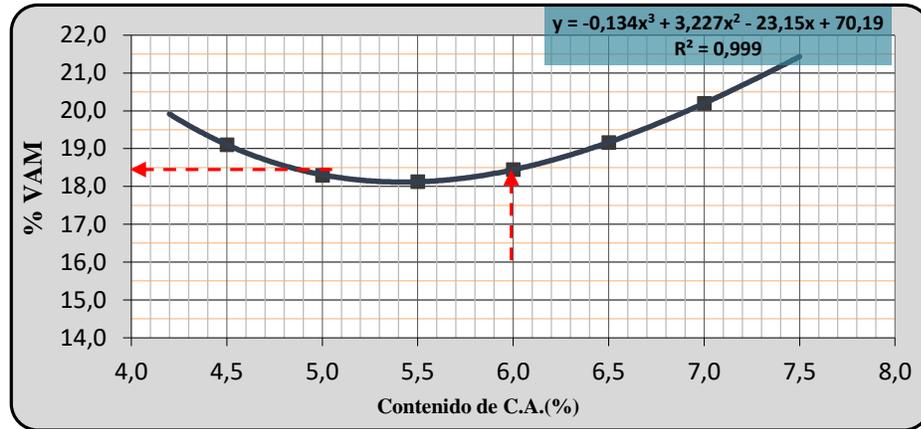


Figura 3.31: Curva de (% VAM) vs Contenido de Cemento Asfáltico

Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico se observa que los Vacíos del Agregado Mineral generalmente disminuye hasta un valor mínimo, y luego aumenta con los aumentos de % de Betún Adicional.

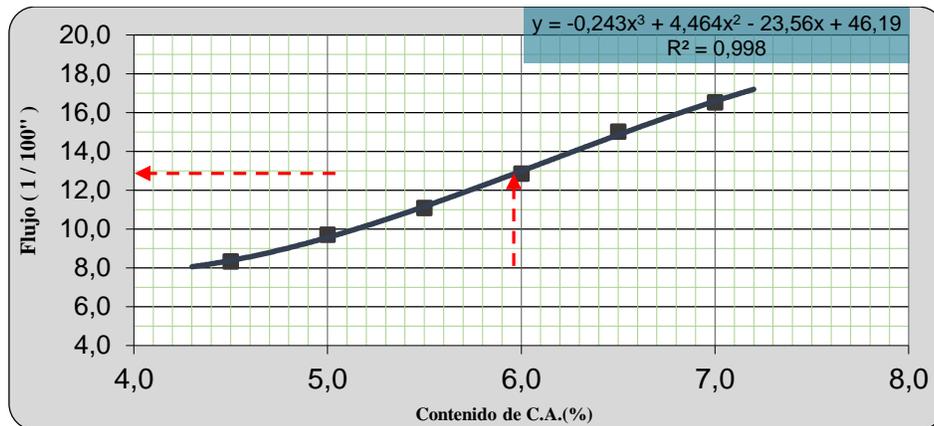


Figura 3.32: Curva de Flujo vs Contenido de Cemento Asfáltico

Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico se observa que el Flujo es proporcional al % de Betún Adicional, es decir que a mayor % de Betún Adicional, mayor será el Flujo.

3.4.5.4.- Cemento asfáltico óptimo para la investigación

Tabla 3.19: Resumen para la determinación del Porcentaje Óptimo de cemento asfáltico

PORCENTAJE DE BETÚN ADICIONAL	DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm ³)	ESTABILIDAD (libras)	% DE VACIOS DE MEZCLA TOTAL (%)	V.A.M. (VACIOS DE AGREGADO MINERAL) (%)	R.B.V. (RELACIÓN BETÚN VACIOS) (%)	FLUJO
4,5	2,301	2058,26	8,84	19,11	53,71	8,33
5	2,336	2444,89	6,72	18,3	63,27	10,5
5,5	2,354	2629,18	5,3	18,13	70,76	11,42
6	2,357	2510,57	4,43	18,44	75,99	13,39
6,5	2,349	2443,17	4,03	19,16	78,98	15,35
7	2,333	2306,14	3,95	20,2	80,06	16,54
Obtenido de Gráficos	2,358	2598,40	4,00	18,179	75	11,01
Porcentaje de Cemento Asfáltico para cada valor (%)	5,97	5,58	6,48	5,41	5,89	5,44
PROMEDIO FINAL (%)	5,98					

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 3.20 se determina el contenido óptimo de cemento asfáltico para el diseño de la mezcla, utilizando la densidad, estabilidad, relación betún vacíos y % de vacíos total en la mezcla. Con los cuales entramos a las ecuaciones de las curvas de tendencia y obtenemos el porcentaje de cemento asfáltico adicional para cada valor promedio o especificación técnica, luego se determina una media de los valores promedio de porcentajes de cemento asfáltico, este valor llega a ser el porcentaje óptimo de cemento asfáltico.

EL PORCENTAJE ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO CON EL QUE SE TRABAJARÁ PARA LA INVESTIGACIÓN SERÁ IGUAL AL 5,98%.

Reemplazando en las ecuaciones de las gráficas realizadas se determinaron los siguientes valores para el contenido óptimo de cemento asfáltico de 5,98%.

Tabla 3.20: Resumen de valores obtenidos con el valor óptimo de asfalto

VALORES OBTENIDOS DISEÑO MARHALL				
CARACTERÍSTICAS	% DE ASFALTO	VALORES CON EL % ÓPTIMO	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
DENSIDAD	5,98	2,358	-----	-----
% VACIOS	5,98	4,44	3	5
R.B.V.	5,98	75,81	75	82
V.A.M	5,98	18,50		
ESTABILIDAD (Lb)	5,98	2552	> 1500 Lb. (75 Golpes)	
FLUENCIA 1/100"	5,98	12,97	8	14
% ÓPTIMO DE ASFALTO PROPUESTO			5,98	

Fuente: Elaboración Propia

3.5.- ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA ENERGÍA DE COMPACTACIÓN

3.5.1.- Variación de la energía de compactación

Las variaciones de energía de compactación que se aplicaran a las briquetas están determinadas por sus golpes del martillo Marshall, los golpes seleccionados para esta investigación son los siguientes (25; 35; 45; 55; 65; 75; 85).

Las energías de compactación que se aplicaron a las briquetas pueden ser determinadas de la siguiente manera:

$$Y = \frac{n * N * P * H}{V}$$

Donde:

Y= Energía a aplicar a la muestra

n = Número de capas a ser compactadas

N = Número de golpes aplicados por cara

P = Peso del pisón

H = Altura de caída del pisón

V = Volumen del cilindro

$$\text{Para 25 golpes su energía aplicada será: } Y = \frac{2*25*0,04451[kN]*0,457[m]}{0,0006178} = 1646,31 \frac{KN}{m^3} m$$

$$\text{Para 35 golpes su energía aplicada será: } Y = \frac{2*35*0,04451[kN]*0,457[m]}{0,0006178} = 2304,83 \frac{KN}{m^3} m$$

$$\text{Para 45 golpes su energía aplicada será: } Y = \frac{2*45*0,04451[kN]*0,457[m]}{0,0006178} = 2963,36 \frac{KN}{m^3} m$$

$$\text{Para 55 golpes su energía aplicada será: } Y = \frac{2*55*0,04451[kN]*0,457[m]}{0,0006178} = 3621,88 \frac{KN}{m^3} m$$

$$\text{Para 65 golpes su energía aplicada será: } Y = \frac{2*65*0,04451[kN]*0,457[m]}{0,0006178} = 4280,41 \frac{KN}{m^3} m$$

$$\text{Para 75 golpes su energía aplicada será: } Y = \frac{2*75*0,04451[kN]*0,457[m]}{0,0006178} = 4938,93 \frac{KN}{m^3} m$$

$$\text{Para 85 golpes su energía aplicada será: } Y = \frac{2*85*0,04451[kN]*0,457[m]}{0,0006178} = 5597,45 \frac{KN}{m^3} m$$

$$\text{Para 100 golpes su energía aplicada será: } Y = \frac{2*100*0,04451[kN]*0,457[m]}{0,0006178} = 6583,52 \frac{KN}{m^3} m$$

Figura 3.33: Elaboración de briquetas a diferentes energías de compactación



Fuente:
3.5.2.-
energías de



Elaboración Propia
Resultados de estabilidad a diferentes
compactación

Tabla 3.21: Resumen de propiedades de las briquetas con diferentes energías de compactación

N° de probeta		altura de probeta		% C.A.		N° Golpes		Peso Briqueta			Volumen		Densidad Briqueta		% de Vacios			Estabilidad Marshall				
								seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua	probeta	densidad real	densidad promedio	densidad maxima teorica	% de vacios mezcla total	V.A.ML.(vacios agregado mineral)	R.B.V. (relacion betumen vacios)	lectura del dial	Real	Factor de corrección (Altura)	Estabilidad corregida	Corregida
								grs.	grs.	grs.	cc	grs/cm3	grs/cm3	%	%	%	mm	libras	-	-	libras	
1	6,72	5,98	25	1188,4	1188,9	673,3	515,6	2,305	2,281	2,467	7,54	21,06	64,20	490	1080	0,918	991,1	1021,8				
2	6,70			1187,9	1188,6	666,9	521,7	2,277						520	1146	0,923	1057,5					
3	6,74			1190,6	1191,3	665,1	526,2	2,263						515	1135	0,913	1036,0					
4	6,73			1189,2	1190,9	669,2	521,7	2,279						497	1096	0,915	1002,6					
1	6,66	5,98	35	1187,1	1188,1	668,2	519,9	2,283	2,289	2,467	7,20	20,76	65,35	594	1310	0,932	1220,4	1247,1				
2	6,71			1186,2	1187,4	667,4	520,0	2,281						599	1321	0,920	1214,9					
3	6,69			1185,4	1186,5	669,4	517,1	2,292						630	1389	0,925	1284,7					
4	6,72			1184,8	1185,8	670,9	514,9	2,301						627	1382	0,918	1268,2					
1	6,65	5,98	45	1187,5	1188,2	674,9	513,3	2,313	2,302	2,467	6,69	20,34	67,08	698	1539	0,934	1436,9	1459,4				
2	6,67			1186,4	1187,6	675,0	512,6	2,314						693	1528	0,930	1420,8					
3	6,64			1188,6	1189,3	667,9	521,4	2,280						727	1603	0,936	1499,7					
4	6,63			1184,2	1185,4	670,5	514,9	2,300						716	1578	0,938	1480,0					
1	6,64	5,98	55	1188,7	1189,3	675,5	513,8	2,314	2,332	2,467	5,48	19,30	71,60	810	1786	0,936	1670,9	1686,4				
2	6,61			1187,9	1188,7	682,4	506,3	2,346						795	1753	0,941	1649,8					
3	6,66			1185,3	1186,4	685,4	501,0	2,366						710	1565	0,932	1458,7					
4	6,63			1186,4	1187,6	672,1	515,5	2,301						841	1854	0,938	1738,4					
1	6,65	5,98	65	1189,7	1190,7	685,7	505,0	2,356	2,357	2,467	4,45	18,42	75,84	982	2165	0,934	2021,6	2089,8				
2	6,59			1188,6	1189,7	684,9	504,8	2,355						995	2194	0,945	2072,9					
3	6,60			1189,9	1190,2	687,1	503,1	2,365						1030	2271	0,943	2141,8					
4	6,55			1190,5	1192,1	686,2	505,9	2,353						1011	2229	0,953	2123,0					
1	6,64	5,98	75	1193,8	1195,2	688,4	506,8	2,356	2,365	2,467	4,12	18,14	77,29	1204	2654	0,936	2483,7	2452,6				
2	6,50			1191,5	1193,1	689,7	503,4	2,367						1139	2511	0,963	2416,9					
3	6,49			1198,2	1198,3	692,4	505,9	2,368						1133	2498	0,965	2410,4					
4	6,41			1181,7	1182,7	684,2	498,5	2,371						1151	2537	0,985	2499,4					
1	6,46	5,98	85	1194,7	1195,1	689,7	505,4	2,364	2,368	2,467	4,00	18,04	77,82	1180	2601	0,973	2529,9	2494,6				
2	6,49			1195,6	1196,2	691,1	505,1	2,367						1189	2621	0,965	2529,5					
3	6,55			1198,6	1199,1	691,3	507,8	2,360						1175	2590	0,953	2467,4					
4	6,57			1187,9	1187,9	689,2	498,7	2,382						1172	2584	0,949	2451,5					
1	6,44	5,98	100	1205,6	1206,3	703,8	502,5	2,399	2,369	2,467	3,97	18,01	77,95	1179	2599	0,978	2540,7	2509,7				
2	6,42			1188,4	1189,3	685,2	504,1	2,357						1150	2535	0,983	2490,9					
3	6,61			1211,3	1212,8	700,8	512,0	2,366						1218	2685	0,941	2527,6					
4	6,52			1204,1	1205,3	693,7	511,6	2,354						1174	2588	0,958	2479,8					

Fuente: Elaboración Propia

3.5.3.- Tratamiento estadístico y análisis de error de los resultados de estabilidad

Tabla 3.22: Tratamiento estadístico de los resultados de estabilidad

N de golpes	ESTABILIDAD lb (X)	N DATOS	MEDIA (x)	DESVIACION EST.	MEDIANA	coef. Variacion (%)	ERROR EN LA MEDICIÓN		
							ERROR ABSOLUTO	ERROR RELATIVO	ERROR PORCENTUAL
25	991,1	4	1021,81	30,50	1019,29	2,99	30,68	0,0309556	3,10
	1057,5						35,73	0,0337880	3,38
	1036,0						14,21	0,0137159	1,37
	1002,6						19,26	0,0192123	1,92
35	1220,4	4	1247,06	34,71	1244,30	2,78	26,71	0,0218846	2,19
	1214,9						32,15	0,0264622	2,65
	1284,7						37,67	0,0293217	2,93
	1268,2						21,19	0,0167046	1,67
45	1436,9	4	1459,37	36,69	1458,47	2,51	22,43	0,0156063	1,56
	1420,8						38,52	0,0271136	2,71
	1499,7						40,32	0,0268862	2,69
	1480,0						20,63	0,0139384	1,39
55	1670,9	3	1686,35	46,28	1670,90	2,74	15,45	0,0092451	0,92
	1649,8						36,58	0,0221700	2,22
	1458,7						-	-	-
	1738,4						52,02	0,0299263	2,99
65	2021,6	4	2089,82	53,96	2097,96	2,58	68,22	0,0337445	3,37
	2072,9						16,89	0,0081466	0,81
	2141,8						51,94	0,0242523	2,43
	2123,0						33,16	0,0156208	1,56
75	2483,7	4	2452,59	45,52	2450,27	1,86	31,07	0,0125115	1,25
	2416,9						35,71	0,0147772	1,48
	2410,4						42,20	0,0175083	1,75
	2499,4						46,84	0,0187411	1,87
85	2529,9	4	2494,57	41,09	2498,44	1,65	35,32	0,0139610	1,40
	2529,5						34,96	0,0138192	1,38
	2467,4						27,21	0,0110272	1,10
	2451,5						43,07	0,0175679	1,76
100	2540,7	4	2509,75	29,06	2509,25	1,16	30,99	0,0121976	1,22
	2490,9						18,83	0,0075584	0,76
	2527,6						17,83	0,0070548	0,71
	2479,8						30,00	0,0120960	1,21

