

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

INTRODUCCIÓN

La arcilla expandida térmicamente es un agregado liviano artificial obtenido cuando determinados tipos de suelos son sometidos a altas temperaturas. El producto resultante es un agregado celular, poroso, de gran resistencia estructural, se utiliza como remplazo de los agregados pétreos para la elaboración de concretos livianos, elementos prefabricados, mezclas asfálticas y en aplicaciones geotécnicas como rellenos de suelos

El estudio de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas con el uso de arcilla expandida térmicamente se realiza por la necesidad que se tiene de buscar otras alternativas a los agregados pétreos convencionales que se utilizan en las obras viales. Mediante este estudio se pretende determinar si este agregado artificial cumple las especificaciones técnicas normadas para la elaboración de mezclas asfálticas, buscando establecer parámetros técnicos que permitan su adecuada dosificación.

Como se ha mencionado, arcilla expandida térmicamente, es un material que existe hace mucho tiempo, por lo que a nivel internacional existe bastante documentación relacionado al presente objeto de estudio. A nivel Bolivia, al existir un déficit investigativo en este campo, no se conoce trabajos nacionales relacionados con el objeto de la presente investigación.

Lo que el autor propone en esta investigación es Estudiar el comportamiento de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas utilizando arcilla expandida térmicamente como agregado, a través de ensayos de laboratorio estandarizados como ser Marshall, con el fin de determinar si este agregado artificial puede ser considerado como alternativa técnica para la elaboración de mezclas.

El aporte de esta investigación en lo teórico es la utilización de la teoría científica que se describe más adelante; La implementación de este material alternativo hará posible la realización de obras que en otro caso no serían viables, y el consecuente acceso al mejoramiento de la calidad de vida de una amplia región del país donde no se cuenta con agregados pétreos.

1.1 JUSTIFICACIÓN

Este proyecto se realizó para establecer el comportamiento de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas utilizando arcilla expandida térmicamente utilizando como agregado.

El presente proyecto de investigación se emprendió debido a la necesidad que se tiene de buscar otras alternativas a los agregados pétreos convencionales que utilizan en las obras viales.

La implementación de este material alternativo hará posible la realización de obras que en otro caso no serían viables, y el consecuente acceso al mejoramiento de la calidad de vida de una amplia región del país donde no se cuenta con agregados pétreos.

Es viable la producción industrializada del agregado liviano para su utilización en obras viales, debido a que se necesita un proceso parecido al que se desarrolla en las plantas cementeras que operan actualmente en el país y se fabrica a base de arcilla; material abundante en el país, por lo que representa una alternativa de desarrollo de agregados diferente a la convencional.

Mediante este estudio se pretende determinar si este agregado artificial puede ser considerado como alternativa técnica para la elaboración de mezclas, buscando establecer parámetros técnicos que permitan su adecuada dosificación.

Si la variación presentada demuestra una optimización en las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas, esto dará lugar para que se realicen otras investigaciones más a detalle para demostrar si es viable la utilización de este agregado artificial en proyectos viales.

1.2 SITUACIÓN PROBLÉMICA

En una mezcla asfáltica normal, los agregados ocupan normalmente entre un 60% y un 80% del volumen total y constituyen una parte fundamental de la resistencia mecánica y de la densidad final de la mezcla, por lo que es muy importante conocer las propiedades mecánicas de los materiales, los mismos que nos permiten diferenciar un material del otro ya sea por su composición, estructura o comportamiento ante algún efecto físico o químico.

La falta de materiales pétreos para la construcción civil en el futuro será un problema debido a la extracción actual sin planificación ni control de nuestros ríos, Las características geográficas de ciertas zonas en nuestro país hacen que no se tenga disponible estos agregados pétreos, por lo que la búsqueda de otras alternativas como ser los agregados artificiales es una tarea importante para el desarrollo de la región que previo proceso de fabricación con la utilización de tecnologías ya conocidas, permitan ser utilizados como agregados en las obras civiles.

1.3 DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

¿De qué forma, un estudio de las propiedades mecánicas a las mezclas asfálticas con arcilla expandida térmicamente, puede determinar si este agregado sería una alternativa técnica para la elaboración de mezclas asfálticas?

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Estudiar el comportamiento de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas con el uso de arcilla expandida térmicamente como agregado, a través de ensayos de laboratorio estandarizados como ser Marshall, con el fin de determinar si este agregado artificial puede ser considerado como alternativa técnica para la elaboración de mezclas.

1.4.2 Objetivos específicos

- ✓ Recopilar información teórica de arcilla expandida térmicamente y su aplicación como agregado en la elaboración de mezclas asfálticas.
- ✓ Realizar la caracterización de los materiales, agregado artificial, agregados pétreos y del cemento asfáltico.
- ✓ Diseñar las mezclas asfálticas en caliente por el método Marshall
- ✓ Determinar los valores de las propiedades mecánicas tales como: estabilidad, fluencia, y densidad de las mezclas asfálticas calientes
- ✓ Realizar un estudio y análisis de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas con arcilla expandida térmicamente, a partir de los resultados de las pruebas de laboratorio realizadas.

1.5 HIPÓTESIS

Si se elabora el diseño de las mezclas asfálticas en caliente utilizando arcilla expandida térmicamente como agregado, donde se hará variar el porcentaje de cemento asfáltico; entonces se podrá establecer un estudio de las propiedades y determinar si este agregado artificial puede ser considerado como alternativa técnica para la elaboración de mezclas.

1.6 ALCANCE

La investigación se centra en el estudio de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas densas en caliente continuas a las cuales se les añade arcilla expandida térmicamente como remplazo parcial y total a los agregados pétreos de uso común en el diseño de mezclas.

El diseño de la mezcla asfáltica en caliente se realizará utilizando el método Marshall.

Los ensayos para los agregados pétreos, agregados arcilla expandida térmicamente, cemento asfáltico y mezcla asfáltica se realizarán conforme a normas AASHTO y/o ASTM.

El diseño de la mezcla asfáltica en caliente será a nivel laboratorio.

1.7 LIMITACIONES

El tipo de cemento asfáltico que se utilizará en la investigación será un asfalto normal de penetración 85 – 100.

Como agregado en el diseño de la mezcla asfáltica se utilizará arcilla expandida Leca fabricado en Argentina. adquirido de comercializadoras ubicadas Buenos Aires Argentina.

El agregado fino que se utilizara en el diseño de la mezcla asfáltica se limitara a los proporcionados por la empresa constructora Erika S.R.L. que se encuentra ubicada en la comunidad de Rancho Sud.

1.8 DEFINICIÓN DE VARIABLES

1.8.1 Variables dependientes

Densidad

Porcentaje de vacíos

Estabilidad

Fluencia

1.8.2 Variables independientes

Porcentaje de cemento asfáltico

Agregado (arcilla expandida)

1.8.3 Conceptualización de variables

Propiedades.- Las propiedades de los materiales son las características inherentes que permiten diferenciar un material de otro.

Mezcla asfáltica.- La mezcla asfáltica es la combinación de áridos (incluido el polvo mineral) con un ligante, las cantidades relativas de ligante y áridos determinan las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla.

Cemento asfáltico. - Material obtenido por refinación de residuos de petróleo y que debe satisfacer los requerimientos establecidos para su uso en la construcción de pavimentos.

Agregado (Arcilla expandida térmicamente).- Agregado liviano artificial obtenido cuando determinados tipos de suelos (arcilla) son sometidos a altas temperaturas.

Filler.- Polvo mineral fino que podrá ser cemento hidráulico, cal u otro material inerte, libre de materia orgánica y partículas de arcilla.

Ensayos.- Procedimiento definitivo que produce un resultado de una prueba que consiste en la determinación de una o más características de un determinado producto.

