

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

El uso de llenante mineral reduce los vacíos de la mezcla asfáltica, sin embargo, la arcilla estabilizada térmicamente es importante dentro de las mezclas ya que, por su finura, cubre los pequeños vacíos reduciendo la permeabilidad de la misma, sin preocupación de generar deformaciones por causa de expansiones y contracciones comparada a una arcilla sin estabilizar.

Existe un cambio de una arcilla natural cuando se somete a altas temperaturas, haciendo variar sus propiedades de expansión y resistencia. En Colombia, realizaron este tipo de estudios con estabilizaciones térmicas de arcillas en diferentes tiempos de exposición (1, 2 y 3 horas) dentro de hornos a temperaturas de 400, 500 y 600 °C, obteniendo excelente respuesta mecánica de las mezclas asfálticas. (Dorado, Quiñones y Rondón, 2019).

La presente investigación se enfoca en la evaluación de las arcillas estabilizadas térmicamente dentro de mezclas asfálticas, aplicando la técnica en caliente, para conocer sus resultados de estabilidad y demás propiedades físico-mecánicas.

Por ello, al realizar un tratamiento térmico a una arcilla natural, se logra eliminar las propiedades indeseables desde el punto de vista ingenieril como son la plasticidad, y su capacidad de expansión dentro de una mezcla asfáltica, aumentando la estabilidad y resistencia a la compresión inconfiada. Sin embargo, más allá de reducir esos problemas, la finalidad de utilizar arcilla en la construcción es para disponer su uso de pavimentos asfálticos, ya que ese tipo de suelos son desechados en proyectos viales. Esto permite a la sociedad tener mejor calidad de pavimentos flexibles, más resistentes, duraderos e impermeables, evitando fallas en la carpeta asfáltica y prolongando la vida útil de las carreteras.

1.2. Justificación

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

Aspecto técnico

Por lo tanto, el filler como tal juega un papel importante en la calidad de las mezclas asfálticas, es un ente adherente junto con el ligante asfáltico para unir los agregados pétreos. Es así que las arcillas estabilizadas térmicamente, al tener un diámetro menor a 0,075 mm, permite entrar hasta los más pequeños vacíos de la mezcla asfáltica, haciéndola más densa e impermeable, sin tener cambios de alteración de propiedades al contacto del agua.

Aspecto económico

Ante la gran cantidad y diversidad de tipos de filler especiales, el filler común, o hasta filler de ceniza en las mezclas asfálticas y teniendo sus costos elevados se ve por conveniente ver otra alternativa para que los constructores, puedan contar con otro tipo de material que les permita lograr los mismos objetivos que de un filler especial pero más accesible al bolsillo; una de estas alternativas son las arcillas, ya que en nuestro medio contamos con grandes bancos de arcillas naturales.

Aspecto social

En cualquier construcción civil, al encontrarse con suelos arcillosos, muchas veces son removidos a otros lugares para rellenos de zonas accidentadas en áreas periurbanas,

perjudicando igualmente a futuras construcciones. Sin embargo, esto puede reducir al reutilizarlas en mezclas asfálticas, con previa estabilización térmica.

Aspecto académico

El estudio de la arcilla estabilizada térmicamente como filler dentro de las mezclas asfálticas, permitirá introducir su uso como una alternativa para adquirir mejores propiedades de cualquier mezcla en futuro, variando los tipos de ligantes, aditivos, componentes adicionales o agregados pétreos.

1.3. Diseño teórico

1.3.1. Planteamiento del problema

1.3.1.1. Situación problemática

La arcilla como filler en mezclas asfálticas es conocida por incrementar la susceptibilidad a la humedad, porque con la presencia de agua, desarrollan comportamiento plástico y expansivo generando baja capacidad portante y rigidez (Chen, 2015). Por tal motivo, se busca una alternativa para mitigar esta problemática, como ser la estabilización térmica.

Muchas carpetas de rodadura fallan por problemas asociados al daño por intemperismo, falta de cohesión o envejecimiento antes que por las cargas impuestas por los vehículos. Frente a esta problemática se han intentado soluciones en el diseño que consisten frecuentemente en aumentar el contenido de asfalto y filler en las mezclas para lograr una masa ligante de mayor envolviendo a los áridos y reducir el porcentaje de vacíos.

Dentro de los diferentes tipos de mezclas asfálticas, se pudo evidenciar que la arcilla no es utilizada en nuestro medio, a pesar de contar con grandes bancos en los barrios periféricos de la ciudad de Tarija, esto conlleva que la investigación tenga un énfasis acerca del uso de las mismas, pero cambiando sus propiedades, para obtener mejores resultados.

En la presente investigación, al utilizar arcilla estabilizada térmicamente como filler, se podrá evaluar las variaciones en el comportamiento mecánico de las propiedades de las

mezclas asfálticas, como una alternativa para reducir las fallas superficiales que presenta una carpeta de rodadura.

1.3.1.2. Problema

¿De qué manera la arcilla estabilizada térmicamente como filler incide en la estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica?

1.3.2. Objetivo de la investigación

1.3.2.1. Objetivo general

Evaluar los efectos de la arcilla estabilizada térmicamente, como relleno filler de mezclas asfálticas; de tal manera, se pueda establecer un comportamiento de mejoras en la estabilidad Marshall.

1.3.2.2. Objetivos específicos

- Levantar información teórica de la estabilización térmica de arcillas en mezclas asfálticas.
- Determinar las características propias de los componentes de la mezcla asfáltica a diseñar.
- Establecer el contenido óptimo de cemento asfáltico de diferentes porcentajes de filler.
- Realizar la estabilización térmica de arcilla en diferentes tiempos.
- Realizar briquetas Marshall con las arcillas estabilizadas térmicamente variando los porcentajes de filler.
- Evaluar los efectos de la arcilla estabilizada térmicamente como filler dentro de la mezcla asfáltica.
- Realizar conclusiones y recomendaciones en función a los resultados obtenidos.

1.3.3. Hipótesis

La arcilla estabilizada térmicamente como relleno filler mejora la estabilidad Marshall.

1.3.4. Definición de las variables

1.3.4.1. Variables independientes

X_1 = Porcentaje de filler: natural y arcilla estabilizada térmicamente.

X_2 = Tiempo de estabilización térmica

1.3.4.2. Variables dependientes

Y_i = Propiedades físico-mecánicas Marshall: propiedades volumétricas, estabilidad y fluencia.

1.4. Diseño metodológico

1.4.1. Métodos y técnicas empleadas

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

El método que se utilizará para esta investigación será correlacional porque elegiremos nuestras muestras que serán utilizadas para los diferentes tipos de mezclas asfálticas que evaluaremos y así poder estudiar las propiedades mecánicas de cada una de las mezclas con las diferentes arcillas y filler de la roca triturada. Se estudiará los ensayos necesarios para la caracterización de la mezcla asfáltica, agregado y asfalto.

La investigación correlacional es un tipo de método de investigación no experimental en el cual un investigador mide dos variables o más variables.

1.4.1.2. Técnicas de muestreo

Para la siguiente investigación la técnica de muestreo que se utiliza es la experimental ya que se la llevará a cabo dentro de un laboratorio donde se realizarán los respectivos ensayos para la elaboración de las mezclas asfálticas.

Para la presente investigación realizaremos las siguientes prácticas y utilizaremos los diferentes instrumentos que serán utilizados para dicho estudio:

1.4.1.2.1. Ensayos a realizar para los agregados

- Granulometría (ASTM C-71).

El análisis granulométrico es el conjunto de operaciones cuyo fin es determinar la distribución del tamaño de los elementos que componen una muestra.

La distribución del tamaño de las partículas es la representación, en forma de tablas, números o gráficos, de los resultados obtenidos experimentalmente.

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

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

- Equivalente de la arena y agregados finos (ASTM D 2419).

El ensayo determina la proporción relativa del contenido de polvo fino nocivo, o material arcilloso, en los suelos o agregados finos. Es un procedimiento que se puede utilizar para lograr una correlación rápida en campo.

- Abrasión de agregados grueso máquina de los ángeles (ASTM C-131).

Esta es la prueba que más se aplica para averiguar la calidad global estructural del agregado grueso. Este método establece el procedimiento a seguir para determinar el desgaste, por abrasión, del agregado grueso, menor de 1½" (38 mm), utilizando la máquina de Los Ángeles.

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

Este método nos permite determinar los pesos específicos aparentes y nominal de las muestras, así como la absorción, después de 24 horas de estar sumergida en agua, de los agregados con tamaño igual o mayor a 4.75mm (tamiz N.º 4).

- Partículas planas y alargadas (ASTM D-4791).

Este método permite la determinación de los porcentajes de partículas planas, alargadas o plano alargadas en agregados gruesos.

1.4.1.2.2. Ensayos a realizar para filler

- **Peso específico y absorción del agregado fino (ASTM D-128).**

Este método determina el peso específico seco y el peso específico saturado con superficie seca, el peso específico aparente y la absorción después de 24 horas del agregado fino.

- **Límites de Attemberg (LL, LP, IP).**

El límite líquido es un ensayo que se determina de forma estandarizada mediante la cuchara de Casagrande.

El límite plástico se determina mediante la formación de pequeños cilindros en la palma de la mano sobre una superficie lisa de unos 3 mm de diámetro y 25-30 mm de longitud.

Una vez definidos el límite líquido y el límite plástico puede determinarse el índice de plasticidad puesto que es la diferencia entre ambos.

- **Hidrómetro**

Esta práctica la utilizamos para determinar el porcentaje de limos y arcillas que pasan por el tamiz N.º 200.

1.4.1.2.3. Ensayos a realizar para el cemento asfáltico

- **Ensayo de penetración (ASTM D-5).**

Este método lo utilizamos para determinar la dureza, mediante penetración, de materiales bituminosos sólidos y semisólidos y se usa como una medida de consistencia; valores altos de penetración indican consistencias más blandas.

- **Ensayo de ductilidad (ASTM D-113).**

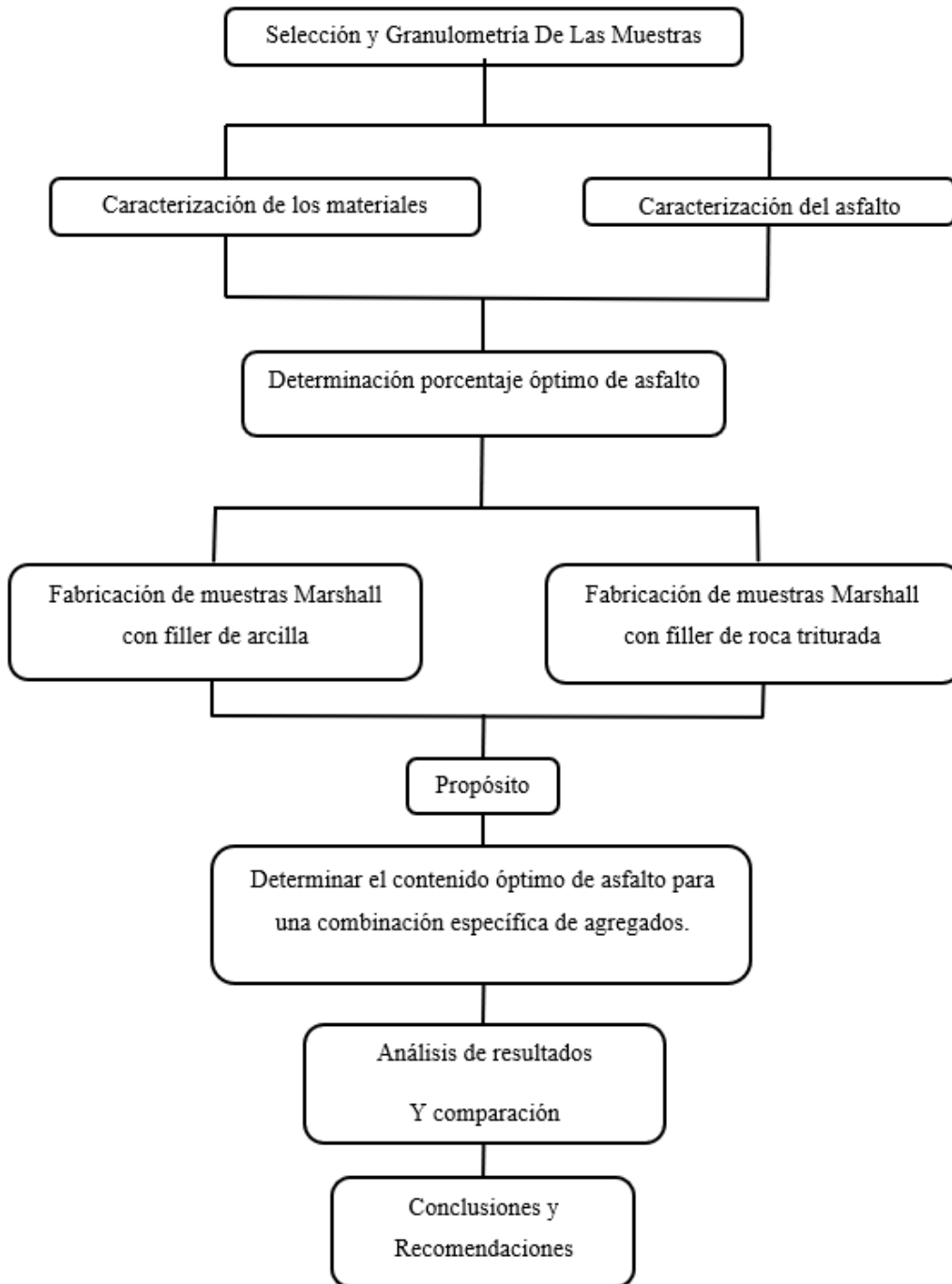
Este método de ensayo describe el procedimiento para determinar la ductilidad de materiales bituminosos por la distancia que esta se alargará antes de romperse cuando los dos extremos de una briqueta de muestra sean separados en dos partes.

- Ensayo de punto de inflamación (ASTM D-92).
Este ensayo consiste en determinar el punto de inflamación, calentando gradualmente una muestra de cemento asfáltico en una copa de latón, mientras se está aplicando una pequeña llama sobre la superficie de la muestra.

- Ensayo de peso específico (ASTM D-70).
Este método determina el peso específico del cemento asfáltico mediante el uso del picnómetro.

- Ensayo de estabilidad y fluencia Método Marshall (ASTM D-1559).
En este ensayo consiste en conocer la estabilidad y la fluencia o deformación de probetas las cuales sacamos del pavimento, y para esto utilizamos la prensa Marshall.

1.4.1.3. Procedimiento de aplicación



1.4.1.4. Metodología de la práctica

El estudio se iniciará con la selección de los materiales (agregados, asfaltos, arcillas).

Las arcillas las obtendremos de diferentes zonas de Tarija como ser Barrio La Cañada, Barrio Juan Nicolai y Barrio Monte Cristo.

Los agregados triturados serán obtenidos de la planta asfaltadora ubicada en la comunidad de Charaja perteneciente al servicio departamental de caminos (SEDECA). De igual manera el cemento asfáltico se obtendrá del servicio departamental de caminos (SEDECA).

Luego realizaremos la caracterización de cada uno de nuestros materiales (agregados, asfaltos, arcillas), seguidamente procedemos a la determinación del porcentaje óptimo de asfalto mediante el método Marshall, para luego realizar nuestras probetas con filler de arcilla en las mezclas asfálticas, realizando una variación de 4 especímenes de porcentajes que varían (2%, 4%, 6% y 8%) y como se tomaron muestras de arcillas de tres zonas diferentes se realizarán 3 ensayos para cada variación de porcentajes, es decir que en total realizaremos 36 probetas de mezclas asfálticas con arcilla para posteriormente realizar 3 probeta de mezclas asfálticas con filler convencional de roca triturada que nos servirán de comparación y evaluación, haciendo un total de 30 probetas para poder establecer densidades y contenidos óptimos de vacío que deben ser cumplidos durante la elaboración de cada una de nuestras mezclas asfálticas.

El propósito del método Marshall es determinar el contenido óptimo del asfalto para cada una de las combinaciones específicas de los agregados.

Posteriormente realizaremos un análisis de resultados y una comparación de nuestra investigación para comprobar el fin por la que fue realizada, y poder llegar a nuestras conclusiones y recomendación de dicho proyecto.

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

1.4.2.1. Análisis estadístico

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

Es el estudio de los métodos para reunir, clasificar, presentar y describir a un conjunto de datos.

Se asume que es descriptivo el estudio de un conjunto de datos, cuando simplemente se describen o analizan a los datos.

Según la norma ASTM para un trabajo de investigación se debe realizar el análisis con un tamaño mínimo de 30 muestras.

La media aritmética

En la práctica la media de posición de mayor uso y más conocida es la media aritmética; a la media aritmética se la conoce directamente como media o promedio, la media aritmética es una medida de tendencia central.

De un conjunto de datos $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$, de tamaño n , de una variable o característica X , se denomina \bar{x} a su media aritmética y se define como la suma de todos los valores observados en la muestra, dividida entre el número total de datos n .

$$\bar{X} = M_{(X)} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{n} = \frac{\sum_{j=1}^n X_j}{n} = \frac{\sum X}{n}$$

La mediana

Es otra de las medidas de posición de amplio uso y de fácil comprensión.

La mediana que se denota por $Me_{(x)}$ o por A^{-se} define como el valor central de un conjunto de datos $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$, de tamaño n de una variable o características X , donde los datos están ordenados correlativamente.

Cuando se tiene un número impar de datos la mediana será el valor del dato central $X_{(n+1)/2}$; Para un número par de datos se calcula la media de los datos centrales: $X_{n/2}, X_{n/2+1}$

La moda

Otra medida de posición de amplio uso es la moda, que sin imaginarlo se usa frecuentemente.

En un conjunto de datos $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$, de tamaño n , de una variable o característica X ; la moda se define como el valor que ocurre con mayor frecuencia, se denota por $Mo_{(x)}$.

En algunos conjuntos de datos, la moda puede no existir, o no ser única en otros casos.

La varianza

Es la principal medida de dispersión más precisa y de mayor uso, en especial su uso es más amplio en la estadística inferencial.

Dependiendo de si los datos corresponden a una población o a una muestra, se obtendrán la varianza poblacional o la varianza muestral, cuyas definiciones son ligeramente diferentes. La varianza de una población o varianza poblacional se designa por σ^2 (Sigma cuadrado), la varianza de una muestra o varianza muestral se designa por s^2 .

Para una ordenación de datos: $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$. La varianza se calcula como:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \mu)^2}{N} = \frac{\sum (X - \mu)^2}{N}$$

Donde:

σ^2 = Varianza de la población.

X_j = Término del conjunto de datos.

μ = Media de la población.

n = Tamaño de la población.

$$s^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2}{n - 1} = \frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n - 1} = \frac{n \sum X^2 - (\sum X)^2}{n(n - 1)}$$

Donde:

s^2 = Varianza muestral

X_j = Término del conjunto de datos.

\bar{X} = Media de la muestra.

n = Tamaño de la muestra.

Desviación estándar

Con base en la varianza, otras medidas de dispersión es la desviación estándar, o desviación típica; según se trabaje con una población o con una muestra, se obtendrán la desviación estándar poblacional o la desviación estándar muestral, cuyas definiciones son ligeramente diferentes. La desviación estándar de una población se designa por σ (sigma).

La desviación estándar de una muestra se designa por S. Son las raíces cuadradas de las varianzas de una población o muestra respectivamente:

Para una ordenación de datos: $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$. la desviación estándar se calcula por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \mu)^2}{N}} = \sqrt{(X - \mu)^2}; \quad N = \sum_{j=1}^k f_j$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2}{n-1}} = \sqrt{(X - \bar{X})^2}; \quad n = \sum_{j=1}^k f_j$$

Donde:

(σ) = Desviación estándar poblacional.

(s) = Desviación estándar muestral

X_j = Valor de la variable.

μ = Media poblacional.

\bar{X} = Media muestral

N = Tamaño de la población y muestral.

Coefficiente de variación

Se llama también coeficiente de dispersión a una medida de dispersión relativa, que permite efectuar comparaciones entre diversos conjuntos de datos que no necesariamente poseen la misma frecuencia total (Número total de datos).

Para un conjunto de datos, se llama coeficiente de variación al cociente de la desviación estándar muestral entre su media aritmética:

$$CV = \frac{s}{\bar{X}} * 100$$

Este coeficiente se expresa en porcentaje al multiplicarse por 100. Se considera que un coeficiente de variación menor a 50 % significa baja dispersión, es decir que la media aritmética es una buena representación de un conjunto de datos. Si es mayor al 50% significa alta dispersión, la media aritmética en tal caso no es una buena representación.

Además de los anteriores parámetros estadísticos se realiza un análisis estadístico del error aplicando el programa Excel para obtener los grados de error y confiabilidad de los resultados.

1.4.3. Alcance de la investigación

La investigación es de tipo experimental con diseño cuasi-experimental, porque los grupos experimentales son asignados o impuestos, para recién proceder al desarrollo metodológico.

En el presente estudio se impone la arcilla estabilizada térmicamente de la ciudad de Tarija, como un experimento dentro de una mezcla asfáltica, en reemplazo a un filler convencional.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. Mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonado. Se producen en centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y compactan. Se usan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros. Sin olvidar que se utilizan en las capas inferiores de los pavimentos para tráfico pesado intenso. Están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (arcilla) (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Estos son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.

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

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

2.1.1. Mezclas asfálticas en caliente

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

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

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

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

2.1.2. Diseño de mezclas asfálticas

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

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

Selección del diseño de una mezcla:

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

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

2.1.3. Métodos de diseño de mezclas asfálticas caliente en laboratorio

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

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

2.1.4. Características y comportamiento de la mezcla

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

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

2.1.4.1. Densidad de la mezcla

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

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

2.1.4.2. Vacíos de aire

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

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

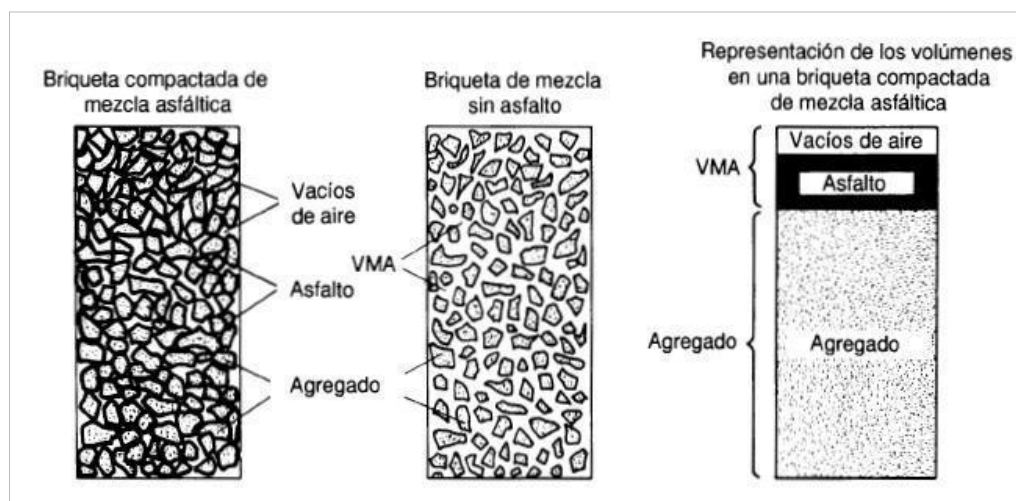
La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre más alta la densidad menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa. Las especificaciones de la obra requieren, usualmente, una densidad que permita acomodar el menor número posible (en la realidad) de vacíos: preferiblemente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

2.1.4.3. Vacíos en el agregado mineral

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

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

Figura 2.1: Ilustración del VMA en una probeta de mezcla compactada (Nota: para simplificar el volumen de asfalto absorbido no es mostrado).



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

Existen valores mínimos para VMA los cuales están recomendados y especificados como función del tamaño del agregado. Estos valores se basan en el hecho de que cuanto más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más durables será

la mezcla. La fig. 2.1. ilustra el concepto de VMA y la fig. 2.2. presenta los valores requeridos.

Figura 2.2: Vacíos en el agregado mineral (requisitos de VMA).

Máximo tamaño de partícula nominal		Porcentaje mínimo VMA		
		Porcentaje diseño vacíos de aire		
mm	in	3.0	4.0	5.0
1.18	No.16	21.5	22.5	23.5
2.36	No.8	19.0	20.0	21.0
4.75	No.6	16.0	17.0	18.0
9.5	3/8.	14.0	15.0	16.0
12.5	1/2.	13.0	14.0	15.0
19	3/4.	12.0	13.0	14.0
25	1.0	11.0	12.0	13.0
37.5	1.5	10.0	11.0	12.0

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

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

2.1.4.4. Contenido de asfalto

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

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

El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende, en gran parte, de las características del agregado tales como la granulometría y la capacidad de absorción. La granulometría

del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo del asfalto. Entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor será el área superficial total, y, mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir, uniformemente, todas las partículas. Por otro lado, las mezclas más gruesas (agregados más grandes) exigen menos asfalto debido a que poseen menos área superficial total.

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

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

El contenido total de asfalto es la cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla. El contenido efectivo de asfalto es el volumen de asfalto no absorbido por el agregado; es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva sobre la superficie de los agregados. El contenido efectivo de asfalto se obtiene al restar la cantidad absorbida de asfalto del contenido total de asfalto.

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

2.1.5. Propiedades consideradas en el diseño de mezclas

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

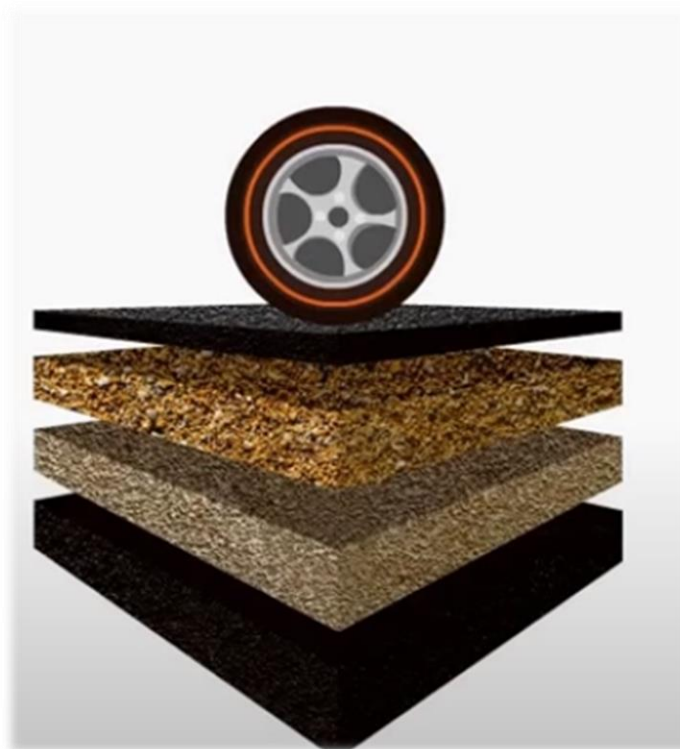
El objetivo primordial del procedimiento de diseño de mezclar es el de garantizar que la mezcla de pavimentación posea cada una de estas propiedades. Por lo tanto, hay que saber qué significa cada una de estas propiedades, cómo es evaluada, y qué representa en términos de rendimiento del pavimento.

2.1.5.1. Estabilidad

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

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

Figura 2.3: Carga que sufre una mezcla asfáltica.



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

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

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

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

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

Tabla 2.1: Causas y efectos de inestabilidad en el pavimento.

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

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Cap.3, pág. 61 del Asphalt Institute MS-22

2.1.5.2. Durabilidad

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

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

películas gruesas de asfalto no se envejecen o endurecen tan rápido como lo hacen las películas delgadas.

En consecuencia, el asfalto retiene por más tiempo sus características originales. Además, el máximo contenido posible de asfalto sella eficazmente un gran porcentaje de vacíos interconectados en el pavimento, haciendo difícil la penetración del aire y del agua. Por supuesto, se debe dejar un cierto porcentaje de vacíos en el pavimento para permitir la expansión del asfalto en los tiempos cálidos.

Figura 2.4: Muestra de poca durabilidad de la mezcla asfáltica.



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

Una graduación densa de agregado firme y duro a la separación, contribuye de tres maneras a la durabilidad del pavimento. Una graduación densa proporciona un contacto más cercano entre las partículas del agregado, lo cual mejora la impermeabilidad de la mezcla. Un agregado firme y duro resiste la desintegración bajo las cargas del tránsito. Un agregado resistente a la separación resiste la acción del agua y el tránsito, las cuales tienden a separar la película de asfalto de las partículas de agregado, conduciendo a la

desintegración del pavimento. La resistencia de una mezcla a la separación puede ser mejorada, bajo ciertas condiciones, mediante el uso de compuestos adhesivos, o rellenos como la cal hidratada. La intrusión del aire y agua en el pavimento puede minimizarse si se diseña y compacta la mezcla para darla al pavimento el máximo de impermeabilidad posible. Existen muchas causas y efectos con una poca durabilidad del pavimento.

Tabla 2.2: Causas y efectos de una poca durabilidad.

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

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Cap.3, pág. 62 del Asphalt Institute MS-22

2.1.5.3. Impermeabilidad

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

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

Figura 2.5: Extracto de mezcla asfáltica permeable.



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

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

Tabla 2.3: Causas y efectos de la permeabilidad.

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

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Cap.3, pág. 63 del Asphalt Institute MS-22

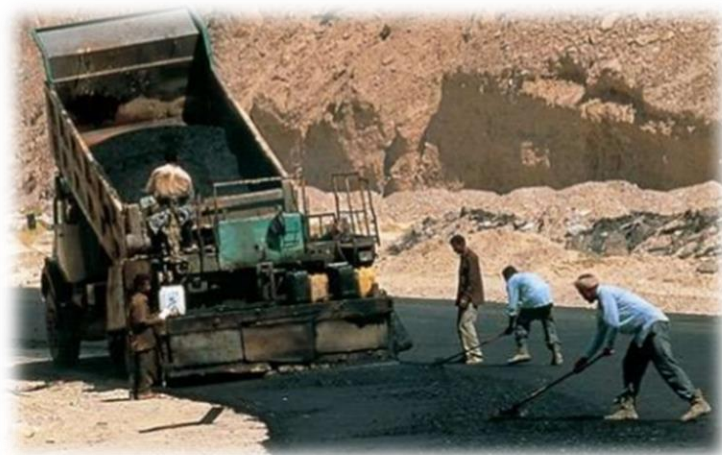
2.1.5.4. Trabajabilidad

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

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

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

Figura 2.6: Trabajabilidad de una mezcla asfáltico.



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

La trabajabilidad es especialmente importante en sitios donde se requiere colocar y rastrillar a mano cantidades considerables de mezcla, como por ejemplo alrededor de tapas

de alcantarillados, curvas pronunciadas y otros obstáculos similares. Es muy importante usar mezclas trabajables en dichos sitios.

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

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

Tabla 2.4: Causas y efectos de problemas en la trabajabilidad.

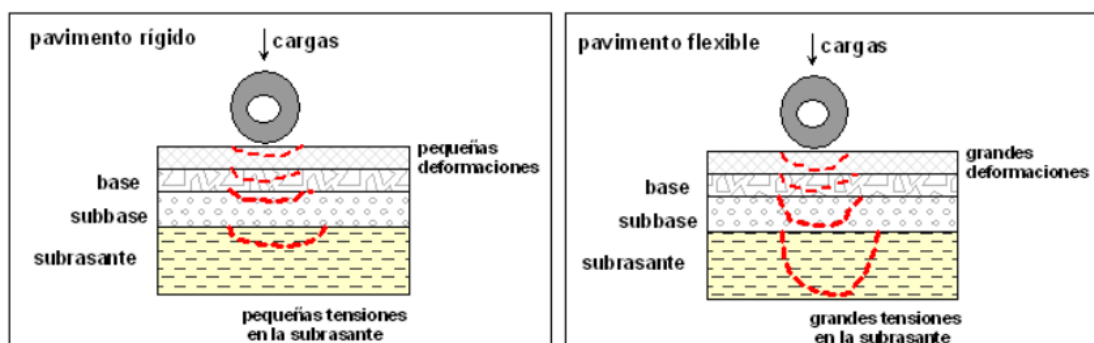
Causas	Efectos
Tamaño máximo de partícula: grande	Superficie áspera, difícil de colocar.
Demasiado agregado grueso	Puede ser difícil de compactar
Temperatura muy baja de mezcla	Agregado sin revestir, mezcla poco durable superficie áspera, difícil de compactar
Demasiada arena de tamaño medio	La mezcla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

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Cap.3, pág. 64 del Asphalt Institute MS-22

2.1.5.5. Flexibilidad

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

Figura 2.7: Efecto de la flexibilidad en la mezcla asfáltica.



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

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

2.1.5.6. Resistencia a la fatiga

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

Figura 2.8: Efecto de la poca resistencia a la fatiga de la mezcla asfáltica.



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

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

Tabla 2.5: Causas y Efectos de una Mala Resistencia a la Fatiga

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

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Cap.3, pág. 65 del Asphalt Institute MS-22

2.1.5.7. Resistencia al deslizamiento

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

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

Tabla 2.6: Causas y Efectos de Poca Resistencia al Deslizamiento

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

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Cap.3, pág. 65 del Asphalt Institute MS-22

2.1.6. Propiedades físicas de los agregados

Los agregados para mezclas asfálticas en caliente son usualmente clasificados por tamaños en agregados gruesos, agregados finos, o filler mineral. ASTM define a los

agregados gruesos como las partículas retenidas en la malla N°4; y filler mineral como el material que pasa la malla N°200 en un porcentaje mínimo de 70%.

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

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

2.1.7. Método de diseño Marshall

El concepto del método Marshall para diseño de mezclas de pavimentación fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del departamento de autopistas del estado de Mississippi. El cuerpo de ingenieros de Estados Unidos, a través de una extensiva investigación y estudios de correlación, mejoró y adicionó ciertos aspectos al procedimiento de prueba Marshall y desarrolló un criterio de diseño de mezclas.

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

Debido a que la prueba de estabilidad es de naturaleza empírica, la importancia de los resultados en términos de estimar el comportamiento en campo se pierde cuando se

realizan modificaciones a los procedimientos estándar. El método Marshall utiliza especímenes de prueba estándar de una altura de 64 mm (2 ½”) y 102 mm (4”) de diámetro. Se preparan mediante un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar mezclas de asfalto-agregado. (ASTM D1559).

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

2.1.8. Propiedades método Marshall

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

2.1.8.1. Fluencia

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

2.1.8.2. Estabilidad

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

La estabilidad depende, sobre todo de la fricción interna y la cohesión. La fricción interna depende de la textura superficial, forma de la partícula, y granulometría del agregado; así como de la densidad de la mezcla, la cantidad y el tipo de asfalto; mientras que la cohesión

depende del contenido de asfalto. La cohesión se incrementa con el incremento del contenido de asfalto hasta un punto óptimo después del cual el aumento en el contenido de asfalto forma una película demasiado gruesa en las partículas de asfalto, lo que produce una pérdida de fricción entre las partículas de agregado.

2.1.8.3. Porcentaje de vacíos de la mezcla

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

2.1.8.4. Porcentaje de vacíos del agregado mineral (V.A.M)

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

2.1.8.5. Densidad

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

2.1.9. Arcillas

La arcilla es una roca sedimentaria descompuesta constituida por agregados de silicatos de aluminio hidratados procedentes de la descomposición de rocas que contienen feldespato, como el granito. Presenta diversas coloraciones según las impurezas que contiene, desde el rojo anaranjado hasta el blanco cuando es pura.

Desde el punto de vista mineralógico, engloba a un grupo de minerales (minerales de la arcilla), filosilicatos en su mayor parte, cuyas propiedades físico-químicas dependen de su estructura y de su tamaño de grano, muy fino (inferior a 2 mm).

Desde el punto de vista petrológico la arcilla es una roca sedimentaria, en la mayor parte de los casos de origen detrítico, con características bien definidas. Para un sedimentólogo, arcilla es un término granulométrico, que abarca los sedimentos con un tamaño de grano inferior a 2 mm.

Por tanto, el término arcilla no solo tiene connotaciones mineralógicas, sino también de tamaño de partícula; en este sentido se consideran arcillas todas las fracciones con un tamaño de grano inferior a 2 mm. Según esto todos los filosilicatos pueden considerarse verdaderas arcillas si se encuentran dentro de dicho rango de tamaños, incluso minerales no pertenecientes al grupo de los filosilicatos (cuarzo, feldespatos, etc.) pueden ser considerados partículas arcillosas cuando están incluidos en un sedimento arcilloso y sus tamaños no superan las 2 mm.

2.1.10. Propiedades físico químicas de las arcillas

Las importantes aplicaciones de este grupo de minerales radican en sus propiedades físico-químicas. Dichas propiedades derivan, principalmente, de:

- Su extremadamente pequeño tamaño de partícula (inferior a 2 mm)
- Su morfología laminar (filosilicatos)
- Las sustituciones isomórficas, que dan lugar a la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar.

Como consecuencia de estos factores, presentan, por una parte, un valor elevado del área superficial y, a la vez, la presencia de una gran cantidad de superficie activa, con enlaces no saturados. Por ello pueden interaccionar con muy diversas sustancias, en especial compuestos polares, por lo que tienen comportamiento plástico en mezclas arcilla-agua con elevada proporción sólido/líquido y son capaces en algunos casos de hinchar, con el desarrollo de propiedades reológicas en suspensiones acuosas.

Por otra parte, la existencia de carga en las láminas se compensa, como ya se ha citado, con la entrada en el espacio interlaminar de cationes débilmente ligados y con estado variable de hidratación, que pueden ser intercambiados fácilmente mediante la puesta en

contacto de la arcilla con una solución saturada en otros cationes; a esta propiedad se la conoce como capacidad de intercambio catiónico y es también la base de multitud de aplicaciones industriales.

2.1.10.1. Superficie específica

La superficie específica o área superficial de una arcilla se define como el área de la superficie externa más el área de la superficie interna (en el caso de que esta exista) de las partículas constituyentes, por unidad de masa, expresada en m^2/g .

Las arcillas poseen una elevada superficie específica, muy importante para ciertos usos industriales en los que la interacción sólido-fluido depende directamente de esta propiedad.

2.1.10.2. Capacidad de intercambio catiónico

Es una propiedad fundamental de las esmectitas. Son capaces de cambiar, fácilmente, los iones fijados en la superficie exterior de sus cristales, en los espacios interlaminares o en otros espacios interiores de las estructuras, por otros existentes en las soluciones acuosas envolventes.

La capacidad de intercambio catiónico (CEC) se puede definir como la suma de todos los cationes de cambio que un mineral puede adsorber a un determinado pH. Es equivalente a la medida del total de cargas negativas del mineral. Estas cargas negativas pueden ser generadas de tres formas diferentes:

- Sustituciones isomórficas dentro de la estructura.
- Enlaces insaturados en los bordes y superficies externas.
- Disociación de los grupos hidroxilos accesibles.

2.1.10.3. Capacidad de absorción

Algunas arcillas encuentran su principal campo de aplicación en el sector de los absorbentes ya que pueden absorber agua u otras moléculas en el espacio interlaminar (esmeclitas) o en los canales estructurales (sepiolita y paligorskita).

La capacidad de absorción está directamente relacionada con las características texturales (superficie específica y porosidad) y se puede hablar de dos tipos de procesos que difícilmente se dan de forma aislada: absorción (cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad) y adsorción (cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente, en este caso la arcilla, y el líquido o gas adsorbido, denominado adsorbato).

La capacidad de adsorción se expresa en porcentaje de adsorbato con respecto a la masa y depende, para una misma arcilla, de la sustancia de que se trate. La absorción de agua de arcillas absorbentes es mayor del 100% con respecto al peso.