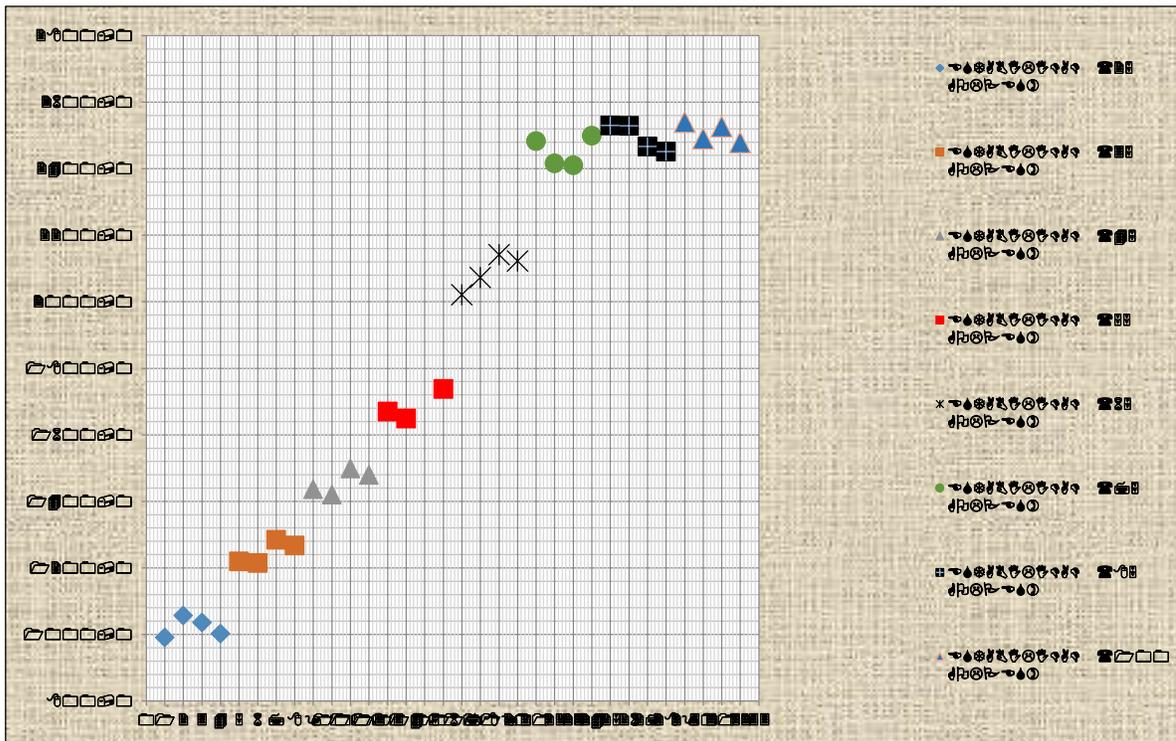
Fuente: Elaboración Propia

En la tabla se realizó el cálculo estadístico de los datos donde también se determinó los errores en la medición de los datos determinándose que los valores de Estabilidad su media y su desviación para los diferentes números de golpes son: para 25 golpes (1021,81 lb \pm 30,51) el valor más alejado a la media es (1057,5 lb) con un error de 3,38 %, para 35 golpes (1247,06lb \pm 34,71) el valor más alejado a la media es (1284,7 lb) con un error de 2,93%, para 45 golpes (1459,37lb \pm 36,69) el valor más

alejado a la media es (1420,8 lb) con un error de 2,71%, para 55 golpes (1686,35 lb \pm 46,28) el valor más alejado a la media es (1738,4 lb) con un error de 2,99%, para 65 golpes (2093 lb \pm 53,96) el valor más alejado a la media es (2021,6 lb), con un error de 3,37%, para 75 golpes (2452,57 lb \pm 45,52) el valor más alejado a la media es (2499,4 lb) con un error de 1,87%, para 85 golpes (2494,57 lb \pm 41,09) el valor más alejado a la media es (2451,5 lb), con un error de 1,76%, y para 100 golpes (2524,06 lb \pm 45,72) el valor más alejado a la media es (2540,7 lb), con un error de 1,22%.

En la siguiente figura se pueden observar los resultados de Estabilidad (lb), obtenidos en las diferentes briquetas que fueron elaboradas con 25, 35, 45, 55, 75, 85 y 100 golpes aplicados a cada cara de las briquetas, produciéndose así diferentes niveles de energía de compactación.

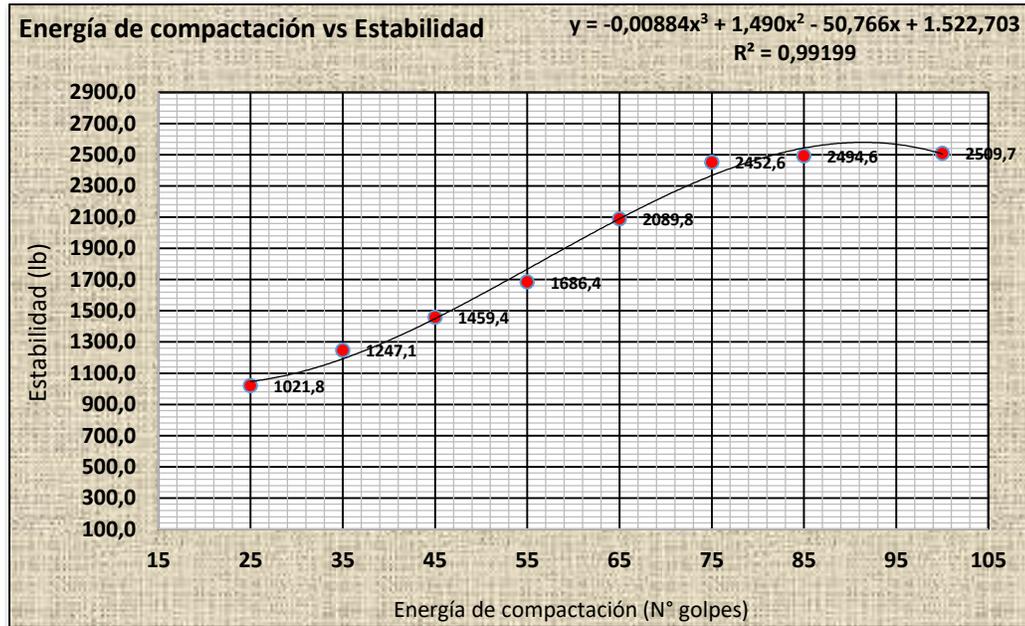
Figura 3.34: Resultados de Estabilidad a diferentes números de golpes



Fuente: Elaboración Propia

3.5.4.- Análisis de los resultados de estabilidad a diferentes energías de compactación

Figura 3.35: Curva de Estabilidad vs Energía de Compactación



Fuente: Elaboración Propia

En la gráfica de estabilidad vs energía de compactación, se puede apreciar que la estabilidad es directamente proporcional a la energía de compactación que se aplica a las briquetas, a mayor energía de compactación, mayor será la Estabilidad en las briquetas, pero cuando se superan los 75 golpes la estabilidad crece en menor proporción. Volviéndose con una tendencia que aumenta en valores muy pequeños.

Se puede observar que para la máxima energía de compactación aplicada a las briquetas se produjo un valor de estabilidad de 2509,7 lb y para la mínima energía de compactación el valor de la Estabilidad fue de 1021,8 lb es decir hubo una diferencia de 1487,9 lb que representa un 59,29% de pérdida en el valor de estabilidad.

La energía de compactación tiene mucha importancia debido a que cuando es muy baja se puede observar que los valores de estabilidad decrecen en gran proporción, así de un diseño realizado para 75 golpes con una estabilidad de 2452,6 lb. Se produce una disminución en la estabilidad hasta 1021,8 lb para una energía de compactación producida por tan solo 25 golpes aplicados por cara de la briqueta, representa un 58,34% de pérdida.

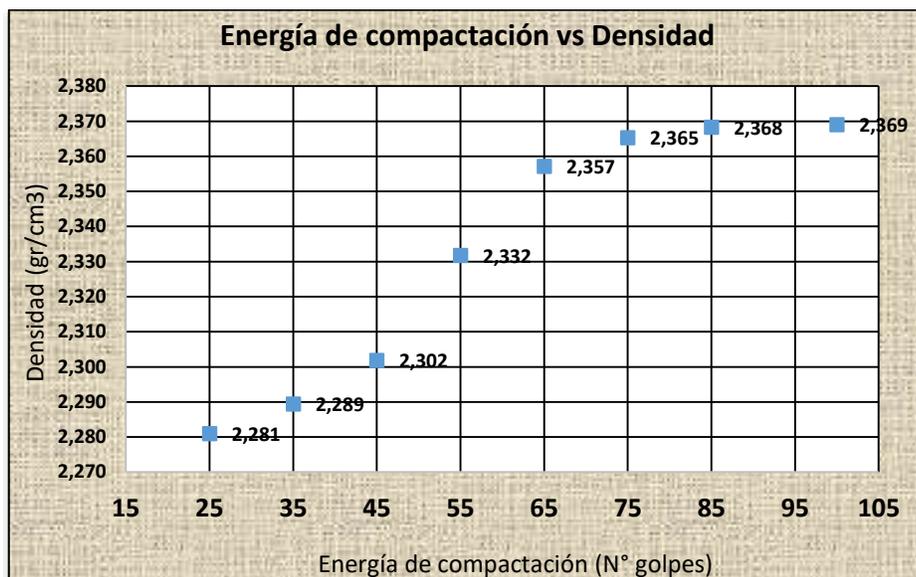
Según los criterios del diseño Marshall para mezclas asfálticas, las briquetas en laboratorio pueden ser elaboradas con 35 golpes, 50 golpes y 75 golpes esto en función del tipo de tránsito correspondiente, considerando que un tránsito liviano resulta de un EAL de diseño menor a 104, un tránsito mediano resulta de un EAL de diseño entre 104 y 106, y el tránsito pesado resulta de un EAL de diseño mayor a 106.

Si se trata de un tránsito pesado el número de golpes aplicados a las briquetas es de 75 golpes por cada cara de las briquetas y la estabilidad mínima esperada de diseño debería ser de 1800 lb, en este caso se puede observar en la gráfica que para 75 golpes el valor de la estabilidad obtenido es de 2452,6 lb.

Para el caso de los 50 golpes que según los criterios del método Marshall para un tránsito considerado medio la estabilidad mínima que se requiere del diseño Marshall es de 1200 lb, utilizando la ecuación obtenida del gráfico de Estabilidad versus energía de compactación podemos determinar la estabilidad para los 50 golpes y nos da un valor de 1604,4 lb.

En el caso de los 35 golpes según los criterios del método Marshall para mezclas asfálticas, se aplican este número de golpes para un tránsito considerado liviano, la estabilidad mínima de diseño que se requiere es de 750 lb, y el valor de estabilidad para los 35 golpes obtenido en la investigación es de 1247,06 lb, es decir se cumple con los requisitos mínimos de valores estabilidad para los 3 tipos de tránsito pesado, mediano y liviano que establece el método Marshall en los criterios de diseño de mezclas asfálticas.

Figura 3.36: Energía de compactación vs Densidad



Fuente: Elaboración Propia

En la gráfica se puede observar como la densidad se ve afectada por la energía de compactación que se aplica a las briquetas, produciéndose valores muy bajos cuando la energía de compactación es menor de los 75 golpes.

Cuando el número de golpes es igual a 25 se observa que el valor de densidad es de 2,281 gr/cm³. Este valor de densidad está muy por debajo del valor de densidad para 75 golpes que es de 2,365 gr/cm³, por lo tanto la mezcla asfáltica se verá afectada de mayor manera debido al gran espacios de vacíos presentes en la mezcla siendo de 7,54 % superando en gran medida al valor de espacios de vacíos que debería de tener la mezcla asfáltica.

En el otro extremo el caso de los 100 golpes aplicados es decir la máxima energía de compactación se obtuvo una densidad de 2,369 gr/cm³, y se produjo una disminución en el porcentaje de vacíos total en la mezcla hasta un valor de 3,97%, es decir a una energía de compactación de 100 golpes se mejoran las propiedades de densidad y porcentaje de vacíos total en la mezcla asfáltica.

3.6.- ANÁLISIS DEL EFECTO EN LA DURABILIDAD A DIFERENTES NIVELES DE ENERGÍA DE COMPACTACIÓN

Para realizar el análisis del efecto en la durabilidad, que es producida en las briquetas que fueron elaboradas en diferentes niveles de energía de compactación de 25; 35; 45; 55; 65; 75; 85 y 100 golpes, las briquetas fueron sometidas por un tiempo de 5 horas a las temperaturas de (70°C, 75°C y 80°C).

Las mezclas asfálticas durante su proceso de elaboración, colocación y puesta en servicio a través de su vida útil experimentan diferentes temperaturas, sin embargo para fines investigativos se selecciona los rangos de temperatura de (70°C, 75°C y 80°C) porque son las temperaturas sobre las cuales el asfalto tiene un comportamiento normal que utilizamos para realizar el análisis del efecto en la durabilidad de las mezclas asfálticas.

Estas briquetas fueron colocadas en el horno para acelerar su proceso de oxidación debido a que cuando el cemento asfáltico es sometido a altas temperaturas se produce la oxidación y por consiguiente su envejecimiento del cemento asfáltico y de esta manera disminuyen sus propiedades y su desempeño en condiciones de servicio.

Posterior a este proceso de oxidación por la temperatura, las briquetas fueron colocadas en la prensa Marshall para determinar sus valores de estabilidad y de esta manera poder determinar su pérdida en la estabilidad con relación a los valores de Estabilidad inicial de las briquetas elaboradas.

