

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

Como parte fundamental en la caracterización de mezclas asfálticas, se encuentran los ensayos de fatiga, los cuales se relacionan directamente con la capacidad de soportar carga a largo plazo de una mezcla asfáltica, característica fundamental para el diseño estructural de un pavimento y poder efectuar un adecuado análisis del mismo.

El proceso evolutivo que ha experimentado la Ingeniería Vial, pone de manifiesto el real interés en profundizar aún más sobre el conocimiento de los distintos materiales y mezclas que componen la estructura del pavimento. Esto se refleja por medio de los variados métodos de diseño existentes hasta la fecha y la forma de simular el comportamiento de las mezclas asfálticas. Las mezclas asfálticas poseen un comportamiento mecánico complejo, puesto que dependen de la temperatura, cargas de tráfico y duración en la aplicación de dichas cargas.

Los métodos empíricos mecanicistas se basan en determinar las tensiones y deformaciones unitarias en puntos críticos de la estructura del pavimento y relacionarlos con un número de repeticiones de carga a través de ecuaciones de transferencia que se obtienen en forma empírica. De este modo, investigadores han sugerido controlar la deformación unitaria en tensión en la interfase de la capa asfáltica y la capa granular para disminuir el agrietamiento por fatiga. Para esto, se debe buscar los mecanismos que puedan reproducir de mejor forma las sollicitaciones reales que afectan a las carpetas asfálticas, con el objeto de analizar su comportamiento a fatiga.

Existen diversos test para simular la fatiga de las mezclas asfálticas, los que resultan difíciles de realizar. Ésto impulsa a estudiar y aplicar un método, basado en un ensayo de flexión compuesta que representa las sollicitaciones a flexo tracción a las que están sometidos constantemente los pavimentos asfálticos. Este método caracteriza la

fisuración por fatiga que sufren las mezclas asfálticas durante su vida en servicio. Describe su comportamiento, controla y determina la deformación de rotura a tracción, su vida de servicio, su resistencia a la fisuración por fatiga; entre otros factores, con el objeto de estudiar comparativamente el comportamiento a fatiga de mezclas asfálticas diferentes desde el análisis del tipo de fractura que presenten.

1.2 JUSTIFICACIÓN

En Bolivia la mayor parte de las carreteras que existen son de pavimento flexible, es por esta razón que se hará un análisis de mezclas asfálticas con agregados de nuestra región (agregados específicos y no así todos los agregados pertenecientes a nuestra región), para determinar a través de ensayos de laboratorio la resistencia a la fatiga de las mezclas asfálticas por fractura.

El estudio del análisis para la determinación de la respuesta a la fatiga en mezclas asfálticas, se lo realizará con la finalidad de proyectar para el futuro una base de datos que permita a los profesionales afines a esta área, tener conocimiento sobre la investigación realizada, como ser: la caracterización de los agregados empleados, caracterización de cementos asfálticos empleados, como así también del análisis y resultados obtenidos de los ensayos a la fractura por fatiga de mezclas asfálticas.

Es así que la presente investigación de la determinación del análisis de las mezclas asfálticas ensayadas a fractura por fatiga, serán un aporte para nuestra universidad y sociedad en general, con la finalidad de establecer criterios que puedan ayudar a nuestras autoridades en los siguientes años, a emplear técnicas basadas en esta investigación, de tal manera, que se pueda resguardar los recursos económicos, la seguridad y bienestar social, como así también aumentar la vida útil de los pavimentos, y al mismo tiempo disminuir la susceptibilidad térmica de los pavimentos flexibles, y de esta manera emplear en nuestra región pavimentos más resistentes a la falla por fatiga.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.3.1 Situación problemática

En nuestro país la mayor parte de las carreteras son de pavimentos flexibles, constantemente se observa que el pavimento de una carretera está sujeto a la acción continua y repetida del tráfico y a la susceptibilidad térmica (cambios climáticos), estos dos factores, junto con el envejecimiento natural de los materiales, hacen que la carpeta asfáltica sufra un proceso progresivo de deterioro, lo cual conlleva a una disminución paulatina de los niveles de seguridad y confort del tráfico, que sobrepasan ciertos valores y hacen necesaria la conservación de las vías.

El presupuesto necesario para el mantenimiento, justifica la búsqueda de nuevas técnicas que permitan analizar el comportamiento de diferentes muestras asfálticas sometidas a ensayos de fractura para de esta manera determinar la respuesta a la fatiga, y así obtener una base de datos técnicos que permitan reducir el deterioro de las carpetas asfálticas por la acción repetida del tránsito (fatiga) en un futuro y al mismo tiempo protejan el medio ambiente.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivos generales

- Realizar el análisis de diferentes mezclas asfálticas, elaboradas con agregados específicos de nuestra región, cemento asfáltico convencional 85 – 100 y cemento asfáltico 60 – 70, con la finalidad de determinar a través de ensayos de laboratorio la respuesta a la fatiga por fractura en las mezclas asfálticas en estudio.

1.4.2 Objetivos específicos

- Establecer criterios sobre mezclas asfálticas.
- Fundamentar mediante normativas los ensayos de fractura a realizar en el laboratorio.
- Caracterizar los agregados pétreos a ser utilizados.
- Evaluar el comportamiento de los cementos asfálticos a ser utilizados.
- Diseñar las mezclas asfálticas en laboratorio de acuerdo con la metodología de dosificación Marshall.
- Realizar en laboratorio los ensayos de fractura para las probetas de mezclas asfálticas.
- Establecer una relación de los resultados obtenidos para cada muestra, y así analizar la fractura presente en cada una de ellas.
- Realizar un análisis de los resultados obtenidos en laboratorio.
- Establecer conclusiones y recomendaciones en base a los datos obtenidos en laboratorio.

1.5 VARIABLES

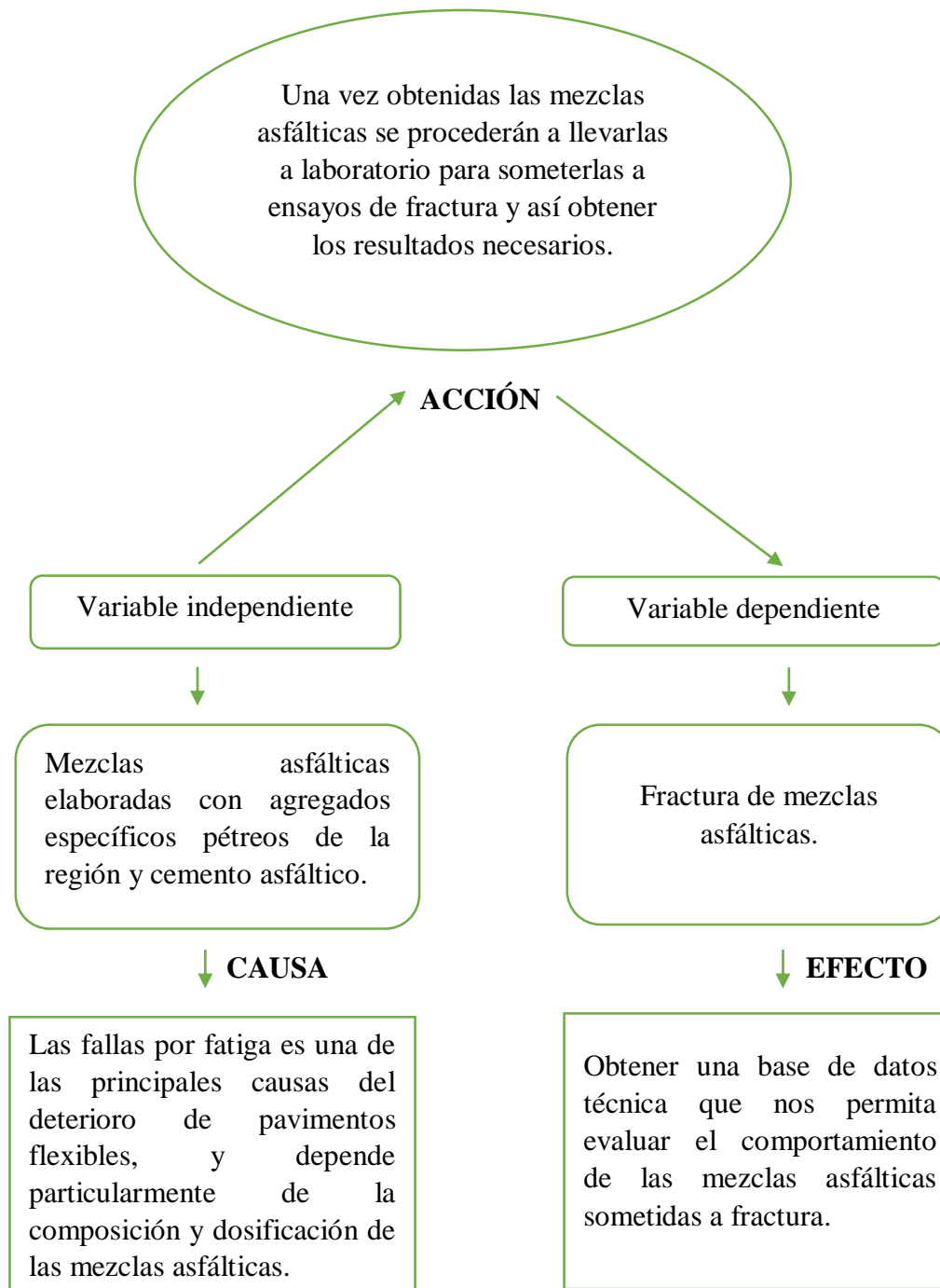
1.5.1 Variable independiente

- La variable independiente de la presente investigación son las mezclas asfálticas, elaboradas con materiales específicos de nuestra región, y cemento asfáltico convencional 85-100, y cemento asfáltico 60 -70.

1.5.2 Variable dependiente

- La variable dependiente de la presente investigación es la respuesta a la fatiga por fractura de las mezclas asfálticas.

Esquema 1: Relación entre la variable independiente y la variable dependiente



Fuente: Elaboración propia

1.6 ALCANCE

Mediante la presente investigación se desea concluir un análisis del comportamiento de distintas mezclas asfálticas sometidas a ensayos de fractura, de los resultados se pretende obtener información acerca de la carga máxima que puede soportar las mencionadas mezclas asfálticas, para que, con los resultados obtenidos determinar la respuesta a la fatiga que presentan dichas mezclas, elaboradas en base al diseño de carpeta asfáltica utilizada y proporcionada por el Servicio Departamental de Caminos de los tramos en estudio detallados en la siguiente investigación.

1.7 DISEÑO METODOLÓGICO

1.7.1 Componentes

1.7.1.1 Unidad

Mezclas asfálticas.

1.7.1.2 Población

Mezclas asfálticas con agregados específicos de la región.

1.7.1.3 Muestra

Mezclas asfálticas con agregados específicos de la región ensayados a fractura.

1.7.1.3.1 Muestreo

- Se realizará el muestreo de las mezclas asfálticas, utilizando agregados pétreos específicos de nuestra región de cuatro diferentes procedencias, y con dos tipos de cemento asfáltico.

- Se obtendrán mezclas asfálticas diferentes, para sus respectivos ensayos a fractura.
- Se realizará 12 muestras de cada uno de los 5 tramos estudiados, para su posterior evaluación, 12 de ellas por fractura y 12 para ensayos de estabilidad.

1.7.2 Métodos y técnicas

Método inductivo

Para la presente investigación se utilizará el método inductivo, por lo que primero se explicará el concepto del método inductivo.

El método inductivo es aquel método científico que alcanza conclusiones generales partiendo de hipótesis o antecedentes en particular. El método inductivo suele basarse en la observación y la experimentación de hechos y acciones concretas para así poder llegar a una resolución o conclusión general sobre estos; es decir en este proceso se comienza por los datos y finalmente llegan a una teoría, por lo tanto, se puede decir que asciende de lo particular a lo general. En el método inductivo se exponen leyes generales acerca del comportamiento o la conducta del objeto partiendo específicamente de la observación de casos particulares que se producen durante el experimento.

La metodología utilizada para la realización de este proceso puede resumirse en cuatro pasos, los cuales comprenden la observación de los hechos o acciones y registro de ellos, la indagación científica da inicio siempre partiendo de un fenómeno particular, que no posee una explicación propia dentro de los posibles conocimientos científicos existentes en dado momento; luego viene la elaboración de un hipótesis o del análisis de lo observado anteriormente, aquí se forma una posible explicación y posible definición de lo observado; a continuación en la tercera parte del proceso se presenta la deducción de predicciones o la clasificación de los fundamentos anteriormente obtenidos, estas predicciones se formulan a partir de la hipótesis; y finalmente el cuarto paso se pone en marcha el experimento, y encontramos la representación de los enunciados universales derivados del proceso de investigación que se realizó.

La presente investigación tiene un método inductivo, ya que parte de la observación de un hecho como el deterioro que sufren los pavimentos flexibles, es por eso que se hizo un estudio de las mezclas asfálticas, los componentes de las mezclas asfálticas, la dosificación, y la fractura en las mezclas asfálticas, para así poder tener un conocimiento más amplio del problema.

Partiendo de los conceptos adquiridos se procederá a elaborar muestras de mezclas asfálticas, las cuales serán llevadas a laboratorio y sometidas a ensayos de fractura para determinar la fatiga que presenta cada una de ellas, para obtener una base de datos dirigida a profesionales de ramas afines, que genere resultados que puedan ser analizados, estudiados o evaluados con la finalidad de brindar un aporte a la sociedad, y que la presente investigación pueda en un futuro servir para diferentes usos.

Técnicas

Las técnicas que se utilizan en la presente investigación son por medio de ensayos experimentales, es por esta razón que primeramente se hace un estudio del concepto de que son los ensayos experimentales.

El estudio experimental es un ensayo analítico, prospectivo, caracterizado por la manipulación artificial del factor de estudio por el investigador y por la elección en forma aleatoria de los casos o sujetos en dos grupos, llamados “grupo control” y “grupo experimental”. La característica de la elección aleatoria no es imprescindible en el estudio experimental, llamándose entonces estudio cuasi experimental.

En la presente investigación se utiliza la técnica de ensayos experimentales para proceder con la determinación de la respuesta a la fatiga de mezclas asfálticas a través de un análisis a partir de su fractura, en este caso nuestro factor de estudio serán las mezclas asfálticas elaboradas con agregados pétreos procedentes de diferentes chancadoras de nuestra región, y cemento asfáltico 85 -100 como así también cemento asfáltico 60 – 70, sometidos a ensayos de laboratorio para su caracterización y posterior uso en base a la

dosificación de las mezclas asfálticas de los diferentes tramos en estudio, dosificación que fue proporcionada por el Servicio Departamental de Caminos.

Finalmente, se procederá al diseño y dosificación de las mezclas asfálticas con los materiales ya evaluados y caracterizados, por el método de dosificación Marshall, una vez obtenidas las muestras son sometidas a ensayos de fractura y estabilidad, posteriormente se realiza un análisis de la fatiga que puedan presentar las diferentes mezclas asfálticas, y así crear una base de datos técnica que nos permita evaluar el comportamiento de las diferentes mezclas asfálticas y proceder a hacer un análisis de los resultados obtenidos en laboratorio.

Descripción detallada del proceso metodológico

Para el proceso de la presente investigación se siguen los siguientes pasos:

Obtener los diferentes materiales seleccionados de nuestra región como ser los agregados pétreos utilizados para cada uno de los 5 tramos en estudio, como así también los diferentes cementos asfálticos utilizados. (cemento asfáltico 85 – 100 y cemento asfáltico 60 -70).

Realizar pruebas de laboratorio para caracterizar los diferentes tipos de agregados pétreos utilizados para cada tramo en estudio.

Realizar la caracterización de los cementos asfálticos que se emplean para la presente investigación, que es cemento asfáltico convencional 85 – 100 y cemento asfáltico 60 - 70, diferentes de acuerdo a cada tramo en estudio.

Una vez obtenidos la caracterización de los materiales, se procede a la dosificación de las mezclas asfálticas.

Las mezclas asfálticas son dosificadas por método de dosificación Marshall, se realizará la dosificación de 24 mezclas asfálticas para cada tramo en estudio, siendo un total de 5 tramos en estudio, haciendo un total de 120 muestras de mezclas asfálticas.

El producto final de las mezclas asfálticas, son llevadas a laboratorio para someterlas a ensayos de estabilidad y fractura, para obtener resultados de las cargas máximas q pueden soportar las muestras en estudio para cada tramo.

Posteriormente se crea una base de datos técnica con los resultados obtenidos en laboratorio.

Finalmente se procede a realizar el análisis, conclusiones y recomendaciones de los resultados obtenidos.

1.7.3 Tratamiento estadístico

Estadística descriptiva:

La media aritmética

En matemáticas y estadística, la media aritmética de un conjunto finito de números es el valor característico de una serie de datos cuantitativos objeto de estudio que parte del principio de la esperanza matemática o valor esperado, se obtiene a partir de la suma de todos sus valores dividida entre el número de sumandos.

Dados los n números $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, la media aritmética se define como:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

Donde:

\bar{x} = Con una barra horizontal sobre el símbolo, se utiliza para representar la media de la muestra.

n = Valores de la variable.

La mediana

En el ámbito de la estadística, la mediana representa el valor de la variable de posición central en un conjunto de datos ordenados.

Existen dos métodos para el cálculo de la mediana:

- Considerando los datos en forma individual, sin agruparlos.
- Utilizándolos datos agrupados en intervalos de clase.

A continuación, veamos cada una de ellas:

Datos sin agrupar

Sean $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ los datos de nuestra muestra ordenada en orden creciente y designando la mediana como M_e , distinguimos dos casos:

- Si n es impar la mediana es el valor que ocupa la posición $(n+1)/2$ una vez que los datos han sido ordenados (en orden creciente o decreciente), porque este es el valor central. Es decir:

$$M_e = x_{(n+1)/2}.$$

Donde:

M_e = Mediana aritmética de n datos impares.

n = Número de datos impares.

- Si n es par, la mediana es la media aritmética de los dos valores centrales. Cuando n es par, los datos que están en el centro de la muestra ocupan las posiciones $n/2$ y $n/2+1$. Es decir:

$$M_e = (x_{\frac{n}{2}} + x_{\frac{n}{2}+1})/2.$$

Donde:

M_e = Mediana aritmética de n datos pares.

n = Número de datos pares.

Datos agrupados

Al tratar con datos agrupados si $n/2$ coincide con un valor de una frecuencia acumulada, el valor de la mediana coincidirá con la abscisa correspondiente. Si no coincide con el

valor de ninguna abscisa, se calcula a través de semejanza de triángulos en el histograma o polígono de frecuencias acumuladas, utilizando la siguiente equivalencia:

$$\frac{N_i - N_{i-1}}{a_i - a_{i-1}} = \frac{\frac{n}{2} - N_{i-1}}{p} \Rightarrow p = \frac{\frac{n}{2} - N_{i-1}}{N_i - N_{i-1}}(a_i - a_{i-1})$$

Donde:

N_i y N_{i-1} = Son las frecuencias absolutas acumuladas tales que:

Son los extremos, interior y exterior del intervalo donde se alcanza la mediana y $Me = a_{i-1} + p$ es la abscisa a calcular, la mediana. Se observa que $a_i - a_{i-1}$ es la amplitud de los intervalos seleccionados para el diagrama.

La moda

En estadística, la moda es el valor con mayor frecuencia en una distribución de datos.

Se hablará de una distribución bimodal de los datos adquiridos en una columna cuando encontremos dos modas, es decir dos datos que tengan la misma frecuencia absoluta máxima. Una distribución trimodal de los datos es en la que encontramos tres modas. Si todas las variables tienen la misma frecuencia diremos que no hay moda.

El intervalo modal es el de mayor frecuencia absoluta. Cuando tratamos con datos agrupados antes de definir la moda, se ha de definir el intervalo modal.

La moda, cuando los datos están agrupados, es un punto que divide al intervalo modal en dos partes de la forma p y $c-p$, siendo c la amplitud del intervalo, que verifiquen que:

$$\frac{p}{c - p} = \frac{n_i - n_{i-1}}{n_i - n_{i+1}}$$

Donde:

p = Intervalo modal.

c = Amplitud del intervalo modal.

n_{i-1} = Frecuencia absoluta del intervalo anterior.

n_{i+1} = Frecuencia absoluta del intervalo posterior.

Siendo la frecuencia absoluta del intervalo modal las frecuencias absolutas de los intervalos anteriores y posteriores, respectivamente, al intervalo modal.

Para obtener la moda en datos agrupados se usa la siguiente formula:

$$M = L_i + \left(\frac{D_1}{D_1 + D_2} \right) A_i$$

Donde:

L_i = L inferior de la clase modal.

D_1 = Es el delta de frecuencia absoluta modal y la frecuencia absoluta premodal.

D_2 = Es el delta de frecuencia absoluta modal y la frecuencia absoluta postmodal.

A_i = Amplitud del intervalo modal.

La desviación estándar

La desviación estándar es una medida de dispersión para variables de razón (variables cuantitativas o cantidades racionales) y de intervalo. Se define como la raíz cuadrada de la varianza de la variable.

Para conocer con detalle un conjunto de datos no basta con conocer las medidas de tendencia central, sino que necesitamos conocer también la desviación que presenta los datos en su distribución respecto de la media aritmética de dicha distribución, con objeto de tener una visión de los mismos más acorde con la realidad al momento de describirlos e interpretarlos para la toma de decisiones.

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

Donde:

s^2 = Desviación estándar.

\bar{x} = Con una barra horizontal sobre el símbolo, promedio o media aritmética.

n = Número de datos.

x_i = Cada dato con su valor correspondiente.

Varianza

En teoría de probabilidad la varianza de una variable aleatoria es una medida de dispersión definida como la esperanza del cuadrado de la desviación de dicha variable respecto a su media.

Esta medida en la unidad de medida de variable al cuadrado. Por ejemplo, si la variable mide una distancia en metros la varianza se expresa en metros al cuadrado. La desviación estándar es la raíz cuadrada de la varianza, es una medida de dispersión alternativa expresada en las mismas unidades de los datos de la variable objeto de estudio. La varianza tiene como valor mínimo 0.

Si tenemos un conjunto de datos de una misma variable, la varianza se calcula de la siguiente manera:

$$\sigma_n^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^2 \right) - \bar{X}^2 = \frac{1}{n^2} \sum_{i < j} (X_i - X_j)^2$$

Donde:

σ = Varianza de un conjunto de datos.

X_i = Cada dato con su valor correspondiente.

n = Número de datos.

\bar{X} = Con una barra horizontal sobre el símbolo, media aritmética de los datos.

CAPÍTULO II

ESTADO DE CONOCIMIENTO SOBRE MEZCLAS ASFÁLTICAS Y ENSAYOS DE FRACTURA

2.1 MEZCLAS ASFÁLTICAS

2.1.1 Introducción

Se define como mezcla asfáltica (o bituminosa) en caliente a la combinación de áridos (incluido el polvo mineral) con un ligante, las cantidades relativas de ligante y áridos determinan las propiedades físicas de la mezcla.

El proceso de fabricación implica calentar el agregado pétreo y el ligante a alta temperatura, muy superior a la ambiental, enseguida esta mezcla es colocada en la obra.

Existen diferentes métodos de diseño. En Bolivia generalmente se usa el Método Marshall.

- Método Marshall: Basado en estabilidad y contenido de vacíos.

2.1.2 Empleo de mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas se emplean en la construcción de firmes, ya sea en capas de rodadura o en capas inferiores y su función es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica a los usuarios de las vías de comunicación, facilitando la circulación de los vehículos, aparte de transmitir suficientemente las cargas debidas al tráfico a la explanada para que sean soportadas por ésta.

2.1.3 Funcionalidad de las mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas como ya hemos visto anteriormente sirven para soportar directamente las acciones de los neumáticos y transmitir las cargas a las capas inferiores,

proporcionando unas condiciones adecuadas de rodadura, cuando se emplean en capas superficiales; y como material con resistencia simplemente estructural o mecánica en las demás capas de los firmes.

Como material simplemente estructural se pueden caracterizar de varias formas. La evaluación de parte de sus propiedades por la cohesión y el rozamiento interno es comúnmente utilizada; o por un módulo de rigidez longitudinal y un módulo transversal, o incluso por un valor de estabilidad y de deformación. Como en otros materiales hay que considerar también, la resistencia a la rotura, las leyes de fatiga y las deformaciones plásticas.

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

2.1.4 Definición de mezclas asfálticas

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).

Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros. Sin olvidar que se utilizan en las capas inferiores de los firmes para tráfico pesados intensos.

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

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.

2.1.5 Clasificación de mezclas asfálticas

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

- **Por fracciones de agregado pétreo empleado**

Masilla asfáltica: Polvo mineral más ligante.

Mortero asfáltico: Agregado fino más masilla.

Concreto asfáltico: Agregado grueso más mortero.

Macadam asfáltico: Agregado grueso más ligante asfáltico.

- **Por la temperatura de puesta en obra**

Mezclas asfálticas en caliente: Se fabrican con asfaltos a unas temperaturas elevadas, en el rango de los 150 °C, 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 al ambiente, pues en caso contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente.

Mezclas asfálticas en frío: El ligante suele ser una emulsión asfáltica (debido a que se sigue utilizando en algunos lugares los asfaltos fluidificados), y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.

- **Por la proporción de vacíos en la mezcla asfáltica**

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

Mezclas cerradas o densas: La proporción de vacíos no supera el 6 %.

Mezclas Semi-cerradas o Semi-densas: La proporción de vacíos está entre el 6 % y el 10 %.

Mezclas abiertas: La proporción de vacíos supera el 12 %.

Mezclas porosas o drenantes: La proporción de vacíos es superior al 20 %.

- **Por el tamaño máximo del agregado pétreo**

Mezclas gruesas: Donde el tamaño máximo del agregado pétreo excede los 10 mm.

Mezclas finas: También llamadas micro aglomerados, pueden denominarse también morteros asfálticos, pues se trata de mezclas formadas básicamente por un árido fino incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico. El tamaño máximo del agregado pétreo determina el espesor mínimo con el que ha de extenderse una mezcla que vendría a ser del doble al triple del tamaño máximo.

- **Por la estructura del agregado pétreo**

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

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

- **Por la granulometría**

Mezclas continuas: Una cantidad muy distribuida de diferentes tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico.

Mezclas discontinuas: Una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico.

Cuadro 1: Parámetros de clasificación de mezclas asfálticas

Parámetro de clasificación	Tipo de mezcla
Fracciones de agregado empleadas	Masilla
	Mortero
	Concreto
	Macadam
Temperatura de puesta en obra	En frío
	En caliente
Huecos en la mezcla (h)	Cerradas ($h < 6\%$)
	Semicerradas ($6\% < h < 12\%$)
	Abiertas ($h > 12\%$)
	Porosas ($h > 20\%$)
Tamaño máximo del agregado (t máx.)	Gruesas (t máx. > 10 mm)
	Finas (t máx. < 10 mm)
Estructura del agregado	Con esqueleto mineral
	Sin esqueleto mineral
Granulometría	Continuas
	Discontinuas

Fuente: MezclasAsfálticasGeoge AriasWilson GalvisLeonel OrduñaJenny
RodríguezGustavo Sánchez

El asfalto o mezclas asfálticas son susceptibles a los cambios de temperatura, sufre envejecimiento por intemperismo, es afectado por la oxidación. Sus propiedades mecánicas son limitadas frente a diversos factores; es quebradizo a bajas temperaturas, fluye a altas temperaturas, además de tener una baja recuperación elástica, lo que limita su rango de utilidad. Por estas razones se hicieron estudios para modificar el cemento asfáltico y así mejorar sus propiedades mecánicas, en especial su recuperación elástica.

2.2 COMPONENTES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

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 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.

A continuación, describiremos los materiales que conforman las mezclas asfálticas:

2.2.1 Asfalto de petróleo.

2.2.1.1 Definición

La American Society for Testing and Materials (ASTM) define al asfalto como un material ligante de color marrón oscuro a negro, constituido, principalmente, por betunes que pueden ser naturales u obtenidos por refinación del petróleo. El asfalto se presenta en proporciones variables en la mayoría de los petróleos crudos.

El betún según ASTM, es una sustancia ligante (sólida, semisólida o viscosa) oscura o negra, natural o artificial, compuesta principalmente por hidrocarburos de alto peso molecular, como los asfaltos, alquitranes, breas y asfálticas.

El asfalto es un material negro, cementante, que varía ampliamente en consistencia, entre sólido y semisólido (sólido blando), a temperaturas ambientes normales.

Cuando se calienta lo suficiente, el asfalto se ablanda y se vuelve líquido, lo cual le permite cubrir las partículas de agregado durante la producción de mezcla en caliente.

El asfalto usado en pavimentación, generalmente llamado cemento asfáltico, es un material viscoso (espeso) y pegajoso. Se adhiere fácilmente a las partículas del agregado

y por lo tanto es un excelente cemento para unir partículas del agregado en un pavimento de mezcla caliente.

El cemento asfáltico es un excelente material impermeabilizante y no es afectado por los ácidos, los álcalis (bases) o las sales.

Esto significa que un pavimento de cemento asfáltico construido adecuadamente es impermeable y resistente a muchos tipos de daños químicos.

2.2.1.2 Propiedades del asfalto

Propiedades químicas: Básicamente, el asfalto está compuesto por varios hidrocarburos (combinaciones moleculares de hidrógeno y carbono) y algunas trazas de azufre, nitrógeno y otros elementos. El asfalto cuando es disuelto en un solvente como el heptano puede separarse en dos partes principales asfáltenos y máltenos.

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

2.2.1.3 Técnicas de producción de los asfaltos

El petróleo crudo está compuesto por distintos productos, incluyendo el asfalto. La refinación permite separar estos productos y recuperar el asfalto. Durante el proceso de refinación, el petróleo crudo es conducido a un calentador tubular donde se eleva rápidamente su temperatura para la destilación inicial. Luego entra a una torre de destilación donde se vaporizan los componentes o fracciones más livianas (más volátiles), y se separa para su posterior refinamiento en nafta, gasolina, kerosene, y otros productos derivados del petróleo.

El residuo de este proceso de destilación es la fracción pesada del petróleo crudo, comúnmente llamado crudo reducido. Puede ser usado como fuel oil residual, o

procesado en distintos productos, entre ellos el asfalto. Para separar la fracción asfalto del crudo reducido se puede utilizar un proceso de extracción mediante solventes. Luego, se refina la mayor parte de esta fracción para obtener el cemento asfáltico. Según el proceso de refinación usado se obtiene cementos asfálticos de muy alta o de baja consistencia. Estos productos se mezclan después, en cantidades adecuadas para obtener cementos asfálticos de la consistencia deseada. Los asfaltos sopladados se producen insuflando aire a altas temperaturas al asfalto de consistencia adecuada.

- **Cementos asfálticos**

Son preparados especialmente por presentar cualidades y consistencias propias para su uso directo en la construcción de pavimentos asfálticos. Es un material ideal para aplicaciones en trabajos de pavimentación por sus propiedades aglutinantes, impermeabilizantes, flexibilidad, durabilidad y alta resistencia a los ácidos y álcalis en general. Se clasifican de acuerdo a su consistencia medida por la viscosidad dinámica o absoluta y por su penetración (PEN).

Los asfaltos se producen por la refinación del petróleo en unidades de destilación primaria y de vacío. El producto obtenido del fondo de la destilación primaria (crudo reducido) es destilado a 26 mm Hg. de presión de vacío y alta temperatura (del orden de 700° F). El producto obtenido por los fondos de la torre de vacío se llama “Residual Asfáltico” o Cemento Asfáltico de Petróleo (CAP), semisólido a temperatura ambiente. Dicho CAP es obtenido a diferentes viscosidades las que miden su consistencia.

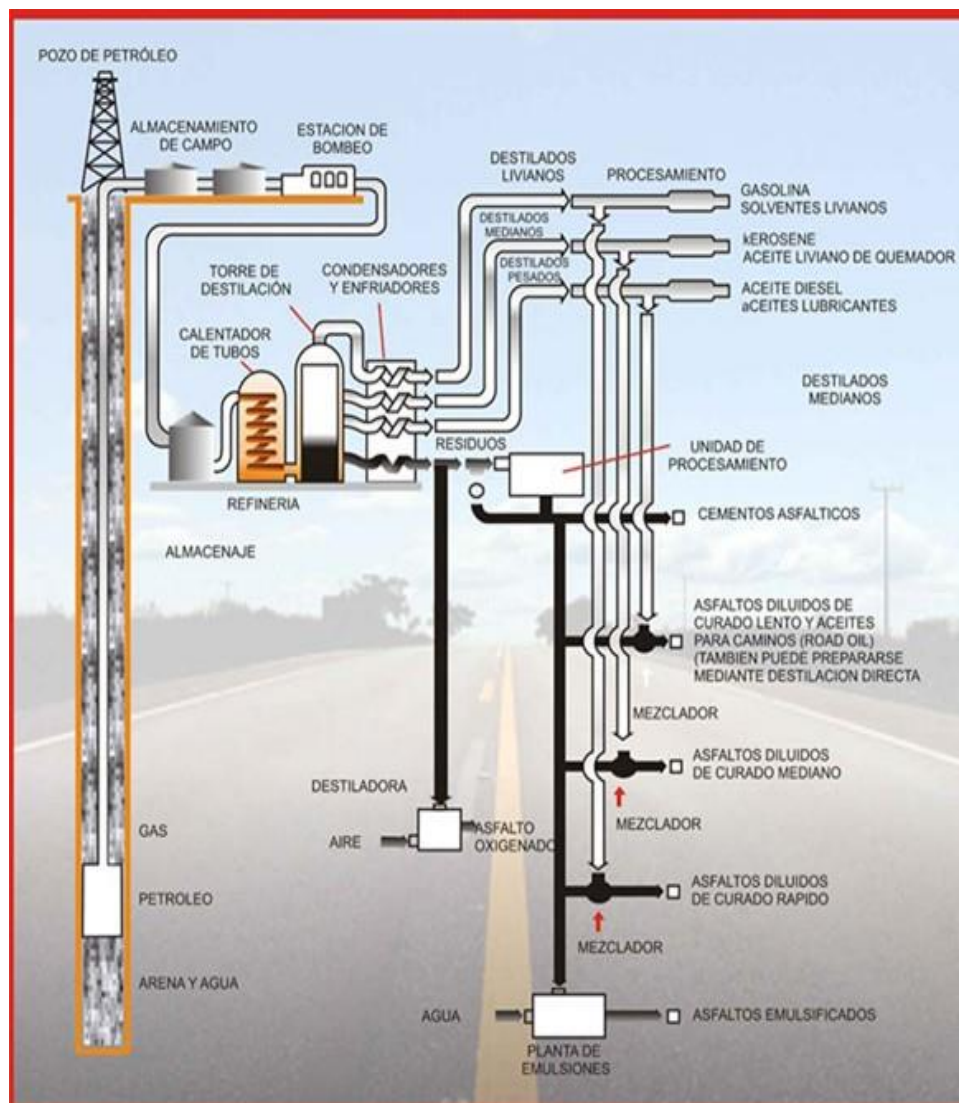
Los asfaltos obtenidos son denominados con la siguiente nomenclatura:

CAP PEN: 60/70 **(Penetración 60 a 70)**

CAP PEN: 85/100 **(Penetración 85 a 100)**

En la Figura, se observa el proceso por el cual tiene que pasar el petróleo para poder obtener el cemento asfáltico.

Ilustración 1: Diagrama de flujo para asfalto de petróleo



Fuente: Introducción al asfalto, Manual seriado No. 5, 8ª. Edición, Instituto del Asfalto, Lexington, Ky., 1993

2.2.2 Polvo mineral o filler.

El filler, o polvo mineral, es la fracción que pasa por el tamiz de 0,063 mm, por lo que tiene una levada superficial específica. Precisamente por esto, desempeña un papel fundamental en el comportamiento de las mezclas bituminosas, en función de su naturaleza, finura, actividad y proporción en la que entra a formar parte de la mezcla. La unión de ligante y polvo mineral se denomina mástico. El término filler hace referencia a

que se trata de una fracción que supuestamente rellena los huecos dejados por las partículas más gruesas, aunque esta no es su misión fundamental.