Marshall.- Equipo eléctrico diseñado para aplicar carga a las probetas durante el ensayo, sirve para medir la deformación que se produce cuando se le aplica una carga también se puede medir la estabilidad y fluencia de la muestra.

Cántabro.- Ensayo que se aplica para determinar la pérdida por desgaste de las mezclas asfálticas, empleando la máquina de desgaste de los Ángeles.

Propiedades.- Las propiedades de las mezclas asfálticas son las características inherentes que permiten diferenciar una mezcla de otra.

Estabilidad.- Es la capacidad de resistir deformaciones bajo la acción de cargas de una briqueta cuando se somete al ensayo Marshall.

Fluencia.- Representa la deformación correspondiente a la carga máxima de rotura de la briqueta en el ensayo Marshall.

Densidad.- La densidad de la mezcla compactada se considera como el volumen macizo de la briqueta, más el volumen de los poros accesibles e inaccesibles, se expresa generalmente en kg/m^3 .

Cantidad de vacíos.- Se pueden definir como el volumen total de una pequeña bolsa de aire que se encuentra entre las partículas de agregado revestidas de cemento asfáltico en una mezcla asfáltica compactada, expresado como el porcentaje del volumen neto de la mezcla asfáltica compactada.

1.8.4 Operacionalidad de variables

Tabla 1.1. Operacionalidad de variables dependientes.

Variable dependiente	Dimensiones	Indicador	Valor/acción
Propiedades mecánicas de mezclas asfálticas con arcilla expandida térmicamente como agregado	Densidad	kg/m^3	Atreves de ensayos de laboratorio según especificaciones de la norma (AASHTO)
	Porcentaje de vacíos	%	
	Estabilidad	kg/m^3	
	Fluencia	mm.	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1.2. Operacionalidad de variables independientes

Variable independiente	Dimensiones	Indicador	Valor/acción
% del cemento asfáltico	Caracterización	Se hace variar la cantidad en %	Realizando la dosificación en laboratorio
Agregado arcilla expandida (leca)	Caracterización	Granulometría	Mediante el método AASHTO T – 84
		Peso específico y absorción	Mediante el método AASHTO T – 84
		Desgaste de los ángeles	Mediante el método AASHTO T – 96
		Peso unitario	Mediante el método AASHTO T – 19
		Equivalente de arena	Mediante el método AASHTO T – 176

Fuente: Elaboración propia.

1.9 DISEÑO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.9.1 Unidad de estudio o muestreo

Los únicos elementos que brindan información sustancial para la investigación son los ensayos a los materiales ya sea de forma individual o mezclados.

Unidad de muestreo = Ensayos de laboratorio.

1.9.2 Población y muestra

Existe una variedad de población de ensayos relacionados al área de investigación

Población = Ensayos de caracterización de los agregados, caracterización del ligante asfáltico y ensayos Marshall.

1.9.3 Tamaño de la muestra

Para determinar el contenido óptimo de cada diseño se elaborará 15 muestras sumando en total 60 muestras.

Una vez determinado el contenido óptimo se realizará como mínimo 15 ensayos para el análisis estadístico en cada diseño sumando en total 60 muestras.

1.10 MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS LÓGICOS

1.10.1 Listado de actividades a realizar

1.- Mezcla asfáltica

Consultar bibliografía referente a mezclas asfálticas

2.- Diseño

Definir el tipo de mezcla asfáltica a diseñar en la presente investigación

3.- Componentes de mezclas asfálticas

Definir el lugar de adquisición de todos los componentes de la mezcla asfáltica (agregados, ligante y equipo).

4.- Equipos necesarios para la investigación

Definir el lugar (laboratorio con equipo necesario) donde se realizará todos los ensayos para la presente investigación.

5.- Agregados

Adquisición y selección de agregados

Granulometría de los agregados

Densidad y % de vacíos

Gravedad específica y % de absorción

Desgaste de los ángeles

Equivalente de arena

6.- Ligante (cemento asfáltico)

Adquisición del ligante (cemento asfáltico)

Penetración a 25 °C

Viscosidad cinemática

Punto de inflamación

Peso específico

Ductilidad

7.- Ensayos (Marshall)

Estabilidad

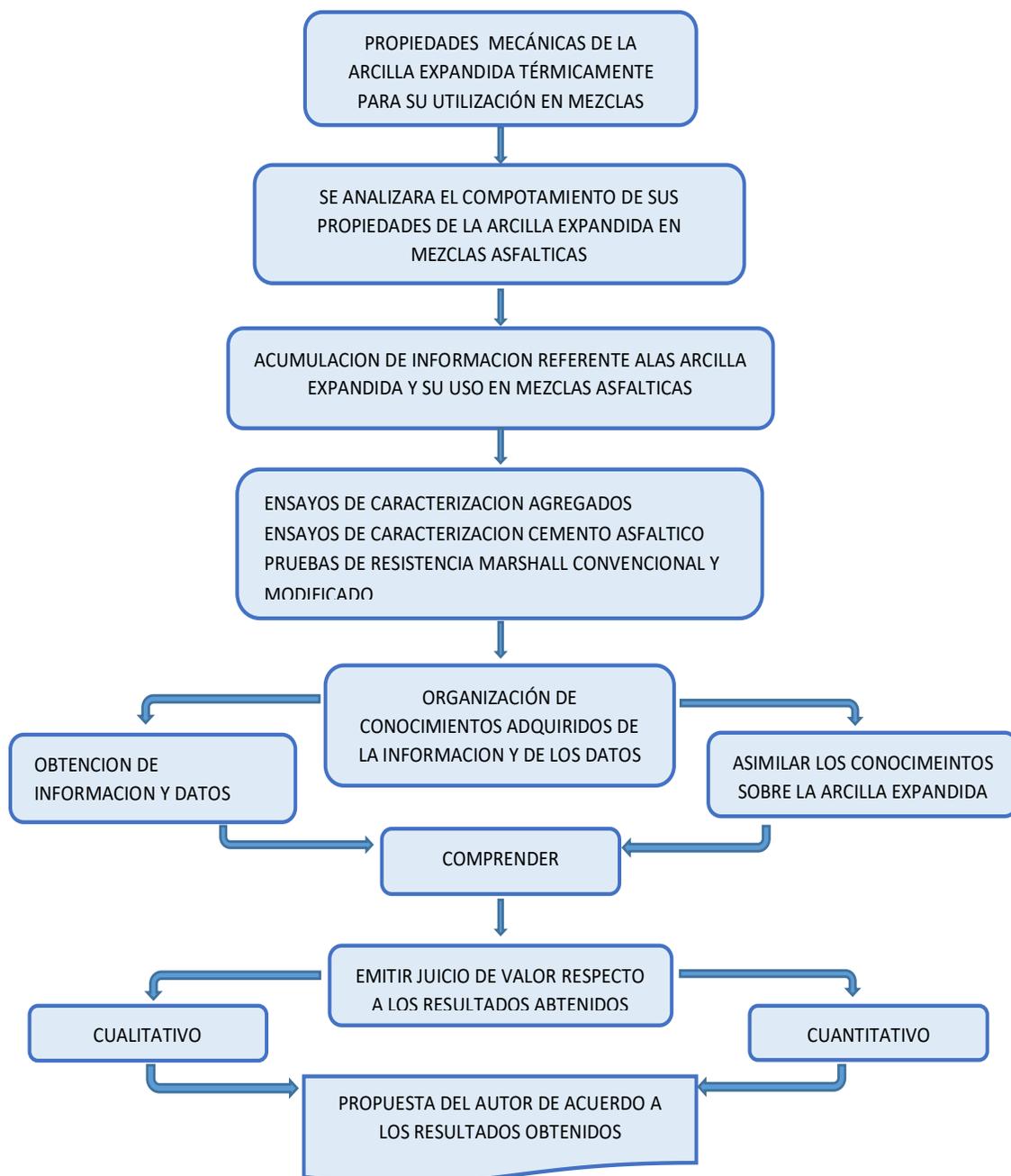
Fluencia

Densidad

Los ensayos se realizarán en los laboratorios de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho los mismos cuentan con todo el equipo necesario que se requiere en la presente investigación, los resultados obtenidos serán avalados por los encargados de laboratorio.