Figura 3.37: Briquetas colocadas en el horno para acelerar su proceso de oxidación



Fuente: Elaboración Propia

3.6.1.- Resultados de estabilidad en briquetas sometidas a una temperatura de 70 °C por un tiempo de 5 horas

Tabla 3.23: Resultados de las briquetas colocadas en el horno por un tiempo de 5 horas a una temperatura de 70 °C

N° de probeta		altura de probeta	% C.A.	N° Golpes	Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacíos			Estabilidad Marshall																																																																					
					seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua		probeta	densidad real	densidad promedio	densidad máxima teorica	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relacion betumen vacíos)	lectura del dial	Real	Factor de corrección (Altura)	Estabilidad corregida	Corregida																																																																
					grs.	grs.	grs.	cc	grs/cm3	grs/cm3	grs/cm3	%	%	%	mm	libras	-	-	libras																																																																	
					1190,2	1191,5	674,8	516,7	2,303	BETÚN					AGREGADO		%																																																																			
					1168,6	1169,6	647,2	522,4	2,237	CEMENTO ASFÁLTICO 85-100					Grava	2,70	30																																																																			
					1178,8	1179,6	664,1	515,5	2,287	PESO ESPECIFICO TOTAL AASHTO T-228					1,009	Gravilla	2,68	25																																																																		
					1191,2	1192,0	670,0	522,0	2,282							Arena	2,75	45																																																																		
pesos específicos					% de agregado																																																																															
Mat. Retenido Tamiz N° 4					2,69	55																																																																														
Mat. Pasa Tamiz N° 4					2,75	45																																																																														
peso específico total					2,717	100																																																																														
					UNIVERSIDAD AUTONOMA JUAN MISAEL SARACHO																																																																															
					FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA																																																																															
					DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFIA Y VIAS DE COMUNICACIÓN																																																																															
					CARRERA DE INGENIERIA CIVIL (TARJIA-BOLIVIA)																																																																															
					DISEÑO DE MEZCLAS AFÁLTICAS EN CALIENTE METODO MARSHALL																																																																															
					PROYECTO: INVESTIGACIÓN : "INFLUENCIA DE LOS NIVELES DE ENERGÍA DE COMPACTACIÓN EN LA ESTABILIDAD Y DURABILIDAD DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS"																																																																															
					CEMENTO ASFÁLTICO 85-100							FECHA: 19 de ABRIL 2017																																																																								
					AGREGADOS CHARAJA							LABORATORISTA: VALDEZ ARENAS FERNANDO																																																																								
<table border="1"> <tr> <td colspan="13">BETÚN</td> <td colspan="2">AGREGADO</td> <td>%</td> </tr> <tr> <td colspan="13">CEMENTO ASFÁLTICO 85-100</td> <td>Grava</td> <td>2,70</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td colspan="13">PESO ESPECIFICO TOTAL AASHTO T-228</td> <td>1,009</td> <td>Gravilla</td> <td>2,68</td> <td>25</td> </tr> <tr> <td colspan="13"></td> <td>Arena</td> <td>2,75</td> <td>45</td> </tr> </table>																				BETÚN													AGREGADO		%	CEMENTO ASFÁLTICO 85-100													Grava	2,70	30	PESO ESPECIFICO TOTAL AASHTO T-228													1,009	Gravilla	2,68	25														Arena	2,75	45
BETÚN													AGREGADO		%																																																																					
CEMENTO ASFÁLTICO 85-100													Grava	2,70	30																																																																					
PESO ESPECIFICO TOTAL AASHTO T-228													1,009	Gravilla	2,68	25																																																																				
													Arena	2,75	45																																																																					
<table border="1"> <tr> <th rowspan="2">N° de probeta</th> <th rowspan="2">altura de probeta</th> <th rowspan="2">% C.A.</th> <th rowspan="2">N° Golpes</th> <th colspan="3">Peso Briqueta</th> <th rowspan="2">Volumen</th> <th colspan="3">Densidad Briqueta</th> <th colspan="3">% de Vacíos</th> <th colspan="5">Estabilidad Marshall</th> </tr> <tr> <th>seco</th> <th>sat. Sup. Seca</th> <th>sumergida en agua</th> <th>probeta</th> <th>densidad real</th> <th>densidad promedio</th> <th>densidad máxima teorica</th> <th>% de vacíos mezcla total</th> <th>V.A.M.(vacíos agregado mineral)</th> <th>R.B.V. (relacion betumen vacíos)</th> <th>lectura del dial</th> <th>Real</th> <th>Factor de corrección (Altura)</th> <th>Estabilidad corregida</th> <th>Corregida</th> </tr> <tr> <th colspan="5"></th> <th>grs.</th> <th>grs.</th> <th>grs.</th> <th>cc</th> <th>grs/cm3</th> <th>grs/cm3</th> <th>grs/cm3</th> <th>%</th> <th>%</th> <th>%</th> <th>mm</th> <th>libras</th> <th>-</th> <th>-</th> <th>libras</th> </tr> </table>																				N° de probeta	altura de probeta	% C.A.	N° Golpes	Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacíos			Estabilidad Marshall					seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua	probeta	densidad real	densidad promedio	densidad máxima teorica	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relacion betumen vacíos)	lectura del dial	Real	Factor de corrección (Altura)	Estabilidad corregida	Corregida						grs.	grs.	grs.	cc	grs/cm3	grs/cm3	grs/cm3	%	%	%	mm	libras	-	-	libras											
N° de probeta	altura de probeta	% C.A.	N° Golpes	Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacíos			Estabilidad Marshall																																																																						
				seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua		probeta	densidad real	densidad promedio	densidad máxima teorica	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relacion betumen vacíos)	lectura del dial	Real	Factor de corrección (Altura)	Estabilidad corregida	Corregida																																																																	
					grs.	grs.	grs.	cc	grs/cm3	grs/cm3	grs/cm3	%	%	%	mm	libras	-	-	libras																																																																	
1	6,75	5,98	25	1190,2	1191,5	674,8	516,7	2,303	2,277	2,467	7,69	21,19	63,70	360	793,656	0,910	722,2	744,82																																																																		
2	6,69			1168,6	1169,6	647,2	522,4	2,237						378	833,339	0,925	770,8																																																																			
3	6,78			1178,8	1179,6	664,1	515,5	2,287						390	859,794	0,903	776,0																																																																			
4	6,76			1191,2	1192,0	670,0	522,0	2,282						355	782,633	0,908	710,2																																																																			
1	6,68	5,98	35	1188,3	1189,4	667,9	521,5	2,279	2,279	2,467	7,64	21,14	63,88	381	839,953	0,928	779,1	810,23																																																																		
2	6,72			1174,2	1175,9	655,2	520,7	2,255						414	912,704	0,918	837,4																																																																			
3	6,74			1184,6	1185,5	670,1	515,4	2,298						405	892,863	0,913	814,7																																																																			
4	6,68			1170,4	1171,7	658,9	512,8	2,282						396	873,022	0,928	809,7																																																																			
1	6,65	5,98	45	1190,7	1191,8	675,1	516,7	2,304	2,297	2,467	6,91	20,52	66,34	431	950,183	0,934	887,3	1100,46																																																																		
2	6,69			1162,6	1163,9	650,3	513,6	2,264						552	1216,94	0,925	1125,7																																																																			
3	6,70			1179,7	1180,4	665,2	515,2	2,290						525	1157,42	0,923	1067,7																																																																			
4	6,62			1167,6	1168,7	667,3	501,4	2,329						535	1179,46	0,939	1108,0																																																																			
1	6,59	5,98	55	1170,6	1171,7	660,3	511,4	2,289	2,327	2,467	5,66	19,45	70,92	610	1344,81	0,945	1270,8	1251,10																																																																		
2	6,57			1178,6	1180,1	683,7	496,4	2,374						584	1287,49	0,949	1221,6																																																																			
3	6,65			1162,4	1163,3	670,2	493,1	2,357						624	1375,67	0,934	1284,6																																																																			
4	6,64			1153,1	1154,6	650,9	503,7	2,289						595	1311,74	0,936	1227,4																																																																			
1	6,66	5,98	65	1166,3	1167,7	660,9	506,8	2,301	2,338	2,467	5,22	19,07	72,66	742	1635,81	0,932	1524,4	1553,25																																																																		
2	6,55			1192,7	1193,2	685,2	508,0	2,348						758	1671,09	0,953	1591,7																																																																			
3	6,70			1178,8	1180,0	673,2	506,8	2,326						735	1620,38	0,923	1494,8																																																																			
4	6,59			1198,6	1200,1	696,1	504,0	2,378						769	1695,34	0,945	1602,1																																																																			
1	6,58	5,98	75	1175,2	1176,7	670,1	506,6	2,320	2,369	2,467	3,98	18,02	77,90	971	2140,67	0,947	2027,0	1969,9																																																																		
2	6,64			1197,9	1198,2	699,4	498,8	2,402						952	2098,78	0,936	1963,8																																																																			
3	6,42			1198,9	1199,9	698,0	501,9	2,389						896	1975,32	0,983	1940,8																																																																			
4	6,67			1184,6	1186,4	685,5	500,9	2,365						978	2156,1	0,930	2005,2																																																																			
1	6,40	5,98	85	1181,4	1182,1	677,0	505,1	2,339	2,372	2,467	3,86	17,92	78,44	947	2087,76	0,988	2061,7	2016,82																																																																		
2	6,47			1203,5	1204,1	692,7	511,4	2,353						931	2052,48	0,970	1990,9																																																																			
3	6,53			1213,7	1214,2	700,6	513,6	2,363						968	2134,05	0,956	2040,8																																																																			
4	6,41			1189,6	1190,3	701,0	489,3	2,431						909	2003,98	0,985	1973,9																																																																			
1	6,44	5,98	100	1179,4	1180,7	675,1	505,6	2,333	2,373	2,467	3,82	17,89	78,62	925	2039,26	0,978	1993,4	2025,90																																																																		
2	6,62			1204,7	1205,9	702,2	503,7	2,392						1000	2204,6	0,939	2071,0																																																																			
3	6,55			1201,5	1202,3	702,4	499,9	2,403						942	2076,73	0,953	1978,1																																																																			
4	6,43			1198,4	1199,5	692,3	507,2	2,363						954	2103,19	0,980	2061,1																																																																			

Fuente: Elaboración Propia

3.6.1.1.-Tratamiento estadístico y análisis de error de los resultados de estabilidad de briquetas sometidas a 70°C por un tiempo de 5 horas

Tabla 3.24: Tratamiento estadístico de los resultados de estabilidad en briquetas sometidas a 70°C por un tiempo de 5 horas

N de golpes	ESTABILIDAD lb (x)	N DATOS	MEDIA (x)	DESVIACION EST.	MEDIANA	coef. Variacion (%)	ERROR EN LA MEDICIÓN		
							ERROR ABSOLUTO	ERROR RELATIVO	ERROR PORCENTUAL
25	722,2	4	744,82	33,43	746,53	4,49	22,59	0,031	3,13
	770,8						26,02	0,034	3,38
	776,0						31,15	0,040	4,01
	710,2						34,58	0,049	4,87
35	779,1	4	810,23	24,02	812,23	2,96	31,18	0,040	4,00
	837,4						27,17	0,032	3,25
	814,7						4,51	0,006	0,55
	809,7						0,50	0,001	0,06
45	887,3	3	1100,46	29,70	1107,99	2,70	-	-	-
	1125,7						25,21	0,022	2,24
	1067,7						32,74	0,031	3,07
	1108,0						7,53	0,007	0,68
55	1270,8	4	1251,10	31,34	1249,12	2,50	19,74	0,016	1,55
	1221,6						29,53	0,024	2,42
	1284,6						33,50	0,026	2,61
	1227,4						23,71	0,019	1,93
65	1524,4	4	1553,25	52,00	1558,06	3,35	28,84	0,019	1,89
	1591,7						38,46	0,024	2,42
	1494,8						58,45	0,039	3,91
	1602,1						48,84	0,030	3,05
75	2027,0	4	1984,19	39,05	1984,50	1,97	42,81	0,021	2,11
	1963,8						20,36	0,010	1,04
	1940,8						43,43	0,022	2,24
	2005,2						20,98	0,010	1,05
85	2061,7	4	2016,82	41,22	2015,85	2,04	44,84	0,022	2,17
	1990,9						25,91	0,013	1,30
	2040,8						23,97	0,012	1,17
	1973,9						42,90	0,022	2,17
100	1993,4	4	2025,90	46,97	2027,25	2,32	32,52	0,016	1,63
	2071,0						45,10	0,022	2,18
	1978,1						47,81	0,024	2,42
	2061,1						35,23	0,017	1,71

Fuente: Elaboración Propia

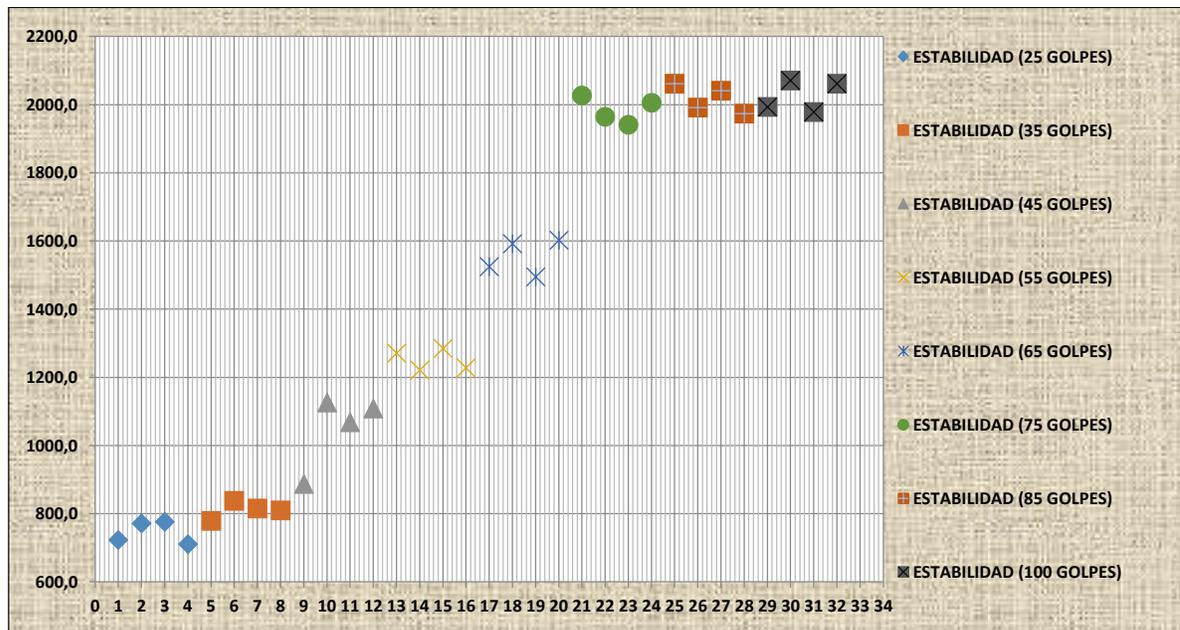
En la tabla se realizó el cálculo estadístico de los datos donde también se determinó los errores en la medición de los datos

determinándose que los valores de Estabilidad su media y su desviación para los diferentes números de golpes son: para 25 golpes (744,82 lb + 33,43) el valor más alejado de la media es 710,2 lb con un error de 4,87%, para 35 golpes (810,23 + 24,02) el

valor más alejado de la media es 779,1 lb con un error de 4%, para 45 golpes(1100,46 lb \pm 29,70) el valor más alejado de la media es 1067,7 lb con un error de 3,07%, para 55 golpes(1251,10 lb \pm 31,34) el valor más alejado de la media es 1284,6 lb con un error de 2,61%, para 65 golpes (1553,25 lb \pm 52) el valor más alejado de la media es 1494,8 lb con un error de 3,91%, para 75 golpes (1984,19 lb \pm 39,05) el valor más alejado de la media es 1940,8 lb con un error de 2,24% para 85 golpes (2016,82 \pm 41,22) el valor más alejado de la media es 2061,7 lb con un error de 2,17%, para 100 golpes (2025,90 lb \pm 46,97) el valor más alejado de la media es 1978,1 lb con un error de 2,42%.