En las mezclas bituminosas se emplea polvo mineral que puede ser el contenido en los áridos, procedente de su trituración, un producto comercial de en estado de polvo (normalmente cemento, y en ocasiones cenizas volantes de central térmica) o un polvo (por lo general calizo) especialmente preparado para este fin. Esta fracción sólo se considera por separado de la fracción fina en las mezclas bituminosas, en las que las normas dan unas recomendaciones sobre si el polvo mineral puede ser el propio de los áridos o debe ser, todo o en parte, de aportación.

El polvo mineral o fíller, también tiene que ser caracterizado, y para ello se utilizan dos ensayos. Uno de ellos es el de densidad aparente, que estimará si es muy fino (baja densidad aparente), y puede dar problemas de mezcla con el ligante, o si es muy grueso (alta densidad aparente), e influirá muy poco en el mástico. El otro ensayo es el de emulsibilidad, con el que se analiza si el polvo mineral presenta mayor afinidad con un ligante tipo que con el agua, ya que el polvo mineral no debe ser hidrófilo.

2.2.3 Agregados

Agregado, también conocido como roca, o agregado mineral, es cualquier material mineral duro e inerte usado, en forma de partículas graduadas o fragmentos, como parte de un pavimento de mezcla asfáltica en caliente. Los agregados típicos incluyen arena, grava, piedra triturada, escoria, y polvo de roca. El agregado constituye entre el 90 y el 95%, en peso, y entre el 75% y el 85%, en volumen, de la mayoría de las estructuras de pavimento. El comportamiento de un pavimento se ve altamente influenciado por la selección apropiada del agregado, debido a que el agregado mismo proporciona la mayoría de las características de capacidad portante.

2.2.3.1 Clasificación de agregados

Las rocas se dividen en tres tipos generales: sedimentarias, ígneas, y metamórficas. Esta clasificación está basada en el tipo de formación de cada roca.

Rocas sedimentarias: Las rocas sedimentarias se forman por la acumulación de sedimentos (partículas finas) en el agua, o a medida que el agua se deposita. El sedimento puede consistir de partículas minerales o fragmentos (como es el caso de las areniscas y la arcilla esquistosa), de residuos de productos animales (algunas calizas), de plantas (carbón), de los productos finales de una acción química o una evaporación (sal, yeso), o de la combinación de cualquiera de estos tipos de materiales.

Dos términos que usualmente se aplican a rocas sedimentarias son silíceo y calcáreo. Rocas sedimentarias silíceas son aquellas que contienen un porcentaje alto de sílice. Aquellas rocas que contienen un alto porcentaje de carbonato de calcio (calizas) son llamadas calcáreas.

Las rocas sedimentarias se encuentran, característicamente, en capas (estratos), dentro de la corteza terrestre. Esta estratificación es el resultado directo de la manera en que se formaron las rocas sedimentarias: a partir de depósitos de partículas finas, generalmente sedimentados sobre el fondo de lagos o mares antiguos.

Rocas ígneas: Las rocas ígneas constan de material fundido (magma) que se ha enfriado y solidificado. Hay dos tipos de rocas ígneas: extrusivas e intrusivas.

Las rocas ígneas extrusivas son formadas a partir del material que se ha vertido afuera, sobre la superficie terrestre, durante una erupción volcánica o alguna actividad geológica similar. La roca resultante tiene una apariencia y estructura vidriosa, debido a que el material se enfría rápidamente al ser expuesto a la atmósfera. La riolita, la andesita, y el basalto son ejemplos de rocas extrusivas.

Las rocas intrusivas, por otro lado, se forman a partir del magma que queda atrapado en las profundidades de la corteza terrestre. Al ser atrapado en la corteza, el magma se enfría y endurece lentamente, permitiendo la formación de una estructura cristalina. En consecuencia, la roca ígnea intrusiva es cristalina en estructura y apariencia; siendo ejemplos el granito, la diorita y el gabro. Los movimientos terrestres y los procesos de erosión traen rocas intrusivas a la superficie terrestre, donde pueden ser explotadas en cantera y posteriormente usadas.

Rocas metamórficas: Las rocas metamórficas son, generalmente, rocas sedimentarias o ígneas que han sido transformadas por procesos de intensa presión y calor dentro de la tierra, y también por reacciones químicas. Es muy difícil determinar el origen exacto de una roca metamórfica en particular, debido a que los procesos de formación son muy complejos.

Muchos tipos de rocas metamórficas presentan un rasgo característico: los minerales están alineados en capas o planos paralelos. Partir la roca en el sentido de sus planos es mucho más fácil que partirla en sus otras direcciones. Las rocas metamórficas que exhiben este tipo de estructura se denominan foliadas. Ejemplos de rocas foliadas son las gneises, los esquistos (formados de rocas ígneas) y la pizarra (formado de la arcilla esquistosa; una roca sedimentaria).

No todas las rocas metamórficas son foliadas. El mármol (formado de las calizas) y la cuarcita (formada de las areniscas) son tipos comunes de rocas metamórficas que no presentan foliación.

2.2.3.2 Fuentes de agregados

Los agregados usados en el pavimento asfáltico se clasifican, generalmente, de acuerdo a su origen. Estos incluyen: agregados naturales, y agregados procesados.

Agregados naturales: Los agregados naturales son aquellos que son usados en su forma natural, con muy poco o ningún procesamiento. Ellos están constituidos por partículas

producidas mediante procesos naturales de erosión y degradación, tales como la acción del viento, el agua el movimiento del hielo, y los químicos. La forma de las partículas individuales es un producto, a la larga, de los agentes que actúan sobre ellas. Los glaciares, por ejemplo, usualmente producen rocas y guijarros redondeados. Así mismos, las corrientes de agua producen partículas lisas y redondeadas.

Los principales tipos de agregado natural usados en la construcción de pavimento son la grava y la arena. La grava se define, usualmente, como partículas de un tamaño igual o mayor que 6.35 mm (1/4 pulgada). La arena se define como partículas de un tamaño menor que 6.35 mm (1/4 pulgada) pero mayor que 0.075 mm (N° 200). Las partículas de un tamaño menor que 0.075 mm (N° 200) son conocidas como relleno mineral (filler), el cual consiste principalmente de limo y arcilla.

Las gravas y las arenas son clasificadas, además, de acuerdo a su origen. Los materiales producidos en canteras abiertas y usados sin ningún procesamiento adicional son conocidos como materiales en bruto, y los materiales tomados de la ribera de los ríos son conocidos como materiales de canteras de ríos.

Los depósitos de gravas varían ampliamente en composición, pero usualmente contienen alguna cantidad de arena y limo. Los depósitos de arena también contienen, comúnmente, alguna cantidad de arcilla y limo. Las arenas de playa (algunas de las cuales se encuentran tierra adentro hoy día) están compuestas de partículas de tamaño regularmente uniforme, mientras que las arenas de río contienen proporciones grandes de grava, limo y arcilla.

Agregados procesados: Los agregados procesados son aquellos que han sido triturados y tamizados antes de ser usados. Existen dos fuentes principales de agregados procesados: gravas naturales que son trituradas para volverlas más apropiadas para pavimento de mezcla asfáltica, y fragmentos de lecho de roca y de piedras grandes que deben ser reducidos en tamaño antes de ser usados en la pavimentación.

La roca es triturada por tres razones: para cambiar la textura superficial de las partículas de lisa a rugosa, para cambiar la forma de la partícula de redonda a angular, y para reducir y mejorar la distribución y el rango (graduación) de los tamaños de las partículas. El propósito principal de la trituración, en el caso de los fragmentos de lechos de roca y de piedras grandes, es reducir las piedras a un tamaño que sea manejable. Sin embargo, los cambios en la textura superficial, y en la forma de las partículas, son también muy importantes.

El tamizado de los materiales, después de triturarlos, resulta en una granulometría con cierto rango de tamaño de partícula. Un factor importante en la construcción de pavimentos de buena calidad consiste en mantener graduaciones específicas de agregados. Sin embargo, por razones económicas, el material triturado es usado tal y como sale del triturador, con muy poco o ningún tamizado. Un control adecuado de las operaciones de triturado sin cribar, y es usado satisfactoriamente en muchos proyectos de construcción de pavimento. Sin embargo, es esencial garantizar que la operación de triturado sea continuamente supervisada para poder producir un agregado que cumpla con las especificaciones.

El triturado de algunos tipos de roca, como las calizas, produce cantidades substanciales de pequeños fragmentos y partículas. Esta fracción de material es separada de las partículas que tienen diámetros iguales o mayores 6.35 mm (1/4 pulgada), casi siempre, y usada como agregado de una arena triturada, o procesada hasta tamaños máximos de 0.60 mm (N° 30).

Fotografía 1: Agregado procesado triturado y tamizado



Fuente: Elaboración propia

2.3 DOSIFICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

2.3.1 Caracterización y criterios de aceptación de los materiales componentes.

En éste y, en realidad, en todos los métodos de dosificación, el primer paso es caracterizar a los materiales que se van a utilizar y definir su aptitud o no, para formar parte de la mezcla a formular.

Ya se mencionó la importancia de la calidad de los componentes en el producto final. Por ello, y como paso ineludible del proceso, deben determinarse las cualidades de los agregados pétreos, del fíller, del ligante asfáltico y de otros eventuales materiales intervinientes en la mezcla.

Las mezclas asfálticas son sistemas cohesivos compuesto por tres fases: una sólida (agregados, filler, etc), un líquido de elevada viscosidad (asfalto) y por último una gaseosa (aire). Las proporciones relativas en que se combinan estos, determinan las características físico-mecánicas de las mezclas y el comportamiento posterior como pavimento terminado. Los áridos pétreos deben cumplir exigencias granulométricas (es

decir, de tamaño máximo y graduación), y condiciones de limpieza, dureza, forma, porosidad y textura. Los filleres o “rellenos minerales”, que son materiales naturales (fracción más fina de los agregados pétreos) o artificiales pulverizados (cal, cemento, polvo calizo) que pasan el tamiz N° 200, se usan para cumplir con condiciones de granulometría pero, además, conforman con el asfalto el mástic o sistema fíller-betún, aportando consistencia al medio ligante, adherencia con los áridos y propiedades antioxidantes inhibitoras del envejecimiento del asfalto; el contenido de fíller se acota pues un exceso del mismo determinaría una rigidización indeseada de la mezcla, usándose en nuestro medio el ensayo de “concentración crítica” para limitar el porcentaje de relleno mineral en la mezcla. El ligante asfáltico debe cumplir una serie de requisitos físico-químicos; el tipo de asfalto a utilizar en una obra depende principalmente de cuestiones climáticas, necesitándose ligantes más consistentes o viscosos en regiones cálidas y, contrariamente, ligantes más “blandos” (menos viscosos) en zonas frías. En primera instancia, es importante que todas las muestras de materiales tengan exacta correlación con los que van a ser usados en la obra.

Para su ensayo, los áridos deben ser secados previamente, aun cuando en algunos ensayos deberán ser sumergidos en agua. Deberá realizarse la batería de tests que prevé el Pliego y, eventualmente, algún otro complementario que la Inspección o el proyectista de la mezcla considere conveniente.

El asfalto, por su parte, si la muestra está contenida en latas de más de medio litro de capacidad, convendrá trasvasarlo a recipientes de menor volumen para su correcto manipuleo en el laboratorio. Debe hacerse este paso cuidando de no calentar demasiado al ligante, sometiéndolo al menor calentamiento posible que permita el trasvase, para no envejecerlo prematuramente. En el laboratorio se suelen efectuar varios ensayos, aunque ciertos datos de interés pueden extraerse del protocolo o certificado de ensayos que debe suministrar la empresa proveedora del asfalto, en particular debe conocerse la relación viscosidad-temperatura del cemento asfáltico para establecer las temperaturas de mezclado y compactación en el laboratorio.

Los pliegos técnicos especifican los valores admisibles de resultados de los ensayos previstos. De todas maneras, es posible aplicar algunos criterios prácticos de selección que no están explicitados en estos documentos; por ejemplo, si se dispone de dos o más fuentes posibles de provisión de un determinado material, más allá que todas cumplan las exigencias es posible implementar pautas para elegir el producto más conveniente desde el punto de vista técnico.

Los áridos gruesos son los que proveen la mayor parte de la estructura granular del aglomerado; por lo tanto, es conveniente priorizar su forma y su resistencia; se sugiere, entonces, darles prioridad a los resultados de índice de lajas y de desgaste Los Ángeles. Otra prueba comparativa de interés es la absorción, pues influirá en la cantidad de ligante final a emplear, aconsejándose optar por áridos menos absorbentes.

Respecto de los áridos finos, si se dispone de más de una alternativa de provisión que cumpla con los requisitos especificados, una variable que puede hacer inclinar la balanza hacia una u otra posibilidad en ciertas mezclas es el contenido de la fracción más fina, en especial el pasante del tamiz N°200, hecho que puede llegar a hacer ahorrar una adición elevada de filler comercial.

Tanto en agregados finos como gruesos también debe prestarse atención preferencial a la adherencia con el ligante; si alguno de los potenciales materiales denota una mejor respuesta en esta propiedad, debería ser considerado como la mejor posibilidad.

En los asfaltos convencionales, si se puede elegir entre dos posibles marcas que cumplen con las exigencias, deben compararse aspectos relacionados con el clima y con el tránsito previsto en la obra, hechos que pueden influir en la decisión de usar el ligante con más o con menos consistencia entre los comparados.

En los ligantes modificados la calidad suele relacionarse con un par de parámetros de ensayo: la recuperación elástica y la estabilidad al almacenamiento.

En los filleres, si no se especifica cuál material comercial emplear, debe dejarse en claro, por un lado, que la cal posee cualidades superlativas, muy superiores al fíller calizo y al cemento Portland; pero, por otra parte, por cuestiones relacionadas con su poder rigidizante, analizable en el ensayo de Concentración Crítica, debe tenerse presente que la posibilidad de incorporación a la mezcla es más limitada que los otros filleres cálcicos comerciales mencionados.

2.3.2 Método de dosificación Marshall.

Este procedimiento de dosificación tiene por objeto determinar las proporciones de los materiales a partir del cumplimiento de una cierta granulometría específica de agregados y, fundamentalmente, de la obtención del contenido óptimo de asfalto. Para ello se apoya en el análisis de las propiedades de la mezcla asfáltica en caliente, y establece parámetros mecánicos y volumétricos que fundamentan sus principios: estabilidad y fluencia Marshall, densidades y contenidos óptimos de vacíos que deben cumplirse en la mezcla durante la fase de formulación y en los procesos constructivos de la pavimentación.

En este Método se utilizan, para las evaluaciones y determinaciones, las denominadas “probetas Marshall”, especímenes cilíndricos de laboratorio de confección normalizada, de 10,16 cm de diámetro y 6,35 cm de altura (o 4” de diámetro y 2,5” de altura). En la implementación del proceso se fabrican series de probetas con la misma combinación porcentual de agregados, pero variando el porcentaje o tenor de asfalto, para poder compararlas analíticamente y definir las proporciones finales óptimas. El moldeo se efectúa a la temperatura óptima de compactación de la mezcla, que depende de la viscosidad del ligante y que se puede obtener del nomograma de Heukelom, que relaciona la consistencia del asfalto con su temperatura; se aplica una energía de compactación que consiste en aplicar 50 o

75 golpes por cara (de acuerdo a las características del tránsito que circulará por el camino) a la mezcla caliente colocada dentro del molde, con un pisón de forma, peso y altura de caída normalizados.

Esta técnica sólo es aplicable a las mezclas asfálticas en caliente de granulometría continua con tamaño máximo de agregados de 25 mm (1”), cuyo ligante es un cemento asfáltico clasificado, y puede ser empleada tanto para el diseño en laboratorio como para el control de calidad de ejecución durante las obras de pavimentación vial.

Fotografía 2: Equipo Marshall



Fuente: Elaboración propia

2.3.3 Método de diseño Marshall

2.3.3.1 Caracterización de los materiales pétreos.

Es importante que la mezcla sea diseñada de tal forma que pueda ser colocada con facilidad, evitando segregaciones.

Previo al diseño de la mezcla se deben analizar tanto los agregados como el asfalto para decidir si son aptos para la construcción del pavimento.

Los agregados deben ser limpios, tenaces y durables y lo más importante deben tener una granulometría de acuerdo a especificación.

Las especificaciones generales que deben cumplir son:

- Granulometría
- Resistencia al desgaste
- Solidez
- Limpieza y pureza
- Rozamiento interno
- Propiedades superficiales

Granulometría

Indica la distribución de los diferentes tamaños de las partículas.

De la granulometría se desprenden los diferentes tipos de graduaciones:

- Semidensas o densas (carpetas de rodado / ciclovías)
- Semiabiertas (binder y bases) y
- Abiertas (bases).

Cuadro 2: Tipo de gradaciones según granulometría

Tipo de graduación	Porcentaje que pasa tamiz N° 8
Abierta	5-20
Gruesa	20-35
Semi densa	28-42
Densa	35-50
Fina	>50

Fuente: Manual de carretera V4C de Administración Boliviana de Camino

Resistencia al desgaste

Los agregados deben ser resistentes para poder soportar el rodillado durante el proceso constructivo y enseguida la acción del tráfico.

Para ello se debe realizar el método de ensayo “Desgaste de los ángeles”.

Ilustración 2: Máquina de los ángeles

Fuente: Caminos – UPM – Universidad Politécnica de Madrid

Ensayo de los sulfatos (solidez)

Los agregados usados en los pavimentos asfálticos no se deben disgregar bajo la acción de los agentes atmosféricos.

Limpieza y pureza

Se determina en forma visual, pero en el caso de dudas se recomienda efectuar un tamizado por vía húmeda.

Rozamiento interno

Es una propiedad muy importante de los áridos, ya que los áridos chancados tienden a impedir el desplazamiento de las partículas bajo la acción de una carga; debido al roce y trabazón entre partículas de agregado.

Su influencia se refleja en los valores obtenidos en el Ensayo de estabilidad Marshall.

Fotografía 3: Grava 3/4"

Fuente: Elaboración propia

Fotografía 4: Gravilla 3/8"

Fuente: Elaboración propia

Propiedades superficiales

Para que un pavimento asfáltico resulte resistente y durable es necesario que los asfaltos adhieran bien a los agregados pétreos.

Para ello, se realizan diferentes ensayos de adherencia agregado - bitumen. Estos sirven para evaluar la capacidad de adherencia y despegue entre áridos y ligantes empleados en la mezcla.

Fotografía 5: Cementos asfálticos convencionales



Fuente: Elaboración propia

El agregado pétreo debe encontrarse recubierto con una película de asfalto lo suficientemente conveniente para ser sometida al proceso de compactación sin ser alterada.

El espesor de película de asfalto que recubre el agregado pétreo es un factor importante que regula el comportamiento de las mezclas a través de los parámetros de estabilidad y durabilidad.

2.3.3.2 Ensayos de control en cementos asfálticos

El asfalto es un material termoplástico, por lo que su consistencia varía en mayor o menor grado con la temperatura. Si se quiere realizar comparaciones entre ellos, es necesario medir si su consistencia a una misma temperatura es igual a su condición de

carga. Los ensayos más utilizados para medir la consistencia de los cementos asfálticos son los siguientes:

- **La viscosidad**

Una de las propiedades que más interesan desde el punto de vista ingenieril es la viscosidad de los asfaltos. La viscosidad se define como la resistencia que ofrece un fluido a la deformación, debida básicamente al rozamiento interno de las moléculas. Cuanto más elevada sea su viscosidad, mucho más lento será su movimiento.

Medida de la viscosidad Saybolt furol: Para medir la viscosidad del cemento asfáltico a temperaturas altas de mezclado (alrededor de 135 °C), es común utilizar el viscosímetro Saybolt equipado con un orificio Furol.

Este ensayo se emplea normalmente para cut backs, emulsiones y roads oils. Y sirve para determinar el tiempo, en segundos, necesario para que pasen 60 ml. de líquido, a cada una de las temperaturas dadas, a través de un tubo de dimensiones estándar. Es necesario dar una serie de temperaturas, porque los asfaltos más viscosos no fluyen con rapidez a través del tubo a la temperatura normal de 77 °F (25°C).

Ilustración 3: Viscosímetro Saybolt furol



Fuente: <http://asfalca.com/viscosímetro-saybolt-furol-vs-paletas>

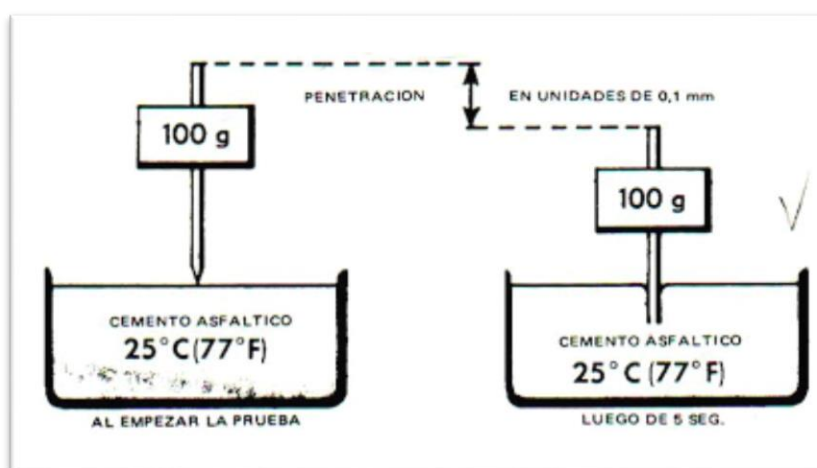
El ensayo consiste en colocar un determinado volumen de cemento asfáltico en un tubo normalizado y cerrado con un tapón, que se calienta usando el aceite del baño termostático del viscosímetro. Después de que el asfalto alcanza la temperatura

requerida, se saca el tapón y se mide el tiempo en segundos que tarda en fluir 60 ml del material a través del orificio furol. Los valores se expresan en segundo Saybolt furol (SSF).

- **La penetración**

Es un ensayo empírico usado para medir la consistencia del cemento asfáltico a temperaturas medias de servicio. Usualmente se mide a 25° C (77° f), considerada como la temperatura media en servicio de la mezcla asfáltica.

Ilustración 4: Ensayo de Penetración



Fuente: <http://ingenieriaenconstruccion-ua.blogspot.com>

El ensayo consiste en calentar una muestra de asfalto de 25 °C (o a una temperatura definida con anterioridad) en un baño de agua controlada termostáticamente. Una aguja normalizada de 100 g se hace penetrar en la superficie de la muestra durante un tiempo de 5 segundos. La penetración se mide como la distancia en décimas de milímetro que la aguja penetra el cemento asfáltico durante un tiempo de 5 segundos (Ilustración 4). Por ejemplo, si fue necesario penetrar 8 mm, la penetración del cemento asfáltico es de 80. La penetración es un ensayo normalizado según la norma AASHTO T-49. El ensayo se puede realizar a otras temperaturas, aunque el cargado el tiempo de penetración puede variar. A bajas temperaturas se utiliza un peso de 200 g y un tiempo de 60 segundos.

- **El punto de ablandamiento**

Se mide a través del ensayo de anillo y bola (ring and ball). Se define como la temperatura a la cual el asfalto no puede soportar una carga de una bola de acero y comienza a fluir. Todos los asfaltos son materiales termoplásticos, por lo que no es posible hablar de un punto de fusión en el término estricto de la palabra. Se ha definido por conveniencia, un punto de ablandamiento convencional, dado por la temperatura a la que alcanza un determinado estado de fluidez.

Ilustración 5: Punto de ablandamiento anillo y bola



Fuente: <http://ingenieriacivilfacil.blogspot.com>

El punto de ablandamiento es utilizado para clasificar los cementos asfálticos, generalmente se utiliza para medir la consistencia de los asfaltos usados como impermeabilizantes comerciales.

- **Peso específico**

Se define como la relación entre la masa del material a una temperatura dada y la masa de igual volumen de agua a la misma temperatura. El peso específico cambia cuando el asfalto se expande por calentamiento.

La determinación del peso específico del cemento asfáltico a diversas temperaturas es de gran interés práctico por sus numerosas aplicaciones en las que se precisó emplear una cantidad determinada del material caliente, siendo más fácil medir volúmenes que pesos.

El peso específico del cemento asfáltico varía según su origen y proceso de obtención, manteniéndose siempre sensiblemente igual a la unidad. En asfaltos del mismo origen, el peso específico aumenta cuando la penetración disminuye. El método del picnómetro (AASHTO T 280) es el más utilizado para su determinación. Generalmente se expresa en términos de peso específico a una temperatura dada para ambos materiales: agua y cemento asfáltico. Un peso específico tiene de 1.040 a 25 °C/°C significa que el cemento asfáltico tiene un peso específico de 1.040 cuando el agua y el cemento asfáltico están a una temperatura de 25 °C.

2.3.4 Objetivo del diseño de la mezcla

El objetivo principal es encontrar la combinación más económica agregado-asfalto, que dé a la mezcla las siguientes propiedades:

Cuadro 3: Propiedades de las mezclas asfálticas

Propiedades de las mezclas asfálticas	
Estabilidad	Propiedad Estructural
Durabilidad	Propiedad de Construcción y Servicio
Impermeabilidad	Propiedad de Construcción y Servicio
Trabajabilidad	Propiedad de Construcción y Servicio
Flexibilidad	Propiedad Estructural
Resistencia a la Fatiga	Propiedad Estructural
Resistencia al Deslizamiento	Propiedad Funcional

Fuente: Elaboración propia

Estabilidad

Es la capacidad de un pavimento asfáltico para resistir las cargas de tránsito sin que se produzcan deformaciones. Depende de la FRICCIÓN INTERNA y trabazón entre agregados.

- **Fricción interna (ϕ):** Depende de la Textura Superficial, Forma de los Agregados, Densidad de la Mezcla, Granulometría y Cantidad de Asfalto.

- El conjunto de Agregados Pétreos se debe comportar como una masa elástica uniforme en vez de un conjunto de partículas individuales.

Durabilidad

Es la capacidad de un pavimento de resistir la desintegración debido al tránsito, al clima y pérdida de COHESIÓN al paso del tiempo.

- **Cohesión:** Es la fuerza aglomerante del ligante con el agregado; ayuda a aumentar la resistencia al corte de la mezcla; varía con la temperatura; y aumenta con la cantidad de asfalto hasta un máximo, para luego decrecer.

Impermeabilidad

Es la resistencia del pavimento a ser penetrado por el agua y el aire.

Trabajabilidad

Es la facilidad que tiene una mezcla para ser colocada y compactada, está relacionado con el tipo y porcentaje de agregado, además de la temperatura de mezclado y compactación.

Flexibilidad

Es la capacidad de un pavimento asfáltico para adaptarse a los movimientos y asentamientos de la base y subrasante sin agrietarse.

Resistencia a la fatiga

Es la capacidad de un pavimento para resistir los esfuerzos provocados por el tránsito en repetidas pasadas (Vida Útil).

Resistencia al deslizamiento

Es una cualidad que debe presentar un pavimento especialmente mojado para ofrecer resistencia al patinaje o a la posibilidad de hidroplaneo.

2.4 FRACTURA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

El análisis de las diferentes formas en la que un material puede fallar se ha convertido en uno de los aspectos más importantes a evaluar. La investigación en el comportamiento que tienen los materiales bajo diferentes condiciones de trabajo, ha tenido como consecuencia el desarrollo en diferentes áreas para tratar de resolver el problema.

El tipo de falla que presenta cualquier material está totalmente relacionado con el origen de la misma, la falla originada por una fractura es uno de los problemas principales en los materiales. Una fractura se puede definir como la separación de un sólido que es sometido a un esfuerzo en dos o más partes.

En general las fracturas que sufren los materiales se pueden clasificar en dos tipos:

- Fractura dúctil
- Fractura frágil

En algunas ocasiones ambas fracturas pueden ocurrir en el mismo material, pero por lo general las fracturas son totalmente dúctiles o totalmente frágiles.

2.4.1 Fractura dúctil.

Una fractura dúctil ocurre después de que un material es sometido a una deformación plástica excesiva, esto quiere decir que este tipo de fractura aparece en aquellos materiales que tienen una zona de deformación plástica considerable, este tipo de fractura se puede reconocer por las siguientes características:

Deformación de cuello de botella en el área fracturada.

Deformación plástica permanente.

Elongación del material

Reducción del área transversal

Otra consideración importante es que la carga máxima y la carga de fractura no es la misma, esto se debe a que el material se deforma plásticamente alcanza su carga máxima, y después empieza a ceder hasta el punto de fracturarse. Se ha comprobado que una de las principales causas que ocasionan que se origine este tipo de fractura son las impurezas del material, y las inclusiones que esta pueda tener.

2.4.2 Fractura frágil

Una fractura frágil es aquella que ocurre antes o durante el momento en el que se presenta una deformación plástica. Este tipo de fractura se presenta principalmente en aquellos materiales no cristalinos, en presencia de temperaturas muy bajas, (cuando las temperaturas son muy bajas no existe ningún movimiento atómico, esto evita que se presente una deformación plástica) y en la aplicación de esfuerzos muy elevados.

La forma en la que se presenta la fractura frágil se puede definir en dos pasos:

Inicio de la fractura a nivel intragranular.

Propagación de la fractura.

Para iniciar una fractura a nivel intragranular, es necesario desarrollar un esfuerzo normal en un área determinada por un par de cristalinos, este esfuerzo debe ser mayor a la resistencia de adhesión de los planos.

Existen dos condiciones para que el esfuerzo intragranular aparezca por medio de una deformación plástica:

- Las dislocaciones provocadas por la deformación deben actuar entre sí para generar largas concentraciones de esfuerzos.
- El material no debe aumentar su resistencia a los esfuerzos a causa de la deformación.

La propagación de la fractura en el material depende principalmente de las características plásticas del material.

CAPÍTULO III

INVESTIGACIÓN SOBRE ENSAYOS DE FRACTURA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

3.1 INTRODUCCIÓN

Para el presente proyecto, se realizó el estudio para 5 diferentes mezclas asfálticas, cada una de estas corresponden a distintos lugares dentro del departamento de Tarija, los lugares estudiados son los siguientes:

- TRAMO SANTA ANA-YESERA
- TRAMO TOMATITAS- ERQUIZ CEIBAL- CRUCE CADILLAR
- TRAMO SANTA BARBARA
- TRAMO BERMEJO-SAN ANTONIO
- TRAMO PUERTA AL CHACO-CANALETAS-VILLA MONTES

Las mezclas en caliente para pavimentos, son consideradas desde hace mucho tiempo, como un producto disponible a un costo accesible, que proporciona un adecuado diseño con excelente comportamiento como pavimento flexible, es por esta razón que en nuestras carreteras se emplea este tipo de mezclas asfálticas por el método de dosificación Marshall, para cada uno de nuestros diferentes tramos se procedió con la obtención del material empleado en cada tramo, se caracterizaron los materiales que fueron utilizados como ser los diferentes agregados pétreos y así también los diferentes cementos asfálticos, para su posterior dosificación por el método Marshall, y una vez obtenidas las probetas Marshall finalmente se las llevó a ensayos Marshall (estabilidad y fluencia), y se realizó en base a los resultados obtenidos los análisis correspondientes y así determinar la fatiga que presenta cada tramo y evaluar el comportamiento del mismo.

3.2 UBICACIÓN

ESTUDIO 1. TRAMO SANTA ANA-YESERA

El tramo Santa Ana-Yesera está ubicado al este de la ciudad de Tarija a unos 25 Km. Aproximadamente, con una longitud de 20, 073 km, que abarca hasta Yesera Norte, este tramo se encuentra conectado con el tramo de la red fundamental Tarija-Entre Ríos.

El Área de estudio se encuentra en el interior de la cadena montañosa de la cordillera Oriental de Los Andes, constituida predominantemente por rocas de los sistemas Ordovícico (lutitas, limonitas, areniscas, cuarcitas y filitas), con presencia de Cuaternario en la parte Central de las sub cuencas de Calderas y Yesera, las pendientes de las laderas son bastantes fuertes lo que favorece el rápido escurrimiento superficial. La vegetación corresponde a un clima o piso ecológico de Tierras Altas, con variaciones de los pisos ecológicos que llegan en la parte media hasta el bosque espinoso montañoso bajo subtropical.

ESTUDIO 2. TRAMO TOMATITAS-ERQUIZ CEIBAL-CRUCÉ CADILLAR

El tramo Tomatitas – Erquiz Ceibal – Cruce Cadillar, se encuentra ubicado íntegramente en la Primera Sección de la Provincia Méndez en el Departamento de Tarija.

Esta carretera constituye uno de los caminos vecinales más importantes para el desarrollo del turismo y la vinculación de una región altamente potencial en la agricultura, con la red fundamental de Carreteras y la ciudad de Tarija ubicada a 8 km.

El Camino tiene una longitud de 16,12 km., que se inicia en Cruce Cadillar y continua hacia el oeste hasta llegar a Erquiz Ceibal y Tomatitas. Las pendientes relativamente más altas se encuentran al inicio del tramo, al final la pendiente es media.

ESTUDIO 3. TRAMO SANTA BÁRBARA

El tramo Santa Bárbara, se encuentra ubicado íntegramente en la Primera Sección de la Provincia Méndez, en el Departamento de Tarija.

Esta carretera constituye uno de los caminos vecinales más importantes para el desarrollo del turismo y la vinculación de una región altamente potencial en la agricultura, con la red fundamental de Carreteras y la ciudad de Tarija.

ESTUDIO 4. TRAMO BERMEJO- SAN ANTONIO

El tramo Bermejo – San Antonio, se encuentra ubicado íntegramente en la Sección de la Provincia Arce en el Departamento de Tarija.

Esta carretera constituye uno de los caminos interprovinciales más importantes para el desarrollo del turismo y la vinculación de una región altamente potencial en la agricultura, con la red fundamental de Carreteras y la ciudad de Tarija ubicada a aproximadamente unos 200 km de la Ciudad.

ESTUDIO 5. TRAMO PUERTA AL CHACO-CANALETAS-VILLA MONTES

El Tramo Puerta al Chaco-Canaletas-Villa Montes, se encuentra enlazando las provincias de Cercado, O'Connor y Gran Chaco del Departamento de Tarija, está ubicada en la faja Sub Andina Sur (Chaco Tarijeño), morfológicamente está caracterizado por serranías formado por altos topográficos, con afloramiento de sedimentos sueltos cuaternarios, cuenta con una longitud aproximada de 222 km., el tramo se inicia en la localidad de Puerta al Chaco y termina en la Ciudad de Villa Montes.

3.3 DESCRIPCIÓN

ESTUDIO 1. TRAMO SANTA ANA-YESERA

Para la fabricación de probetas de mezclas asfálticas de este tramo, se emplearon tanto gravas como el material fino procedentes de la Chancadora Vafercon, ubicada en la localidad de Tolomosa, el cemento asfáltico 85-100 empleado de procedencia petrolera STRATURA ASFALTOS (Brasil), los mismos que fueron caracterizados según Normas AASTHO y especificaciones del proyecto, más adelante se muestran resultados.

**Cuadro 4: Procedencia de materiales para el tramo Santa Ana - Yesera
(Estudio 1)**

ESTUDIO 1. SANTA ANA-YESERA			
Materiales	%	Unidad	Procedencia
3/4" - 3/8"	31,25	En peso	Chancadora Vafercon
3/8" - N° 4	21,78	En peso	Chancadora Vafercon
Arena	41,67	En peso	Chancadora Vafercon
Cemento asfáltico	5,30	En peso	85-100 STRATURA ASFALTOS (Brasil)
TOTAL	100		

Fuente: Elaboración propia

ESTUDIO 2. TRAMO TOMATITAS-ERQUIZ CEIBAL-CRUCE CADILLAR

Para la fabricación de probetas de mezclas asfálticas de este tramo, se emplearon tanto gravas como el material fino procedentes de la Chancadora de San José de Charaja, ubicada en la localidad del mismo nombre, el cemento asfáltico usado de procedencia petrolera STRATURA ASFALTOS (Brasil), los mismos que fueron caracterizados según normas AASTHO y especificaciones del proyecto, más adelante se muestran resultados.