2.1.10.4. Hidratación e hinchamiento

La hidratación y deshidratación del espacio interlaminar son propiedades características de las esmeclitas, y cuya importancia es crucial en los diferentes usos industriales. Aunque hidratación y deshidratación ocurren con independencia del tipo de catión de cambio presente, el grado de hidratación sí está ligado a la naturaleza del catión interlaminar y a la carga de la lámina.

La absorción de agua en el espacio interlaminar tiene como consecuencia la separación de las láminas dando lugar al hinchamiento. Este proceso depende del balance entre la atracción electrostática catión-lámina y la energía de hidratación del catión. A medida que se intercalan capas de agua y la separación entre las láminas aumenta, las fuerzas que predominan son de repulsión electrostática entre láminas, lo que contribuye a que el proceso de hinchamiento pueda llegar a disociar completamente unas láminas de otras.

2.1.10.5. Plasticidad

Las arcillas son eminentemente plásticas. Esta propiedad se debe a que el agua forma una envuelta sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas.

La elevada plasticidad de las arcillas es consecuencia, nuevamente, de su morfología laminar, tamaño de partícula extremadamente pequeño (elevada área superficial) y alta capacidad de hinchamiento.

Generalmente, esta plasticidad puede ser cuantificada mediante la determinación de los índices de Atterberg (límite líquido, límite plástico y límite de retracción). Estos límites marcan una separación arbitraria entre los cuatro estados o modos de comportamiento de un suelo sólido, semisólido, plástico y semilíquido.

La relación existente entre el límite líquido y el índice de plasticidad ofrece una gran información sobre la composición granulométrica, comportamiento, naturaleza y calidad de la arcilla. Existe una gran variación entre los límites de Atterberg de diferentes minerales de la arcilla, e incluso para un mismo mineral arcilloso, en función del catión de cambio. En gran parte, esta variación se debe a la diferencia en el tamaño de partícula y al grado de perfección del cristal. En general, cuanto más pequeñas son las partículas y más imperfecta su estructura, más plástico es el material.

2.1.10.6. Tixotropía

La tixotropía se define como el fenómeno consistente en la pérdida de resistencia de un coloide, al amarlo, y su posterior recuperación con el tiempo. Las arcillas tixotrópicas cuando son amasadas se convierten en un verdadero líquido. Si, a continuación, se las deja en reposo recuperan la cohesión, así como el comportamiento sólido. Para que una arcilla tixotrópica muestre este especial comportamiento deberá poseer un contenido en agua próximo a su límite líquido. Por el contrario, en torno a su límite plástico no existe posibilidad de comportamiento tixotrópico.

2.1.11. Filler mineral

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

El “filler” empleado en mezclas asfálticas es un material finamente molido o pulverizado, cuyo tamaño de partículas pasa por el tamiz número 200 (0.075 mm). El término “filler” proviene del inglés y significa “rellenador o llenante”, debido a que inicialmente se consideraba a este material únicamente como un material de relleno de vacíos. Este concepto ha evolucionado y actualmente se considera al filler no simplemente como un material inerte relleno sino como un material que al mezclarse íntimamente con el asfalto desempeña cierta actividad que modifica algunas de las propiedades del sistema.

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

2.1.12. Elección del filler adecuado

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

- Fillers de asbestos no son adecuados para aplicaciones en las cuales, la mezcla es utilizada como sellante o un protector en continuo contacto con un líquido, debido a que las fibras de asbestos pueden transportar el líquido a través del asfalto.
- Fillers que pueden absorber agua no deben ser utilizados cuando el asfalto está en contacto con el agua.

- Si el asfalto va a ser utilizado como un proyectivo resistente a los ácidos, los fillers deben ser sílices.
- El uso de cal como filler mejora la adhesión del asfalto a las superficies minerales (piedra, vidrio, etc.) en presencia de agua.

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

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

2.1.13.1. Mejorar el cerrado de la mezcla sin el empleo exagerado de asfalto

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

2.1.13.2. Incrementar la resistencia a la deformación de la mezcla asfáltica

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

2.1.13.3. Incrementar la durabilidad de la mezcla

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

CAPÍTULO III

CARACTERIZACIÓN Y DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

CAPÍTULO III

CARACTERIZACIÓN Y DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

3.1 Componentes

3.1.1 Unidad de estudio

- Mezclas asfálticas.

3.1.2 Población

- Mezclas asfálticas con diferentes tipos de filler.

3.1.3 Muestra

- Mezcla asfáltica con filler arcilla estabilizada térmicamente.

3.1.4 Técnicas de muestreo

Este tipo de muestreo es por el método de conveniencia, no aleatorio, no probabilístico porque se realiza el presente estudio con tres muestras de arcilla de diferentes bancos de la ciudad de Tarija, porque son muy pocos los estratos de arcilla que se encuentran en esta zona.

Sin embargo, los resultados de estos tres bancos serán evaluados según valores estándar que proporcione el banco de agregados con filler convencional.

3.2 Criterios adoptados en la investigación

Criterios adoptados en la presente investigación son:

3.2.1 Criterios para determinar los porcentajes de filler

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

Por lo tanto, a partir de estos porcentajes y bajo criterio propio, se determina estudiar los porcentajes de filler cada 2%, es decir al 2%, 4%, 6% y 8%, siendo un total de 4 variaciones de porcentajes.

Estos porcentajes de filler son estudiados para cada banco de arcilla estabilizada térmicamente.

3.2.2 Criterios para determinar los tiempos de estabilización térmica

Según antecedentes de estabilización térmica de suelos en Latino América, recomiendan estabilizaciones térmicas en un tiempo de 2 hr, y a 500 °C. de temperatura. Por lo tanto, bajo esa referencia, y considerando que en nuestro medio contamos con tipos de suelos más específicos como ser las arcillas, se optó por estudiar el tiempo de estabilización a 1 hr antes y 1 hr después del tiempo recomendado, para poder ver el comportamiento de estabilización térmica. Es decir, los tiempos de estabilización a estudiar para los diferentes bancos arcillas serán 1hr, 2hr y 3 hr.

3.3 Selección de materiales

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

3.3.1 Criterios para determinar el número de bancos

Para poder conocer la variación de estabilidad térmica de las arcillas, se aplicó el método de conveniencia, que permite estudiar muestras a propósito de tres bancos de arcillas de diferentes barrios de la ciudad de Tarija, barrio La Cañada, barrio Juan Nicolai y barrio Monte Cristo, porque son los únicos tres lugares donde se tenía como antecedente la presencia de arcillas.

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

3.3.2 Criterios de selección de agregados pétreos

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

3.3.3 Criterios de selección de cemento asfáltico

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

3.3.4 Criterios de selección de filler

Dentro de la selección del filler, en la presente investigación se utilizó las arcillas de diferentes zonas de Tarija como ser del Barrio La Cañada (banco 1), Barrio Juan Nicolai (banco 2) y Barrio Monte Cristo (banco 3). La selección del filler natural (banco natural), fue obtenido de la planta chancadora del servicio departamental de caminos (SEDECA). Para luego realizar el reemplazo del filler natural con cada muestra de nuestros diferentes bancos de arcillas y poder determinar de qué manera influye o afecta a cada una de las mezclas asfálticas.

3.4 Criterios para determinar del número de ensayos

Para la presente investigación, se desglosan los diferentes ensayos y el número de los mismos a ejecutarse.

3.4.1 Criterio del número de ensayos para la caracterización de los agregados

- Granulometría. - Se realizan 3 ensayos para los agregados arena, grava 3/4" y gravilla 1/2".
- Abrasión del agregado grueso máquina de los Ángeles. - Se realiza 1 ensayo de los agregados de grava 3/4" y gravilla 1/2".
- Peso específico y absorción del agregado grueso. - Se realizan 3 ensayos de peso específico y absorción del agregado grueso de los agregados de grava 3/4" y gravilla 1/2" y se sacará su promedio.
- Peso específico del agregado fino. - Se realizan 3 ensayos del agregado fino y se sacará su promedio.
- Peso unitario. - Se realizan 3 ensayos por cada agregado arena, grava 3/4" y gravilla 1/2".
- Equivalente de la arena. - Se realizan 3 ensayos de equivalente de la arena, de los cuales se saca un promedio.
- Porcentaje de caras fracturadas. - Se realiza 1 ensayo para el agregado de grava 3/4" y gravilla 1/2".
- Determinación de partículas largas y achatadas. - Se realiza 1 ensayo para el agregado de grava 3/4" y gravilla 1/2".

Tabla 3.1: Número de ensayos de los agregados pétreos.

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

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2 Criterio del número de ensayos para el cemento asfáltico

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

Tabla 3.2: Número de ensayos del cemento asfáltico.

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

Fuente: Elaboración propia.

3.4.3 Criterio del número de ensayos para la caracterización del filler

- Granulometría. - Se realiza 1 ensayo para cada banco de filler, (banco1, banco2 y banco3) que en total se realizan 3 ensayos.
- Límites de Atterberg. - Para límite líquido se realiza 1 ensayo para cada banco de filler, (banco1, banco2 y banco3) que en total se realizan 3 ensayos.
Para límite plástico se realizan 3 ensayos para cada banco de filler, del cual se obtendrá su promedio. (banco1, banco2 y banco3) que en total se realizaran 9 ensayos.
- Contenido de humedad. - Se realizan 3 ensayos de contenido de humedad, de los cuales se saca un promedio, para cada banco de filler, (banco1, banco2 y banco3) y que en total se realizaron 9 ensayos.

- **Hidrómetro.** - Se realizan 3 ensayos para cada banco de filler y se saca su promedio de cada banco (banco1, banco2 y banco3) y se procederá a sacar un promedio para cada banco, realizando un total de 9 ensayos.

3.4.4 Criterios del número de briquetas

El criterio para determinar el número de briquetas, se basa en un esquema de ensayos para cada banco, según el porcentaje de filler y el tiempo de estabilización térmica.

Se inicia determinando el contenido óptimo de cemento asfáltico para cada porcentaje de filler, con previa dosificación, a partir del banco convencional, como referente para los demás bancos de arcilla, como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 3.3. Número de briquetas para el contenido óptimo de cemento asfáltico.

Banco	Porcentajes de filler según norma	Nº de briquetas para determinar el óptimo de C.A.	Nº de briquetas con el óptimo de C.A.	Total
Banco convencional	2%	18	3	21
	4%	18	3	21
	6%	18	3	21
	8%	18	3	21
Total briquetas =		72	12	84

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se realizan las pruebas de estabilización térmica de las arcillas a 1 hr, 2 hr y 3 hr; con dichas muestras ya estabilizadas se realizan las briquetas haciendo variar las muestras de arcillas estabilizadas térmicamente a diferentes horas, para cada porcentaje de filler, para cada banco en estudio, con su contenido óptimo del cemento asfáltico, como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 3.4. Número de briquetas para determinar el tiempo óptimo de estabilización térmica y porcentaje óptimo de filler para cada banco.

Porcentaje de filler	Tiempo de estabilización	B1	B2	B3	Total
2%	1hr	3	3	3	27
	2hr	3	3	3	
	3hr	3	3	3	
	Subtotal	9	9	9	
4%	1hr	3	3	3	27
	2hr	3	3	3	
	3hr	3	3	3	
	Subtotal	9	9	9	
6%	1hr	3	3	3	27
	2hr	3	3	3	
	3hr	3	3	3	
	Subtotal	9	9	9	
8%	1hr	3	3	3	27
	2hr	3	3	3	
	3hr	3	3	3	
	Subtotal	9	9	9	
Total briquetas =		36	36	36	108

Fuente: Elaboración propia.

Con los resultados de estas briquetas se determinan el tiempo óptimo de estabilización térmica y porcentaje óptimo de filler para cada banco de arcilla.

Posteriormente para realizar el tratamiento estadístico, se elige un banco de arcilla estabilizada, y según su tiempo de estabilización, su porcentaje óptimo de filler y su contenido óptimo de cemento asfáltico, se realizan 30 briquetas para una mejor representación de datos y resultados.

Por lo tanto, el número total de muestras realizadas en el presente estudio es:

Tabla 3.5. Total, número de briquetas realizadas en el presente estudio.

Etapas del estudio	Nº de briquetas
Determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico.	84
Determinación del tiempo óptimo de estabilización térmica y porcentaje óptimo de filler.	108
Tratamiento estadístico.	30
Total briquetas =	222

Fuente: Elaboración propia.

De la anterior tabla se observa que el número total de muestras a realizar es igual a 222 briquetas.

3.5 Estabilización térmica de los bancos de arcilla

3.5.1 Aplicabilidad del reemplazo del filler dentro de la elaboración de mezclas asfálticas

Filler se refiere a todo material que pasa el tamiz N°200, lo cual fácilmente puede ser cambiado por cualquier arcilla estabilizada térmicamente, y su aplicación dentro de la elaboración de mezclas supondría un nuevo uso de un material además de una alternativa técnica al verificar su comportamiento dentro de las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica, a partir de los resultados del efecto que produciría el nuevo filler dentro de las propiedades mecánicas.

Por tal motivo en la presente investigación se realiza una evaluación para determinar el valor de las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas al reemplazar el filler natural por el filler de arcilla estabilizada térmicamente.

3.5.2 Otros usos del material

El material al ser arcilla puede llegar a tener diferentes tipos de usos como en la elaboración de adobes, ya sea de uso artesanal, elaboración de macetas, ollas, en el uso cerámico en la fabricación de ladrillos, en el uso de cosmética natural, uso de productos farmacéuticos, uso de la elaboración de fibra de vidrio, uso en la elaboración de papel.

3.5.3 Proceso de obtención del filler

Para efectos de esta investigación, se decide incorporar la arcilla como remplazo del filler natural, con la intención de poder obtener una nueva alternativa para el uso como filler en las mezclas asfálticas.

El material es triturado y tamizado para obtener la fracción pasante de la malla N°200, con lo cual se obtiene el filler de arcilla. En conclusión, el proceso de la estabilización térmica de la arcilla consiste en que el filler tiene que estar expuesto durante 1 hora, 2 horas y 3 horas a una temperatura de 500°C, hasta conseguir el filler estabilizado térmicamente. Posteriormente el filler estabilizado térmicamente es incorporado en la mezcla asfáltica.

Figura 3.1: Proceso de la obtención del nuevo filler.



Fuente: Elaboración propia.

3.6 Levantamiento de información

3.6.1 Ubicación de la fuente de los materiales a utilizarse

3.6.1.1 Agregado pétreo

Los materiales pétreos de la investigación son provenientes de la planta chancadora del Servicio Departamental de Caminos (SEDECA). Se verificará si los agregados son de buena calidad mediante los ensayos de caracterización.

Se toma en cuenta como agregado pétreo a los materiales:

- Grava 3/4”.
- Gravilla 1/2”
- Arena triturada.
- Filler natural.

Figura 3.2: Ubicación de la obtención del agregado grueso.

Fuente: Elaboración propia.

Coordenadas:

Tabla 3.6: Coordenadas de la ubicación del agregado pétreo.

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

Fuente: Elaboración propia.

3.6.1.2 Cemento asfáltico

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

Figura 3.3: Ubicación de la obtención del cemento asfáltico.

Fuente: Elaboración propia.

Coordenadas:**Tabla 3.7:** Coordenadas de la ubicación del cemento asfáltico.

Coordenadas	
Geográficas	Latitud: 21°46'56.10" S Longitud: 64°46'12.95" O
U.T.M	Este: 316973.00 Norte: 7590225.00
Altitud	1833msnm.

Fuente: Elaboración propia.

3.6.1.3 Ubicación geo referencial de los bancos de arcilla

Para obtener las arcillas se hizo una inspección visual y de tacto con personal experto en clasificación de suelos del Laboratorio de Suelos de la U.A.J.M.S., en los siguientes barrios:

Banco 1	Barrio La Cañada
Banco 2	Barrio Juan Nicolai
Banco 3	Barrio Monte Cristo

Las muestras de arcilla de cada banco fueron extraídas de las siguientes ubicaciones que están debidamente geo referenciadas:

Ubicación banco 1:**Figura 3.4.** Ubicación del banco 1, barrio La Cañada

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.8. Coordenadas de la ubicación del banco 1, barrio La Cañada.

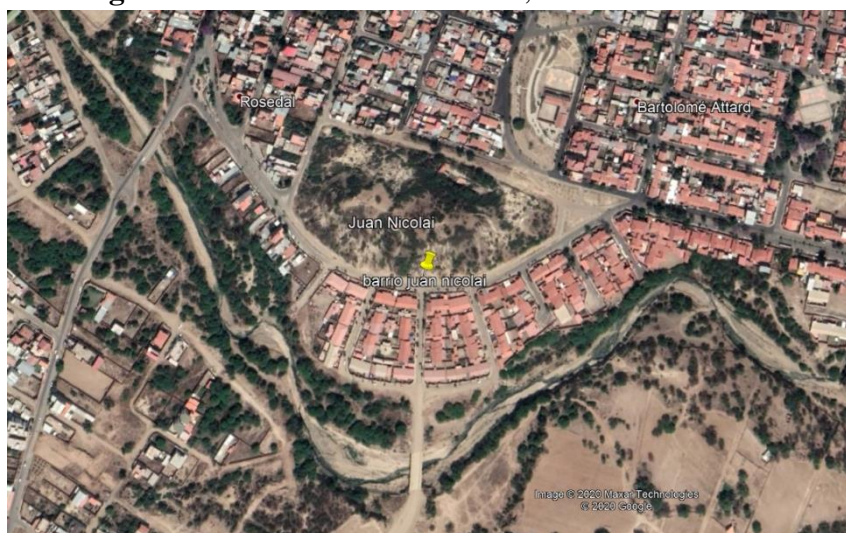
Coordenadas	
Geográficas	Latitud: 21°29'44.53"S Longitud: 64°44'0.80"O
U.T.M	Este: 320415.01 Norte: 7621994.25
Altitud	1916 msnm.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.5. Extracción de muestra del banco 1, barrio La Cañada.

Fuente: Elaboración propia.

Ubicación banco 2:

Figura 3.6. Ubicación del banco 2, barrio Juan Nicolai

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.9: Coordenadas de la ubicación del banco 2, barrio Juan Nicolai.

Coordenadas	
Geográficas	Latitud: 21°32'9.75"S Longitud: 64°42'16.87"O
U.T.M	Este: 323455.01 Norte: 7617560.98
Altitud	1891 msnm.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.7. Extracción de muestra del banco 2, barrio Juan Nicolai.

Fuente: Elaboración propia.

Ubicación banco 3:

Figura 3.8. Ubicación del banco 3, barrio Monte Cristo

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.10. Coordenadas de la ubicación del barrio Monte Cristo.

Coordenadas	
Geográficas	Latitud: 21°31'30.98"S Longitud: 64°42'8.28"O
U.T.M	Este: 323689.35 Norte: 7618756.12
Altitud	1900 msnm.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.9. Extracción de muestra del banco 3, barrio Monte Cristo.

Fuente: Elaboración propia.

3.6.2 Caracterización de los agregados.

3.6.2.1 Ensayo de granulometría (ASTM C-136)

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

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

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

Figura 3.10: Proceso del tamizado.

Fuente: Elaboración propia.

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

Tabla 3.11: Datos de las granulometrías de la grava 3/4".

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

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.12: Datos de las granulometrías de la gravilla 1/2”.

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

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.13: Datos de las granulometrías de la arena.

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

Fuente: Elaboración propia.

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

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

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

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

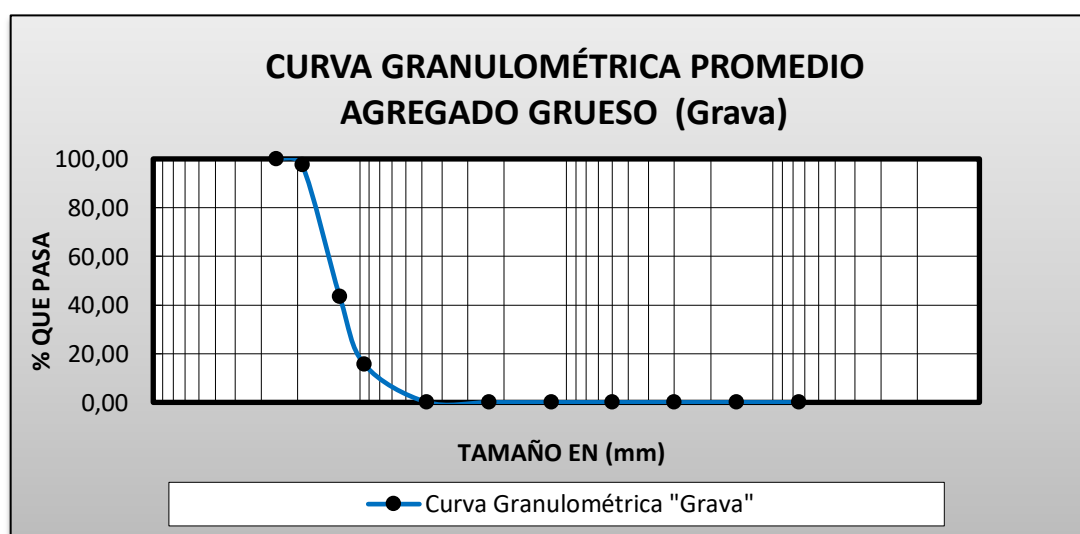
Tabla 3.14: Planilla de resultados de las granulometrías promedio.

Granulometría - agregado grueso (grava 3/4").

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

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.1: Curva granulométrica - grava.

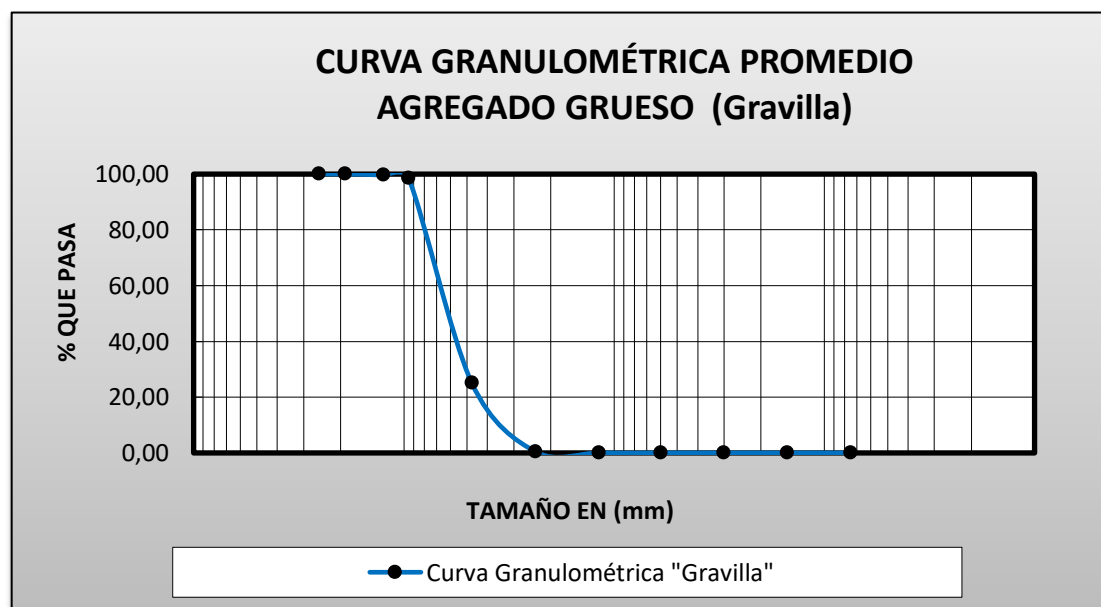


Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.15: Planilla de resultados de las granulometrías promedio.**Granulometría - agregado grueso (gravilla 1/2").**

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

Fuente: Elaboración propia.

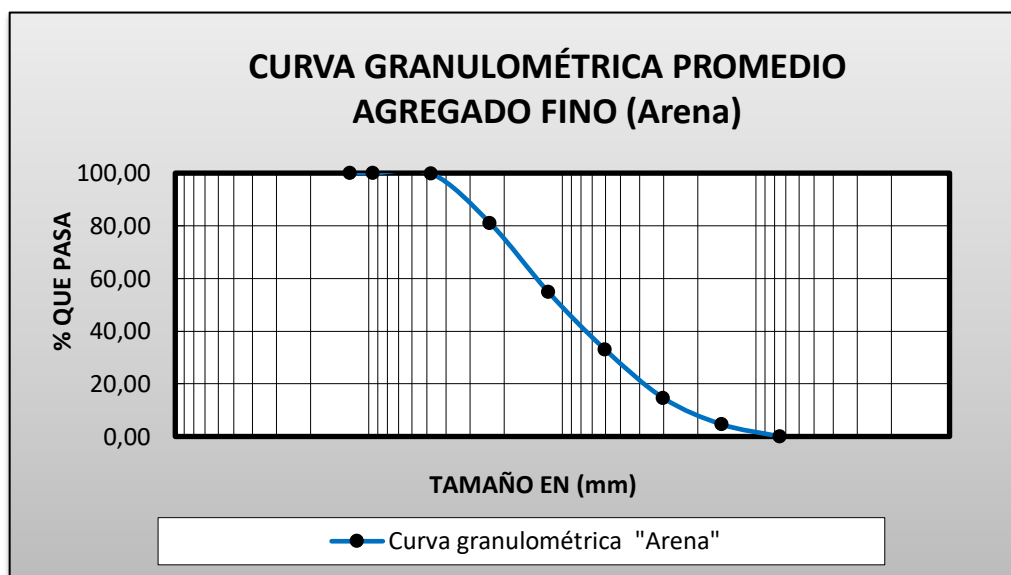
Gráfico 3.2: Curva granulométrica - gravilla.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.16: Planilla de resultados de las granulometrías promedio.**Granulometría - agregado fino (arena).**

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

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.3: Curva granulométrica- agregado fino.

Fuente: Elaboración propia.

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

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

Procedimiento del ensayo:

Para realizar el ensayo se deberá realizar:

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

Para este ensayo se realizó la medición del peso específico tanto para la grava 3/4” como para la gravilla 1/2”.

Figura 3.11: Agregado utilizado para el ensayo.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.12: Obtención del peso sumergido en agua.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.17: Datos del ensayo de peso específico para agregado grueso (grava).

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

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo para la grava 3/4"

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\% \text{ de absorción} = 1,07\%$$

Tabla 3.18: Resultados del ensayo de peso específico para grava.

Muestra N°	Peso específico a granel (gr/cm3)	Peso específico saturado con sup. seca (gr/cm3)	Peso específico aparente (gr/cm3)	% de absorción
1	2,63	2,66	2,71	1,07
2	2,63	2,66	2,70	1,08
3	2,63	2,66	2,70	1,05
Promedio	2,63	2,66	2,71	1,06

Fuente: Elaboración propia.

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

Tabla 3.19: Datos del ensayo de peso específico para agregado grueso (gravilla).

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

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.20: Resultados del ensayo de peso específico para gravilla 1/2”.

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

Fuente: Elaboración propia.

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

Mediante este ensayo podemos determinar el peso específico aparente, lo mismo que la cantidad de agua que se absorbe en el agregado fino cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas, este valor expresado en porcentaje en peso. Se define como peso específico aparente a la relación entre el peso al aire del sólido y el peso del agua correspondiente a su volumen aparente.

Figura 3.13: Secado superficial del material.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.14: Preparación del matraz para el pesado de la muestra

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.21: Datos del ensayo de peso específico para arena.

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

Fuente: Elaboración propia.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\% \text{ de Absorción} = 3,93 \%$$

Tabla 3.22: Resultados del ensayo de peso específico para agregado fino.

Ensayos	1	2	3	Promedio
Peso específico seco (gr/cm3)	2,53	2,43	2,44	2,47
Peso específico S.S.S (gr/cm3)	2,63	2,53	2,53	2,53
Peso específico aparente (gr/cm3)	2,81	2,69	2,68	2,73
% de absorción	3,93	3,93	3,73	3,86

Fuente: Elaboración propia.

3.6.2.4 Equivalente de arena (ASTM D 2419)

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

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

Figura 3.15: Equivalente de Arena y agitación del cilindro graduado con la muestra.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.16: Lectura de la altura de arena que contiene



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.23: Datos del ensayo equivalente de arena.

Descripción	Ensayo		
	1	2	3
Lectura nivel superior (H_1)	11,70	11,80	11,70
Lectura nivel inferior (H_2)	9,30	9,60	9,50

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo del equivalente de arena:

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

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

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

Tabla 3.24: Resultados del ensayo equivalente de arena.

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

Fuente: Elaboración propia.

3.6.2.5 Ensayo de peso unitario agregados (ASTM C-29)

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

Procedimiento del ensayo:

Se deberá realizar de la siguiente manera:

- Para medir el peso unitario con áridos sueltos, se llena el recipiente por un procedimiento normalizado y se determina el peso de los áridos contenidos en el recipiente lleno.
- Para medir el peso compactado, se llena el recipiente en tres capas aproximadamente iguales, aplicando a cada capa determinados procedimientos de agitación o apisonado según el tamaño de los áridos empleados en el ensayo.

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

Figura 3.17: Peso unitario compactado del agregado 3/4”.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.25: Datos del ensayo de peso unitario de la grava 3/4”.

Peso unitario suelto

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

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.26: Datos del ensayo de peso unitario de la grava 3/4”.

Peso unitario compactado

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

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo de peso unitario

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

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

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

Tabla 3.27: Resultados del ensayo de peso unitario de la grava ¾”.

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

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.28: Datos del peso unitario de la gravilla 3/8”.

Peso unitario suelto

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

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.29: Datos del peso unitario de la gravilla 3/8”.

Peso unitario compactado

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

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.30: Resultados del ensayo de la gravilla 3/8”.

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

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.31: Datos del peso unitario suelto de la arena.

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

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.32: Datos del peso unitario compactado de la arena.

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

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.33: Resultados del ensayo de la arena.

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

Fuente: Elaboración propia.

3.6.2.6 Ensayo de desgaste mediante la máquina de los Ángeles (ASTM C-131)

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

durante la vida de servicio del pavimento.

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

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

Figura 3.18: Máquina de desgaste por abrasión y material ensayado.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.34: Datos del ensayo de desgaste para la grava 3/4”.

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

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.19: Agregado grueso - grava.

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo para encontrar el % del desgaste:

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

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

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

Tabla 3.35: Datos del ensayo de desgaste para la gravilla 1/2".

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

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.20: Agregado grueso – gravilla y las 8 esferas.



Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo para encontrar el % del desgaste:

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

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

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

3.6.2.7 Ensayo de porcentaje de caras fracturadas (ASTM D-5821)

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

Figura 3.21: Partículas de caras fracturadas.



Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 3.36: Datos del ensayo de caras fracturadas.

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

Fuente: Elaboración Propia.

Proceso de cálculo:

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

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

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

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

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

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

Tabla 3.37: Resultados del ensayo de caras fracturadas.

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

Fuente: Elaboración Propia.

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

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

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

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

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

Procedimiento:

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

Figura 3.22: Partículas largas y achatadas.



Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 3.38: Datos del ensayo partículas chatas y alargadas.

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

Fuente: Elaboración Propia.

Proceso de cálculo del ensayo de partículas chatas y alargadas.

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

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

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

Tabla 3.39: Resultados del ensayo partículas chatas y alargadas.

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

Fuente: Elaboración Propia.

3.6.3 Caracterización del cemento asfáltico

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

3.6.3.1 Ensayo de penetración (ASTM D-5)

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

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

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

Figura 3.23: Realización del ensayo de penetración del cemento asfáltico.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.40: Datos del ensayo penetración del cemento asfáltico 85-100.

Ensayo		Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C, 100gr. 5seg. (0,1mm) AASHTO T-49	Lectura N°1	0,1 mm	107	105	110		
	Lectura N°2	0,1 mm	100	95	94		
	Lectura N°3	0,1 mm	89	96	94		
	Promedio	0,1 mm	99	99	99		
Resultado		0,1 mm	99			85	100

Fuente: Elaboración propia.

3.6.3.2 Ensayo punto de inflamación (ASTM D-92)

El objetivo de esta práctica es determinar el punto de ignición mínimo del asfalto (el cual representa las temperaturas críticas), por medio de la copa abierta de Cleveland.

Cuando se calienta un asfalto, libera vapores que son combustibles. El punto de inflamación, es la temperatura a la cual puede ser calentado con seguridad un asfalto, sin que se produzca la inflamación instantánea de los vapores liberados, en presencia de una llama libre.

El ensayo más usado para medir el punto de inflamación del cemento asfáltico es el de

"Vaso Abierto Cleveland" (COC), que consiste en llenar un vaso de bronce con un determinado volumen de asfalto, y calentarlo con un aumento de temperatura normalizado. Se pasa una pequeña llama sobre la superficie del asfalto a intervalos de tiempo estipulados.

El punto de inflamación es la temperatura a la cual se han desprendido suficientes volátiles como para provocar una inflamación instantánea.

Figura 3.24: Realización del ensayo punto de inflamación del cemento asfáltico.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.41: Datos del ensayo punto de inflamación.

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Min.	Max.
Punto de inflamación AASHTO T-48	°C	270,0	280,0	278,0	276	>232	-

Fuente: Elaboración propia.

3.6.3.3 Ensayo peso específico del asfalto (ASTM D-70)

Aunque normalmente no se especifica, es deseable conocer el peso específico del betún asfáltico que se emplea. Este conocimiento es útil para hacer las correcciones de volumen cuando éste se mide a temperaturas elevadas. Se emplea como uno de los factores para la determinación de los huecos en las mezclas asfálticas para pavimentación compactada.

El peso específico es la relación del peso de un volumen determinado del material al peso de igual volumen de agua, estando ambos materiales a temperaturas especificadas. Así, un peso específico de 1,05 significa que el material pesa 1,05 veces lo que el agua a la temperatura fijada. El peso específico del betún asfáltico se determina normalmente por el método del picnómetro, descrito en los métodos AASHTO T-43 y ASTM D-70.

Figura 3.25: Realización del ensayo peso específico del cemento asfáltico.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.42: Datos del ensayo peso específico.

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Peso picnómetro (a)	gr	33,9	33,8	36,7
Peso picnómetro + agua (25°C) (b)	gr	84,4	84,6	84,6
Peso picnómetro + muestra (c)	gr	57,0	57,0	53,8
Peso picnómetro + agua + muestra (d)	gr	84,0	85,8	85,0

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo:

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

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

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

Tabla 3.43: Resultados del ensayo peso específico.

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Especificaciones	
					Min.	Max.
Peso específico de cemento asfáltico	gr/cm ³	0,980	1,051	1,021		
Promedio	gr/cm³	1,018			1	1,05

Fuente: Elaboración propia.

3.6.3.4 Ensayo punto de ablandamiento (ASTM D-36)

Los asfaltos de diferentes tipos se ablandan a temperaturas diferentes. El punto de ablandamiento se determina usualmente por el método de ensayo arbitrario de anillo y bola. Aunque este ensayo no se incluye en las especificaciones para los asfaltos de pavimentación, se emplea frecuentemente para caracterizar los materiales más duros empleados en otras aplicaciones e indica la temperatura a la que estos asfaltos se hacen fluidos.

Consiste en llenar de asfalto fundido un anillo de latón de dimensiones normalizadas. La muestra así preparada se suspende en un baño de agua y sobre el centro de la muestra se sitúa una bola de acero de dimensiones y peso especificados. A continuación, se calienta el baño a una velocidad determinada y se anota la temperatura en el momento en que la bola de acero toca el fondo del vaso de cristal. Esta temperatura se llama punto de ablandamiento del asfalto.

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

Figura 3.26: Ensayo punto de ablandamiento.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.44: Datos y resultado del ensayo de punto de ablandamiento.

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Especificaciones	
					Min.	Max.
Punto de ablandamiento	°C	47,0	48,0	48,5	Min.	Max.
Promedio	°C	47,8			41	53

Fuente: Elaboración propia.

3.6.3.5 Ensayo ductilidad (ASTM D-113)

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

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

Figura 3.27: Realización del ensayo de ductilidad del cemento asfáltico.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.45: Datos y resultados del ensayo de ductilidad.

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Especificaciones	
					Min.	Max.
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51	cm	107	106	105		
Promedio	cm	106			100	-

Fuente: Elaboración propia.

3.6.4 Caracterización del filler

3.6.4.1 Ensayo de determinación de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad (ASTM D-4318)

La plasticidad de un suelo es muy importante al momento de ser utilizado este para diversos fines en pavimentos. Para calcular el índice de plasticidad es necesario determinar el límite líquido del suelo que es el contenido de humedad expresado en porcentaje del suelo secado al horno, cuando este se halla en el límite entre el estado líquido y el estado plástico. El ensayo se realiza utilizando una porción de material húmedo disperso en el aparato llamado casa grande y sometida a una serie de golpes hasta obtener la unión del material. Los cálculos se realizan con los determinados pesos de la muestra en estado húmedo, seco y por consiguiente hallar el índice de plasticidad.

El límite plástico de un suelo es el contenido mínimo de agua en el cual el material

permanece en estado plástico. Es indispensable establecer este límite para determinar el índice de plasticidad que es el tamaño del intervalo de contenido agua, expresado con un porcentaje de la masa seca de suelo, dentro del cual el suelo está en un estado plástico. El índice de plasticidad sirve para determinar qué tipo de suelo está en un estado plástico. El índice de plasticidad sirve para determinar qué tipo de suelo se está ensayando y que tan compresibles es. Según la norma ASTM-242 donde especifica los requerimientos necesarios para que un suelo pueda ser utilizado como llenante mineral aclara que el índice de plasticidad no puede estar superior a 4 teniendo algunas excepciones como la cal hidratada y el cemento hidráulico. El ensayo es sencillo y se utiliza una pequeña porción de muestra, formando rollitos de masa hasta quebrantarse, pesando la muestra en estado húmedo y seco y calculando el límite y el índice con las fórmulas indicadas por la norma.

Figura 3.28: Aparato de casa grande



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 3.29: Colocado y retiro de la muestra en el aparato de casa grande



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.30: Obtención de la plasticidad de la muestra

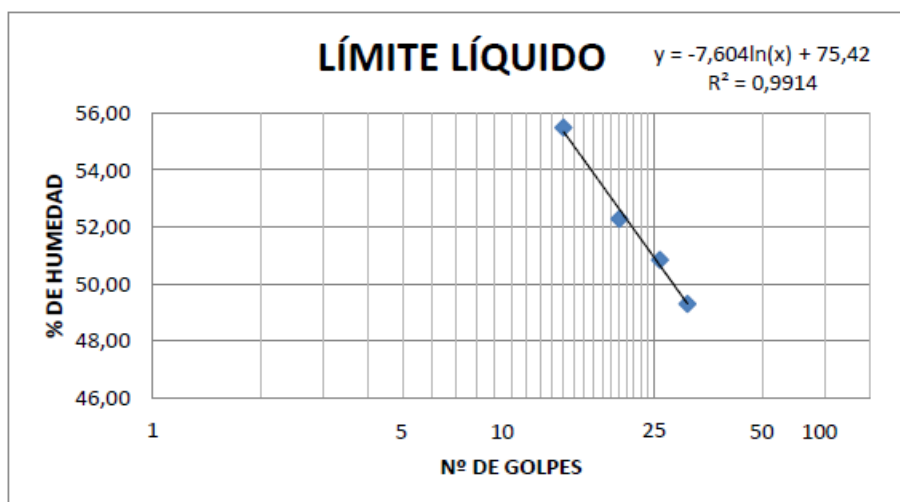
Fuente: Elaboración propia.

Banco 1 B. La Cañada

Tabla 3.46: Planilla de datos y resultados para la granulometría.

Determinación del límite líquido				
Cápsula N°	1	2	3	4
N° de golpes	14	20	26	31
Suelo Húmedo + Cápsula	46,33	41,03	40,94	44,67
Suelo Seco + Cápsula	36,24	33,06	33,10	35,72
Peso del agua	10,09	7,97	7,84	8,95
Peso de la Cápsula	18,06	17,82	17,68	17,57
Peso Suelo seco	18,18	15,24	15,42	18,15
Porcentaje de Humedad	55,50	52,30	50,84	49,31

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.4: Para sacar el límite líquido a 25 golpes

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.47: Datos para la determinación del ensayo límite plástico.