En la siguiente figura se puede observar los resultados de Estabilidad (lb), obtenidos en las diferentes briquetas elaboradas con 25, 35, 45, 55, 75, 85 y 100 golpes, que fueron colocadas en el horno a 70°C por un tiempo de 5 horas, para acelerar su proceso de oxidación y envejecimiento de las briquetas.

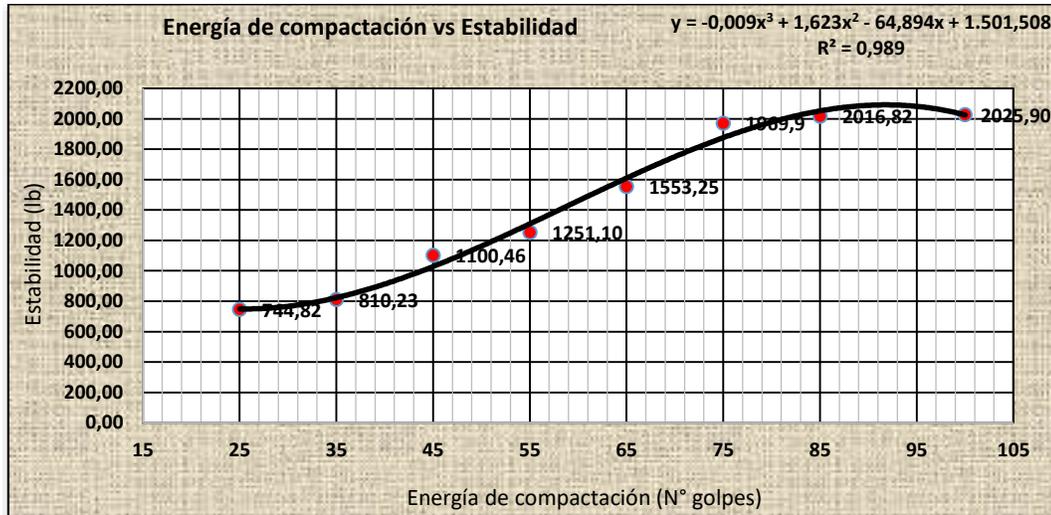
Figura 3.38: Resultados de Estabilidad en briquetas sometidas a 70°C por un tiempo de 5 horas



Fuente: Elaboración Propia

3.6.1.2.- Análisis de resultados del efecto en la durabilidad de briquetas producidas con diferentes niveles de energía de compactación y sometidas a una temperatura de 70°C por un tiempo de 5 horas

Figura 3.39: Curva de Estabilidad vs Energía de compactación

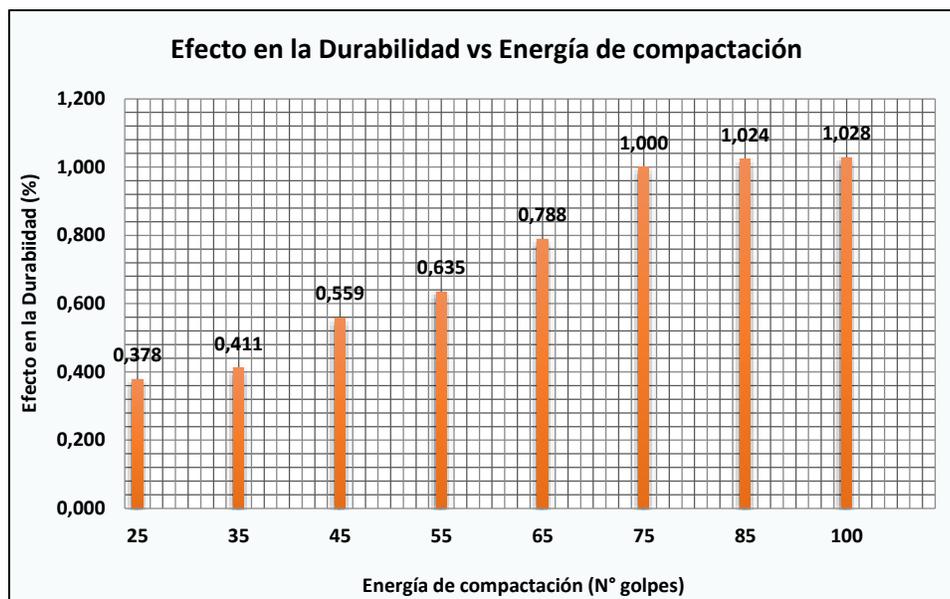


Fuente: Elaboración Propia

La gráfica de energía de compactación y Estabilidad demuestra la relación directa que existe entre la energía de compactación y la estabilidad a mayor energía de compactación mayor será la estabilidad. Pero se puede observar que existe una disminución en los valores de estabilidad para los diferentes números de golpes en relación con los valores de estabilidad obtenidos por el proceso convencional. Esto debido a que las briquetas estuvieron en el horno por un tiempo de 5 horas y a una temperatura de 70°C, este proceso de calentamiento hizo que las briquetas tengan una oxidación por calor lo que produjo que las briquetas pierdan sus valores de estabilidad inicial.

Los valores de estabilidad para la máxima energía de compactación a 100 golpes y la mínima energía de compactación de 25 golpes varían en 1281,08 lb es decir hay una pérdida del 63,24% en la estabilidad para la máxima y mínima energía de compactación.

Figura 3.40: Efecto en la durabilidad vs Energía de compactación



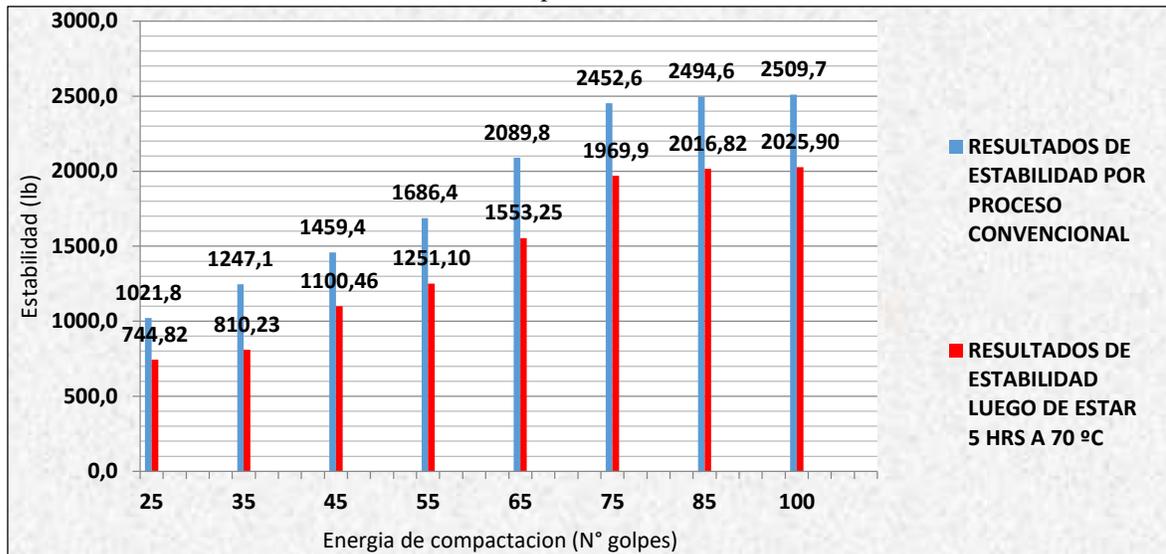
Fuente: Elaboración Propia

La durabilidad es una propiedad que establece la duración de la mezcla asfáltica a través de su vida útil soportando la carga de servicio, al no disponer de equipos calibrados para la durabilidad de una mezcla asfáltica en el laboratorio, es posible relacionar el comportamiento a través de la relación de estabilidades entre sí cuya variabilidad muestra una tendencia de la mezcla a través del tiempo. Una mezcla elaborada en laboratorio para un diseño óptimo con 75 golpes para tráfico pesado se espera que la estabilidad producida para ese número de golpes sea el máximo y que con el paso del tiempo ese valor irá disminuyendo. En la gráfica elaborada se puede apreciar que los valores de Estabilidad disminuyen para energías de compactación menores de los 75 golpes, Observándose que para una energía de compactación de 55 golpes se produce una disminución del 36,49 % del efecto en la durabilidad, para 35 golpes hay una disminución del 58,87% del efecto en la durabilidad de la mezcla asfáltica.

Cuando la energía de compactación aplicada es mínima de 25 golpes hay una disminución del 62,19 % del efecto en la durabilidad y cuando el número de golpes es de 100 se produce un aumento del 2,84% del efecto en la durabilidad.

La durabilidad de las briquetas también se ve afectada por la pérdida de densidad y consecuentemente el aumento en el porcentaje de vacíos, debido a que cuando se aplicaron los 25 golpes se obtuvo una densidad de 2,277 gr/cm³, que está muy por debajo de la densidad obtenida en 75 golpes 2,369 gr/cm³ el porcentaje de vacíos total en la mezcla subió a 7,69%, mientras mayor es el porcentaje de vacíos en la mezcla mayor será el espacio disponible para la intrusión de aire y agua en las mezclas asfálticas que afectara en la durabilidad de las mezclas.

Figura 3.41: Resultados de Estabilidad por proceso convencional y Estabilidad de briquetas a 70 °C por un tiempo de 5 horas



Fuente: Elaboración Propia

En la gráfica se puede apreciar todos los valores de Estabilidad que fueron determinados con las briquetas por proceso convencional a diferentes energías de compactación, y los valores de Estabilidad de las briquetas que fueron colocadas al horno por 5 horas a una temperatura de 70 °C. Observándose que en 100 golpes la pérdida de estabilidad fue de 483,9 lb igual a 19,3%, en 85 golpes se produjo una pérdida de 477,7 lb que representa el 19,2%, en 75 golpes la pérdida de estabilidad es de 482,7 lb que es un 19,7%, para los 65 golpes con un valor de pérdida de 536,6 lb igual a 25,7%, en 55 golpes la pérdida de estabilidad fue de

435,3 lb que es un 25,8%, en 45 golpes la pérdida en la estabilidad fue de 358,9 lb igual a 24,6%, en los 35 golpes la pérdida de estabilidad fue de 436,8 lb que representa un 35%, y en 25 golpes la estabilidad perdió un valor de 277 lb igual a 27,1%. El promedio de reducción en los valores de estabilidad es de 24,5%.

Figura 3.42: Estabilidad vs Efecto en la durabilidad



Fuente: Elaboración Propia

El gráfico anterior nos permite visualizar la relación efectiva entre la Estabilidad y el Efecto de la Durabilidad, basados teóricamente en que al efecto de durabilidad del 100% le corresponde una estabilidad de 1969,9 lb a partir de ella a medida que se tienen menores estabilidad en la mezcla se produce un mayor efecto en la durabilidad haciendo que esta tenga menores porcentajes para menor estabilidad de la mezcla, se puede apreciar que si la energía de compactación aplicada es igual a 25 golpes se obtiene una estabilidad de 744,82 libras y produce el máximo efecto en la durabilidad con una disminución igual a 62,19%, mientras que para el otro extremo de la energía de compactación producida por la aplicación de 100 golpes aumenta la estabilidad a 2025,90 libras lo que muestra un mejoramiento de la mezcla para resistir las cargas aumentando el efecto en la durabilidad en un 2,84% relacionado con la producida por 75 golpes como está establecido en la normativa.

3.6.2.- Resultados de estabilidad en briquetas sometidas a una temperatura de 75 °C por un tiempo de 5 horas

Tabla 3.25: Resultados de las briquetas colocadas en el horno por un tiempo de 5 horas a una temperatura de 75 °C