**Cuadro 5: Procedencia de materiales para el tramo Tomatitas - Erquiz Ceibal
- Cruce Cadillar (Estudio 2)**

ESTUDIO 2. TOMATITAS-ERQUIZ CEIBAL-CRUCE CADILLAR			
Materiales	%	Unidad	Procedencia
3/4" - 3/8"	25,50	En peso	Chancadora San José de Charaja
3/8" - N° 4	22,70	En peso	Chancadora San José de Charaja
Arena	46,20	En peso	Chancadora San José de Charaja
Cemento asfáltico	5,60	En peso	85-100 STRATURA ASFALTOS (Brasil)
TOTAL	100		

Fuente: Elaboración propia

ESTUDIO 3. TRAMO SANTA BÁRBARA

Para la fabricación de probetas de mezclas asfálticas de este tramo, se emplearon tanto gravas como el material fino procedentes de la Chancadora de San José de Charaja, ubicada en la localidad del mismo nombre, el cemento asfáltico 85-100 empleado de

procedencia petrolera IPIRANGA (Brasil), los mismos que fueron caracterizados según Normas AASTHO y especificaciones del proyecto, más adelante se muestran resultados.

Cuadro 6: Procedencia de materiales para el tramo Santa Bárbara (Estudio 3)

ESTUDIO 3. SANTA BÁRBARA			
Materiales	%	Unidad	Procedencia
3/4" - 3/8"	25,60	En peso	Chancadora San José de Charaja
3/8" - N° 4	24,65	En peso	Chancadora San José de Charaja
Arena	44,55	En peso	Chancadora San José de Charaja
Cemento asfáltico	5,20	En peso	85-100 Ipiranga (Brasil)
TOTAL	100		

Fuente: Elaboración propia

ESTUDIO 4. TRAMO BERMEJO- SAN ANTONIO

Para la fabricación de probetas de mezclas asfálticas de este tramo, se emplearon agregados triturados procedentes del Río Bermejo de la Chancadora de Ubesan, ubicada en Candado Chico y arena Fina natural procedentes del Río Tarija, el cemento asfáltico 60-70 empleado de procedencia CHILE-ASFALCHILE (Planta Concon), los mismos que fueron caracterizados según Normas AASTHO y especificaciones del proyecto, más adelante se muestran resultados.

Cuadro 7: Procedencia de materiales para el tramo Bermejo - San Antonio (Estudio 4)

ESTUDIO 4. BERMEJO-SAN ANTONIO			
Materiales	%	Unidad	Procedencia
3/4" - 3/8"	14,18	En peso	Chancadora UBESAN
3/8" - N° 4	28,35	En peso	Chancadora UBESAN
Arena	42,53	En peso	Chancadora UBESAN
Filler	9,45	En peso	Arena natural del rio Tarija
Cemento asfáltico	5,50	En peso	60-70 CHILE - ASFALCHILE
TOTAL	100		

Fuente: Elaboración propia

ESTUDIO 5. TRAMO PUERTA AL CHACO-CANALETAS-VILLA MONTES

Para la fabricación de probetas de mezclas asfálticas de este tramo, se emplearon tanto gravas como el material fino procedentes del Río Cañadas, Chancadora Cañadas,

ubicada en la localidad del mismo nombre, el cemento asfáltico 85-100 usado de procedencia petrolera IPIRANGA (Brasil), los mismos que fueron caracterizados según Normas AASTHO y especificaciones del proyecto, más adelante se muestran resultados.

Cuadro 8: Procedencia de materiales para el tramo Puerta al Chaco - Canaletas - Villa Montes (Estudio 5)

ESTUDIO 5. PUERTA AL CHACO-CANALETAS-VILLA MONTES			
Materiales	%	Unidad	Procedencia
Grava 3/4"	23,65	En peso	Chancadora Cañadas
Gravilla 3/8"	23,65	En peso	Chancadora Cañadas
Material fino	47,30	En peso	Chancadora Cañadas
Cemento asfáltico	5,40	En peso	85-100 Ipiranga (Brasil)
TOTAL	100		

Fuente: Elaboración propia

3.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS PÉTREOS

A continuación, se presenta una descripción del procedimiento realizado para cada ensayo de laboratorio utilizado en esta investigación, para así luego recién presentar el cuadro de resumen de los valores obtenidos para los diferentes agregados pétreos triturados utilizados en cada tramo, así también los detalles de las planillas utilizadas para cada caracterización se encuentran en ANEXOS.

3.4.1 Granulometría de agregados pétreos

3.4.1.1 Estudio 1: Santa Ana - Yesera

Objetivo

Determinar la distribución de los tamaños de las partículas de agregado fino y grueso mayores a 0,075mm. mediante un proceso de tamizado.

Equipos y materiales

- Balanza eléctrica: De 0.01 gr. De precisión para muestras de hasta 200gr.
- Juego de Tamices: Con aberturas en cada tamiz según la siguiente tabla:

Tabla 1: Serie de tamices (Tamices utilizados en el ensayo)

Agregado grueso		Agregado fino	
milímetros(mm)	ASTM	milímetros(mm)	ASTM
63 mm.	2 1/2"	2.36 mm.	N° 8
50 mm.	2"	1.18 mm.	N° 16
37.5 mm.	1 1/2"	0.60 mm.	N° 30
25 mm.	1"	0.30 mm.	N° 50
19 mm.	3/4"	0.15 mm.	N° 100
12.5 mm.	1/2"	0.075 mm.	N° 200
9.5 mm.	3/8"		
4.75 mm.	N° 4		

Fuente: Manual de Carretera V4C de Administración Boliviana de Caminos

Procedimiento

- Antes de realizar el ensayo se debe de eliminar todo tipo de impurezas (material orgánico) y toda partícula fina menor a 0.075 mm. Para ello se procederá a lavar bien la muestra y secarla muy bien. (Se recomienda dejarlo secar 24 Hrs. a temperatura ambiente o secarlo en un horno.)
- Se realiza el cuarteo del material para determinar una cantidad de muestra apropiada según la siguiente tabla:

Tabla 2: Cantidad mínima de muestra a ser utilizada para cada N° de tamiz

Tamaño máximo de las partículas	Tamiz N°	Masa de muestra mínima
63,00 mm.	2 1/2"	35 kg.
50,00 mm.	2"	20 kg.
37,00 mm.	1 1/2"	15kg.
25,00 mm.	1"	10 kg.
19,00 mm.	3/4"	5 kg.
12,50 mm.	1/2"	2kg.
9,50 mm.	3/8"	1 kg.
4,75 mm. O menos	N° 4	0.3 y/o 0.5 kg.

Fuente: Manual de Carretera V4C de Administración Boliviana de Caminos

- Se agita todo el juego de mallas, horizontalmente con movimientos de rotación y verticalmente con golpes de vez en cuando. El tiempo de agitado por lo general es de 15 minutos.
- Se quita la tapa y se separa los tamices, vaciando las fracciones de muestra que quedaron retenidos en cada una uno de ellos, incluyendo en la base.

Fotografía 6: Tamizado de material grueso para ensayo de granulometría



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 7: Tamizado de material grueso (gravilla) para ensayo de granulometría



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 8: Tamizado de material fino para ensayo de granulometría

Fuente: Elaboración propia

Cálculo y resultado

- Sume y registre todas las fracciones retenidas de todos los tamices, esta suma no debe diferir de la masa inicial registrada en más de 3% para agregados finos y de 0.5 % para los áridos gruesos
- Si esta especificación no se cumple se rechaza el ensayo y se realiza otro con una muestra gemela.
- Calcular la masa retenida acumulada en cada tamiz.
- Calcule el porcentaje retenido en cada tamiz.
- Calcular el porcentaje que pasa cada tamiz haciendo la diferencia de 100 entre el % retenido de cada tamiz
- Graficar la curva granulométrica en un sistema de coordenadas ortogonales cuya abscisa en escala logarítmica indique las aberturas nominales de los tamices y en las ordenadas a escala lineal los valores.

Fotografía 9: Cálculo y registro de material fino para ensayo de granulometría

Fuente: Elaboración propia

Dosificación de agregados para la granulometría combinada

- **Objetivo**

La dosificación de agregados tiene por objeto lograr una mezcla cuya gradación se encuentre dentro de los límites recomendados en una especificación determinada, se cuenta con procedimientos analíticos y gráficos; dentro de estos el método de prueba y error (método de tanteos) es el más utilizado, ya que con la ayuda de programas de computación como Excel es cómodo elaborar tablas de cálculos y establecer una combinación de varios agregados.

- **Procedimiento**

Se busca una combinación de los tres agregados que se utilizarán: grava 3/4", gravilla 3/8" y material fino, para esto se ha utilizado el programa Excel de Windows mediante la elaboración de una tabla con fórmulas para que realice dichos cálculos de la cual se obtiene los porcentajes para cada uno de los agregados antes mencionados, y considerando que el tamaño máximo del agregado que se tiene es de 3/4".

Se procede a asignar un porcentaje a cada agregado, la sumatoria de dichos porcentajes será el 100% de los agregados; por ejemplo:

Cuadro 9: Porcentaje de agregados pétreos a ser utilizados para dosificación Marshall (Estudio 1: Santa Ana – Yesera)

Material	Cantidad (%)
Grava 3/4"	33
Gravilla 3/8"	23
Material fino	44
TOTAL	100

Fuente: Elaboración propia

El porcentaje de cada agregado es multiplicado por su respectiva granulometría luego se obtiene la suma de los tres porcentajes obteniendo así el valor para cada tamiz respectivamente, se verifica si está dentro de la especificación e igual a la granulometría proyectada.

Granulometría: se utiliza la especificación granulométrica del Manual de Carretera Administración Boliviana de Caminos ABC, que exige para ese tamaño es el tipo C.

Tabla 3: Combinaciones granulométricas - convencional tipo C (Estudio 1: Santa Ana – Yesera)

Tamices	Curva proyectada	Gradación "C"		% Retenido por tamiz
		Mínimo	Máximo	
1"	100,00	100	100	0,00
3/4"	99,70	80	100	0,30
1/2"	73,90	67	85	25,80
3/8"	66,96	60	77	6,94
N° 4	48,90	43	54	18,06
N°10	39,70	29	45	9,20
N° 40	23,60	14	25	16,10
N°80	15,70	8	17	7,90
N°200	7,70	4	8	8,00

Fuente: Elaboración propia

- **Resumen de granulometría de los agregados pétreos para el estudio 1**

En el siguiente cuadro se muestra la distribución en forma individual de cada agregado para el tramo Santa – Yesera.

Tabla 4: Granulometrías de producción (Estudio 1: Santa Ana – Yesera)

Tamices	Grava 3/4" (% que pasa)	Grava 3/8" (% que pasa)	Material fino (% que pasa)
1"	100,00	100,00	100,00
3/4"	98,99	100,00	100,00
1/2"	20,96	100,00	100,00
3/8"	1,42	97,80	100,00
Nº 4	0,40	22,02	99,30
Nº 10	0,30	3,20	88,30
Nº 16	0,25	2,36	80,10
Nº 40	0,20	1,54	52,80
Nº 50	0,20	1,45	43,71
Nº 80	0,20	1,20	34,89
Nº 200	0,10	0,79	17,00

Fuente: Elaboración propia

Dada la naturaleza de las granulometrías de producción, se procedió a establecer una gradación tipo C.

Tabla 5: Requisitos de gradación para la mezcla (Estudio 1: Santa Ana – Yesera)

Tamices	Tamaño máximo nominal del agregado 3/4"	
	Porcentaje total que pasa	
1"	100	100
3/4"	80	100
1/2"	67	85
3/8"	60	77
Nº 4	43	54
Nº 10	29	45
Nº 40	14	25
Nº 80	8	17
Nº 200	4	8

Fuente: Elaboración propia

Después de analizar el cuadro de la composición granulométrica de los agregados, se obtuvieron los siguientes valores, resultado de varias tentativas, en base a los agregados.

Cuadro 10: Aporte porcentual de agregados en peso (Estudio 1: Santa Ana – Yesera)

Material	Cantidad (%)
Grava 3/4"	33
Gravilla 3/8"	23
Material fino	44
TOTAL	100

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6: Curva proyecta (Estudio 1: Santa Ana - Yesera)

Tamices	Curva proyectada	Gradación "C"		% Retenido por tamiz
		Mínimo	Máximo	
1"	100,00	100	100	0,00
3/4"	99,70	80	100	0,30
1/2"	73,90	67	85	25,80
3/8"	66,96	60	77	6,94
N° 4	48,90	43	54	18,06
N°10	39,70	29	45	9,20
N° 40	23,60	14	25	16,10
N°80	15,70	8	17	7,90
N°200	7,70	4	8	8,00

Fuente: Elaboración propia

Los planillas y curvas se encuentran en la parte final (Anexo 1).

3.4.1.2 Estudio 2: Tomatitas – Erquiz Ceibal – Cruce Cadillar

En el siguiente cuadro se presenta la distribución en forma individual de cada agregado para el tramo Tomatitas – Erquiz Ceibal – Cruce Cadillar.

Tabla 7: Granulometrías de producción (Estudio 2: Tomatitas - Erquiz Ceibal - Cruce Cadillac)

Tamices	Grava 3/4" (% que pasa)	Grava 3/8" (% que pasa)	Material fino (% que pasa)
1"	100,00	100,00	100,00
3/4"	92,70	100,00	100,00
1/2"	34,60	100,00	100,00
3/8"	6,50	93,60	100,00
N° 4	0,70	16,30	98,70
N°10	0,40	11,40	81,10
N° 40	0,30	7,00	45,70
N°80	0,20	3,20	25,10
N°200	0,10	1,60	12,70

Fuente: Elaboración propia

Dada la naturaleza de las granulometrías de producción, se procedió a establecer una gradación tipo C.

Tabla 8: Requisitos de gradación para la mezcla (Estudio2: Tomatitas - Erquiz Ceibal - Cruce Cadillac)

Tamices	Tamaño máximo nominal del agregado 3/4"	
	Porcentaje total que pasa	
1"	100	100
3/4"	80	100
1/2"	67	85
3/8"	60	77
N° 4	43	54
N°10	29	45
N° 40	14	25
N°80	8	17
N°200	4	8

Fuente: Elaboración propia

Después de analizar el cuadro de la composición granulométrica de los agregados, se obtuvieron los siguientes valores, resultado de varias tentativas, en base a los agregados.

Cuadro 11: Aporte porcentual de agregados en peso (Estudio 2: Tomatitas - Erquiz Ceibal - Cruce Cadillar)

Material	Cantidad (%)
Grava 3/4"	27
Gravilla 3/8"	24
Material fino	49
TOTAL	100

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9: Curva proyectada (Estudio 2: Tomatitas - Erquiz Ceibal - Cruce Cadillar)

Tamices	Curva proyectada	Gradación "C"		% Retenido por tamiz
		Mínimo	Máximo	
1"	100,00	100	100	0,00
3/4"	98,00	80	100	2,00
1/2"	82,30	67	85	15,70
3/8"	73,20	60	77	9,10
N° 4	52,50	43	54	20,70
N°10	42,60	29	45	9,90
N° 40	24,20	14	25	18,40
N°80	13,10	8	17	11,10
N°200	6,60	4	8	6,50

Fuente: Elaboración propia

Los planillas y curvas se encuentran en la parte final (Anexo 2).

3.4.1.3 Estudio 3: Santa Bárbara

El siguiente cuadro presenta la distribución en forma individual de cada agregado para el tramo Santa Bárbara.

Tabla 10: Granulometrías de producción (Estudio 3: Santa Bárbara)

Tamices	Grava 3/4" (% que pasa)	Grava 3/8" (% que pasa)	Material fino (% que pasa)
1"	100,00	100,00	100,00
3/4"	93,10	100,00	100,00
1/2"	34,70	100,00	100,00
3/8"	6,30	93,90	100,00
N° 4	0,60	16,50	98,70
N°8	0,50	12,60	88,00
N° 40	0,30	7,00	48,00
N°200	0,10	1,30	12,90

Fuente: Elaboración propia

Dada la naturaleza de las granulometrías de producción, se procedió a establecer una gradación tipo C.

Tabla 11: Referencias de gradación para la mezcla (Estudio 3: Santa Bárbara)

Tamices	Tamaño máximo nominal del agregado 3/4"	
	Porcentaje total que pasa	
1"	100	100
3/4"	80	100
1/2"	67	85
3/8"	60	77
N° 4	43	54
N°10	29	45
N° 40	14	25
N°80	8	17
N°200	4	8

Fuente: Elaboración propia

Después de analizar el cuadro de la composición granulométrica de los agregados, se obtuvieron los siguientes valores, resultado de varias tentativas, en base a los agregados.

Cuadro 12: Aporte porcentual de agregados en peso (Estudio 3: Santa Bárbara)

Material	Cantidad (%)
Grava 3/4"	27
Gravilla 3/8"	26
Material fino	47
TOTAL	100

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12: Curva proyectada (Estudio 3: Santa Bárbara)

Tamices	Curva proyectada	Gradación "C"		% Retenido por tamiz
		Mínimo	Máximo	
1"	100,00	100	100	0,00
3/4"	98,10	80	100	1,90
1/2"	82,40	67	85	15,70
3/8"	73,12	60	77	9,28
N° 4	50,80	43	54	22,32
N°10	40,90	29	45	9,90
N° 40	24,50	14	25	16,40
N°80	12,40	8	17	12,10
N°200	6,40	4	8	6,00

Fuente: Elaboración propia

Los planillas y curvas se encuentran en la parte final (Anexo 3).

3.4.1.4 Estudio 4: Bermejo – San Antonio.

En el siguiente cuadro se ve la distribución en forma individual de cada agregado para el tramo Bermejo – San Antonio.

Tabla 13: Granulometrías de producción (Estudio 4: Bermejo - San Antonio)

Tamices	% que pasa 1"	% que pasa 3/4"	% que pasa 3/8"	% que pasa arena natural
1"	100,00	-	-	-
3/4"	98,00	100,00	-	-
3/8"	3,20	18,30	100,00	100,00
N° 4	1,00	1,60	66,40	99,90
N°8	0,40	1,20	43,70	99,80
N° 50	-	-	18,50	75,70
N°200	-	-	8,50	3,30

Fuente: Elaboración propia

Dada la naturaleza de las granulometrías de producción, se procedió a establecer una gradación tipo C.

Tabla 14: Referencia de gradación para la mezcla (Estudio 4: Bermejo - San Antonio)

Tamices	Tamaño máximo nominal del agregado 1"	
	Porcentaje total que pasa	
1"	100	100
3/4"	90	100
3/8"	56	80
N° 4	35	65
N°8	23	49
N° 50	5	19
N°200	2	8

Fuente: Elaboración propia

Después de analizar el cuadro de la composición granulométrica de los agregados, se obtuvieron los siguientes valores, resultado de varias tentativas, en base a los agregados.

Cuadro 13: Aporte porcentual de agregados en peso (Estudio 4: Bermejo - San Antonio)

Material	Cantidad (%)
Grava 1"	15
Grava 3/4"	30
Gravilla 3/8"	45
Arena natural	10
TOTAL	100

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15: Curva proyectada (Estudio 4: Bermejo - San Antonio)

Tamices	Curva proyectada	Faja "C" Curva de trabajo		% Retenido por tamiz
		Porcentaje total que pasa		
1"	100,00	100	100	0,00
3/4"	99,70	93	100	0,30
3/8"	61,00	56	68	38,70
N° 4	40,50	35	48	20,50
N°8	30,10	25	35	10,40
N° 50	15,90	13	19	14,20
N°200	4,20	2	6	11,70

Fuente: Elaboración propia

Los planillas y curvas se encuentran en la parte final (Anexo 4).

3.4.1.5 Estudio 5: Puerta al Chaco – Canaletas - Villa Montes

En el siguiente cuadro se observa la distribución en forma individual de cada agregado para el tramo Puerta al Chaco – Canaletas – Villa Montes.

Tabla 16: Granulometrías de producción (Estudio 5: Puerta al Chaco - Canaletas - Villa Montes)

Tamices	Grava 3/4" (% que pasa)	Grava 3/8" (% que pasa)	Material fino (% que pasa)
1"	100,00	100,00	100,00
3/4"	97,80	100,00	100,00
1/2"	24,00	100,00	100,00
3/8"	1,60	96,00	100,00
N° 4	0,90	34,20	94,40
N°8	0,30	11,70	71,40
N° 40	0,30	6,20	36,20
N°200	0,10	1,60	13,20

Fuente: Elaboración propia

Dada la naturaleza de las granulometrías de producción, se procedió a establecer una gradación tipo C.

Tabla 17: Referencia para la gradación de la mezcla (Estudio 5: Puerta al Chaco - Canaletas - Villa Montes)

Tamices	Tamaño máximo nominal del agregado 3/4"	
	Porcentaje total que pasa	
1"	100	100
3/4"	97	100
1/2"	76	88
N° 4	49	59
N°8	36	45
N° 40	14	22
N°200	3	7

Fuente: Elaboración propia

Después de analizar el cuadro de la composición granulométrica de los agregados, se obtuvieron los siguientes valores, resultado de varias tentativas, en base a los agregados.

Cuadro 14: Aporte porcentual de agregados (Estudio 5: Puerta al Chaco - Canaletas - Villa Montes)

Material	Cantidad (%)
Grava 3/4"	25
Gravilla 3/8"	25
Material fino	50
TOTAL	100

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18: Curva proyectada (Estudio 5: Puerta al Chaco - Canaletas - Villa Montes)

Tamices	Curva proyectada	Gradación "C"		% Retenido por tamiz
		Mínimo	Máximo	
1"	100,00	100	100	0,00
3/4"	99,40	97	100	0,60
1/2"	80,99	76	88	18,41
N° 4	56,00	49	59	24,99
N°8	38,70	36	45	17,30
N° 40	19,70	14	22	19,00
N°200	7,00	3	7	12,70

Fuente: Elaboración propia

Los planillas y curvas se encuentran en la parte final (Anexo 5).

3.4.2 Peso específico de agregados

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, un 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 agregadas, asfalto, y vacío que van a usarse en los métodos de diseño.

Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos (ASTM C 127 AASHTO T85)

Objetivo:

- Este método establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos.
- Es aplicable a los áridos gruesos que se emplean en el análisis de suelos, elaboración de hormigones y obras asfálticas.

Definiciones:

Áridos grueso: Material árido retenido en el tamiz de 4,75 mm (N° 4) en el caso de suelos y hormigones, y en el tamiz de 2,36 mm (N.º 8) cuando se utiliza en asfaltos.

Huecos: Espacios vacíos entre las partículas de un material áridos.

Poros: Espacios vacíos interiores de una partícula de material árido.

- Poro accesible: Poro permeable o abierto.
- Poro inaccesible: Poro impermeable o cerrado.

Densidad U: Es la tasa entre la masa (M) y el volumen (V) de un material árido a una temperatura especificada. Se expresa en kg/m^3

- Densidad real (U_R). Densidad en que se considera el volumen macizo de las partículas de material áridos, más el volumen de los poros accesibles e inaccesibles de esas partículas.

Densidad real de áridos seco (U_{RS}). Densidad real en que se considera solamente la masa de áridos seco.

Densidad real de áridos saturado superficialmente seco (U_{RT}). Densidad real en que se considera la masa de árido seco más la masa del agua que llena los poros accesibles.

- Densidad neta (U_N). Densidad en que se considera el volumen macizo de las partículas de material áridos más el volumen de los poros inaccesibles.

Absorción de agua D: Masa de agua necesaria para llevar un material árido del estado seco al estado saturado superficialmente seco. Se expresa como porcentaje referido a la masa de áridos seco.

Áridos seco: Material secado en horno hasta masa constante. Esta condición se obtiene cuando dos pesadas sucesivas, separadas por 1 h de secado a $110 \pm 5^\circ \text{C}$ $230 \pm 10^\circ \text{F}$, difieren en un porcentaje igual o inferior al 0,1 % de la menor masa determinada.

Equipos y materiales:

Balanza: De capacidad superior a la masa del canastillo porta muestra más la masa de la muestra de ensaye y una precisión mínima de 1 g.

Horno: Con circulación de aire y temperatura regulable para las condiciones del ensaye.

Canastillo porta muestra: De alambre de acero inoxidable lo suficientemente resistente para soportar el peso de la muestra, con malla de abertura igual o inferior que 2 mm y de capacidad igual o superior a 4l. Además, debe estar provisto de un dispositivo que permita suspenderlo del platillo de la balanza.

Estanque: Impermeable, inoxidable, de forma y capacidad tal que permita contener totalmente y con holgura el canastillo porta muestra, de acuerdo con el procedimiento especificado en este método.

Recipientes: Deben estar limpios, de material resistente, estancos y de capacidad suficiente para contener la muestra de ensaye.

Extracción y preparación de muestras:

Extracción de muestras: Extraiga y prepare las muestras según se requiere y con el respectivo cuarteo para cada muestra a ser ensayada.

Tamaño de la muestra de ensaye: La cantidad mínima de muestra para el ensaye se determina, en función del tamaño máximo nominal del árido, según la siguiente tabla:

Tabla 19: Cantidad mínima de muestra según tamaño máximo nominal del árido

Tamaño máximo nominal (mm)	Cantidad mínima de muestra (grs.)
12,5 (1/2")	2.000
19,0 (3/4")	3.000
25,0 (1")	4.000
37,5 (1 1/2")	5.000
50,0 (2")	8.000

Fuente: Manual de Carretera V4C de Administración Boliviana de Camino

Preparación de la muestra de ensaye

- Puede emplear el material proveniente del ensaye de tamizado, debidamente homogeneizado.
- Elimine por tamizado las partículas inferiores a 4,75mm (Nº 4), en el caso de hormigones y suelos y las partículas inferiores a 2,36mm (Nº 8), en el caso de asfaltos.
- Lave la muestra hasta remover el polvo superficial o cualquier materia extraña adherida a las partículas.
- Seque la muestra hasta masa constante en un horno a 110 r 5° C 230r10°F.
- Enfríe la muestra al aire a temperatura ambiente por un período de 24 r 4 h.
- Sumerja la muestra en agua a temperatura ambiente por un período de 24 r 4 h.

Nota 1: Se debe tener presente que existen áridos cuya saturación no se completa en 24 h. En ese caso es necesario continuar el control de absorción hasta que dos pesadas sucesivas, separadas por una hora de inmersión, difieran en un porcentaje igual o inferior que el 0,1 % de la menor masa determinada.

Fotografía 10: Muestra lavada para ensayo de peso específico

Fuente: Elaboración propia

Procedimiento:

Efectúe las siguientes pesadas a la muestra de ensaye:

- Pesada al aire ambiente del pétreo saturado superficialmente seco.
- Retire la muestra del agua y seque superficialmente las partículas, haciéndolas rodar sobre un paño absorbente húmedo hasta que desaparezca la película visible de agua adherida. Seque individualmente las partículas mayores manteniendo el áridos, ya secado superficialmente, cubierto por un paño húmedo hasta el momento de pesar. Efectúe toda la operación en el menor tiempo posible.
- Determine inmediatamente la masa de áridos saturado superficialmente seco, por pesada al aire ambiente, aproximando a 1 g. Registre su valor como M_{SS} .

Pesada sumergida

- Coloque la muestra inmediatamente en el canastillo porta muestra.
- Sumerja el canastillo en agua a $20 \pm 3^\circ \text{C}$ ($68 \pm 5^\circ \text{F}$), por un período de al menos 3 min.
- Determine la masa sumergida, aproximando a 1 g. Registre su valor como M_{SUM} .

Nota 2: Mantenga el canastillo y su contenido totalmente sumergidos durante la operación. Debe procurarse que el elemento de suspensión del canastillo tenga la menor dimensión posible, a fin de minimizar su efecto sobre los resultados.

Pesada al aire ambiente de áridos seco.

- Retire la muestra del canastillo y vacíela completamente del recipiente, cuidando de no dejar partículas atrapadas.
- Seque la muestra hasta masa constante en horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$ $230 \pm 10^\circ \text{F}$.
- Enfríe la muestra hasta temperatura ambiente, en lo posible dentro de un recipiente protegido, para evitar la absorción de humedad del aire.
- Determine la masa de la muestra seca, por pesada al aire ambiente, aproximando a 1 g. Registre su valor como M_s .

Fotografía 11: Secado de muestra agregado grueso para ensayo de peso específico



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 12: Calibración de balanza para pesado de agregado grueso



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 13: Pesado de material grueso para peso específico



Fuente: Elaboración propia

Cálculos:

Densidad real (ρ_R).

- Densidad real del áridos saturado superficialmente seco (ρ_{RT}). Calcule la densidad real de áridos saturado superficialmente seco según la fórmula siguiente, aproximando a 1 kg/m^3 .

$$\rho_{RT} (\text{kg/m}^3) = \frac{M_{SSS}}{M_{SSS} - M_{SUM}} \cdot 1.000 (\text{kg/m}^3)$$

Donde:

ρ_{RT} = Densidad real de áridos saturado superficialmente seco (kg/m^3).

M_{SSS} = Muestra saturada con superficie seca (kg).

M_{SUM} = Muestra sumergida (kg).

- Densidad real de áridos seco (ρ_{RS}). Calcule la densidad real de áridos seco según la fórmula siguiente, aproximando a 1 Kg./m^3 :

$$\rho_{RS} (\text{kg/m}^3) = \frac{M_S}{M_{SSS} - M_{SUM}} \cdot 1.000 (\text{kg/m}^3)$$

Donde:

ρ_{RS} = Densidad real de áridos seco (kg/m^3).

M_S = Muestra seca (kg).

M_{SSS} = Muestra saturada con superficie seca (kg).

M_{SUM} = Muestra sumergida (kg).

- Densidad neta (ρ_N) Calcule la densidad neta según la fórmula siguiente, aproximado a 1 kg/m³

$$\rho_N (\text{kg/m}^3) = \frac{M_S}{M_S - M_{SUM}} \cdot 1.000 (\text{kg/m}^3)$$

Donde:

ρ_N = Densidad neta (kg/m³).

M_S = Muestra seca (kg).

M_{SUM} = Muestra sumergida (kg).

Absorción de agua (α):

Calcule la absorción de agua según la fórmula siguiente, aproximando a la centésima en porcentaje.

$$\alpha (\%) = \frac{M_{SSS} - M_S}{M_S} \cdot 100$$

Donde:

α = Absorción de agua (%).

M_{SSS} = Muestra saturada con superficie seca (kg).

M_S = Muestra seca (kg).

Nota 3: Para efectos prácticos se considerará la densidad del agua como 1.000 kg/m³ en lugar del valor real a 20 °C (68 °F) que es 998,20 kg/m³.

Expresión de resultados:

- Determine la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua de un áridos como el promedio aritmético de dos ensayos sobre muestras gemelas.

- Exprese las densidades en kg/m^3 , aproximando a 1 kg/m^3 Exprese la absorción en porcentaje, aproximando a la centésima.

Precisión:

Acepte la determinación de densidad real, densidad neta y absorción de agua de los áridos gruesos, cuando la diferencia entre los valores obtenidos de los dos ensayos realizados por uno o más laboratoristas, sea:

- Igual o inferior que 20 kg/m^3 en la determinación de densidades.
- Igual o inferior que 3 décimas porcentuales en la determinación de la absorción de agua.

Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos finos (ASTM C 128 AASHTO T84)**Objetivo:**

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

Es aplicable a los áridos finos, que se emplean en la elaboración de hormigones y obras asfálticas.

Definiciones:

Áridos fino: Material árido que pasa el tamiz de 4,75 mm (N° 4) en el caso de hormigones, y que pasa el tamiz de 2,36 mm (N° 8) cuando se utiliza en asfaltos.

Huecos: Espacios vacíos entre las partículas de un material árido.

Poros: Espacios vacíos interiores de una partícula de material árido.

- Poro Accesible: Poro permeable o abierto.
- Poro Inaccesible: Poro impermeable o cerrado.

Densidad: Es el cociente entre la masa (m) y el volumen (v) de un material árido a una temperatura especificada. Se expresa en kg/m^3 .

- Densidad real (ρ_R). Densidad en que se considera el volumen macizo de las partículas de material áridos, más el volumen de los poros accesibles e inaccesibles de esas partículas.

Densidad real del áridos seco (ρ_{RS}). Densidad real en que se considera solamente la masa del pétreo seco.

Densidad real del áridos saturado superficialmente seco (ρ_{RT}).

Densidad real en que se considera la masa de áridos secos más la masa del agua que llena los poros accesibles.

- Densidad neta (ρ_N). Densidad en que se considera el volumen macizo de las partículas de material áridos más el volumen de los poros inaccesibles.

Absorción de agua: Masa de agua necesaria para llevar un material árido del estado seco al estado saturado superficialmente seco. Se expresa como porcentaje referido a la masa de áridos seco.

Áridos seco: Material secado en horno hasta masa constante. Esta condición se obtiene cuando dos pesadas sucesivas, separadas por 1 hora de secado a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ $230 \pm 10^\circ\text{F}$, difieren en un porcentaje igual o inferior al 0,1 % de la menor masa determinada.

Equipos y materiales:

Balanza: De capacidad superior a 1 kg y una precisión mínima de 0,1 g.

Horno: Con circulación de aire y temperatura regulable para las condiciones del ensaye.

Recipientes: Limpios, de material resistente, estancos y de capacidad suficiente para contener la muestra del ensaye.

Matraz: Es un matraz aforado en el que se pueda introducir fácilmente la muestra de ensaye. Debe llevar una marca de calibración que indique el volumen contenido con una precisión de $\pm 0,1$ ml. Dicho volumen excederá a lo menos en un 50 % al volumen aparente de la muestra de áridos fino. Se recomienda emplear un matraz de 500 cm^3 de capacidad. También puede emplearse un picnómetro.

Molde: Con forma tronco - cónica, de 40 r 3 mm de diámetro en la parte superior, 90 r 3 mm de diámetro en la parte inferior y 75 r 3 mm de altura. Confeccionado con una plancha metálica de un espesor igual o superior que 0,8 mm.

Pisón: Es una varilla metálica, con uno de sus extremos de sección plana y circular, de 25 r 3 mm de diámetro. Debe tener una masa de 340 r 15 g.

Extracción y preparación de la muestra:

Extracción de muestras: Extraiga y prepare las muestras de acuerdo con lo requerido en cada ensayo, como así también realice el cuarteo correspondiente.

Tamaño de la muestra de ensayo: Para cada ensaye se usará una cantidad de áridos finos superiores a 50 g e inferior a 500 g.

Preparación de la muestra de ensaye:

- Corte el material retenido en tamiz de referencia (4,75mm (N° 4) para hormigón o 2,36mm (N° 8) para asfalto).
- Si la muestra de laboratorio contiene un porcentaje superior al 15 % de material retenido sobre el tamiz de referencia, considérela como un integral y determine los porcentajes de la fracción retenida y de la fracción que pasa respecto del total de dicha muestra.
- Ensaye la fracción retenida de acuerdo con el Método para agregados grueso y la fracción que pasa de acuerdo con este Método de ensaye.
- Reduzca por cuarteo, de acuerdo con el Método H0102, la muestra de terreno o la fracción que pasa indicada en “Preparación de la muestra de ensaye” punto b), a una cantidad de áridos de aproximadamente el doble del tamaño de muestra de laboratorio requerido.

Nota 1: La muestra debe humedecerse antes de efectuar la reducción para evitar la segregación y pérdidas de polvo.