1.10.2 Esquema de actividades en función a procedimiento definido por la perspectiva

Figura 1.1. Esquema de actividades en función a procedimiento definido por la perspectiva.



Fuente: Elaboración propia.

1.10.3 Productos esperados en correspondencia con el procedimiento de la perspectiva

Los productos esperados en correspondencia con el procedimiento de la perspectiva acerca del estudio del comportamiento de las propiedades mecánicas de la arcilla expandida térmicamente utilizando como agregado en una mezcla asfáltica son:

- ✓ Realizar los ensayos de densidad, estabilidad y fluencia, para así poder obtener los resultados que nos permitirán emitir un juicio de valor cualitativo y cuantitativo al respecto.
- ✓ La obtención de los resultados de la relación de vacíos que es necesario realizar un cálculo después de realizar los ensayos.

1.10.4 Resultados esperados

Los resultados esperados del estudio el comportamiento de las propiedades mecánicas de la arcilla expandida térmicamente utilizando como agregado en una mezcla asfáltica son:

- ✓ Identificar el comportamiento de las propiedades de las mezclas asfálticas y determinar si este agregado artificial puede ser considerado como alternativa técnica para la elaboración de mezclas.

1.10.5 Análisis de resultados

El programa a utilizar en el análisis de resultados será el Excel, ya que es el más conocido en nuestro medio.

Las variables dependientes que se mediaran son:

Estabilidad

Fluencia

Densidad

Estadística Descriptiva

Variabes dependientes:

Y1 = Estabilidad

Y2 = Fluencia

Y3 = Densidad

Analizar los datos por variable

Tabulación de datos

Medidas de tendencia

Media.- Es la media aritmética (promedio) de los valores de una variable. Suma de los valores divididos por el tamaño de la muestra, es muy sensible a los valores extremos.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n X_i = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} \quad \text{Ec. (1)}$$

Mediana.- Es un conjunto de datos ordenados de mayor a menor, la mediana corresponde al dato central, aquel que deja un 50% de la información abajo y el otro 50% es mayor. Es un valor que divide las observaciones en dos grupos con el mismo número de individuos.

$$Me = \frac{X_{n+1}}{2} \quad \text{si } n \text{ es impar} \quad \text{Ec. (2)}$$

$$Me = \left(\frac{X_n}{2} + \frac{X_{n+1}}{2} \right) * \frac{1}{2} \quad \text{si } n \text{ es par} \quad \text{Ec. (3)}$$

Moda.- Es el valor o los valores donde la distribución de frecuencias alcanza un máximo.

Medidas de dispersión

Desviación estándar. - Es la raíz cuadrada de la varianza, es la más usada de las medidas de dispersión.

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad \text{Para población} \quad \text{Ec. (4)}$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad \text{Para muestras} \quad \text{Ec. (5)}$$

X = Media seleccionada, se debe seleccionar la que tenga menor dispersión.

CAÍTULO II

MARCO TEÓRICO

MEZCLAS ASFÁLTICAS

2.1 GENERALIDADES

2.1.1 Definición de mezcla asfáltica

La mezcla asfáltica se puede definir como la combinación de agregados pétreos con cemento asfáltico, mezclados de tal manera que los agregados pétreos queden cubiertos por una película uniforme de asfalto.

Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros. Sin olvidar que se utilizan en las capas inferiores de los pavimentos para tráficos pesados intensos. Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto.

El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.

Existen tres métodos de diseño utilizados para determinar las proporciones adecuadas de asfalto y agregados. Ellos son el método Marshall y el método Hveem, actualmente el método que se utiliza en EEUU. es el método SUPERPAVE ya que se considera que la metodología de diseño está basada en pruebas más reales y científicas y no empíricas como las del método Marshall; debido a las condiciones económicas los países como el nuestro se siguen utilizando es el método Marshall.

2.1.2 Clasificación de mezcla asfáltica

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

Tabla 2.1. Clasificación de las mezclas asfálticas.

Clasificación de mezclas asfálticas	Fracción de agregado	Masilla asfáltica
		Mortero asfáltico
		Concreto asfáltico
		Macadam asfáltico
	Temperatura de puesta en obra	Mezclas en caliente
		Mezclas en frío
	Proporción de vacíos	Mezclas densas
		Mezclas semi densas
		Mezclas abiertas
		Mezclas porosas o drenantes
	Tamaño máximo del agregado	Mezclas gruesas
		Mezclas finas
	Estructura del agregado	Con esqueleto mineral
		Sin esqueleto mineral
	Granulometría	Mezclas continuas
		Mezclas discontinuas

Fuente: Elaboración propia.

2.1.3 Características de la mezcla (analizando el método Marshall)

La mezcla asfáltica en caliente preparada en laboratorio debe ser analizada para determinar el desempeño posible en la estructura del pavimento. Determinando así, características principales y la influencia que estas tienen en el comportamiento de la mezcla. Las cuales se detallan a continuación:

2.1.3.1 Densidad

Está definida como su peso unitario, es decir, el peso de un volumen específico de mezcla compactada. La densidad es una característica importante para obtener un rendimiento duradero. Si la densidad es baja la cantidad de vacíos son mayores, por lo tanto, la mezcla compactada será vulnerable al agua. Si la densidad es alta la cantidad de vacíos es menor,

el agua no entrara en su interior obteniéndose de esta manera una carpeta de rodadura más durable. La densidad de la muestra compactada se expresa en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3) o libras por pie cúbico (lb/pe^3), se calculada al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua ($1,000 \text{ kg/m}^3$ o 62.416 lb/pe^3). La densidad patrón obtenida en laboratorio se utiliza como referencia para determinar si la densidad del pavimento compactado en la obra es adecuada o no. Difícilmente en la compactación in-situ se obtiene la densidad patrón, por lo tanto, las especificaciones permiten un porcentaje aceptable.

2.1.3.2 Vacíos de aire

Están presentes entre los agregados revestidos de asfalto en la mezcla compactada y son pequeños espacios de aire, o bolsas de aire. Es de mucha importancia que las mezclas densamente graduadas contengan determinado porcentaje de vacíos, ya que estos permiten que el asfalto fluya durante la compactación adicional debido al tráfico. El porcentaje, en muestras elaboradas en laboratorio, para capas de base y capas superficiales debe estar entre 3% y 5%. La permeabilidad de una mezcla asfáltica tiene relación con la durabilidad de un pavimento asfáltico.

A mayor permeabilidad, mayor contenido de vacíos; permitiendo pasajes a través de la mezcla del agua y el aire causando un deterioro irreversible a la carpeta asfáltica.

Por otra parte, un contenido muy bajo de permeabilidad, es decir bajo contenido de vacíos, tiende a producir exudación de asfalto. La exudación consiste en que el exceso de asfalto es exprimido, o expulsado fuera de la mezcla hacia la superficie. La relación de la densidad y el contenido de vacíos demuestra que, a mayor densidad, menor porcentaje de vacíos y a menor densidad, mayor porcentaje de vacíos en la mezcla. En campo las especificaciones para la densidad requieren acomodar el menor número posible de vacíos inferior al 8%.

2.1.3.3 Vacíos en el agregado mineral (VMA)

Son los espacios de aire que existen de entre las partículas de agregado y los espacios que están llenos de asfalto en una mezcla asfáltica compactada de pavimentación. Es decir, el VMA es el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto y el volumen de vacíos necesarios en la mezcla.