N° de probeta		altura de probeta	% C.A.	N° Golpes	Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacios			Estabilidad Marshall																													
					seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua		probeta	densidad real	densidad promedio	densidad maxima teorica	% de vacios mezcla total	V.A.M.(vacios agregado mineral)	R.B.V. (relacion betumen vacios)	lectura del dial	Real	Factor de corrección (Alt)	Estabilidad corregida	Corregida																								
						grs.	grs.	grs.	cc	grs/cm ³	grs/cm ³	grs/cm ³	%	%	%	mm	libras	-	-	libras																								
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="text-align: center;">  <p>UNIVERSIDAD AUTONOMA JUAN MISAEL SARACHO FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFIA Y VIAS DE COMUNICACIÓN CARRERA DE INGENIERIA CIVIL (TARIJA-BOLIVIA) DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE METODO MARSHALL PROYECTO: INVESTIGACIÓN : "INFLUENCIA DE LOS NIVELES DE ENERGÍA DE COMPACTACIÓN EN LA ESTABILIDAD Y DURABILIDAD DE LAS MEZCLAS ASFALTICAS"</p> </div> <div style="text-align: right;"> <p>CEMENTO ASFALTICO 85-100</p> <p>FECHA: 26 de ABRIL 2017</p> <p>AGREGADOS CHARAJA</p> <p>LABORATORISTA: VALDEZ ARENAS FERNANDO</p> </div> </div>																																												
<table border="1"> <thead> <tr> <th>pesos especificos</th> <th colspan="2">% de agregado</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Mat. Retenido Tamiz N° 4</td> <td>2,69</td> <td>55</td> </tr> <tr> <td>Mat. Pasa Tamiz N° 4</td> <td>2,75</td> <td>45</td> </tr> <tr> <td>peso especifico total</td> <td>2,717</td> <td>100</td> </tr> </tbody> </table>					pesos especificos	% de agregado		Mat. Retenido Tamiz N° 4	2,69	55	Mat. Pasa Tamiz N° 4	2,75	45	peso especifico total	2,717	100	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">BETÚN</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CEMENTO ASFALTICO 85-100</td> <td></td> </tr> <tr> <td>PESO ESPECIFICO TOTAL AASHTO T-228</td> <td>1,009</td> </tr> </tbody> </table>					BETÚN		CEMENTO ASFALTICO 85-100		PESO ESPECIFICO TOTAL AASHTO T-228	1,009	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">AGREGADO</th> <th>%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Grava</td> <td>2,70</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>Gravilla</td> <td>2,68</td> <td>25</td> </tr> <tr> <td>Arena</td> <td>2,75</td> <td>45</td> </tr> </tbody> </table>					AGREGADO		%	Grava	2,70	30	Gravilla	2,68	25	Arena	2,75	45
pesos especificos	% de agregado																																											
Mat. Retenido Tamiz N° 4	2,69	55																																										
Mat. Pasa Tamiz N° 4	2,75	45																																										
peso especifico total	2,717	100																																										
BETÚN																																												
CEMENTO ASFALTICO 85-100																																												
PESO ESPECIFICO TOTAL AASHTO T-228	1,009																																											
AGREGADO		%																																										
Grava	2,70	30																																										
Gravilla	2,68	25																																										
Arena	2,75	45																																										
1	6,73	5,98	25	1186,4	1187,2	668,4	518,8	2,287	2,276	2,467	7,72	21,21	63,60	333	734,1	0,915	671,7	641,17																										
2	6,69			1174,3	1176,2	657,1	519,1	2,262						315	694,4	0,925	642,4																											
3	6,79			1178,8	1179,6	664,1	515,5	2,287						250	551,2	0,900	496,0																											
4	6,80			1164,4	1165,7	652,8	512,9	2,270						308	679	0,898	609,4																											
1	6,71	5,98	35	1171,4	1172,7	656,8	515,9	2,271	2,279	2,467	7,62	21,12	63,94	380	837,7	0,920	770,7	729,26																										
2	6,79			1165,4	1166,2	648,2	518,0	2,250						355	782,6	0,900	704,4																											
3	6,60			1184,6	1185,5	670,1	515,4	2,298						364	802,5	0,943	756,9																											
4	6,49			1165,5	1166,7	659,4	507,3	2,297						335	738,5	0,965	712,7																											
1	6,62	5,98	45	1190,7	1191,8	675,1	516,7	2,304	2,297	2,467	6,91	20,52	66,34	453	998,7	0,939	938,2	922,01																										
2	6,57			1162,6	1163,9	650,3	513,6	2,264						425	937	0,949	889,0																											
3	6,71			1179,7	1180,4	665,2	515,2	2,290						445	981	0,920	902,6																											
4	6,59			1167,6	1168,7	667,3	501,4	2,329						460	1014	0,945	958,3																											
1	6,64	5,98	55	1173,2	1174,8	668,1	506,7	2,315	2,331	2,467	5,50	19,32	71,53	570	1257	0,936	1175,8	1128,50																										
2	6,47			1178,6	1179,4	680,1	499,3	2,361						511	1127	0,970	1092,8																											
3	6,68			1161,4	1162,9	674,2	488,7	2,377						560	1235	0,928	1145,1																											
4	6,72			1189,2	1190,4	667,2	523,2	2,273						544	1199	0,918	1100,4																											
1	6,64	5,98	65	1191,4	1192,7	685,4	507,3	2,349	2,358	2,467	4,41	18,39	76,00	708	1561	0,936	1460,5	1405,08																										
2	6,52			1168,2	1169,4	665,3	504,1	2,317						680	1499	0,958	1436,3																											
3	6,60			1198,8	1199,7	697,2	502,5	2,386						642	1415	0,943	1335,0																											
4	6,48			1180,4	1181,5	685,7	495,8	2,381						651	1435	0,968	1388,6																											
1	6,53	5,98	75	1194,2	1195,7	687,2	508,5	2,348	2,361	2,467	4,28	18,27	76,59	836	1843	0,956	1762,5	1706,35																										
2	6,48			1177,2	1178,7	682,2	496,5	2,371						782	1724	0,968	1668,0																											
3	6,49			1198,9	1199,9	698,0	501,9	2,389						817	1801	0,965	1738,1																											
4	6,62			1174,9	1175,3	672,7	502,6	2,338						800	1764	0,939	1656,8																											
1	6,45	5,98	85	1190,4	1191,7	686,4	505,3	2,356	2,367	2,467	4,06	18,08	77,57	798	1759	0,975	1715,3	1732,32																										
2	6,47			1181,7	1182,5	670,2	512,3	2,307						785	1731	0,970	1678,7																											
3	6,55			1213,4	1214,3	693,4	520,9	2,329						839	1850	0,953	1761,8																											
4	6,63			1203,2	1204,7	718,7	486,0	2,476						858	1892	0,938	1773,5																											
1	6,40	5,98	100	1215,0	1216,4	708,4	508,0	2,392	2,368	2,467	4,00	18,04	77,82	787	1735	0,988	1713,3	1759,41																										
2	6,51			1194,3	1195,4	682,1	513,3	2,327						821	1810	0,960	1737,6																											
3	6,62			1187,6	1188,3	688,3	500,0	2,375						869	1916	0,939	1799,7																											
4	6,49			1192,4	1193,5	692,4	501,1	2,380						840	1852	0,965	1787,0																											

Fuente: Elaboración Propia

3.6.2.1.-Tratamiento estadístico y análisis de error de los resultados de estabilidad de briquetas sometidas a 75°C por un tiempo de 5 horas

Tabla 3.26: tratamiento estadístico de los resultados de estabilidad en briquetas sometidas a 75°C por un tiempo de 5 horas

N de golpes	ESTABILIDAD lb (x)	N DATOS	MEDIA (x)	DESVIACION EST.	MEDIANA	coef. Variacion (%)	ERROR EN LA MEDICIÓN		
							ERROR ABSOLUTO	ERROR RELATIVO	ERROR PORCENTUAL
25	671,7	3	641,17	31,17	642,37	4,86	30,559	0,0455	4,549
	642,4						1,194	0,0019	0,186
	496,0						-	-	-
	609,4						31,75	0,0521	5,210
	770,7						34,56	0,0448	4,484
35	704,4	4	736,17	32,59	734,79	4,43	31,80	0,0451	4,515
	756,9						20,72	0,0274	2,738
	712,7						23,48	0,0329	3,294
	938,2						16,15	0,0172	1,722
	889,0						33,03	0,0372	3,715
45	902,6	4	922,01	31,88	920,36	3,46	19,45	0,0215	2,155
	958,3						36,33	0,0379	3,791
	1175,8						47,32	0,0402	4,024
	1092,8						35,75	0,0327	3,271
	1145,1						16,57	0,0145	1,447
55	1100,4	4	1128,50	39,09	1122,71	3,46	28,14	0,0256	2,557
	1460,5						55,41	0,0379	3,794
	1436,3						31,23	0,0217	2,175
	1335,0						70,12	0,0525	5,253
	1388,6						16,53	0,0119	1,190
65	1762,5	4	1405,08	55,49	1412,43	3,95	56,16	0,0319	3,186
	1668,0						38,38	0,0230	2,301
	1738,1						31,77	0,0183	1,828
	1656,8						49,55	0,0299	2,990
	1715,3						17,04	0,0099	0,993
75	1678,7	4	1706,35	51,93	1703,04	3,04	53,63	0,0319	3,195
	1761,8						29,48	0,0167	1,673
	1773,5						41,19	0,0232	2,323
	1713,3						46,08	0,0269	2,690
	1737,6						21,84	0,0126	1,257
85	1799,7	4	1759,41	40,77	1762,31	2,32	40,29	0,0224	2,238
	1787,0						27,63	0,0155	1,546

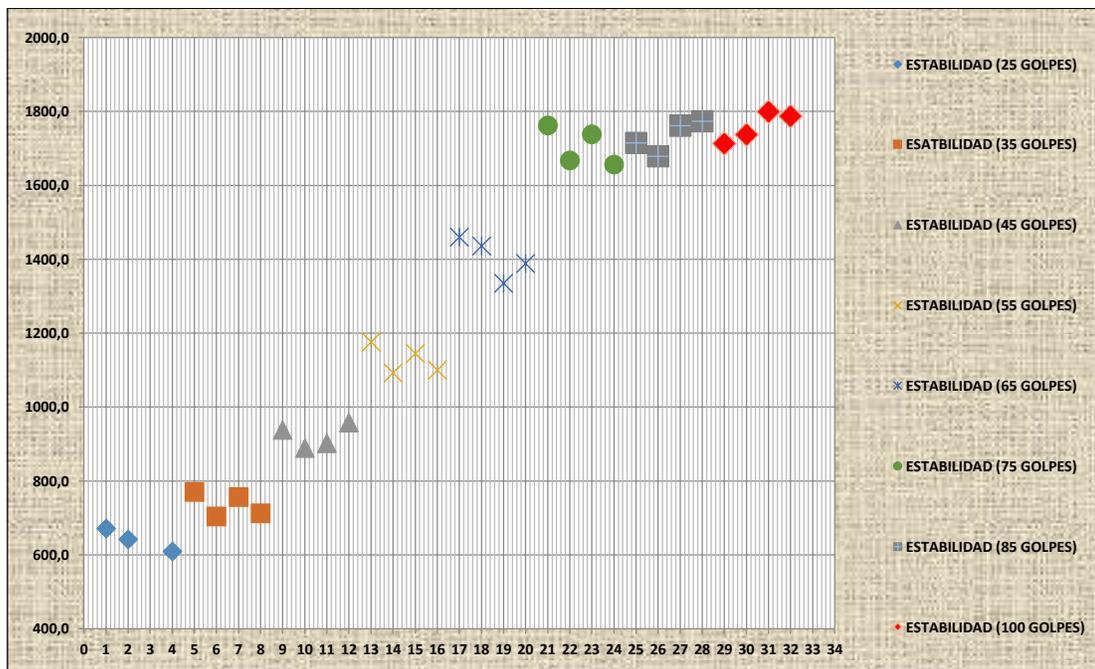
Fuente: Elaboración Propia

En la tabla se realizó el cálculo estadístico de los datos donde también se determinó los errores en la medición de los datos determinándose que los valores de Estabilidad para los diferentes números de golpes, su media y su desviación son: para 25 golpes (641,17lb \pm 31,17) el valor más alejado de la media es 609,4 lb con un error de 5,21%, para 35 golpes (736,17 lb \pm 32,59)

el valor más alejado de la media es 704,4 lb con un error de 4,52%, para 45 golpes (922,01 lb \pm 31,88) el valor más alejado de la media es 958,3 lb con un error de 3,79%, para 55 golpes (1128,50 lb \pm 39,09) el valor más alejado de la media es 1175,8 lb con un error de 4,02%, para 65 golpes (1405,08 lb \pm 55,49) el valor más alejado de la media es 1335 lb con un error de 5,25%, para 75 golpes (1706,35 lb \pm 51,93) el valor más alejado de la media es 1762,5 lb con un error de 3,19%, para 85 golpes (1732,32 lb \pm 43,71) el valor más alejado de la media es 1678,7 lb con un error de 3,19% para 100 golpes (1759,41 lb \pm 40,77) el valor más alejado de la media es 1713,3 lb con un error de 2,69%.

En la siguiente figura se puede observar los resultados de Estabilidad (lb), obtenidos en las diferentes briquetas elaboradas con 25, 35, 45, 55, 75, 85 y 100 golpes, que fueron colocadas en el horno a 75°C por un tiempo de 5 horas, para acelerar su proceso de oxidación y envejecimiento de las briquetas.

Figura 3.43: Resultados de Estabilidad en briquetas sometidas a 75°C por un tiempo de 5 horas



Fuente: Elaboración Propia

3.6.2.2.- Análisis de resultados del efecto en la durabilidad de briquetas producidas con diferentes niveles de energía de compactación y sometidas a una temperatura de 75°C por un tiempo de 5 horas

Figura 3.44: Curva de Estabilidad vs Energía de compactación

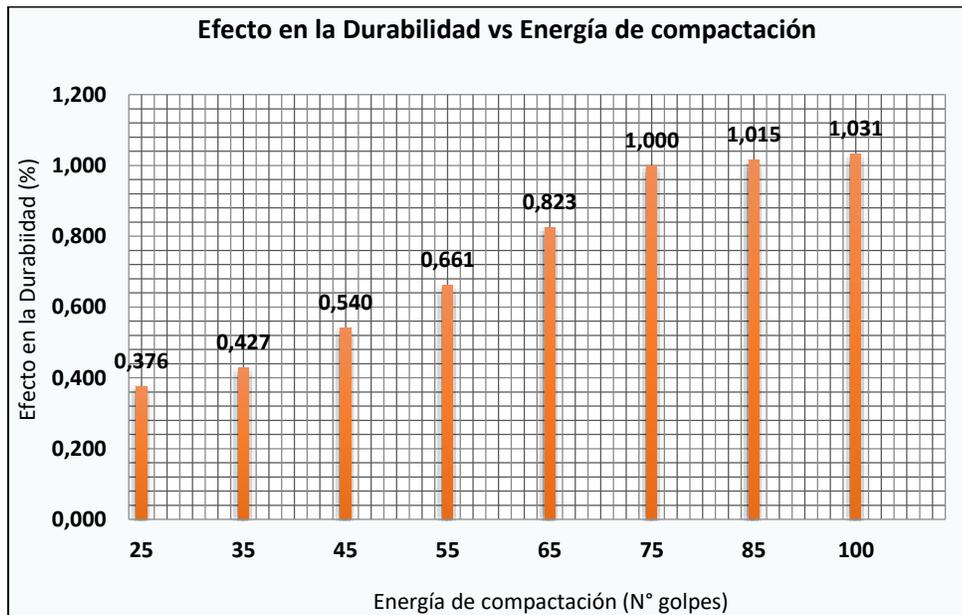


Fuente: Elaboración Propia

La gráfica de energía de compactación y Estabilidad, se puede observar que existe una disminución en los valores de estabilidad para los diferentes números de golpes en relación con los valores de estabilidad obtenidos por el proceso convencional. Esto debido a que las briquetas estuvieron en el horno por un tiempo de 5 horas y a una temperatura de 75°C, este proceso de calentamiento hizo que las briquetas tengan una oxidación por calor lo que produjo que las briquetas pierdan sus valores de estabilidad inicial.

Los valores de estabilidad para la máxima energía de compactación a 100 golpes y la mínima energía de compactación de 25 golpes varían en 118,24 lb es decir hay una pérdida del 63,56% en la estabilidad para la máxima y mínima energía de compactación.

Figura 3.45: Efecto en la durabilidad vs Energía de compactación



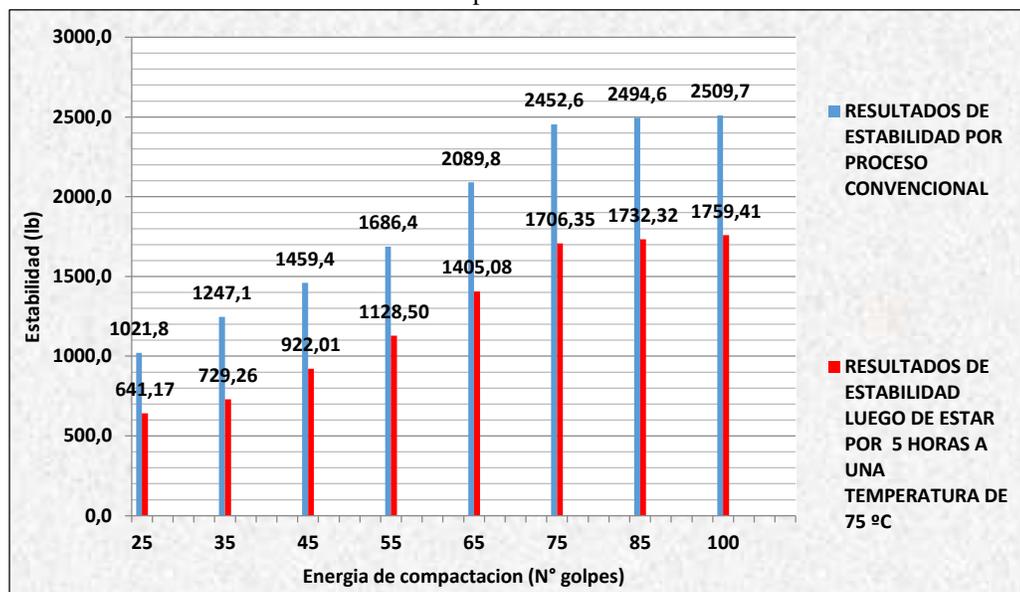
Fuente: Elaboración Propia

La durabilidad es una propiedad que establece la duración de la mezcla asfáltica a través de su vida útil soportando la carga de servicio, al no disponer de equipos calibrados para la durabilidad de una mezcla asfáltica en el laboratorio, es posible relacionar el comportamiento a través de la relación de estabilidades entre sí. Una mezcla elaborada en laboratorio para un diseño óptimo con 75 golpes para tráfico pesado se espera que la estabilidad producida para ese número de golpes sea el máximo y que con el paso del tiempo ese valor irá disminuyendo. En la gráfica elaborada se puede apreciar que los valores de Estabilidad disminuyen para energías de compactación menores de los 75 golpes, Observándose que para una energía de compactación de 55 golpes se produce una disminución del 33,86 % del efecto en la durabilidad, para 35 golpes hay una disminución del 57,26% del efecto en la durabilidad de la mezcla asfáltica.