- Seque el árido en horno a una temperatura de 110 r 5 ° C 230r10°F.
- Cubra el árido en su totalidad con el mínimo de agua a temperatura ambiente, necesaria para asegurar su saturación en un período de 24 r 4 h.

Fotografía 14: Corte del material en el tamiz N° 4 (4,75 mm)



Fuente: Elaboración propia

Procedimiento:

- Elimine paulatinamente el exceso de agua, evitando la pérdida de finos. Revuelva la muestra frecuentemente para asegurar un secado uniforme, hasta llevarla a su condición suelta.

Nota 2: La eliminación del exceso de agua de la muestra no se debe realizar a fuego directo, ni tampoco utilizar para ello fuertes corrientes de aire.

- 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.
- Compacte suavemente con 25 golpes de pisón uniformemente distribuidos sobre la superficie. En cada golpe deje caer el pisón libremente desde una altura de 5 mm sobre la superficie del áridos. Dicha altura debe conservarse, ajustándola a la nueva elevación de la muestra después de cada golpe.
- 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, a intervalos frecuentes.

- Cuando, al retirar el molde, el árido caiga suavemente según su talud natural, será indicación que éste ha alcanzado la condición saturada superficialmente seca.

Fotografía 15: Colocado de árido en el molde cónico para determinar la condición saturada superficialmente seca



Fuente: Elaboración propia

Nota 3: La primera verificación de humedad mediante el moldeo del cono debe hacerse cuando aún permanece un mínimo de agua libre, por lo tanto, si el cono se asienta en esta primera verificación, mezcle unos pocos cm^3 de agua con el árido y déjelo en un recipiente cubierto durante 30 min y proceda desde a).

- Inmediatamente que el árido alcance la condición de saturado superficialmente seco, obtenga el tamaño de muestra de ensaye requerido, pese y registre su masa.
- Coloque la muestra en el matraz y cúbrala con agua a una temperatura de $20 \text{ r } 3^\circ \text{ C } 68\text{r}5^\circ \text{ F}$, hasta alcanzar aproximadamente $2/3$ del volumen del matraz.
- Agite el matraz a fin de eliminar burbujas de aire golpeándolo ligeramente contra la palma de la mano. En caso de áridos muy finos, se debe utilizar una bomba de vacío.
- Deje reposar durante 1 h manteniendo una temperatura de $20 \text{ r } 3^\circ \text{ C } 68\text{r}5^\circ \text{ F}$.

- Llene con agua a $20 \pm 3^\circ \text{C}$ $68 \pm 5^\circ \text{F}$ hasta la marca de calibración, agite y deje reposar un instante.
- Mida y registre la masa total del matraz con la muestra de ensaye y el agua (mm).
- Saque la muestra del matraz, evitando pérdidas de material, y séquela hasta masa constante en horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$ $230 \pm 10^\circ \text{F}$. Déjela enfriar a temperatura ambiente.

Determine y registre la masa de la muestra de ensaye en condición seca (ms).

- Llene el matraz solamente con agua a una temperatura de $20 \pm 3^\circ \text{C}$ $68 \pm 5^\circ \text{F}$ hasta la marca de calibración. Mida y registre la masa del matraz con agua (Ma).

Fotografía 16: Muestra de árido fino + agua a una temperatura de 20°C



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 17: Peso y registro de la masa del matraz con agua



Fuente: Elaboración propia

Cálculos:

Densidad real

- Densidad real de áridos saturado superficialmente seco (ρ_{RT}). Calcule la densidad real de áridos saturado superficialmente seco, según la fórmula siguiente, aproximando a 1 kg/m³:

$$\rho_{RT} \text{ (kg/m}^3\text{)} = \frac{M_{SSS}}{M_a + M_{SSS} + M_m} \cdot 1.000 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

Donde:

ρ_{RT} = Densidad real de áridos saturado superficialmente seco (kg/m³).

M_{SSS} = Masa de la muestra saturada superficialmente seca (grs).

M_a = Masa del matraz con agua hasta la marca de calibración (grs).

M_m = Masa del matraz con la muestra más agua hasta la marca de calibración (grs).

- Densidad real de áridos seco (ρ_{RS}). Calcule la densidad real del áridos seco, según la fórmula siguiente, aproximando a 1 Kg/m³:

$$\rho_{RS} \text{ (kg / m}^3\text{)} = \frac{M_s}{M_a + M_{SSS} - M_m} \cdot 1.000 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

Donde:

ρ_{RS} = Densidad real de áridos seco (kg/m³).

M_s = Masa de la muestra seca (grs).

M_{SSS} = Masa de la muestra saturada superficialmente seca (grs).

M_a = Masa del matraz con agua hasta la marca de calibración (grs).

M_m = Masa del matraz con la muestra más agua hasta la marca de calibración (grs).

Densidad neta (ρ_N):

Calcule la densidad neta, según la fórmula siguiente, aproximando a 1 kg/m³:

$$\rho_N \text{ (kg/m}^3\text{)} = \frac{M_S}{M_a + M_S - M_m} \cdot 1000 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

Donde:

ρ_N = Densidad neta de áridos (kg/m³).

M_S = Masa de la muestra seca (grs).

M_a = Masa del matraz con agua hasta la marca de calibración (grs).

M_m = Masa del matraz con muestra más agua hasta la marca de calibración (grs).

Absorción de agua (α).

Calcule la absorción de agua, según la fórmula siguiente, aproximando a la centésima, en porcentaje

$$\alpha \text{ (\%)} = \frac{M_{SSS} - M_S}{M_S} \cdot 100$$

Donde:

α = Absorción de agua (%).

M_{SSS} = Masa de la muestra saturada superficialmente seca (grs).

M_S = Masa de la muestra seca (grs).

Expresión de resultados:

- La densidad real, la densidad neta y la absorción de agua de un árido fino se determinan como el promedio aritmético de dos ensayos sobre muestras gemelas.
- En el caso de un integral, la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua de los áridos se calculan como el promedio ponderado de la densidad real, densidad neta y la absorción de agua, respectivamente, obtenidas mediante el ensayo por separado de sus dos fracciones, de acuerdo con las siguientes fórmulas:

$$\rho(\text{kg/m}^3) = \frac{1}{100} \cdot (\rho_r \cdot P_r + \rho_p \cdot P_p)$$

$$\alpha(\%) = \frac{1}{100} \cdot (\alpha_r \times P_r + \alpha_p \times P_p)$$

Donde:

ρ = Densidad (real o neta) de la integral (kg/ m3).

ρ_r = Densidad (real o neta) de la fracción retenida (kg/ m3).

ρ_p = Densidad (real o neta) de la fracción que pasa (kg/ m3).

P_r = Porcentaje en masa de la fracción retenida (%).

P_p = Porcentaje en masa de la fracción que pasa, (%).

α = Absorción de agua de la integral (%).

α_r = Absorción de agua de la fracción retenida (%).

α_p = Absorción de agua de la fracción que pasa (%).

- Expresar las densidades en kg/m³ aproximando a 1 kg/m³, y la absorción en porcentaje, aproximando a la centésima.

Precisión:

Acepte la determinación de densidad real, densidad neta y absorción de agua de los áridos finos, cuando la diferencia entre los valores obtenidos de los dos ensayos realizados por uno o más laboratoristas sea:

- Igual o inferior que 20 kg/m³ en la determinación de densidades.
- Igual o inferior que 4 décimas porcentuales en la determinación de la absorción de agua.

A continuación, se muestra una tabla de valores obtenidos del ensayo de peso específicos para cada tramo en estudio:

Cuadro 15: Peso específico de los agregados pétreos (Estudio 1: Santa Ana - Yesera)

ESTUDIO 1. SANTA ANA-YESERA			
Ensayo	Unidad	Resultados	Designación AASHTO
Peso específico agregado (3/4")	gr/cm ³	2,648	T-85
Peso específico agregado (3/8")	gr/cm ³	2,638	
Peso específico agregado fino	gr/cm ³	2,631	T-84

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 16: Peso específico de los agregados pétreos (Estudio 2: Tomatitas - Erquiz Ceibal - Cruce Cadillar)

ESTUDIO 2. TOMATITAS-ERQUIZ CEIBAL-CRUCE CADILLAR			
Ensayo	Unidad	Resultados	Designación AASHTO
Peso específico agregado (3/4")	gr/cm ³	2,650	T-85
Peso específico agregado (3/8")	gr/cm ³	2,645	
Peso específico agregado fino	gr/cm ³	2,550	T-84

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 17: Peso específico de los agregados pétreos (Estudio 3: Santa Bárbara)

ESTUDIO 3. SANTA BÁRBARA			
Ensayo	Unidad	Resultados	Designación AASHTO
Peso específico agregado (3/4")	gr/cm ³	2,668	T-85
Peso específico agregado (3/8")	gr/cm ³	2,687	
Peso específico agregado fino	gr/cm ³	2,603	T-84

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 18: Peso específico de los agregados pétreos (Estudio 4: Bermejo – San Antonio)

ESTUDIO 4. BERMEJO-SAN ANTONIO			
Ensayo	Unidad	Resultados	Designación AASHTO
Peso específico agregado (3/4")	gr/cm ³	2,695	T-85
Peso específico agregado (3/8")	gr/cm ³	2,692	
Peso específico agregado fino	gr/cm ³	2,679	T-84

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 19: Peso específico de los agregados pétreos (Estudio 5: Puerta al Chaco – Canaletas – Villa Montes)

ESTUDIO 5. PUERTA AL CHACO-CANALETAS-VILLA MONTES			
Ensayo	Unidad	Resultados	Designación AASHTO
Peso específico agregado (3/4")	gr/cm ³	2,666	T-85
Peso específico agregado (3/8")	gr/cm ³	2,700	
Peso específico agregado fino	gr/cm ³	2,680	T-84

Fuente: Elaboración propia

3.4.3 Peso unitario de los agregados pétreos

Material y equipo:

Material:

- Agregado grueso y/o fino en cantidad suficiente que exceda la capacidad del molde (de 125% a 200% el volumen del molde).
- Agua potable.
- Franela o papel toalla.

Equipo:

- Balanza o báscula con una precisión de 0.1% de la carga de ensayo y para cualquier punto dentro del rango de uso con una precisión de al menos 0.1 lb (0.05 kg). El rango de uso deberá ser considerado para poder extenderlo a valores de 120 lb/pie³ (1980 kg/m³).
- Varilla compactadora: Una varilla lisa redonda de acero de 5/8" de diámetro y 24" de largo, teniendo un extremo o ambos redondeados a una punta semiesférica de 5/8" de diámetro.
- Recipiente volumétrico (molde).
- Pala o cucharón de tamaño conveniente para llenar el molde.
- Termómetro: Con una precisión de al menos 0.1 °C.
- Placa de vidrio preferiblemente con un espesor de al menos 1/4" (6 mm) y con 1" (25 mm) más largo que el diámetro del molde a ser calibrado. Un suministro de

agua bombeada o grasa para chasis puede colocarse en el borde del depósito para prevenir derrames o pérdidas.

Procedimiento:

Determinación de la capacidad del molde a utilizar:

En función del tamaño máximo nominal y los valores de la siguiente tabla, se determina el volumen mínimo del molde a utilizar.

Tabla 20: Capacidad del molde en función del tamaño máximo nominal del agregado

Tamaño máximo nominal del agregado		Capacidad del deposito	
Pulgadas (")	milímetros (mm)	pie ³	L (m ³)
1/2	12,5	1/10	2,8 (0,0028)
1	25	1/3	9,3 (0,0093)
1 1/2	37,5	1/2	14 (0,014)
3	75	1	28 (0,028)
4	100	2 1/2	70 (0,070)
5	125	3 1/2	100 (0,100)

Fuente: Manual de Carretera V4C de Administración Boliviana de Camino

Preparación de la muestra de agregado a utilizar:

El tamaño de la muestra deberá ser aproximadamente de 125 a 200% de la cantidad requerida para llenar el molde que se utilizará y deberá manejarse de tal forma que se evite la segregación. A continuación, secar la muestra hasta masa constante, preferiblemente en un horno a 230.9 °F (110±5 °C).

Calibración del molde:

- Determinar el peso del molde seco solo.
- Cada molde que se utilice deberá ser calibrado con agua a temperatura ambiente, llenando el molde y nivelándolo con una pieza o placa de vidrio.

- Secar rápidamente el exterior del molde con un papel toalla o una tela absorbente y determinar el peso del molde más agua y tomar la temperatura al agua.
- Realizar una, al menos una segunda determinación.

Nota: Se sugiere realizar al menos dos determinaciones de volumen como mínimo, pero debe tenerse en cuenta que, a mayor cantidad de determinaciones, más confiable es el dato obtenido.

- Determinar el peso volumétrico promedio del agua.
- Determinar el volumen promedio del molde.

Determinación de pesos volumétricos (suelto, varillado o sacudido):

Determinación de peso volumétrico suelto PVS:

- Determinar el peso del molde a precisión.
- Colocar el molde en un sitio nivelado como un piso de concreto.
- Introducir el agregado en el molde seleccionado, en su estado suelto, llenándolo por medio de una cuchara o pala a una altura que no exceda de 2" por encima del borde superior del molde hasta que el material rebose éste; teniendo el cuidado de evitar en la medida de lo posible la segregación.

Fotografía 18: Colocado de los agregados en sus respectivos moldes



Fuente: Elaboración propia

- A continuación, se nivela la superficie con una regla enrasadora (en agregado fino o grueso) teniendo el cuidado de no presionar mucho para no compactar ligeramente su estado suelto o nivelando directamente con los dedos (en agregado grueso) de forma tal que ninguna pieza se proyecte o balancee los huecos en la superficie por debajo del borde del recipiente.

Fotografía 19: Nivelación de la superficie del agregado grueso con una regla enrasadora



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 20: Nivelación de la superficie con una regla enrasadora (Agregado fino)



Fuente: Elaboración propia

- Determinar el peso del molde con el agregado con precisión.

Fotografía 21: Determinación del peso del molde con agregado fino



Fuente: Elaboración propia

- Realizar al menos dos determinaciones de PVS.
- Determinar el peso volumétrico suelto PVS promedio por medio de la siguiente ecuación y su respectiva desviación estándar(s) y verificar que la desviación estándar (1s) con un solo operador no exceda de 0.88 lb/pie³ (14 kg/m³).

$$PVS = (G_s - T) / V \text{ ó } (G - T) \times (1/V) = (G - T) \times F$$

Donde:

PVS= Peso volumétrico suelto (kg/m³).

G_s= Peso del agregado suelto más molde (kg).

T= Peso del molde (kg).

V= Volumen del molde (m³).

- Si se conocen el valor de absorción y/o el de gravedad específica del agregado se procede a calcular el peso volumétrico en condición suelta y SSS (Pbs.) por medio de la siguiente ecuación:

$$PVS_{SSS} = PVS \times (1 + A/100)$$

Donde:

PV_{SSS} = Peso volumétrico suelto en condición saturado superficialmente seco (kg/m^3).

A = Absorción del agua (%).

y el porcentaje de vacíos por medio de la ecuación:

$$\% \text{ de vacíos} = 100 \times (S\gamma_{\text{agua}} - PVS) / (S\gamma_{\text{agua}})$$

Donde:

% de vacíos = Porcentaje de vacíos (%).

S = Gravedad específica del agregado (adimensional).

γ_{agua} = Densidad del agua, 62,3 lb/pie^3 o 998 kg/m^3 .

Determinación de peso volumétrico varillado PVV (para tamaño máximo nominal menor o igual a 1 ½”):

- Determinar el peso del molde a precisión.
- Colocar el molde en un sitio nivelado como un piso de concreto.
- Introducir el agregado en el molde seleccionado y llenarlo hasta un tercio de su altura.

Fotografía 22: Llenado del molde a un tercio de su altura con agregado grueso



Fuente: Elaboración propia

- Nivelar con los dedos su superficie, a continuación, se varilla la capa de agregados con 25 golpes uniformemente distribuidos sobre su superficie; al varillar la primera capa no se debe permitir que la varilla toque el fondo del recipiente con una varilla lisa de acero de 5/8” de diámetro y 24” de largo cuyos extremos están redondeados con punta semiesférica.
- A continuación, se llena el recipiente a dos tercios de su altura, se vuelve a nivelar y aplicar 25 golpes con la varilla de compactación, uniformemente distribuida y vigorosa (pero de forma tal que la varilla no penetre la capa anterior).
- Finalmente se llena el recipiente hasta rebosarlo y se varilla con 25 golpes uniformemente distribuidos.
- Se nivela la superficie del agregado con los dedos o regla enrasadora de tal forma que ninguna partícula del agregado grueso sobresalga, balancee los huecos por debajo del borde del recipiente.

Fotografía 23: Nivelación de la superficie del agregado grueso después de ser varillado



Fuente: Elaboración propia

- Determinar el peso del molde con el agregado a precisión.

- Realizar al menos 2 determinaciones de PVV.
- Determinar el peso volumétrico varillado PVV promedio por medio de la siguiente ecuación y su respectiva desviación estándar(s) y verificar que la desviación estándar (1s) con un solo operador no exceda de 0.88 lb/pie³ (14 kg/m³).

$$PVV=(G_v-T)/V \text{ ó } (G_v-T)\times(1/V) = (G_v-T)\times F$$

Donde:

PVV= Peso volumétrico varillado (kg/m³).

G_v= Peso del agregado varillado más molde (kg).

T = Peso del molde (kg).

V = Volumen del molde (m³).

- Si se conocen el valor de absorción y/o el de gravedad específica del agregado se procede a calcular el peso volumétrico en condición varillada (PVV_{sss}.) por medio de la Ecuación:

$$PVV_{SSS}=PVV\times(1+A/100)$$

Donde:

PVV_{SSS}=Peso volumétrico varillado en condición saturado superficialmente seco (kg/m³).

PVV= Peso volumétrico varillado (kg/m³).

A = Absorción del agua (%).

y el porcentaje de vacíos por medio de la ecuación:

$$\% \text{ de vacíos}=100\times(S\gamma_{\text{agua}} - PVV)/(S\gamma_{\text{agua}})$$

Donde:

% de vacíos = Porcentaje de vacíos (%).

S = Gravedad específica del agregado (adimensional).

PVV= Peso volumétrico varillado (kg/m³).

γ_{agua}= Densidad del agua, 62,3 lb/pie³ o 998 kg/m³.

A continuación, se presenta los resultados para los diferentes tramos en estudio para más detalles de las planillas se puede ver en ANEXOS.

Cuadro 20: Peso unitario de los agregados pétreos (Estudio 1: Santa Ana - Yesera)

ESTUDIO 1. SANTA ANA-YESERA		
Ensayo	Unidad	Resultados
Peso unitario agregado grueso (suelto)	gr/cm ³	1,398
Peso unitario agregado grueso (varillado)	gr/cm ³	1,545
Peso unitario agregado fino (suelto)	gr/cm ³	1,576
Peso unitario agregado fino (varillado)	gr/cm ³	1,710

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 21: Peso unitario de los agregados pétreos (Estudio 2: Tomatitas – Erquiz Ceibal – Cruce Cadillar)

ESTUDIO 2. TOMATITAS-ERQUIZ CEIBAL-CRUCÉ CADILLAR		
Ensayo	Unidad	Resultados
Peso unitario agregado grueso (suelto)	gr/cm ³	1,375
Peso unitario agregado grueso (varillado)	gr/cm ³	1,518
Peso unitario agregado fino (suelto)	gr/cm ³	1,557
Peso unitario agregado fino (varillado)	gr/cm ³	1,689

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 22: Peso unitario de los agregados pétreos (Estudio 3: Santa Bárbara)

ESTUDIO 3. SANTA BÁRBARA		
Ensayo	Unidad	Resultados
Peso unitario agregado suelto (3/4")	gr/cm ³	1,391
Peso unitario agregado varillado (3/4")	gr/cm ³	1,507
Peso unitario agregado suelto (3/8")	gr/cm ³	1,305
Peso unitario agregado varillado (3/8")	gr/cm ³	1,414
Peso unitario agregado suelto (fino)	gr/cm ³	1,417
Peso unitario agregado varillado (fino)	gr/cm ³	1,703

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 23: Peso unitario de los agregados pétreos (Estudio 4: Bermejo – San Antonio)

ESTUDIO 4. BERMEJO-SAN ANTONIO		
Ensayo	Unidad	Resultados
Peso unitario agregado grueso (suelto)	gr/cm ³	1,342
Peso unitario agregado grueso (varillado)	gr/cm ³	1,507
Peso unitario agregado fino (suelto)	gr/cm ³	1,558
Peso unitario agregado fino (varillado)	gr/cm ³	1,690

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 24: Peso unitario de los agregados pétreos (Estudio 5: Puerta al Chaco – Canaletas – Villa Montes)

ESTUDIO 5. PUERTA AL CHACO-CANALETAS-VILLAMONTES		
Ensayo	Unidad	Resultados
Peso unitario agregado grueso (3/4")	gr/cm ³	1,442
Peso unitario agregado grueso (3/8")	gr/cm ³	1,359
Peso unitario agregado fino	gr/cm ³	1,560

Fuente: Elaboración propia

3.4.4 Desgaste de los ángeles

Método para determinar el desgaste mediante la máquina de los ángeles (ASTM C 131 AASHTO T96)

Objeto:

Este método establece el procedimiento para determinar la resistencia al desgaste de los áridos mayores a 2,5 mm, mediante la máquina de los ángeles.

Equipos Y Materiales:

Fotografía 24: Máquina de los ángeles



Fuente: Elaboración propia

Máquina de los ángeles: Tambor de acero de 710 ± 6 mm de diámetro interior y de 510 ± 6 mm de longitud interior montado horizontalmente por sus vástagos axiales con una tolerancia de inclinación de 1 en 100, uno de los cuales debe tener un dispositivo de polea o similar, para acoplar un motor. En su manto cilíndrico debe tener una abertura para introducir la muestra, con una tapa provista de dispositivos para fijarla firmemente en su lugar y que asegure la estanqueidad del material sobre tamiz 0,3 mm (Nº 50).

Debe llevar en su superficie interior una aleta consistente en una plancha de acero desmontable, fijada rígida y firmemente a todo lo largo de una generatriz del cilindro, de modo que se proyecte radialmente hacia el interior en 90 ± 3 mm. La distancia entre la aleta y la abertura, medida a lo largo de la circunferencia exterior del cilindro y en la dirección de rotación, debe ser igual o mayor que 1,25 m.

Nota 1: Es preferible utilizar una aleta de acero de sección rectangular montada independientemente de la tapa. Sin embargo, puede emplearse como aleta una de las alas de un perfil L de acero laminado montado en el interior de la tapa, de modo que la carga se reciba por la cara externa del ángulo. Cuando la aleta se deforma debe ser reparada o reemplazada.

La rotación debe estar comprendida entre 30 y 33 rpm, ser contrapesada e impulsada de modo de mantener una velocidad periférica uniforme y tener incorporado un dispositivo contador de revoluciones con detención automática.

Nota 2: Cualquier deslizamiento o punto muerto en el mecanismo de impulsión puede alterar los resultados de ensaye, lo que los hace no comparables con resultados obtenidos en una máquina que produzca una velocidad periférica uniforme.

Balanza: Con una capacidad superior a 10 kg. y una precisión de 1 g.

Tamices: Deben cumplir con lo especificado en la siguiente tabla:

Tabla 21: Tamaños nominales de abertura

Tamaños nominales de abertura	
milímetros (mm)	ASTM
75,00	(3")
63,00	(2 1/2")
50,00	(2")
37,50	(1 1/2")
25,00	(1")
19,00	(3/4")
12,50	(1/2")
9,50	(3/8")
6,30	(1/4")
4,75	(N°4)
25,00	(N°8)
2,00	(N°10)
1,18	(N°16)
0,60	(N°30)
0,30	(N°50)
0,15	(N°100)
0,08	(N°200)

Fuente: Manual de Carretera V4C de Administración Boliviana de Camino

Horno: Con circulación de aire y temperatura regulable para las condiciones del ensaye.

Esferas (Carga abrasiva): Un juego de esferas de acero de aproximadamente 47 mm de diámetro y de masas diferentes, distribuidas en un rango entre 390 y 445 g.

Fotografía 25: Esferas de acero



Fuente: Elaboración propia

Extracción y preparación de la muestra:

Muestreo y preparación: Extraiga y prepare la muestra de acuerdo con los Métodos selección de material y cuarteo.

Determine la granulometría de la muestra.

Tamaño de la muestra: El tamaño de la muestra (en kg) debe ser igual o mayor que $2 D_n$, en que D_n es el tamaño máximo nominal expresado en mm, y no menor que 50 kg. para los grados 1 al 5 y 25 kg. para los grados 6 y 7.

Acondicionamiento de la muestra de ensaye

- Lave la muestra y séquela hasta masa constante en horno a una temperatura de 110 ± 5 °C 230 ± 10 °F.
- Tamice la muestra obtenida, empleando la serie de tamices de aberturas nominales siguientes: 75mm (3"), 63mm (2½"), 50mm (2"), 37,5mm (1½"), 25,0mm (1"), 19mm (¾"), 12,5mm (½"), 9,5mm (3/8"), 6,3mm (¼"), 4,75mm (Nº 4) y 2,36mm (Nº 8). Deje el material separado en las fracciones resultantes de este tamizado.
- Elija de la siguiente tabla el grado de ensaye que mejor represente la granulometría de la muestra. Para ello, sume los porcentajes parciales retenidos en los tamices correspondientes a cada uno de los grados y elija para el ensaye el que entregue una mayor suma.

Tabla 22: Grados de ensayo (Definidos por tipos y rangos de tamaños, en mm)

Tamaño de Partículas (mm)		1	2	3	4	5	6	7
		(75-37,5) (3" - 1 ½")	(50-2,36) (2" - N°8)	(37,5-19) (1 ½" - ¾")	(37,5-9,5) (1 ½" - 3/8")	(19-9,5) (¾" - 3/8")	(9,5-4,75) (3/8" - N° 4)	(4,75-2,36) (N° 4 - N° 8)
(mm)	ASTM	Tamaño de las fracciones (g)						
75 - 63	3" - 2 ½"	2.500 ± 50						
63 - 50	2 ½" - 2"	2.500 ± 50						
50 - 37,5	2" - 1 ½"	5.000 ± 50	5.000 ± 25					
37,5 - 25,0	1 ½" - 1"		5.000 ± 50	5.000 ± 25	1.250 ± 10			
25,0 - 19	1" - ¾"			5.000 ± 25	1.250 ± 25			
19 - 12,5	¾" - ½"				1.250 ± 10	2.500 ± 10		
12,5 - 9,5	½" - 3/8"				1.250 ± 25	2.500 ± 10		
9,5 - 6,3	3/8" - ¼"						2.500 ± 10	
6,3 - 4,75	¼" - N° 4						2.500 ± 10	
4,75 - 2,36	N°4 - N°8							5.000 ± 10
Masa inicial de muestra (Mi)		10.000 ± 100	10.000 ± 75	10.000 ± 50	5.000 ± 10	5.000 ± 10	5.000 ± 10	5.000 ± 10
Esferas								
numero		12		12	11	8	6	
masa (g)		5.000 ± 25		5.000 ± 25	4.584 ± 25	3.330 ± 25	2.500 ± 15	
Numero de revoluciones		1.000			500			

Fuente: Manual de Carretera V4C de Administración Boliviana de Caminos

Nota 3: En caso que alguna de las fracciones del grado elegido tenga un porcentaje parcial retenido muy bajo, que requiera tamizar una cantidad de material muy alta para componerlo, se considerará como grado de ensaye aquel que entregue la suma de parciales retenidos inmediatamente inferior a la del grado elegido. En el caso del grado 4 se entenderá como porcentaje parcial retenido muy bajo un valor igual o inferior que 4%.

Cuando se trate de áridos sin tratamiento ni selección, debe procesar la muestra a fin de componer la banda granulométrica adecuada al uso propuesto y elegir de la tabla el grado de ensaye correspondiente a dicha banda granulométrica.

Procedimiento:

- Pese los tamaños de las fracciones correspondientes al grado elegido, de acuerdo con la Tabla, Registre la masa del total de material por ensayar como masa inicial de la muestra (mi), aproximando a 1 g.
- Coloque la masa inicial de material en la máquina de los ángeles y ensaye de acuerdo con el grado elegido (número y masa de esferas, y número de revoluciones), según Tabla.

Nota 4: Seleccione las esferas de manera tal que la suma de sus masas individuales cumpla con los valores estipulados en la Tabla.

Fotografía 26: Muestra colocada en la máquina de los ángeles para el ensayo



Fuente: Elaboración propia

- Una vez completado el número de revoluciones correspondiente, saque el material de la máquina evitando pérdidas y contaminaciones.
- Separe la carga abrasiva.
- Efectúe un primer tamizado en un tamiz de 2,36 mm o superior, a fin de evitar dañar el tamiz de corte (1,7 mm).
- Tamice manualmente el material bajo 2,36 mm por tamiz de 1,7 mm (N° 12), según procedimiento de tamizado final.
- Reúna todo el material retenido en ambos tamices, lávelo, séquelo hasta masa constante en horno a $110 \pm 5^\circ \text{C}$ $230 \pm 10^\circ \text{F}$ y deje enfriar a temperatura ambiente.
- Pese y registre la masa del material retenido como masa final de la muestra (mf), aproximando a 1 g.

Fotografía 27: Realización del ensayo de los ángeles



Fuente: Elaboración propia

Cálculos:

- Calcule el desgaste de áridos como el porcentaje de pérdida de masa de la muestra, aproximando a un decimal, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$P(\%) = \frac{(m_i - m_f)}{m_i} \cdot 100$$

Donde:

P = Pérdida de masa de la muestra (%).

m_i = Masa inicial de la muestra (grs).

m_f = Masa final de la muestra (grs).

Nota 5: Los resultados de ensaye de los grados 1, 2 y 3 con 1.000 revoluciones no tienen relación consistente con los resultados de los grados 4, 5, 6 y 7 con 500 revoluciones y, por lo tanto, no son comparables.

A continuación, se detallan los resultados para los diferentes tramos en estudio (para más detalles de planillas revisar ANEXOS):

Cuadro 25: Desgaste de los ángeles (Estudio 1: Santa Ana - Yesera)

ESTUDIO 1. SANTA ANA-YESERA					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Desgaste de los ángeles (3/4")	%	27,00		40	T-96
Desgaste de los ángeles (3/8")	%	25,56		40	

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 26: Desgaste de los ángeles (Estudio 2: Tomatitas – Erquiz Ceibal – Cruce Cadillar)

ESTUDIO 2. TOMATTAS-ERQUIZ CEIBAL-CRUCÉ CADILLAR					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Desgaste de los ángeles (3/4")	%	22,92		40	T-96
Desgaste de los ángeles (3/8")	%	23,08		40	

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 27: Desgaste de los ángeles (Estudio 3: Santa Bárbara)

ESTUDIO 3. SANTA BÁRBARA					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Desgaste de los ángeles (3/4")	%	18,42		40	T-96
Desgaste de los ángeles (3/8")	%	16,56		40	

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 28: Desgaste de los ángeles (Estudio 4: Bermejo – San Antonio)

ESTUDIO 4. BERMEJO-SAN ANTONIO					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Desgaste de los ángeles (3/4")	%	18,04		40	T-96
Desgaste de los ángeles (3/8")	%	20,88		40	

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 29: Desgaste de los ángeles (Estudio 5: Puerta al Chaco – Canaletas -Villa Montes)

ESTUDIO 5. PUERTA AL CHACO-CANALETAS-VILLA MONTES					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Desgaste de los ángeles (3/4")	%	28,10		40	T-96
Desgaste de los ángeles (3/8")	%	29,26		40	

Fuente: Elaboración propia

3.4.5 Durabilidad del agregado

Método de los sulfatos para determinar la desintegración (ASTM C 88 AASHTO T104)

Objetivo:

Este método establece el procedimiento para determinar la desintegración de los áridos mediante soluciones de sulfato de sodio o sulfato de magnesio. El uso de una u otra sal es alternativo, pero sus resultados no son comparables.

Este método se aplica a los áridos que se utilizan en la elaboración de morteros, hormigones y mezclas asfálticas.

Equipos y materiales:

- Balanza para áridos finos de capacidad superior a 500 g y una precisión de 0,1 g.
- Balanza para áridos gruesos de capacidad superior a 5.000 g y una precisión de 0,1 g. 2.
- Horno con circulación de aire y temperatura regulable para las condiciones del ensaye. 3.
- Tamices emplee la misma serie de tamices especificados anteriormente.
- Recipientes: Canastillos rígidos y químicamente inertes con las soluciones de ensaye. Las perforaciones deben permitir el libre acceso y drenaje de la solución sin pérdidas de material de la muestra.

Nota 1: Se recomienda emplear canastillos fabricados con tela metálica de aberturas adecuadas a las fracciones de áridos en ensaye.

- Recipientes para solución, rígidos, estancos y químicamente inertes con las soluciones de ensaye. Serán de forma y tamaño tales que permitan contener los canastillos completamente sumergidos en la solución. Deben tener un dispositivo para regular la temperatura de la solución durante la inmersión.
- Reactivos: Para cada operación se debe disponer de un volumen de solución igual o mayor a 5 veces el volumen aparente de la muestra.

- Solución de sulfato de sodio. Disuelva aproximadamente 350g de sulfato de sodio anhidro (Na_2SO_4) o aproximadamente 750g de sulfato de sodio deshidratado ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) por litro de agua a una temperatura mayor a 25°C y menor a 0°C . Revuelva completamente durante la adición de la sal y a intervalos regulares hasta su uso. Enfríe y mantenga a una temperatura de $20 \pm 3^\circ\text{C}$ durante un período igual o mayor a 48 h previas al uso.
- Al momento del empleo, la solución debe tener una densidad (g/ml) comprendida entre 1,151 y 1,174 a $20 \pm 3^\circ\text{C}$.

Nota 2: Es recomendable usar el producto comercial anhidro por tener mayor solubilidad que el producto hidratado.

Nota 3: El ajuste de la densidad se logra diluyendo o disolviendo más sal, según corresponda.

- Solución de sulfato de magnesio. Disuelva 350 g de sulfato de magnesio anhidro (MgSO_4) o 1.400 g de sulfato de magnesio heptahidratado $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ por litro de agua a una temperatura mayor que 25°C y menor que 30°C . Revuelva completamente durante la adición de la sal y a intervalos regulares hasta su uso. Enfríe y mantenga a una temperatura de $20 \pm 3^\circ\text{C}$ durante un período igual o mayor a 48 h previas al uso.
- Al momento de empleo la solución debe tener una densidad (g/ml) comprendida entre 1,295 y 1,308 a $20 \pm 3^\circ\text{C}$.

Fotografía 28: Preparación de solución de sulfato de sodio



Fuente: Elaboración propia

Extracción y preparación de la muestra:

Extracción de muestras: Extraiga y prepare las muestras, con sus respectivas granulometrías.

Tamaño de la muestra de ensaye

- Áridos fino: Pase previamente por el tamiz de 9,5mm ($3/8''$) para hormigón y 4,75mm (N° 4) para asfalto. Cuando el material retenido exceda el 5% de la muestra, ensaye de acuerdo con tabla 23.

Prepare la muestra con el material que pasa por el tamiz de 9,5mm ($3/8''$) para hormigón y 4,75 mm (N° 4) para asfalto; debe tener un tamaño tal que permita obtener las fracciones de muestra especificadas en la siguiente Tabla 23.

- Áridos grueso: Pase previamente por el tamiz de 4,75mm (N° 4) para hormigón y 2,36mm (N° 8) para asfalto. Cuando el material que pasa exceda el 5 % de la muestra, ensaye de acuerdo con tabla 24.

Prepare la muestra con el material retenido en el tamiz de 4,75mm (N° 4) para hormigón y 2,36 mm (N° 8) para asfalto; debe tener un tamaño tal que permita obtener las fracciones de muestra especificadas en la siguiente Tabla 24.