El volumen efectivo de asfalto es todo el asfalto menos la porción que se pierde, por absorción, en el agregado. Si el VMA es mayor, existirá más espacio para la película de asfalto. Hay que tener en cuenta que entre más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado se obtiene mayor durabilidad de una mezcla. Por lo anteriormente descrito existen valores mínimos de VMA recomendados y especificados en función del tamaño del agregado. Puede resultar que para economizar el contenido de asfalto en un diseño de mezcla disminuyamos los valores de VMA establecidos como mínimos, siendo esto completamente perjudicial y dañino para la calidad de la carpeta asfáltica, obteniéndose películas delgadas de asfalto en el agregado y una mezcla de baja durabilidad y apariencia seca.

2.1.3.4 Contenido de asfalto

El contenido de asfalto de una mezcla en particular es establecido usando los criterios descritos por el método de diseño seleccionado.

El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende en gran medida de su granulometría y la capacidad de absorción del agregado. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo de asfalto. Si en una granulometría el porcentaje de finos es considerablemente alto, el área superficial total será mayor, requiriendo así mayor cantidad de asfalto para cubrir todas las partículas.

Las mezclas gruesas exigen menos asfalto debido a que el área superficial total es menor. Si a la mezcla se le agrega pequeños incrementos de filler (fracciones de agregado que pasan a través del tamiz de 0.075 mm (No. 200)) existe una tendencia a absorber la mayor parte del contenido de asfalto, resultando una mezcla inestable y seca. Caso contrario al efectuar pequeñas disminuciones de filler nos da como resultado una mezcla muy rica (húmeda).

Figura 2.1. Diagrama de componentes de una mezcla asfáltica.



Fuente: *Guía básica de diseño, control de producción y colocación de mezclas asfálticas en caliente*, pág. 401.

Es así que los incrementos o disminuciones de filler causan cambios en las propiedades de la mezcla, llegando a variar de seca a húmeda. La capacidad de absorción del agregado en una mezcla es importante para determinar el contenido óptimo de asfalto.

Técnicamente se habla de dos tipos de asfalto al referirse al asfalto absorbido y el no-absorbido, contenido total de asfalto y contenido efectivo de asfalto.

El contenido total de asfalto: cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla. El contenido efectivo de asfalto: volumen de asfalto no absorbido por el agregado; es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva sobre las superficies 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.

2.1.3.5 Vacíos llenos de asfalto (VFA)

Son el porcentaje de vacíos intergranulares entre las partículas de agregado (VMA) que se encuentran llenos de asfalto. El VMA abarca asfalto y aire, por lo tanto, el VFA se

calcula al restar los vacíos de aire del VMA, y luego dividiendo por el VMA, y expresando su valor como un porcentaje.

2.1.4 Propiedades de las mezclas asfálticas

El diseño de una mezcla asfáltica consiste básicamente en la selección del tipo y granulometría del agregado a emplear, y de la selección del tipo y contenido de asfalto, de tal manera que se obtengan las propiedades deseadas en la mezcla y se satisfagan los requisitos específicos del proyecto. La selección apropiada de los materiales (con la calidad suficiente) que constituirán la mezcla y de sus proporciones correctas, requiere el conocimiento de las propiedades más significativas de las mezclas, y de su influencia en el comportamiento del pavimento. Para una aplicación específica e independientemente del procedimiento de diseño empleado.

2.1.4.1 Estabilidad o resistencia a las deformaciones plásticas

Es la capacidad de una mezcla asfáltica de resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas impuestas por el tránsito. La carpeta asfáltica debe de ser capaz de mantener su forma y textura ante las secuencias de carga que a diario le son impuestas. La fricción interna depende de la textura superficial, graduación del agregado, forma de la partícula, densidad de la mezcla, y, del contenido y tipo de asfalto. La estabilidad es función de la fricción y la resistencia inter-bloqueada del agregado en la mezcla. Cuando sobrepasamos el nivel óptimo de asfalto la película es demasiado gruesa y esto genera que la cohesión decrezca, resultando en pérdida de fricción entre las partículas que componen la mezcla asfáltica. Es importante que las partículas que componen el agregado sean angulares y ásperas en su textura superficial, esto dará una alta estabilidad a la mezcla.

Los problemas clásicos debido a una estabilidad baja se detallan a continuación:

a) Ahuellamiento: consiste en una depresión continua a lo largo de la capa de rodadura. Las cargas repetitivas de tránsito conducen a deformar permanentemente cualquier capa que componen la estructura del pavimento, sin embargo, cuando la carpeta asfáltica recién colocada presenta ahuellamiento es debido al exceso de asfalto en la mezcla, es decir el óptimo de asfalto se ha sobrepasado y genera por consiguiente pérdida de cohesión. El ahuellamiento también es producido por la forma redondeada de la partícula, por la falta de textura áspera, falta de adherencia y absorción del agregado. Es decir, si una mezcla

tiene un óptimo de asfalto y sus agregados no cumplen con las siguientes propiedades tales como: graduación, limpieza, dureza, textura superficial, capacidad de absorción, afinidad con el asfalto, peso específico, también nos generara ahuellamiento y una serie de problemas que desarrollaremos en este capítulo.

b) Corrimiento: desplazamiento de la mezcla asfáltica provocando distorsiones en la superficie de la carpeta asfáltica acompañado a veces por levantamiento de material formando “cordones” principalmente laterales. Estos desplazamientos son ocasionados por las cargas de tránsito y son debido al exceso de asfalto, falta de vacíos o bien por falta de confinamiento lateral. La corrugación son una serie de ondulaciones constituidas por crestas y depresiones, perpendiculares a la dirección de tránsito, siendo próximas unas de otras, por lo general menores a un metro entre ellas.

c) Exudación del asfalto: es el afloramiento del asfalto o ligante asfáltico hacia la superficie de la carpeta asfáltica. Formando una película continua de ligante, creando una superficie brillante, reflectante, resbaladiza y pegajosa durante las altas temperaturas. Es causado específicamente por un excesivo contenido de asfalto. Ocurre en mezclas con un porcentaje de vacíos deficiente, durante épocas calurosas. El proceso de exudación no es reversible durante el tiempo frío, por tal motivo el asfalto se acumula en la superficie.

2.1.4.2 Durabilidad

Es la propiedad de una mezcla asfáltica para resistir los efectos perjudiciales causados por el agua, aire, temperatura y las cargas debidas al tráfico. Estos efectos perjudiciales provocan desintegración del agregado, cambio en las propiedades del asfalto (polimerización y oxidación), envejecimiento, segregación, etc. Puede mejorarse la durabilidad de una mezcla asfáltica de tres maneras:

a) Utilizando un contenido óptimo de asfalto: se aumenta la durabilidad de la mezcla ya que las partículas del agregado están cubiertas por una película gruesa de asfalto. Esto evita el envejecimiento y el endurecimiento del asfalto, reteniendo por más tiempo las características originales tanto del asfalto como de los agregados.

b) Utilizando una graduación densa: esto proporciona un contacto más cercano entre las partículas de agregado, mejorando así la impermeabilidad de la mezcla.

c) Diseñar y compactando la mezcla para obtener la máxima impermeabilidad: esto se logra mediante la compactación por medios mecánicos utilizando maquinaria y equipo adecuado.

2.1.4.3 Flexibilidad

Es la capacidad de la carpeta asfáltica para acomodarse ligeramente, sin sufrir agrietamiento, soportando los movimientos graduales y asentamientos de la base y subbase. Los asentamientos en el pavimento pueden ocurrir debido a que falle cualquiera de sus componentes. Provocando daños visibles en la carpeta de rodadura. De hecho, todas las estructuras tienden a tener asentamientos diferenciales. La flexibilidad de las mezclas asfálticas es incrementada agregando mayor contenido de asfalto, hasta llegar al contenido óptimo, a partir de este, si se aumenta en exceso el contenido de asfalto la carpeta tiende a ser extremadamente flexible y provoca entonces una mezcla con estabilidad baja. 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. Una mezcla de granulometría abierta con alto contenido de asfalto es, generalmente, más flexible que una mezcla densamente graduada de bajo contenido de asfalto.