Cuando la energía de compactación aplicada es mínima de 25 golpes hay una disminución del 62,42 % del efecto en la durabilidad y cuando el número de golpes es de 100 se produce un aumento del 3,11 % del efecto en la durabilidad.

La durabilidad de las briquetas también se ve afectada por la pérdida de densidad y consecuentemente el aumento en el porcentaje de vacíos, debido a que cuando se aplicaron los 25 golpes se obtuvo una densidad de 2,276 gr/cm³, que está muy por debajo de la densidad obtenida para 75 golpes que fue de 2,361 gr/cm³ el porcentaje de vacíos total en la mezcla subió a 7,72%, mientras mayor es el porcentaje de vacíos en la mezcla mayor será el espacio disponible para la intrusión de aire y agua en las mezclas asfálticas que afectará en la durabilidad de las mezclas.

Figura 3.46: Resultados de Estabilidad por proceso convencional y Estabilidad de briquetas a 75 °C por un tiempo de 5 horas

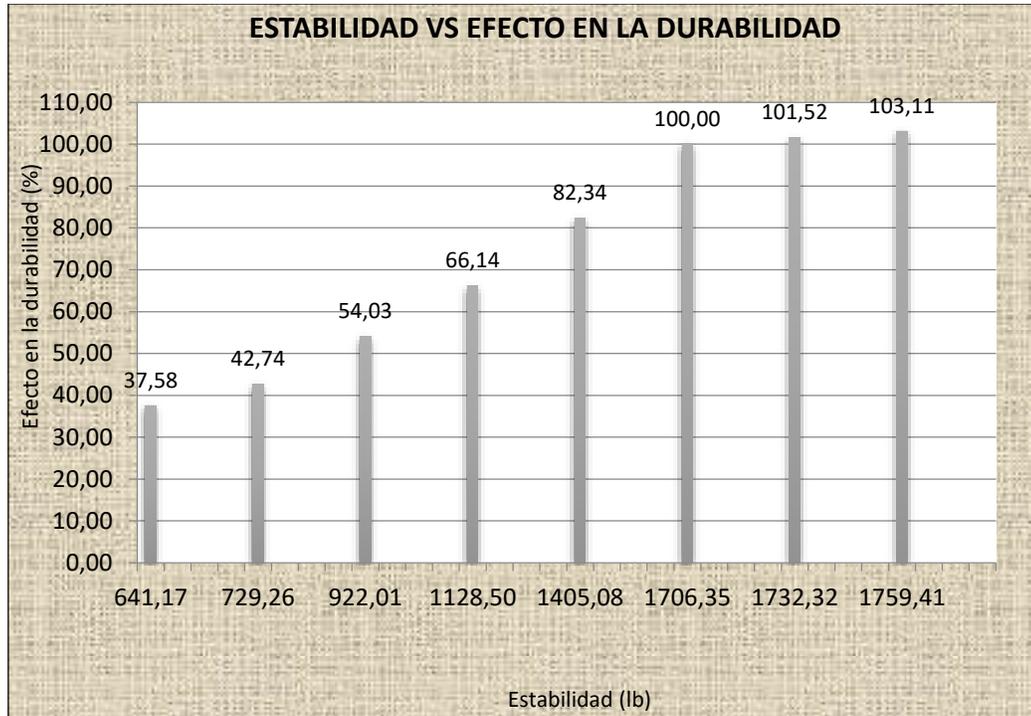


Fuente: Elaboración Propia

En la gráfica se puede apreciar los valores de Estabilidad que fueron determinados con las briquetas por proceso convencional a diferentes energías de compactación, y los valores de Estabilidad de las briquetas que fueron colocadas al horno por 5 horas a una temperatura de 75 °C. Observándose que en 100 golpes la pérdida de estabilidad fue de 750,3 lb igual a 29,9%, en 85 golpes se produjo una pérdida de 762,2 lb que representa el 30,6%, en 75 golpes la pérdida de estabilidad es de 746,2 lb que es un 30,4%, para los 65 golpes con un valor de pérdida de 684,7 lb igual a 32,8%, en 55 golpes la pérdida de estabilidad fue de 557,9 lb que es un 33,1%, en 45 golpes la pérdida en la estabilidad fue de 537,4 lb igual a 36,8%, en los 35 golpes la pérdida de estabilidad fue de 517,8 lb que representa un 41,5%, y

en 25 golpes la estabilidad perdió un valor de 380,6 lb igual a 37,3%. El promedio de reducción en los valores de estabilidad es de 34%.

Figura 3.47: Estabilidad vs Efecto en la durabilidad



Fuente: Elaboración Propia

El gráfico anterior nos permite visualizar la relación efectiva entre la Estabilidad y el Efecto de la Durabilidad, basados teóricamente en que al efecto de durabilidad del 100% le corresponde una estabilidad de 1706,35 a partir de ella a medida que se tienen menores estabilidad en la mezcla se produce un mayor efecto en la durabilidad haciendo que esta tenga menores porcentajes para menor estabilidad de la mezcla, se puede apreciar que si la energía de compactación aplicada es igual a 25 golpes se obtiene una estabilidad de 641,17 libras y produce el máximo efecto en la durabilidad con una disminución igual a 62,42%, mientras que para el otro extremo de la energía de compactación producida por la aplicación de 100 golpes aumenta la estabilidad a 1759,41 libras lo que muestra un mejoramiento de la mezcla para resistir las cargas aumentando el efecto en la durabilidad en un 3,11% relacionado con la producida por 75 golpes como está establecido en la normativa.

3.6.3.- Resultados de estabilidad en briquetas sometidas a una temperatura de 80 °C por un tiempo de 5 horas

Tabla 3.27: Resultados de las briquetas colocadas en el horno por un tiempo de 5 horas a una temperatura de 80 °C

		UNIVERSIDAD AUTONOMA JUAN MISAEL SARACHO FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFIA Y VIAS DE COMUNICACIÓN CARRERA DE INGENIERIA CIVIL (TARJIA-BOLIVIA) DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE METODO MARSHALL PROYECTO: INVESTIGACIÓN: "INFLUENCIA DE LOS NIVELES DE ENERGÍA DE COMPACTACIÓN EN LA ESTABILIDAD Y DURABILIDAD DE LAS MEZCLAS ASFALTICAS"										FECHA: 26 de ABRIL 2017						
		CEMENTO ASFÁLTICO 85-100					AGREGADOS CHARAJA					LABORATORISTA: VALDEZ ARENAS FERNANDO						
pesos específicos		% de agregado		BETÚN				AGREGADO		%								
Mat. Retenido Tamiz N° 4		2,69	55	CEMENTO ASFALTICO 85-100				Grava		2,70	30							
Mat. Pasa Tamiz N° 4		2,75	45	PESO ESPECIFICO TOTAL				Gravilla		2,68	25							
peso específico total		2,717	100	1,009				Arena		2,75	45							
N° de probeta	altura de probeta	% C.A.	N° Golpes	Peso Briqueta			olumen	Densidad Briqueta		% de Vacios			Estabilidad Marshall					
				seco	sat. Sup. Secca	sumergida en agua	probeta	densidad real	densidad promedio	densidad maxima teorica	% de vacios mezcla total	V.A.M.(vacios agregado mineral)	R.B.V. (relacion betumen vacios)	lectura del dial	Real	Factor de corrección (Altura)	Estabilidad corregida	Corregida
				grs.	grs.	grs.	cc	grs/cm ³	grs/cm ³	grs/cm ³	%	%	%	mm	libras	-	-	libras
1	6,80	5,98	25	1180,2	1181,6	659,4	522,2	2,260	2,241	2,467	9,16	22,44	59,18	277	610,674	0,898	548,1	566,62
2	6,75			1179,4	1180,6	645,9	534,7	2,206						190	418,874	0,910	381,2	
3	6,69			1166,3	1167,7	656,1	511,6	2,280						285	628,311	0,925	581,2	
4	6,82			1188,7	1189,2	653,4	535,8	2,219						290	639,334	0,893	570,6	
1	6,72	5,98	35	1175,9	1172,4	657,8	514,6	2,285	2,274	2,467	7,83	21,31	63,25	348	767,201	0,918	703,9	687,29
2	6,80			1176,5	1178,1	660,4	517,7	2,273						331	729,723	0,898	654,9	
3	6,80			1178,4	1180,9	662,4	518,5	2,273						362	798,065	0,898	716,3	
4	6,55			1175,8	1178,3	659,2	519,1	2,265						321	707,677	0,953	674,1	
1	6,59	5,98	45	1189,6	1191,4	680,1	511,3	2,327	2,294	2,467	7,03	20,62	65,92	305	672,403	0,945	635,4	819,54
2	6,75			1175,4	1177,3	660,4	516,9	2,274						410	903,886	0,910	822,5	
3	6,59			1182,6	1184,2	665,3	518,9	2,279						378	833,339	0,945	787,5	
4	6,68			1188,5	1190,3	672,4	517,9	2,295						415	914,909	0,928	848,6	
1	6,70	5,98	55	1185,1	1186,4	675,9	510,5	2,321	2,328	2,467	5,65	19,44	70,96	495	1091,28	0,923	1006,7	1039,35
2	6,48			1179,9	1180,7	681,4	499,3	2,363						480	1058,21	0,968	1023,8	
3	6,56			1190,4	1191,2	679,2	512,0	2,325						505	1113,32	0,951	1058,4	
4	6,78			1158,9	1159,6	656,0	503,6	2,301						537	1183,87	0,903	1068,4	
1	6,68	5,98	65	1187,3	1188,2	686,7	501,5	2,367	2,350	2,467	4,74	18,67	74,60	637	1404,33	0,928	1302,5	1268,22
2	6,49			1155,9	1157,0	625,3	531,7	2,174						580	1278,67	0,965	1233,9	
3	6,54			1172,1	1173,9	691,0	482,9	2,427						611	1347,01	0,954	1285,6	
4	6,57			1169,7	1170,3	689,2	481,1	2,431						598	1318,35	0,949	1250,9	
1	6,52	5,98	75	1190,4	1191,7	684,2	507,5	2,346	2,359	2,467	4,39	18,37	76,09	660	1455,04	0,958	1394,1	1444,17
2	6,68			1165,6	1166,6	678,4	488,2	2,388						718	1582,9	0,928	1468,1	
3	6,55			1184,3	1185,9	695,2	490,7	2,413						678	1494,72	0,953	1423,7	
4	6,43			1190,8	1191,5	671,0	520,5	2,288						690	1521,17	0,980	1490,8	
1	6,49	5,98	85	1195,6	1196,3	686,7	509,6	2,346	2,360	2,467	4,35	18,34	76,26	690	1521,17	0,965	1467,9	1466,61
2	6,57			1201,0	1202,7	690,0	512,7	2,343						732	1613,77	0,949	1531,1	
3	6,44			1184,0	1185,4	690,7	494,7	2,393						650	1432,99	0,978	1400,7	
4	6,69			1186,0	1187,5	684,2	503,3	2,356						740	1631,4	0,925	1509,049	
1	6,45	5,98	100	1201,7	1202,4	701,4	501,0	2,399	2,362	2,467	4,26	18,26	76,66	710	1565,27	0,975	1526,1	1495,98
2	6,43			1184,3	1185,7	679,2	506,5	2,338						670	1477,08	0,980	1447,5	
3	6,57			1190,4	1191,3	684,2	507,1	2,347						701	1545,42	0,949	1466,3	
4	6,61			1195,7	1196,5	690,5	506,0	2,363						744	1640,22	0,941	1543,9	

Fuente: Elaboración Propia

3.6.3.1.-Tratamiento estadístico y análisis de error de los resultados de estabilidad de briquetas sometidas a 80°C por un tiempo de 5 horas

Tabla 3.28: tratamiento estadístico de los resultados de estabilidad en briquetas sometidas a 80°C por un tiempo de 5 horas

N de golpes	ESTABILIDAD lb (X)	N DATOS	MEDIA (x)	DESVIACION EST.	MEDIANA	coef. Variacion (%)	ERROR EN LA MEDICIÓN		
							ERROR ABSOLUTO	ERROR RELATIVO	ERROR PORCENTUAL
25	548,1	3	566,62	16,91	570,61	2,98	18,544	0,034	3,384
	381,2						-	-	
	581,2						14,563	0,025	2,506
	570,6						3,981	0,007	0,698
35	703,9	4	687,29	27,92	688,98	4,06	16,617	0,024	2,361
	654,9						32,364	0,049	4,942
	716,3						28,974	0,040	4,045
	674,1						13,228	0,020	1,962
45	635,4	3	819,54	30,65	822,54	3,74	-	-	-
	822,5						2,996	0,004	0,364
	787,5						32,035	0,041	4,068
	848,6						29,038	0,034	3,422
55	1006,7	4	1039,35	28,97	1041,13	2,79	32,647	0,032	3,243
	1023,8						15,533	0,015	1,517
	1058,4						19,087	0,018	1,803
	1068,4						29,093	0,027	2,723
65	1302,5	4	1268,22	31,39	1268,22	2,48	34,299	0,026	2,633
	1233,9						34,303	0,028	2,780
	1285,6						17,370	0,014	1,351
	1250,9						17,366	0,014	1,388
75	1394,1	4	1444,17	43,48	1445,93	3,01	50,101	0,036	3,594
	1468,1						23,972	0,016	1,633
	1423,7						20,451	0,014	1,436
	1490,8						46,580	0,031	3,125
85	1467,9	4	1466,61	65,21	1467,93	4,45	1,325	0,001	0,090
	1531,1						64,535	0,042	4,215
	1400,7						65,860	0,047	4,702
	1509,0						42,441	0,028	2,812
100	1526,1	4	1495,98	46,32	1496,22	3,10	30,156	0,020	1,976
	1447,5						48,438	0,033	3,346
	1466,3						29,680	0,020	2,024
	1543,9						47,963	0,031	3,107