Tabla 23: Tamaño de la muestra de ensaye de áridos finos

Fracción	Tamaño de partículas (mm)	Masa mínima de la fracción (grs)
1	4,75-9,50	100
2	2,36-4,75	100
3	1,18-2,36	100
4	0,60-1,18	100
5	0,30-0,60	100

Fuente: Manual de carretera V4C de Administración Boliviana de Caminos

Nota 4: Fracción 1, 2, 3, 4 y 5 para hormigón, fracción 2, 3, 4 y 5 para asfalto

Tabla 24: Tamaño de la muestra de ensaye de áridos gruesos

Fracción	Tamaño de partículas (mm)	Masa de la subfracción (g)	Masa de fracción (g)
1	50-63	3.000 ± 300	5.000 ± 300
	37,5-50	2.000 ± 200	
2	25,0-37,5	1.000 ± 50	1.500 ± 50
	19-25,0	500 ± 30	
3	12,5-19	670 ± 10	1.000 ± 10
	9,5-12,5	330 ± 5	
4	4,75-9,5	300 ± 5	300 ± 5
5	2,36-4,75	100 ± 5	100 ± 5

Fuente: Manual de carretera V4C de Administración Boliviana de Caminos

Nota 5: - Para tamaños mayores a 63 mm constituir fracciones de 7.000 ± 1.000 g por cada incremento del tamaño en 25 mm. La fracción 5 es sólo para asfalto.

- Tome los tamaños de muestra indicados en la Tabla 23 considerando el porcentaje parcial retenido (Ppr) de cada fracción, determinado mediante tamizado, en la forma siguiente:
- Ensaye las fracciones indicadas siempre que el Ppr sea igual o mayor que 5%.
- No ensaye las fracciones que tengan un Ppr menor que 5%.
- Si una subfracción de áridos gruesos tiene un Ppr menor que 3%, componga la fracción con la subfracción que exista, siempre que ella tenga un Ppr igual o mayor a 3%.

Acondicionamiento de la muestra de ensaye

- Áridos fino: Lave la muestra de ensaye sobre un tamiz de 0,3mm (N°50) o 0,15mm (N°100), para hormigón o asfalto, respectivamente, Seque hasta masa constante en horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$. Tamice de modo de obtener las fracciones de muestra especificadas en la Tabla 23
Pese los tamaños de muestra requeridos para cada fracción y registre la masa inicial (mi) de cada una de ellas, aproximando a 0,1 g.

Coloque cada fracción en su canastillo.

- Áridos grueso: Lave la muestra de ensaye sobre un tamiz de 4,75mm (N°4) o 2,36mm (N° 8), según corresponda.

Seque hasta masa constante en horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Tamice de modo de obtener las subfracciones de muestra especificada en la siguiente tabla:

Tabla 25: Serie de tamices para examen cuantitativo

Fracción	Tamaño de partículas de la fracción original (mm)	Tamices, tamaños nominales de abertura	
		ASTM	mm
1	37,5-68	1"	25
2	19-37,5	1/2"	12,5
3	9,5-19	1/4"	6,3
4	4,75-9,5	N°8	2,36
5	2,36-4,75	N°10	2,0

Fuente: Manual de carretera V4C de Administración Boliviana de Caminos

Pese los tamaños de muestra requeridos para cada subfracción.

Componga y pese las fracciones requeridas y registre la masa inicial (mi) de cada una de ellas, aproximando a 1 g.

Cuente y registre el número inicial de partículas (ni) de tamaño mayor a 19mm ($\frac{3}{4}$).

Coloque cada fracción en su canastillo.

Fotografía 29: Peso de agregados grueso y fino para ensayo de durabilidad

Fuente: Elaboración propia

Fotografía 30: Preparación de cada fracción de agregado según tabla

Fuente: Elaboración propia

Ciclos de inmersión y secado:

- Sumerja los canastillos con las fracciones de muestra en la solución de sulfato de sodio o sulfato de magnesio a una temperatura de $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ por un período de 17 r 1 h, de modo que los áridos queden cubiertos por una capa de solución superior a 1,5 cm. Cubra los recipientes para reducir la evaporación y evitar contaminaciones.

- Retire los canastillos con las fracciones de muestra de la solución; deje escurrir durante 15 r 5 min y seque hasta masa constante en horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$. Deje enfriar a temperatura ambiente.
- Repita 5 veces el ciclo de inmersión y secado.
- Terminado el número de ciclos y una vez enfriada la muestra, lave hasta eliminar totalmente el sulfato.

Nota 4: Para determinar el término del lavado se recomienda comprobar el agua de lavado mediante solución de cloruro de bario al 10%. No debe formarse precipitado blanco.

- Seque hasta masa constante en horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$; deje enfriar a temperatura ambiente. Cubra los canastillos para evitar absorciones o contaminaciones.
- Determine la masa final de las fracciones de acuerdo con el siguiente procedimiento:

Áridos fino

Tamice cada fracción de áridos fino en el tamiz en que fue retenida al iniciar el ensaye. -Pese y registre la masa del material retenido como masa final de la fracción correspondiente (mf), aproximando a 0,1 g.

Áridos grueso

Tamice cada fracción de árido grueso por el tamiz correspondiente de acuerdo con la Tabla 25.

Nota: La fracción 5 es sólo para asfalto.

- Pese y registre la masa del material retenido como masa final de la fracción correspondiente (mf), aproximando a 1g.
- Examine cualitativamente y cuantitativamente las partículas mayores que 19mm ($\frac{3}{4}$ "") como sigue:

- Observe y registre el efecto de la acción del sulfato (desintegración, agrietamiento, hendidura, exfoliación, desmoronamiento, etc.).
- Cuente y registre el número final de partículas (nf).

Fotografía 31: Material preparado con sulfato de sodio



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 32: Material de ensayo de sulfato de sodio en el horno



Fuente: Elaboración propia

Cálculos:

Calcule el porcentaje ponderado de pérdida de masa de cada fracción de muestra de acuerdo con la fórmula siguiente, aproximando al 0,1 %.

$$P_N (\%) = \frac{m_i - m_f}{m_i} \cdot p_{pr}$$

Donde:

P_N = Porcentaje ponderado de pérdida de masa de cada fracción de muestra (%).

m_i = Masa inicial de la fracción (grs).

m_f = Masa final de la fracción (grs).

p_{pr} = Porcentaje parcial retenido correspondiente a la fracción según el análisis granulométrico (%).

Para las fracciones no ensayadas de acuerdo con lo especificado en 7 c), considere que tienen una pérdida de masa igual a la media aritmética de las pérdidas de las dos fracciones inmediatamente superior e inferior. Si se trata de una fracción extrema considere que tiene una pérdida igual a la de la fracción más próxima.

Calcule la desintegración del árido fino o grueso, según corresponda, como el porcentaje de pérdida de masa de la muestra de acuerdo con la fórmula siguiente, aproximando al 0,1%.

$$P(\%) = (P_1 + P_2 + \dots + P_n)$$

Donde:

P = Porcentaje de pérdida de masa de la muestra (%).

P_n = Porcentaje ponderado de pérdida de masa de cada fracción de muestra (%).

Calcule el porcentaje de partículas mayores que 19mm ($3/8$) afectadas por la acción del sulfato, según la fórmula siguiente, aproximando al 1%.

$$A(\%) = \frac{n_i - n_f}{n_i} \cdot 100$$

Donde:

A = Porcentaje de partículas mayores que 19 mm afectadas por la acción del sulfato (%).

ni = Número inicial de partículas mayores que 19 mm.

nf = Número final de partículas mayores que 19 mm.

A continuación, se presentan los resultados para el ensayo descrito (para más detalles de las planillas revisar ANEXOS).

Cuadro 30: Durabilidad de los agregados pétreos (Estudio 1: Santa Ana - Yesera)

ESTUDIO 1. SANTA ANA-YESERA					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Durabilidad agregado 3/4"	%	0,10		12	T-104
Durabilidad agregado 3/8"	%	1,55		12	
Durabilidad agregado fino	%	0,60		12	

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 31: Durabilidad de los agregados pétreos (Estudio 2: Tomatitas – Erquiz Ceibal – Cruce Cadillar)

ESTUDIO 2. TOMATITAS-ERQUIZ CEIBAL-CRUCES CADILLAR					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Durabilidad agregado 3/4"	%	6,12		12	T-104
Durabilidad agregado 3/8"	%	5,68		12	
Durabilidad agregado fino	%	7,76		12	

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 32: Durabilidad de los agregados pétreos (Estudio 3: Santa Bárbara)

ESTUDIO 3. SANTA BÁRBARA					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Durabilidad agregado 3/4"	%	6,22		12	T-104
Durabilidad agregado 3/8"	%	5,89		12	
Durabilidad agregado fino	%	4,39		12	

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 33: Durabilidad de los agregados pétreos (Estudio 4: Bermejo – San Antonio)

ESTUDIO 4. BERMEJO-SAN ANTONIO					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Durabilidad agregado 3/4"	%	2,15		12	T-104
Durabilidad agregado 3/8"	%	1,95		12	
Durabilidad agregado fino	%	0,53		12	

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 34: Durabilidad de los agregados pétreos (Estudio 5: Puerta al Chaco – Canaletas – Villa Montes)

ESTUDIO 5. PUERTA AL CHACO-CANALETAS-VILLA MONTES					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Durabilidad agregado 3/4"	%	5,72		12	T-104
Durabilidad agregado 3/8"	%	1,15		12	
Durabilidad agregado fino	%	2,13		12	

Fuente: Elaboración propia

3.4.6 Límites

Determinación del límite líquido de los suelos (ASTM D4318 AASHTO T89)

Objeto:

Este método establece el procedimiento para determinar el límite líquido de los suelos, mediante la máquina Casagrande.

Definición

El límite Líquido, es la humedad, expresada como porcentaje de la masa de suelo seco en horno, de un suelo remoldeado en el límite entre los estados líquido y plástico. Corresponde a la humedad necesaria para que una muestra de suelo remoldeada, depositada en la taza de bronce de la máquina Casagrande y dividida en dos porciones simétricas separadas 2 mm entre sí, fluya y entren en contacto en una longitud de 10 mm, aplicando 25 golpes.

Equipo y materiales

- Plato de Evaporación: Debe ser de porcelana, acero inoxidable, bronce o aluminio, con un diámetro de aproximadamente 120 mm.
- Espátula: Debe contar con una hoja flexible de aproximadamente 75 mm de largo y 20 mm de ancho.
- Aparato de Límite Líquido (Máquina Casagrande): Taza de bronce con una masa de 200 ± 20 g, montada en un dispositivo de apoyo fijado a una base de plástico duro de una resiliencia tal que una bolita de acero de 8 mm de diámetro, dejada caer libremente desde una altura de 25 cm, rebote entre un 75 y un 90%, (Figura S0304_1).
- Acanalador: Combinación de acanalador y calibre, construido de acuerdo con el plano y dimensiones de la figura de la Figura S0304_2.
- Cápsulas para Secado: Debe ser de aluminio, bronce o acero inoxidable.
- Balanza: La balanza debe tener una precisión de 0,01 g.
- Probeta Graduada: La probeta debe tener una capacidad mínima de 25 ml.
- Horno: Provisto de circulación de aire y temperatura regulable capaz de mantener la temperatura a $60 \pm 5^\circ\text{C}$.

Nota 1: No se debe ocupar la superficie inferior del horno para el secado de muestras, pues ésta se encuentra siempre a una temperatura superior a la fijada.

Nota 2: Se recomienda para una mayor velocidad de secado el uso de hornos con convección forzada.

Ajuste y control del aparato de límite líquido

Ajuste de la Altura de Caída de la Taza:

Gire la manivela hasta que la taza se eleve a su mayor altura. Utilizando el calibrador de 10 mm (adosado al ranurador), verifique que la distancia entre el punto de percusión y la base sea exactamente de 10 mm. De ser necesario, afloje los tornillos de fijación y mueva el de ajuste hasta obtener la altura de caída requerida. Si el ajuste es correcto se escuchará un ligero campanilleo producido por la leva al golpear el tope de la taza; si la

taza se levanta por sobre el calibre o no se escucha ningún sonido, realice un nuevo ajuste.

Verificaciones Adicionales:

- No debe producirse juego lateral por desgaste entre la taza y el pasador que la sostiene.
- Los tornillos que conectan la taza con el apoyo deben estar apretados.
- El desgaste de la taza no debe sobrepasar la tolerancia de masa especificada en 3.
- El diámetro de la huella del punto de percusión en la base no debe exceder 15 mm. Cuando esto ocurra, pula la base, verificando que se mantiene la resiliencia especificada en 3.
- El desgaste del ranurador no debe sobrepasar las tolerancias dimensionales especificadas en la figura de la Figura S0304_2.
- Antes de cada ensaye verifique que la base y la taza estén limpias y secas.

Preparación de la muestra de ensaye

Extraiga por cuarteo una muestra representativa de un tamaño tal que asegure una masa mínima de ensaye de 500 g de material bajo tamiz 0,425 mm (N° 40).

Desmenuce los terrones con mortero, sin reducir el tamaño natural de las partículas individuales.

Seque la muestra al aire o en horno a una temperatura que no exceda de 60°C.

Distribuya de la siguiente forma la masa mínima de ensaye obtenida en 12.

Límite Líquido 160 g

Límite Plástico 40 g

Límite de Contracción 100 g

Ensayes de control 200 g

Acondicionamiento de la Muestra

Coloque la muestra en el plato de evaporación; agregue agua destilada y mezcle completamente mediante la espátula. Continúe la operación durante el tiempo y con la cantidad de agua destilada necesarios para asegurar una mezcla homogénea.

Cure la muestra durante el tiempo necesario para que las fases líquida y sólida se mezclen homogéneamente. El tiempo de curado de las muestras depende del grado de plasticidad del suelo, para lo cual existe la siguiente clasificación:

- | | |
|------------------------------|--------|
| Suelos de alta plasticidad: | • 24 h |
| Suelos de plasticidad media: | • 12 h |
| Suelos de baja plasticidad: | • 1 h |

Fotografía 33: Peso de las cápsulas sin muestra para ensayo de límites



Fuente: Elaboración propia

Procedimiento de ensaye

Coloque el aparato de límite líquido sobre una base firme.

Coloque en la taza una porción de la muestra acondicionada utilizando una espátula; la masa de suelo deberá colocarse centrándola en el punto de apoyo de la taza con la base.

Fotografía 34: Colocado de la muestra en la taza casa grande con ayuda de la espátula



Fuente: Elaboración propia

Moldee la masa de suelo con la espátula, evitando incorporar burbujas de aire en la mezcla.

Enrase y nivele a 10mm en el punto de máximo espesor.

Reincorpore el material excedente al plato de evaporación.

Divida la pasta de suelo, pasando el acanalador cuidadosamente a lo largo del diámetro que pasa por el eje de simetría de la taza, de modo que se forme una ranura clara y bien delineada de las dimensiones especificadas. Pase el acanalador, manteniéndolo perpendicular a la superficie interior de la taza; en ningún caso debe existir desprendimiento de la pasta del fondo de la taza; si ello ocurre, retire todo el material y reinicie el procedimiento. La formación de la ranura se debe lograr con el mínimo de pasadas, limpiando el acanalador después de cada pasada.

Fotografía 35: División de la pasta de suelo con el acanalador



Fuente: Elaboración propia

Gire la manivela levantando y dejando caer la taza con una frecuencia de dos golpes por segundo, hasta que las paredes de la ranura entren en contacto en el fondo del surco a lo largo de un tramo de 10 mm.; si el cierre de la ranura es irregular, descarte el resultado. Registre el número de golpes obtenido (N).

Retire aproximadamente 10 g del material que se junta en el fondo del surco; colóquelo en una cápsula de secado y determine su humedad (w).

Fotografía 36: Extracción de muestra de material en una cápsula (tara)



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 37: Peso de la muestra + cápsula para la determinación de humedad

Fuente: Elaboración propia

Transfiera el material que quedó en la taza al plato de evaporación; lave y seque la taza y el ranurador.

Continúe batiendo con la espátula la pasta de suelo que quedó en el plato de evaporación para obtener un secado homogéneo. Repita las operaciones precedentes desde 20 en adelante, para dar origen a un nuevo punto.

Nota 3: El ensaye se debe realizar desde la condición más húmeda a la más seca; en ningún caso se debe rehumedecer la pasta de suelo.

El ensaye requiere de al menos cinco puntos para el trazado de la curva de fluidez.

Nota 4: Se recomienda que los puntos seleccionados se encuentren en el rango de 10 a 45 golpes.

Cálculos

Calcule y registre la humedad de cada determinación (w), de acuerdo con el método definido anteriormente para determinar el contenido de humedad.

Construya un gráfico semilogarítmico, con la humedad (w) como ordenada en escala aritmética y el número de golpes (N) como abscisa en escala logarítmica.

Dibuje los puntos correspondientes a los resultados de cada una de las cinco (o más) determinaciones efectuadas y construya una recta (curva de fluidez) que pase tan aproximadamente como sea posible por los puntos.

Para los casos que se requiera la determinación del límite líquido de los suelos fundamentalmente plásticos, existen varios métodos, el primero que es mediante la determinación del contenido de humedad de un punto, y mediante la aplicación de la ecuación:

$$W_L = \left[\frac{N}{25} \right]^{0.121} \cdot w$$

Donde:

N = Número de golpes (adimensional).

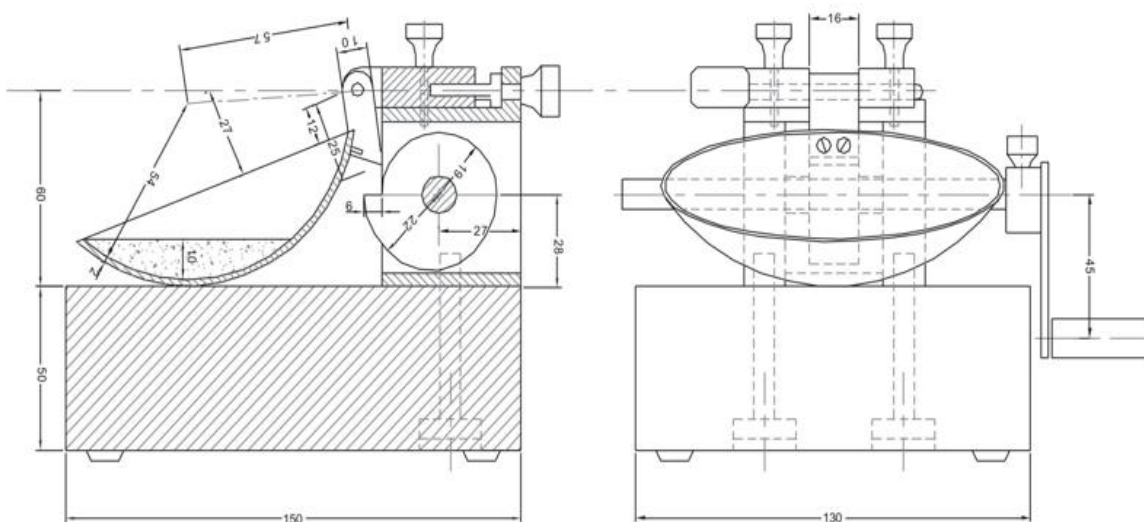
w = Contenido de humedad (%).

Para los casos que se tengan cinco puntos (lo mínimo que se debe exigir son 3), deberán considerarse dos puntos que contengan la suficiente humedad para que el número de golpes sea menor a 25, y los otros dos puntos con contenidos de humedad de manera de obtener un número de golpes mayor a los 25.

Expresar el límite líquido (LL) del suelo como la humedad correspondiente a la intersección de la curva de fluidez con la abscisa de 25 golpes, aproximando a un decimal.

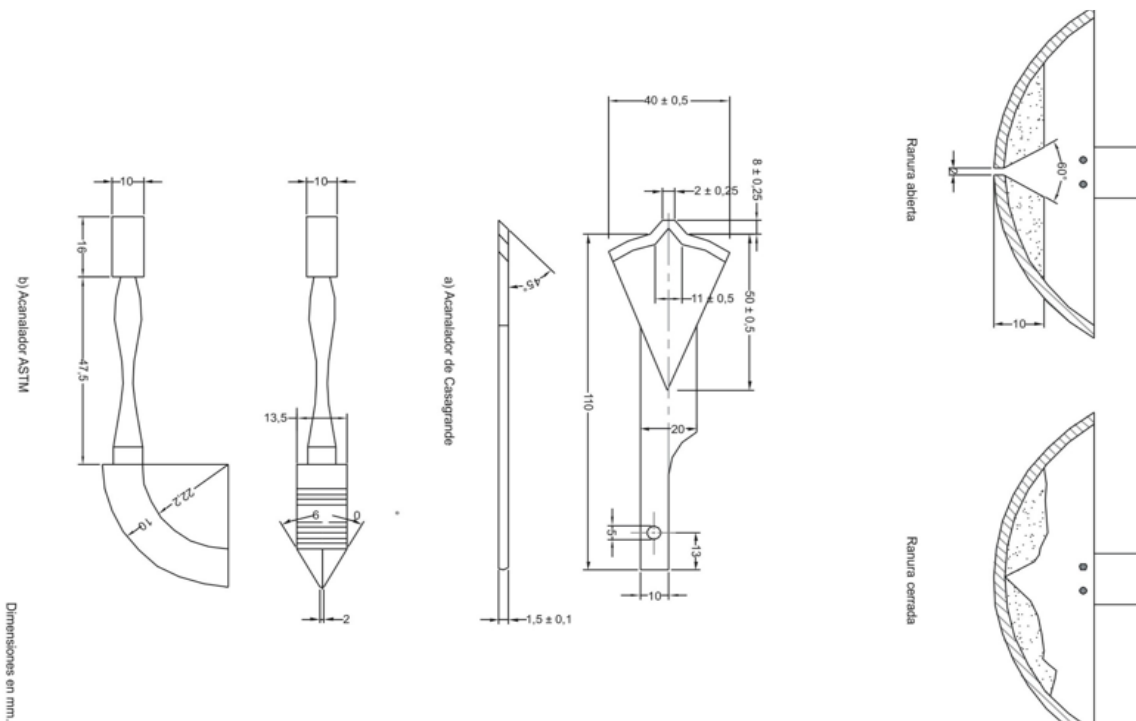
Nota 5: Más adelante se incluye un formato tipo de ficha de ensayo de Límites de Atterberg, en el cual se registrarán los resultados obtenidos en las determinaciones de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad.

Ilustración 6: Aparato para determinar límite líquido



Fuente: Manual de carretera V4C de Administración Boliviana de Caminos

Ilustración 7: Sección de la ranura en la pasta de suelo antes y después del ensaye acanaladores



Fuente: Manual de carretera V4C De Administración Boliviana de Caminos

Determinación del límite plástico e índice de plasticidad (ASTM D4318 AASHTO T90)

Objeto:

Este método establece el procedimiento para determinar el límite plástico y el índice de plasticidad de los suelos.

Definición:

1. Límite plástico

Humedad expresada como porcentaje de la masa de suelo seco en horno, de un suelo remoldeado en el límite entre los estados plástico y semisólido. Corresponde a la humedad necesaria para que bastones cilíndricos de suelo de 3mm de diámetro se disgreguen en trozos de 0,5 a 1cm de largo y no puedan ser reamados ni reconstituidos.

Equipo y materiales

- Plato de evaporación: Debe ser de porcelana, acero inoxidable, bronce o aluminio, con un diámetro de 120 mm aproximadamente.
- Espátula: Debe tener una hoja flexible de aproximadamente 75 mm de largo y 20 mm de ancho.
- Superficie de amasado: Placa de vidrio esmerilado de 20 x 20 cm.
- Cápsulas para secado: Deben ser de aluminio, bronce o acero inoxidable.
- Balanza: Debe tener una precisión de 0,01 g.
- Probeta graduada: Debe tener una capacidad mínima de 25 ml.
- Patrón de comparación: Alambre o plástico de 3 mm de diámetro.
- Horno: Debe tener circulación de aire y temperatura regulable, capaz de mantener una temperatura de 60 ± 5 °C.

Extracción y preparación de la muestra

Preparación de la muestra

Extraiga, por cuarteo, una muestra representativa de un tamaño que asegure una masa mínima de ensaye de 500g de material bajo tamiz 0,425mm (N° 40).

Desmenuce los terrones con mortero, sin reducir el tamaño natural de las partículas individuales.

Seque la muestra al aire o en horno a una temperatura que no exceda de 60°C.

La masa mínima de ensaye, obtenida en 10 debe distribuirse como sigue:

Límite líquido = 60grs.

Límite plástico = 40grs.

Límite de contracción = 100grs.

Ensayes de control = 200grs.

Acondicionamiento de la muestra

Coloque la muestra en el plato de evaporación; agregue agua destilada y mezcle completamente mediante la espátula. Continúe la operación durante el tiempo y con la cantidad de agua destilada necesarios para asegurar una mezcla homogénea.

Cure la muestra durante el tiempo necesario para que las fases líquida y sólida se mezclen homogéneamente. El tiempo de curado de las muestras depende del grado de plasticidad del suelo, existiendo la siguiente clasificación:

Suelos de alta plasticidad: • 24 h

Suelos de plasticidad media: • 12 h

Suelos de baja plasticidad: • 1 h

Una vez curado el material, reduzca la humedad si es necesario mediante revoltura con la espátula, hasta que la pasta se vuelva suficientemente plástica para moldearla como una esfera.

Procedimiento

Tome una porción de la muestra de ensaye acondicionada de aproximadamente 1 cm³.

Amase la muestra entre las manos; luego hágala rodar sobre la superficie de amasado, ejerciendo una leve presión con la palma de la mano hasta conformar un cilindro.

Cuando el cilindro alcance un diámetro de aproximadamente 3 mm, doble, amase nuevamente y vuelva a conformar el cilindro.

Repita la operación, manteniendo la velocidad y la presión de amasado, hasta que el cilindro se disgregue al llegar a un diámetro de aproximadamente 3 mm, en trozos del orden de 0,5 a 1 cm de largo y no pueda ser reamasado ni reconstituido.

Reúna las fracciones del cilindro disgregado y colóquelas en una cápsula de secado, previamente tarada. Determine y registre la humedad (w) de acuerdo con el Método S0301, aproximando a un decimal.

Repita las anteriores etapas con dos porciones más de la muestra de ensaye.

Cálculos

Calcule el Límite plástico (LP) como el promedio de las tres determinaciones efectuadas sobre la muestra de ensaye, aproximando a un decimal. Las determinaciones no deben diferir entre sí en más de dos puntos; cuando no se cumpla esta condición, repita todo el ensaye.

Calcule el índice de plasticidad (IP) del suelo de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$IP = LL - LP$$

Donde:

IP = Índice de plasticidad del suelo (%).

LL = Límite líquido del suelo (%).

LP = Límite plástico del suelo (%).

Cuando no pueda determinar uno de los dos límites (LL o LP), o la diferencia resulte negativa, informe el índice de plasticidad como NP (no plástico).

Calcule el índice líquido (IL) del suelo de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$IL = \frac{W - LP}{LP}$$

Donde:

IL = Índice líquido del suelo.

W = Humedad natural del suelo (%).

LP = Límite plástico del suelo (%).

IP = Índice de plasticidad del suelo (%).

Calcule el índice de consistencia (IC) del suelo de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$LC = \frac{LL - W}{IP}$$

Donde:

IC = Índice de consistencia del suelo.

LL = Límite líquido del suelo (%).

W = Humedad natural del suelo (%).

IP = Índice de plasticidad del suelo (%).

A continuación, se muestran los ensayos realizados para cada muestra y los valores obtenidos para cada uno de ellos, (para mayor detalle de planillas ver ANEXOS).

Cuadro 35: Límites (Estudio 1: Santa Ana - Yesera)

ESTUDIO 1. SANTA ANA-YESERA					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Límite líquido	%	18	-	35	T-89
Índice de plasticidad	%	N.P.	-	-	T-90

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 36: Límites (Estudio 2: Tomatitas – Erquiz Ceibal - Cruce Cadillac)

ESTUDIO 2. TOMATITAS-ERQUIZ CEIBAL-CRUCÉ CADILLAR					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Límite líquido	%	25	-	35	T-89
Índice de plasticidad	%	N.P.	-	-	T-90

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 37: Límites (Estudio 3: Santa Bárbara)

ESTUDIO 3. SANTA BÁRBARA					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Límite líquido	%	14	-	35	T-89
Índice de plasticidad	%	N.P.	-	-	T-90

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 38: Límites (Estudio 4: Bermejo – San Antonio)

ESTUDIO 4. BERMEJO-SAN ANTONIO					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Límite líquido	%	22	-	-	T-89
Límite plástico	%	N.P.	-	-	T-90

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 39: Límites (Estudio 5: Puerta al Chaco – Canaletas – Villa Montes)

ESTUDIO 5. PUERTA AL CHACO-CANALETAS-VILLA MONTES					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Límite líquido	%	16	-	-	T-89
Límite plástico	%	N.P.	-	-	T-90

Fuente: Elaboración propia

3.4.7 Caras fracturadas

Angularidad del agregado grueso ASTM D 5821

Objetivo:

Uno de los propósitos de esta estimación es maximizar la resistencia al corte mediante el incremento de la fricción entre partículas de las mezclas de agregado.

Otro propósito es proveer estabilidad para tratamientos superficiales de agregados mediante el incremento de la fricción y textura del agregado utilizado carpetas asfálticas delgadas.

Equipo y materiales:

- Juego de tamices

- Cuarteador mecánico
- Balanza de 5000 g de capacidad y aproximación de 1 gr.
- Espátula

Procedimiento:

Esparza la muestra en un área suficientemente grande, para inspeccionar cada partícula. Si es necesario lave el agregado sucio. Esto facilitará la inspección y detección de las partículas fracturadas.

Separe 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 producidas por procedimientos mecánicos.

Pese las partículas fracturadas y anote este valor.

Fotografía 38: Clasificación de partículas fracturadas y no fracturadas

Fuente: Elaboración propia

Fotografía 39: Inspección y detección de partículas fracturadas

Fuente: Elaboración propia

Fotografía 40: Peso de partículas fracturadas

Fuente: Elaboración propia

Cálculo y resultados:

Anote el peso exacto de las porciones de la muestra tomadas para el ensayo, comprendidas entre los tamaños antes especificados.

Anote el peso del material con caras fracturadas para cada tamaño.

Finalmente calcule el porcentaje de caras fracturadas para cada tamaño:

$$P(\%) = \frac{B}{A} * 100$$

Donde:

A = Peso exacto de las muestras tomadas para el ensayo (grs).

B = Peso del material con caras fracturadas para cada tamaño (grs).

P = Porcentaje de caras fracturadas para cada tamaño (%).

A continuación, se presentan los resultados de los diferentes tramos en estudio, (para más detalles revisar las planillas en ANEXOS).

Cuadro 40: Caras fracturadas (Estudio 1: Santa Ana – Yesera)

ESTUDIO 1. SANTA ANA-YESERA					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Caras fracturadas 3/4"	%	92,20	75	-	-
Caras fracturadas 3/8"	%	92,50	75	-	-

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 41: Caras fracturadas (Estudio 2: Tomatitas - Erquiz Ceibal - Cruce Cadillar)

ESTUDIO 2. TOMATTAS-ERQUIZ CEIBAL-CRUCE CADILLAR					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Caras fracturadas 3/4"	%	95,70	75	-	-
Caras fracturadas 3/8"	%	99,50	75	-	-

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 42: Caras fracturadas (Estudio 3: Santa Bárbara)

ESTUDIO 3. SANTA BÁRBARA					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Caras fracturadas	%	85,70	75	-	-

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 43: Caras fracturadas (Estudio 4: Bermejo - San Antonio)

ESTUDIO 4. BERMEJO-SAN ANTONIO					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Caras fracturadas	%	96,90	75	-	-

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 44: Caras fracturadas (Estudio 5: Puerta al Chaco - Canaletas - Villa Montes)

ESTUDIO 5. PUERTA AL CHACO-CANALETAS-VILLA MONTES					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Caras fracturadas	%	96,50	75	-	-

Fuente: Elaboración propia

3.4.8 Equivalente de arena

Determinación del valor equivalente de arena de suelos y agregados finos norma (ASTM D 2419)

Objetivo:

El equivalente de arena es una medida de la cantidad de contaminación de limo o arcilla en el agregado fino menor de 4.75 mm.

Equipo y materiales:

Tubo irrigado, de acero inoxidable, cobre o bronce, de 6.35 mm de diámetro exterior, 508 mm de longitud, cuyo extremo inferior está cerrado en forma de cuña.

Sistema de Sifón, se compone de un botellón de 3.8 lt de capacidad con un tapón. El tapón tiene dos orificios que lo atraviesan, uno para el tubo del sifón y el otro para entrada de aire. El conjunto deberá ubicarse a 90 cm por encima de la mesa.

Probeta graduada. Con diámetro interior de 31.75 ± 0.381 mm y 431.8 mm de altura graduada hasta una altura de 381 mm, provista de un tapón de caucho o goma que ajuste en la boca del cilindro.

Tubo flexible. De caucho o goma con 4.7 mm de diámetro, tiene una pinza que permite cortar el paso del líquido a través del mismo. Este tubo permite conectar el tubo irrigador con el sifón.

Pistón de metal.

Recipiente metálico.

Cronómetro o reloj. Lecturas en minutos y segundos

Embudo. De boca ancha para incorporar la muestra de ensayo en la probeta graduada.

Tamiz N°4

Recipiente para mezcla

Horno. Capaz de mantener temperaturas de $110\pm 5^{\circ}\text{C}$.

Procedimiento:

Llenamos la probeta hasta 10 cm con solución tipo (Cloruro de calcio, glicerina y agua destilada).

Fotografía 41: Llenado de la probeta con cloruro de calcio



Fuente: Elaboración propia

Vertemos contenido de muestra de arena.

Fotografía 42: Colocado de la muestra de arena

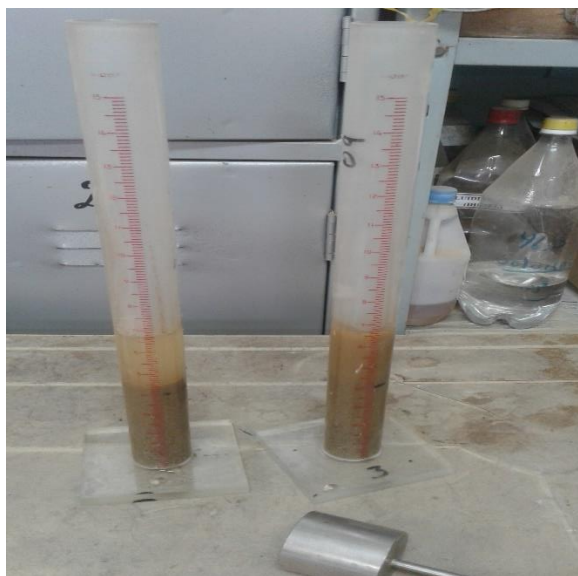


Fuente: Elaboración propia

Golpeamos parte inferior para desalojar burbujas y humedecer muestra.

Dejamos reposar 10 minutos.

Fotografía 43: Muestras de arena en reposo



Fuente: Elaboración propia

Tapamos la probeta y agitar 90 ciclos (ida y vuelta 20 cm) durante 30 segundos.

Fotografía 44: Probeta más muestra después de ser agitada



Fuente: Elaboración propia

Lavamos el tapón y las paredes interiores de la probeta con disolución lavadora.

Fotografía 45: Lavado de las paredes interiores de la probeta con disolución

Fuente: Elaboración propia

Introducimos tubo irrigador al fondo de la muestra y ascendemos poco a poco (permite el ascenso del material fino atrapado).

Fotografía 46: Introducción del tubo irrigador

Fuente: Elaboración propia

Dejar reposar durante 20 minutos.

Hacemos lecturas h1 y h2 para las dos muestras.