Determinación de límite plástico			
Cápsula	1	2	3
Peso de suelo húmedo + Cápsula	20,10	20,80	20,11
Peso de suelo seco + Cápsula	19,40	20,12	19,40
Peso de cápsula	16,80	17,59	16,73
Peso de suelo seco	2,60	2,53	2,67
Peso del agua	0,70	0,68	0,71
Contenido de humedad	26,92	26,88	26,59

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.48: Resultados de límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad e índice de grupo.

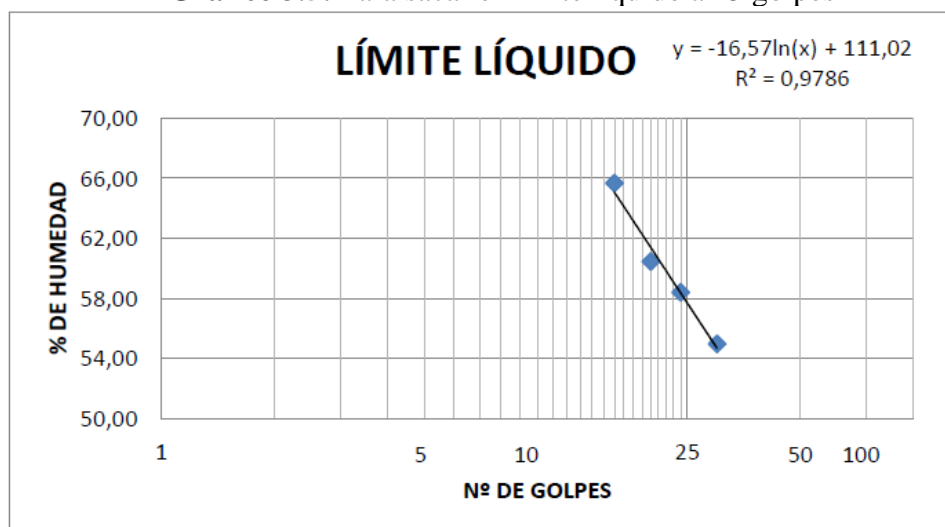
Resultados de banco 1 B. La Cabaña
Límite líquido (%) LL=51
Límite plástico (%) LP = 27
Índice de plasticidad (%) IP = 24
Índice de grupo IG = 16

Fuente: Elaboración propia.

Banco 2 B. Juan Nicolai**Tabla 3.49:** Datos para la determinación del ensayo límite líquido.

Determinación del límite líquido				
Cápsula N°	1	2	3	4
N° de golpes	16	20	24	30
Suelo Húmedo + Cápsula	40,85	40,28	45,45	47,43
Suelo Seco + Cápsula	29,43	30,17	33,29	35,06
Peso del agua	11,42	10,11	12,16	12,37
Peso de la Cápsula	12,04	13,45	12,47	12,56
Peso Suelo seco	17,39	16,72	20,82	22,50
Porcentaje de Humedad	65,67	60,47	58,41	59,98

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.5: Para sacar el límite líquido a 25 golpes

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.50: Datos para la determinación del ensayo límite plástico.

Determinación de límite plástico			
Cápsula	1	2	3
Peso de suelo húmedo + Cápsula	18,12	18,42	17,79
Peso de suelo seco + Cápsula	16,78	17,13	16,42
Peso de cápsula	13,37	13,87	12,87
Peso de suelo seco	3,41	3,26	3,55
Peso del agua	1,34	1,29	1,37
Contenido de humedad	39,30	39,57	38,59

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.51: Resultados de límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad e índice de grupo.

Resultados de banco 2 B. Juan Nicolai
Límite líquido (%) LL=58
Límite plástico (%) LP = 39
Índice de plasticidad (%) IP = 19
Índice de grupo IG = 15

Fuente: Elaboración propia.

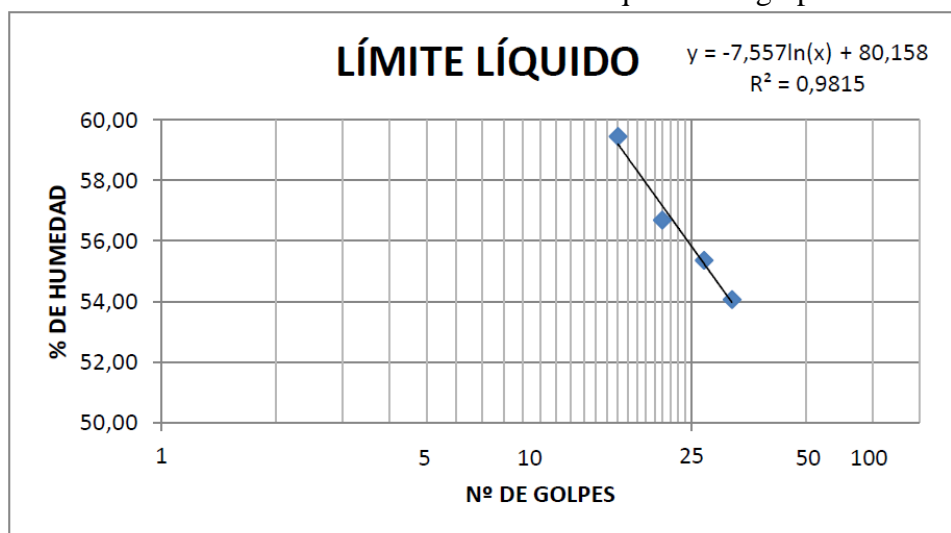
Banco 3 B. Monte Cristo

Tabla 3.52: Datos para la determinación del ensayo límite líquido.

Determinación del límite líquido				
Cápsula N°	1	2	3	4
N° de golpes	16	21	27	32
Suelo Húmedo + Cápsula	50,39	56,88	46,29	54,82
Suelo Seco + Cápsula	37,94	42,56	36,13	41,90
Peso del agua	12,45	14,32	10,16	12,92
Peso de la Cápsula	17	17,3	17,78	18
Peso Suelo seco	20,94	25,26	18,35	23,90
Porcentaje de Humedad	59,46	56,69	55,37	54,06

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.6: Para sacar el límite líquido a 25 golpes



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.53: Datos para la determinación del ensayo límite plástico.

Determinación de límite plástico			
Cápsula	1	2	3
Peso de suelo húmedo + Cápsula	15,31	16,21	17,95
Peso de suelo seco + Cápsula	14,66	15,47	17,00
Peso de cápsula	11,96	12,54	13,28
Peso de suelo seco	2,70	2,93	3,72
Peso del agua	0,65	0,74	0,95
Contenido de humedad	24,07	25,26	25,54

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.54: Resultados de límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad.

Resultados de banco 3 B. Monte Cristo
Límite líquido (%) LL=56
Límite plástico (%) LP = 25
Índice de plasticidad (%) IP = 31
Índice de grupo IG = 20

Fuente: Elaboración propia.

3.6.4.2 Ensayo de granulometría método del lavado (ASTM C-136)

En este método utilizamos el material que pasa el tamiz N° 10, en el cual se toma una muestra representativa en total 500 gr.

La muestra hay que saturarla con agua completamente, cuya consistencia se asemeje al barro y con mucho cuidado de no perder material se introduce la muestra en la malla N° 40, y con agua se procede a lavar la muestra hasta que el agua que escurre tome un color más claro. El material retenido en la malla N° 200, se coloca en un recipiente para secarlo en el horno, y nuevamente proceder a retamizar con las mallas N° 40 y N° 200 y pesar lo que retiene en cada tamiz.

Figura 3.31: Juego de tamices para proceder al método del lavado.

Fuente: Elaboración propia.

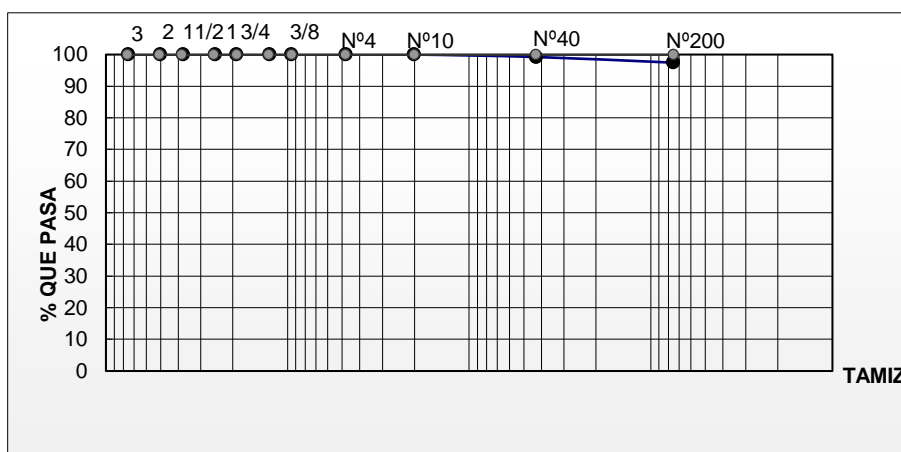
Banco 1 B. La Cañada

Tabla 3.55: Datos y resultados de la granulometría B. La Cañada.

Peso total = 500 gr					
Tamices	Tamaño	Peso Ret.	Ret. Acum.	% Ret.	% Que Pasa
	(mm)	(gr)	(gr)		del Total
Nº4	4,75	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº10	2,00	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº40	0,425	3,90	3,90	0,78	99,22
Nº200	0,075	8,90	12,80	2,56	97,44

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.7: Curva granulométrica – Banco 1 B. La Cañada.



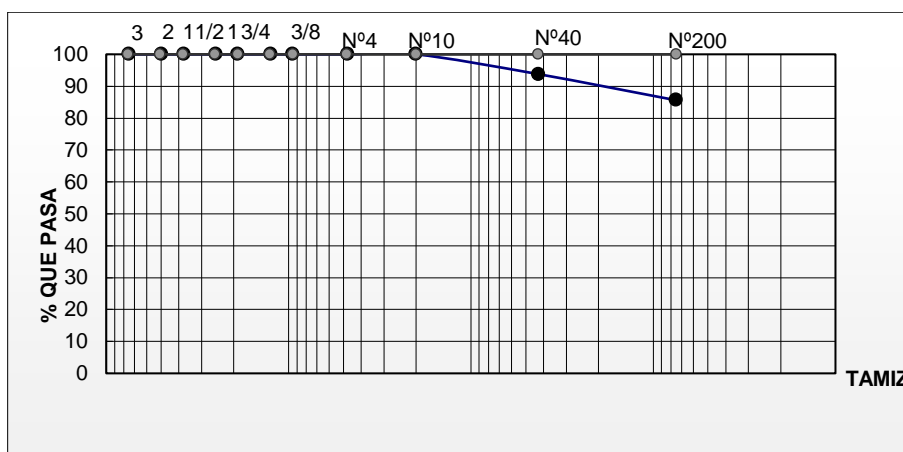
Fuente: Elaboración propia.

Banco 2 B. Juan Nicolai

Tabla 3.56: Datos y resultados de la granulometría B. Juan Nicolai

Peso total = 500 gr					
Tamices	Tamaño	Peso Ret.	Ret. Acum.	% Ret.	% Que Pasa
	(mm)	(gr)	(gr)		del Total
Nº4	4,75	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº10	2,00	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº40	0,425	31,10	31,10	6,22	93,78
Nº200	0,075	40,80	71,90	14,38	85,62

Fuente: Elaboración propia.

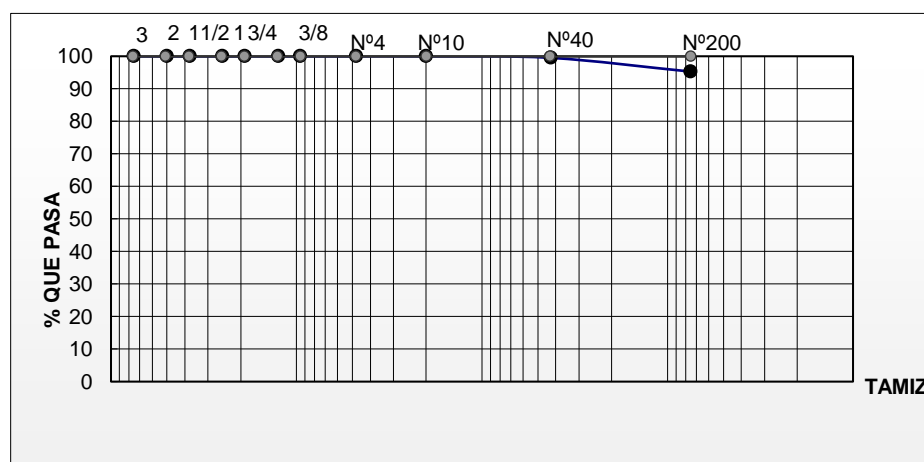
Gráfico 3.8: Curva granulométrica – Banco 2 B. Juan Nicolai.

Fuente: Elaboración propia.

Banco 3 B. Monte Cristo**Tabla 3.57:** Datos y resultados de la granulometría B. Monte Cristo

Peso total = 500 gr					
Tamices	Tamaño	Peso Ret.	Ret. Acum.	% Ret.	% Que Pasa
	(mm)	(gr)	(gr)		del Total
N°4	4,75	0,00	0,00	0,00	100,00
N°10	2,00	0,00	0,00	0,00	100,00
N°40	0,425	2,40	2,40	0,48	99,52
N°200	0,075	21,10	23,50	4,70	95,30

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.9: Curva granulométrica – Banco 3 B. Monte Cristo.

Fuente: Elaboración propia.

3.6.4.3 Determinación del contenido de humedad (ASTM D2216)

Este método cubre la determinación del contenido de humedad de la muestra por peso.

El contenido de humedad de la muestra se define como la relación, expresada en porcentaje, entre la masa de agua que llena los poros o "agua libre", en una masa de material, y la masa de las partículas sólidas de material.

Banco 1 B. La Cañada

Tabla 3.58: Datos y resultados del contenido de humedad B. La Cañada.

Humedad natural			
Cápsula	1	2	3
Peso de suelo húmedo + Cápsula	104,2	105,15	106,09
Peso de suelo seco + Cápsula	101,24	102,31	103,37
Peso de cápsula	18,04	18,39	18,74
Peso de suelo seco	83,2	83,92	84,63
Peso del agua	2,96	2,84	2,72
Contenido de humedad	3,56	3,38	3,21
Promedio	3,39		

Fuente: Elaboración propia.

Banco 2 B. Juan Nicolai

Tabla 3.59: Datos y resultados del contenido de humedad B. Juan Nicolai.

Humedad natural			
Cápsula	1	2	3
Peso de suelo húmedo + Cápsula	62,54	67,29	72,04
Peso de suelo seco + Cápsula	61,01	65,58	70,14
Peso de cápsula	18,23	17,99	17,74
Peso de suelo seco	42,78	47,59	52,40
Peso del agua	1,53	1,71	1,90
Contenido de humedad	3,58	3,59	3,63
Promedio	3,60		

Fuente: Elaboración propia.

Banco 3 B. Monte Cristo

Tabla 3.60: Datos y resultados del contenido de humedad B. Monte Cristo.

Humedad natural			
Cápsula	1	2	3
Peso de suelo húmedo + Cápsula	42,92	41,16	39,39
Peso de suelo seco + Cápsula	42,42	40,7	38,98
Peso de cápsula	18,51	18,4	18,29
Peso de suelo seco	23,91	22,3	20,69
Peso del agua	0,5	0,46	0,41
Contenido de humedad	2,09	2,06	1,98
Promedio	2,05		

Fuente: Elaboración propia.

3.6.4.4 Ensayo de peso específico del filler (ASTM D-854)

Este método establece el procedimiento para determinar, mediante un picnómetro, la densidad de partículas de suelos compuestos por partículas menores que 5mm. Cuando el suelo se compone de partículas mayores que 5mm, se debe aplicar el rentado de determinación de densidad neta de los gruesos, según el método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos.

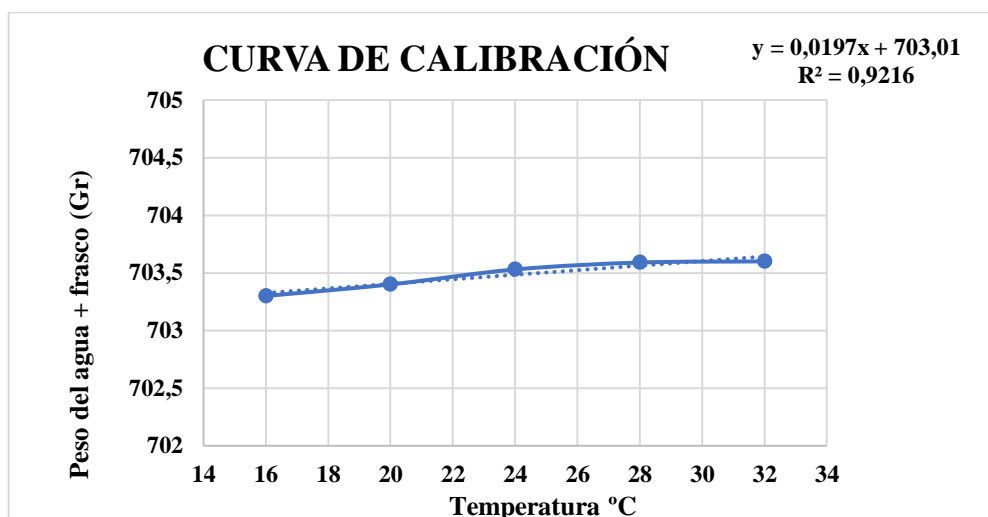
Cuando el suelo se compone tanto de partículas mayores como menores que 5mm, separe en el tamiz N°4 (4,75mm), determine y registre el porcentaje en masa seca de ambas fracciones y ensáyese con el método correspondiente. El resultado es el procedimiento ponderado de ambas fracciones.

Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos AASHO T-100 y ASTM D-854.

Tabla 3.61: Datos de la calibración de frasco volumétrico.

Número de ensayo	Wfw	T
	(Gr)	(° C)
1	703,6	32
2	703,59	28
3	703,53	24
4	703,4	20
5	703,3	16

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.10: Curva de calibración del frasco volumétrico.

Fuente: Elaboración propia.

Banco 1 B. La Cañada.**Tabla 3.62:** Datos y resultados del ensayo de peso específico del filler banco 1.

Descripción	Ensayos				
	1	2	3	4	5
Número de ensayo	1	2	3	4	5
Temperatura ensayada °C	32,00	28,00	24,00	20,00	16,00
Peso del suelo seco W_s	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00
Peso del frasco + agua W_{fw}	703,64	703,56	703,48	703,40	703,33
Peso del frasco + agua + suelo W_{fws}	753,60	753,40	753,20	752,70	752,5
Peso específico	2,663	2,652	2,642	2,606	2,595
Factor de corrección $K = 0,99791$	0,99680	0,99800	0,99910	1,00000	1,00090
Peso específico corregido	2,672	2,658	2,644	2,606	2,593
Promedio (gr/cm³)	2,634				

Fuente: Elaboración propia.

Banco 2 B. Juan Nicolai.

Tabla 3.63: Datos y resultados del ensayo de peso específico del filler banco 2.

Descripción	Ensayos				
	1	2	3	4	5
Número de ensayo					
Temperatura ensayada °C	32,00	28,00	24,00	20,00	16,00
Peso del suelo seco W _s	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00
Peso del frasco + agua W _{fw}	703,64	703,56	703,48	703,40	703,33
Peso del frasco + agua + suelo W _{fws}	750,70	750,60	750,50	750,40	750,3
Peso específico	2,429	2,427	2,426	2,424	2,422
Factor de corrección K= 0,99791	0,99680	0,99800	0,99910	1,00000	1,00090
Peso específico corregido	2,436	2,432	2,428	2,424	2,420
Promedio (gr/cm³)	2,428				

Fuente: Elaboración propia.

Banco 3 B. Monte Cristo.

Tabla 3.64: Datos y resultados del ensayo de peso específico del filler banco 3

Descripción	Ensayos				
	1	2	3	4	5
Número de ensayo					
Temperatura ensayada °C	32,00	28,00	24,00	20,00	16,00
Peso del suelo seco W _s	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00
Peso del frasco + agua W _{fw}	703,64	703,56	703,48	703,40	703,33
Peso del frasco + agua + suelo W _{fws}	754,60	754,50	754,30	754,20	754,1
Peso específico	2,755	2,753	2,741	2,739	2,737
Factor de corrección K= 0,99791	0,99680	0,99800	0,99910	1,00000	1,00090
Peso específico corregido	2,764	2,758	2,744	2,739	2,735
Promedio (gr/cm³)	2,748				

Fuente: Elaboración propia.

3.6.4.5 Análisis granulométrico por medio del hidrómetro ASTM D-422.

El análisis hidrométrico se basa en la ley de Stokes, la cual relaciona la velocidad de una esfera, cayendo libremente de un fluido, con el diámetro de la esfera. Se requiere el peso en su estado seco, pudiendo haber variantes de acuerdo a las características del suelo ensayado.

Así, por ejemplo:

Limo y arcillas (que pasa el tamiz N°200) 50 a 60 gramos.

Hay dos opciones para obtener el peso de la muestra, que se seque antes del ensayo o después del ensayo. Si la muestra se seca antes del ensayo, entonces, se anota el valor de peso de suelo seco. Si la muestra se seca después del ensayo, hay que transportar toda la suspensión a un recipiente para luego introducirla al horno, luego hay que restar el peso del defloculante.

Banco 1 B. La Cañada.

Tabla 3.65: Datos y resultados de la granulometría - método del hidrómetro.

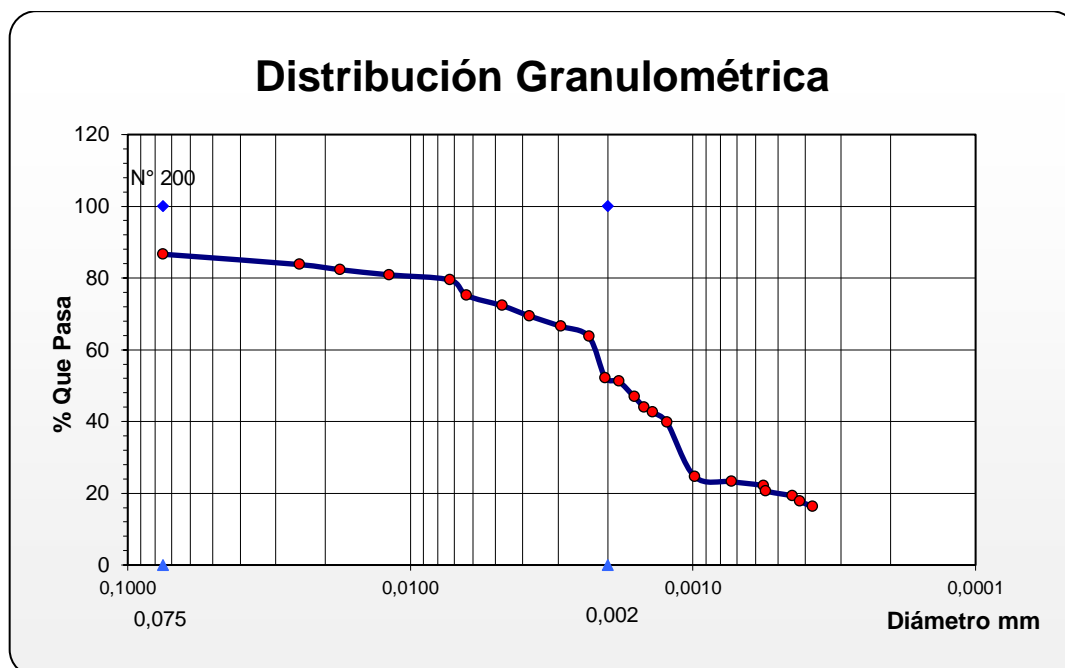
Tiempo transc. min.	Temp. °c.	Lectura real R'.	Lectura correg. R.	Prof. efec. L	Constante K tabla	L/t	Ct	Lectura correg. Rc.	Diam. partícula mm	% más fino
0	22	59	60	6,5	0,01340	0	0,400	60,400	0,075	86,63
2	22	57	58	6,8	0,01340	3,400	0,400	58,400	0,0247	83,76
4	22	56	57	7,0	0,01340	1,750	0,400	57,400	0,0177	82,33
9	22	55	56	7,1	0,01340	0,789	0,400	56,400	0,0119	80,89
25	22	54	55	7,3	0,01340	0,292	0,400	55,400	0,0072	79,46
35	22	51	52	7,8	0,01340	0,223	0,400	52,400	0,0063	75,16
65	22	49	50	8,1	0,01340	0,125	0,400	50,400	0,0047	72,29
105	22	47	48	8,4	0,01340	0,080	0,400	48,400	0,0038	69,42
183	22	45	46	8,8	0,01340	0,048	0,400	46,400	0,0029	66,55
299	22	43	44	9,1	0,01340	0,030	0,400	44,400	0,0023	63,68
447	22	35	36	10,4	0,01340	0,023	0,400	36,400	0,0020	52,21
555	23	34	35	10,6	0,01325	0,019	0,700	35,700	0,0018	51,20
747	23	31	32	11,1	0,01325	0,015	0,700	32,700	0,0016	46,90
902	23	29	30	11,4	0,01325	0,013	0,700	30,700	0,0015	44,03
1048	23	28	29	11,5	0,01325	0,011	0,700	29,700	0,0014	42,60
1368	23	26	27	11,9	0,01325	0,009	0,700	27,700	0,0012	39,73
2548	21	16	17	13,5	0,01356	0,005	0,200	17,200	0,0010	24,67
4708	21	15	16	13,7	0,01356	0,003	0,200	16,200	0,0007	23,24
7828	22	14	15	13,8	0,01340	0,002	0,400	15,400	0,0006	22,09
8168	22	13	14	14,0	0,01340	0,002	0,400	14,400	0,0006	20,65
12900	22	12	13	14,2	0,01340	0,001	0,400	13,400	0,0004	19,22
14560	22	11	12	14,3	0,01340	0,001	0,400	12,400	0,0004	17,79
18296	22	10	11	14,5	0,01340	0,001	0,400	11,400	0,0004	16,35

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.66: Resultados de la granulometría - método del hidrómetro.

% pasa 200	100,00
% limo parcial	47,99
% arcilla parcial	52,01

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.11: Distribución granulométrica.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.67: Datos y resultados de la granulometría - método del hidrómetro.

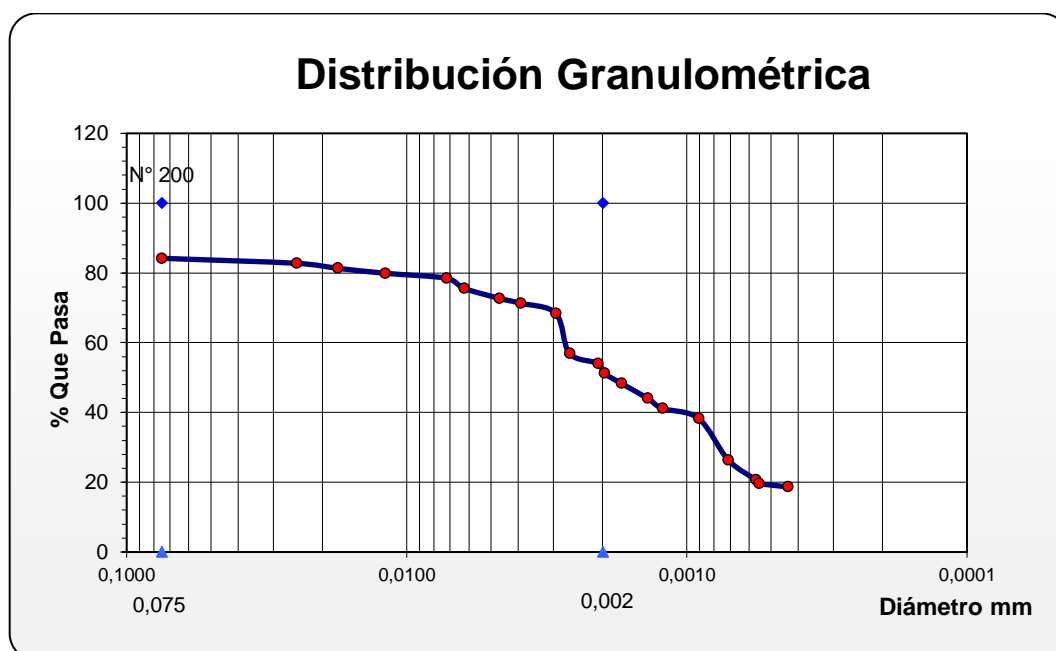
Tiempo transc. min.	Temp. °c.	Lectura real R'.	Lectura correg. R.	Prof. efec. L	Constante K tabla	L/t	Ct	Lectura correg. Rc.	Diam. partícula mm	% más fino
0	23	57	58	6,8	0,01325	0	0,700	58,700	0,075	84,19
2	23	56	57	7,0	0,01325	3,500	0,700	57,700	0,0248	82,76
4	23	55	56	7,1	0,01325	1,775	0,700	56,700	0,0177	81,32
9	23	54	55	7,3	0,01325	0,811	0,700	55,700	0,0119	79,89
25	23	53	54	7,4	0,01325	0,296	0,700	54,700	0,0072	78,46
35	23	51	52	7,8	0,01325	0,223	0,700	52,700	0,0063	75,59
65	23	49	50	8,1	0,01325	0,125	0,700	50,700	0,0047	72,72
95	23	48	49	8,3	0,01325	0,087	0,700	49,700	0,0039	71,28
175	23	46	47	8,6	0,01325	0,049	0,700	47,700	0,0029	68,42
252	23	38	39	9,9	0,01325	0,039	0,700	39,700	0,0026	56,94
414	23	36	37	10,2	0,01325	0,025	0,700	37,700	0,0021	54,07
485	23	34	35	10,7	0,01325	0,022	0,700	35,700	0,0020	51,20
650	23	32	33	10,9	0,01325	0,017	0,700	33,700	0,0017	48,34
1052	23	29	30	11,4	0,01325	0,011	0,700	30,700	0,0014	44,03
1370	23	27	28	11,7	0,01325	0,009	0,700	28,700	0,0012	41,16
2553	23	25	26	12,0	0,01325	0,005	0,700	26,700	0,0009	38,30
4710	22	17	18	13,3	0,01340	0,003	0,400	18,400	0,0007	26,39
7834	22	13	14	14,0	0,01340	0,002	0,400	14,400	0,0006	20,65
8184	23	12	13	14,2	0,01325	0,002	0,700	13,700	0,0006	19,65
12905	24	11	12	14,3	0,01309	0,001	1,000	13,000	0,0004	18,65

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.68: Resultados de la granulometría - método del hidrómetro.

% pasa 200	100,00
% limo parcial	47,96
% arcilla parcial	52,04

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.12: Distribución granulométrica.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.69: Datos y resultados de la granulometría - método del hidrómetro.

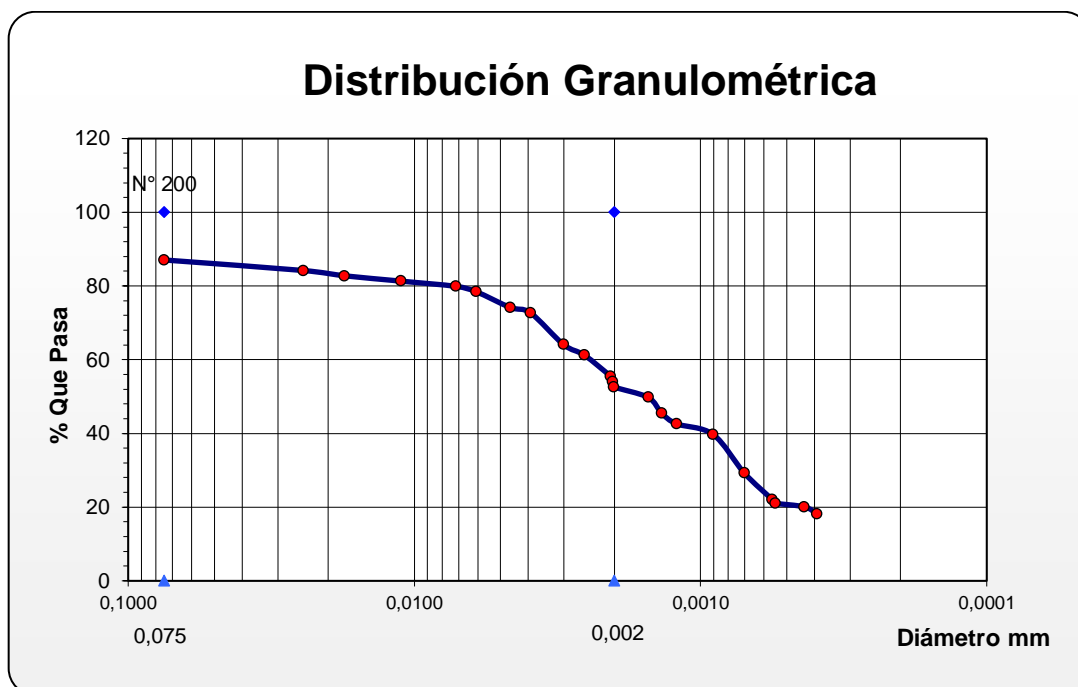
Tiempo transc. min.	Temp. °c.	Lectura real R'.	Lectura correg. R.	Prof. efec. L	Constante K tabla	L/t	Ct	Lectura correg. Rc.	Diam. partícula mm	% más fino
0	23	59	60	6,5	0,01325	0	0,700	60,700	0,075	87,06
2	23	57	58	6,8	0,01325	3,400	0,700	58,700	0,0244	84,19
4	23	56	57	7,0	0,01325	1,750	0,700	57,700	0,0175	82,76
10	23	55	56	7,1	0,01325	0,710	0,700	56,700	0,0112	81,32
25	23	54	55	7,3	0,01325	0,292	0,700	55,700	0,0072	79,89
35	23	53	54	7,4	0,01325	0,211	0,700	54,700	0,0061	78,46
65	23	50	51	7,9	0,01325	0,122	0,700	51,700	0,0046	74,15
92	23	49	50	8,1	0,01325	0,088	0,700	50,700	0,0039	72,72
176	23	43	44	9,1	0,01325	0,052	0,700	44,700	0,0030	64,11
254	23	41	42	9,4	0,01325	0,037	0,700	42,700	0,0025	61,24
415	23	37	38	10,1	0,01325	0,024	0,700	38,700	0,0021	55,51
435	23	36	37	10,2	0,01325	0,023	0,700	37,700	0,0020	54,07
452	23	35	36	10,4	0,01325	0,023	0,700	36,700	0,00201	52,64
808	23	33	34	10,7	0,01325	0,013	0,700	34,700	0,0015	49,77
1052	23	30	31	11,2	0,01325	0,011	0,700	31,700	0,0014	45,47
1375	23	28	29	11,5	0,01325	0,008	0,700	29,700	0,0012	42,60
2554	23	26	27	11,9	0,01325	0,005	0,700	27,700	0,0009	39,73
4715	22	19	20	13,0	0,01340	0,003	0,400	20,400	0,0007	29,26
7835	22	14	15	13,8	0,01340	0,002	0,400	15,400	0,0006	22,09
8185	23	13	14	14,0	0,01325	0,002	0,700	14,700	0,0005	21,08
12908	24	12	13	14,2	0,01309	0,001	1,000	14,000	0,0004	20,08
16348	23	11	12	14,3	0,01325	0,001	0,700	12,700	0,0004	18,22

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.70: Resultados de la granulometría - método del hidrómetro.

% pasa 200	100,00
% limo parcial	48,11
% arcilla parcial	51,89

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.13: Distribución granulométrica.

Fuente: Elaboración propia.

Banco 2 B. Juan Nicolai.**Tabla 3.71:** Datos y resultados de la granulometría - método del hidrómetro.

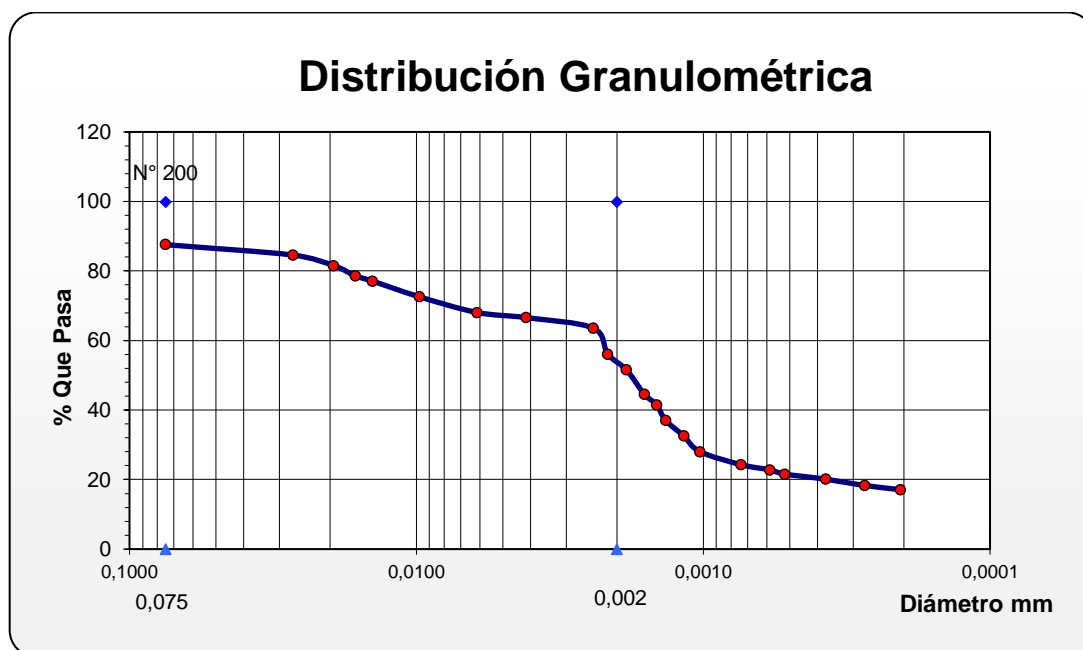
Tiempo transc. min.	Temp. °c.	Lectura real R'.	Lectura correg. R.	Prof. efec. L	Constante K tabla	L/t	Ct	Lectura correg. Rc.	Diam. partícula mm	% más fino
0	22	57	58	6,8	0,0143	0	0,400	58,400	0,075	87,58
2	22	55	56	7,1	0,0143	3,550	0,400	56,400	0,0269	84,58
4	22	53	54	7,4	0,0143	1,850	0,400	54,400	0,0194	81,59
6	22	51	52	7,8	0,0143	1,300	0,400	52,400	0,0163	78,59
8	22	50	51	7,9	0,0143	0,988	0,400	51,400	0,0142	77,09
18	22	47	48	8,4	0,0143	0,467	0,400	48,400	0,0098	72,59
48	22	44	45	8,9	0,0143	0,185	0,400	45,400	0,0062	68,09
108	22	43	44	9,1	0,0143	0,084	0,400	44,400	0,0041	66,59
328	22	41	42	9,4	0,0143	0,029	0,400	42,400	0,0024	63,59
450	22	36	37	10,2	0,0143	0,023	0,400	37,400	0,0022	56,09
637	22	33	34	10,7	0,0143	0,017	0,400	34,400	0,0019	51,59
893	23	28	29	11,5	0,0141	0,013	0,700	29,700	0,0016	44,54
1123	23	26	27	11,9	0,0141	0,011	0,700	27,700	0,0015	41,54
1353	23	23	24	12,4	0,0141	0,009	0,700	24,700	0,0014	37,04
1883	23	20	21	12,9	0,0141	0,007	0,700	21,700	0,0012	32,54
2513	23	17	18	13,3	0,0141	0,005	0,700	18,700	0,0010	28,04
5256	21	15	16	13,7	0,0145	0,003	0,200	16,200	0,0007	24,30
8436	21	14	15	13,8	0,0145	0,002	0,200	15,200	0,0006	22,80
10556	22	13	14	14	0,0143	0,001	0,400	14,400	0,0005	21,60
20836	22	12	13	14,2	0,0143	0,001	0,400	13,400	0,0004	20,10
40136	21	11	12	14,3	0,0145	0,000	0,200	12,200	0,0003	18,30
70176	22	10	11	14,5	0,0143	0,000	0,400	11,400	0,0002	17,10

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.72: Resultados de la granulometría - método del hidrómetro.