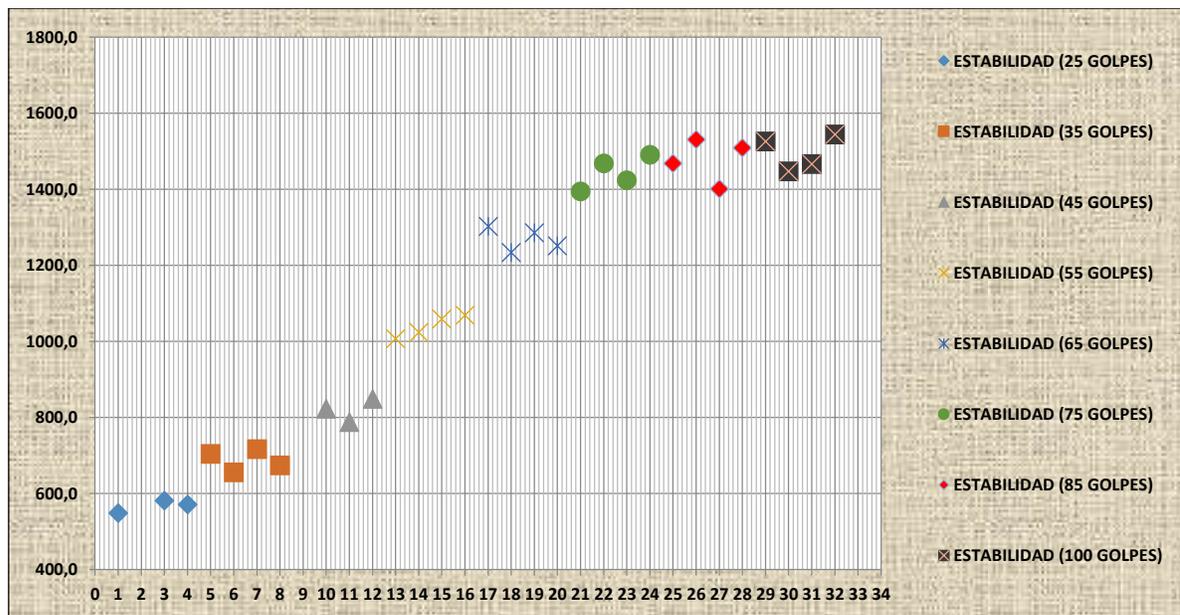
Fuente: Elaboración Propia

En la tabla se realizó el cálculo estadístico de los datos donde también se determinó los errores en la medición de los datos, determinándose que los valores de Estabilidad para los diferentes números de golpes aplicados a las briquetas su media y su desviación son: para 25 golpes (566,62 lb \pm 16,91) el valor más alejado de la media es 548,1 lb con un error de 3,38%, para 35

golpes (687,92 lb \pm 27,92) el valor más alejado de la media es 654,9 lb con un error de 4,94%, para 45 golpes (819,54 lb \pm 30,65) el valor más alejado de la media es 787,5 lb con un error de 4,07%, para 55 golpes (1039,35 lb \pm 28,97) el valor más alejado de la media es 1006,7 lb con un error de 3,24%, para 65 golpes (1268,22 lb \pm 31,39) el valor más alejado de la media es 1233,9 lb con un error de 2,78%, para 75 golpes (1444,17 lb \pm 43,48) el valor más alejado de la media es 1394,1 lb con un error de 3,59%, para 85 golpes (1466,61 lb \pm 65,21) el valor más alejado de la media es 1400,7 lb con un error de 4,70%, para 100 golpes (1495,98 lb \pm 46,32) el valor más alejado de la media es 1447,5 lb con un error de 3,35%.

En la siguiente figura se puede observar los resultados de Estabilidad (lb), obtenidos en las diferentes briquetas elaboradas con 25, 35, 45, 55, 75, 85 y 100 golpes, que fueron colocadas en el horno a 80°C por un tiempo de 5 horas, para acelerar su proceso de oxidación y envejecimiento de las briquetas.

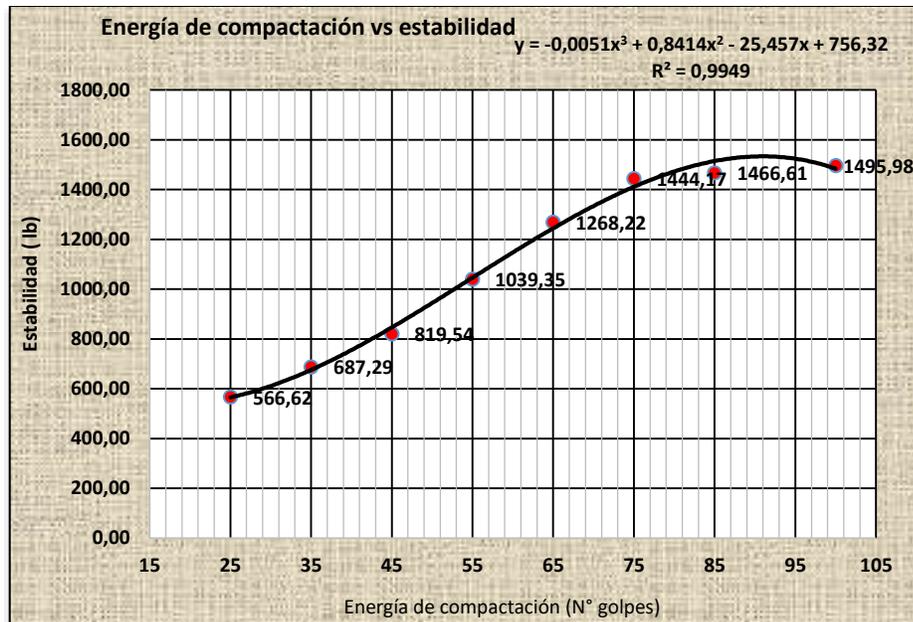
Figura 3.48: Resultados de Estabilidad en briquetas sometidas a 80°C por un tiempo de 5 horas



Fuente: Elaboración Propia

3.6.3.2.- Análisis de resultados del efecto en la durabilidad de briquetas producidas con diferentes niveles de energía de compactación y sometidas a una temperatura de 80°C por un tiempo de 5 horas

Figura 3.49: Curva de Estabilidad vs Energía de compactación



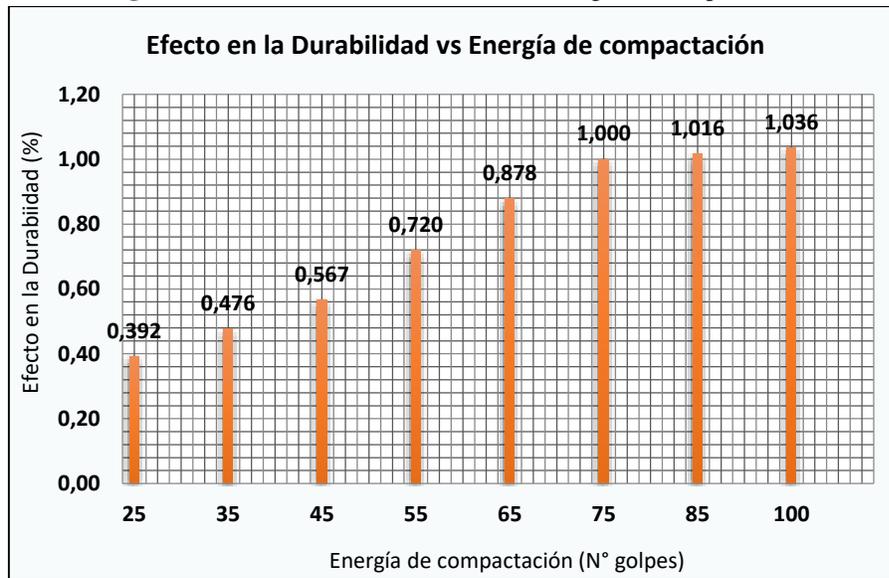
Fuente: Elaboración Propia

En la gráfica de energía de compactación versus Estabilidad, se puede observar que existe una disminución mayor en los valores de estabilidad para los diferentes números de golpes en relación con los valores de estabilidad obtenidos por el proceso convencional. Esto debido a que las briquetas estuvieron en el horno por un tiempo de 5 horas y a una temperatura de 80°C, este proceso de calentamiento hizo que las briquetas tengan una oxidación por calor lo que produjo que las briquetas pierdan sus valores de estabilidad inicial.

Los valores de estabilidad para la máxima energía de compactación a 100 golpes y la mínima energía de compactación de 25 golpes varían en 929,35 lb es decir hay una pérdida del 62,12% en la estabilidad para la máxima y mínima energía de

compactación.

Figura 3.50: Efecto en la durabilidad vs Energía de compactación



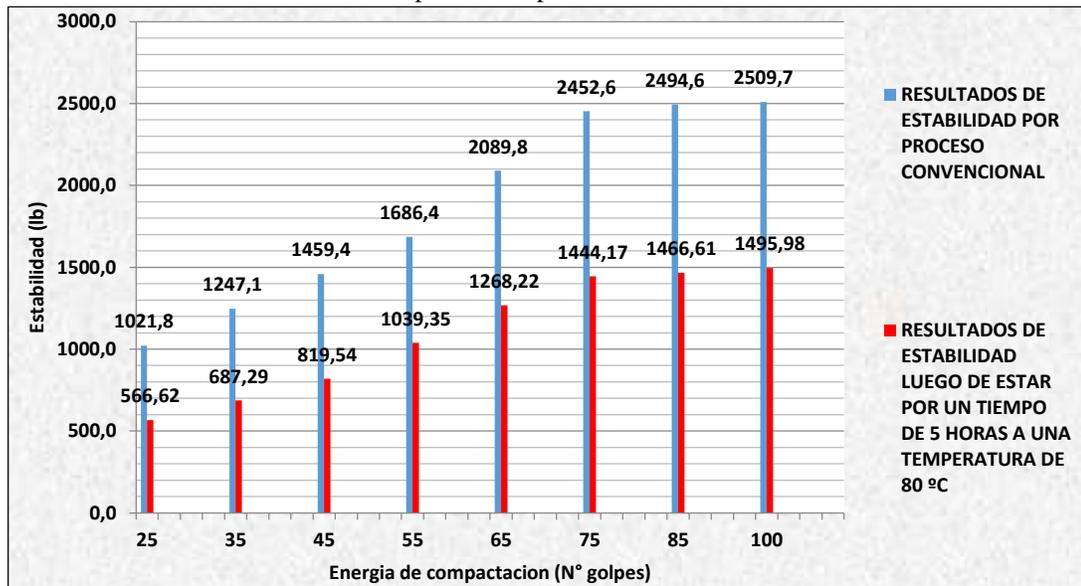
Fuente: Elaboración Propia

La durabilidad es una propiedad que establece la duración de la mezcla asfáltica a través de su vida útil soportando la carga de servicio, al no disponer de equipos calibrados para la durabilidad de una mezcla asfáltica en el laboratorio, es posible relacionar el comportamiento a través de la relación de estabilidades entre sí. Una mezcla elaborada en laboratorio para un diseño óptimo con 75 golpes para tráfico pesado se espera que la estabilidad producida para ese número de golpes sea el máximo y que con el paso del tiempo ese valor irá disminuyendo. En la gráfica elaborada se puede apreciar que los valores de Estabilidad disminuyen para energías de compactación menores de los 75 golpes, Observándose que para una energía de compactación de 55 golpes se produce una disminución del 28,03 % del efecto en la durabilidad, para 35 golpes hay una disminución del 52,41% del efecto en la durabilidad de la mezcla asfáltica. Cuando la energía de compactación aplicada es mínima de 25 golpes hay una disminución del 60,76% del efecto en la durabilidad y cuando el número de golpes es de 100 se produce un aumento del 3,59 % del efecto en la durabilidad.

La durabilidad de las briquetas también se ve afectada por la pérdida de densidad y

consecuentemente el aumento en el porcentaje de vacíos, debido a que cuando se aplicaron los 25 golpes se obtuvo una densidad de $2,241\text{gr/cm}^3$, que está muy por debajo de la densidad obtenida en los 75 golpes de $2,359\text{ gr/cm}^3$ el porcentaje de vacíos total en la mezcla subió a 9,16%, mientras mayor es el porcentaje de vacíos en la mezcla mayor será el espacio disponible para la intrusión de aire y agua en las mezclas asfálticas que afectara en la durabilidad de las mezclas.

Figura 3.51: Resultados de Estabilidad por proceso convencional y Estabilidad de briquetas a $80\text{ }^\circ\text{C}$ por un tiempo de 5 horas



Fuente: Elaboración Propia

En la gráfica se puede apreciar los valores de Estabilidad que fueron determinados con las briquetas por proceso convencional a diferentes energías de compactación, y los valores de Estabilidad de las briquetas que fueron colocadas al horno por 5 horas a una temperatura de $80\text{ }^\circ\text{C}$. Observándose que en 100 golpes la pérdida de estabilidad fue de 1013,8 lb igual a 40,4%, en 85 golpes se produjo una pérdida de 1028,0 lb que representa el 41,2%, en 75 golpes la pérdida de estabilidad es de 1008,4 lb que es un 41,1%, para los 65 golpes con un valor de pérdida de 821,6 lb igual a 39,3%, en 55 golpes la pérdida de estabilidad fue de 647 lb que es un 38,4 %, en 45 golpes la pérdida en la estabilidad fue de 639,8 lb igual a 43,8%, en los 35 golpes la pérdida de estabilidad fue de 559,8 lb que representa un 44,9%, y en 25 golpes la estabilidad

perdió un valor de 455,2 lb igual a 44,5%. El promedio de reducción en los valores de estabilidad fue de 41,7%.

Figura 3.52: Estabilidad vs Efecto en la durabilidad



Fuente: Elaboración Propia

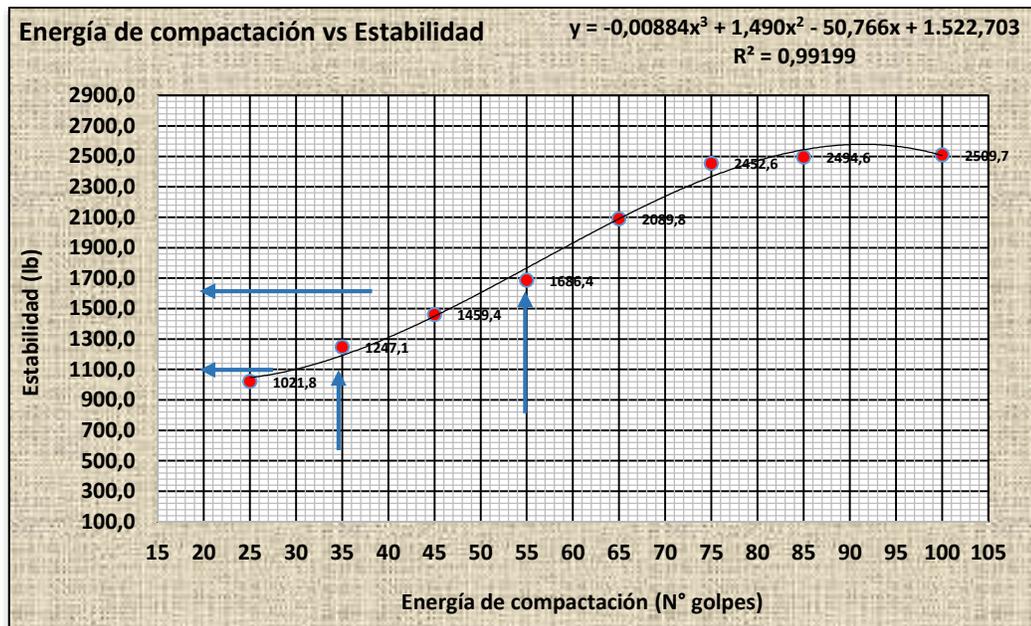
El gráfico anterior nos permite visualizar la relación efectiva entre la Estabilidad y el Efecto en la Durabilidad, basados teóricamente en que al efecto de durabilidad del 100% le corresponde una estabilidad de 1444,17 lb a partir de ella a medida que se tienen menores estabilidades en la mezcla se produce un mayor efecto en la durabilidad haciendo que esta tenga menores porcentajes para menor estabilidad de la mezcla, se puede apreciar que si la energía de compactación aplicada es igual a 25 golpes se obtiene una estabilidad de 566.62 libras y produce el máximo efecto en la durabilidad con una disminución igual a 60,76%, mientras que para el otro extremo de la energía de compactación producida por la aplicación de 100 golpes aumenta la

estabilidad a 1495,98 libras lo que muestra un mejoramiento de la mezcla para resistir las cargas aumentando el efecto en la durabilidad en un 3,59% relacionado con la producida por 75 golpes como esta establecido en la normativa.