Fotografía 47: Ensayo equivalente de arena en reposo



Fuente: Elaboración propia

Cálculo y resultado:

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

$$\% \text{ de arena} = \frac{\text{lectura de arena}}{\text{lectura de arcilla}} * 100$$

A continuación, se muestran los resultados finales y tabulados para cada tramo en estudio (para mayor detalle de las planillas, revisar la parte de ANEXOS).

Cuadro 45: Equivalente de arena (Estudio 1: Santa Ana - Yesera)

ESTUDIO 1. SANTA ANA-YESERA					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Equivalente de arena	%	55,30	45	-	T-176

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 46: Equivalente de arena (Estudio 2: Tomatitas – Erquiz Ceibal – Cruce Cadillar)

ESTUDIO 2. TOMATTAS-ERQUIZ CEIBAL-CRUCES CADILLAR					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Equivalente de arena	%	59,20	45	-	T-176

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 47: Equivalente de arena (Estudio 3: Santa Bárbara)

ESTUDIO 3. SANTA BÁRBARA					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Equivalente de arena	%	59,20	45	-	T-176

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 48: Equivalente de arena (Estudio 4: Bermejo – San Antonio)

ESTUDIO 4. BERMEJO-SAN ANTONIO					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Equivalente de arena	%	66,10	45	-	T-176

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 49: Equivalente de arena (Estudio 5: Puerta al Chaco – Canaletas – Villa Montes)

ESTUDIO 5. PUERTA AL CHACO-CANALETAS-VILLA MONTES					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Equivalente de arena	%	82,40	45	-	T-176

Fuente: Elaboración propia

3.5 CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO

3.5.1 Viscosidad

Ensayo de viscosidad Saybolt furol (ASTM D244)

Objetivo:

Este método de ensayo permite determinar la consistencia de los materiales asfálticos mediante sus características de flujo. Empleando una temperatura de 135°C para los cementos asfálticos, de 25 y 50°C para las emulsiones asfálticas y de 50 y 60°C para los

asfaltos rebajados, haciendo a otras temperaturas, con el propósito de estudiar la susceptibilidad al calor de los materiales asfálticos y determinar las viscosidades apropiadas para su utilización.

La prueba consiste en determinar el tiempo que tarda en pasar 60 ml. del material a probar a través de un orificio furol, instalado en un tubo de Viscosidad Saybolt, bajo condiciones de carga y temperatura preestablecida.

Equipo y materiales:

- Viscosímetro Saybolt furol
- Recipiente
- Aceite
- Matraz 60 ml

Procesamiento:

Se colocan 450 grs. de la muestra de cemento asfáltico en un recipiente, para derretirla se calienta hasta alcanzar una temperatura superior en 15 °C a la prueba, agitándola de vez en cuando, excepto durante los últimos 30°C de calentamiento, cuando el agitado será continuo. El tiempo de calentamiento no será mayor de 2 horas.

Se llena el baño del viscosímetro con el aceite adecuado para la temperatura a la cual se efectuará la prueba o con agua si se trata de un asfalto rebajado.

Se limpia el tubo del equipo y se seca perfectamente antes de utilizarlo. Para facilitar esta limpieza, después de cada prueba el tubo de viscosidad se llena con aceite, se vacía y enseguida se limpia.

Una vez limpiado el tubo de viscosidad, se le inserta el tapón de corcho en su parte inferior, de manera que penetre de 6 a 9 mm, cuidando que ajuste herméticamente para evitar pérdidas de la muestra de prueba.

Se ajusta el baño del viscosímetro a una temperatura ligeramente inferior a la seleccionada para la prueba, se entibian y secan el tubo de viscosidad y el embudo con la malla N° 20 cuando se trate de cemento asfáltico o N° 100 para asfalto rebajado. A continuación, se vierte en el tubo de viscosidad la muestra preparada, filtrándola a través

de la malla, hasta que se derrame en la cazoleta; se coloca la tapa y se inserta el termómetro a través del orificio central de la misma.

Se ajusta la muestra continuamente con el termómetro, dándole a este un movimiento circular y evitando movimientos verticales que pudieran provocar la formación de burbujas, teniendo cuidado de no golpear el tubo de viscosidad para no presionar el asfalto a través del orificio de la boquilla se ajusta la temperatura del baño hasta que la muestra alcance la temperatura de prueba y se establezca el equilibrio térmico.

Cuando la temperatura de la muestra permanezca constante durante 1 minuto de agitado continuo, con una discrepancia no mayor de 0,3 °C respecto a la temperatura de prueba, se retira la tapa para verificar que la muestra dentro de la cazoleta no llegue al nivel de derrame y se vuelve a colocar la tapa.

Inmediatamente después se coloca el matraz debajo del tubo de viscosidad, se retira el tapón de corcho y simultáneamente se pone en marcha el cronometro, el cual se detiene en el momento en que la muestra alcance la marca de aforo de 60 cm³ del matraz y se registra el tiempo medido. El tiempo transcurrido desde que se inicia el llenado del tubo de viscosidad hasta que empiece el llenado del matraz.

Fotografía 48: Vertido del material



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 49: Control de la temperatura



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 50: Segundos después de retirar el corcho



Fuente: Elaboración propia

Cálculo y resultados:

Viscosidad Saybolt 135°C de 60 cm³ de muestra de asfalto

Cuadro 50: Promedios de viscosidad Saybolt asfalto convencional 85 – 100

Ensayos	Tiempo (seg)
1	115,5
2	115,1
Promedio	115,3

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestran los resultados para cada uno de los tramos en estudio, para ver más detalles dirigirse a la parte de Anexos.

Cuadro 51: Viscosidad Saybolt furol con cemento asfáltico 85 - 100 (Estudio 1: Santa Ana - Yesera)

ESTUDIO 1. SANTA ANA-YESERA					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Viscosidad Saybolt furol a 135°C	seg.	115,30	85	-	T-202

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 52: Viscosidad Saybolt furol con cemento asfáltico 85 - 100 (Estudio 2: Tomatitas – Erquiz Ceibal – Cruce Cadillar)

ESTUDIO 2. TOMATITAS-ERQUIZ CEIBAL-CRUCE CADILLAR					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Viscosidad Saybolt furol a 135°C	seg.	92,00	85	-	T-202

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 53: Viscosidad Saybolt furol con cemento asfáltico 85 - 100 (Estudio 3: Santa Bárbara)

ESTUDIO 3. SANTA BÁRBARA					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Viscosidad Saybolt furol a 135°C	seg.	92,00	85	-	T-202

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 54: Viscosidad Saybolt furol con cemento asfáltico 60 – 70 (Estudio 4: Bermejo – San Antonio)

ESTUDIO 4. BERMEJO-SAN ANTONIO					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Viscosidad Saybolt furol a 135°C	seg.	156,00	85	-	T-202

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 55: Viscosidad Saybolt furol con cemento asfáltico 85 – 100 (Estudio 5: Puerta al Chaco – Canaletas – Villa Montes)

ESTUDIO 5. PUERTA AL CHACO-CANALETAS-VILLA MONTES					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Viscosidad Saybolt furol a 135°C	seg.	87,00	85	-	T-202

Fuente: Elaboración propia

3.5.2 Penetración

Penetración (ASTM D5, AASHTO T49)

Objetivo:

Determina la dureza o consistencia relativa, midiendo la distancia que una aguja normalizada penetra verticalmente a una muestra de asfalto en condiciones especificadas de temperatura, carga y tiempo. Cuando no se mencionan específicamente otras condiciones, se determina la penetración normal. Esta se hace a 25 °C, calentando la muestra en un baño de agua termostáticamente controlada, la aguja cargada con 100 g y la carga se aplica durante 5 segundos. La unidad de penetración es la décima de milímetro.

Equipo y material:

Penetrómetro, cualquier equipo que permita el movimiento vertical sin fricción apreciable del vástago sostenedor de la aguja y que sea capaz de indicar la profundidad de la penetración con una precisión de 0,1 mm. El peso del vástago será de $47,5 \pm 0,05$ gr. El peso total del vástago con aguja será de $50 \pm 0,05$ gr. para cargas totales de 100 y 200 gr. Dependiendo de las condiciones en que se aplique el ensayo.

Aguja de Penetración, La aguja es de acero inoxidable templado y duro, debe tener aproximadamente 50 mm. de largo y diámetro entre 1,00 y 1,02 mm.

Cápsulas

Baño de agua

Transportador de cápsula

Aparato medidor de tiempo

Termómetros

Procedimiento:

Calentar el material en un recipiente, agitándolo para evitar sobrecalentamientos locales y para homogeneizar el material, hasta que alcance la fluidez que permita su vertido en los moldes para las probetas.

Se llena el molde para la probeta calentado a una temperatura semejante a la del material, hasta una altura que sea superior al menos en 10 mm a la penetración supuesta.

Después de llenar los moldes, protegerlos del polvo y permitir la eliminación de posibles burbujas de aire, y dejar enfriar al aire a una temperatura por un período entre 1 y 1.5 horas.

Sumergir el recipiente en el baño de agua a la temperatura controlada de 25°C, durante un periodo de 30 minutos.

Comprobar que el vástago soporte de la aguja este perfectamente limpio y seco, y que se deslice en forma suave y sin rozamientos

Fijar la aguja firmemente en su soporte. Se coloca el peso suplementario de 50g sobre el vástago, para obtener la masa móvil total de 100 ± 0.1 g.

Aproximar la aguja del penetrómetro hasta que su punta toque justamente la superficie de la muestra, sí que penetre.

Poner en cero el penetrómetro y se suelta seguidamente el mecanismo que libera la aguja durante el tiempo especificado.

Se lee y anota la distancia, expresada en décimas de milímetro, que haya penetrado la aguja en la muestra.

Se puede realizar más perforaciones en la muestra para lo cual se la vuelva a introducir al baño de agua durante un periodo de 15 minutos.

Al momento de repetir el ensayo se debe tener en cuenta que se las debe realizar tanto a 10mm de la perforación inicial y del borde.

Fotografía 51: Lectura de penetración 25°C, 5 segundos y con un peso de 100 grs.



Fuente: Elaboración propia

Cálculo y resultados:

Cuadro 56: Promedio ensayo de penetración con cemento asfáltico convencional 85-100

Penetración a 25°C, 100 grs., 5 seg. (0,1 mm) ASTHO T-49	Lectura N°1	mm.	92,30	88,30	Promedio
	Lectura N°2	mm.	92,00	92,80	
	Lectura N°3	mm.	88,30	92,50	
	Promedio	mm.	90,90	91,20	91,00

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestran los resultados para los distintos tramos en estudio, (para mayores detalles ver ANEXOS).

**Cuadro 57: Penetración a 25°C; 100 grs.; 5 Seg.; cemento asfáltico 85 – 100
(Estudio 1: Santa Ana – Yesera)**

ESTUDIO 1. SANTA ANA-YESERA					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Penetración a 25°C; 100 grs.; 5seg.	mm.	91,00	85	100	T-49

Fuente: Elaboración propia

**Cuadro 58: Penetración a 25°C; 100 grs.; 5 Seg.; cemento asfáltico 85 – 100
(Estudio 2: Tomatitas - Erquiz Ceibal -Cruce Cadillar)**

ESTUDIO 2. TOMATITAS-ERQUIZ CEIBAL-CRUCÉ CADILLAR					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Penetración a 25°C; 100 grs.; 5seg.	mm.	89,00	85	100	T-49

Fuente: Elaboración propia

**Cuadro 59: Penetración a 25°C; 100 grs.; 5 Seg.; cemento asfáltico 85 – 100
(Estudio 3: Santa Bárbara)**

ESTUDIO 3. SANTA BÁRBARA					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Penetración a 25°C; 100 grs.; 5seg.	mm.	97,80	85	100	T-49

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 60: Penetración a 25°C; 100 grs.; 5 Seg.; cemento asfáltico 60 – 70 (Estudio 4: Bermejo – San Antonio)

ESTUDIO 4. BERMEJO-SAN ANTONIO					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Penetración a 25°C; 100 grs.; 5seg.	mm.	63,20	60	70	T-49

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 61: Penetración a 25°C; 100 grs.; 5 Seg.; cemento asfáltico 60–70 (Estudio 5: Puerta al Chaco –Canaletas –Villa Montes)

ESTUDIO 5. PUERTA AL CHACO-CANALETAS-VILLA MONTES					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Penetración a 25°C; 100 grs.; 5seg.	mm.	86,70	85	100	T-49

Fuente: Elaboración propia

3.5.3 Peso específico

Ensayo de peso específico ASTM D-70.

Objetivo:

Se entiende como peso específico de un material a la relación de su peso en el aire a una temperatura dada, al peso de un volumen igual de agua a la misma temperatura, a los 25°C. Además de dar una identificación de la calidad y origen del material, el peso específico es útil para determinar el peso por unidad de volumen de un ligante calentado a la temperatura de aplicación.

Material y equipo:

- Picnómetro.
- Baño de agua.
- Termómetro.
- Recipiente de vidrio boca ancha de 600ml.
- Balanza $A \pm 0.01\text{gr.}$
- Agua destilada.
- Asfalto.

Procesamiento:

Calibración del picnómetro. - Se limpia perfectamente el picnómetro y su tapón con el líquido de limpieza, enjuagándolo; a continuación con agua destilada y secándolo finalmente. Esta operación de limpieza debe realizarse antes de cada calibración, o bien cuando se observe cualquier falla en el escurrimiento uniforme de los líquidos, en las paredes interiores del picnómetro o en el capilar del tapón.

Después de secado, se deja que el picnómetro alcance la temperatura ambiente y se pesa con aproximación de 1 mg. el peso del picnómetro vacío, se designa por A.

Se seca el vaso del baño y se llena el picnómetro con agua destilada, colocando suavemente el tapón, sin apretarlo. Se sumerge completamente el picnómetro en el vaso y se aprieta entonces el tapón, no debiendo quedar burbujas de aire ocluidas en el

picnómetro en esta operación. El vaso con el picnómetro se vuelve a colocar en el baño de agua a 25 °C.

Se deja el picnómetro en el interior del vaso por un mínimo de 30 minutos, se saca del agua e inmediatamente se seca la superficie superior del tapón pasando suavemente y una sola vez un paño seco por la misma; a continuación, se seca rápidamente el resto del picnómetro y se pesa con aproximación de 0.1 mg. El peso del picnómetro lleno de agua, se designa por B.

Preparación de la muestra. - Calentar con cuidado la muestra, agitándola para evitar sobre calentamientos locales hasta que llegue a ser suficientemente fluida para que pueda ser vertida. La muestra debe ser representativa de la existente en el laboratorio y deberá ser homogénea y no estar contaminada.

Verter una cantidad de muestra suficiente dentro del picnómetro limpio y seco previamente calentado, llenándolo hasta tres cuartos de su capacidad. Tomar precaución para evitar que el material se ponga en contacto con las paredes del picnómetro por encima del nivel final y para evitar la inclusión de burbujas de aire. Dejar enfriar el picnómetro con su contenido hasta la temperatura ambiente durante un período no menor de 40 minutos y pesar con el tapón con aproximación a 1 mg. El peso del picnómetro con la muestra, se designa como C.

Llenar el picnómetro que contiene el asfalto con agua destilada, colocando firmemente el tapón en el picnómetro. No deben permitirse burbujas de aire en el picnómetro. Colocar el picnómetro en el vaso y apretar firmemente el tapón. Retornar luego el vaso al baño de agua a 25° C.

Mantener el picnómetro dentro del baño de agua durante un período no menor de 30 minutos Sacar y pesar, este peso del picnómetro con la muestra y con agua, se designa como D.

Fotografía 52: Muestras de asfaltos

Fuente: Elaboración propia

Fotografía 53: Registro de peso picnómetro + asfalto + agua

Fuente: Elaboración propia

Cálculo y resultados:

Tabla 26: Resultado de la gravedad específica del asfalto convencional 85 – 100

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio	Especificaciones	
					Mínimo	Máximo
Peso picnómetro	grs.	87,20	87,00			
Peso picnómetro + agua(25°C)	grs.	168,80	168,10			
Peso picnómetro + muestra	grs.	132,70	132,70			
Peso picnómetro + agua + muestra	grs.	169,40	168,70			
Peso específico	grs./cm ³	1,01	1,01	1,01	1,00	1,05

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestran los resultados finales de los pesos específicos para cada tramo (para ver más detalles de las planillas de elaboración revisar la parte de ANEXOS).

Cuadro 62: Peso específico cemento asfáltico 85-100 (Estudio 1: Santa Ana - Yesera)

ESTUDIO 1. SANTA ANA-YESERA					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Peso específico	gr./cm ³	1,010	0,95	1,05	T-228

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 63: Peso específico cemento asfáltico 85-100 (Estudio 2: Tomatitas – Erquiz Ceibal – Cruce Cadillar)

ESTUDIO 2. TOMATITAS-ERQUIZ CEIBAL-CRUCE CADILLAR					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Peso específico	gr./cm ³	1,008	1,00	1,05	T-228

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 64: Peso específico cemento asfáltico 85-100 (Estudio 3: Santa Bárbara)

ESTUDIO 3. SANTA BÁRBARA					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Peso específico	gr./cm ³	1,017	0,95	1,05	T-228

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 65: Peso específico cemento asfáltico 60 – 70 (Estudio 4: Bermejo – San Antonio)

ESTUDIO 4. BERMEJO-SAN ANTONIO					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Peso específico	gr./cm ³	1,002	-	-	T-228

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 66: Peso específico cemento asfáltico 85 – 100 (Estudio 5: Puerta al Chaco – Canaletas – Villa Montes)

ESTUDIO 5. PUERTA AL CHACO-CANALETAS-VILLA MONTES					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Peso específico	gr./cm ³	1,002	1,00	1,05	T-228

Fuente: Elaboración propia

3.5.4 Punto de ablandamiento

Punto de reblandecimiento anillo y bola (ASTM D 36)

Objetivo:

Este método se utiliza para determinar el punto de ablandamiento del betún en el intervalo de 30° a 157° C (86° a 315° F), utilizando el aparato de anillo y bola, sumergido en agua destilada (30° a 80° C). Se basa en la determinación de la temperatura a la cual una esfera de acero produce una deformación de 25 mm, en una muestra sostenida en un anillo horizontal, que se calienta gradualmente dentro de un baño de agua o glicerina.

Este ensayo mide de forma indirecta la consistencia y equivale a una temperatura de equiviscosidad en las condiciones de ensayo. Junto a la penetración a 25° C, permite calcular el índice de penetración y estimar mediante su valor la susceptibilidad de los asfaltos.

Procesamiento:

Se homogeniza su contenido con una espátula.

Verter una pequeña muestra de betún caliente en cada anillo, posterior a esto permitir que las muestras se enfríen a temperatura ambiente por un periodo mínimo de 30 minutos.

Una vez que las muestras se encuentren frías, cortar el exceso de betún sobre la parte superior del anillo con un cuchillo o espátula ligeramente caliente, de modo que el betún quede al ras y a nivel con el anillo.

Monte el aparato con los anillos, guías de centrado de la bola, y el termómetro en posición. Llene la bañera de modo que la profundidad del líquido sea de 105 ± 3 mm con el aparato en su lugar.

Coloque las esferas en las guías y sumerja el aparato en el medio del baño correspondiente.

Calentar el baño de tal manera que la temperatura se incremente en rangos de 5°C cada minuto.

Se registra para cada anillo la temperatura en el momento en que el material asfáltico toque la placa inferior del soporte, con aproximación de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Las temperaturas registradas no deben diferir entre sí en más de 1°C , de lo contrario se debe repetir la prueba utilizando una nueva muestra de prueba.

Fotografía 54: Colocación del betún



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 55: Colocación de esferas en el anillo



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestran los resultados para cada tramo en estudio, (para más detalle revisar la parte de ANEXOS):

Cuadro 67: Punto de ablandamiento cemento asfáltico 85 -100 (Estudio 1: Santa Ana - Yesera)

ESTUDIO 1. SANTA ANA-YESERA					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Punto de ablandamiento	°C	43,2	43	53	T-202

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 68: Punto de ablandamiento cemento asfáltico 85 -100 (Estudio 2: Tomatitas – Erquiz Ceibal – Cruce Cadillar)

ESTUDIO 2. TOMATITAS-ERQUIZ CEIBAL-CRUCE CADILLAR					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Punto de ablandamiento	°C	44,0	43	53	T-202

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 69: Punto de ablandamiento cemento asfáltico 85 -100 (Estudio 3: Santa Bárbara)

ESTUDIO 3. SANTA BÁRBARA					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Punto de ablandamiento	°C	43,5	43	53	T-202

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 70: Punto de ablandamiento cemento asfáltico 60 - 70 (Estudio 4: Bermejo – San Antonio)

ESTUDIO 4. BERMEJO-SAN ANTONIO					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Punto de ablandamiento	°C	51,0	43	53	T-202

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 71: Punto de ablandamiento cemento asfáltico 85 -100 (Estudio 5: Puerta al Chaco – Canaletas – Villa Montes)

ESTUDIO 5. PUERTA AL CHACO-CANALETAS-VILLA MONTES					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Punto de ablandamiento	°C	43,0	43	53	T-202

Fuente: Elaboración propia

3.5.5 Punto de inflamación

Puntos de inflamación Copa abierta de Cleveland (ASTM D-92)

Objetivo:

El punto de inflamación de un ligante asfáltico es la temperatura más baja a la cual se separan materiales volátiles de la muestra, y crean un “destello” en presencia de una llama abierta. El punto de inflamación no debe ser confundido con el punto de combustión, el cual es la temperatura más baja a la cual el ligante asfáltico se inflama y se quema. El punto de inflamación consiste, tan solo, en la combustión instantánea de las fracciones volátiles que se están separando del asfalto.

Procesamiento:

Arme el aparato sobre una mesa nivelada en una pieza sin corrientes de aire; ubique el protector alrededor del aparato de encendido, afirmado por algún medio adecuado que permita la lectura del Punto de Inflamación.

Lave la copa de ensaye con un solvente apropiado y quite cualquier aceite o vestigios pegados o residuos remanentes de ensayos anteriores. Si hay depósitos de carbón remuévalos con una esponja de acero. Limpie la copa bajo un chorro de agua fría y seque por unos pocos minutos sobre una llama, placa caliente o en un horno y elimine los últimos indicios de solvente y agua. Enfríe la copa por lo menos a 55°C por debajo del Punto de Inflamación esperado antes de usarla.

Mantenga el termómetro en posición vertical con el bulbo a una distancia de 6,5 mm del fondo de la copa y localizada en el punto medio del trecho entre el centro y el borde de la copa, en un diámetro perpendicular al arco o línea del recorrido de la llama de prueba y en el lado opuesto de la llama del quemador.

Llene la copa a una temperatura conveniente no excediendo 100°C por encima de lo esperado para el Punto de Ablandamiento; de esa manera la parte superior del menisco está en la línea de llenado. Para ayudar en esta operación use un medidor del nivel de llenado. Si un exceso de muestra se ha agregado a la copa, quítelo usando una pipeta u otro aparato adecuado. Sin embargo, si hay muestra que esté fuera del aparato, vacíe,

limpie y vuelva a llenar. Destruya cualquier burbuja de aire sobre la superficie de la muestra.

La luz de la llama de prueba se ajusta a un diámetro de 3,0 a 5,0 mm y se compara con el tamaño del cabezal.

Aplique calor inicialmente de modo que la temperatura de la muestra suba a una velocidad entre 14 y 17°C por minuto. Cuando la temperatura de la muestra se aproxime a los 55°C por debajo del Punto de Inflamación esperado, disminuya el calor de modo que la velocidad de la temperatura para 28°C antes del Punto de Inflamación, sea de 5 a 6°C por min.

Comenzando, al menos 28°C por debajo del Punto de Inflamación, aplique la llama de prueba cada 2°C sucesivos leídos en el termómetro. Pase la llama de prueba a través del centro de la copa, en ángulo recto al diámetro que pasa a través del termómetro; con suavidad continúe el movimiento aplicando la llama en línea recta a lo largo de la circunferencia de un círculo que tenga un radio al menos de 150 mm. El centro de la llama de prueba debe moverse en un plano que diste menos de 2 mm por encima del plano del borde superior de la copa, pasando en una dirección primero y en el próximo intervalo en la dirección opuesta. El tiempo consumido en pasar la llama a través de la copa será cercano a 1 s. Durante los últimos 17°C, suba la temperatura previa al Punto de Inflamación.

Informe el Punto de Inflamación como la temperatura leída en el termómetro, cuando aparece el destello en cualquier punto de la superficie del material, pero no confunda el verdadero destello con el halo azulado que algunas veces circunda la llama de prueba.

Para determinar el Punto de Combustión continúe calentando de modo que la temperatura de la muestra se eleve a una razón de 5 a 6°C por min. Continúe aplicando la llama a intervalos de 2°C hasta que el material se inflame y continúe quemándose como mínimo 5 s. Informe la temperatura de este punto como el Punto de Combustión del material.

Fotografía 56: Preparación de la muestra para determinar el punto de inflamación

Fuente: Elaboración propia

Fotografía 57: Determinación del punto de inflamación

Fuente: Elaboración propia

Resultado:

De acuerdo a la norma de ensayos de laboratorio de asfalto de ABC para el tipo de asfalto 85-100 el punto de inflamación y combustión mínima es 230°C.

De acuerdo al procedimiento se obtuvo 263 °C de punto de inflamación y 300°C de combustión.

Si la presión barométrica real durante el tiempo de ensayo es menor que 715 mm de mercurio informe y sume la corrección apropiada al Punto de Inflamación y Punto de Combustión de acuerdo a la tabla siguiente:

Tabla 27: Valores de corrección del punto de inflamación

Presión barométrica (mm de mercurio)	Corrección (°C)
715-665	2
664-610	4
609-550	6

Fuente: Manual de carreteras ensayos de laboratorio de asfalto de ABC

Cuadro 72: Resultado del punto de inflamación asfalto convencional

Muestra	Presión barométrica (Tarija) (mm de mercurio)	Corrección (°C)	Punto de inflamación (°C)
1	609-550	6	263

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se detallan los resultados para cada muestra en estudio de los diferentes tramos, (para más detalle revisar planillas en ANEXOS).

Cuadro 73: Punto de inflamación cemento asfáltico 85 – 100 (Estudio 1: Santa Ana – Yesera)

ESTUDIO 1. SANTA ANA-YESERA					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Punto de inflamación	°C	263	232	-	T-48

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 74: Punto de inflamación cemento asfáltico 85 – 100 (Estudio 2: Tomatitas – Erquiz Ceibal – Cruce Cadillac)

ESTUDIO 2. TOMATITAS-ERQUIZ CEIBAL-CRUCÉ CADILLAR					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Punto de inflamación	°C	265	232	-	T-48

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 75: Punto de inflamación cemento asfáltico 85 – 100 (Estudio 3: Santa Bárbara)

ESTUDIO 3. SANTA BÁRBARA					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Punto de inflamación	°C	261	232	-	T-48

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 76: Punto de inflamación cemento asfáltico 60 – 70 (Estudio 4: Bermejo – San Antonio)

ESTUDIO 4. BERMEJO-SAN ANTONIO					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Punto de inflamación	°C	272	232	-	T-48

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 77: Punto de inflamación cemento asfáltico 85 – 100 (Estudio 5: Puerta al Chaco – Canaletas – Villa Montes)

ESTUDIO 5. PUERTA AL CHACO-CANALETAS-VILLA MONTES					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Punto de inflamación	°C	263	232	-	T-48

Fuente: Elaboración propia

3.6 Elaboración Marshall

Método de diseño Marshall convencional (AASHTO T 245)

Objetivo:

Este procedimiento es aplicable a mezclas en caliente con cementos asfálticos que contengan áridos con tamaño máximo absoluto o inferior a 25mm. Se puede usar tanto para el diseño en laboratorio como en el control de terreno.

Resumen del método:

El procedimiento consiste en la elaboración de briquetas (probetas cilíndricas de 101.6 mm. de diámetro y 63.5 mm. de altura, rompiéndolas posteriormente en la prensa Marshall determinando su estabilidad y flujo.

Si se desea determinar el porcentaje de vacíos de las mezclas, se determinaran previamente los pesos específicos de los materiales empleados y de las briquetas compactadas antes del ensayo de rotura.

Previa a la preparación de las briquetas es necesario determinar la granulometría de los áridos y la combinación de éstos, además de los pesos específicos de los mismos, así como también del asfalto.

Equipo y materiales:

Moldes de Compactación: Se conforman de una placa de base plana con su molde y collar de extensión cilíndricos. El molde deberá tener un diámetro interior de 4” y una altura aproximada de 3”, la placa de base y el collarín deberán ser intercambiables o sea que se deberán ajustar en los dos extremos de los moldes.

Extractor: Que sirva para sacar las briquetas del molde.

Martillo de compactación: Consiste en una cara circular de 100mm. De diámetro equipada con un peso de 4.515 ± 15 gr. (10lb) Y construido de modo de obtener una altura de caída de 460 ± 2 mm.

Pedestal de compactación: Consiste en un poste de madera de 205 x 205 x 455 mm. Cubierto con una placa de acero de 305 x305 x25 mm. Debe estar empotrado y quedar firmemente afianzada y a nivel.

Sujetador de molde: Consiste en un aro con resorte diseñado para mantener centrado y fijo el molde en el pedestal durante la compactación.

Mordaza: Son dos segmentos de cilindro (superior e inferior) con un radio interno de 51 ± 0.2 mm. Diseñado para transmitir la carga.

Maquina Marshall: Aparato eléctrico diseñado para aplicar carga a las probetas durante el ensayo a una velocidad de deformación de 50 ± 1 mm/min. Está equipada con un anillo de prueba calibrada para determinar la carga aplicada de una capacidad superior a 25 kN y una sensibilidad de 45 N. con un dial graduado de 0.0025 mm. Y un medidor de flujo con una precisión de 0.01 mm. Para determinar la deformación que se produce en la carga máxima.

Horno

Baño de agua: Deberá ser controlado termostáticamente a 60 ± 1 :C y también contara con un fondo falso y un termómetro centrado y fijo.

Realizar la combinación de agregados de gravedad específica y absorción en relación al porcentaje que se obtiene la estructura granular de las granulometrías propuestas, el diseño de mezcla debe proporcionar la granulometría que se encuentra dentro de los rangos de diseño.

Gravedad específica seca o bulk de la combinación de agregados (Gsb):

$$Gsb = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}}$$

Donde:

Gsb = Gravedad Especifica seca o bulk de la combinación de agregados.

P1, P2,..Pn = Porcentaje por peso de los agregados.

G1, G2, ...G3 = Gravedad especifica seca o bulk de cada agregado.

Las gravedades específicas de la granulometría 1 convencional de los materiales las cuales se han obtenido por medio de cada uno de los ensayos respectivos son las siguientes:

Agregado ¾": G1 = 2,650

Agregado ⅜": G2 = 2,638

Arena: G3 = 2,630

Asfalto: $G_{\text{asf}} = 1,010$

$$G_{sb} = \frac{33 + 23 + 44}{\frac{33}{2,650} + \frac{23}{2,638} + \frac{44}{2,630}} = 2.639$$

De manera resumida se tiene la gravedad específica bulk de la granulometría estudiada.

Tabla 28: Resultado de gravedades específicas bulk de la combinación de los agregados

Gravedad específica seca o bulk	Gsb
Granulometría 1 convencional	2,639

Fuente: Elaboración propia

Evaluación del cemento asfáltico convencional:

Se determina el grado apropiado de cemento asfáltico C.A. 85-100, que es el utilizado en el ESTUDIO 1, según el tipo y ubicación geográfica del proyecto, así la gravedad específica del cemento asfáltico (G_a) tiene igual a 1,010 que se determinó en la caracterización de los ensayos de asfalto.

Cuadro 78: Resumen de control de calidad asfalto convencional (Estudio1: Santa Ana - Yesera)

Ensayos	Unidad	Normas		Resultado	Especificación
Penetración	(mm)	AASTHO T-49	ASTM D5	91,00	85-100
Viscosidad Saybolt furol	°C	AASTHO T-202	ASTM D244	115,30	85 min
Punto de ablandamiento	°C	AASTHO T-53	ASTM D36	45,00	30-150
Gravedad específica a 25 °C	grs/cm ³	AASTHO T-228	ASTM D71	1,01	0,95-1,05
Punto de inflamación	°C	AASTHO T-48	ASTM D1310	263,00	232 min

Fuente: Elaboración propia

3.7 Dosificación de probetas Marshall

Preparación de los Especímenes Marshall:

Dosificación de agregados para una probeta Marshall:

El procedimiento para dosificación de agregado que se utilizará en el método de diseño que se explica en este documento es el que recomienda la norma Bolivia de Laboratorio de suelos y asfalto, que los agregados se separen por tamizado seco en ciertas fracciones y recomienda los rangos.

Según el tamaño máximo de los agregados (3/4") que se utilizan en el diseño, se toman las siguientes fracciones de tamaño:

Cuadro 79: Juego de tamices

Tamices
25.40 mm a 19.05 mm (1 pulg a ¾ pulg.)
19.05 mm a 12.70 mm (¾ a 1/2 pulg.)
12.70 mm a 9.53 mm (1/2 a 3/8 pulg.)
9.53 mm a 4.75 mm (3/8 pulg. a No. 4)
4.75 mm a 3.56 mm (No. 4 a No. 10)
3.56 mm a 2.00 mm (No. 10 a No. 16)
2.00 mm a 1.00 mm (No. 16 a No. 40)
1.00 mm a 0.42 mm (No. 40 a No. 50)
0.42 mm a 0.18 mm (No. 50 a No. 80)
0.18 mm a 0.075 mm (No. 80 a No. 200)
Pasa por malla N°200

Fuente: Elaboración propia

Nuestro diseño utilizará tres tamaños de agregado con sus respectivos porcentajes establecidos que son: Agregado Grueso 3/4" , Agregado Medio 3/8" y Arena; pero ahora, para poder hacer una briqueta de 1200 grs, se debe incluir cemento asfáltico, de acuerdo a los porcentajes óptimos obtenidos del servicio departamental de caminos (SEDECA), de esta manera se tienen cuatro fracciones de distintos materiales, lo cual implica que se deben pesar cuatro cantidades, una de cada fracción para complementar una dosificación de agregado para la elaboración de una briqueta; para éstas fracciones generalmente no se cuenta con un porcentaje establecido por lo que se procede a calcularlo de las granulometrías propuestas que se obtuvo al combinar los tres

agregados, pero en este caso contamos con los datos de porcentaje óptimos de dosificación para cada tramo, proporcionados por el servicio departamental de caminos.

El porcentaje retenido se calcula restando los porcentajes acumulados que pasan entre las mallas en las que se encuentra dicha fracción.

Dosificación de agregado y asfalto:

A continuación, se ejemplifica el cálculo de los diferentes pesos de agregados para cada una de las fracciones, de acuerdo a los porcentajes establecidos.

Cálculo Para una briqueta:

Para ejemplificar el cálculo se utilizará la granulometría 1 del Estudio 1, la dosificación completa para una briqueta de 1200 gramos con un óptimo de 5.3 % C.A. (Cemento Asfáltico)

$$W_{\text{briqueta}} = 1200 \text{ g}$$

$$1200 \text{ g} \times 5.3 \% = 63.6 \text{ grs. de cemento asfáltico.}$$

$$1200 \text{ g} \times 94.7\% = 1136.4 \text{ grs. de agregado}$$

$$100 \% = 1200 \text{ grs. peso total en mezcla}$$

Los cálculos para las diferentes dosificaciones para las briquetas de acuerdo a su porcentaje respectivo de material granular se realizan de la misma forma que los ejemplos en las secciones anteriores, a continuación, se presenta todos los datos calculados de material granular.

Fotografía 58: Preparación del material para las briquetas



Fuente: Elaboración propia

Preparación de la mezcla:

Pese en bandejas separadas para cada briqueta la cantidad necesaria de cada fracción para producir muestra quede como resultado una briqueta compacta de altura igual a 65 mm. Normalmente se requieren 1200 gr.