2.1.4.4 Resistencia a la fatiga

Es la capacidad de un pavimento asfáltico para resistir la flexión repetida causada por las cargas de tránsito. Si el porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica aumenta, ya sea por diseño o por falta de compactación, la resistencia a la fatiga del pavimento disminuye. Por tal razón, las mezclas asfálticas de graduación densa presentan mayor resistencia a la fatiga que las mezclas asfálticas de graduaciones abiertas. El envejecimiento y endurecimiento del asfalto en la carpeta de rodadura da como resultado menor resistencia a la fatiga. Las características de resistencia y espesor de un pavimento, y la capacidad de soporte de la subrasante, influyen determinantemente en la vida útil de una carpeta de rodadura asfáltica. Si la carpeta asfáltica presenta buena resistencia a la fatiga y la subbase está mal compactada, se verán claramente los asentamientos y la resistencia a la fatiga disminuye considerablemente. Caso contrario si la subbase está bien compactada y la carpeta asfáltica presenta mala resistencia a la fatiga la carpeta se dañará. Por lo anterior, el pavimento debe trabajar en conjunto para que pueda resistir la flexión causada por el

tránsito.

Entre algunos daños visibles debido a una mala resistencia a la fatiga se detallan a continuación:

a) Fisura piel de cocodrilo: Serie de fisuras interconectadas formando pequeños polígonos irregulares de ángulos agudos, generalmente con un diámetro promedio menor a 30 cm. El fisuramiento empieza en la parte inferior de la carpeta asfáltica, donde las tensiones y deformaciones por tracción alcanza su valor máximo, cuando el pavimento es solicitado por una carga. Las fisuras se propagan a la superficie, evolucionan interconectándose y formando una malla cerrada, que asemeja el cuero de un cocodrilo. La fisura piel de cocodrilo son causadas por la fatiga que sufre la carpeta de asfáltica al ser sometidas a las cargas repetidas del tránsito. Por lo general, el fisuramiento indica que el pavimento ya no tiene capacidad estructural de sostener las cargas de tránsito y ha llegado al fin de su vida útil. El ligante por lo general ha envejecido y por ende ha perdido la flexibilidad de sostener cargas repetidas al tránsito sin agrietarse.

b) Fisuras en bloque: Serie de fisuras interconectadas formando piezas aproximadamente rectangulares, de diámetro promedio mayor de 30 cm, con un área variable de 0.10 a 9.0 m². Se presenta generalmente en una gran área de la carpeta asfáltica y algunas veces ocurren solamente en las áreas no afectadas por el tráfico. Son causadas principalmente por la contracción de las mezclas asfálticas debido a las variaciones diarias de temperatura. A menudo es difícil constatar si las fisuras y grietas son debido a contracciones producidas en la carpeta asfáltica o en la base y subbase.

La presencia de fisuras en bloques generalmente es un indicativo de que el asfalto se ha endurecido significativamente.

c) Fisura transversal: Fracturación de longitud variable que se extiende a través de la superficie de la carpeta asfáltica, formando un ángulo aproximadamente recto con el eje de la carretera. Puede afectar todo el ancho del carril como limitarse a los 0.60 m próximos al borde lateral de la carpeta de rodadura. La contracción de la mezcla asfáltica por pérdida de flexibilidad, es decir si una carpeta asfáltica no tiene la capacidad de flexionar repetitivamente la resistencia a la fatiga es menor o nula. Puede ser ocasionado por un

exceso de filler, envejecimiento asfáltico, etc. Particularmente ante la baja temperatura y gradientes térmicos importantes.

d) Peladura: Desintegración superficial de la carpeta asfáltica como consecuencia de la pérdida de ligante bituminoso y del desprendimiento del agregado pétreo, aumentando la textura de la carpeta asfáltica pavimento y exponiendo cada vez más los agregados a la acción del tránsito y el clima. Esta anomalía es un indicativo que el asfalto se ha endurecido apreciablemente, perdiendo sus propiedades ligantes, o bien que la mezcla asfáltica existente es de deficiente calidad, ya sea por un contenido de asfalto insuficiente, empleo de agregados sucios o muy absorbentes, como también por deficiencias durante la construcción, especialmente en tratamientos superficiales bituminosos.

2.1.4.5 Resistencia al fracturamiento por baja temperatura

Es la capacidad de la mezcla asfáltica para no agrietarse en condiciones de bajas temperaturas. Depende principalmente de la rigidez del asfalto a bajas temperaturas.

2.1.4.6 Resistencia al daño por humedad o impermeabilidad

Es la resistencia al paso de agua y aire hacia el interior, o a través de la mezcla asfáltica. La resistencia al daño por humedad se relaciona con las propiedades químicas del agregado mineral y el contenido de vacíos de aire en la mezcla compactada, y por tanto con los procesos de oxidación del asfalto, su adherencia y el drenaje del pavimento.

2.1.4.7 Resistencia al deslizamiento

Es la habilidad de una carpeta asfáltica, particularmente cuando esta mojada, de minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos. Esto implica que el neumático debe mantenerse en contacto con las partículas del agregado y no sobre una película de agua en la superficie del pavimento, conocido como hidropelaje. Una buena resistencia al deslizamiento lo contribuyen agregados con textura áspera y contenidos adecuados de asfalto. Los contenidos altos de asfalto producen mezclas inestables las cuales tienden a deformarse y exudar, generando así, mayor deslizamiento.

2.1.4.8 Trabajabilidad

Es la facilidad con la cual una mezcla asfáltica puede ser colocada y compactada. Las mezclas que poseen buena trabajabilidad son fáciles de colocar y compactar; aquellas con

mala trabajabilidad es difícil de colocar y compactar. 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. 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.

2.2 COMPONENTES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

2.2.1 Cemento asfáltico

El cemento asfáltico es una mezcla compleja de hidrocarburos de peso molecular elevado, que se presenta en forma de cuerpo viscoso más o menos elástico, no cristalino y de color negro. Son productos de la destilación natural o artificial del petróleo. Es el residuo sólido que queda una vez que se hayan extraído los componentes más ligeros y volátiles del petróleo.

El asfalto es un material que se puede encontrar en la naturaleza en yacimientos naturales o puede ser obtenido como subproducto de la destilación de determinados crudos de petróleo. Tiene una consistencia sólida, al calentarlo se ablanda y se vuelve líquido, lo que le permite recubrir los agregados durante el proceso de fabricación de la mezcla asfáltica en caliente. El asfalto cambia su comportamiento dependiendo de la temperatura y el tiempo de aplicación de la carga. Es más duro a bajas temperaturas y más blando a altas, por esto, se debe seleccionar el tipo de asfalto más conveniente dependiendo del clima del sitio de colocación.

El asfalto ha sido utilizado para la construcción de carreteras desde la antigüedad ya que tiene ciertas características físicas que le permiten su uso como aglutinante en la mezcla asfáltica. El asfalto es un material altamente impermeable, adherente y cohesivo, capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo la acción de cargas permanentes, que tiene las propiedades ideales para la construcción de pavimentos cumpliendo las siguientes funciones:

- ✓ Impermeabilizar la estructura del pavimento, haciéndolo poco sensible a la humedad y eficaz contra la penetración del agua proveniente de la precipitación.
- ✓ Proporciona una fuerte unión y cohesión entre agregados, capaz de resistir la acción mecánica de disgregación producida por las cargas de los vehículos. Igualmente mejora la capacidad portante de la estructura, permitiendo disminuir el espesor de la carpeta asfáltica.