% pasa 200	100,00
% limo parcial	46,11
% arcilla parcial	53,89

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.14: Distribución granulométrica.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.73: Datos y resultados de la granulometría - método del hidrómetro.

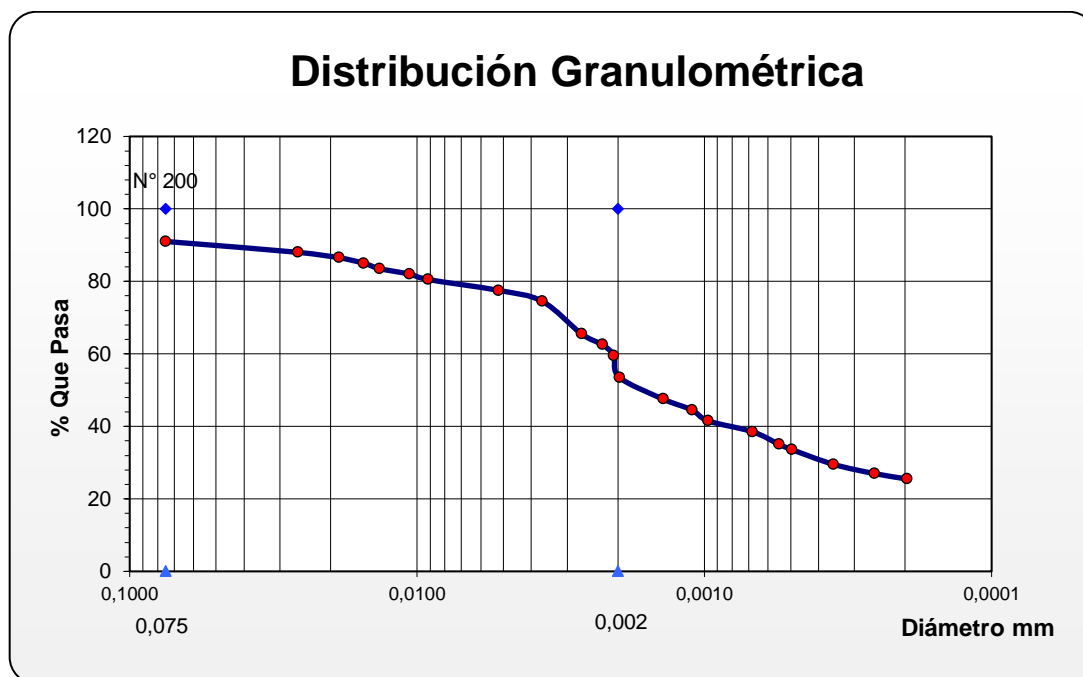
Tiempo transc. min.	Temp. °c.	Lectura real R'.	Lectura correg. R.	Prof. efec. L	Constante K tabla	L/t	Ct	Lectura correg. Rc.	Diam. partícula mm	% más fino
0	23	59	60	6,5	0,0141	0	0,700	60,700	0,075	91,03
2	23	57	58	6,8	0,0141	3,400	0,700	58,700	0,0260	88,03
4	23	56	57	7,0	0,0141	1,750	0,700	57,700	0,0187	86,53
6	23	55	56	7,1	0,0141	1,183	0,700	56,700	0,0154	85,03
8	23	54	55	7,3	0,0141	0,913	0,700	55,700	0,0135	83,53
13	23	53	54	7,4	0,0141	0,569	0,700	54,700	0,0107	82,04
18	23	52	53	7,6	0,0141	0,422	0,700	53,700	0,0092	80,54
58	23	50	51	7,9	0,0141	0,136	0,700	51,700	0,0052	77,54
123	23	48	49	8,3	0,0141	0,067	0,700	49,700	0,0037	74,54
256	23	42	43	9,2	0,0141	0,036	0,700	43,700	0,0027	65,54
374	23	40	41	9,6	0,0141	0,026	0,700	41,700	0,0023	62,54
461	23	38	39	9,9	0,0141	0,021	0,700	39,700	0,0021	59,54
542	23	34	35	10,6	0,0141	0,020	0,700	35,700	0,0020	53,54
1153	23	30	31	11,2	0,0141	0,010	0,700	31,700	0,0014	47,54
1883	23	28	29	11,5	0,0141	0,006	0,700	29,700	0,0011	44,54
2513	23	26	27	11,9	0,0141	0,005	0,700	27,700	0,0010	41,54
5256	23	24	25	12,2	0,0141	0,002	0,700	25,700	0,0007	38,54
8436	22	22	23	12,5	0,0143	0,001	0,400	23,400	0,0006	35,09
10556	22	21	22	12,7	0,0143	0,001	0,400	22,400	0,0005	33,59
20836	23	18	19	13,2	0,0141	0,001	0,700	19,700	0,0004	29,54
40136	24	16	17	13,5	0,0140	0,000	1,000	18,000	0,0003	27,00
70176	24	15	16	13,7	0,0141	0,000	1,000	17,000	0,0002	25,50

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.74: Resultados de la granulometría - método del hidrómetro.

% pasa 200	100,00
% limo parcial	44,87
% arcilla parcial	55,13

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.15: Distribución granulométrica.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.75: Datos y resultados de la granulometría - método del hidrómetro.

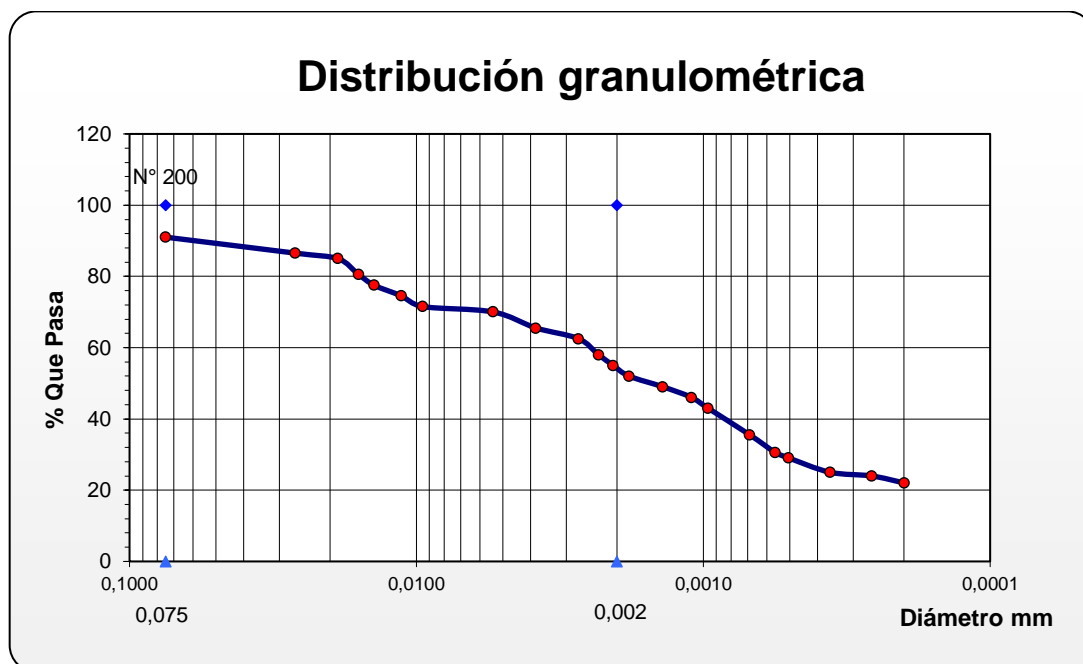
Tiempo transc. min.	Temp. °c.	Lectura real R'.	Lectura correg. R.	Prof. efec. L	Constante K tabla	L/t	Ct	Lectura correg. Rc.	Diam. partícula mm	% más fino
0	23	59	60	6,5	0,0141	0	0,700	60,700	0,075	91,03
2	23	56	57	7	0,0141	3,500	0,700	57,700	0,0264	86,53
4	23	55	56	7,1	0,0141	1,775	0,700	56,700	0,0188	85,03
6	23	52	53	7,6	0,0141	1,267	0,700	53,700	0,0159	80,54
8	23	50	51	7,9	0,0141	0,988	0,700	51,700	0,0140	77,54
13	23	48	49	8,3	0,0141	0,638	0,700	49,700	0,0113	74,54
19	23	46	47	8,6	0,0141	0,453	0,700	47,700	0,0095	71,54
60	23	45	46	8,8	0,0141	0,147	0,700	46,700	0,0054	70,04
125	23	42	43	9,2	0,0141	0,074	0,700	43,700	0,0038	65,54
258	23	40	41	9,6	0,0141	0,037	0,700	41,700	0,0027	62,54
375	23	37	38	10,1	0,0141	0,027	0,700	38,700	0,0023	58,04
488	23	35	36	10,4	0,0141	0,021	0,700	36,700	0,0021	55,04
647	23	33	34	10,7	0,0141	0,017	0,700	34,700	0,0018	52,04
1153	23	31	32	11,1	0,0141	0,010	0,700	32,700	0,0014	49,04
1883	23	29	30	11,4	0,0141	0,006	0,700	30,700	0,0011	46,04
2513	23	27	28	11,7	0,0141	0,005	0,700	28,700	0,0010	43,04
5256	23	22	23	12,5	0,0141	0,002	0,700	23,700	0,0007	35,54
8436	22	19	20	13	0,0143	0,002	0,400	20,400	0,0006	30,59
10554	22	18	19	13,2	0,0143	0,001	0,400	19,400	0,0005	29,09
20836	23	15	16	13,7	0,0141	0,001	0,700	16,700	0,0004	25,05
40159	24	14	15	13,8	0,0140	0,000	1,000	16,000	0,0003	24,00
70176	23	13	14	14	0,0141	0,000	0,700	14,700	0,0002	22,05

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.76: Resultados de la granulometría - método del hidrómetro.

% pasa 200	100,00
% limo parcial	45,68
% arcilla parcial	54,32

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.16: Distribución granulométrica.

Fuente: Elaboración propia.

Banco 3 B. Monte Cristo.

Tabla 3.77: Datos y resultados de la granulometría - método del hidrómetro.

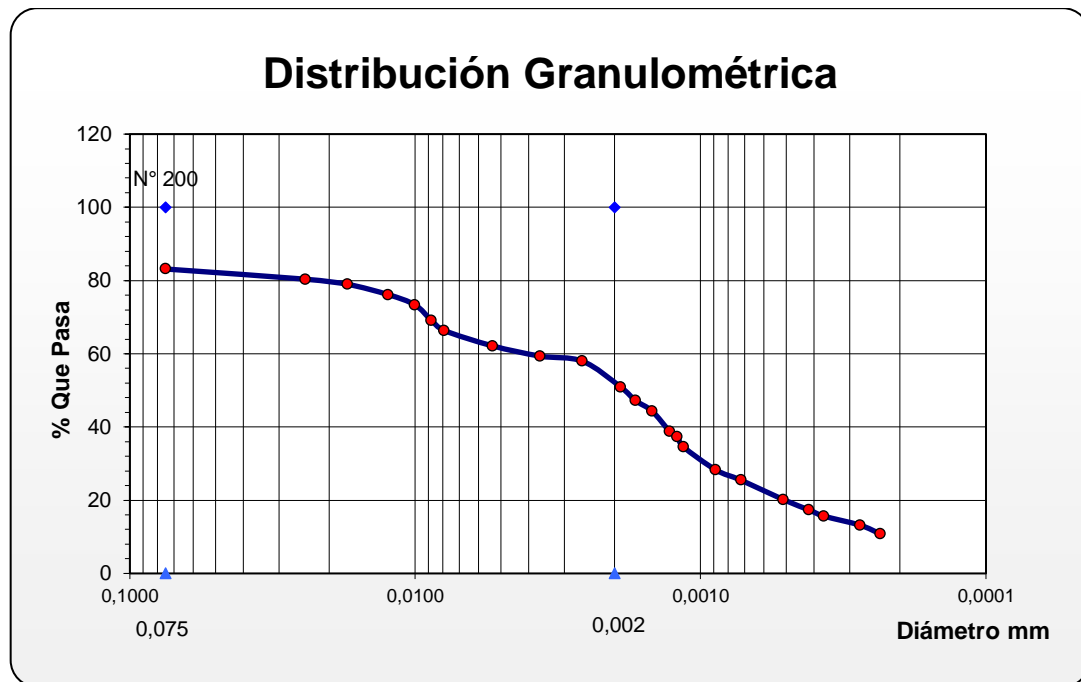
Tiempo transc. min.	Temp. °c.	Lectura real R'.	Lectura correg. R.	Prof. efec. L	Constante K tabla	L/t	Ct	Lectura correg. Rc.	Diam. partícula mm	% más fino
0	22	58	59	6,6	0,01294	0	0,400	59,400	0,075	83,16
2	22	56	57	7,0	0,01294	3,500	0,400	57,400	0,0242	80,36
4	22	55	56	7,1	0,01294	1,775	0,400	56,400	0,0172	78,96
8	22	53	54	7,4	0,01294	0,925	0,400	54,400	0,0124	76,16
13	22	51	52	7,8	0,01294	0,600	0,400	52,400	0,0100	73,36
18	22	48	49	8,3	0,01294	0,461	0,400	49,400	0,0088	69,16
23	22	46	47	8,6	0,01294	0,374	0,400	47,400	0,0079	66,36
53	22	43	44	9,1	0,01294	0,172	0,400	44,400	0,0054	62,16
118	22	41	42	9,4	0,01294	0,080	0,400	42,400	0,0037	59,36
239	22	40	41	9,6	0,01294	0,040	0,400	41,400	0,0026	57,96
478	22	35	36	10,4	0,01294	0,022	0,400	36,400	0,0019	50,96
625	23	32	33	10,9	0,01279	0,017	0,700	33,700	0,0017	47,18
836	23	30	31	11,2	0,01279	0,013	0,700	31,700	0,0015	44,38
1184	23	26	27	11,9	0,01279	0,010	0,700	27,700	0,0013	38,78
1345	23	25	26	12,0	0,01279	0,009	0,700	26,700	0,0012	37,38
1536	23	23	24	12,4	0,01279	0,008	0,700	24,700	0,0011	34,58
2846	21	19	20	13,0	0,01309	0,005	0,200	20,200	0,0009	28,28
4375	21	17	18	13,3	0,01309	0,003	0,200	18,200	0,0007	25,48
8913	22	13	14	14,0	0,01294	0,002	0,400	14,400	0,0005	20,16
13756	22	11	12	14,3	0,01294	0,001	0,400	12,400	0,0004	17,36
18113	21	10	11	14,5	0,01309	0,001	0,200	11,200	0,0004	15,68
32586	22	8	9	14,8	0,01294	0,000	0,400	9,400	0,0003	13,16
45362	23	6	7	15,2	0,01279	0,000	0,700	7,700	0,0002	10,78

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.78: Resultados de la granulometría - método del hidrómetro.

% pasa 200	100,00
% limo parcial	47,97
% arcilla parcial	52,03

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.17: Distribución granulométrica.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.79: Datos y resultados de la granulometría - método del hidrómetro.

Tiempo transc. min.	Temp. °c.	Lectura real R'.	Lectura correg. R.	Prof. efec. L	Constante K tabla	L/t	Ct	Lectura correg. Rc.	Diam. partícula mm	% más fino
0	23	58	59	6,6	0,01279	0	0,700	59,700	0,075	83,58
2	23	56	57	7	0,01279	3,500	0,700	57,700	0,0239	80,78
4	23	55	56	7,1	0,01279	1,775	0,700	56,700	0,0170	79,38
8	23	53	54	7,4	0,01279	0,925	0,700	54,700	0,0123	76,58
13	23	52	53	7,6	0,01279	0,585	0,700	53,700	0,0098	75,18
18	23	50	51	7,9	0,01279	0,439	0,700	51,700	0,0085	72,38
24	23	48	49	8,4	0,01279	0,350	0,700	49,700	0,0076	69,58
54	23	46	47	8,6	0,01279	0,159	0,700	47,700	0,0051	66,78
120	23	44	45	8,9	0,01279	0,074	0,700	45,700	0,0035	63,98
240	23	40	41	9,1	0,01279	0,038	0,700	41,700	0,0025	58,38
440	23	35	36	10,2	0,01279	0,023	0,700	36,700	0,0019	51,38
625	23	33	34	10,7	0,01279	0,017	0,700	34,700	0,0017	48,58
825	23	31	32	11,1	0,01279	0,013	0,700	32,700	0,0015	45,78
1182	23	29	30	11,4	0,01279	0,010	0,700	30,700	0,0013	42,98
1345	23	27	28	11,7	0,01279	0,009	0,700	28,700	0,0012	40,18
1835	23	25	26	12	0,01279	0,007	0,700	26,700	0,0010	37,38
2845	23	23	24	12,4	0,01279	0,004	0,700	24,700	0,0008	34,58
4375	22	20	21	13,3	0,01294	0,003	0,400	21,400	0,0007	29,96
8193	22	16	17	13,5	0,01294	0,002	0,400	17,400	0,0005	24,36
13756	22	13	14	14	0,01294	0,001	0,400	14,400	0,0004	20,16
18113	23	12	13	14,2	0,01279	0,001	0,700	13,700	0,0004	19,18
32570	24	9	10	14,3	0,01264	0,000	1,000	11,000	0,0003	15,40
45362	23	8	9	14,5	0,01279	0,000	0,700	9,700	0,0002	13,58

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.81: Datos y resultados de la granulometría - método del hidrómetro.

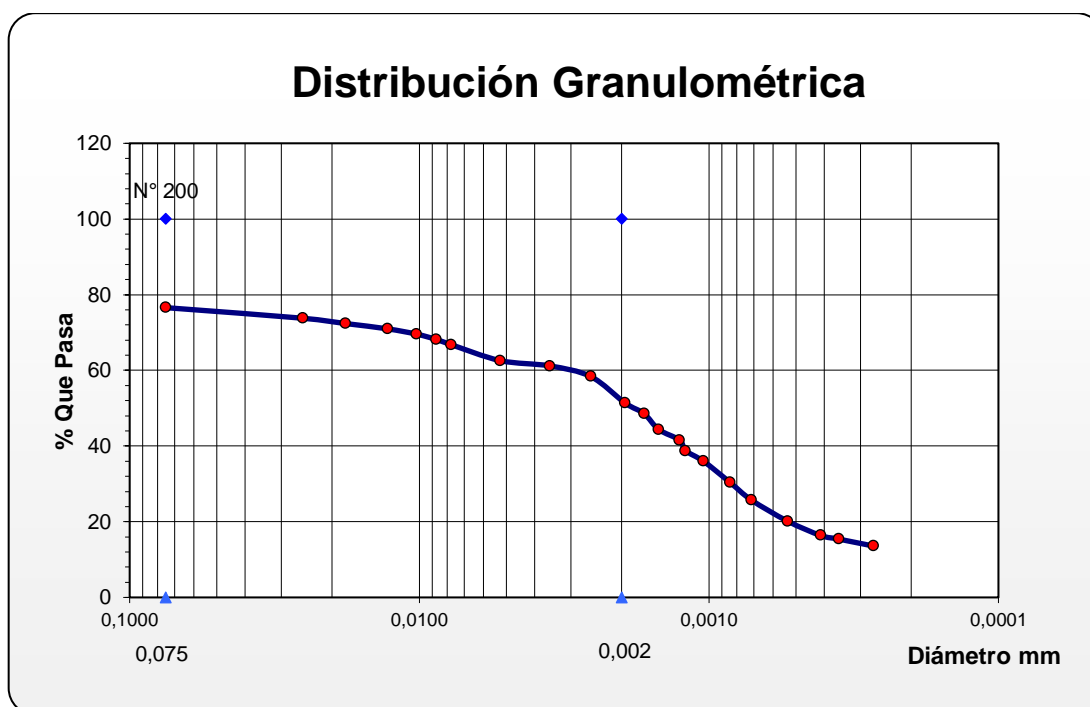
Tiempo transc. min.	Temp. °c.	Lectura real R'.	Lectura correg. R.	Prof. efec. L	Constante K tabla	L/t	Ct	Lectura correg. Rc.	Diam. partícula mm	% más fino
0	23	53	54	7,4	0,01279	0	0,700	54,700	0,075	76,58
2	23	51	52	7,8	0,01279	3,900	0,700	52,700	0,0253	73,78
4	23	50	51	7,9	0,01279	1,975	0,700	51,700	0,0180	72,38
8	23	49	50	8,1	0,01279	1,013	0,700	50,700	0,0129	70,98
13	23	48	49	8,3	0,01279	0,638	0,700	49,700	0,0102	69,58
18	23	47	48	8,4	0,01279	0,467	0,700	48,700	0,0087	68,18
24	23	46	47	8,8	0,01279	0,367	0,700	47,700	0,0077	66,78
54	23	43	44	9,1	0,01279	0,169	0,700	44,700	0,0053	62,58
120	23	42	43	9,2	0,01279	0,077	0,700	43,700	0,0035	61,18
240	23	40	41	9,6	0,01279	0,040	0,700	41,700	0,0026	58,38
440	23	35	36	10,2	0,01279	0,023	0,700	36,700	0,0019	51,38
625	23	33	34	10,7	0,01279	0,017	0,700	34,700	0,0017	48,58
825	23	30	31	11,2	0,01279	0,014	0,700	31,700	0,0015	44,38
1182	23	28	29	11,5	0,01279	0,010	0,700	29,700	0,0013	41,58
1345	23	26	27	11,9	0,01279	0,009	0,700	27,700	0,0012	38,78
1835	23	24	25	12,2	0,01279	0,007	0,700	25,700	0,0010	35,98
2845	23	20	21	12,4	0,01279	0,004	0,700	21,700	0,0008	30,38
4375	22	17	18	13,3	0,01294	0,003	0,400	18,400	0,0007	25,76
8193	22	13	14	14	0,01294	0,002	0,400	14,400	0,0005	20,16
13756	23	10	11	14,2	0,01279	0,001	0,700	11,700	0,0004	16,38
18113	24	9	10	14,3	0,01264	0,001	1,000	11,000	0,0004	15,40
32570	23	8	9	14,5	0,01279	0,000	0,700	9,700	0,0003	13,58

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.82: Resultados de la granulometría - método del hidrómetro.

% pasa 200	100,00
% limo parcial	47,94
% arcilla parcial	52,06

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.19: Distribución granulométrica.

Fuente: Elaboración propia.

3.7 Diseño de mezclas asfálticas con diferentes porcentajes de filler

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

3.7.1 Diseño granulométrico

Se realiza el diseño granulométrico con la grava, gravilla, arena y filler natural, caracterizados previamente, formando una curva granulométrica con diferentes

porcentajes de filler (2%, 4%, 6% y 8%), donde menor o mayor porcentaje de filler ya no entra dentro de las especificaciones de la norma ASTM D3515 del método Marshall.

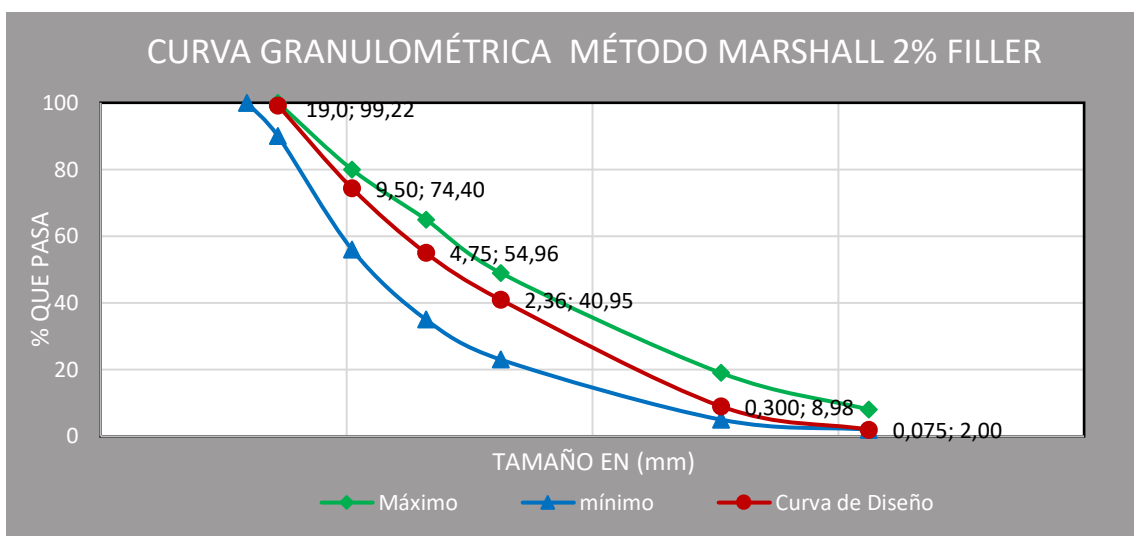
Para el diseño de las fajas granulométricas se utilizarán los materiales de los que se disponía, tanto para el agregado grueso como para el fino, con lo cual se estableció que la mezcla de agregados estará compuesta por el 30% de grava de 3/4", 20% de gravilla de 3/8", de 42% a 48% de arena y de 2% a 8% de filler, haciendo un total del 50% del agregado grueso y 50% de agregado fino para la granulometría de la mezcla.

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

Tabla 3.83: Diseño granulométrico para 2% filler.

Tamices	Tamaño (mm)	Grava (%) 30,00	Gravilla (%) 20,00	Arena (%) 48,00	Filler (%) 2,00	Curva de dosificación				Especificaciones ASTM D3515	
						Peso ret. 100,00	Ret. acum.	% ret.	% que pasa del total	Mínimo	Máximo
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4"	19,0	39,00	0,00	0,00	0,00	39,00	39,00	0,78	99,22	90	100
1/2"	12,5	810,00	3,80	0,00	0,00	813,80	852,80	17,06	82,94	-	-
3/8"	9,50	417,00	10,44	0,00	0,00	427,44	1280,24	25,60	74,40	56	80
Nº4	4,75	232,50	735,00	4,32	0,00	971,82	2252,06	45,04	54,96	35	65
Nº8	2,36	1,50	246,62	452,21	0,00	700,33	2952,39	59,05	40,95	23	49
Nº16	1,18	0,00	4,14	628,13	0,00	632,27	3584,66	71,69	28,31	-	-
Nº30	0,60	0,00	0,00	524,83	0,00	524,83	4109,49	82,19	17,81	-	-
Nº50	0,30	0,00	0,00	441,26	0,00	441,26	4550,75	91,02	8,98	5	19
Nº100	0,15	0,00	0,00	238,85	0,00	238,85	4789,60	95,79	4,21	-	-
Nº200	0,075	0,00	0,00	110,40	0,00	110,40	4900,00	98,00	2,00	2	8
BASE	-	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	5000,00	100,00	0,00	-	-

Fuente: Elaboración propia.

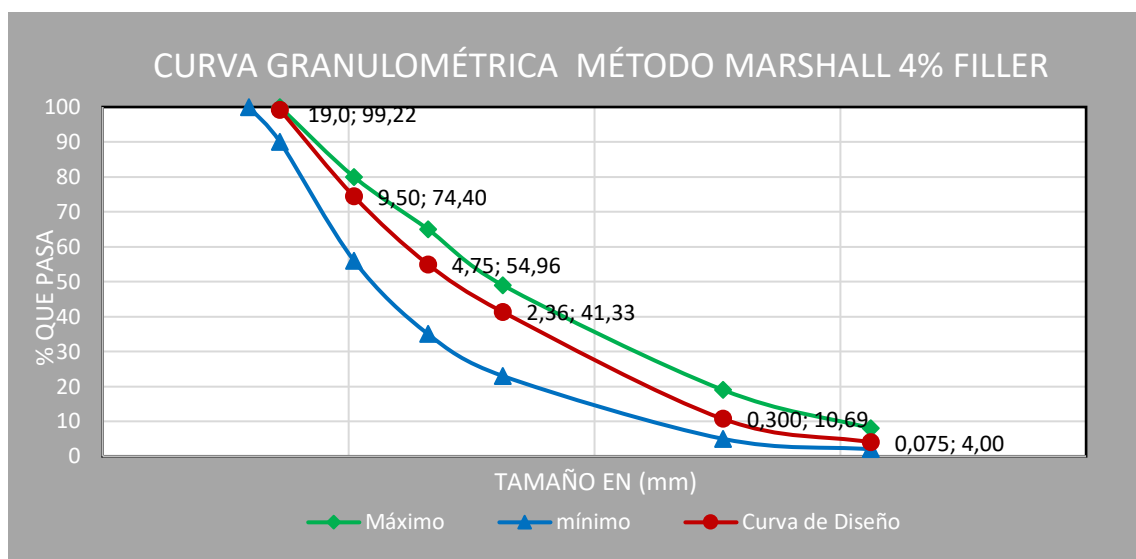
Gráfico 3.20: Curva de diseño granulométrico para 2% filler

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.84: Diseño granulométrico para 4% filler.

Tamices	Tamaño (mm)	Grava (%) 30,00	Gravilla (%) 20,00	Arena (%) 46,00	Filler (%) 4,00	Curva de dosificación				Especificaciones ASTM D3515	
						Peso ret. 100,00	Ret. acum.	% ret.	% que pasa del total	Mínimo	Máximo
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4"	19,0	39,00	0,00	0,00	0,00	39,00	39,00	0,78	99,22	90	100
1/2"	12,5	810,00	3,80	0,00	0,00	813,80	852,80	17,06	82,94	-	-
3/8"	9,50	417,00	10,44	0,00	0,00	427,44	1280,24	25,60	74,40	56	80
Nº4	4,75	232,50	735,00	4,14	0,00	971,64	2251,88	45,04	54,96	35	65
Nº8	2,36	1,50	246,62	433,37	0,00	681,49	2933,37	58,67	41,33	23	49
Nº16	1,18	0,00	4,14	601,96	0,00	606,10	3539,46	70,79	29,21	-	-
Nº30	0,60	0,00	0,00	502,96	0,00	502,96	4042,43	80,85	19,15	-	-
Nº50	0,30	0,00	0,00	422,88	0,00	422,88	4465,30	89,31	10,69	5	19
Nº100	0,15	0,00	0,00	228,90	0,00	228,90	4694,20	93,88	6,12	-	-
Nº200	0,075	0,00	0,00	105,80	0,00	105,80	4800,00	96,00	4,00	2	8
BASE	-	0,00	0,00	0,00	200,00	200,00	5000,00	100,00	0,00	-	-

Fuente: Elaboración propia.

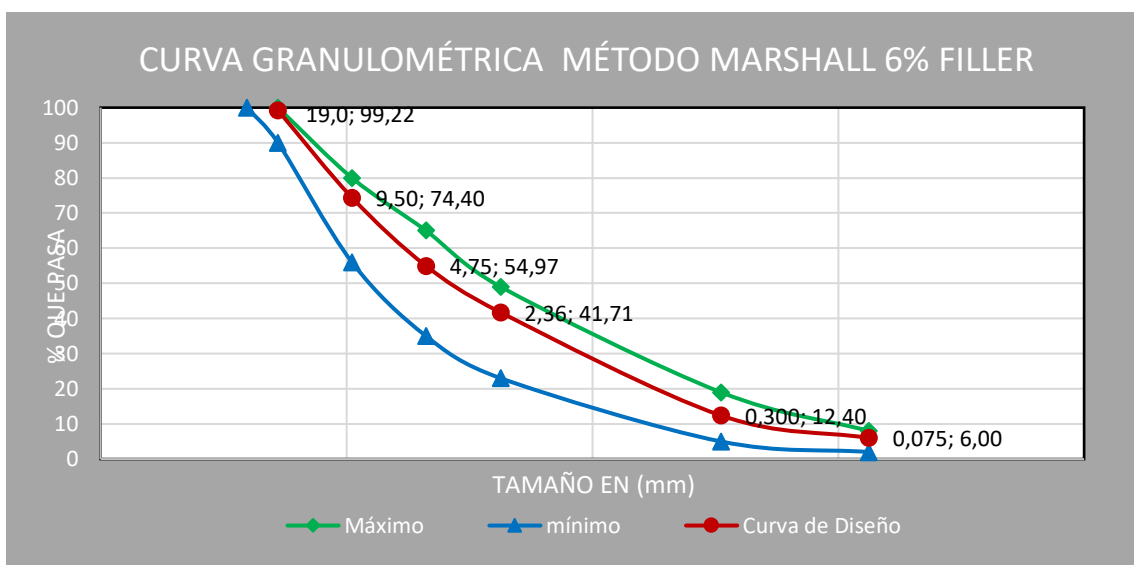
Gráfico 3.21: Curva de diseño granulométrico para 4% filler

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.85: Diseño granulométrico para 6% filler.

Tamices	Tamaño (mm)	Grava (%) 30,00	Gravilla (%) 20,00	Arena (%) 44,00	Filler (%) 6,00	Curva de dosificación				Especificaciones ASTM D3515	
						Peso ret.	Ret. acum.	% ret.	% que pasa del total	Mínimo	Máximo
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4"	19,0	39,00	0,00	0,00	0,00	39,00	39,00	0,78	99,22	90	100
1/2"	12,5	810,00	3,80	0,00	0,00	813,80	852,80	17,06	82,94	-	-
3/8"	9,50	417,00	10,44	0,00	0,00	427,44	1280,24	25,60	74,40	56	80
Nº4	4,75	232,50	735,00	3,96	0,00	971,46	2251,70	45,03	54,97	35	65
Nº8	2,36	1,50	246,62	414,52	0,00	662,64	2914,34	58,29	41,71	23	49
Nº16	1,18	0,00	4,14	575,78	0,00	579,92	3494,27	69,89	30,11	-	-
Nº30	0,60	0,00	0,00	481,10	0,00	481,10	3975,36	79,51	20,49	-	-
Nº50	0,30	0,00	0,00	404,49	0,00	404,49	4379,86	87,60	12,40	5	19
Nº100	0,15	0,00	0,00	218,94	0,00	218,94	4598,80	91,98	8,02	-	-
Nº200	0,075	0,00	0,00	101,20	0,00	101,20	4700,00	94,00	6,00	2	8
BASE	-	0,00	0,00	0,00	300,00	300,00	5000,00	100,00	0,00	-	-

Fuente: Elaboración propia.

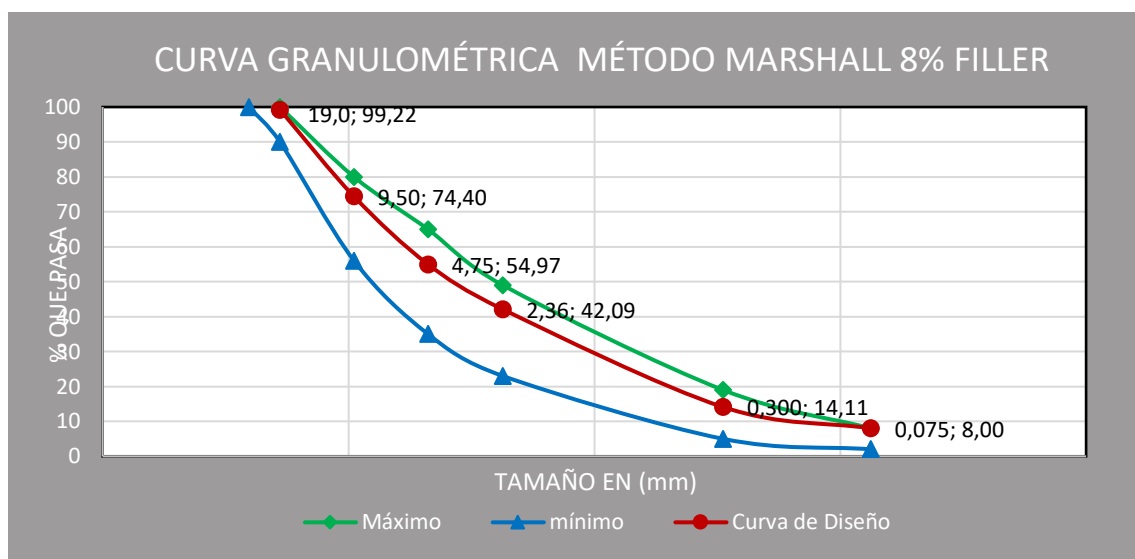
Gráfico 3.22: Curva de diseño granulométrico para 6% filler

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.86: Diseño granulométrico para 8% filler.

Tamices	Tamaño (mm)	Grava (%) 30,00	Gravilla (%) 20,00	Arena (%) 42,00	Filler (%) 8,00	Curva de dosificación				Especificaciones ASTM D3515	
						Peso ret. 100,00	Ret. acum.	% ret.	% que pasa del total	Mínimo	Máximo
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4"	19,0	39,00	0,00	0,00	0,00	39,00	39,00	0,78	99,22	90	100
1/2"	12,5	810,00	3,80	0,00	0,00	813,80	852,80	17,06	82,94	-	-
3/8"	9,50	417,00	10,44	0,00	0,00	427,44	1280,24	25,60	74,40	56	80
Nº4	4,75	232,50	735,00	3,78	0,00	971,28	2251,52	45,03	54,97	35	65
Nº8	2,36	1,50	246,62	395,68	0,00	643,80	2895,32	57,91	42,09	23	49
Nº16	1,18	0,00	4,14	549,61	0,00	553,75	3449,07	68,98	31,02	-	-
Nº30	0,60	0,00	0,00	459,23	0,00	459,23	3908,30	78,17	21,83	-	-
Nº50	0,30	0,00	0,00	386,11	0,00	386,11	4294,41	85,89	14,11	5	19
Nº100	0,15	0,00	0,00	208,99	0,00	208,99	4503,40	90,07	9,93	-	-
Nº200	0,075	0,00	0,00	96,60	0,00	96,60	4600,00	92,00	8,00	2	8
BASE	-	0,00	0,00	0,00	400,00	400,00	5000,00	100,00	0,00	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.23: Curva de diseño granulométrico para 8% filler

Fuente: Elaboración propia.

3.7.2 Dosificación de mezclas asfálticas

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

Tabla 3.87: Variaciones del porcentaje del cemento asfáltico para obtener el porcentaje óptimo de cada diseño granulométrico.

Porcentajes de cemento asfáltico	Cantidad de briquetas a realizar
4,50%	3
5,00%	3
5,50%	3
6,00%	3
6,50%	3
7,00%	3
Total, briquetas elaboradas para cada diseño	18

Fuente: Elaboración propia.

Se realizan 18 briquetas con diferentes porcentajes de cemento asfáltico 85-100 variando de 0,5% con respecto del porcentaje aproximado de cemento asfáltico calculado; de igual manera varían el porcentaje de agregados en la mezcla, de la cual se obtendrá el porcentaje óptimo de cemento asfáltico a utilizar en los cálculos.

Tabla 3.88: Dosificación con porcentajes de cemento asfáltico para 2% filler.

	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla					
	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	7,0%
Porcentaje de agregado (%)	95,50%	95,00%	94,50%	94,00%	93,50%	93,00%
Peso del cemento asfáltico (gr)	54,00	60,00	66,00	72,00	78,00	84,00
Peso de grava (30%) (gr)	343,80	342,00	340,20	338,40	336,60	334,80
Peso de gravilla (20%) (gr)	229,20	228,00	226,80	225,60	224,40	223,20
Peso de arena (48%) (gr)	550,08	547,20	544,32	541,44	538,56	535,68
Peso de filler (2%) (gr)	22,92	22,80	22,68	22,56	22,44	22,32
Peso total de la briqueta (gr)	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.89: Dosificación con porcentajes de cemento asfáltico para 4% filler.