Fotografía 59: Preparación de bandejas para dosificación Marshall

Fuente: Elaboración propia

Fotografía 60: Bandejas separadas para cada briqueta la cantidad necesaria

Fuente: Elaboración propia

Coloque las bandejas en el horno y caliente a una temperatura de aproximadamente 30°C sobre la temperatura de mezclado.

Fotografía 61: Muestras preparadas para dosificación Marshall llevadas al horno



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 62: Incorporación de cemento asfáltico para dosificación Marshall



Fuente: Elaboración propia

Coloque el árido caliente en una bandeja y revuelva completamente, forme un cráter en el árido y pese la cantidad necesaria de cemento asfáltico e incorpórela en la bandeja junto con los áridos.

Asegúrese que la temperatura en ese instante sea la de mezclado. Mezcle el asfalto y el árido tan rápido como sea posible hasta que quede completamente uniforme.

Fotografía 63: Briqueta en proceso de fabricación



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 64: Preparación de la mezcla asfáltica



Fuente: Elaboración propia

Compactación de Briquetas:

Prepare el molde y el martillo, limpiéndolos completamente y calentándolos durante 15 min, a una temperatura próxima a la de compactación, coloque un disco de papel filtro (papel común pintado con aceite sucio) cortado a medida, suavice las paredes del molde con aceite.

Fotografía 65: Preparación de moldes a temperaturas próximas de la compactación



Fuente: Elaboración propia

Coloque el conjunto collar molde y base en el pedestal del compactador.

Fotografía 66: Preparación del molde



Fuente: Elaboración propia

Coloque la mezcla para la elaboración de briqueta.

Fotografía 67: Mezcla elaborada para posterior compactación Marshall

Fuente: Elaboración propia

Llene el molde con la espátula acomodando la mezcla 15 veces en el perímetro y 10 veces en el centro.

Con el martillo de compactación aplique 75 golpes en un tiempo no superior a 90s. Saque la base y el collar, invierta y re ensamble el molde y aplique en la otra cara del molde el mismo número de golpes.

Fotografía 68: Compactación de briquetas Marshall

Fuente: Elaboración propia

Después de compactar saque la base y deje enfriar la briqueta al aire. Si se desea puede utilizar un ventilador. Normalmente se deja enfriar toda la noche.

Fotografía 69: Briquetas a temperatura ambiente



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 70: Extracción de briquetas



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 71: Obtención de briquetas para la investigación

Fuente: Elaboración propia

Gravedad Específica Bulk mezcla compactada (Gmb):

Después de la compactación de las briquetas y su posterior extracción de los moldes para su respectivo curado a temperatura ambiente, se procede a realizar el ensayo de la gravedad bulk, según AASHTO T 166-05. El procedimiento seguido fue secar los especímenes hasta masa constante (curado a temperatura ambiente). Posteriormente se registró el peso seco de cada briqueta. Luego se sumergieron en un recipiente con agua a 25 °C, dejándolos saturar por lo menos 10 minutos. Al final del período de 10 minutos se removieron los especímenes y se colocaron en la canastilla sumergida previamente agitada para la eliminación de burbujas de aire, y se registró el peso sumergido de cada briqueta, inmediatamente al retirar la briqueta de la canastilla se secó la humedad del espécimen con una toalla húmeda tan rápido como fue posible. Pesamos al espécimen y registramos como peso saturado superficialmente seco.

La norma AASHTO T 166-05 establece que la diferencia máxima permitida entre dos valores de gravedad específica bulk es de 0.02, para que puedan ser promediados, aquella gravedad bulk que sobrepasa dicho valor es descartada.

Fotografía 72: Medición de la altura de las briquetas



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 73: Peso de las briquetas - peso seco



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 74: Peso de las briquetas - peso sumergido en agua

Fuente: Elaboración Propia

Cálculo:

$$G_{mb} = \frac{W_{seco\ al\ aire}}{W_{s.s.s.} - W_{sumergido}} = \frac{B}{C - D}$$

Donde:

G_{mb} = Gravedad específica de la mezcla (gr/cm^3).

$W_{seco\ al\ aire}$ = Peso de la briqueta seca (grs).

$W_{s.s.s.}$ = Peso de la briqueta saturada con superficie seca (grs).

$W_{sumergido}$ = Peso de la briqueta sumergida en agua (grs).

Porcentaje de C.A. = 5.30%:

$$G_{mb1} = \frac{1185.8}{1188.7 - 678.7} = 2,325$$

$$G_{mb2} = \frac{1196.3}{1198.7 - 683.9} = 2,324$$

$$G_{mb3} = \frac{1199.0}{1201.1 - 688.4} = 2,339$$

Valor promedio:

$$G_{mb} = \frac{2,325 + 2,324 + 2,339}{3} = 2,329$$

Cálculo de las propiedades volumétricas:

Porcentaje de vacíos en total de la mezcla (VTM):

Los vacíos de aire o vacíos en total de mezcla se pueden definir como el volumen total de una pequeña bolsa de aire entre las partículas cubiertas del agregado en una mezcla de pavimento compactada, expresado como el porcentaje del volumen neto de la mezcla de pavimento compactado.

En mezclas asfálticas densas, este valor de vacíos según las especificaciones, debe estar en el rango de 3 a 5%. Existe una relación entre la gravedad específica bulk y la teórica máxima, esta última no contempla vacíos en su muestra, mientras que una briqueta compactada si posee vacíos en su interior, por lo tanto, si el procedimiento se ha efectuado correctamente, la gravedad específica bulk siempre será menor que la gravedad específica teórica máxima.

La fórmula para calcular el porcentaje de vacíos es la siguiente: $100*(J-F) / J$

$$\% VTM = 100 * \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} = \frac{J - F}{J}$$

$$\% VTM = 100 * \frac{2.479 - 2.329}{2.479} = 6.05$$

Donde:

VTM = Vacíos de aire en mezcla compactada, porcentaje de volumen total (%).

G_{mm} = Densidad máxima teórica de la mezcla de pavimentación.

G_{mb} = Densidad promedio de la mezcla compactada.

Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM):

Se definen como el vacío intergranular entre las partículas del agregado en una mezcla asfáltica compactada, que incluye los vacíos de aire y el contenido de asfalto efectivo, expresado como un porcentaje del volumen total.

La ecuación utilizada para determinar los vacíos en el agregado mineral (VAM) es la siguiente:

$$\% V.A.M. = \%VTM + \left(\frac{G_{mb} * \%C.A.}{G_{a.C.A.}} \right)$$

$$\% V.A.M. = 6.05 + \left(\frac{2.329 * 5.3.}{1.010} \right)$$

$$\% V.A.M. = 18.27$$

Donde:

VAM = Vacíos en el agregado mineral, porcentaje del total de la mezcla (%).

G_{mb} = Densidad promedio de la mezcla compactada.

C.A. = Porcentaje de cemento asfáltico.

$G_{a.C.A.}$ = Peso específico del cemento asfáltico.

R.B.V. (Vacíos llenos con asfalto):

Los vacíos llenos de asfalto, son el porcentaje de vacíos intergranulares entre las partículas de agregado (VAM), que se encuentran llenos de asfalto. El VAM abarca asfalto y aire, mientras que el R.B.V. solamente abarca el asfalto que une a los agregados (asfalto efectivo), el valor de R.B.V. se expresa generalmente como un porcentaje.

La ecuación que determina el R.B.V. es la siguiente:

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

$$\% \text{ R. B. V.} = 100 * \frac{18.27 - 6.05}{18.27}$$

$$\% \text{ R. B. V.} = 66.88$$

Donde:

R.B.V. = Vacíos llenos con asfalto, porcentaje de VMA.

VAM = Vacíos en el agregado mineral, porcentaje del total de la mezcla.

VTM = vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total.

Medición de la estabilidad y la fluencia:

Para briquetas confeccionadas con cemento asfáltico coloque éstas en un baño de agua a $60 \pm 1^\circ\text{C}$ durante 30 a 40 min antes de ensayar.

Fotografía 75: Preparación de agua a 60°C para baño de agua a las briquetas



Fuente: Elaboración propia

Limpie completamente la mordaza, la temperatura de ésta debe mantenerse entre 21 °C y 38 °C, usando un baño de agua, si es necesario, lubrique las barras guías con una película delgada de aceite de modo que la parte superior de la mordaza se deslice nuevamente. Si se usa un anillo de prueba para medir la carga aplicada asegúrese que el dial esté firmemente ajustado y en cero.

Saque la probeta del agua y seque cuidadosamente la superficie coloque y centre la probeta en la parte inferior de la mordaza luego coloque la parte superior y centre el conjunto en el aparato de carga.

Aplique carga a la briqueta a una velocidad constante de deformación de 50 ± 1 mm/min. Hasta que produzca la falla.

Fotografía 76: Determinación de la estabilidad Marshall



Fuente: Elaboración Propia

El punto de falla queda definido por la carga máxima obtenida el cual se define como la estabilidad Marshall como el número total de Newtons o libras necesarios para producir falla de la briqueta a 60°C A medida que avanza el ensayo de estabilidad sujete firmemente el medidor de flujo sobre la barra guía, cuando se produzca la carga máxima, tome la lectura y anótela. Esta lectura es el valor de la fluidez de la briqueta expresada en unidades de 0.25 mm (1/100 pulg.).

El procedimiento completo de estabilidad y fluencia comienza desde el momento en que se retira la briqueta del agua y no debe durar más de 30 s.

Nota: El cálculo de las propiedades volumétricas como ser el V.T.M.; V.A.M. y R.V.B. se los ejemplifica como referencia de cómo se obtuvieron los datos que nos fueron proporcionados por el servicio departamental de caminos, de manera que en la presente investigación no se realizaron los cálculos respectivos, ya que contamos con los porcentajes óptimos proporcionados por el servicio departamental de caminos para cada tramo.

3.8 RESULTADOS DE LAS PROBETAS MARSHALL

A continuación, se presentaron solo los resultados de estabilidad de cada mezcla asfáltica por tramo, porque son los valores finales que utilizaremos para fines de la investigación, los demás valores planillas de detallan en la parte de ANEXOS.

Los valores de estabilidad son valores tomados directamente de la lectura del aparato de Marshall, estos valores son letrados en unidades kilogramos, y para la transformación a libras, y viceversa solo se realizó una regla de tres simple, para fines investigativos.

$$1 \text{ libra} = 0,453592 \text{ kilogramos}$$

Tabla 29: Resultados de estabilidad obtenidos por Marshall (Estudio 1: Santa Ana - Yesera)

ESTUDIO 1 - SANTA ANA - YESERA		
Nro de muestras	Estabilidad (lb)	Estabilidad (kg)
1	2071,836	939,770
2	2076,258	941,776
3	2120,914	962,032
4	2214,325	1004,402
5	2215,306	1004,847
6	2235,154	1013,850
7	2267,254	1028,411
8	2292,142	1039,700
9	2368,956	1074,542
10	2381,601	1080,278
11	2426,589	1100,684
12	2447,879	1110,341
Promedio	2259,851	1025,053

Fuente: Elaboración propia

Tabla 30: Resultados de estabilidad obtenidos por Marshall (Estudio 2: Tomatitas – Erquiz Ceibal – Cruce Cadillac)

ESTUDIO 2 - TOMATITAS - ERQUIZ CEIBAL - CRUCE CADILLAR		
Nro de muestras	Estabilidad (lb)	Estabilidad (kg)
1	2339,280	1061,08
2	2351,070	1066,43
3	2356,960	1069,10
4	2358,850	1069,96
5	2359,369	1070,19
6	2389,214	1083,73
7	2423,658	1099,35
8	2457,600	1114,75
9	2547,870	1155,70
10	2568,124	1164,88
11	2601,070	1179,83
12	2635,245	1195,33
Promedio	2449,026	1110,86

Fuente: Elaboración propia

Tabla 31: Resultados de estabilidad obtenidos por Marshall (Estudio 3: Santa Bárbara)

ESTUDIO 3 - SANTA BÁRBARA		
Nro de muestras	Estabilidad (lb)	Estabilidad (kg)
1	2420,600	1097,97
2	2478,370	1124,17
3	2546,321	1154,99
4	2584,325	1172,23
5	2659,159	1206,18
6	2685,965	1218,33
7	2755,320	1249,79
8	2794,350	1267,50
9	2865,325	1299,69
10	2974,970	1349,43
11	3215,689	1458,61
12	3467,440	1572,81
Promedio	2787,320	1264,31

Fuente: Elaboración propia

Tabla 32: Resultados de estabilidad obtenidos por Marshall (Estudio 4: Bermejo – San Antonio)

ESTUDIO 4 - BERMEJO - SAN ANTONIO		
Nro de muestras	Estabilidad (lb)	Estabilidad (kg)
1	2688,742	1219,59
2	2758,963	1251,45
3	2801,550	1270,76
4	2805,214	1272,43
5	2840,626	1288,49
6	2896,429	1313,80
7	2956,321	1340,97
8	2979,727	1351,58
9	3037,122	1377,62
10	3125,854	1417,87
11	3125,869	1417,87
12	3205,246	1453,88
Promedio	2935,139	1331,36

Fuente: Elaboración propia

Tabla 33: Resultados de estabilidad obtenidos por Marshall (Estudio 5: Puerta al Chaco – Canaletas – Villa Montes)

ESTUDIO 5 - PUERTA AL CHACO - CANALETAS - VILLA MONTES		
Nro de muestras	Estabilidad (lb)	Estabilidad (kg)
1	2008,325	910,96
2	2096,354	950,89
3	2142,479	971,81
4	2158,397	979,03
5	2203,589	999,53
6	2253,154	1022,01
7	2498,651	1133,37
8	2516,745	1141,58
9	2619,854	1188,35
10	2809,817	1274,51
11	2818,204	1278,32
12	2832,184	1284,66
Promedio	2413,146	1094,59

Fuente: Elaboración propia

3.9 ENSAYOS DE FRACTURA

Para los ensayos realizados por fractura, se tomó como base: el ensayo de fractura de la norma española, haciendo a este ensayo las correspondientes adaptaciones para poder aplicarlo en esta investigación, para así poder utilizarlo en la prensa Marshall ya que un nuestro departamento todavía no contamos con el equipo necesario para la realización de dicho ensayo; a continuación hablaremos de la manera en la que se procedió para realizar el ensayo de fractura a la diferentes mezclas asfálticas, y para obtener resultados de cargas máximas que soportan dichas mezclas asfálticas antes de fracturarse.

Para esto, se procedió de la siguiente manera:

- Una vez dosificadas las probetas con el porcentaje óptimo de cemento asfáltico de cada tramo, se las llevó a cortar las probetas Marshall en forma de semicircunferencia (como se ve en la fotografía), para así poder llevar cada una de ellas a ensayos por fractura.

Fotografía 77: Probetas Marshall cortadas para ser llevadas a ensayos de fractura

Fuente: Elaboración propia

- Para realizar dichos ensayos se elaboró un molde macizo de hierro, con dos apoyos fijos de hierro, con las dimensiones tales que la muestra sometida a investigación , simule una viga simplemente apoyada, con un punto máximo donde se le aplica la carga a ser analizada, (como se muestra en la siguiente fotografía), las cuales se basaron en la norma española, y en las medidas propias de tanto del aparato de Marshall como así también de la muestra en estudio, para adaptarlo de tal manera que se produzca un ensayo a fractura de dichas muestras asfálticas, de los diferentes tramos en estudio.

Fotografía 78: Molde para la adaptación a la prensa Marshall, para realizar los ensayos por fractura

Fuente: Elaboración propia

- Una vez conseguidas las probetas de forma semicircular, como así también el molde para la adaptación, se procedió a llevar todas las muestras en estudio a la prensa Marshall, obteniendo así valores máximos (cargas últimas) que resisten dichas muestras, hasta llegar a la fractura, el ensayo se realizó como se muestra en la siguiente fotografía.

Fotografía 79: Probeta Marshall de forma semicircular, ensayada a fractura



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 80: Muestra de forma semicircular, ensayada a fractura



Fuente: Elaboración propia

fotografía 81: Ensayo de fractura a muestras elaboradas

Fuente: Elaboración propia

- Después de haber realizado el ensayo de fractura para cada muestra en estudio se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 34: Resultados de carga última que soportan las mezclas antes de fracturarse (ordenados de forma ascendente)

ESTUDIO 1 - SANTA ANA - YESERA		ESTUDIO 2 - TOMATITAS - ERQUIZ CEIBAL- CRUCE CADILLAR		ESTUDIO 3 - SANTA BÁRBARA		ESTUDIO 4 - BERMEJO - SAN ANTONIO		ESTUDIO 5 - PUERTA AL CHACO - CANALETAS-VILLAMONTES	
Nro de muestras	Fractura(kg)	Nro de muestras	Fractura(kg)	Nro de muestras	Fractura(kg)	Nro de muestras	Fractura(kg)	Nro de muestras	Fractura(kg)
1	297,0	1	294,0	1	311,6	1	387,8	1	333,8
2	303,2	2	306,0	2	315,7	2	388,0	2	359,7
3	311,0	3	310,0	3	326,4	3	395,0	3	364,2
4	311,0	4	321,1	4	330,6	4	395,0	4	370,6
5	324,0	5	328,0	5	333,4	5	399,0	5	371,7
6	332,8	6	335,0	6	350,8	6	403,5	6	375,0
7	342,5	7	338,0	7	351,6	7	404,0	7	376,7
8	347,4	8	340,0	8	358,5	8	405,0	8	389,1
9	360,0	9	351,0	9	362,6	9	425,0	9	397,0
10	360,0	10	352,0	10	365,4	10	426,0	10	408,0
11	366,0	11	356,0	11	365,6	11	428,4	11	422,7
12	376,8	12	367,1	12	368,9	12	451,0	12	440,7
Promedio	336,0	Promedio	333,2	Promedio	345,1	Promedio	409,0	Promedio	384,1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 35: Cuadro comparativo Estabilidad (kg) vs Fractura (kg)

ESTUDIO 1 - SANTA ANA - YESERA		ESTUDIO 2 - TOMATITAS - ERQUIZ CEIBAL- CRUCE CADILLAR		ESTUDIO 3 - SANTA BÁRBARA		ESTUDIO 4 - BERMEJO - SAN ANTONIO		ESTUDIO 5 - PUERTA AL CHACO - CANALETAS-VILLAMONTES	
Estabilidad (kg)	Fractura(kg)	Estabilidad (kg)	Fractura(kg)	Estabilidad (kg)	Fractura(kg)	Estabilidad (kg)	Fractura(kg)	Estabilidad (kg)	Fractura(kg)
939,77	297,0	1061,08	294,0	1097,97	311,6	1219,59	387,8	910,96	333,8
941,78	303,2	1066,43	306,0	1124,17	315,7	1251,45	388,0	950,89	359,7
962,03	311,0	1069,10	310,0	1154,99	326,4	1270,76	395,0	971,81	364,2
1004,40	311,0	1069,96	321,1	1172,23	330,6	1272,43	395,0	979,03	370,6
1004,85	324,0	1070,19	328,0	1206,18	333,4	1288,49	399,0	999,53	371,7
1013,85	332,8	1083,73	335,0	1218,33	350,8	1313,80	403,5	1022,01	375,0
1028,41	342,5	1099,35	338,0	1249,79	351,6	1340,97	404,0	1133,37	376,7
1039,70	347,4	1114,75	340,0	1267,50	358,5	1351,58	405,0	1141,58	389,1
1074,54	360,0	1155,70	351,0	1299,69	362,6	1377,62	425,0	1188,35	397,0
1080,28	360,0	1164,88	352,0	1349,43	365,4	1417,87	426,0	1274,51	408,0
1100,68	366,0	1179,83	356,0	1458,61	365,6	1417,87	428,4	1278,32	422,7
1110,34	376,8	1195,33	367,1	1572,81	368,9	1453,88	451,0	1284,66	440,7
1025,05	336,0	1110,86	333,2	1264,31	345,1	1331,36	409,0	1094,59	384,1

Fuente: Elaboración propia

3.10 ANÁLISIS DE RESULTADOS:

ESTUDIO 1: SANTA ANA - YESERA

Para este tramo se realizó el análisis respectivo con 12 datos correspondientes a estabilidad Marshall y 12 datos correspondientes a ensayos de fractura, de los cuales se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 36: Valores de estabilidad y fractura (Estudio 1: Santa Ana - Yesera)

ESTUDIO 1 - SANTA ANA - YESERA			
Nro de muestras	Estabilidad (lb)	Estabilidad (kg)	Fractura (kg)
1	2071,836	939,770	297,0
2	2076,258	941,776	303,2
3	2120,914	962,032	311,0
4	2214,325	1004,402	311,0
5	2215,306	1004,847	324,0
6	2235,154	1013,850	332,8
7	2267,254	1028,411	342,5
8	2292,142	1039,700	347,4
9	2368,956	1074,542	360,0
10	2381,601	1080,278	360,0
11	2426,589	1100,684	366,0
12	2447,879	1110,341	376,8
Promedio	2259,851	1025,053	336,0

Fuente: Elaboración propia

- Para el tramo 1, la variación de fractura soportada por la mezcla en estudio tiene como mínimo un valor de 297 kg y un valor máximo de 376,8 kg, haciendo una relación entre ambos, la diferencia entre dichos valores es igual a 79,8 kg, el cual, expresado en porcentaje da un valor de 21,18 %.
- Para este tramo también se puede observar que para el promedio de valores de fractura se obtuvo un valor de 336,0 kg.
- Haciendo énfasis en los valores de estabilidad se manifiesta que los valores mínimo y máximo que son 939,77 kg y 1110,341 kg respectivamente,

obteniendo así una diferencia de 170,57 kg, cuyo valor expresado en porcentaje da un porcentaje de 15,36 para este primer tramo en estudio.

- Para este tramo, el promedio de valores de estabilidad es igual a 1025,053 kg.

Analizando los datos se evidencia que existen valores muy altos y muy bajos, por lo que nos basaremos en que la dispersión de datos aceptables según la ASTM debe ser la **MEDIA +/- DESVIACIÓN ESTÁNDAR**, por lo tanto, se procede a calcular la desviación estándar para clasificar los datos aceptables y depurar datos que no se encuentren dentro del rango para este tramo en estudio calculado a continuación:

Cuadro 80: Rango de valores aceptables de fractura según desviación estándar para el estudio 1: Santa Ana - Yesera

Desviación estándar	26,8
Media	336
Mínimo	309,2
Máximo	362,8

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 81: Rango de valores aceptables de estabilidad según desviación estándar para el estudio 1: Santa Ana - Yesera

Desviación estándar	58,7
Media	1025,053
Mínimo	966,4
Máximo	1083,7

Fuente: Elaboración propia

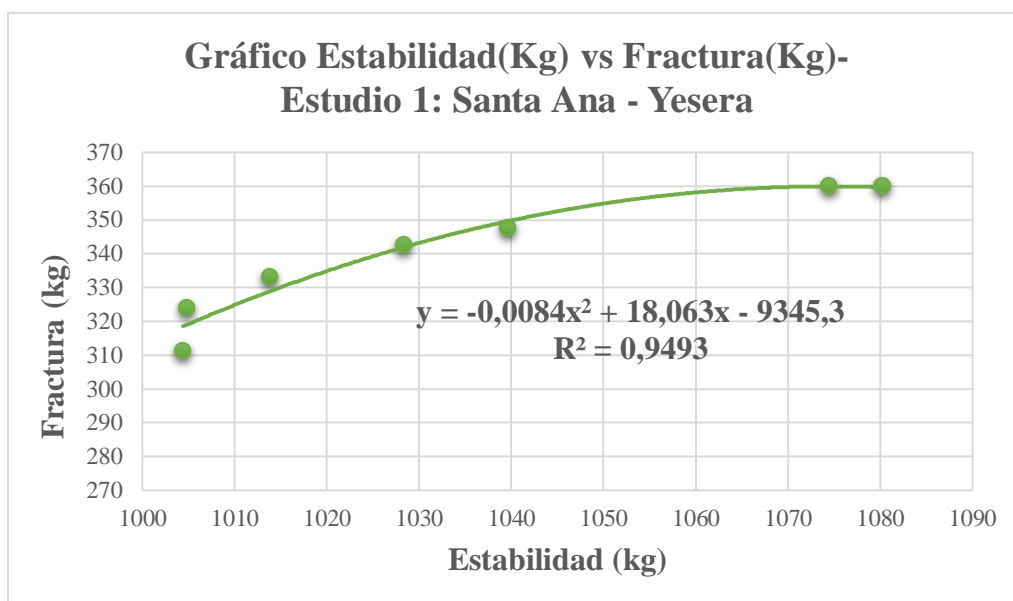
De acuerdo a los rangos calculados, se realizó la depuración de datos que no se encuentran dentro de los valores mínimos y máximos, quedando nuevos datos que se presentan dentro de la tabla 37.

Tabla 37: Valores aceptables según rango de desviación estándar, de estabilidad y fractura (Estudio 1: Santa Ana - Yesera)

ESTUDIO 1: SANTA ANA - YESERA			
Nro de muestras	Estabilidad (lb)	Estabilidad (kg)	Fractura (kg)
1	2214,325	1004,402	311,0
2	2215,306	1004,847	324,0
3	2235,154	1013,850	332,8
4	2267,254	1028,411	342,5
5	2292,142	1039,700	347,4
6	2368,956	1074,542	360,0
7	2381,601	1080,278	360,0
Promedio	2282,105	1035,147	339,7

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 1: Estabilidad (kg) vs Fractura (kg) (Estudio 1: Santa Ana - Yesera)



Fuente: Elaboración propia

- Respecto al análisis de las gráficas de estabilidad vs fractura, se evidencia que esta gráfica se ajusta mejor a una línea de tendencia polinómica de segundo grado, con un valor de R^2 igual a 0,9493 siendo este valor encontrado, el valor más próximo a 1, el que garantiza que la línea de

tendencia elegida es la que nos brinda una ecuación con mayor precisión, la que mostramos a continuación:

$$y = -0,0084x^2 + 18,063x - 9345,3$$

dicha ecuación servirá para obtener valores de fractura, a partir de los valores de estabilidad Marshall obtenidas durante el diseño de las probetas en estudio, siendo “y” valores de fractura en kilogramos, en función de “x” que representa los valores de estabilidad en kilogramos obtenidas durante el diseño de la misma. Cabe aclarar que dicha ecuación es especialmente para tramos en donde se trabaje con los mismos materiales, tanto agregados y cementos asfálticos, la alteración de cualquier de estos materiales, proporciona cambios y por lo tanto la ecuación encontrada no proporcionara valores correctos.

- Así también se observa mediante el análisis del gráfico obtenido que, para valores mayores de estabilidad surgen valores mayores de fractura, como así también que para valores menores de estabilidad obtenemos valores menores de fractura respectivamente; lo que permite inferir que los valores de fractura dependen directamente de los valores de estabilidad, como ya lo habíamos estudiado anteriormente. Podemos comprobar que, a mayor estabilidad de diseño de una mezcla asfáltica, se obtendrá mayores valores últimos de fractura para diferentes mezclas asfálticas.
- Al mismo tiempo, se analiza que lo que ocasionó valores muy altos y bajos (valores depurados) se debe al mal corte que se obtuvo de las mezclas en estudio, ya que no se pudo contar con un equipo y/o material más preciso para realizar los cortes de las muestras asfálticas con exactitud, para este tramo se obtuvieron 5 valores que no se ajustaron a los rangos, calculados en base a datos estadísticos.

ESTUDIO 2: TOMATITAS – ERQUIZ CEIBAL – CRUCE CADILLAR

Para este tramo se observa que se realizó el análisis respectivo con 12 datos correspondientes a estabilidad Marshall y 12 datos correspondientes a ensayos de fractura, de los cuales se obtuvieron los siguientes resultados y a continuación el análisis de los resultados mostrados:

Tabla 38: Valores de estabilidad y fractura (Estudio 2: Tomatitas - Erquiz Ceibal - Cruce Cadillar)

ESTUDIO 2 - TOMATITAS - ERQUIZ CEIBAL - CRUCE CADILLAR			
Nro de muestras	Estabilidad (lb)	Estabilidad (kg)	Fractura (Kg)
1	2339,280	1061,08	294,0
2	2351,070	1066,43	306,0
3	2356,960	1069,10	310,0
4	2358,850	1069,96	321,1
5	2359,369	1070,19	328,0
6	2389,214	1083,73	335,0
7	2423,658	1099,35	338,0
8	2457,600	1114,75	340,0
9	2547,870	1155,70	351,0
10	2568,124	1164,88	352,0
11	2601,070	1179,83	356,0
12	2635,245	1195,33	367,1
Promedio	2449,026	1110,86	333,2

Fuente: Elaboración propia

- Para el tramo 2 se puede observar que, la variación de fractura soportada por la mezcla en estudio, tiene como mínimo un valor de 294 kg y un valor máximo de 367,1 kg, haciendo una relación entre ambos se evidencia que la diferencia entre dichos valores es igual a 73,1 kg. el cual, expresado en porcentaje, da un valor de 19,91%.
- Para este tramo también se establece que para el promedio de valores de fractura se obtuvo un valor de 333,2 kg.

- Poniendo énfasis en los valores de estabilidad, se observa que los valores mínimo y máximo que son 1061,08 kg y 1195,32 kg respectivamente, obteniendo así una diferencia de 134,25 kg, cuyo valor expresado en porcentaje, da un valor de 11,23% para este segundo tramo en estudio.
- Para este tramo también se comprueba que para el promedio de valores de estabilidad se obtuvo un valor de 1110,86 kg.

Analizando los datos, se establece que existen valores muy altos y muy bajos, por lo que nos basaremos en que la dispersión de datos aceptables según la ASTM debe ser la MEDIA +/- DESVIACIÓN ESTÁNDAR, por lo tanto, se procede a calcular la desviación estándar para clasificar los datos aceptables y depurar datos que no se encuentren dentro del rango para este tramo en estudio calculado a continuación:

Cuadro 82: Rango de valores aceptables de fractura según desviación estándar para el estudio 2: Tomatitas- Erquiz Ceibal- Cruce Cadillar

Desviación estándar	22,2
Media	333,2
Mínimo	311,0
Máximo	355,3

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 83: Rango de valores aceptables de estabilidad según desviación estándar para el estudio 2: Tomatitas- Erquiz Ceibal- Cruce Cadillar

Desviación estándar	49,8
Media	1110,9
Mínimo	1061,1
Máximo	1160,6

Fuente: Elaboración propia

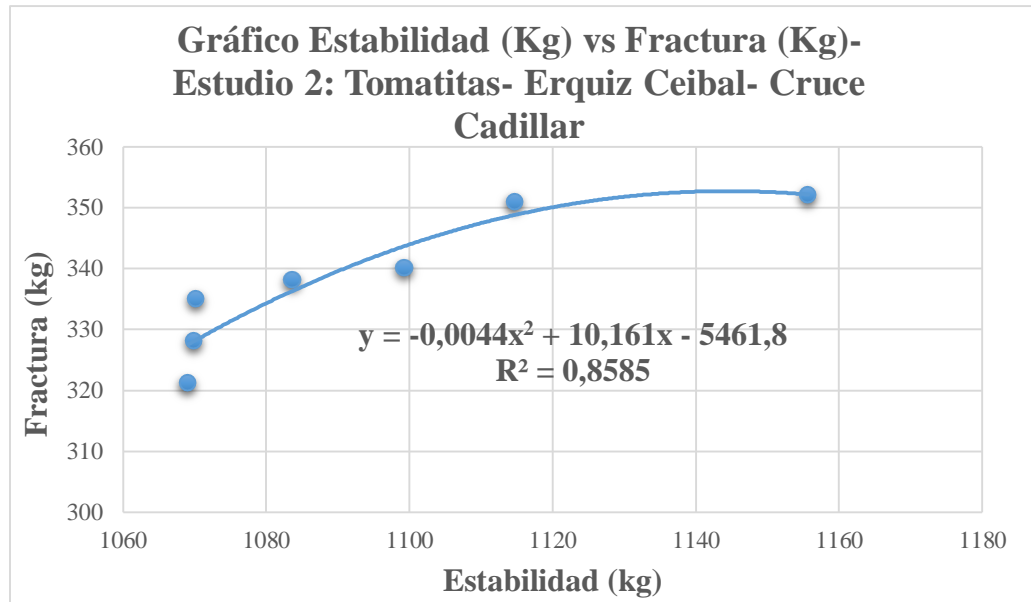
De acuerdo a los rangos calculados, se realizó la depuración de datos que no se encuentran dentro de los valores mínimos y máximos, quedando nuevos datos que se presentan dentro de la tabla 39.

Tabla 39: Valores aceptables según rango de desviación estándar, de estabilidad y fractura (Estudio 2: Tomatitas. Erquiz Ceibal- Cruce Cadillar)

ESTUDIO 2: TOMATITAS- ERQUIZ CEIBAL- CRUCE CADILLAR			
Nro de muestras	Estabilidad (lb)	Estabilidad (kg)	Fractura (Kg)
1	2356,960	1069,10	321,1
2	2358,850	1069,96	328,0
3	2359,369	1070,19	335,0
4	2389,214	1083,73	338,0
5	2423,658	1099,35	340,0
6	2457,600	1114,75	351,0
7	2547,870	1155,70	352,0
Promedio	2413,360	1094,68	337,9

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 2: Estabilidad (kg) vs Fractura (kg) (Estudio 2: Tomatitas- Erquiz Ceibal- Cruce Cadillar)



Fuente: Elaboración propia

- Respecto al análisis de las gráficas de estabilidad vs fractura, podemos observar que esta gráfica se ajusta mejor a una línea de tendencia polinómica de segundo grado, con un valor de R^2 igual a 0,8585 siendo

este valor encontrado, el valor más próximo a 1, el cual nos garantiza que la línea de tendencia elegida es la que nos brindara una ecuación con mayor precisión, la cual mostramos a continuación:

$$y = -0,0044x^2 + 10,161x - 5461,8$$

dicha ecuación servirá para obtener valores de fractura, a partir de los valores de estabilidad Marshall obtenidas durante el diseño de las probetas en estudio, siendo “y” valores de fractura en kilogramos, en función de “x” que representa los valores de estabilidad en kilogramos obtenidas durante el diseño de la misma; cabe aclarar que dicha ecuación es especialmente para tramos en donde se trabaje con los mismos materiales, tanto agregados y cementos asfálticos, la alteración de cualquier de estos materiales, proporciona cambios y por lo tanto la ecuación encontrada no proporcionara valores correctos.

- Así también se comprueba mediante el análisis del gráfico obtenido que, para valores mayores de estabilidad hay valores mayores de fractura, como así también que para valores menores de estabilidad se obtienen valores menores de fractura respectivamente, lo que indica que los valores de fractura dependen directamente de los valores de estabilidad, como ya lo habíamos estudiado anteriormente, podemos comprobar que a mayor estabilidad de diseño de una mezcla asfáltica, se obtendrán mayores valores últimos de fractura para diferentes mezclas asfálticas.
- Al mismo tiempo, se analiza que la consecuencia de valores muy altos y bajos (valores depurados) se debe al mal corte que se obtuvo de las mezclas en estudio, ya que no se pudo contar con un equipo y/o material más preciso para poder realizar los cortes de las muestras asfálticas con exactitud; para este tramo, se obtuvieron 5 valores que no se ajustaron a los rangos, calculados en base a datos estadísticos.