2.2.1.1 Ensayos realizados al asfalto para determinar sus propiedades

2.2.1.1.1 Penetración (ASTM D 5 AASHTO T49-97)

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

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

2.2.1.1.2 Ductilidad (ASTM D 113 AASHTO T51-00)

La ductilidad de un material bituminoso es la longitud, medida en cm., a la cual se alarga antes de romperse cuando dos extremos de una briqueta, confeccionada con una muestra se tracciona a la velocidad y temperatura especificadas. A menos que otra condición se especifique, el ensayo se efectúa a una temperatura de 25 °C y a una velocidad de 5cm/min. Para otras temperaturas deberá especificarse la velocidad.

2.2.1.1.3 Punto de inflamación y combustión en la copa abierta de Cleveland (ASTM D 1310-01 AASHTO T79-96)

El método define la determinación de los puntos de inflamación y combustión por medio de la copa abierta de Cleveland, para productos del petróleo y otros líquidos, excepto aceites combustibles y materiales que tienen un punto de inflamación por debajo de los 70°C determinado por medio de este método de ensayo.

2.2.1.1.4 Viscosidad (AASHTO T201 ASTM D 2170)

Este método abarca los procedimientos para determinar la viscosidad de asfaltos líquidos, aceites de caminos y residuos destilados de asfaltos líquidos, todos a 60°C, y de cementos asfálticos a 135°C, en el rango de 30 a 100.000 cts.

2.2.1.1.5 Densidad (ASTM D 71-94 AASHTO T229-97)

Este método establece el procedimiento para determinar la densidad de los asfaltos, mediante el uso del picnómetro a la temperatura requerida.

2.2.1.2 Requisitos del cemento asfáltico clasificado por penetración

Tabla 2.2. Requisitos del cemento asfáltico clasificado por penetración.

Pruebas	Grado de penetración									
	40 - 50		60 - 70		85 - 100		120 - 150		200 - 300	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Penetración a 25°C (77°F), 100, 5seg.	40,00	50,00	60,00	70,00	85,00	100,00	120,00	150,00	200,00	300,00
Punto de inflamación °C (°F)	232,00	-	232,00	-	232,00	-	218,00	-	177,00	-
	450,00		450,00		450,00		425,00		350,00	
Ductilidad a 25°C (77°F), 5cm/min, cm	100,00	-	100,00	-	100,00	-	100,00	-	-	-
Solubilidad en tricloroetileno, porcentaje	90,00	-	90,00	-	90,00	-	90,00	-	90,00	-
Prueba en horno de película delgada (TFO), 3,2 mm (1/8in), 163°C (325°F), 5 horas perdida por calentamiento, porcentaje										
	-	0,80	-	0,80	-	1,00	-	1,30	-	1,50
Penetración del residuo, porcentaje del original	58,00	-	54,00	-	50,00	-	46,00	-	40,00	-
Ductilidad de residuo, a 25°C (77°F), 5cm/min.cm	-	-	50,00	-	75,00	-	100,00	-	100,00	-
Prueba de mancha (cuando y como se especifique) (ver nota)	Negativo para todos los grados									
Solvente normal de nafta	Negativo para todos los grados									
Solvente de nafta-xileno, porcentaje de xileno	Negativo para todos los grados									
Solvente de heptano-xileno, porcentaje de xileno	Negativo para todos los grados									

Fuente: Guía básica de diseño, control de producción y colocación de mezclas asfálticas en caliente, pág. 223.

2.2.2 Agregados

Los agregados también llamados áridos son aquellos materiales inertes, de forma granular, naturales o artificiales, usado en forma de partículas gradadas o fragmentos, como parte de un pavimento flexible. Los agregados se usan tanto en las capas de base granular como para la elaboración de la mezcla asfáltica.

El agregado constituye entre el 90 y 95% en peso y entre el 75 y 85% en volumen en la mayoría de las estructuras de pavimento. Esto hace que la calidad del agregado usado sea un factor determinante en el comportamiento del pavimento.

2.2.2.1 Clasificación de los agregados

En general los agregados se han clasificado de varias maneras a través del tiempo, pero principalmente desde los puntos de vista de:

Procedencia

Densidad

Tamaño

Forma

Textura

2.2.2.2 Clasificación según su procedencia

De acuerdo con el origen de los agregados, según su procedencia ya sea de fuentes naturales o a partir de productos industriales, se pueden clasificar de la siguiente manera:

Agregados naturales.

Agregados artificiales.

2.2.2.3 Agregados naturales

Son aquellos procedentes de la explotación de fuentes naturales tales como: depósitos de arrastres fluviales (arenas y gravas de río) o glaciares (cantos rodados) y de canteras de diversas rocas y piedras naturales. Pueden usarse tal como se hallen o variando la distribución de tamaños de sus partículas, si ello se requiere. Todas las partículas que provienen de los agregados tienen su origen en una masa mayor la que se ha fragmentado por procesos naturales como intemperismo y abrasión, o mediante trituración mecánica realizada por el hombre, por lo que gran parte de sus características vienen dadas por la roca madre que le dio su origen.

2.2.2.4 Agregados artificiales

Por lo general, los agregados artificiales se obtienen a partir de productos y procesos industriales tales como: arcillas expandidas, escorias de alto horno, clinker, limaduras de hierro y otros, comúnmente estos son de mayor o menor densidad que los agregados corrientes.

2.2.2.5 Agregados livianos artificiales

Los áridos livianos artificiales se obtienen a través de un tratamiento térmico -a elevadas temperaturas- a determinados productos que poseen la propiedad de desprender gas al tiempo que se reblandecen, con lo cual expanden. Por efecto de la temperatura la capa superficial se vitrifica y el gas queda encerrado en el interior. Una vez enfriado se obtiene un material liviano y duro de superficie lisa y forma más o menos regular. Los más corrientes son las arcillas expandidas, las pizarras o esquistos expandidos y las cenizas volantes calcinadas.

La densidad aparente de estos áridos oscila entre los 300 y 1000 kg/m³. La absorción de agua de estos agregados, varían según la materia prima, el proceso de fabricación y el tamaño del grano; el intervalo de variación oscila entre un 8 y 25 por ciento sobre el peso deseado de los áridos mayores. A continuación, se nombra estos tipos de áridos:

- Piedra pómez
- Escorias de lava porosa
- Escorias de caldera
- Escorias de alto horno
- Pómez siderúrgica
- Arcilla, esquisto y pizarras expandidas
- Vermiculita o mica esponjada
- Perlita expandida
- Clinker
- Ladrillos triturados

2.3 ARCILLAS EXPANDIDAS TÉRMICAMENTE (AET)

Corresponden a una clase especial de arcilla en estado natural, ya que todas las arcillas comunes no expanden, extraída de canteras a cielo abierto que presentan una aptitud a la expansión de forma natural cuando se lleva el material granulado a elevadas temperaturas (entre 1100°C y 1300°C), caracterizándose porque expande, debido a los gases de combustión internos, entre un 20% y un 400% veces su tamaño inicial, dependiendo si el material fue mezclado con o sin adiciones. Las arcillas expandidas térmicamente, (AET), se caracterizan por ser esferas o partículas irregulares con un recubrimiento exterior

sinterizado, brillante en ocasiones, con una superficie externa cerrada, poco porosa y de preferencia vitrificada. En contraste, el interior del árido presenta un color negro calcinado y una gran porosidad, que es la responsable del carácter liviano del agregado.

Figura 2.2. Arcillas expandidas térmicamente.



Fuente: Elaboración propia.