3.7.- VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Para validar los resultados de esta investigación, se elaboraron dos briquetas con 30 golpes y 50 golpes. Estas briquetas fueron elaboradas con las mismas especificaciones que las realizadas para la elaboración de gráficas de energía de compactación y estabilidad, con el contenido óptimo de cemento asfáltico de encontrado por el diseño Marshall de 5,98%. Estas dos briquetas que fueron elaboradas mediante la aplicación de 30 golpes y 50 golpes fueron colocadas en la prensa Marshall para así obtener sus valores de Estabilidad, y de esta manera poder comprobar que los resultados obtenidos en la curva de estabilidad vs Energía de compactación son correctos. Mediante el uso de la ecuación del ajuste gráfico de la curva de estabilidad y energía de compactación podemos tener una estimación de los valores de estabilidad a diferentes números de golpes aplicados.

Figura 3.53: Validación de resultados con la curva de Estabilidad vs Energía de compactación



Fuente: Elaboración Propia

En la curva de ajuste gráfico y aplicando la ecuación (La ecuación es sólo válida hasta los 100 golpes) de la línea de tendencia.

Primero haciendo uso de la ecuación de ajuste gráfico podemos obtener los siguientes valores de estabilidad para 30 y 50 golpes:

$$\text{Para 30 golpes: } y = -0,00884 * 30^3 + 1,49 * 30^2 - 50,766 * 30 + 1522,703 = 1102,04lb$$

$$\text{Para 50 golpes: } y = -0,00884 * 50^3 + 1,490 * 50^2 - 50,766 * 50 + 1522,703 = 1604,40 lb$$

Las briquetas que fueron elaborada con 30 golpes y 50 golpes, fueron colocadas en la prensa Marshall por fines investigativos de validación se obtuvieron los siguientes resultados de estabilidad:

Tabla 3.29: Resultados de estabilidad para 30 y 50 golpes para validación de resultados

N° de golpes	Altura (cm)	Lect. Dial de Estabilidad	Real	factor de corrección por altura	Estabilidad Corregida (lb)
30	6,70	570	1256,622	0,923	1159,23
50	6,55	730	1609,358	0,953	1532,91

Fuente: Elaboración Propia

Realizando una comparación de los valores de estabilidad obtenidos con la curva de ajuste gráfico y los valores de estabilidad en la prensa Marshall, se puede observar que los resultados de Estabilidad tuvieron una diferencia para el caso de 30 golpes de 57,19 libras igual al 5,19%, y para 50 golpes los resultados de estabilidad variaron en 71,49 libras igual a 4,66% con respecto a los valores obtenidos en la prensa Marshall. Estos valores entran dentro de los rangos de desviación y errores porcentuales calculados en el análisis estadístico de los resultados de Estabilidad.

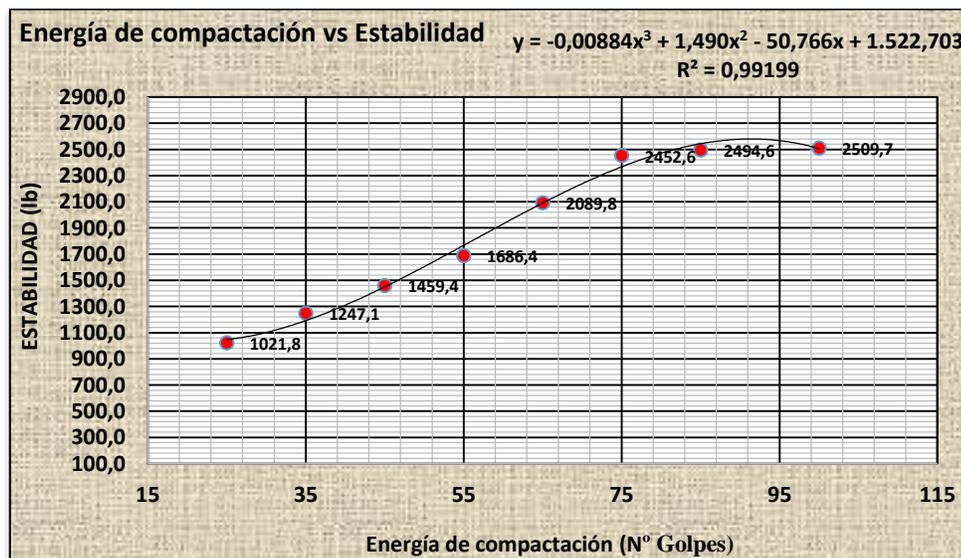
CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

- En la investigación se demuestra la influencia que tienen los niveles de energía de compactación en la estabilidad, determinándose que la diferencia de estabilidades producidas para la máxima y la mínima energía de compactación aplicada a las mezclas asfálticas se obtuvo un promedio de 62 %.
- Se elaboró la gráfica de Estabilidad a diferentes energías de compactación en la cual se observa que la Estabilidad está directamente relacionada con la energía de compactación aplicada, a mayor energía de compactación mayor es la estabilidad observándose, que desde los 25 golpes hasta los 75 golpes la Estabilidad crece en proporciones mayores que cuando se supera los 75 golpes. A continuación se presenta una de las gráficas de los valores de estabilidad obtenidos por proceso convencional a diferentes energías de compactación.

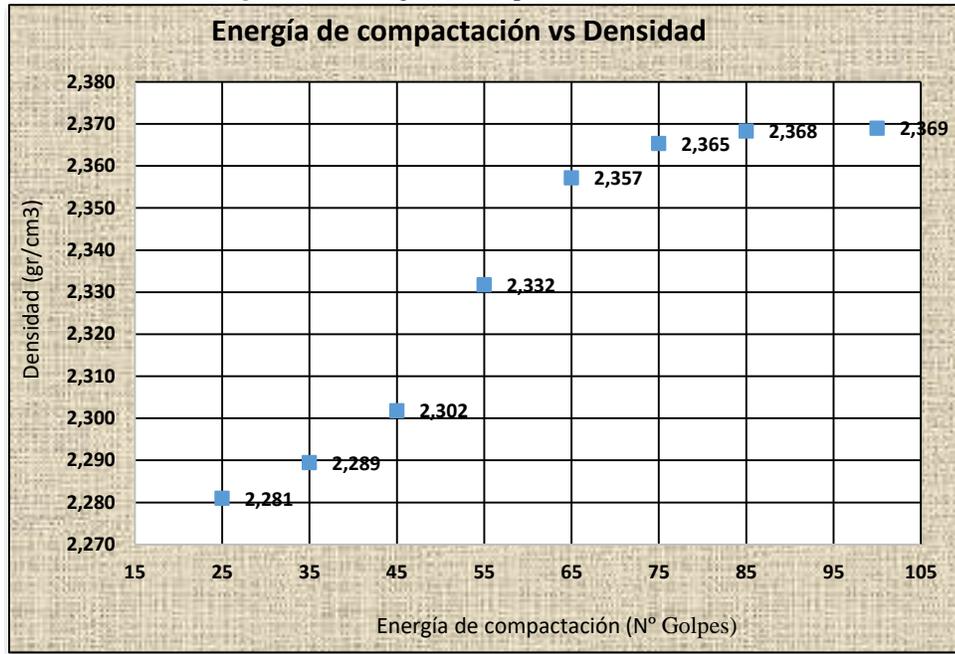
Figura 4.1: Curva de Estabilidad vs Energía de Compactación



Fuente: Elaboración Propia

- Se realizó la caracterización correspondiente tanto del cemento asfáltico como de los agregados grueso y fino, cumpliendo con las recomendaciones dadas por las normas correspondientes AASHTO y ASTM para el diseño de una mezcla asfáltica en caliente de granulometría densa.
- Se logró realizar el diseño de la mezcla asfáltica por el método Marshall, cumpliendo con las especificaciones recomendadas por dicho método, el cual como resultado nos dio un porcentaje de cemento asfáltico óptimo de 5,98%. El cual fue utilizado en la elaboración de briquetas para la investigación.
- Se elaboraron de manera correcta las briquetas a diferentes energías de compactación, cumpliendo con las recomendaciones apropiadas en la elaboración de briquetas para mezclas asfálticas en caliente, elaborándose las briquetas con los siguientes números de golpes: 25; 35; 45; 55; 65; 75; 85 y 100 golpes aplicados a cada cara de las briquetas, elaborándose 128 briquetas en total para la investigación.
- Los valores de densidades obtenidas para una energía de compactación mínima de 25 golpes fueron de 2,281 gr/cm³, 2,277 gr/cm³, 2,276 gr/cm³, y 2,241 gr/cm³ .las cuales son menores que la densidad lograda para los 75 golpes del diseño de la mezcla, que era de 2,358 gr/cm³, y por el otro lado las densidades obtenidas para los 100 golpes fueron las siguientes: 2,369 gr/cm³, 2,373 gr/cm³, 2,368 gr/cm³, 2,362 gr/cm³, lo cual tiene mucha influencia en la durabilidad de las asfálticas debido a que es esencial tener una alta densidad para obtener un rendimiento duradero de las mezclas asfálticas. A continuación se presenta uno de los gráficos obtenidos de densidad a diferentes energías de compactación.

Figura 4.2: Energía de compactación vs Densidad



Fuente: Elaboración Propia

- De acuerdo a los resultados presentados en la investigación se puede observar que a menor energía de compactación, mayor será el porcentaje de vacíos total en las mezclas, cuando la energía de compactación fue realizada con 25 golpes se produjeron porcentajes de vacíos total en la mezcla de 7,54%, 7,69%, 7,72%, 9,16%. En el caso de los 100 golpes los porcentajes de vacíos total en la mezcla fueron los siguientes: 3,97%, 3,82%, 4 % y 4,26%.
- La durabilidad de un pavimento flexible está relacionada con el porcentaje de vacíos en la mezcla. Un contenido de vacíos demasiado alto como los producidos para los 25 golpes proporciona pasajes a través de la mezcla, por los cuales puede entrar el agua y aire elementos que causaran deterioros prematuros en los pavimentos flexibles.

- Se logro realizar el análisis entre los resultados de Estabilidad obtenidos por proceso convencional, y los resultados de Estabilidad después de someter a las briquetas a temperaturas de 70°C, 75°C y 80°C, por un tiempo de 5 horas. verificándose las pérdidas de Estabilidad para cada nivel de energía de compactación, mientras mayor fue la temperatura mayor fue la pérdida en la estabilidad de las briquetas. El promedio de reducción en la Estabilidad para la temperatura de 80°C es de 41,7%. Para el caso de las briquetas que estuvieron a una temperatura de 75 °C el promedio de reducción en la estabilidad es de 34 %. Para el caso de las briquetas que estuvieron a una temperatura de 70 °C por un tiempo de 5 horas el promedio de reducción en la estabilidad es de 24,5%.

- En el análisis realizado en el efecto en la durabilidad producida por los diferentes niveles de energía de compactación, se puede observar que la energía de compactación tiene una importancia fundamental para el correcto desempeño de los pavimentos y su durabilidad. Debido a que los pavimentos son diseñados en condiciones óptimas con una energía de compactación producida por los 75 golpes aplicados a cada cara de las briquetas esperando que la estabilidad producida sea la máxima. Pero de los resultados se puede concluir que si la energía de compactación que se aplica a las briquetas es menor, el caso de los 25 golpes se puede producir una disminución alrededor del 62 % en el efecto en la durabilidad. Considerando la reducción del efecto en la durabilidad por las temperaturas a las que estuvieron las briquetas, se concluye lo siguiente, para una temperatura de 70°C la reducción promedio del efecto en la durabilidad es de 24,5%, para el caso de la temperatura de 75 °C hay una reducción promedio de 34%, y en el caso de la temperatura de 80 °C la reducción promedio en la durabilidad es igual a 41,7%.

4.2 RECOMENDACIONES

- Con los resultados obtenidos se recomienda tener un exhaustivo control sobre las energías de compactación, que se aplican a las mezclas asfálticas, debido a que si

se aplican energías de compactación muy bajas se pueden reducir de gran medida los valores de estabilidad esperados cerca del 62% de pérdida en la estabilidad si se aplican energías de compactación mínimas, reduciéndose su capacidad de resistir desplazamientos y deformaciones bajo las cargas de tránsito, produciendo un efecto negativo en la durabilidad de las mismas.

- Al momento de realizar la caracterización de los agregados pétreos y el cemento asfáltico, es importante cumplir con los procedimientos recomendados por las normas AASHTO, debido a que las características de los diferentes materiales son fundamentales para obtener mezclas asfálticas de buena calidad.
- Se recomienda tener mucho cuidado al momento de aplicar los golpes con el martillo Marshall, debido a que se realizan de manera manual y si se hace variar la intensidad de los golpes, puede hacer variar los resultados de las briquetas.
- Se recomienda que al momento de elaborar las briquetas, los moldes Marshall sean precalentados, como preparación para la compactación, así también el Martillo Marshall debe ser previamente calentado, para que no enfríe la superficie de la mezcla al golpearla.
- Para la determinación de la durabilidad de las mezclas asfálticas se recomienda el uso del reómetro, con el cual podemos determinar el posible efecto que el tiempo de la aplicación de carga y la temperatura tienen sobre el asfalto.
- Se recomienda que cuando se compacten las mezclas asfálticas en campo, se apliquen energías de compactación que produzcan densidades en los pavimentos que representen un 95% de la densidad máxima obtenida en laboratorio, esto se debe a que rara vez la compactación in situ se logra las densidades, que se obtienen usando los métodos normalizados de compactación en laboratorio. Y esto puede afectar en su

futuro desempeño del pavimento y su durabilidad.

- Se recomienda tener mucho cuidado al utilizar los equipos para realizar la medición ya que se necesita precisión de los mismos, caso contrario se obtendrían resultados erróneos.
- Es importante y se recomienda dar mantenimiento al equipo Marshall para compactación, los moldes, el martillo y la prensa Marshall, para obtener valores correctos.