ESTUDIO 3: SANTA BÁRBARA

Para este tramo se realizó el análisis respectivo con 12 datos correspondientes a estabilidad Marshall y 12 datos correspondientes a ensayos de fractura, de los cuales se obtuvieron los siguientes resultados y a continuación el análisis de los resultados mostrados:

Tabla 40: Valores de estabilidad y fractura (Estudio 3: Santa Bárbara)

ESTUDIO 3 - SANTA BÁRBARA			
Nro de muestras	Estabilidad (lb)	Estabilidad (kg)	Fractura (Kg)
1	2420,600	1097,97	311,6
2	2478,370	1124,17	315,7
3	2546,321	1154,99	326,4
4	2584,325	1172,23	330,6
5	2659,159	1206,18	333,4
6	2685,965	1218,33	350,8
7	2755,320	1249,79	351,6
8	2794,350	1267,50	358,5
9	2865,325	1299,69	362,6
10	2974,970	1349,43	365,4
11	3215,689	1458,61	365,6
12	3467,440	1572,81	368,9
Promedio	2787,320	1264,31	345,09

Fuente: Elaboración propia

- Para el tramo 3, la variación de fractura soportada por la mezcla en estudio tiene como mínimo un valor de 311,6 kg y un valor máximo de 368,9 kg; haciendo una relación entre ambos se observa que la diferencia entre dichos valores es igual a 57,3 kg. el cual expresado en porcentaje nos da un valor de 15,53%.
- Para este tramo también se evidencia que para el promedio de valores de fractura se obtuvo un valor de 345,1 kg.
- Haciendo énfasis en los valores de estabilidad se pone de manifiesto que los valores mínimo y máximo que son 1097,97 kg y 1572,81 kg

respectivamente, obteniendo así una diferencia de 474,84 kg, cuyo valor expresado en porcentaje da un porcentaje de 30,19% para este tercer tramo en estudio.

- Para este tramo también se observa que para el promedio de valores de estabilidad se obtuvo un valor de 1264,31 kg.

Analizando los datos, se observa que existen valores muy altos y muy bajos, por lo que nos basaremos en que la dispersión de datos aceptables según la ASTM debe ser la MEDIA +/- DESVIACIÓN ESTÁNDAR, por lo tanto, se procede a calcular la desviación estándar para clasificar los datos aceptables y depurar datos que no se encuentren dentro del rango para este tramo en estudio calculado a continuación:

Cuadro 84: Rango de valores aceptables de fractura según desviación estándar para el estudio 3: Santa Bárbara

Desviación estándar	20,5
Media	345,1
Mínimo	324,5
Máximo	365,6

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 85: Rango de valores aceptables de estabilidad según desviación estándar para el estudio 3: Santa Bárbara

Desviación estándar	139,8
Media	1264,3
Mínimo	1124,5
Máximo	1404,1

Fuente: Elaboración propia

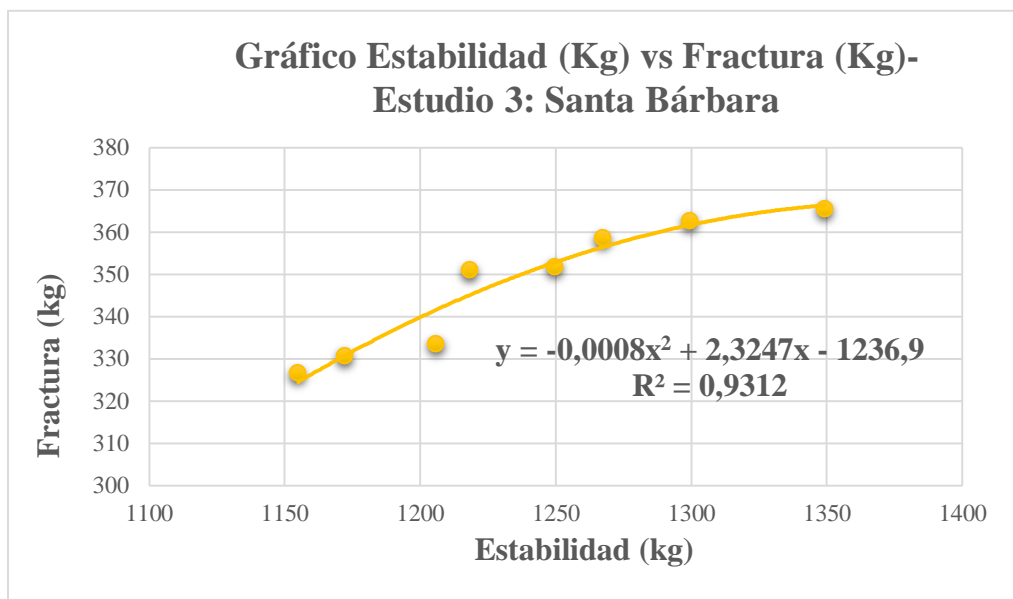
De acuerdo a los rangos calculados, se realizó la depuración de datos que no se encuentran dentro de los valores mínimos y máximos, quedando nuevos datos que se presentan dentro de la tabla 41.

Tabla 41: Valores aceptables según rango de desviación estándar, de estabilidad y fractura (Estudio 3: Santa Bárbara)

ESTUDIO 3: SANTA BÁRBARA			
Nro de muestras	Estabilidad (lb)	Estabilidad (kg)	Fractura (Kg)
1	2546,321	1154,99	326,4
2	2584,325	1172,23	330,6
3	2659,159	1206,18	333,4
4	2685,965	1218,33	350,8
5	2755,320	1249,79	351,6
6	2794,350	1267,50	358,5
7	2865,325	1299,69	362,6
8	2974,970	1349,43	365,4
Promedio	2733,217	1239,77	347,41

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3: Estabilidad (kg) vs Fractura (kg) (Estudio 3: Santa Bárbara)



Fuente: Elaboración propia

- Respecto al análisis de las gráficas de estabilidad vs fractura, podemos observar que esta gráfica se ajusta mejor a una línea de tendencia polinómica de segundo grado, con un valor de R^2 igual a 0,9312 siendo este valor encontrado, el valor más próximo a 1, el que garantiza que la

línea de tendencia elegida es la que brinda una ecuación con mayor precisión, la que mostramos a continuación:

$$y = -0,0008x^2 + 2,3247x - 1236,9$$

dicha ecuación servirá para obtener valores de fractura, a partir de los valores de estabilidad Marshall obtenidas durante el diseño de las probetas en estudio, siendo “y” valores de fractura en kilogramos, en función de “x” que representa los valores de estabilidad en kilogramos obtenidas durante el diseño de la misma. Cabe aclarar que dicha ecuación es especialmente para tramos en donde se trabaje con los mismos materiales, tanto agregados y cementos asfálticos, la alteración de cualquier de estos materiales, proporciona cambios y por lo tanto la ecuación encontrada no proporcionara valores correctos.

- Así también se observa mediante el análisis del gráfico obtenido que, para valores mayores de estabilidad hay valores mayores de fractura, como así también que para valores menores de estabilidad se tiene valores menores de fractura respectivamente, lo que indica que los valores de fractura dependen directamente de los valores de estabilidad, como ya lo habíamos estudiado anteriormente; podemos comprobar que a mayor estabilidad de diseño de una mezcla asfáltica, se obtendrán mayores valores últimos de fractura para diferentes mezclas asfálticas.
- Al mismo tiempo, se analiza que lo que ocasionó valores muy altos y bajos (valores depurados) se debe al mal corte que se obtuvo de las mezclas en estudio, ya que no se pudo contar con un equipo y/o material más preciso para poder realizar los cortes de las muestras asfálticas con exactitud; para este tramo se obtuvieron 4 valores que no se ajustaron a los rangos, calculados en base a datos estadísticos.

ESTUDIO 4: BERMEJO – SAN ANTONIO

Para este tramo se observa que se realizó el análisis respectivo con 12 datos correspondientes a estabilidad Marshall y 12 datos correspondientes a ensayos de fractura, de los cuales se obtuvieron los siguientes resultados y a continuación el análisis de los resultados mostrados:

Tabla 42: Valores de estabilidad y fractura (Estudio 4: Bermejo – San Antonio)

ESTUDIO 4: BERMEJO - SAN ANTONIO			
Nro de muestras	Estabilidad (lb)	Estabilidad (kg)	Fractura (Kg)
1	2688,742	1219,59	387,8
2	2758,963	1251,45	388,0
3	2801,550	1270,76	395,0
4	2805,214	1272,43	395,0
5	2840,626	1288,49	399,0
6	2896,429	1313,80	403,5
7	2956,321	1340,97	404,0
8	2979,727	1351,58	405,0
9	3037,122	1377,62	425,0
10	3125,854	1417,87	426,0
11	3125,869	1417,87	428,4
12	3205,246	1453,88	451,0
Promedio	2935,139	1331,36	408,98

Fuente: Elaboración propia

- Para el tramo 4 se puede observar que la variación de fractura soportada por la mezcla en estudio tiene como mínimo un valor de 387,8 kg y un valor máximo de 451,0 kg, haciendo una relación entre ambos se observa que la diferencia entre dichos valores es igual a 63,2 kg. el que expresado en porcentaje da un valor de 14,01%.
- Para este tramo también se observa que para el promedio de valores de fractura se obtuvo un valor de 409,0 kg.

- Haciendo énfasis en los valores de estabilidad se puede observar que los valores mínimo y máximo que son 1219,59 kg y 1453,88 kg respectivamente, obteniendo así una diferencia de 234,28 kg, cuyo valor expresado en porcentaje da un valor de 16,11% para este cuarto tramo en estudio.
- Para este tramo también se observa que para el promedio de valores de estabilidad se obtuvo un valor de 1331,36 kg.

Analizando los datos se comprueba que existen valores muy altos y muy bajos, por lo que nos basaremos en que la dispersión de datos aceptables según la ASTM debe ser la MEDIA +/- DESVIACIÓN ESTÁNDAR, por lo tanto, se procede a calcular la desviación estándar para clasificar los datos aceptables y depurar datos que no se encuentren dentro del rango para este tramo en estudio calculado a continuación:

Cuadro 86: Rango de valores aceptables de fractura según desviación estándar para el estudio 4: Bermejo – San Antonio

Desviación estándar	19,4
Media	409,0
Mínimo	389,6
Máximo	428,4

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 87: Rango de valores aceptables de estabilidad según desviación estándar para el estudio 4: Bermejo – San Antonio

Desviación estándar	74,3
Media	1331,4
Mínimo	1257,0
Máximo	1405,7

Fuente: Elaboración propia

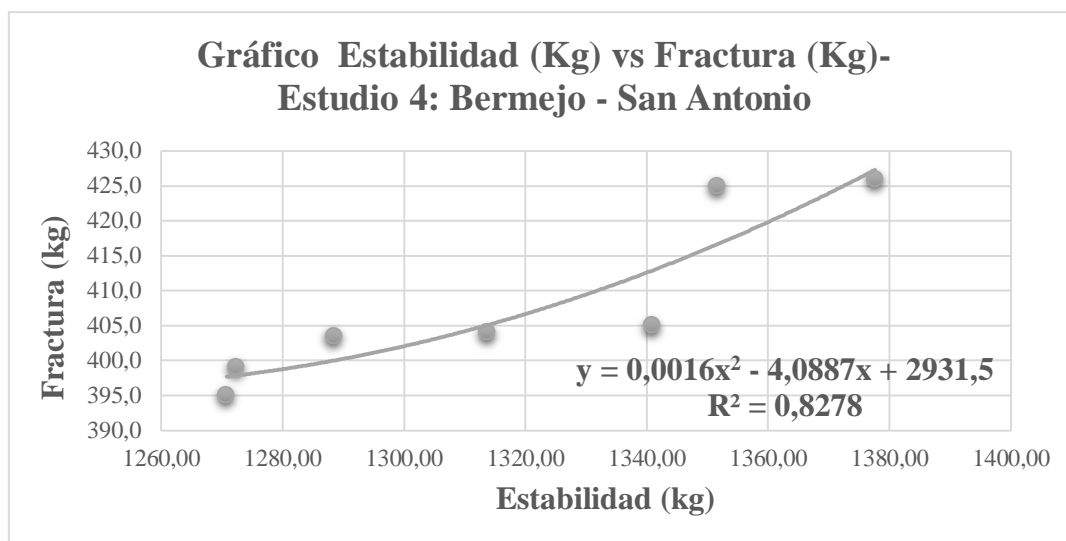
De acuerdo a los rangos calculados, se realizó la depuración de datos que no se encuentran dentro de los valores mínimos y máximos quedando nuevos datos que se presentan dentro de la tabla 43.

Tabla 43: Valores aceptables según rango de desviación estándar, de estabilidad y fractura (Estudio 4: Bermejo – San Antonio)

ESTUDIO 4: BERMEJO - SAN ANTONIO			
Nro de muestras	Estabilidad (lb)	Estabilidad (kg)	Fractura (Kg)
1	2801,550	1270,76	395,0
2	2805,214	1272,43	399,0
3	2840,626	1288,49	403,5
4	2896,429	1313,80	404,0
5	2956,321	1340,97	405,0
6	2979,727	1351,58	425,0
7	3037,122	1377,62	426,0
Promedio	2902,427	1316,52	408,21

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4: Estabilidad (kg) vs Fractura (kg) (Estudio 4: Bermejo – San Antonio)



Fuente: Elaboración propia

- Respecto al análisis de las gráficas de estabilidad vs fractura, se observa que esta gráfica se ajusta mejor a una línea de tendencia polinómica de segundo grado, con un valor de R^2 igual a 0,8278 siendo este valor encontrado, el valor más próximo a 1, el cual nos garantiza que la línea de

tendencia elegida es la que nos brinda una ecuación con mayor precisión, la cual mostramos a continuación:

$$y = 0,0016x^2 - 4,0887x + 2931,5$$

esta ecuación servirá para obtener valores de fractura, a partir de los valores de estabilidad Marshall obtenidas durante el diseño de las probetas en estudio, siendo “y” valores de fractura en kilogramos, en función de “x” que representa los valores de estabilidad en kilogramos obtenidas durante el diseño de la misma; cabe aclarar que dicha ecuación es especialmente para tramos en donde se trabaje con los mismos materiales, tanto agregados y cementos asfálticos, la alteración de cualquier de estos materiales, produce cambios y por lo tanto la ecuación encontrada no proporcionara valores correctos.

- Así también se hace notar que mediante el análisis del gráfico obtenido que, para valores mayores de estabilidad tenemos valores mayores de fractura, como así también que para valores menores de estabilidad obtenemos valores menores de fractura respectivamente, indicando que los valores de fractura dependen directamente de los valores de estabilidad, como ya lo habíamos estudiado anteriormente, podemos comprobar que a mayor estabilidad de diseño de una mezcla asfáltica, se obtendrán mayores valores últimos de fractura para diferentes mezclas asfálticas.
- Al mismo tiempo, se analiza que lo que ocasionó valores muy altos y bajos (valores depurados) se debe al mal corte que se obtuvo de las mezclas en estudio, ya que no se pudo contar con un equipo y/o material más preciso para poder realizar los cortes de las muestras asfálticas con exactitud, para este tramo se obtuvieron 5 valores que no se ajustaron a los rangos, calculados en base a datos estadísticos.

ESTUDIO 5: PUERTA AL CHACO – CANALETAS – VILLA MONTES

Para este tramo se observa que se realizó el análisis respectivo con 12 datos correspondientes a estabilidad Marshall y 12 datos correspondientes a ensayos de fractura, de los cuales se obtuvieron los siguientes resultados y a continuación el análisis de los resultados mostrados:

Tabla 44: Valores de estabilidad y fractura (Estudio 5: Puerta al Chaco- Canaletas – Villa Montes)

ESTUDIO 5: PUERTA AL CHACO- CANALETAS - VILLA MONTES			
Nro de muestras	Estabilidad (lb)	Estabilidad (kg)	Fractura (Kg)
1	2008,325	910,96	333,8
2	2096,354	950,89	359,7
3	2142,479	971,81	364,2
4	2158,397	979,03	370,6
5	2203,589	999,53	371,7
6	2253,154	1022,01	375,0
7	2498,651	1133,37	376,7
8	2516,745	1141,58	389,1
9	2619,854	1188,35	397,0
10	2809,817	1274,51	408,0
11	2818,204	1278,32	422,7
12	2832,184	1284,66	440,7
Promedio	2413,146	1094,59	384,10

Fuente: Elaboración propia

- Para el tramo 5 se manifiesta que, la variación de fractura soportada por la mezcla en estudio tiene como mínimo un valor de 333,8 kg y un valor máximo de 440,7 kg, haciendo una relación entre ambos se observa que la diferencia entre dichos valores es igual a 106,9 kg. el cual expresado en porcentaje da un valor de 24,26%.
- Para este tramo también se observa que para el promedio de valores de fractura se obtuvo un valor de 384,1 kg.

- Haciendo énfasis en los valores de estabilidad se evidencia que los valores mínimo y máximo que son 910,96 kg y 1284,66 kg. respectivamente, obteniendo así una diferencia de 373,70 kg, cuyo valor expresado en porcentaje da un porcentaje de 29,09% para este quinto tramo en estudio.
- Para este tramo también se puede observar que para el promedio de valores de estabilidad se obtuvo un valor de 1094,59 kg.

Analizando los datos, se comprueba que existen valores muy altos y muy bajos, por lo que nos basaremos en que la dispersión de datos aceptables según la ASTM debe ser la MEDIA +/- DESVIACIÓN ESTÁNDAR, por lo tanto, se procede a calcular la desviación estándar para clasificar los datos aceptables y depurar datos que no se encuentren dentro del rango para este tramo en estudio calculado a continuación:

Cuadro 88: Rango de valores aceptables de fractura según desviación estándar para el estudio 5: Puerta al Chaco – Canaletas – Villa Montes

Desviación estándar	29,3
Media	384,1
Mínimo	354,8
Máximo	413,4

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 89: Rango de valores aceptables de estabilidad según desviación estándar para el estudio 5: Puerta al Chaco – Canaletas -Villa Montes

Desviación estándar	138,8
Media	1094,6
Mínimo	955,8
Máximo	1233,4

Fuente: Elaboración propia

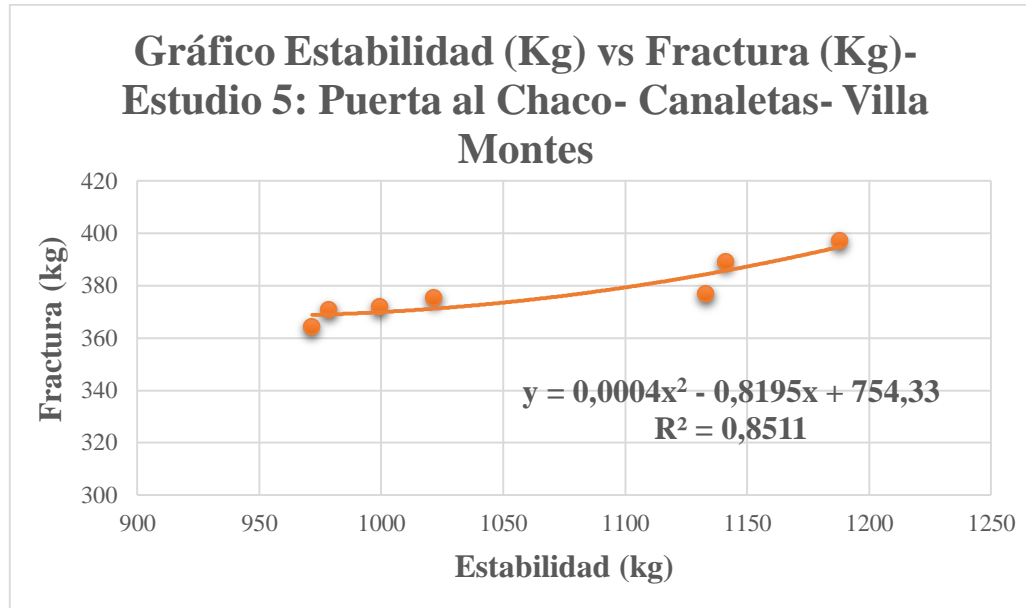
De acuerdo a los rangos calculados, se realizó la depuración de datos que no se encuentran dentro de los valores mínimos y máximos, quedando nuevos datos que se presentan dentro de la tabla 45.

Tabla 45: Valores aceptables según rango de desviación estándar, de estabilidad y fractura (Estudio 5: Puerta al Chaco – Canaletas – Villa Montes)

ESTUDIO 5: PUERTA AL CHACO- CANALETAS - VILLA MONTES			
Nro de muestras	Estabilidad (lb)	Estabilidad (kg)	Fractura (Kg)
1	2142,479	971,81	364,2
2	2158,397	979,03	370,6
3	2203,589	999,53	371,7
4	2253,154	1022,01	375,0
5	2498,651	1133,37	376,7
6	2516,745	1141,58	389,1
7	2619,854	1188,35	397,0
Promedio	2341,838	1062,24	377,76

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 5: Estabilidad (kg) vs Fractura (kg) (Estudio 5: Puerta al Chaco – Canaletas – Villa Montes)



Fuente: Elaboración propia

- Respecto al análisis de las gráficas de estabilidad vs fractura, esta gráfica se ajusta mejor a una línea de tendencia polinómica de segundo grado, con

un valor de R^2 igual a 0,8511 siendo este valor encontrado, el valor más próximo a 1, lo que garantiza que la línea de tendencia elegida es la que nos brindara una ecuación con mayor precisión, la cual mostramos a continuación:

$$y = 0,0004x^2 - 0,8195x + 754,33$$

dicha ecuación sirve para obtener valores de fractura, a partir de los valores de estabilidad Marshall obtenidas durante el diseño de las probetas en estudio, siendo “y” valores de fractura en kilogramos, en función de “x” que representa los valores de estabilidad en kilogramos obtenidas durante el diseño de la misma; cabe aclarar que dicha ecuación es especialmente para tramos en donde se trabaje con los mismos materiales, tanto agregados y cementos asfálticos, la alteración de cualquier de estos materiales, proporciona cambios y por lo tanto la ecuación encontrada no proporcionara valores correctos.

- Así también se observa mediante el análisis del gráfico obtenido que a valores mayores de estabilidad hay valores mayores de fractura, como así también que para valores menores de estabilidad obtenemos valores menores de fractura respectivamente, lo que demuestra que los valores de fractura dependen directamente de los valores de estabilidad, como ya lo habíamos estudiado anteriormente, se comprueba que a mayor estabilidad de diseño de una mezcla asfáltica, se obtendrán mayores valores últimos de fractura para diferentes mezclas asfálticas.
- Al mismo tiempo, se analiza que la consecuencia de valores muy altos y bajos (valores depurados) se debe al mal corte que se obtuvo de las mezclas en estudio, ya que no se pudo contar con un equipo y/o material más preciso para poder realizar los cortes de las muestras asfálticas con exactitud, para este tramo se obtuvo 5 valores que no se ajustaron a los rangos, calculados en base a datos estadísticos.

Cuadro 90: Cuadro comparativo de procedencia y porcentajes óptimos de cada tramo en estudio

Cuadro comparativo de porcentajes óptimos de dosificación						
Observaciones	Unidades	ESTUDIO 1 - SANTA ANA - YESERA	ESTUDIO 2 - TOMATITAS - ERQUIZ CEIBAL - CRUCE CADILLAR	ESTUDIO 3 - SANTA BARBARA	ESTUDIO 4 - BERMEJO - SAN ANTONIO	ESTUDIO 5 - PUERTA AL CHACO - CANALETAS - VILLAMONTES
Procedencia de grava	No contiene	Vafercon	San Jose de Charaja	San Jose de Charaja	Ubesan	Cañadas
Procedencia de gravilla	No contiene	Vafercon	San Jose de Charaja	San Jose de Charaja	Ubesan	Cañadas
Procedencia de arena	No contiene	Vafercon	San Jose de Charaja	San Jose de Charaja	Ubesan	Cañadas
Procedencia de filler	No contiene	No contiene	No contiene	No contiene	Rio Tarija	No contiene
Procedencia de cemento asfáltico	No contiene	Stratura (Brasil) 85 -100	Stratura (Brasil) 85 -100	Ipiranga (Brasil) 85-100	AsfalChile (Chile) 60-70	Ipiranga (Brasil) 85-100
Porcentaje de dosificación grava	Porcentaje (%)	31,25	25,50	25,60	14,18	23,65
Porcentaje de dosificación gravilla	Porcentaje (%)	21,78	22,70	24,65	28,35	23,65
Porcentaje de dosificación arena	Porcentaje (%)	41,67	46,20	44,55	42,53	47,30
Porcentaje de dosificación filler	Porcentaje (%)	No contiene	No contiene	No contiene	9,45	No contiene
Porcentaje de dosificación cemento asfáltico	Porcentaje (%)	5,30	5,60	5,20	5,50	5,40

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 91: Cuadro comparativo de caracterización para agregados pétreos de los tramos en estudio

Cuadro comparativo de caracterización para agregados petreos						
Observaciones	Unidades	ESTUDIO 1 - SANTA ANA - YESERA	ESTUDIO 2 - TOMATITAS -	ESTUDIO 3 - SANTA BARBARA	ESTUDIO 4 - BERMEJO - SAN	ESTUDIO 5 - PUERTA AL CHACO
Granulometría	Porcentaje (%)	Gradación C	Gradación C	Gradación C	Gradación C	Gradación C
Peso específico grava	gr/cm3	2,648	2,650	2,668	2,695	2,666
Peso específico gravilla	gr/cm3	2,638	2,645	2,687	2,692	2,700
Peso específico fino	gr/cm3	2,631	2,550	2,603	2,679	2,680
Peso unitario grava	gr/cm3	1,472	1,447	1,449	1,425	1,442
Peso unitario gravilla	gr/cm3	1,472	1,447	1,360	1,425	1,359
Peso unitario fino	gr/cm3	1,643	1,623	1,560	1,624	1,560
Desgaste de los ángeles grava	Porcentaje (%)	27,00	22,92	18,42	18,04	28,10
Desgaste de los ángeles gravilla	Porcentaje (%)	25,56	23,08	16,56	20,88	29,26
Durabilidad de los agregados grava	Porcentaje (%)	0,10	6,12	6,22	2,15	5,72
Durabilidad de los agregados gravilla	Porcentaje (%)	1,55	5,68	5,89	1,95	1,15
Durabilidad de los agregados fino	Porcentaje (%)	0,60	7,76	4,39	0,53	2,13
Límites líquido	Porcentaje (%)	18,00	25,00	14,00	22,00	16,00
Índice de plasticidad	Porcentaje (%)	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.
Caras Fracturas agregado grueso	Porcentaje (%)	92,35	97,60	85,70	96,90	96,50
Equivalente de arena	Porcentaje (%)	55,30	59,20	59,20	66,10	82,40

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 92: Cuadro comparativo de caracterización de cementos asfálticos de los tramos en estudio

Cuadro comparativo de caracterización de cementos asfálticos						
Observaciones	Unidades	ESTUDIO 1 - SANTA ANA - YESERA	ESTUDIO 2 - TOMATITAS -	ESTUDIO 3 - SANTA BARBARA	ESTUDIO 4 - BERMEJO - SAN	ESTUDIO 5 - PUERTA AL CHACO
Viscosidad Saybolt furol	seg.	115,30	92,00	92,00	156,00	87,00
Penetración	mm.	91,00	89,00	97,80	63,20	86,70
Peso específico	gr/cm ³	1,010	1,008	1,017	1,002	1,002
Punto de ablandamiento	°C	43,20	44,00	43,50	51,00	43,00
Punto de inflamación	°C	263,00	265,00	261,00	272,00	263,00

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 93: Cuadro comparativo de la estabilidad Marshall y fractura después de la depuración de valores dispersos de los tramos en estudio

ESTUDIO 1 - SANTA ANA - YESERA		ESTUDIO 2 - TOMATITAS - ERQUIZ CEIBAL- CRUCE CADILLAR		ESTUDIO 3 - SANTA BARBARA		ESTUDIO 4 - BERMEJO - SAN ANTONIO		ESTUDIO 5 - PUERTA AL CHACO - CANALETAS- VILLAMONTES	
Estabilidad (kg)	Fractura(kg)	Estabilidad (kg)	Fractura(kg)	Estabilidad (kg)	Fractura(kg)	Estabilidad (kg)	Fractura(kg)	Estabilidad (kg)	Fractura(kg)
1004,40	311,0	1069,10	321,1	1154,99	326,4	1270,76	395,0	971,81	364,2
1004,85	324,0	1069,96	328,0	1172,23	330,6	1272,43	399,0	979,03	370,6
1013,85	332,8	1070,19	335,0	1206,18	333,4	1288,49	403,5	999,53	371,7
1028,41	342,5	1083,73	338,0	1218,33	350,8	1313,80	404,0	1022,01	375,0
1039,70	347,4	1099,35	340,0	1249,79	351,6	1340,97	405,0	1133,37	376,7
1074,54	360,0	1114,75	351,0	1267,50	358,5	1351,58	425,0	1141,58	389,1
1080,28	360,0	1155,70	352,0	1299,69	362,6	1377,62	426,0	1188,35	397,0
-	-	-	-	1349,43	365,4	-	-	-	-
1035,15	339,67	1094,68	337,87	1239,77	347,41	1316,52	408,21	1062,24	377,76

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 94: Cuadro comparativo de valores de estabilidad Marshall y fractura de los tramos en estudio

Cuadro comparativo de valores de estabilidad Marshall y fractura						
Observaciones	Unidades	ESTUDIO 1 - SANTA ANA - YESERA	ESTUDIO 2 - TOMATITAS - ERQUIZ CEIBAL - CRUCE CADILLAR	ESTUDIO 3 - SANTA BARBARA	ESTUDIO 4 - BERMEJO - SAN ANTONIO	ESTUDIO 5 - PUERTA AL CHACO - CANALETAS - VILLAMONTES
Nro de datos	No contiene	7	7	8	7	7
Estabilidad Marshall mínimo	kg	1004,40	1069,10	1154,99	1270,76	971,81
Estabilidad Marshall máximo	kg	1080,28	1155,70	1349,43	1377,62	1188,35
Estabilidad Marshall promedio	kg	1035,15	1094,68	1239,77	1316,52	1062,24
Fractura mínimo	kg	311,0	321,1	326,4	395,0	364,2
Fractura máximo	kg	360,0	352,0	365,4	426,0	397,0
Fractura promedio	kg	339,67	337,87	347,41	408,21	377,76

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES:

- En el análisis realizado a los cinco diferentes tramos en estudio, en cada uno de ellos, se procedió a utilizar, agregados triturados, para cada dosificación Marshall, debido a que los materiales triturados tienen más ventajas sobre los materiales pétreos naturales, por sus caras angulares, chatas y alargadas, como así también a su mejor granulometría.
- El tramo Bermejo – San Antonio presenta mayor estabilidad en sus probetas de dosificación Marshall, debido a la utilización de cemento asfáltico 60-70, a diferencia de los tramos restantes en los que se empleó cemento asfáltico 85-100, por el clima cálido que presenta esta zona; cabe recalcar que este tramo cuenta con agregado filler en su dosificación Marshall.
- En los tramos estudiados se puede evidenciar que ocurre el mismo comportamiento de fractura con respecto a estabilidad, esto permite inferir que independientemente de la dosificación de cada mezcla asfáltica, el comportamiento de fractura y estabilidad siempre presentará una relación directa, mientras mayor estabilidad de diseño tenga una probeta Marshall, mayor carga soportará antes de fracturarse.
- Así también se puede comprobar la importancia de las mezclas asfálticas en caliente, debido a su buen comportamiento en relación a la fractura, puesto que las mezclas asfálticas en caliente se clasifican como materiales que tienen una fractura dúctil y no así frágil, debido al análisis realizado y el comportamiento presentado por cada mezcla, lo que es un aspecto beneficioso para nuestra sociedad, puesto que las mezclas asfálticas en caliente son las más utilizadas

dentro de la red de carreteras principales de nuestro departamento, como así también de nuestro país.

- La presencia de fracturas dúctiles encontradas en el presente trabajo a partir de varios análisis mediante los resultados obtenidos, comprueba que las mezclas asfálticas tienen un buen comportamiento con respecto a la fatiga, debido directamente a su relación con la fractura dúctil que presenta, ya que este tipo de fracturas se dan en materiales que tienen la capacidad de resistir diferentes esfuerzos de deformación antes de llegar a su ruptura; a diferencia de los materiales que presentan fractura frágil que tienden a llegar a su ruptura en el momento en el que sobrepasa sus cargas máximas, y no desarrollan un comportamiento elástico como el que presentan los materiales dúctiles.
- Las ecuaciones encontradas y las correlaciones realizadas, son particularmente para las dosificaciones utilizadas, puesto que, si se altera o cambia algún material, la tendencia que tiene dicha ecuación no se ajustará a la mezcla, así también se denota que los cinco tramos en estudio cuentan con su ecuación particular, dependiente del tipo y cantidad de material con la que sean dosificadas las muestras.
- Concluyente y necesario es también depurar valores extremos, puesto que la diferencia entre un valor mínimo y máximo difiere bastante, a razón de que las muestras no se encontraron cortadas con exactitud por falta de equipo y personal con experiencia en el área, no obstante a través del cálculo de una desviación estándar muestral para cada tramo de manera independiente se pudo obtener el margen de error respecto a la media que deberían tener los valores, de esta manera se seleccionó valores razonables que se ajustasen a la investigación, logrando realizar los análisis de resultados de manera satisfactoria.
- Al evaluar la estabilidad vs la fractura de cada probeta y/o briqueta Marshall, se observa que son directamente proporcionales, ya que mientras más estable sea la probeta estudiada, mayor valor de carga soporta antes de fracturarse.

4.2. RECOMENDACIONES:

- Para obtener una buena caracterización de los materiales de la mezcla asfáltica es recomendable que se realicen dos o tres ensayos de cada uno, de esta forma se podrá analizar si los valores son razonables y obtener un promedio de los mismos.
- Las granulometrías utilizadas deberán estar bien graduadas, respectivamente la caracterización de los agregados deberá respetar los valores máximos y mínimos permisibles según las normas en estudio, y de acuerdo a las especificaciones técnicas que requiere dicha obra.
- Al momento de la dosificación Marshall deben respetarse las temperaturas de diseño de la mezcla asfáltica, de la misma forma los porcentajes óptimos de diseño, para así obtener mejores valores de fractura y estabilidad Marshall.
- Al realizar los ensayos de Fractura deberá tenerse en cuenta la lectura de la última carga que soporta dicha probeta Marshall antes de fisurarse.
- Para la obtención de mejores resultados en el ensayo de fractura, las muestras deben estar cortadas con la mayor exactitud posible, para que los resultados en estudio no difieran de manera brusca.
- Las ecuaciones encontradas son exclusivas para cada tramo, respetando las dosificaciones y procedencia tanto de materiales pétreos como así también de cementos asfálticos, ya que una alteración de éstos no rendirá resultados válidos.

BIBLIOGRAFÍA

La bibliografía consultada para la elaboración del proyecto fue la siguiente:

- Bañon Blázquez Luis. (2002). Mezclas bituminosas. Universidad Pública de Buenos Aires UBA, Buenos Aires, Argentina.
- Bariani B. Liedi., & Goretti da Motta Laura María., & Pereira Jorge Augusto., & Barbosa S Jorge. (2006). Pavimentación Asfáltica – Formación Básica para Ingenieros. BR. Petrobras Asfaltos, Brasil.
- Dynal Industrial S.A (2010). Conservación vial – Lechadas asfálticas. Dynal Industrial S.A., Chile.
- Escalante Z. Jorge R. & Fernández José. & Sáez Lucia. (2008). Clasificación de ligantes asfálticos por desempeño. Universidad de São Paulo, Brasil.
- Milaya Gonzales Silene., & Ordoñez Abel. (2013). Manual de laboratorio de ensayos para pavimentos volumen I. Gasket paper, Colombia.
- Palma Gabriel. & Wahr Carlos. & Pérez Félix. (2001). Estudio del comportamiento a fatiga de mezclas asfálticas mediante el ensayo BTB. Chile.
- Paredes Luis Alberto. & Reyes Oscar. & Camacho Luis Fernando. (2013). Comportamiento de mezclas asfálticas densas a partir del ensayo de viga semicircular simplemente apoyada. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia.

- Rondón Q. Hugo., Reyes L. Fredy., Gonzales O. Laura., Vásquez A. Sergio. (2012). Ahuellamiento y fatiga en mezclas asfálticas. Universidad Distrital, Colombia.