Generalmente un producto expandido sea de arcilla, limo, arcilla esquistosa o esquisto arcilloso tiene dos denominaciones de acuerdo a la forma. La primera corresponde a granulados de arcilla expandida, que son los granos aproximadamente esféricos de forma redondeada o con aristas suaves; mientras que los irregulares con ángulos y aristas agudas corresponden a los denominados ripios de arcilla expandida.

2.3.1 Características de la arcilla expandida térmicamente.

Resistencia mecánica adecuada.

La densidad varía entre 300 y 1120 kg/m³

Porosidad alta

Color marrón claro

Forma redondeada

Superficie rugosa

Material aislante continuo, sin puentes térmicos

Resistente al fuego

No es corrosivo ni se pudre

No produce gases

2.3.2 Condiciones de fabricación

La expansión de los granos se debe a un desprendimiento gaseoso producido en la misma materia arcillosa. Como consecuencia del aumento de la temperatura, dicha materia se vuelve viscosa y se producen en ella reacciones químicas que provocan desprendimientos de gases (gas carbónico, óxido de carbono, anhídridos sulfurosos y sulfúricos). La formación de pequeñas cavidades en la arcilla genera como resultado una estructura celular en la materia.

Las condiciones requeridas para la expansión son, por lo tanto:

- ✓ La presencia en cantidades suficientes dentro la arcilla, de productos minerales u orgánicos, susceptibles de provocar desprendimientos gaseosos a la temperatura de fusión.
- ✓ La aparición a una temperatura determinada, de una fase de fusión cuya viscosidad sea suficientemente alta para poder retener los gases que se escapan.
- ✓ La vitrificación de la superficie exterior del grano debe ser suficiente para que dicho cascarón esté totalmente cerrado y sin poros.
- ✓ Con el fin de evitar los estallidos, es preferible introducir exclusivamente productos secos en los hornos.
- ✓ Los desprendimientos gaseosos empiezan alrededor de 600°C, pero la fase viscosa se produce únicamente entre los 1100 y 1300°C.
- ✓ Para evitar que los desprendimientos gaseosos escapen, la película vitrificada tiene que estar ya constituida. Esta condición, elimina cualquier proceso de calentamiento lento.
- ✓ Se debe tener cuidado, que los granos una vez vitrificados no permanezcan mucho tiempo en este estado, puesto que se pueden aglutinar los unos con los otros.

De acuerdo con Owens (1993) los gases se pueden producir por:

- ✓ Volatización de los sulfatos desde una temperatura de 400°C.
- ✓ Descomposición del agua de cristalización de los minerales de la arcilla aproximadamente a 600 ° C.

- ✓ Combustión de los componentes a base de carbono a aproximadamente 700°C.
- ✓ Descarbonatización de los carbonatos a aproximadamente 850°C.
- ✓ Reacción del Fe_2O_3 , causando la liberación de oxígeno desde 1100°C.

2.3.3 Propiedades de las arcillas expandidas térmicamente

Las arcillas expandidas térmicamente, se diferencian de los agregados de peso normal, por numerosas propiedades que garantizan un menor peso unitario en comparación con estos. Entre éstas, las características más importantes corresponden a las que se mencionan a continuación:

Densidad o peso unitario.- Es la propiedad fundamental de los áridos livianos. La expansión, en su grado máximo, alcanza 5 veces el volumen inicial lo que representa una densidad 5 veces inferior a los agregados naturales, aproximadamente 300 kg/m^3 en la arcilla expandida más ligera y 1120 kg/m^3 en la arcilla con un grado muy incipiente de expansión. En cambio, el peso unitario de los agregados naturales oscila entre 1440 y 1760 kg/m^3 , por lo que la diferencia entre pesos unitarios de las AET y de los agregados de peso normal, repercutirá directamente en la densidad final del concreto liviano.

La flexibilidad de la fabricación permite realizar áridos livianos de distintas densidades dependiendo del tipo de concreto que se requiera. Las arcillas expandidas de densidades más bajas se utilizan con fines aislantes, mientras que las de densidades superiores (500 - 700 kg/m^3) se aplican a la fabricación de concretos livianos estructurales.

Resistencia a la compresión.- La resistencia propia del agregado, se puede determinar por varias formas, entre ellos:

- ✓ Por rotura individual de varios granos.
- ✓ Por compresión lenta y a una carga determinada, de una cantidad de árido introducida en un mortero cilíndrico, de acero, con un embolo que ajusta suavemente y cuya parte superior está dispuesta para recibir el esfuerzo de compresión de una prensa de las corrientemente empleadas para el ensayo de cementos.
- ✓ Por un ensayo comparativo de dos hormigones: uno preparado con agregados tradicionales y otro con el árido liviano que se quiere ensayar.

Es importante aclarar que, para un mismo tipo de agregado liviano, su resistencia está ligada directamente a su densidad. Esto significa que para alcanzar una cierta resistencia del hormigón es preciso utilizar áridos con una densidad mínima, por debajo de la cual no resulta económico, ni en ocasiones físicamente posible, conseguir dicha resistencia. Por lo general, la forma del grano influye grandemente en la resistencia propia del agregado, por lo que debe ser lo más esférica posible. Weigler y Karl dan los siguientes valores de resistencia a la compresión, para gránulos de arcillas expandidas térmicamente comerciales:

Árido "Leca Giesche": 6.5 MPa

Pizarra expandida "Berwilit": 14.5 MPa

Arcillas expandidas "Detoon" y "Liapor 8": 27.2 MPa

Absorción.- Los agregados de peso normal comúnmente presentan absorciones de un 1% a 2% de agua por peso del agregado seco, por lo que la cantidad de agua absorbida, para realizar una mezcla con concreto de peso normal, se puede ajustar fácilmente.

En comparación, la alta absorción de agua es una característica intrínseca de los agregados livianos. La mayoría de los agregados livianos puede absorber de un 5% a 15% de agua por peso de material seco, valor que aumenta a un 20% para áridos con densidades por debajo de 600 kg/m^3 , valor de absorción en el que hay concordancia, que se debe limitar como máximo del árido liviano.

En general, la alta absorción de los agregados livianos indica que éstos toman una parte importante del agua de mezcla, por lo que la literatura recomienda que los agregados deben utilizarse prehumedecidos pero no saturados, ya que la uniformidad del concreto depende de una parte importante de la uniformidad del contenido de humedad de los agregados. Así mismo, se recomienda que el humedecimiento previo debe realizarse varias horas antes del mezclado, para dar tiempo a que la absorción tenga lugar; por lo general se recomiendan 24 horas antes.

Forma y tamaño de la partícula.- La forma, textura superficial y el tamaño de los agregados livianos puede influir en el costo, la trabajabilidad, el acabado, y la densidad del concreto. Muchos agregados livianos expandidos son angulares y tienen superficies

irregulares, El tamaño máximo del agregado grueso raramente excede los 2 cm. Los agregados con estas características requieren un porcentaje mayor de finos para proveer el mortero adicional para una trabajabilidad adecuada. Este aumento de finos puede ser menor cuando se usan agregados “preformados”.

Aislamiento térmico y acústico.- El aire en reposo es el mejor aislante que se conoce. La fina estructura reticular de la arcilla expandida conforma multitud de cámaras microscópicas de aire que confieren a la arcilla su capacidad aislante, con conductividades térmicas de hasta 0.073 Kcal/h.m.°C.

La arcilla expandida es un magnífico aislante acústico, sobre todo ante ruidos de impacto que se propagan por vibraciones de baja frecuencia. La estructura porosa del material amortigua las vibraciones, disipando la energía acústica.

Resistencia al fuego.- La arcilla expandida es un material cerámico y refractario. Tiene un punto de fusión superior a los 1200°C y, además, la ausencia de materia orgánica en su composición (ya que está se volatiliza durante el proceso de fabricación) anula la emisión de gases tóxicos a altas temperaturas. La arcilla expandida es un material completamente inerte, completamente estable a los ataques químicos, y resistente a las heladas.