	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla					
	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	7,0%
Porcentaje de agregado (%)	95,50%	95,00%	94,50%	94,00%	93,50%	93,00%
Peso del cemento asfáltico (gr)	54,00	60,00	66,00	72,00	78,00	84,00
Peso de grava (30%) (gr)	343,80	342,00	340,20	338,40	336,60	334,80
Peso de gravilla (20%) (gr)	229,20	228,00	226,80	225,60	224,40	223,20
Peso de arena (46%) (gr)	527,16	524,40	521,64	518,88	516,12	513,36
Peso de filler (4%) (gr)	45,84	45,60	45,36	45,12	44,88	44,64
Peso total de la briqueta (gr)	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.90: Dosificación con porcentajes de cemento asfáltico para 6% filler.

	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla					
	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	7,0%
Porcentaje de agregado (%)	95,50%	95,00%	94,50%	94,00%	93,50%	93,00%
Peso del cemento asfáltico (gr)	54,00	60,00	66,00	72,00	78,00	84,00
Peso de grava (30%) (gr)	343,80	342,00	340,20	338,40	336,60	334,80
Peso de gravilla (20%) (gr)	229,20	228,00	226,80	225,60	224,40	223,20
Peso de arena (44%) (gr)	504,24	501,60	498,96	496,32	493,68	491,04
Peso de filler (6%) (gr)	68,76	68,40	68,04	67,68	67,32	66,96
Peso total de la briqueta (gr)	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.91: Dosificación con porcentajes de cemento asfáltico para 8% filler.

	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla					
	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	7,0%
Porcentaje de agregado (%)	95,50%	95,00%	94,50%	94,00%	93,50%	93,00%
Peso del cemento asfáltico (gr)	54,00	60,00	66,00	72,00	78,00	84,00
Peso de grava (30%) (gr)	343,80	342,00	340,20	338,40	336,60	334,80
Peso de gravilla (20%) (gr)	229,20	228,00	226,80	225,60	224,40	223,20
Peso de arena (42%) (gr)	481,32	478,80	476,28	473,76	471,24	468,72
Peso de filler (8%) (gr)	91,68	91,20	90,72	90,24	89,76	89,28
Peso total de la briqueta (gr)	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

3.7.3 Elaboración de briquetas

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

Equipo: Martillo de compactación, dispositivo para moldear probetas, extractor de probetas, balanza ± 0.1 gr, bandejas metálicas, termómetro, espátula.

Procedimiento:

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

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

Figura 3.32: Pesado de los materiales.



Fuente: Elaboración propia.

Se mezcla el asfalto con los agregados, hasta tener una mezcla homogénea, la temperatura de la mezcla no debe ser inferior a 140°C ni en ningún caso someterse a recalentamiento. Se compacta la mezcla en un molde abierto por ambos extremos y que tienen 4" de diámetro interior y 3" de altura. La compactación se hace usando un martillo especial

compuesto de: un disco circular que se fija sobre la superficie de la mezcla a compactarse; un martillo en forma de cilindro hueco que se desliza a lo largo de una guía y cae sobre el disco; el peso del martillo es de 10 libras y la altura de caída libre es de 18".

Para el diseño de esta mezcla se aplicaron 75 golpes por cada cara de la briqueta en la compactación, proyectadas para vías de tráfico pesado y se fabricaron 18 briquetas. El molde, conteniendo la briqueta se dejó enfriar a temperatura ambiente durante una media hora y luego se extrajo la briqueta mediante un gato hidráulico.

Figura 3.33: Elaboración y compactado de las briquetas.



Fuente: Elaboración propia

3.7.4 Rotura de briquetas

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

Procedimiento

Una vez extraídas las briquetas de los moldes y dejado enfriar 24 horas, se procede primero a medir con un vernier las alturas en cuatro puntos de la briqueta y de esta manera determinar su altura media que será corregida mediante un factor de corrección.

Figura 3.34: Medición de las alturas de la briqueta.



Fuente: Elaboración propia.

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

Figura 3.35: Briqueta sumergida en agua.



Fuente: Elaboración propia.

Se limpian perfectamente las superficies interiores de las mordazas. La temperatura de las mismas se debe mantener entre 21°C y 38°C (70 a 100°F). Si es inferior, deberán calentarse en baño de agua hasta alcanzar la temperatura indicada. Se lubrican las varillas de guía con una película delgada de aceite de tal forma que la mordaza superior se deslice

fácilmente sin pegarse. Se debe verificar previamente a la aplicación de la carga que el indicador del dial del anillo de carga se encuentre en la posición correspondiente a cero. Se coloca la briqueta en las mordazas y aplica la carga, a una velocidad de deformación constante de 50,8mm por minuto hasta que se produce la rotura. El punto de rotura se define por la carga máxima obtenida. El número total de libras necesarias para producir la rotura de la muestra a 60°C (150°F) se anota como valor de estabilidad Marshall.

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

Figura 3.36: Ensayo de Estabilidad y Fluencia.



Fuente: Elaboración propia.

3.7.5 Datos y resultados de propiedades Marshall

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

Tabla 3.92: Propiedades volumétricas de la mezcla con 2% filler

N° de probeta	% de asfalto		Altura promedio de probeta	Peso briqueta			Volumen	Densidad briqueta			% de vacíos		
	Base mezcla	Base agregados		Seco	Sat. sup. seca	Sumergida en agua	Probeta	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betún vacíos)
1	4,50	4,71	6,49	1194,1	1195,5	671	524,5	2,28	2,30	2,52	9,00	19,15	53,01
2			6,45	1183,0	1184,4	677	507,4	2,33					
3			6,47	1188,6	1190,0	669	521,0	2,28					
4	5,00	5,26	6,45	1199,2	1200,7	688	512,7	2,34	2,33	2,50	6,96	18,39	62,18
5			6,39	1181,2	1181,8	679	502,8	2,35					
6			6,42	1190,2	1191,3	673	518,3	2,30					
7	5,50	5,82	6,26	1167,4	1168,5	675	493,5	2,37	2,34	2,48	5,49	18,16	69,78
8			6,40	1176,3	1177,1	671	506,1	2,32					
9			6,33	1171,9	1172,8	673	499,8	2,34					
10	6,00	6,38	6,39	1197,7	1197,9	695	502,9	2,38	2,36	2,46	4,15	18,04	77,02
11			6,46	1207,2	1207,5	697	510,5	2,36					
12			6,43	1202,5	1202,7	686	516,7	2,33					
13	6,50	6,95	6,15	1158,0	1158,6	663	495,6	2,34	2,35	2,44	3,47	18,50	81,23
14			6,20	1163,3	1164,3	664	500,3	2,33					
15			6,17	1160,7	1161,5	678	483,5	2,40					
16	7,00	7,53	6,22	1152,2	1153,2	663	490,2	2,35	2,34	2,42	3,42	19,47	82,46
17			6,42	1205,1	1205,6	690	515,6	2,34					
18			6,32	1178,7	1179,4	671	508,4	2,32					
Especificaciones			mínimo						3	13	75		
			máximo						5	-	82		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.93: Estabilidad y fluencia de la mezcla con 2% filler

N° de probeta	% de asfalto		Estabilidad Marshall					Fluencia	
	Base mezcla	Base agregados	Lectura del dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
1	4,50	4,71	832	2222,19	0,97	2144,41	2474,11	9	9,33
2			1009	2698,81	0,98	2631,34		10	
3			1020	2728,43	0,97	2646,58		9	
4	5,00	5,26	1167	3124,28	0,98	3046,17	2943,52	8	8,33
5			1172	3137,74	0,99	3106,36		9	
6			1019	2725,74	0,98	2678,04		8	
7	5,50	5,82	1169	3129,66	1,02	3204,77	3167,91	9	9,67
8			1151	3081,19	0,99	3042,68		10	
9			1210	3240,07	1,01	3256,27		10	
10	6,00	6,38	1297	3474,34	0,99	3439,60	3151,10	13	11,33
11			1135	3038,11	0,97	2954,56		10	
12			1166	3121,58	0,98	3059,15		11	
13	6,50	6,95	1030	2755,36	1,06	2909,66	2867,00	13	13,33
14			1015	2714,97	1,04	2823,57		15	
15			1022	2733,82	1,05	2867,78		12	
16	7,00	7,53	607	1616,31	1,04	1672,88	1935,15	17	15,00
17			836	2232,96	0,98	2193,88		15	
18			721	1923,29	1,01	1938,67		13	
Especificaciones			mínimo			1800			8
			máximo			-			16

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.94: Propiedades volumétricas de la mezcla con 4% filler

N° de probeta	% de asfalto		Altura promedio de probeta	Peso briqueta			Volumen	Densidad briqueta			% de vacíos				
	Base mezcla	Base agregados		Seco	Sat. sup. seca	Sumergida en agua	Probeta	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betún vacíos)		
														grs.	grs.
1	4,50	4,71	6,24	1173,8	1175,9	675	500,9	2,34	2,34	2,52	7,18	17,53	59,06		
2			6,47	1223,2	1224,7	702	522,7	2,34							
3			6,35	1198,5	1200,3	689	511,3	2,34							
4	5,00	5,26	6,18	1156,4	1158,6	671	487,6	2,37	2,36	2,50	5,51	17,12	67,83		
5			6,25	1164,1	1166,2	672	494,2	2,36							
6			6,21	1160,3	1162,4	672	490,4	2,37							
7	5,50	5,82	6,35	1197,2	1198,0	690	508,0	2,36	2,38	2,48	4,26	17,10	75,06		
8			6,54	1246,4	1247,5	720	527,5	2,36							
9			6,45	1221,8	1222,8	715	507,8	2,41							
10	6,00	6,38	6,10	1141,4	1142,8	673	469,8	2,43	2,37	2,46	3,50	17,49	80,01		
11			6,36	1185,9	1186,8	679	507,8	2,34							
12			6,23	1163,7	1164,8	671	493,8	2,36							
13	6,50	6,95	5,96	1132,9	1133,5	665	468,5	2,42	2,37	2,44	2,96	18,07	83,61		
14			6,37	1197,5	1198,4	685	513,4	2,33							
15			6,17	1165,2	1166,0	670	496,0	2,35							
16	7,00	7,53	6,20	1164,2	1164,9	671	493,9	2,36	2,36	2,42	2,38	18,61	87,20		
17			6,15	1158,4	1159,1	669	490,1	2,36							
18			6,17	1161,3	1162,0	670	492,0	2,36							
Especificaciones			mínimo						3			13		75	
			máximo						5			-		82	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.95: Estabilidad y fluencia de la mezcla con 4% filler

N° de probeta	% de asfalto		Estabilidad Marshall					Fluencia		
	Base mezcla	Base agregados	Lectura del dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio	
										mm
1	4,50	4,71	1078	2884,62	1,03	2968,27	2918,80	12	12,33	
2			1173	3140,43	0,97	3046,22		13		
3			1025	2741,90	1,00	2741,90		12		
4	5,00	5,26	1235	3307,39	1,05	3459,53	3288,71	9	10,00	
5			1168	3126,97	1,03	3211,40		11		
6			1151	3081,19	1,04	3195,20		10		
7	5,50	5,82	1364	3654,76	1,00	3654,76	3515,81	9	10,00	
8			1340	3590,13	0,95	3426,42		10		
9			1327	3555,12	0,98	3466,25		11		
10	6,00	6,38	1273	3409,71	1,07	3651,80	3457,03	12	11,00	
11			1190	3186,21	1,00	3178,25		10		
12			1281	3431,26	1,03	3541,06		11		
13	6,50	6,95	1064	2846,92	1,12	3174,31	3008,29	12	12,67	
14			1003	2682,66	1,00	2669,24		14		
15			1133	3032,72	1,05	3181,32		12		
16	7,00	7,53	627	1670,16	1,04	1736,97	2010,03	13	14,67	
17			810	2162,95	1,06	2284,07		16		
18			718	1915,21	1,05	2009,05		15		
Especificaciones			mínimo			1800			8	
			máximo			-			16	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.96: Propiedades volumétricas de la mezcla con 6% filler

N° de probeta	% de asfalto		Altura promedio de probeta	Peso briqueta			Volumen	Densidad briqueta			% de vacíos				
	Base mezcla	Base agregados		Seco	Sat. Sup. Seca	Sumergida en agua	Probeta	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betún vacíos)		
														grs.	grs.
1	4,50	4,71	6,15	1166,2	1168,7	672	496,7	2,35	2,37	2,52	6,16	16,62	62,93		
2			6,18	1182,8	1183,8	688	495,8	2,39							
3			6,17	1174,5	1176,3	680	496,3	2,37							
4	5,00	5,26	6,18	1184,6	1185,5	689	496,5	2,39	2,39	2,50	4,54	16,26	72,11		
5			6,19	1184,4	1185,5	690	495,5	2,39							
6			6,19	1184,5	1185,5	689	496,5	2,39							
7	5,50	5,82	6,13	1173,3	1173,9	684	489,9	2,39	2,40	2,48	3,38	16,32	79,29		
8			6,13	1177,5	1178,7	687	491,7	2,39							
9			6,13	1175,4	1176,3	686	490,3	2,40							
10	6,00	6,38	6,40	1219,3	1220,0	709	511,0	2,39	2,40	2,46	2,44	16,57	85,29		
11			6,22	1195,5	1196,2	701	495,2	2,41							
12			6,31	1207,4	1208,1	704	504,1	2,40							
13	6,50	6,95	6,20	1179,5	1180,8	686	494,8	2,38	2,39	2,44	2,09	17,33	87,94		
14			6,26	1196,0	1196,6	696	500,6	2,39							
15			6,23	1187,8	1188,7	691	497,7	2,39							
16	7,00	7,53	6,37	1200,2	1200,8	694	506,8	2,37	2,37	2,42	1,99	18,28	89,09		
17			6,15	1153,5	1154,3	667	487,3	2,37							
18			6,26	1176,9	1177,6	681	496,6	2,37							
Especificaciones			mínimo						3			13		75	
			máximo						5			-		82	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.97: Estabilidad y fluencia de la mezcla con 6% filler

N° de probeta	% de asfalto		Estabilidad Marshall					Fluencia		
	Base mezcla	Base agregados	Lectura del dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio	
										mm
1	4,50	4,71	1216	3256,22	1,06	3438,57	3334,60	11	10,67	
2			1155	3091,96	1,05	3234,19		10		
3			1186	3175,44	1,05	3331,04		11		
4	5,00	5,26	1304	3493,19	1,05	3653,88	3597,27	9	10,33	
5			1302	3487,80	1,04	3637,78		11		
6			1253	3355,86	1,04	3500,16		11		
7	5,50	5,82	1277	3420,48	1,06	3632,55	3665,92	11	10,67	
8			1367	3662,84	1,06	3889,93		12		
9			1222	3272,38	1,06	3475,27		9		
10	6,00	6,38	1271	3404,33	0,99	3361,77	3320,25	16	13,00	
11			1248	3342,39	1,04	3459,38		11		
12			1160	3105,43	1,01	3139,59		12		
13	6,50	6,95	908	2426,84	1,04	2523,91	2557,75	17	15,67	
14			846	2259,89	1,02	2314,12		16		
15			1027	2747,28	1,03	2835,20		14		
16	7,00	7,53	853	2278,74	1,00	2267,34	1792,43	24	22,00	
17			467	1239,32	1,06	1308,72		22		
18			660	1759,03	1,02	1801,24		20		
Especificaciones			mínimo			1800			8	
			máximo			-			16	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.98: Propiedades volumétricas de la mezcla con 8% filler

N° de probeta	% de asfalto		Altura promedio de probeta	Peso briqueta			Volumen	Densidad briqueta			% de vacíos		
	Base mezcla	Base agregados		Seco	Sat. sup. seca	Sumergida en agua	Probeta	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betún vacíos)
1	4,50	4,71	6,24	1200,9	1202,1	705	497,1	2,42	2,41	2,52	4,34	15,01	71,07
2			6,28	1205,4	1206,6	706	500,6	2,41					
3			6,26	1203,2	1204,4	706	498,4	2,41					
4	5,00	5,26	6,21	1191,2	1192,3	697	495,3	2,41	2,42	2,50	3,31	15,19	78,20
5			6,20	1206,9	1207,5	711	496,5	2,43					
6			6,20	1199,1	1199,9	704	495,9	2,42					
7	5,50	5,82	6,30	1212,8	1213,5	711	502,5	2,41	2,42	2,48	2,36	15,44	84,72
8			6,24	1209,8	1210,5	713	497,5	2,43					
9			6,27	1211,3	1212,0	711	501,0	2,42					
10	6,00	6,38	6,10	1171,0	1171,7	686	485,7	2,41	2,42	2,46	1,72	15,96	89,21
11			6,04	1164,3	1164,9	684	480,9	2,42					
12			6,07	1167,7	1168,3	685	483,3	2,42					
13	6,50	6,95	6,19	1176,2	1176,6	685	491,6	2,39	2,40	2,44	1,60	16,91	90,56
14			6,10	1165,2	1165,6	681	484,6	2,40					
15			6,15	1170,7	1171,1	683	488,1	2,40					
16	7,00	7,53	6,32	1202,4	1202,8	696	506,8	2,37	2,38	2,42	1,59	17,94	91,16
17			6,09	1152,8	1153,5	670	483,5	2,38					
18			6,20	1177,6	1178,2	683	495,2	2,38					
Especificaciones			mínimo						3	13	75		
			máximo						5	-	82		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.99: Estabilidad y fluencia de la mezcla con 8% filler

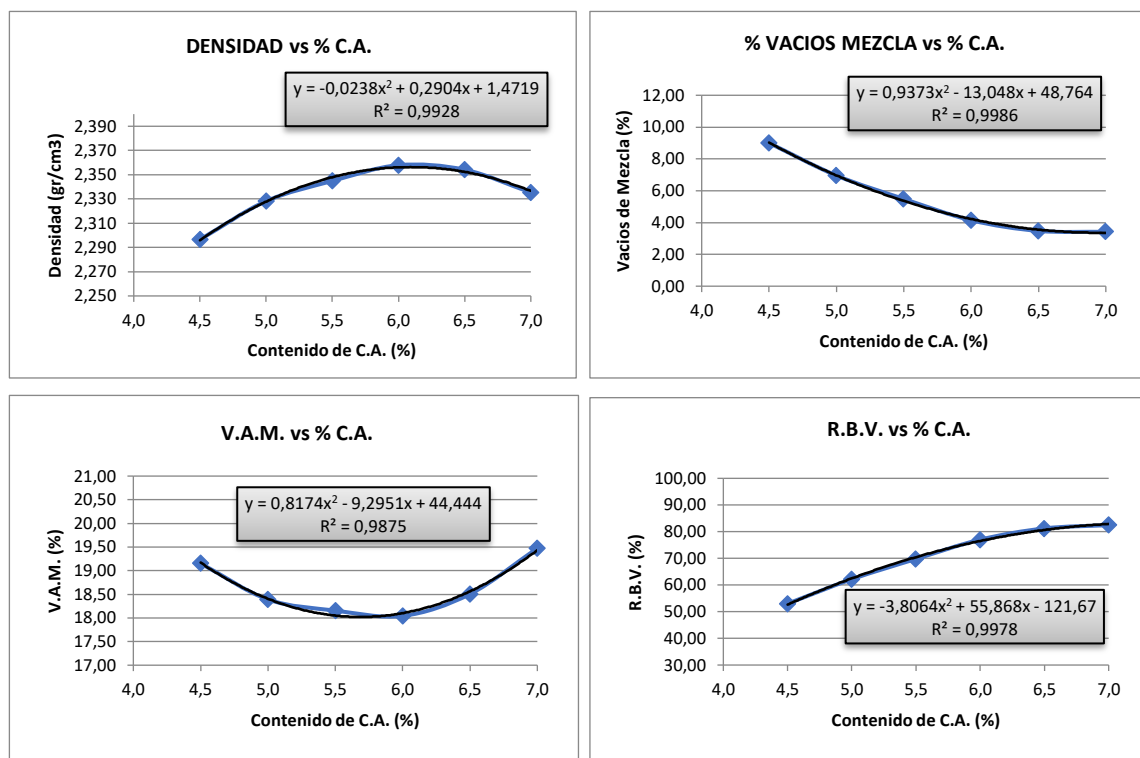
N° de probeta	% de asfalto		Estabilidad Marshall					Fluencia	
	Base mezcla	Base agregados	Lectura del dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
1	4,50	4,71	1267	3393,56	1,03	3491,97	3299,55	13	13,00
2			1039	2779,60	1,02	2832,41		12	
3			1303	3490,50	1,02	3574,27		14	
4	5,00	5,26	1256	3363,94	1,04	3488,40	3745,31	13	12,33
5			1501	4023,67	1,04	4184,62		12	
6			1279	3425,87	1,04	3562,90		12	
7	5,50	5,82	1219	3264,30	1,01	3306,74	3771,36	13	14,00
8			1536	4117,92	1,03	4237,34		14	
9			1378	3692,46	1,02	3770,00		15	
10	6,00	6,38	1069	2860,38	1,07	3063,47	3153,83	19	16,33
11			1145	3065,03	1,09	3340,89		14	
12			1057	2828,07	1,08	3057,14		16	
13	6,50	6,95	644	1715,94	1,04	1789,73	2292,67	19	19,00
14			846	2259,89	1,07	2420,34		18	
15			945	2526,47	1,06	2667,96		20	
16	7,00	7,53	540	1435,89	1,01	1447,38	1462,81	27	23,00
17			518	1376,65	1,07	1478,52		19	
18			529	1406,27	1,04	1462,52		23	
Especificaciones			mínimo			1800			8
			máximo			-			16

Fuente: Elaboración propia.

3.7.6 Determinación de porcentaje óptimo de cemento asfáltico

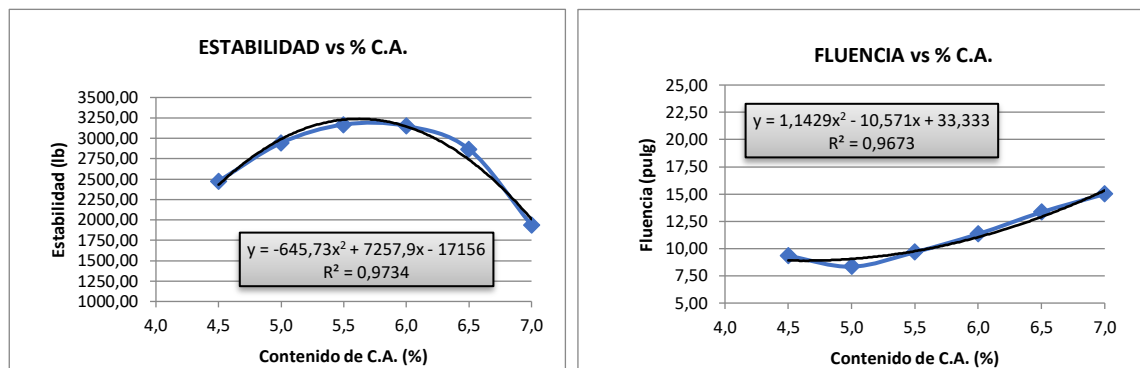
Según los resultados obtenidos de las tablas de propiedades Marshall, se procede a graficar en el eje X, los porcentajes de cemento asfáltico y en el eje Y, los valores de las propiedades Marshall, para cada porcentaje de filler, como se muestra a continuación:

Gráfico 3.24: Curvas de propiedades volumétricas Marshall para 2 % filler



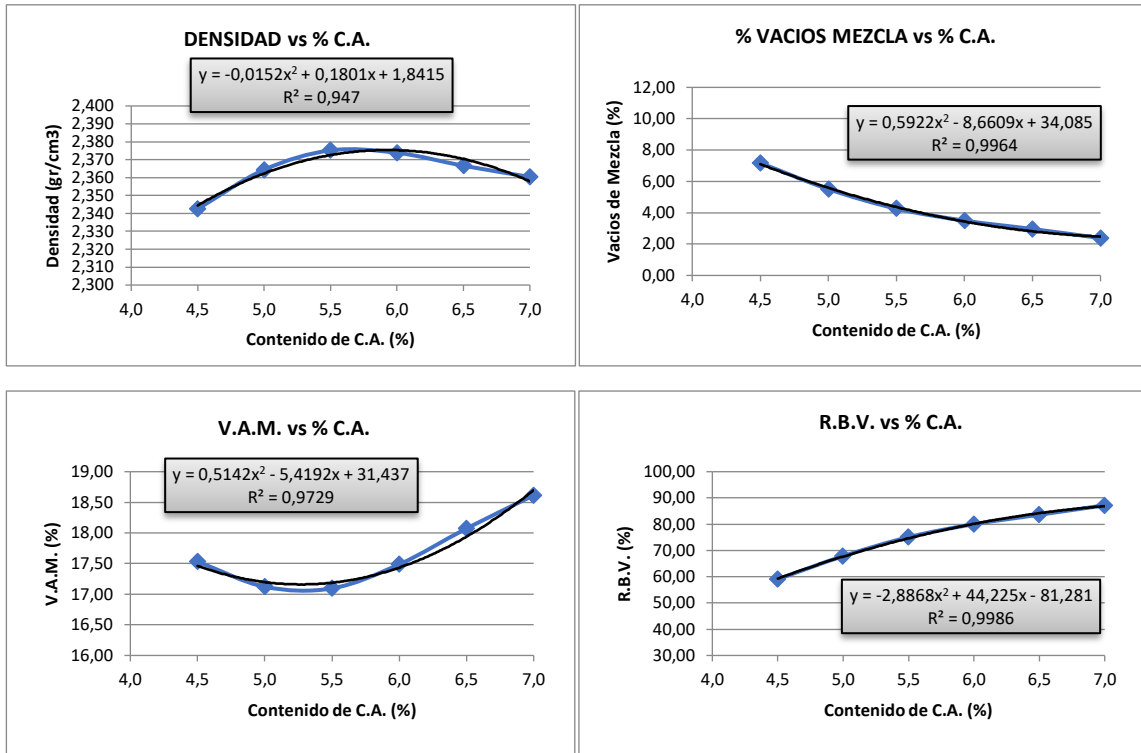
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.25: Curvas de estabilidad y fluencia Marshall para 2 % filler



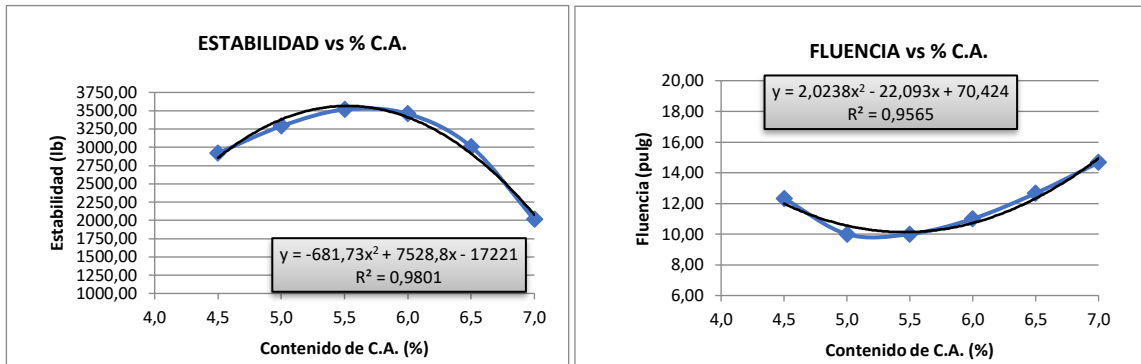
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.26: Curvas de propiedades volumétricas Marshall para 4 % filler



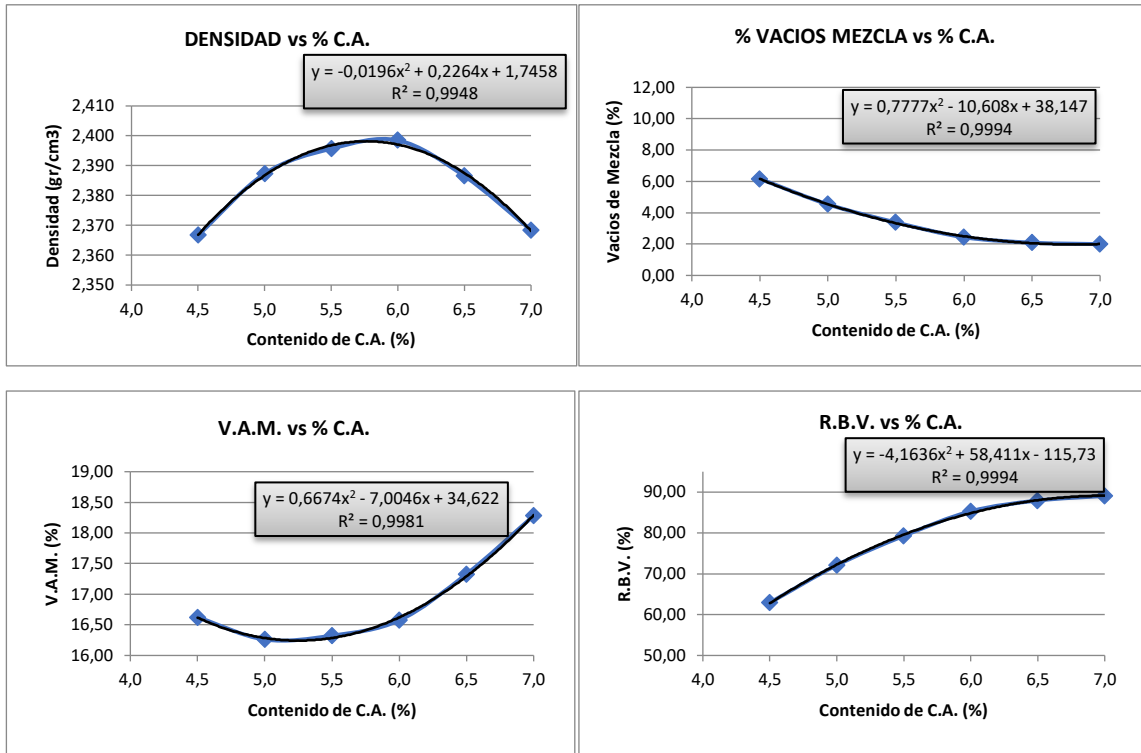
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.27: Curvas de estabilidad y fluencia Marshall para 4 % filler



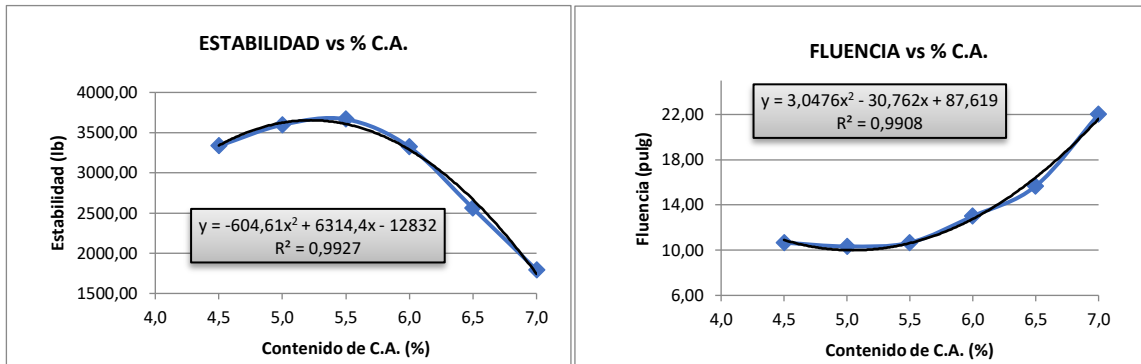
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.28: Curvas de propiedades volumétricas Marshall para 6 % filler

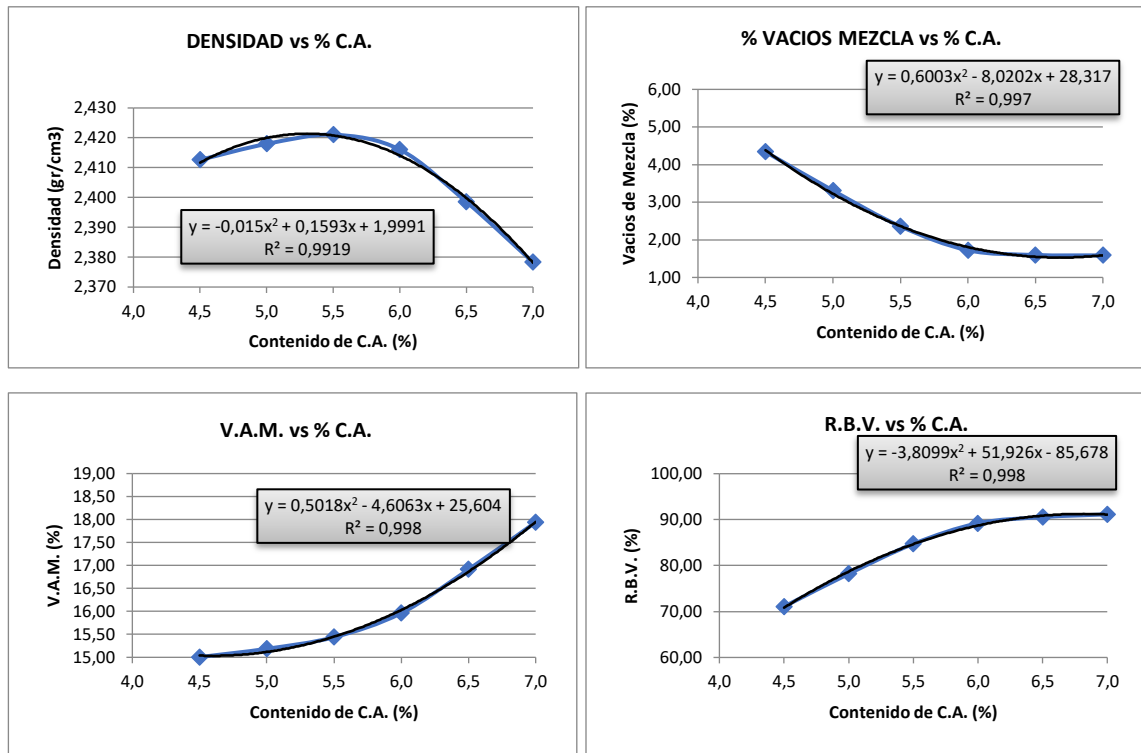


Fuente: Elaboración propia.

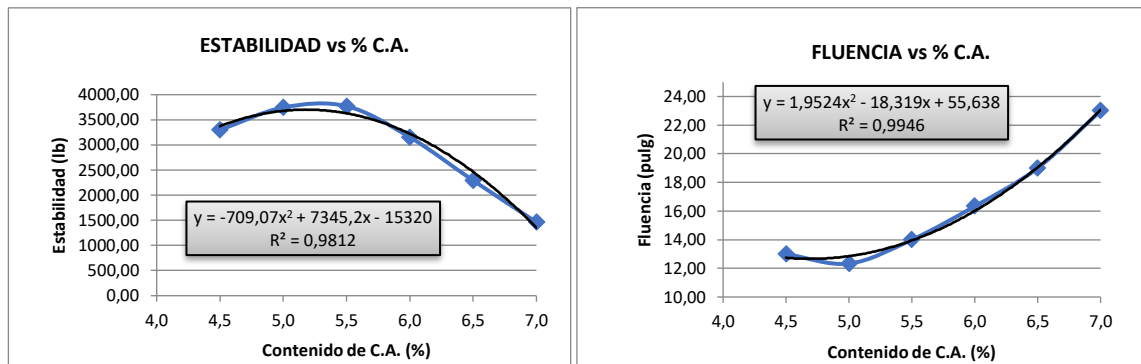
Gráfico 3.29: Curvas de estabilidad y fluencia Marshall para 6 % filler



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.30: Curvas de propiedades volumétricas Marshall para 8 % filler

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.31: Curvas de estabilidad y fluencia Marshall para 8 % filler

Fuente: Elaboración propia.

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

- Porcentaje de cemento asfáltico que genere la densidad máxima.
- Porcentaje de cemento asfáltico que genere la estabilidad máxima.

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

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

Tabla 3.100: Porcentaje óptimo de cemento asfáltico para mezcla con 2 % filler.

Propiedad Marshall	Valor de diseño	% de C.A.
Estabilidad máxima (Lb)	3238,40	5,62
Densidad máxima (gr/cm ³)	2,36	6,10
Vacíos de la mezcla (%)	4,00	6,08
% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%) =	5,93

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.101: Porcentaje óptimo de cemento asfáltico para mezcla con 4 % filler.

Propiedad Marshall	Valor de diseño	% de C.A.
Estabilidad máxima (Lb)	3565,39	5,52
Densidad máxima (gr/cm ³)	2,37	5,92
Vacíos de la mezcla (%)	4,00	5,64
% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%) =	5,70

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.102: Porcentaje óptimo de cemento asfáltico para mezcla con 6 % filler.

Propiedad Marshall	Valor de diseño	% de C.A.
Estabilidad máxima (Lb)	3654,52	5,22
Densidad máxima (gr/cm ³)	2,40	5,78
Vacíos de la mezcla (%)	4,00	5,18
% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%) =	5,39

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.103: Porcentaje óptimo de cemento asfáltico para mezcla con 8 % filler.

Propiedad Marshall	Valor de diseño	% de C.A.
Estabilidad máxima (Lb)	3702,09	5,18
Densidad máxima (gr/cm ³)	2,42	5,31
Vacíos de la mezcla (%)	4,00	4,62
% Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio (%) =	5,04

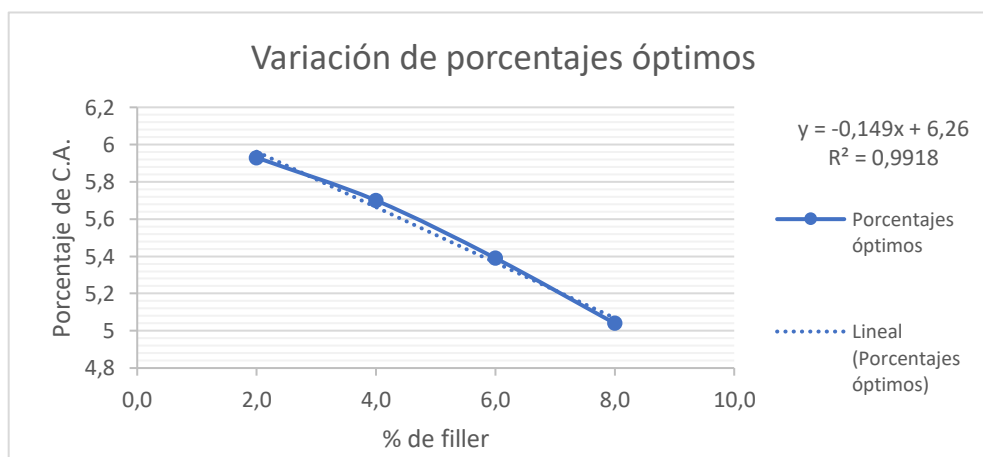
Fuente: Elaboración propia.

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

Tabla 3.104: Resumen porcentaje óptimos de cemento asfáltico para cada mezcla.

Diseño de mezcla según % de filler	% óptimo de cemento asfáltico
2 %	5,93
4 %	5,70
6 %	5,39
8 %.	5,04

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.32: Variación de porcentajes óptimos según los porcentajes de filler.

Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 3.32, se observa claramente el comportamiento del contenido óptimo de cemento asfáltico para cada porcentaje de filler, con una tendencia descendente.

CAPÍTULO IV

EVALUACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON ARCILLAS ESTABILIZADAS TÉRMICAMENTE

CAPÍTULO IV
EVALUACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON ARCILLAS
ESTABILIZADAS TÉRMICAMENTE

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

Los resultados obtenidos de la caracterización de los agregados, arcilla estabilizada térmicamente y cemento asfáltico, son comparados con las especificaciones propuestas por la norma ASTM.

Tabla 4.1: Resultados de la caracterización de los agregados pétreos.

Ensayo	Agregados	Especificación		Resultado	ASTM
		Mín.	Máx.		
Peso específico y absorción de agua en agregados gruesos	Grava 3/4"	-	-	2,71 gr/cm ³	C-127
	Gravilla 3/8"	-	-	2,72 gr/cm ³	
Peso específico y absorción de agua en agregados finos	Arena	-	-	2,73 gr/cm ³	C-128
Peso unitario compactado	Grava 3/4"	-	-	1,456 gr/cm ³	C-29
	Gravilla 3/8"	-	-	1,473 gr/cm ³	
	Arena	-	-	1,788 gr/cm ³	
Equivalente de arena	Arena	50%	-	80,68%	D-2419
Porcentaje de caras fracturadas	Grava 3/4"	75%	-	78,40%	D-5821
	Gravilla 3/8"	75%	-	79,00%	
Desgaste mediante la máquina de los Ángeles	Grava 3/4"	-	35%	12,18%	C-131
	Gravilla 3/8"	-	35%	16,30%	
Determinación de partículas largas y achatadas	Grava 3/4"	-	10%	6,18%	D-4791
	Gravilla 3/8"	-	10%	4,22%	
Peso específico de arcillas	Banco 1	-	-	2,634 gr/cm ³	D-854
	Banco 2	-	-	2,428 gr/cm ³	
	Banco 3	-	-	2,748 gr/cm ³	
Hidrómetro de arcillas	Banco 1	-	-	51,98%	D-422
	Banco 2	-	-	54,44%	
	Banco 3	-	-	52,08%	
Límite líquido de arcillas	Banco 1	-	-	51%	D-4318
	Banco 2	-	-	58%	
	Banco 3	-	-	56%	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.2: Resultados de los ensayos de caracterización del cemento asfáltico.

Ensayo	Especificación		Resultado	Norma
	Mínimo	Máximo		
Peso específico	1	1,05	1,018 gr/cm ³	ASTM D-70
Punto de ablandamiento	41,4	53,2	48 °C	ASTM D-36
Punto de inflamación	232	-	276 °C	ASTM D-92
Penetración	85	100	99 mm	ASTM D-5
Ductilidad	100	-	106 cm	ASTM D-102

Fuente: Elaboración propia.

4.2. Diseño de mezclas asfálticas con arcilla estabilizada térmicamente

Luego de realizar el diseño de una mezcla asfáltica con variación de porcentajes de filler natural y obtener el porcentaje óptimo de cemento asfáltico para cada porcentaje de filler (2%, 4%, 6% y 8%), se procede a estudiar tres bancos de arcilla que fue estabilizada térmicamente en laboratorio a una temperatura de 500°C, a diferentes horas de estabilización (1hr, 2hr y 3 hr). Por lo tanto, las nuevas dosificaciones para los bancos 1, 2 y 3 por igual de arcillas estabilizadas térmicamente son:

Tabla 4.3: Dosificación con porcentajes óptimos para cada porcentaje de filler.

	Contenidos óptimos para:			
	2% filler	4% filler	6% filler	8% filler
Contenido óptimo cemento asfáltico (%)	5,93%	5,70%	5,39%	5,04%
Porcentaje de agregado (%)	94,07%	94,30%	94,61%	94,96%
Ponderación de grava (%)	30	30	30	30
Ponderación de gravilla (%)	20	20	20	20
Ponderación de arena (%)	48	46	44	42
Ponderación de filler (%)	2	4	6	8
Peso de cemento asfáltico (gr)	71,16	68,40	64,68	60,48
Peso de grava (gr)	338,65	339,48	340,60	341,86
Peso de gravilla (gr)	225,77	226,32	227,06	227,90
Peso de arena (gr)	541,84	520,54	499,54	478,60
Peso de filler (gr)	22,58	45,26	68,12	91,16
Peso total de la briqueta (gr)	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

4.2.1 Resultados de propiedades Marshall con arcilla estabilizada térmicamente

Luego de realizar las briquetas con el mismo procedimiento que se mencionó en el anterior capítulo, se obtuvieron datos y resultados de las propiedades volumétricas, estabilidad y fluencia del método Marshall, como se muestra en las siguientes planillas:

Tabla 4.4: Propiedades volumétricas para 2% filler estabilizada térmicamente 1hr.

N° de probeta	Banco de filler	% de asfalto		Peso briqueta	Volumen	Densidad			Vacíos							
		Base mezcla	Base agregados			Altura de probeta	Seco	Sat. sup. seca	Sumergida en agua	Probeta	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado)	R.B.V. (relación betún vacíos)
1	B1	5,93	6,30	6,36	1187,5	1188,3	684	504,3	2,35	2,390	2,46	2,87	16,80	82,89		
2				6,53	1168,6	1169,7	687	482,7	2,42							
3				6,44	1175,9	1176,9	686	490,9	2,40							
4	B2	5,93	6,30	6,47	1168,4	1170,1	652	518,1	2,26	2,281	2,46	7,19	20,48	64,87		
5				6,38	1178,4	1180,8	670	510,8	2,31							
6				6,42	1173,4	1175,5	661	514,5	2,28							
7	B3	5,93	6,30	6,54	1156,1	1158,2	684	474,2	2,44	2,295	2,46	6,82	20,19	66,22		
8				6,35	1120,4	1128,0	620	508,0	2,21							
9				6,49	1168,3	1173,1	652	521,1	2,24							
10	BN	5,93	6,30	6,22	1174,3	1176,3	683	493,3	2,38	2,375	2,46	3,57	17,41	79,46		
11				6,24	1173,8	1175,8	680	495,8	2,37							
12				6,23	1174,1	1176,1	682	494,1	2,38							
Especificaciones				mínimo									3	13	75	
				máximo									5	-	82	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.5: Estabilidad y fluencia para 2% filler estabilizada térmicamente 1hr.

N° de probeta	Banco de filler	% de asfalto		Estabilidad				Fluencia		
		Base mezcla	Base agregados	Lectura del dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
1	B1	5,93	6,30	1052	2814,6	1,00	2807,57	3012,2	8	9,00
2				1254	3358,5	0,96	3211,78		10	
3				1153	3086,6	0,98	3017,13		9	
4	B2	5,93	6,30	671	1788,6	0,97	1734,99	2061,3	15	14,33
5				900	2405,3	0,99	2387,26		14	
6				786	2098,3	0,98	2061,60		14	
7	B3	5,93	6,30	738	1969,1	0,95	1879,28	1482,4	12	11,00
8				412	1091,2	1,00	1091,21		10	
9				575	1530,1	0,97	1476,58		11	
10	BN	5,93	6,30	1228	3288,5	1,04	3403,64	3110,9	11	10,00
11				1024	2739,2	1,03	2818,64		9	
12				1126	3013,9	1,03	3110,32		10	
Especificaciones				mínimo				1800	8	
				máximo				-	16	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.6: Propiedades volumétricas para 2% filler estabilizada térmicamente 2hr.

N° de probeta	Banco de filler	% de asfalto		Altura de probeta	Peso briqueta			Volumen	Densidad			Vacíos			
		Base mezcla	Base agregados		Seco	Sat. sup. seca	Sumergida en agua		Probeta	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado)	R.B.V. (relación betún vacíos)
1	B1	5,93	6,30	6,69	1162,7	1163,6	679	484,6	2,40	2,442	2,46	0,77	15,00	94,84	
2				6,61	1193,4	1194,6	714	480,6	2,48						
3				6,65	1178,1	1179,1	697	482,1	2,44						
4	B2	5,93	6,30	6,33	1196,8	1198,2	686	512,2	2,34	2,424	2,46	1,38	15,50	91,11	
5				6,43	1155,0	1156,9	688	468,9	2,46						
6				6,38	1150,9	1152,6	687	465,6	2,47						
7	B3	5,93	6,30	6,33	1166,0	1167,7	659	508,7	2,29	2,330	2,46	5,39	18,96	71,59	
8				6,58	1151,8	1154,2	677	477,2	2,41						
9				6,46	1183,9	1186,0	668	518,0	2,29						
10	BN	5,93	6,30	6,22	1174,3	1176,3	683	493,3	2,38	2,375	2,46	3,57	17,41	79,46	
11				6,24	1173,8	1175,8	680	495,8	2,37						
12				6,23	1174,1	1176,1	682	494,1	2,38						
Especificaciones				mínimo								3	13	75	
				máximo								5	-	82	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.7: Estabilidad y fluencia para 2% filler estabilizada térmicamente 2hr.

N° de probeta	Banco de filler	% de asfalto		Estabilidad					Fluencia	
		Base mezcla	Base agregados	Lectura del dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
1	B1	5,93	6,30	759	2025,61	0,93	1873,69	2244,56	7	8,00
2				1039	2779,6	0,94	2616,44		9	
3				899	2402,61	0,93	2243,55		8	
4	B2	5,93	6,30	1139	3048,88	1,01	3064,12	2929,73	12	10,00
5				1066	2852,3	0,98	2795,26		8	
6				1103	2951,94	0,99	2929,80		10	
7	B3	5,93	6,30	895	2391,83	1,01	2403,79	2338,43	10	9,00
8				900	2405,3	0,95	2277,58		8	
9				898	2399,91	0,97	2333,92		9	
10	BN	5,93	6,30	1228	3288,54	1,04	3403,64	3110,86	11	10,00
11				1024	2739,21	1,03	2818,64		9	
12				1126	3013,87	1,03	3110,32		10	
Especificaciones				mínimo				1800		8
				máximo				-		16

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.8: Propiedades volumétricas para 2% filler estabilizada térmicamente 3hr.

N° de probeta	Banco de filler	% de asfalto		Altura de probeta	Peso briqueta			Volumen	Densidad			Vacíos			
		Base mezcla	Base agregados		Seco	Sat. sup. seca	Sumergida en agua		Probeta	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado)	R.B.V. (relación betún vacíos)
1	B1	5,93	6,30	6,38	1199,3	1200,5	684	516,5	2,32	2,339	2,46	4,96	18,58	73,32	
2				6,34	1190,6	1191,4	688	503,4	2,37						
3				6,36	1200,0	1201,0	686	515,0	2,33						
4	B2	5,93	6,30	6,31	1170,1	1170,6	664	506,6	2,31	2,347	2,46	4,50	18,17	75,23	
5				6,55	1194,8	1195,5	700	495,5	2,41						
6				6,43	1197,5	1198,1	682	516,1	2,32						
7	B3	5,93	6,30	6,19	1161,4	1163,3	668	495,3	2,34	2,332	2,46	5,31	18,90	71,90	
8				6,31	1176,7	1177,2	670	507,2	2,32						
9				6,25	1169,1	1170,3	669	501,3	2,33						
10	BN	5,93	6,30	6,22	1174,3	1176,3	683	493,3	2,38	2,375	2,46	3,57	17,41	79,46	
11				6,24	1173,8	1175,8	680	495,8	2,37						
12				6,23	1174,1	1176,1	682	494,1	2,38						
Especificaciones				mínimo								3	13	75	
				máximo								5	-	82	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.9: Estabilidad y fluencia para 2% filler estabilizada térmicamente 3hr.

N° de probeta	Banco de filler	% de asfalto		Estabilidad					Fluencia	
		Base mezcla	Base agregados	Lectura del dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
1	B1	5,93	6,30	988	2642,27	0,99	2622,45	2478,83	10	11,67
2				871	2327,21	1,00	2334,19		13	
3				930	2486,08	1,00	2479,87		12	
4	B2	5,93	6,30	851	2273,35	1,01	2298,36	2737,24	12	13,00
5				1242	3326,24	0,95	3168,24		14	
6				1047	2801,14	0,98	2745,12		13	
7	B3	5,93	6,30	1032	2760,75	1,04	2879,46	2549,76	12	9,67
8				823	2197,95	1,01	2222,13		7	
9				928	2480,7	1,03	2547,68		10	
10	BN	5,93	6,30	1228	3288,54	1,04	3403,64	3110,86	11	10,00
11				1024	2739,21	1,03	2818,64		9	
12				1126	3013,87	1,03	3110,32		10	
Especificaciones				mínimo				1800		8
				máximo				-		16

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.10: Propiedades volumétricas para 4% filler estabilizada térmicamente 1hr.

N° de probeta	Banco de filler	% de asfalto		Altura de probeta	Peso briqueta			Volumen	Densidad			Vacíos			
		Base mezcla	Base agregados		Seco	Sat. sup. seca	Sumergida en agua		Probeta	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado)	R.B.V. (relación betún vacíos)
1	B1	5,70	6,04	6,26	1163,8	1166,2	662	504,2	2,31	2,321	2,47	5,99	18,98	68,47	
2				5,93	1108,5	1110,1	635	475,1	2,33						
3				6,09	1136,2	1138,2	649	489,2	2,32						
4	B2	5,70	6,04	6,59	1195,1	1196,1	716	480,1	2,49	2,429	2,46	1,36	14,96	90,89	
5				6,31	1198,5	1199,9	692	507,9	2,36						
6				6,45	1191,8	1193,0	704	489,0	2,44						
7	B3	5,70	6,04	6,78	1182,5	1184,3	713	471,3	2,51	2,448	2,47	1,02	14,73	93,07	
8				6,34	1190,9	1192,2	684	508,2	2,34						
9				6,56	1181,7	1183,3	709	474,3	2,49						
10	BN	5,70	6,04	6,27	1197,9	1199,4	700	499,4	2,40	2,409	2,47	2,56	16,05	84,05	
11				6,21	1192,3	1194,7	702	492,7	2,42						
12				6,24	1195,1	1197,1	701	496,1	2,41						
Especificaciones				mínimo								3	13	75	
				máximo								5	-	82	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.11: Estabilidad y fluencia para 4% filler estabilizada térmicamente 1hr.

N° de probeta	Banco de filler	% de asfalto		Estabilidad				Fluencia		
		Base mezcla	Base agregados	Lectura del dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
1	B1	5,70	6,04	978	2615,34	1,02	2678,11	2483,48	12	11,67
2				945	2526,47	1,12	2839,76		11	
3				675	1799,42	1,07	1932,58		12	
4	B2	5,70	6,04	1132	3030,03	0,95	2863,38	2949,58	11	10,67
5				1124	3008,49	1,01	3041,58		10	
6				1128	3019,26	0,98	2943,78		11	
7	B3	5,70	6,04	1141	3054,26	0,90	2756,47	2600,01	15	13,67
8				909	2429,53	1,00	2436,82		12	
9				1025	2741,9	0,95	2606,72		14	
10	BN	5,70	6,04	1233	3302	1,02	3371,34	3355,98	14	14,00
11				1203	3221,22	1,04	3340,40		14	
12				1218	3261,61	1,03	3356,20		14	
Especificaciones				mínimo				1800		8
				máximo				-		16

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.12: Propiedades volumétricas para 4% filler estabilizada térmicamente 2hr.

N° de probeta	Banco de filler	% de asfalto		Altura de probeta	Peso briqueta			Volumen	Densidad			Vacíos			
		Base mezcla	Base agregados		Seco	Sat. sup. seca	Sumergida en agua		Probeta	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado)	R.B.V. (relación betún vacíos)
1	B1	5,70	6,04	6,27	1181,9	1183,2	680	503,2	2,35	2,357	2,47	4,55	17,74	74,38	
2				6,39	1210,5	1211,2	699	512,2	2,36						
3				6,33	1196,2	1197,2	690	507,2	2,36						
4	B2	5,70	6,04	6,13	1156,9	1159,6	665	494,6	2,34	2,339	2,46	5,02	18,12	72,28	
5				6,44	1212,4	1213,5	695	518,5	2,34						
6				6,28	1184,7	1186,6	680	506,6	2,34						
7	B3	5,70	6,04	6,27	1178,3	1180,5	675	505,5	2,33	2,342	2,47	5,30	18,41	71,22	
8				6,26	1185,5	1188,1	684	504,1	2,35						
9				6,27	1181,9	1184,3	680	504,3	2,34						
10	BN	5,70	6,04	6,27	1197,9	1199,4	700	499,4	2,40	2,409	2,47	2,56	16,05	84,05	
11				6,21	1192,3	1194,7	702	492,7	2,42						
12				6,24	1195,1	1197,1	701	496,1	2,41						
Especificaciones				mínimo								3	13	75	
				máximo								5	-	82	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.13: Estabilidad y fluencia para 4% filler estabilizada térmicamente 2hr.

N° de probeta	Banco de filler	% de asfalto		Estabilidad					Fluencia	
		Base mezcla	Base agregados	Lectura del dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
1	B1	5,70	6,04	900	2405,3	1,02	2455,81	2669,1	11	11,67
2				1087	2908,85	0,99	2879,76		12	
3				994	2658,42	1,01	2671,71		12	
4	B2	5,70	6,04	971	2596,49	1,06	2757,47	2675,61	9	10,67
5				992	2653,04	0,98	2593,34		12	
6				982	2626,11	1,02	2676,00		11	
7	B3	5,70	6,04	883	2359,52	1,02	2409,07	2626,3	8	9,67
8				1039	2779,6	1,02	2846,31		11	
9				961	2569,56	1,02	2623,52		10	
10	BN	5,70	6,04	1233	3302	1,02	3371,34	3355,98	14	14,00
11				1203	3221,22	1,04	3340,40		14	
12				1218	3261,61	1,03	3356,20		14	
Especificaciones				mínimo				1800	8	
				máximo				-	16	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.14: Propiedades volumétricas para 4% filler estabilizada térmicamente 3hr.

N° de probeta	Banco de filler	% de asfalto		Altura de probeta	Peso briqueta			Volumen	Densidad			Vacíos			
		Base mezcla	Base agregados		Seco	Sat. sup. seca	Sumergida en agua		Probeta	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado)	R.B.V. (relación betún vacíos)
1	B1	5,70	6,04	6,24	1168,8	1169,6	669	500,6	2,33	2,364	2,47	4,27	17,50	75,62	
2				6,50	1191,7	1192,8	700	492,8	2,42						
3				6,37	1195,3	1196,2	685	511,2	2,34						
4	B2	5,70	6,04	6,29	1164,6	1166,2	660	506,2	2,30	2,340	2,46	4,97	18,07	72,49	
5				6,49	1180,3	1182,6	692	490,6	2,41						
6				6,39	1187,5	1189,4	676	513,4	2,31						
7	B3	5,70	6,04	6,28	1187,6	1188,0	685	503,0	2,36	2,349	2,47	5,01	18,17	72,40	
8				6,36	1190,3	1191,6	682	509,6	2,34						
9				6,32	1189,0	1189,8	684	505,8	2,35						
10	BN	5,70	6,04	6,27	1197,9	1199,4	700	499,4	2,40	2,409	2,47	2,56	16,05	84,05	
11				6,21	1192,3	1194,7	702	492,7	2,42						
12				6,24	1195,1	1197,1	701	496,1	2,41						
Especificaciones				mínimo									3	13	75
				máximo									5	-	82

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.15: Estabilidad y fluencia para 4% filler estabilizada térmicamente 3hr.

N° de probeta	Banco de filler	% de asfalto		Estabilidad					Fluencia	
		Base mezcla	Base agregados	Lectura del dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
1	B1	5,70	6,04	918	2453,77	1,03	2524,93	2397,31	8	9,67
2				883	2359,52	0,96	2271,04			
3				901	2407,99	1,00	2395,95			
4	B2	5,70	6,04	729	1944,83	1,02	1975,95	2185,51	10	10,67
5				927	2478	0,97	2391,27			
6				828	2211,42	0,99	2189,30			
7	B3	5,70	6,04	899	2402,61	1,02	2448,26	2206,59	15	15,00
8				739	1971,76	1,00	1966,83			
9				819	2187,18	1,01	2204,68			
10	BN	5,70	6,04	1233	3302	1,02	3371,34	3355,98	14	14,00
11				1203	3221,22	1,04	3340,40			
12				1218	3261,61	1,03	3356,20			
Especificaciones				mínimo				1800	8	
				máximo				-	16	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.16: Propiedades volumétricas para 6% filler estabilizada térmicamente 1hr.

N° de probeta	Banco de filler	% de asfalto		Altura de probeta	Peso briqueta			Volumen	Densidad			Vacíos			
		Base mezcla	Base agregados		Seco	Sat. sup. seca	Sumergida en agua		Probeta	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado)	R.B.V. (relación betún vacíos)
1	B1	5,39	5,70	6,20	1178,6	1179,1	685	494,1	2,39	2,380	2,48	4,08	16,68	75,53	
2				6,23	1184,4	1185,1	686	499,1	2,37						
3				6,21	1181,5	1182,1	686	496,1	2,38						
4	B2	5,39	5,70	6,25	1165,1	1167,0	665	502,0	2,32	2,337	2,47	5,50	17,87	69,21	
5				6,34	1190,7	1195,2	689	506,2	2,35						
6				6,29	1177,9	1181,1	677	504,1	2,34						
7	B3	5,39	5,70	6,28	1150,6	1153,3	651	502,3	2,29	2,374	2,49	4,52	17,09	73,56	
8				6,45	1166,8	1167,9	702	465,9	2,50						
9				6,37	1183,7	1185,6	677	508,6	2,33						
10	BN	5,39	5,70	6,24	1164,3	1167,4	674	493,4	2,36	2,381	2,49	4,20	16,81	75,01	
11				6,19	1179,1	1180,7	690	490,7	2,40						
12				6,21	1171,7	1174,1	682	492,1	2,38						
Especificaciones				mínimo								3	13	75	
				máximo								5	-	82	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.17: Estabilidad y fluencia para 6% filler estabilizada térmicamente 1hr.

N° de probeta	Banco de filler	% de asfalto		Estabilidad					Fluencia	
		Base mezcla	Base agregados	Lectura del dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
1	B1	5,39	5,70	996	2663,81	1,04	2770,36	3085,33	14	13,67
2				1229	3291,23	1,03	3396,55		13	
3				1113	2978,87	1,04	3089,08		14	
4	B2	5,39	5,70	1147	3070,42	1,03	3153,32	3157,29	9	10,00
5				1176	3148,51	1,00	3157,96		11	
6				1162	3110,81	1,02	3160,59		10	
7	B3	5,39	5,70	843	2251,81	1,02	2294,59	2563,41	8	7,67
8				1085	2903,47	0,98	2830,88		7	
9				964	2577,64	1,00	2564,75		8	
10	BN	5,39	5,70	940	2513,01	1,03	2585,89	2718,31	13	11,67
11				1021	2731,13	1,04	2848,57		10	
12				981	2623,42	1,04	2720,48		12	
Especificaciones				mínimo				1800	8	
				máximo				-	16	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.18: Propiedades volumétricas para 6% filler estabilizada térmicamente 2hr.

N° de probeta	Banco de filler	% de asfalto		Altura de probeta	Peso briqueta			Volumen	Densidad			Vacíos			
		Base mezcla	Base agregados		Seco	Sat. sup. seca	Sumergida en agua		Probeta	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado)	R.B.V. (relación betún vacíos)
1	B1	5,39	5,70	6,14	1152,0	1156,6	672	484,6	2,38	2,379	2,48	4,11	16,71	75,38	
2				6,24	1180,0	1183,5	688	495,5	2,38						
3				6,19	1166,0	1170,1	680	490,1	2,38						
4	B2	5,39	5,70	6,35	1197,4	1201,4	697	504,4	2,37	2,365	2,47	4,37	16,89	74,15	
5				6,32	1188,1	1191,4	687	504,4	2,36						
6				6,33	1192,8	1196,4	692	504,4	2,36						
7	B3	5,39	5,70	6,18	1163,8	1166,0	677	489,0	2,38	2,337	2,49	6,01	18,38	67,31	
8				6,48	1182,8	1186,4	671	515,4	2,29						
9				6,33	1173,3	1176,2	674	502,2	2,34						
10	BN	5,39	5,70	6,24	1164,3	1167,4	674	493,4	2,36	2,381	2,49	4,20	16,81	75,01	
11				6,19	1179,1	1180,7	690	490,7	2,40						
12				6,21	1171,7	1174,1	682	492,1	2,38						
Especificaciones				mínimo								3	13	75	
				máximo								5	-	82	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.19: Estabilidad y fluencia para 6% filler estabilizada térmicamente 2hr.

N° de probeta	Banco de filler	% de asfalto		Estabilidad					Fluencia	
		Base mezcla	Base agregados	Lectura del dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
1	B1	5,39	5,70	1215	3253,53	1,06	3445,49	3583,95	19	17,67
2				1350	3617,06	1,03	3721,95		16	
3				1283	3436,64	1,04	3584,42		18	
4	B2	5,39	5,70	1061	2838,84	1,00	2838,84	2984,01	18	16,67
5				1159	3102,73	1,01	3127,56		15	
6				1110	2970,79	1,01	2985,64		17	
7	B3	5,39	5,70	982	2626,11	1,05	2746,91	2396,88	16	15,00
8				796	2125,25	0,97	2056,18		14	
9				889	2375,68	1,01	2387,56		15	
10	BN	5,39	5,70	940	2513,01	1,03	2585,89	2718,31	13	11,67
11				1021	2731,13	1,04	2848,57		10	
12				981	2623,42	1,04	2720,48		12	
Especificaciones				mínimo				1800	8	
				máximo				-	16	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.20: Propiedades volumétricas para 6% filler estabilizada térmicamente 3hr.

N° de probeta	Banco de filler	% de asfalto		Altura de probeta	Peso briqueta			Volumen	Densidad			Vacíos			
		Base mezcla	Base agregados		Seco	Sat. sup. seca	Sumergida en agua		Probeta	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado)	R.B.V. (relación betún vacíos)
1	B1	5,39	5,70	6,31	1205,0	1207,0	705	502,0	2,40	2,383	2,48	3,96	16,58	76,10	
2				6,35	1193,2	1196,7	692	504,7	2,36						
3				6,33	1199,1	1201,9	699	502,9	2,38						
4	B2	5,39	5,70	6,16	1184,4	1187,3	695	492,3	2,41	2,394	2,47	3,17	15,84	80,01	
5				6,30	1202,2	1204,8	700	504,8	2,38						
6				6,23	1193,3	1196,1	698	498,1	2,40						
7	B3	5,39	5,70	6,13	1177,1	1179,3	689	490,3	2,40	2,379	2,49	4,32	16,92	74,45	
8				6,25	1184,4	1189,4	687	502,4	2,36						
9				6,19	1180,8	1184,4	688	496,4	2,38						
10	BN	5,39	5,70	6,24	1164,3	1167,4	674	493,4	2,36	2,381	2,49	4,20	16,81	75,01	
11				6,19	1179,1	1180,7	690	490,7	2,40						
12				6,21	1171,7	1174,1	682	492,1	2,38						
Especificaciones				mínimo								3	13	75	
				máximo								5	-	82	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.21: Estabilidad y fluencia para 6% filler estabilizada térmicamente 3hr.

N° de probeta	Banco de filler	% de asfalto		Estabilidad					Fluencia	
		Base mezcla	Base agregados	Lectura del dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
1	B1	5,39	5,70	1260	3374,71	1,01	3411,83	3181,42	18	17,67
2				1103	2951,94	1,00	2951,94			
3				1182	3164,67	1,01	3180,49			
4	B2	5,39	5,70	1380	3697,84	1,05	3893,83	3878,12	16	16,00
5				1423	3813,63	1,01	3863,21			
6				1402	3757,08	1,03	3877,31			
7	B3	5,39	5,70	1150	3078,5	1,06	3269,37	2871,11	18	17,00
8				903	2413,38	1,03	2478,54			
9				1027	2747,28	1,04	2865,42			
10	BN	5,39	5,70	940	2513,01	1,03	2585,89	2718,31	13	11,67
11				1021	2731,13	1,04	2848,57			
12				981	2623,42	1,04	2720,48			
Especificaciones				mínimo				1800	8	
				máximo				-	16	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.22: Propiedades volumétricas para 8% filler estabilizada térmicamente 1hr.

N° de probeta	Banco de filler	% de asfalto		Altura de probeta	Peso briqueta			Volumen	Densidad			Vacíos			
		Base mezcla	Base agregados		Seco	Sat. sup. seca	Sumergida en agua		Probeta	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado)	R.B.V. (relación betún vacíos)
1	B1	5,04	5,31	6,35	1187,4	1189,4	713	476,4	2,49	2,424	2,49	2,83	14,83	80,94	
2				6,15	1172,6	1176,6	685	491,6	2,39						
3				6,25	1195,0	1198,0	699	499,0	2,39						
4	B2	5,04	5,31	6,32	1176,0	1179,3	708	471,3	2,50	2,429	2,48	2,18	14,21	84,63	
5				6,15	1172,1	1176,0	686	490,0	2,39						
6				6,24	1189,1	1192,7	697	495,7	2,40						
7	B3	5,04	5,31	6,06	1169,5	1172,5	689	483,5	2,42	2,417	2,50	3,40	15,37	77,87	
8				6,13	1171,7	1173,6	688	485,6	2,41						
9				6,09	1170,6	1173,1	689	484,1	2,42						
10	BN	5,04	5,31	6,23	1173,1	1174,3	705	469,3	2,50	2,481	2,50	0,78	13,07	94,01	
11				6,26	1183,2	1184,9	702	482,9	2,45						
12				6,24	1178,2	1179,6	707	472,6	2,49						
Especificaciones				mínimo								3	13	75	
				máximo								5	-	82	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.23: Estabilidad y fluencia para 8% filler estabilizada térmicamente 1hr.

N° de probeta	Banco de filler	% de asfalto		Estabilidad					Fluencia		
		Base mezcla	Base agregados	Lectura del dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio	
											%
1	B1	5,04	5,31	1532	4107,15	1,00	4107,15	4325,03	14	14,67	
2				1606	4306,42	1,06	4547,57				15
3				1569	4206,78	1,03	4320,37				15
4	B2	5,04	5,31	1319	3533,58	1,01	3561,85	3588,61	14	15,67	
5				1280	3428,56	1,06	3620,56				17
6				1300	3482,42	1,03	3583,41				16
7	B3	5,04	5,31	1501	4023,67	1,08	4361,66	3899,64	12	13,00	
8				1209	3237,37	1,06	3438,09				14
9				1355	3630,52	1,07	3899,18				13
10	BN	5,04	5,31	1471	3942,89	1,03	4069,06	3695,55	18	17,67	
11				1211	3242,76	1,02	3320,59				17
12				1341	3592,82	1,03	3697,02				18
Especificaciones				mínimo				1800	8		
				máximo				-	16		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.24: Propiedades volumétricas para 8% filler estabilizada térmicamente 2hr.

N° de probeta	Banco de filler	% de asfalto		Altura de probeta	Peso briqueta			Volumen	Densidad			Vacíos			
		Base mezcla	Base agregados		Seco	Sat. sup. seca	Sumergida en agua		Probeta	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado)	R.B.V. (relación betún vacíos)
1	B1	5,04	5,31	6,29	1188,5	1194,5	695	499,5	2,38	2,406	2,49	3,57	15,48	76,95	
2				6,14	1178,4	1180,8	696	484,8	2,43						
3				6,22	1183,5	1187,7	696	491,7	2,41						
4	B2	5,04	5,31	6,20	1177,3	1180,9	688	492,9	2,39	2,381	2,48	4,10	15,89	74,17	
5				6,23	1189,2	1193,0	692	501,0	2,37						
6				6,22	1183,3	1187,0	690	497,0	2,38						
7	B3	5,04	5,31	6,37	1112,6	1117,0	663	454,0	2,45	2,478	2,50	0,93	13,20	92,93	
8				5,84	1113,9	1116,7	655	461,7	2,41						
9				6,10	1113,3	1116,9	684	432,9	2,57						
10	BN	5,04	5,31	6,23	1173,1	1174,3	705	469,3	2,50	2,481	2,50	0,78	13,07	94,01	
11				6,26	1183,2	1184,9	702	482,9	2,45						
12				6,24	1178,2	1179,6	707	472,6	2,49						
Especificaciones				mínimo								3	13	75	
				máximo								5	-	82	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.25: Estabilidad y fluencia para 8% filler estabilizada térmicamente 2hr.

N° de probeta	Banco de filler	% de asfalto		Estabilidad					Fluencia		
		Base mezcla	Base agregados	Lectura del dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio	
											%
1	B1	5,04	5,31	1309	3506,65	1,02	3562,76	4068,24	16	13	17,67
2				1615	4330,65	1,06	4586,16			18	
3				1462	3918,65	1,04	4055,81			22	
4	B2	5,04	5,31	1362	3649,37	1,04	3795,35	3704,43	19	16	19,00
5				1308	3503,96	1,03	3616,09			22	
6				1335	3576,67	1,04	3701,85			19	
7	B3	5,04	5,31	594	1581,3	1,00	1573,40	1548,21	15	16	15,00
8				496	1317,41	1,15	1518,97			14	
9				545	1449,35	1,07	1552,26			15	
10	BN	5,04	5,31	1471	3942,89	1,03	4069,06	3695,55	17	18	17,67
11				1211	3242,76	1,02	3320,59			18	
12				1341	3592,82	1,03	3697,02			17	
Especificaciones				mínimo				1800		8	
				máximo				-		16	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.26: Propiedades volumétricas para 8% filler estabilizada térmicamente 3hr.

N° de probeta	Banco de filler	% de asfalto		Altura de probeta	Peso briqueta			Volumen	Densidad			Vacíos			
		Base mezcla	Base agregados		Seco	Sat. sup. seca	Sumergida en agua		Probeta	Densidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M. (vacíos agregado)	R.B.V. (relación betún vacíos)
1	B1	5,04	5,31	6,37	1178,1	1183,4	703	480,4	2,45	2,463	2,49	1,28	13,47	90,52	
2				6,40	1196,8	1199,0	709	490,0	2,44						
3				6,38	1187,5	1191,2	715	476,2	2,49						
4	B2	5,04	5,31	6,29	1190,6	1193,2	704	489,2	2,43	2,410	2,48	2,95	14,88	80,18	
5				6,22	1182,7	1185,8	692	493,8	2,40						
6				6,26	1191,7	1194,5	698	496,5	2,40						
7	B3	5,04	5,31	6,11	1167,4	1172,3	683	489,3	2,39	2,387	2,50	4,60	16,41	72,00	
8				6,31	1197,5	1201,9	700	501,9	2,39						
9				6,21	1182,5	1187,1	692	495,1	2,39						
10	BN	5,04	5,31	6,23	1173,1	1174,3	705	469,3	2,50	2,481	2,50	0,78	13,07	94,01	
11				6,26	1183,2	1184,9	702	482,9	2,45						
12				6,24	1178,2	1179,6	707	472,6	2,49						
Especificaciones				mínimo								3	13	75	
				máximo								5	-	82	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.27: Estabilidad y fluencia para 8% filler estabilizada térmicamente 3hr.

N° de probeta	Banco de filler	% de asfalto		Estabilidad					Fluencia	
		Base mezcla	Base agregados	Lectura del dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia promedio
1	B1	5,04	5,31	1828	4904,22	1,00	4879,70	4833,16	13	15,67
2				1805	4842,28	0,99	4781,75			
3				1817	4874,6	0,99	4838,04			
4	B2	5,04	5,31	2048	5496,63	1,02	5584,58	5102,68	16	17,67
5				1665	4465,29	1,04	4621,58			
6				1857	4982,31	1,02	5101,88			
7	B3	5,04	5,31	1817	4874,6	1,07	5206,07	5095,12	14	16,00
8				1840	4936,53	1,01	4990,83			
9				1829	4906,91	1,04	5088,47			
10	BN	5,04	5,31	1471	3942,89	1,03	4069,06	3695,55	18	17,67
11				1211	3242,76	1,02	3320,59			
12				1341	3592,82	1,03	3697,02			
Especificaciones				mínimo				1800		8
				máximo				-		16

Fuente: Elaboración propia.

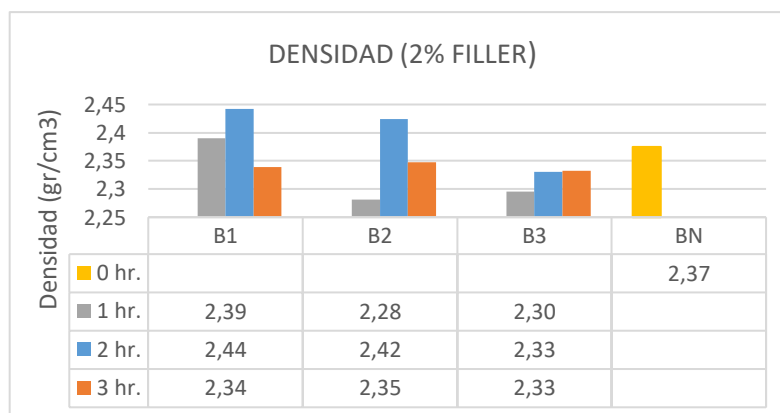
A partir de los resultados de las anteriores tablas, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 4.28: Resumen de propiedades Marshall para cada banco de arcilla según tiempo de estabilización térmica para mezcla 2% filler.

Tiempo de estabilización térmica	Banco	Densidad promedio (gr/cm ³)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)
0 hr.	BN	2,37	3,57	79,46	17,41	3110,86	10,00
1 hr.	B1	2,39	2,87	82,89	16,80	3012,16	9,00
	B2	2,28	7,19	64,87	20,48	2061,28	14,33
	B3	2,30	6,82	66,22	20,19	1482,36	11,00
2 hr.	B1	2,44	0,77	94,84	15,00	2244,56	8,00
	B2	2,42	1,38	91,11	15,50	2929,73	10,00
	B3	2,33	5,39	71,59	18,96	2338,43	9,00
3 hr.	B1	2,34	4,96	73,32	18,58	2478,83	11,67
	B2	2,35	4,50	75,23	18,17	2737,24	13,00
	B3	2,33	5,31	71,90	18,90	2549,76	9,67

Fuente: Elaboración propia.

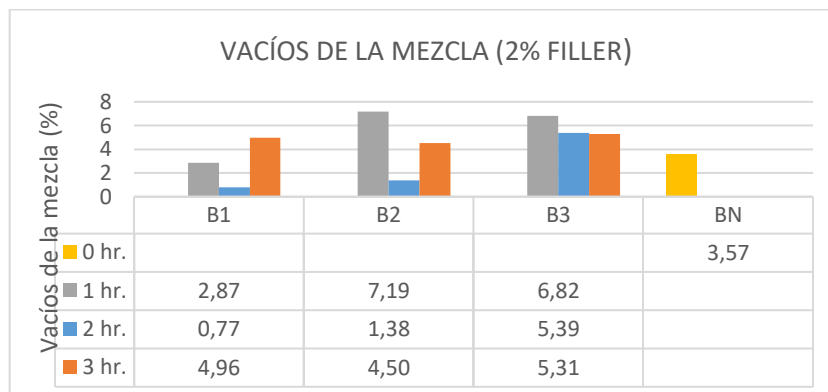
Gráfico 4.1: Valores de densidad según tiempo de estabilización de cada banco con el 2% filler.



Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 4.1 se observa un aumento considerable de densidad en los bancos 1 y 2 respecto a la densidad del banco patrón (BN). Por lo tanto, la arcilla con 2 hr de estabilización térmica del banco 1 tiene mayor densidad con 2,44 gr/cm³ y la arcilla con 1hr de estabilización térmica del banco 2 tiene menor densidad con 2,28 gr/cm³.

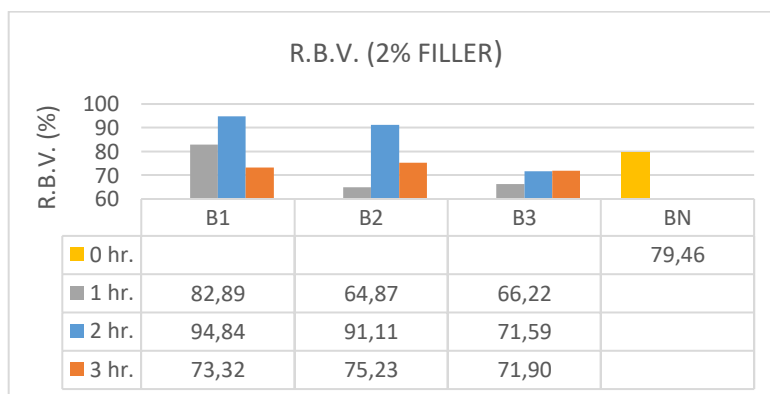
Gráfico 4.2: Valores de vacíos de la mezcla según tiempo de estabilización de cada banco con el 2% filler.



Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 4.2 se observa que la arcilla estabilizada a 2 hr del banco 1 tiene el menor porcentaje de vacíos de la mezcla con el 0,77%, sin embargo, la arcilla estabilizada a 1 hr del banco 2 tiene el mayor porcentaje de vacíos de la mezcla con el 7,19%. Pero el porcentaje más próximo al óptimo de vacíos (4%) es la arcilla del banco 2 estabilizada a 3 hr con el 4,50%.

Gráfico 4.3: Valores de relación betún vacíos según tiempo de estabilización de cada banco con el 2% filler.

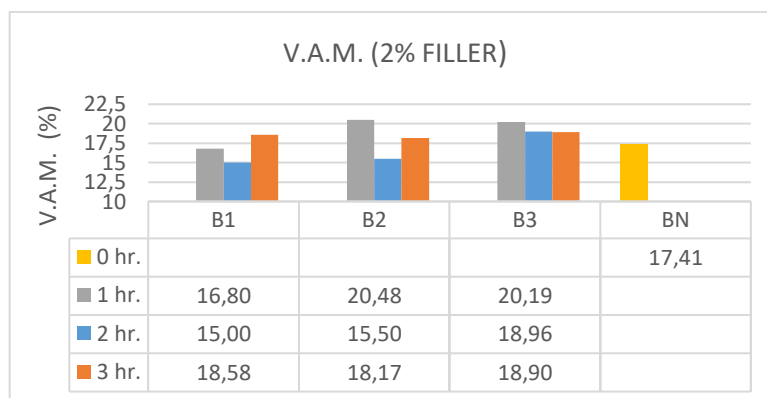


Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 4.3 se observa que la arcilla estabilizada a 2 hr del banco 1 tiene el mayor porcentaje de R.B.V. con el 94,84%, sin embargo, la arcilla estabilizada a 1 hr del banco 2 tiene el menor porcentaje de R.B.V. con el 64,87%. Quedando en medio de ambos

resultados de R.B.V. el valor del banco patrón (BN) sin estabilización térmica con el 79,46%.

Gráfico 4.4: Valores de vacíos de agregado mineral según tiempo de estabilización de cada banco con el 2% filler.

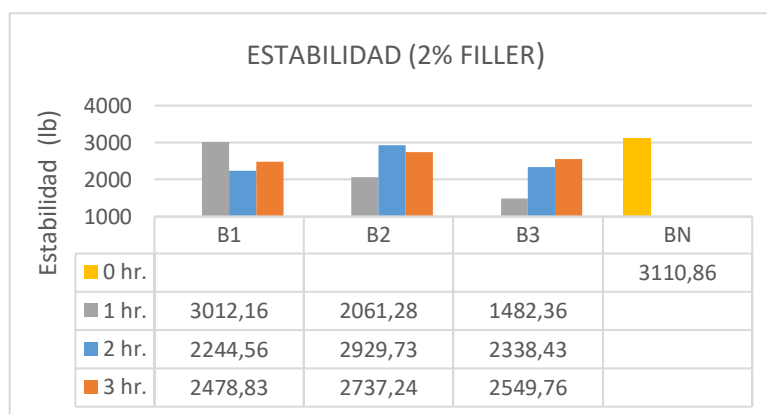


Fuente: Elaboración propia.

Del gráfico 4.4 se observan valores de V.A.M. superiores al del banco patrón (BN), como ser las arcillas estabilizadas a 1 hr del banco 2 y 3, con valores de 20,48% y 20,19% respectivamente; sin embargo, el valor de V.A.M. de la arcilla estabilizada 2 hr térmicamente, igual a 15,00% es el menor de todos.

Por otra parte, las estabilizaciones térmicas a 3 hr de los tres bancos son las que proporcionan mejores resultados muy próximos al banco natural.

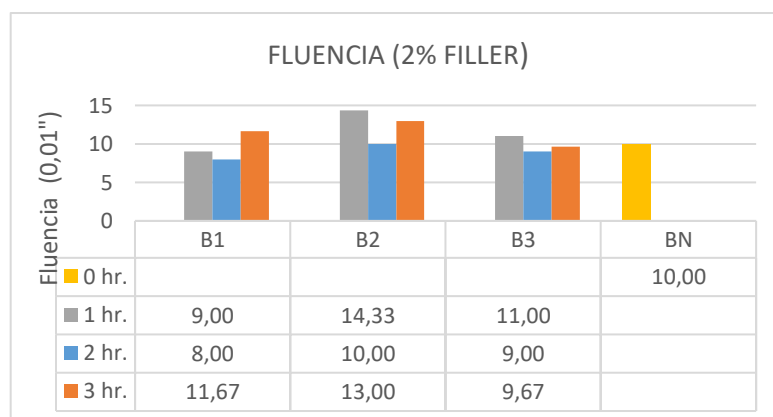
Gráfico 4.5: Valores de estabilidad según tiempo de estabilización de cada banco con el 2% filler.



Fuente: Elaboración propia.

Del gráfico 4.5 se observan valores de estabilidad, donde los bancos con arcillas estabilizadas térmicamente no superan el valor de estabilidad del banco patrón sin estabilizar igual a 3110,86 lb. Sin embargo, el mayor valor dentro de las arcillas estabilizadas térmicamente es del banco 1 a 1 hr de estabilización con el valor de 3012,16 lb y el menor valor de estabilidad igual a 1482,36 lb, lo proporciona el banco 3 con 1 hr de estabilización térmica, siendo este último un resultado que no cumple la norma con un valor mínimo de 1800 lb.

Gráfico 4.6: Valores de fluencia según tiempo de estabilización de cada banco con el 2% filler.



Fuente: Elaboración propia.

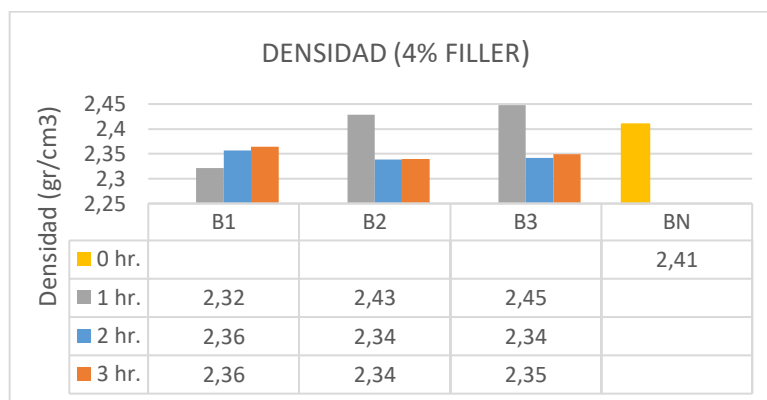
Al observar el gráfico 4.6, se observa un aumento considerable de la fluencia de las arcillas estabilizadas térmicamente, obteniendo el mayor valor de 14,33 del banco 2 a 1 hr de estabilización térmica y la menor fluencia igual a 8 de 0,01 pulg. del banco 1 a 2 hr de estabilización. Es importante resaltar que todos los resultados de fluencia están en el rango de 8 a 16 de 0,01 pulg.

Tabla 4.29: Resumen de propiedades Marshall para cada banco de arcilla según tiempo de estabilización térmica para mezcla 4% filler.

Tiempo de estabilización térmica	Banco	Densidad promedio (gr/cm ³)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)
0 hr.	BN	2,41	2,56	84,05	16,05	3355,98	14,00
1 hr.	B1	2,32	5,99	68,47	18,98	2483,48	11,67
	B2	2,43	1,36	90,89	14,96	2949,58	10,67
	B3	2,45	1,02	93,07	14,73	2600,01	13,67
2 hr.	B1	2,36	4,55	74,38	17,74	2669,10	11,67
	B2	2,34	5,02	72,28	18,12	2675,61	10,67
	B3	2,34	5,30	71,22	18,41	2626,30	9,67
3 hr.	B1	2,36	4,27	75,62	17,50	2397,31	9,67
	B2	2,34	4,97	72,49	18,07	2185,51	10,67
	B3	2,35	5,01	72,40	18,17	2206,59	15,00

Fuente: Elaboración propia.

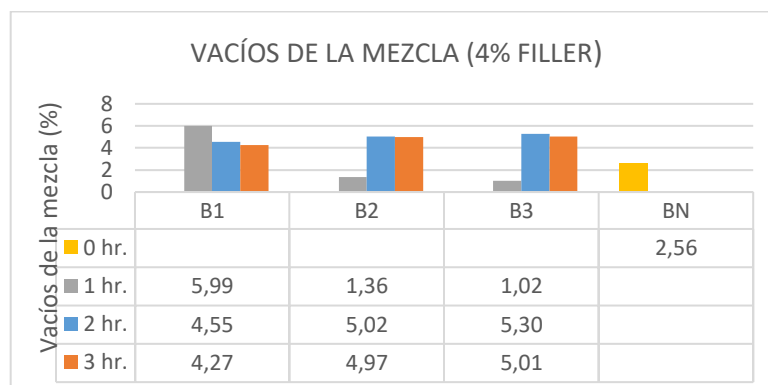
Gráfico 4.7: Valores de densidad según tiempo de estabilización de cada banco con el 4% filler.



Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 4.7 se observa un gran aumento de densidad en el banco 3 respecto a la densidad del banco patrón (BN). Por lo tanto, la arcilla con 1 hr de estabilización térmica del banco 3 tiene mayor densidad con 2,45 gr/cm³ y la arcilla con 1hr de estabilización térmica del banco 1 tiene menor densidad con 2,32 gr/cm³.

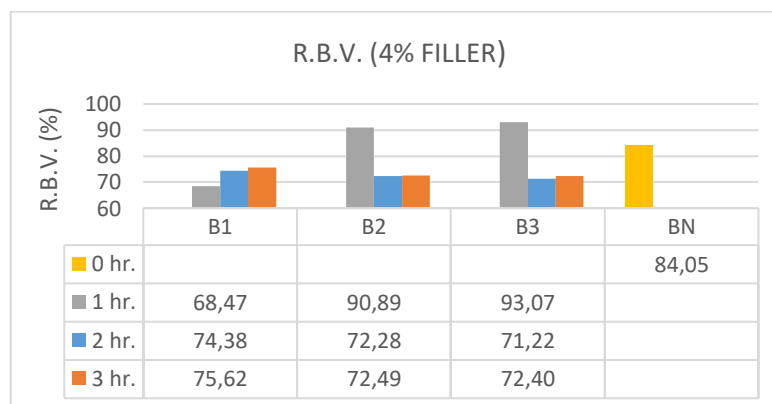
Gráfico 4.8: Valores de vacíos de la mezcla según tiempo de estabilización de cada banco con el 4% filler.



Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 4.8 se observa que la arcilla estabilizada a 1 hr del banco 3 tiene el menor porcentaje de vacíos de la mezcla con el 1,02%, sin embargo, la arcilla estabilizada a 1 hr del banco 1 tiene el mayor porcentaje de vacíos de la mezcla con el 5,99%. Pero el porcentaje más próximo al óptimo de vacíos (4%) es la arcilla del banco 1 estabilizada a 3 hr con el 4,27%.

Gráfico 4.9: Valores de relación betún vacíos según tiempo de estabilización de cada banco con el 4% filler.

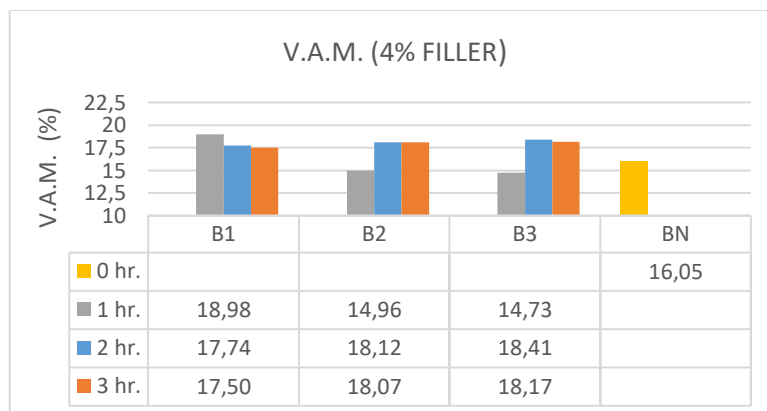


Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 4.9 se observa que la arcilla estabilizada a 1 hr del banco 3 tiene el mayor porcentaje de R.B.V. con el 93,07%, sin embargo, la arcilla estabilizada a 1 hr del banco 1 tiene el menor porcentaje de R.B.V. con el 68,47%. Siendo la más próxima al resultado

del banco patrón (BN) la arcilla estabilizada a 1 hr del banco 2 con un valor de R.B.V. igual a 90,89%.

Gráfico 4.10: Valores de vacíos de agregado mineral según tiempo de estabilización de cada banco con el 4% filler.

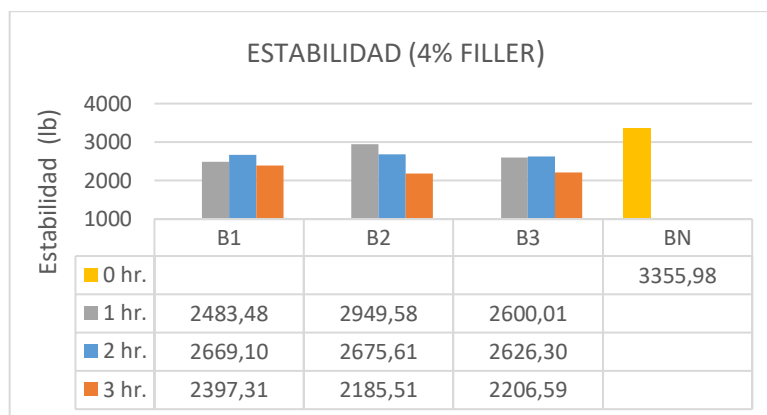


Fuente: Elaboración propia.

Del gráfico 4.10 se observan valores de V.A.M. superiores al del banco patrón (BN), los tres bancos de arcillas estabilizadas a 2 y 3 hr, sin embargo, el banco 1 obtiene el mayor porcentaje de V.A.M. a 1 hr de estabilización igual a 18,98% y el menor valor de V.A.M. es de la arcilla estabilizada 1 hr de banco 3, igual a 14,73%.

Por otra parte, las estabilizaciones térmicas a 3 hr de los tres bancos son las que proporcionan mejores resultados.

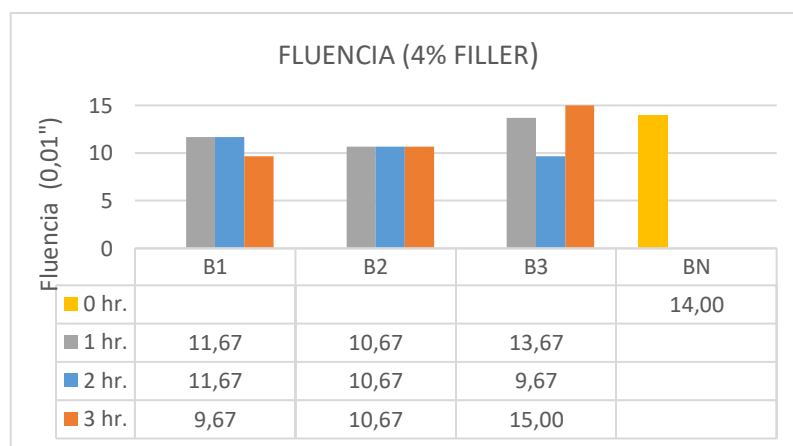
Gráfico 4.11: Valores de estabilidad según tiempo de estabilización de cada banco con el 4% filler.



Fuente: Elaboración propia.

Del gráfico 4.11 se observan valores de estabilidad, donde los bancos con arcillas estabilizadas térmicamente no superan el valor de estabilidad del banco patrón sin estabilizar igual a 3355,98 lb. Sin embargo, el mayor valor dentro de las arcillas estabilizadas térmicamente es del banco 2 a 1 hr de estabilización con el valor de 2949,58 lb y el menor valor de estabilidad igual a 2185,51 lb, lo proporciona el banco 2 con 3 hr de estabilización térmica, siendo este último un resultado que igual cumple la norma con un valor mínimo de 1800 lb.

Gráfico 4.12: Valores de fluencia según tiempo de estabilización de cada banco con el 4% filler.



Fuente: Elaboración propia.

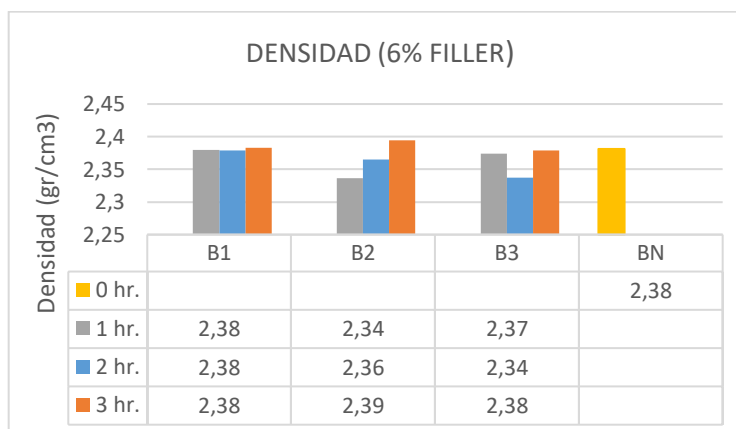
Del gráfico 4.12, se observa que no hay un aumento considerable de la fluencia de las arcillas estabilizadas térmicamente, más al contrario, reducen los valores e fluencia, obteniendo el mayor valor de 15,00 de 0,01” del banco 3 a 3 hr de estabilización térmica y la menor fluencia igual a 9,67 de 0,01 pulg. De los bancos 1 y 3 estabilizadas térmicamente a 3 y 2 hr respectivamente. Es importante resaltar que todos los resultados de fluencia están en el rango de 8 a 16 de 0,01 pulg.

Tabla 4.30: Resumen de propiedades Marshall para cada banco de arcilla según tiempo de estabilización térmica para mezcla 6% filler.

Tiempo de estabilización térmica	Banco	Densidad promedio (gr/cm ³)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)
0 hr.	BN	2,38	4,20	75,01	16,81	2718,31	11,67
1 hr.	B1	2,38	4,08	75,53	16,68	3085,33	13,67
	B2	2,34	5,50	69,21	17,87	3157,29	10,00
	B3	2,37	4,52	73,56	17,09	2563,41	7,67
2 hr.	B1	2,38	4,11	75,38	16,71	3583,95	17,67
	B2	2,36	4,37	74,15	16,89	2984,01	16,67
	B3	2,34	6,01	67,31	18,38	2396,88	15,00
3 hr.	B1	2,38	3,96	76,10	16,58	3181,42	17,67
	B2	2,39	3,17	80,01	15,84	3878,12	16,00
	B3	2,38	4,32	74,45	16,92	2871,11	17,00

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.13: Valores de densidad según tiempo de estabilización de cada banco con el 6% filler.

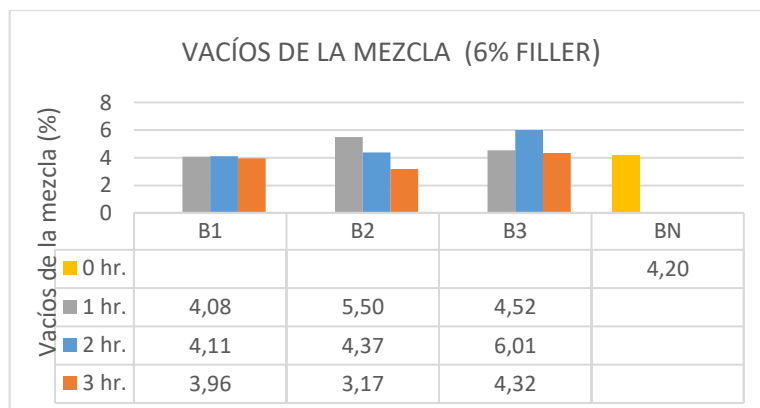


Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 4.13 se observa una constancia de densidad de los tres bancos respecto a la densidad del banco patrón (BN). Sin embargo, la arcilla con 3 hr de estabilización térmica del banco 2 tiene mayor densidad con 2,39 gr/cm³, luego las arcillas con 1hr de

estabilización térmica del banco 2 y las arcillas con 2 hr de estabilización térmica del banco 3 tienen menor densidad con $2,34 \text{ gr/cm}^3$.

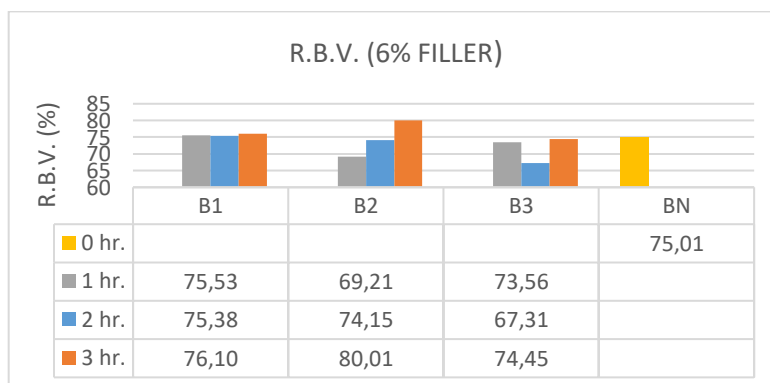
Gráfico 4.14: Valores de vacíos de la mezcla según tiempo de estabilización de cada banco con el 6% filler.



Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 4.14 se observa que la arcilla estabilizada a 2 hr del banco 3 tiene el mayor porcentaje de vacíos de la mezcla con el 4,52%; sin embargo, la arcilla estabilizada a 3 hr del banco 2 tiene el menor porcentaje de vacíos de la mezcla con el 3,17%. Pero el porcentaje más próximo al óptimo de vacíos (4%) es la arcilla del banco 1 estabilizada a 1, 2 y 3 hr con el 4,08%, 4,11% y 3,96%, respectivamente, lo que denota que este banco es el más estable.

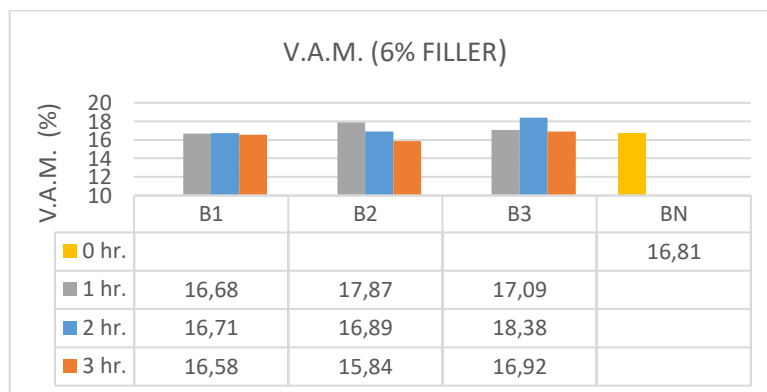
Gráfico 4.15: Valores de relación betún vacíos según tiempo de estabilización de cada banco con el 6% filler.



Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 4.15 se observa que la arcilla estabilizada a 3 hr del banco 2 tiene el mayor porcentaje de R.B.V. con el 80,01%, sin embargo, la arcilla estabilizada a 2 hr del banco 3 tiene el menor porcentaje de R.B.V. con el 67,31%. Además, se observa que el banco 1 tiene la mejor constancia en sus resultados de R.B.V.

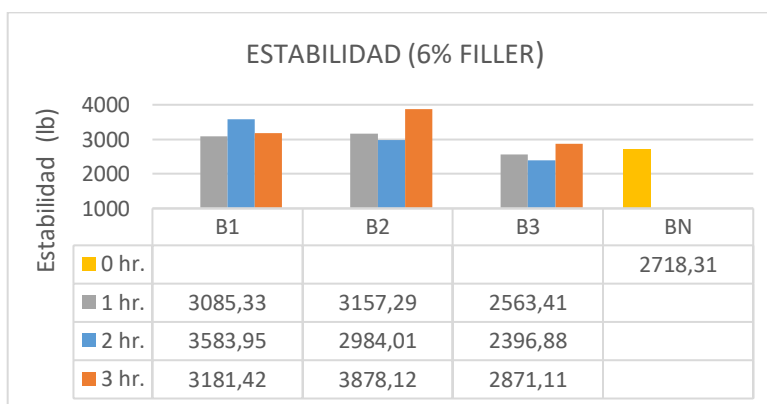
Gráfico 4.16: Valores de vacíos de agregado mineral según tiempo de estabilización de cada banco con el 6% filler.



Fuente: Elaboración propia.

Del gráfico 4.16 se observan valores de V.A.M. superiores al del banco patrón (BN), los tres bancos de arcillas estabilizadas a 1 y 2 hr, sin embargo, el banco 3 se obtiene le mayor porcentaje de V.A.M. a 2 hr de estabilización igual a 18,38% y el menor valor de V.A.M. es de la arcilla estabilizada 3 hr de banco 2, igual a 15,84%.

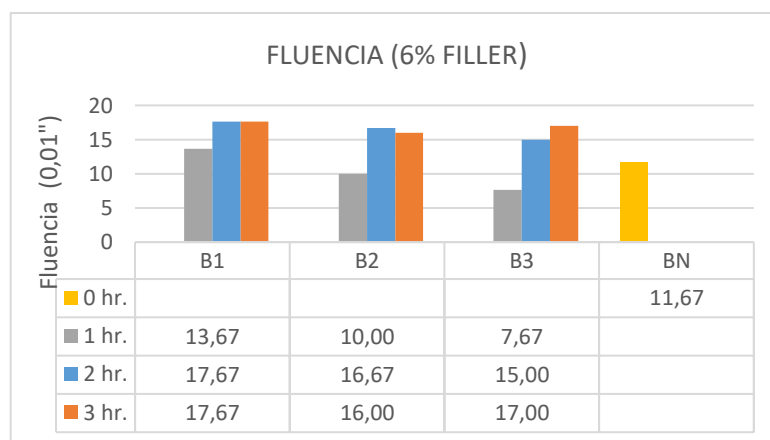
Gráfico 4.17: Valores de estabilidad según tiempo de estabilización de cada banco con el 6% filler.



Fuente: Elaboración propia.

Del gráfico 4.17 se observan valores de estabilidad, donde 2 de los 3 bancos con arcillas estabilizadas térmicamente superan el valor de estabilidad del banco patrón sin estabilizar igual a 2718,31 lb. Sin embargo, el mayor valor dentro de las arcillas estabilizadas térmicamente es del banco 2 a 3 hr de estabilización con el valor de 3157,29 lb y el menor valor de estabilidad igual a 2396,88 lb, lo proporciona el banco 3 con 2 hr de estabilización térmica; cabe resaltar que todos los resultados cumplen la norma con un valor mínimo de 1800 lb.

Gráfico 4.18: Valores de fluencia según tiempo de estabilización de cada banco con el 6% filler.



Fuente: Elaboración propia.

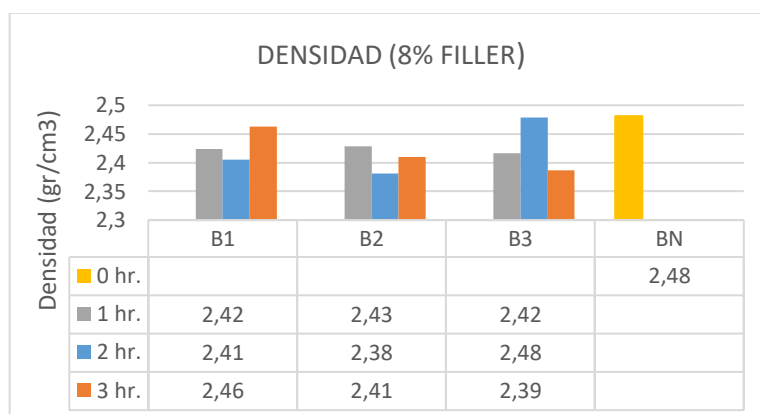
Del gráfico 4.18, se observa que hay un aumento considerable de la fluencia de las arcillas estabilizadas térmicamente, obteniendo el mayor valor de 17,67 de 0,01 pulg del banco 1 a 2 y 3 hr de estabilización térmica y la menor fluencia igual a 7,67 de 0,01 pulg. Es importante resaltar que este último resultado de fluencia no cumple la norma del rango de 8 a 16 de 0,01 pulg.

Tabla 4.31: Resumen de propiedades Marshall para cada banco de arcilla según tiempo de estabilización térmica para mezcla 8% filler.

Tiempo de estabilización térmica	Banco	Densidad promedio (gr/cm ³)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)
0 hr.	BN	2,48	0,78	94,01	13,07	3695,55	17,67
1 hr.	B1	2,42	2,83	80,94	14,83	4325,03	14,67
	B2	2,43	2,18	84,63	14,21	3588,61	15,67
	B3	2,42	3,40	77,87	15,37	3899,64	13,00
2 hr.	B1	2,41	3,57	76,95	15,48	4068,24	17,67
	B2	2,38	4,10	74,17	15,89	3704,43	19,00
	B3	2,48	0,93	92,93	13,20	1548,21	15,00
3 hr.	B1	2,46	1,28	90,52	13,47	4833,16	15,67
	B2	2,41	2,95	80,18	14,88	5102,68	17,67
	B3	2,39	4,60	72,00	16,41	5095,12	16,00

Fuente: Elaboración propia.

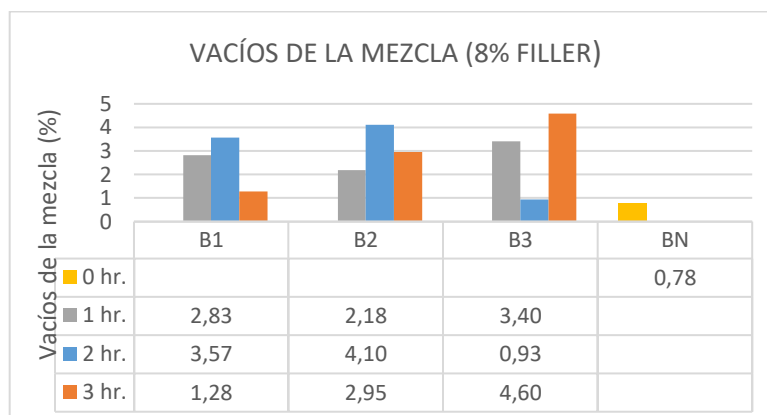
Gráfico 4.19: Valores de densidad según tiempo de estabilización de cada banco con el 8% filler.



Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 4.19 se observa un bajón de densidad de los tres bancos respecto a la densidad del banco patrón (BN). Sin embargo, la arcilla con 2 hr de estabilización térmica del banco 3 tiene mayor densidad con 2,48 gr/cm³, luego las arcillas con 2hr de estabilización térmica del banco 2 y las arcillas con 3 hr de estabilización térmica del banco 3 tienen menor densidad con 2,42 gr/cm³.

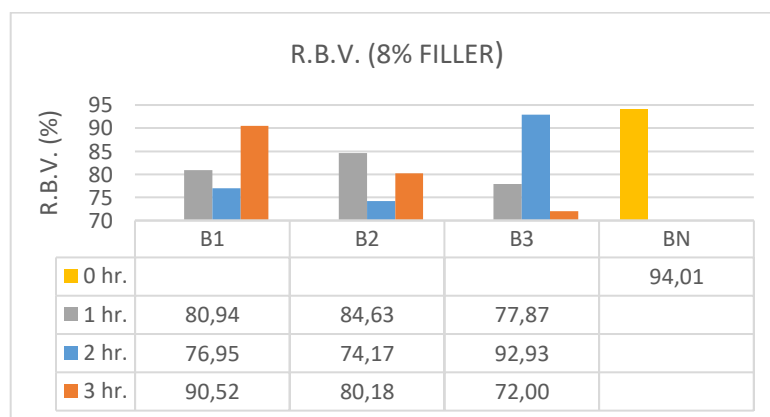
Gráfico 4.20: Valores de vacíos de la mezcla según tiempo de estabilización de cada banco con el 8% filler.



Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 4.20 se observa que la arcilla estabilizada a 3 hr del banco 3 tiene el mayor porcentaje de vacíos de la mezcla con el 4,60%; sin embargo, la arcilla estabilizada a 2 hr del banco 3 tiene el menor porcentaje de vacíos de la mezcla con el 0,93%. Pero el porcentaje más próximo al óptimo de vacíos (4%) es la arcilla del banco 2 estabilizada a 2 hr con el 4,10%.

Gráfico 4.21: Valores de relación betún vacíos según tiempo de estabilización de cada banco con el 8% filler.

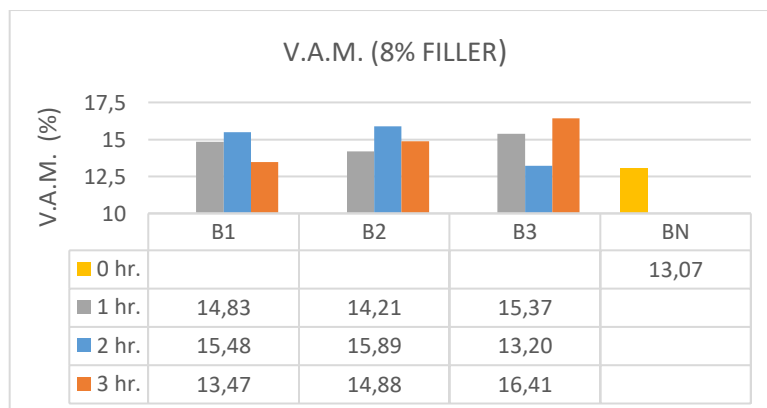


Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 4.21 se observa que la arcilla estabilizada a 2 hr del banco 3 tiene el mayor porcentaje de R.B.V. con el 92,93%, pero no supera al valor del banco patrón (BN) igual

a 94,01%, sin embargo, la arcilla estabilizada a 3 hr del mismo banco 3 tiene el menor porcentaje de R.B.V. con el 72,00%.

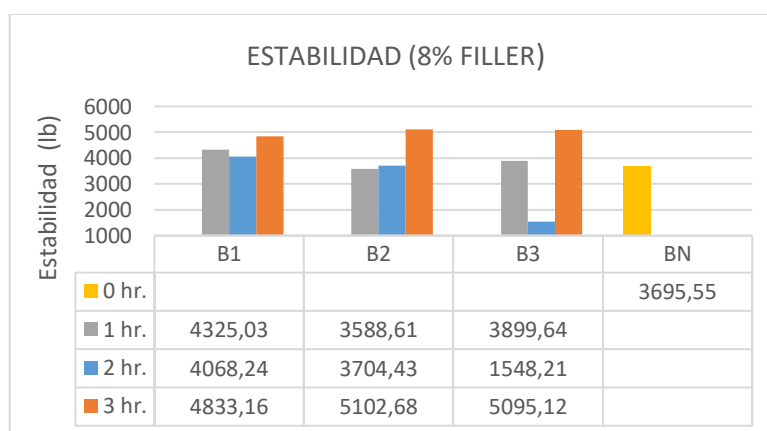
Gráfico 4.22: Valores de vacíos de agregado mineral según tiempo de estabilización de cada banco con el 8% filler.



Fuente: Elaboración propia.

Del gráfico 4.22 se observan valores de V.A.M. superiores al del banco patrón (BN), los tres bancos de arcillas estabilizadas a 1, 2 y 3 hr; sin embargo, el banco 3 obtiene el mayor porcentaje de V.A.M. a 3 hr de estabilización igual a 16,41% y el menor valor de V.A.M. es de la arcilla estabilizada 2 hr de banco 32, igual a 13,20%.

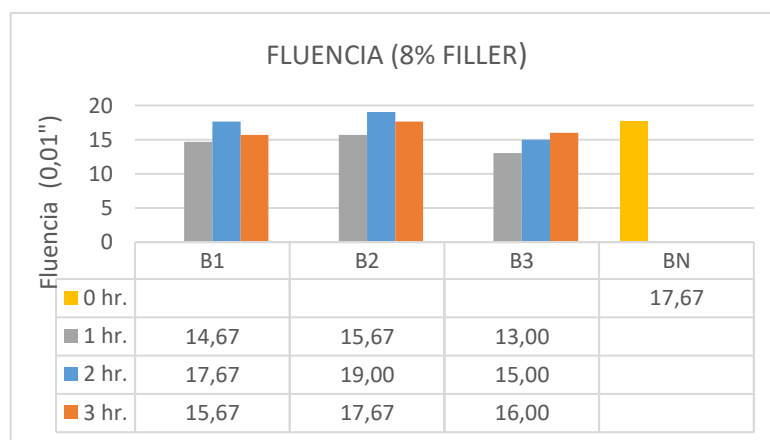
Gráfico 4.23: Valores de estabilidad según tiempo de estabilización de cada banco con el 8% filler.



Fuente: Elaboración propia.

Del gráfico 4.23 se observan valores de estabilidad, donde la mayoría de las arcillas estabilizadas térmicamente en diferentes tiempos superan el valor de estabilidad del banco patrón sin estabilizar igual a 3695,55 lb. Sin embargo, el mayor valor dentro de las arcillas estabilizadas térmicamente es del banco 2 a 3 hr de estabilización con el valor de 5102,68 lb y el menor valor de estabilidad igual a 1548,21 lb, lo proporciona el banco 3 con 2 hr de estabilización térmica; cabe resaltar que este último no cumple la norma con un valor mínimo de 1800 lb.

Gráfico 4.24: Valores de fluencia según tiempo de estabilización de cada banco con el 8% filler.



Fuente: Elaboración propia.

Del gráfico 4.24, se observa que se mantienen estables los valores de fluencia de las arcillas estabilizadas térmicamente, obteniendo el mayor valor de 19,00 de 0,01 pulg del banco 2 a 2 hr de estabilización térmica y la menor fluencia igual a 13 de 0,01 pulg. Es importante resaltar que solo 6 de las 9 muestras cumplen con la norma del rango de 8 a 16 de 0,01 pulg, quedando el resultado del banco patrón fuera de este rango.

4.3. Evaluación de las mezclas por bancos de arcilla estabilizada térmicamente

Para poder determinar qué arcilla proporciona mejores propiedades Marshall, es necesario realizar un estudio previo por bancos con las propiedades Marshall para definir el contenido óptimo filler y el tiempo de estabilización térmica para cada banco en estudio.

Tabla 4.32: Resumen de propiedades Marshall por banco de filler.

Banco	% de filler	Tiempo de estabilización térmica	Propiedades Marshall					
			Densidad promedio (gr/cm ³)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)
Banco Natural	2%	0 hr.	2,37	3,57	79,46	17,41	3110,86	10,00
	4%	0 hr.	2,41	2,56	84,05	16,05	3355,98	14,00
	6%	0 hr.	2,38	4,20	75,01	16,81	2718,31	11,67
	8%	0 hr.	2,48	0,78	94,01	13,07	3695,55	17,67
Banco 1	2%	1 hr.	2,39	2,87	82,89	16,80	3012,16	9,00
		2 hr.	2,44	0,77	94,84	15,00	2244,56	8,00
		3 hr.	2,34	4,96	73,32	18,58	2478,83	11,67
	4%	1 hr.	2,32	5,99	68,47	18,98	2483,48	11,67
		2 hr.	2,36	4,55	74,38	17,74	2669,10	11,67
		3 hr.	2,36	4,27	75,62	17,50	2397,31	9,67
	6%	1 hr.	2,38	4,08	75,53	16,68	3085,33	13,67
		2 hr.	2,38	4,11	75,38	16,71	3583,95	17,67
		3 hr.	2,38	3,96	76,10	16,58	3181,42	17,67
	8%	1 hr.	2,42	2,83	80,94	14,83	4325,03	14,67
		2 hr.	2,41	3,57	76,95	15,48	4068,24	17,67
		3 hr.	2,46	1,28	90,52	13,47	4833,16	15,67
Banco 2	2%	1 hr.	2,28	7,19	64,87	20,48	2061,28	14,33
		2 hr.	2,42	1,38	91,11	15,50	2929,73	10,00
		3 hr.	2,35	4,50	75,23	18,17	2737,24	13,00
	4%	1 hr.	2,43	1,36	90,89	14,96	2949,58	10,67
		2 hr.	2,34	5,02	72,28	18,12	2675,61	10,67
		3 hr.	2,34	4,97	72,49	18,07	2185,51	10,67
	6%	1 hr.	2,34	5,50	69,21	17,87	3157,29	10,00
		2 hr.	2,36	4,37	74,15	16,89	2984,01	16,67
		3 hr.	2,39	3,17	80,01	15,84	3878,12	16,00
	8%	1 hr.	2,43	2,18	84,63	14,21	3588,61	15,67
		2 hr.	2,38	4,10	74,17	15,89	3704,43	19,00
		3 hr.	2,41	2,95	80,18	14,88	5102,68	17,67
Banco 3	2%	1 hr.	2,30	6,82	66,22	20,19	1482,36	11,00
		2 hr.	2,33	5,39	71,59	18,96	2338,43	9,00
		3 hr.	2,33	5,31	71,90	18,90	2549,76	9,67
	4%	1 hr.	2,45	1,02	93,07	14,73	2600,01	13,67
		2 hr.	2,34	5,30	71,22	18,41	2626,30	9,67
		3 hr.	2,35	5,01	72,40	18,17	2206,59	15,00
	6%	1 hr.	2,37	4,52	73,56	17,09	2563,41	7,67
		2 hr.	2,34	6,01	67,31	18,38	2396,88	15,00
		3 hr.	2,38	4,32	74,45	16,92	2871,11	17,00
	8%	1 hr.	2,42	3,40	77,87	15,37	3899,64	13,00
		2 hr.	2,48	0,93	92,93	13,20	1548,21	15,00
		3 hr.	2,39	4,60	72,00	16,41	5095,12	16,00

Fuente: Elaboración propia.

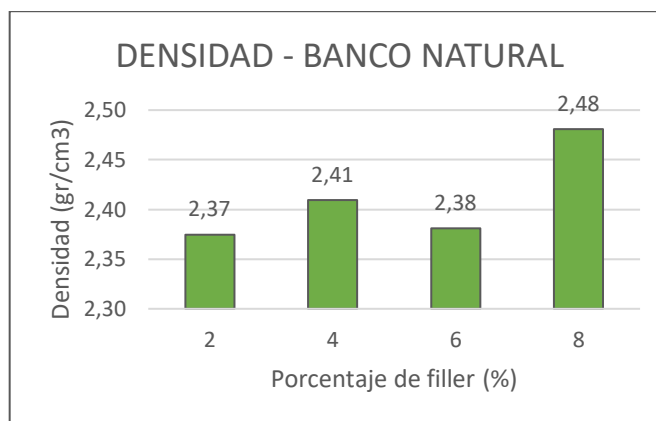
4.3.1 Determinación de porcentajes óptimos de filler y tiempo de estabilización térmica

Son tres las propiedades más importantes que definen el contenido óptimo filler y el tiempo de estabilización térmica para cada banco en estudio, por lo tanto, se tomará en cuenta los siguientes criterios:

- Porcentaje de filler que proporcione la densidad máxima.
- Porcentaje de filler que proporcione la estabilidad máxima
- Porcentaje de filler que proporcione el 4% de vacíos de la mezcla.

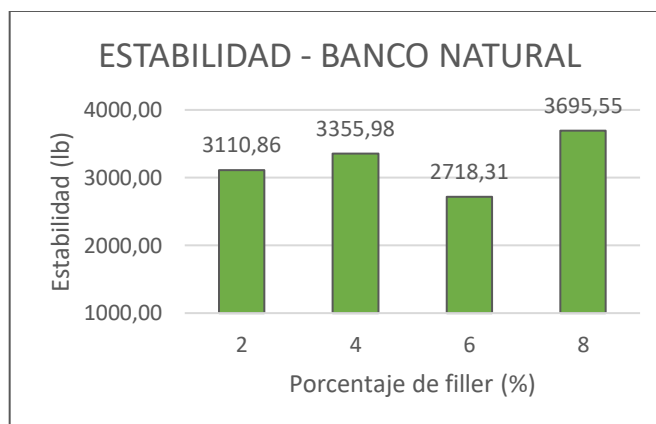
De los resultados del banco con filler natural, obtenemos los siguientes gráficos:

Gráfico 4.25: Valores de densidad por porcentajes de filler del banco natural.

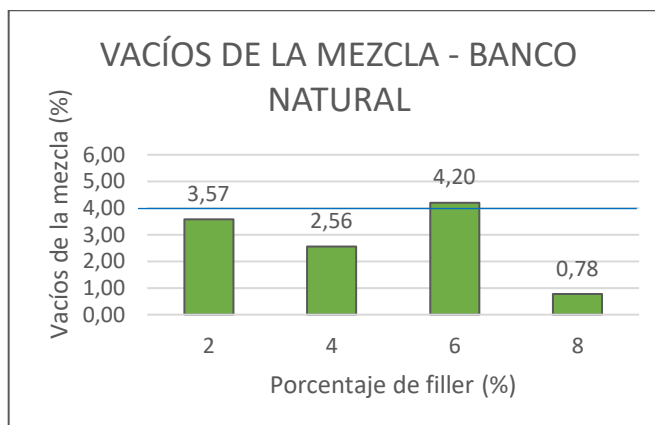


Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.26: Valores de estabilidad por porcentajes de filler del banco natural.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.27: Valores de % de vacíos por porcentajes de filler del banco natural.

Fuente: Elaboración propia.

Si observamos el gráfico 4.25, obtenemos la densidad máxima de $2,48 \text{ gr/cm}^3$ para el 8% de filler, del gráfico 4.26, obtenemos la estabilidad máxima de 3695,55 lb para el 8 % de filler y del gráfico 4.27, obtenemos el porcentaje de vacíos igual o más próximo a 4% tiene el 6% de filler. Por lo tanto, el contenido óptimo de filler para el banco natural se describe en la siguiente tabla:

Tabla 4.33: Contenido óptimo de filler del banco natural.

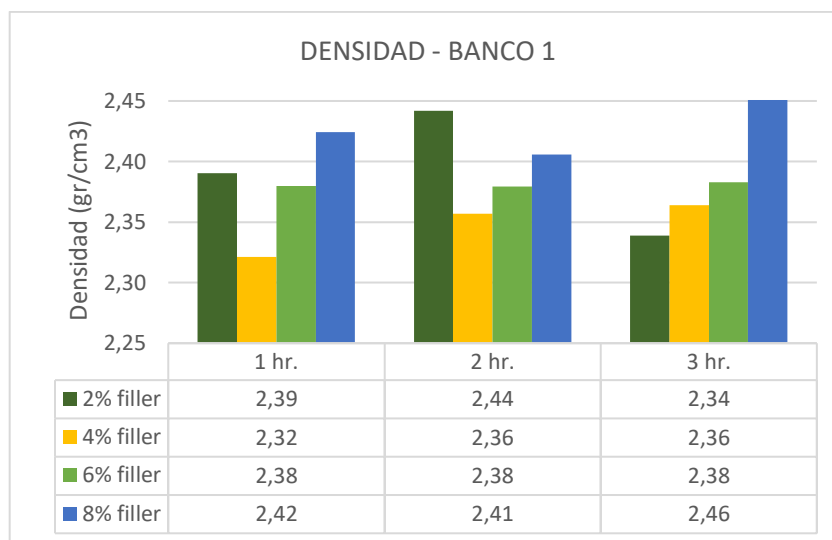
Propiedad Marshall	Valor	Filler (%)
Densidad máxima (gr/cm^3)	2,48	8,00
Estabilidad máxima (lb)	3695,55	8,00
Vacíos de la mezcla (%)	4,20	6,00
Valor óptimo	Promedio	7,33

Fuente: Elaboración propia.

Entonces el porcentaje óptimo de filler para el banco natural es igual al 7,33%.

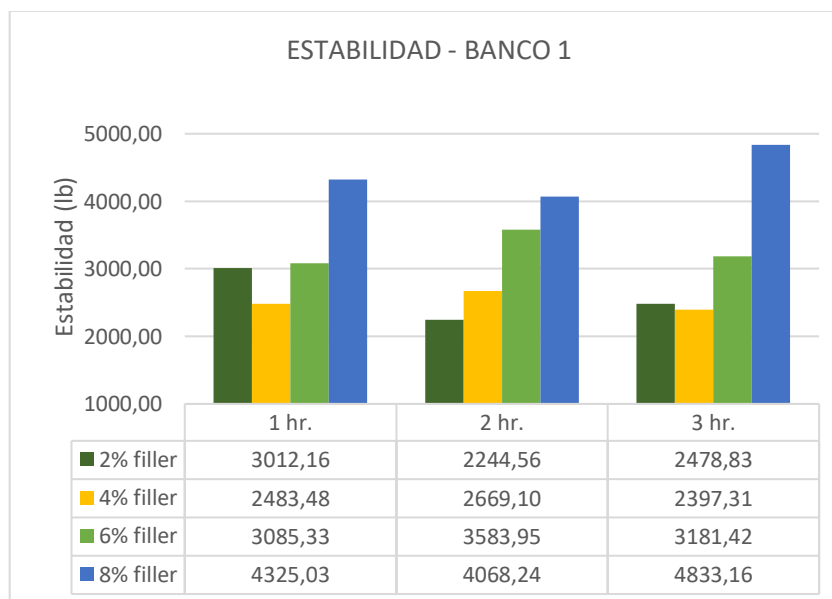
De los resultados del banco 1 del barrio La Cañada, obtenemos los siguientes gráficos:

Gráfico 4.28: Valores de densidad por porcentajes de arcilla estabilizada térmicamente para el banco 1.



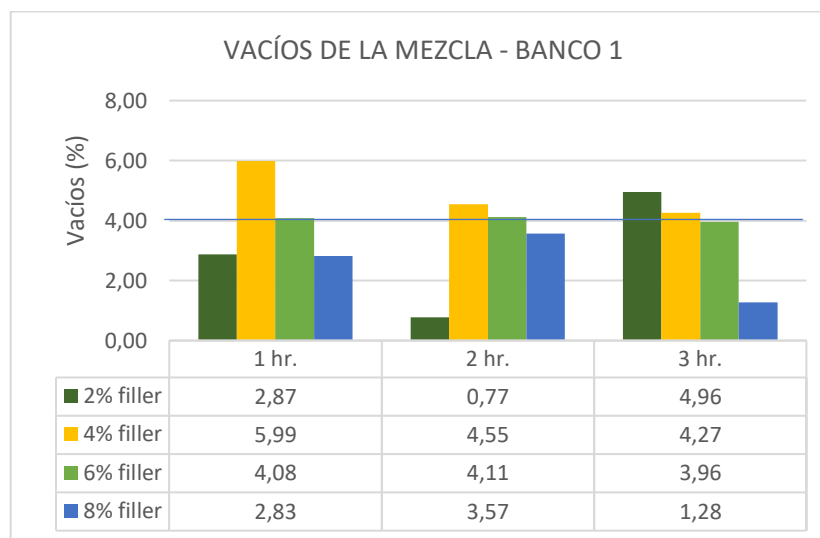
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.29: Valores de estabilidad por porcentajes de arcilla estabilizada térmicamente para el banco 1.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.30: Valores de % de vacíos por porcentajes de arcilla estabilizada térmicamente para el banco 1.



Fuente: Elaboración propia.

Si observamos el gráfico 4.28, obtenemos la densidad máxima de $2,46 \text{ gr/cm}^3$ para el 8% de filler estabilizado térmicamente 3 hr., del gráfico 4.29, obtenemos la estabilidad máxima de 4833,16 lb para el 8 % de filler estabilizado térmicamente 3 hr., y del gráfico 4.30, obtenemos el porcentaje de vacíos igual o más próximo a 4% tiene el 6% de filler estabilizado térmicamente 3 hr. Por lo tanto, el contenido óptimo de filler para el banco 1 se describe en la siguiente tabla:

Tabla 4.34: Contenido óptimo de arcilla estabilizada térmicamente del banco 1.

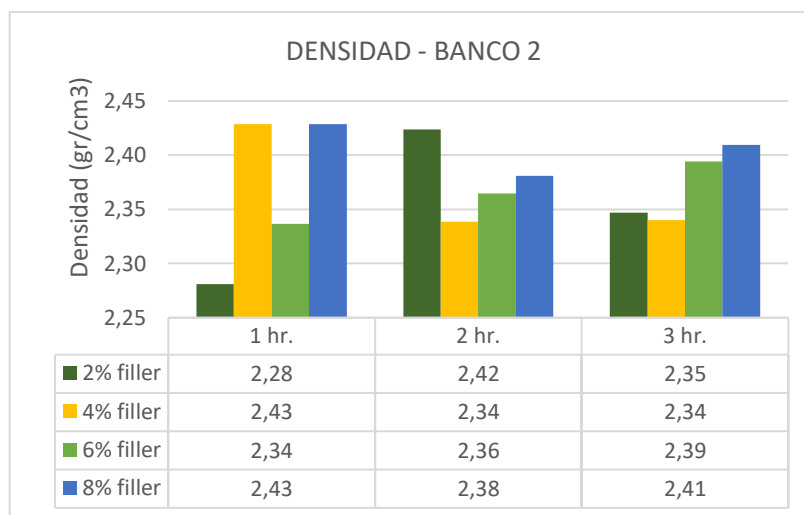
Propiedad Marshall	Valor	Filler (%)	Tiempo de estabilización térmica (hr.)
Densidad máxima (gr/cm^3)	2,46	8,00	3,00
Estabilidad máxima (lb)	4833,16	8,00	3,00
Vacíos de la mezcla (%)	3,96	6,00	3,00
Valor óptimo	Promedio	7,33	3,00

Fuente: Elaboración propia.

Entonces el porcentaje óptimo de arcilla para el banco 1 es igual al 7,33% y 3 horas de estabilización térmica.

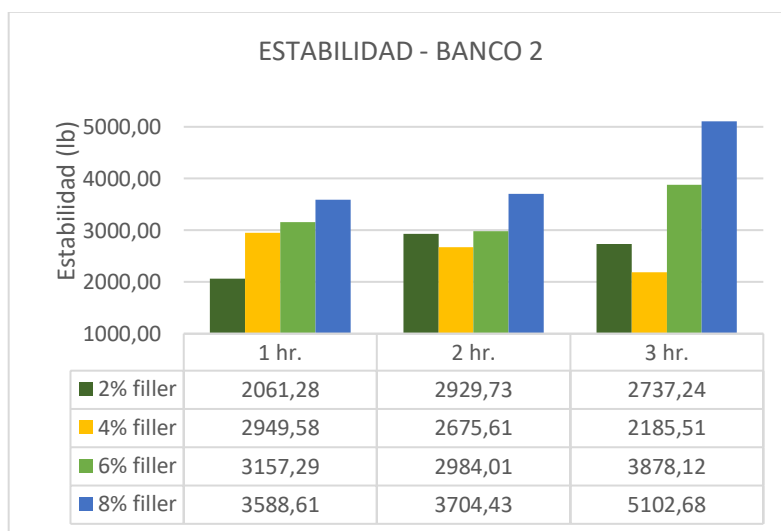
De los resultados del banco 2 del barrio Juan Nicolai, obtenemos los siguientes gráficos:

Gráfico 4.31: Valores de densidad por porcentajes de arcilla estabilizada térmicamente para el banco 2.



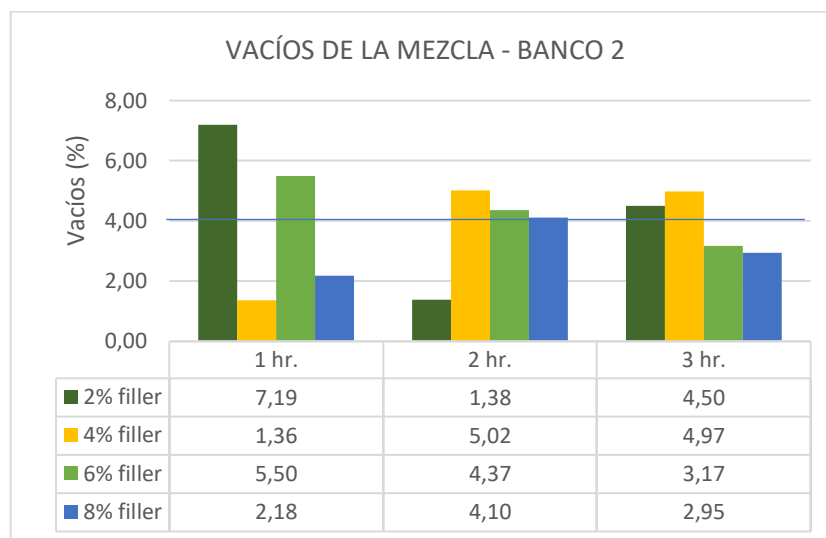
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.32: Valores de estabilidad por porcentajes de arcilla estabilizada térmicamente para el banco 2.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.33: Valores de % de vacíos por porcentajes de arcilla estabilizada térmicamente para el banco 2.



Fuente: Elaboración propia.

Si observamos el gráfico 4.31, obtenemos la densidad máxima de $2,43 \text{ gr/cm}^3$ para el 8% de filler estabilizado térmicamente 1 hr.; del gráfico 4.32, obtenemos la estabilidad máxima de 5120,68 lb para el 8 % de filler estabilizado térmicamente 3 hr., y del gráfico 4.33, obtenemos el porcentaje de vacíos igual o más próximo a 4% tiene el 8% de filler estabilizado térmicamente 2 hr. Por lo tanto, el contenido óptimo de filler para el banco 2 se describe en la siguiente tabla:

Tabla 4.35: Contenido óptimo de arcilla estabilizada térmicamente del banco 2.

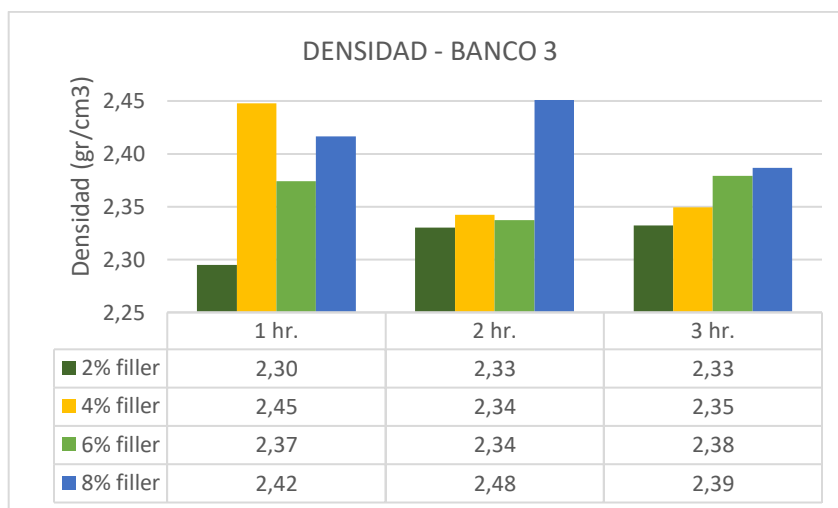
Propiedad Marshall	Valor	Filler (%)	Tiempo de estabilización térmica (hr.)
Densidad máxima (gr/cm^3)	2,43	8,00	1,00
Estabilidad máxima (lb)	5102,68	8,00	3,00
Vacíos de la mezcla (%)	4,10	8,00	2,00
Valor óptimo	Promedio	8,00	2,00

Fuente: Elaboración propia.

Entonces el porcentaje óptimo de arcilla para el banco 2 es igual al 8,00 % y 2 horas de estabilización térmica.

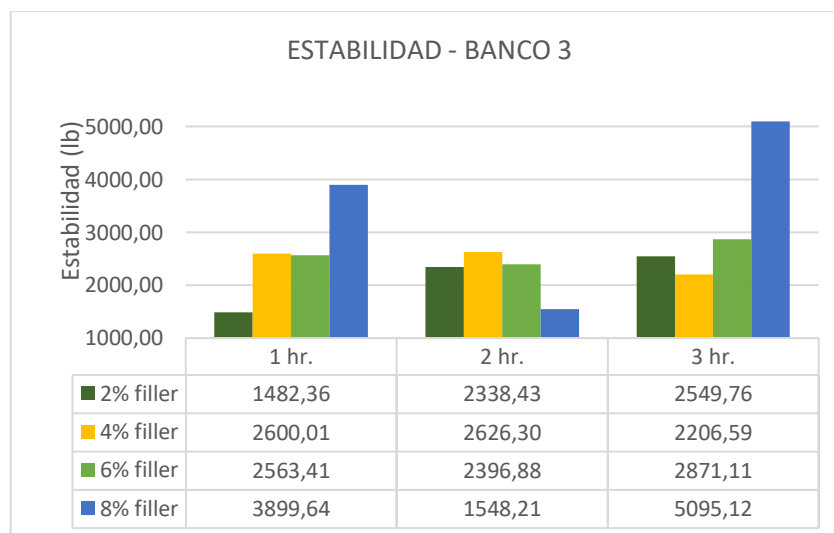
De los resultados del banco 3 del barrio Monte Cristo, obtenemos los siguientes gráficos:

Gráfico 4.34: Valores de densidad por porcentajes de arcilla estabilizada térmicamente para el banco 3.



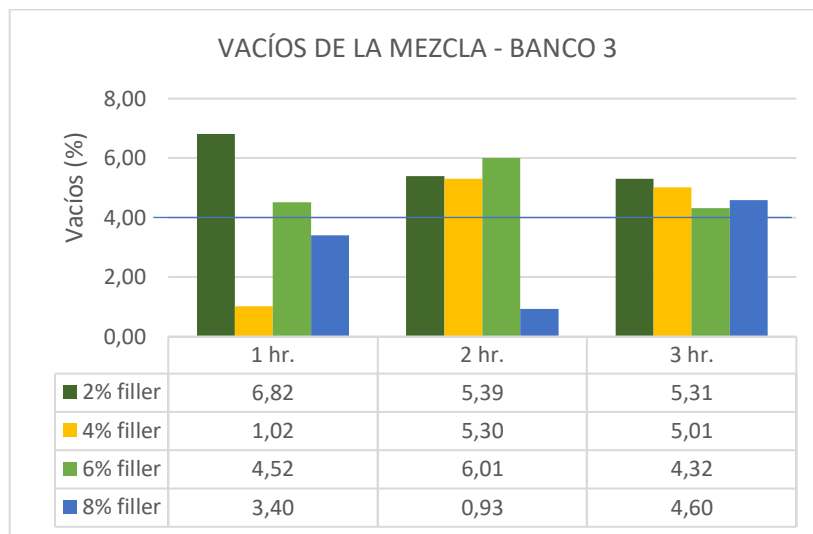
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.35: Valores de estabilidad por porcentajes de arcilla estabilizada térmicamente para el banco 3.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.36: Valores de % de vacíos por porcentajes de arcilla estabilizada térmicamente para el banco 3.



Fuente: Elaboración propia.

Si observamos el gráfico 4.34, obtenemos la densidad máxima de $2,48 \text{ gr/cm}^3$ para el 8% de filler estabilizado térmicamente 2 hr., del gráfico 4.35, obtenemos la estabilidad máxima de 5095,12 lb para el 8 % de filler estabilizado térmicamente 3 hr., y del gráfico 4.36, obtenemos el porcentaje de vacíos igual o más próximo a 4% tiene el 6% de filler estabilizado térmicamente 3 hr. Por lo tanto, el contenido óptimo de filler para el banco 3 se describe en la siguiente tabla:

Tabla 4.36: Contenido óptimo de arcilla estabilizada térmicamente del banco 3.

Propiedad Marshall	Valor	Filler (%)	Tiempo de estabilización térmica (hr.)
Densidad máxima (gr/cm^3)	2,48	8,00	2,00
Estabilidad máxima (lb)	5095,12	8,00	3,00
Vacíos de la mezcla (%)	4,32	6,00	3,00
Valor óptimo	Promedio	7,33	2,67

Fuente: Elaboración propia.

Entonces el porcentaje óptimo de arcilla para el banco 3 es igual al 7,33 % y 2,67 horas de estabilización térmica.

4.3.2 Resultados finales de cada banco de filler

Para el presente estudio es fundamental y necesario determinar el contenido óptimo de filler para cada tipo de diseño de mezcla asfáltica, llegando al siguiente resultado final.

Tabla 4.37: Resultado final para cada banco de filler natural y arcillas estabilizadas térmicamente.

Banco	Procedencia	Densidad máxima (gr/cm ³)	Estabilidad máxima (lb)	Vacíos igual o próximo a 4% (%)	Porcentaje óptimo de filler (%)	Tiempo óptimo de estabilización térmica (hr.)
BN	Charajas SE.DE.CA.	2,48	3695,55	4,20	7,33	0
B1	B. La Cañada	2,46	4833,16	3,96	7,33	3,00
B2	B. Juan Nicolai	2,43	5102,68	4,10	8,00	2,00
B3	B. Monte Cristo	2,48	5095,12	4,32	7,33	2,67

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 4.37 se visualiza claramente los resultados de las propiedades Marshall más importantes, los porcentajes de óptimos de filler y los tiempos óptimos de estabilización térmica para cada banco.

De esta tabla decimos que la mezcla asfáltica con el banco de filler natural de Charajas y la arcilla estabilizada térmicamente del banco 3, tienen la mayor densidad igual a 2,48 gr/cm³, luego el banco con menor densidad es del banco 2 del barrio Juan Nicolai, con 2,43 gr/cm³.

También podemos visualizar que la mezcla con el filler natural de Charajas tiene la menor estabilidad con 3695,55 lb y del banco 2 del barrio Juan Nicolai tiene la mayor estabilidad con 5102,68 lb, quedando por muy poco en segunda posición el banco 3 del barrio Monte Cristo con una estabilidad de 5095,12 lb.

Por otra parte, todos los bancos cumplen con las especificaciones de norma respecto al porcentaje de vacíos en la mezcla, porque están en el rango de 3% a 5%, siendo el banco 2 del barrio La Cañada que tiene un porcentaje de vacíos de mezcla igual a 3,96%, siendo el más próximo a 4% (promedio entre 3% y 5%).

Así mismo, el banco natural, el banco 1 del barrio La Cañada y el banco 3 del barrio Monte Cristo, tienen un mismo porcentaje óptimo de filler de 7,33% y el banco 2 tiene el mayor porcentaje de filler igual a 8,00%.

Finalmente, el banco 2 del barrio Juan Nicolai, tiene el menor tiempo de estabilización térmica igual a 2 hr., luego el banco 1 del barrio La Cañada tiene el mayor tiempo de estabilización térmica de 3 hr., quedando en un punto medio el banco 3 del barrio Monte Cristo con 2,67 hr. de estabilización térmica.

4.4 Tratamiento estadístico

4.4.1 Datos estadísticos

Para realizar el análisis estadístico se realizaron 30 briquetas con la arcilla que proporcionó mejores resultados de propiedades Marshall, como ser la arcilla del banco 2 del barrio Juan Nicolai, con el porcentaje óptimo de filler igual a 8%, con un contenido óptimo de asfalto igual a 5,07% y una temperatura óptima de estabilización térmica igual a 2 hr. Los resultados de estabilidades de las 30 briquetas, por su mayor importancia, serán los datos que se considera en el tratamiento estadístico descriptivo e inferencial.

Tabla 4.38. Datos para tratamiento estadístico.

Nº de muestra	Estabilidad (lb)	Nº de muestra	Estabilidad (lb)
1	4985,56	16	4912,93
2	5301,62	17	4674,88
3	4456,24	18	4999,57
4	4368,01	19	4412,95
5	5328,61	20	4162,73
6	5005,17	21	4394,20
7	4643,87	22	4521,24
8	4229,10	23	4504,07
9	4525,29	24	4634,83
10	4619,30	25	5046,58
11	4896,03	26	4652,97
12	4964,01	27	4311,62
13	4851,11	28	4779,26
14	4542,14	29	4421,99
15	4426,48	30	5056,58

Fuente: Elaboración propia.

4.4.2. Estadística descriptiva

La estadística descriptiva proporciona valores que permiten describir el estado de los datos a través de medidas de tendencia central.

Primero se realiza un ordenamiento de datos:

Tabla 4.39. Datos ordenados para tratamiento estadístico.

Nº muestra	Estabilidad ordenada de menor a mayor (lb)
20	4162,73
8	4229,10
27	4311,62
4	4368,01
21	4394,20
19	4412,95
29	4421,99
15	4426,48
3	4456,24
23	4504,07
22	4521,24
9	4525,29
14	4542,14
10	4619,30
24	4634,83
7	4643,87
26	4652,97
17	4674,88
28	4779,26
13	4851,11
11	4896,03
16	4912,93
12	4964,01
1	4985,56
18	4999,57
6	5005,17
25	5046,58
30	5056,58
2	5301,62
5	5328,61

Fuente: Elaboración propia.

Después con estos datos se calcula los valores de la estadística descriptiva, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4.40. Valores de estadística descriptiva

Media	4687,63 lb
Error típico	56,20 lb
Mediana	4639,35 lb
Moda	-
Desviación estándar	307,84 lb
Varianza de la muestra	94765,86 lb
Rango	1165,88 lb
Mínimo	4162,73 lb
Máximo	5328,61 lb
Número de datos	30
Número de clases	6
Amplitud de intervalos	194,31 lb

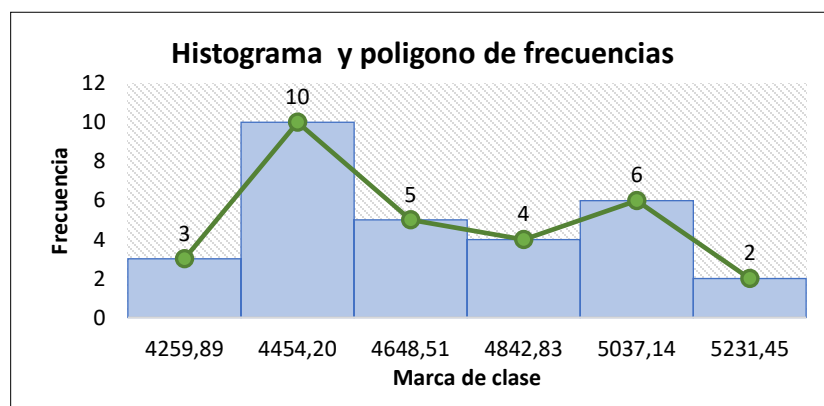
Fuente: Elaboración propia.

Una vez calculado el rango, los valores máximo y mínimo, el número de clases y la amplitud de intervalos, se procede a calcular las frecuencias con sus respectivos histogramas.

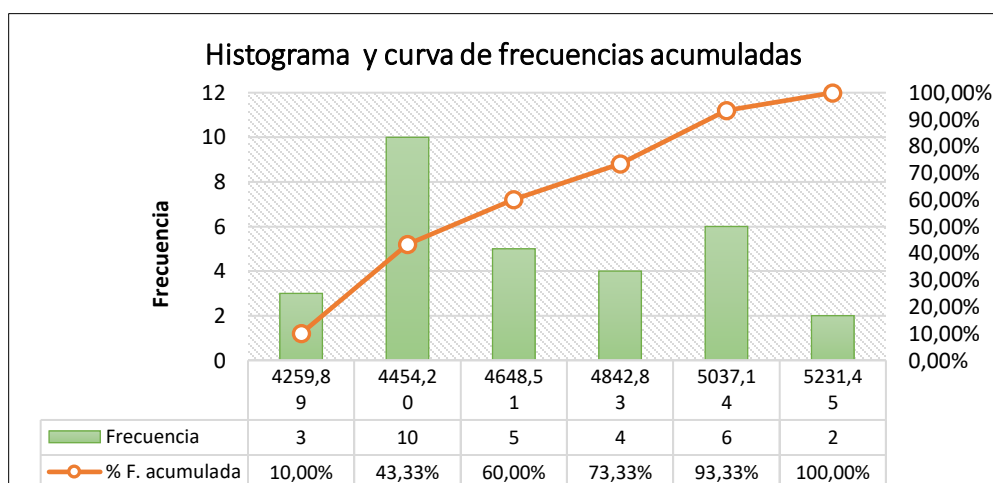
Tabla 4.41. Frecuencias de datos

N° de clase	Intervalos de clase		Marca	Frecuencia observada	F Acumulada	% de F	% F Acumulado
	Límite inferior	Límite superior					
1	4162,73	4357,04	4259,89	3	3	10,00%	10,00%
2	4357,04	4551,36	4454,20	10	13	33,33%	43,33%
3	4551,36	4745,67	4648,51	5	18	16,67%	60,00%
4	4745,67	4939,98	4842,83	4	22	13,33%	73,33%
5	4939,98	5134,30	5037,14	6	28	20,00%	93,33%
6	5134,30	5328,61	5231,45	2	30	6,67%	100,00%

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.37. Histograma y polígono de frecuencias

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.38. Histograma y curva de frecuencias acumuladas

Fuente: Elaboración propia.

En el histograma se observa que la marca de clase con mayor cantidad de datos es la marca igual a 4454,2 lb con 10 datos entre el intervalo 4357,04 lb – 4551,36 lb. Luego la marca con menor cantidad de datos, es la marca de 5231,4 lb, que solo cuenta con 2 datos en el intervalo de 5134,30 lb – 5328,61 lb.

4.4.3. Estadística inferencial

También llamada estadística inductiva, inferencia estadística o teoría de muestras. Abarca un conjunto de procedimientos estadísticos que se utilizan para hacer generalizaciones sobre una población a partir de los datos obtenidos de las 30 muestras analizadas.

Para ello primero se realiza el cálculo de los errores medido de la media:

Tabla 4.42. Cálculo de error

Número de muestras	n = 30
Desviación estándar	S = 307,84 lb
Rango	r = 1165,88 lb
Nivel de confianza	NC = 95 %
	Z = 1,96
Error típico	Ex = 56,20 lb
Error probable	Ep = 110,16 lb
	Ep = 9,45 %

Fuente: Elaboración propia.

Después se calculan los intervalos de confianza:

$$Va = X \pm Ep$$

Donde

Va = Intervalo de confianza (lb)

X = Media aritmética (4687,63 lb)

Ep = Error probable (110,16 lb)

$$Va = 4687,63 \text{ lb} + 110,16 \text{ lb} = 4797,79 \text{ lb} \rightarrow \text{máximo}$$

$$Va = 4687,63 \text{ lb} - 110,16 \text{ lb} = 4577,47 \text{ lb} \rightarrow \text{mínimo}$$

El intervalo para un nivel de confianza igual al 95 % es de 4577,47 lb a 4797,79 lb.

4.5 Prueba de hipótesis

Para dar cumplimiento a la hipótesis donde se desea verificar si los resultados de la Estabilidad (propiedad físico-mecánica Marshall), cumple con el requerimiento de la norma AASHTO.

Las hipótesis son:

1° hipótesis alternativa → Estabilidad media \geq Estabilidad mínima de norma: 1800 lb.

$$X \geq \mu$$

2° hipótesis nula → Estabilidad media $<$ Estabilidad mínima de norma: 1800 lb.

$$X < \mu$$

Los datos son:

Tabla 4.43. Datos para prueba de hipótesis

Estabilidad media	X = 4687,63 lb
Estabilidad mínima según norma	$\mu = 1800$ lb

Fuente: Elaboración propia.

$$X \geq \mu$$

$$¿4687,63 \text{ lb} \geq 1800 \text{ lb?} \rightarrow \mathbf{Sí}$$

Con los resultados se observa claramente que se acepta la hipótesis alterna y se rechaza la hipótesis nula. Por lo tanto, los resultados obtenidos de la investigación son aceptados.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Una vez terminada la investigación se tienen las siguientes conclusiones:

- La investigación cumplió con los objetivos planteados, porque se logra realizar una evaluación detallada del comportamiento de arcillas estabilizadas térmicamente como filler dentro de una mezcla asfáltica en caliente, respecto a las variables tiempo de estabilización y porcentaje de filler.
- También se logra caracterizar los componentes de la mezcla asfáltica como ser, los agregados pétreos incluido filler convencional y el cemento asfáltico 85/100 que fueron proporcionados por SEDECA, y las arcillas de los tres bancos de muestras extraídas de los barrios La Cañada, Juan Nicolai y Monte Cristo.
- Los contenidos óptimos de asfalto determinados para cada porcentaje de filler en estudio son: para el 2% de filler 5,93 % de asfalto; para 4% de filler 5,70% de asfalto; para el 6% de filler 5,39% de asfalto y para el 8% de filler 5,04 % de asfalto.
- Al obtener briquetas con diferentes porcentajes de arcilla y tiempos de estabilización térmica, se realiza una evaluación a los resultados obtenidos de las propiedades físico-mecánicas Marshall, de acuerdo a especificaciones de la norma AASHTO, como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 5.1. Resultado final para cada banco de filler natural y arcillas estabilizadas térmicamente.

Banco	Procedencia	Densidad máxima (gr/cm ³)	Estabilidad máxima (lb)	Vacíos de la mezcla (%)	Porcentaje óptimo de filler (%)	Tiempo óptimo de estabilización térmica (hr)
	Norma AASHTO	2,25 mínimo	1800,00 mínimo	3 – 5 (4 promedio)	2 - 8	-
B1	B. La Cañada	2,46	4833,16	3,96	7,33	3,00
B2	B. Juan Nicolai	2,43	5102,68	4,10	8,00	2,00
B3	B. Monte Cristo	2,48	5095,12	4,32	7,33	2,67

Fuente: Elaboración propia.

Y se concluye que la mezcla asfáltica con mejores resultados obtenidos fue del banco 2 del barrio Juan Nicolai, porque proporciona la estabilidad más alta con 5102,68 lb; así también el porcentaje de vacíos es igual a 4,10% siendo el más próximo al 4% promedio de la norma; al igual que la densidad, si bien es la más baja con 2,43 gr/cm³ supera cumpliendo el mínimo de la norma de 2,25 gr/cm³; luego el filler es el porcentaje más alto con el 8 % quedando al límite máximo de la norma con el rango de 2% a 8% del diseño granulométrico; y con un tiempo de estabilización mínima de 2,00 hr.

- Finalmente analizando los resultados, se concluye que las tres arcillas estabilizadas térmicamente mejoran considerablemente las propiedades volumétricas y mecánicas de las mezclas asfálticas según el método Marshall, logrando resultados favorables y aptos para mejorar la resistencia de cualquier mezcla asfáltica.

5.2. Recomendaciones

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

- Se recomienda que, al estabilizar térmicamente las arcillas, se las realice en hornos de alta capacidad de calentamiento entre 450°C a 750°C, para también poder observar la variación de las estabilizaciones térmicas a diferentes temperaturas.
- Cumplir la temperatura de compactado de 160°C para mezclas calientes hasta un mínimo de 140°C, para evitar el enfriamiento de la mezcla asfáltica que produce desprendimiento de los componentes de la mezcla.
- Compactar en lo posible con el martillo Marshall automático, porque tiene velocidad constante normada, altura de caída estandarizada, mantiene su perpendicularidad, y evita que la mezcla se enfríe rápido, por lo tanto, ahorra tiempo de ejecución.
- Evitar sobrecalentar varias veces el cemento asfáltico debido a que pierde sus propiedades, por lo que se debe calentar el material solo al momento de realizar los ensayos, evitando sobrepasar los 160°C.
- Para la elaboración de la mezcla asfáltica se debe contar con los equipos de protección personal adecuados, debido a que se trabaja a altas temperaturas.