Factor de gravedad específica.- La gravedad específica bruta para los agregados livianos es generalmente entre 1.0 y 2.4. La gravedad específica bruta para cualquier agregado aumentará usualmente si el tamaño máximo de las partículas disminuye.

Reacción álcali-agregado.- Esta es una reacción que se produce entre los álcalis presentes en la fase intersticial del concreto (procedentes no sólo del cemento, sino del agua o de los áridos también) y determinadas variedades de áridos que contengan sílice amorfa como pueden ser los minerales opalinos, ciertas rocas volcánicas con un alto contenido de sílice (andesitas o riolitas), algunas pizarras y filitas con elevado contenido en hidrónicas y zeolitas del tipo heulandita.

El producto de estas reacciones es un gel que absorbe agua, alcanzando un volumen muy superior al de sus materias primas. Esta expansión produce tensiones internas en el

hormigón que pueden llegar a disgregarlo. Para que se produzca la reacción deben presentarse las siguientes condiciones:

Exceso de humedad

Alto contenido alcalino del cemento

Un contenido crítico de silicatos en el agregado

El concreto de peso normal se hace usando agregados de piedra naturales, los cuales pueden ser sensitivos al alcali, ocasionando que el concreto se pueda deteriorar debido a la reacción alcali-agregado. En el caso de los concretos con agregados livianos, los cuales se hacen con áridos de distinta clase, se ha encontrado que agregados artificiales como las arcillas térmicamente expandidas, no son sensitivas al álcali del cemento.

2.3.4 Procesos de fabricación de las arcillas expandidas térmicamente

Los agregados livianos a base de arcilla, se pueden explotar en canteras de arcillas por medio de equipos mecánicos tales como excavadoras, retroexcavadoras, o en caso de ser necesario, el arranque se realiza con explosivos.

Con respecto a las arcillas expandidas térmicamente (AET), las actividades de calcinación y expansión de este material, son mayoritariamente realizadas en hornos rotatorios a temperaturas de 1100 a 1300°C. Estos hornos son bien conocidos en la industria cementera y son los equipos más adecuados para este procedimiento por calor. La expansión depende del proceso de quema, de tal manera que las densidades de las arcillas expandidas térmicamente varían produciendo unas arcillas expandidas más ligeras unas que otras.

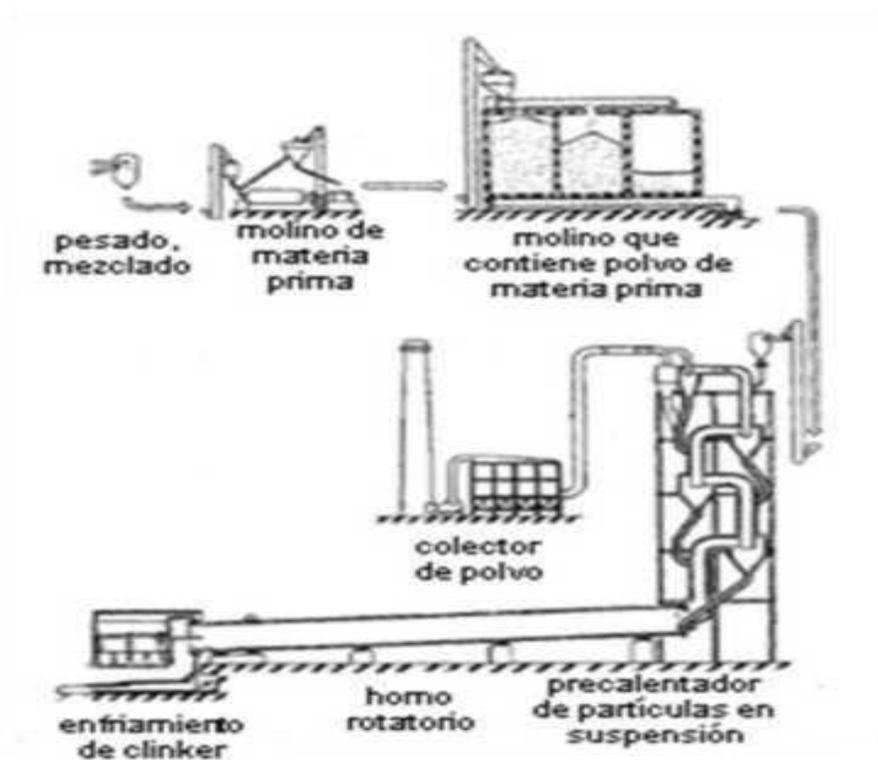
2.3.4.1 Horno rotatorio

El tipo de horno utilizado para fabricar las arcillas expandidas es similar al empleado en la industria cementera. Este consiste de un cilindro largo alineado con ladrillos refractarios y con capacidad de rotar alrededor de su eje longitudinal, el cual está inclinado a un ángulo de 5° con respecto a la horizontal. La longitud del horno depende de la composición del material grueso a ser procesado y es usualmente entre 30 y 60 metros.

El material preparado es depositado dentro del horno, mientras el quemado toma lugar en la parte más baja final. Como el material se mueve a la zona de calor, la temperatura de las partículas gradualmente se incrementa y la expansión toma lugar. El material es luego

descargado en un enfriador rotatorio, donde el agregado es enfriado por la entrada de aire frío.

Figura 2.3. Horno rotatorio para producir arcilla expandida térmicamente.



Fuente: Concreto liviano estructural con arcilla expandida térmicamente extraída de canteras localizadas en el Sur de la Sabana de Bogotá.

De acuerdo al tipo de horno rotatorio utilizado, se pueden identificar los siguientes procedimientos:

2.3.4.2 Proceso seco

Este proceso es muy conocido por las fábricas de cemento. La arcilla inicialmente tiene un 20 % de humedad y posteriormente se seca hasta alcanzar un nivel entre un 7 y 10 %; posteriormente se realiza una pulverización del material, se precalienta, se granula por tamizado y se envía a un horno rotatorio donde el choque térmico provoca la expansión y la vitrificación de la superficie de las esferas; al final el material pasa por un tambor de enfriamiento. El material esféricamente formado se denomina “pellet”, cuyos tamaños

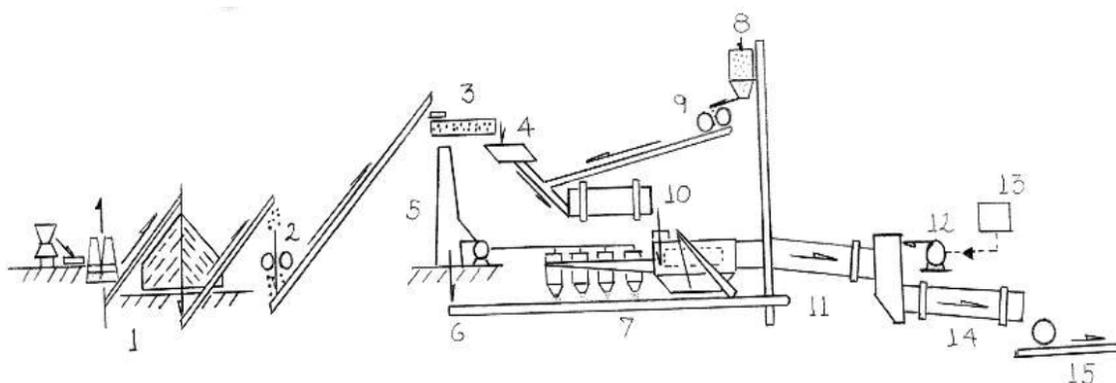
dependen de que tan finamente se haya molido la arcilla, es decir del tamaño de los gránulos, y del grado de homogenización del producto.

2.3.4.3 Proceso semihúmedo

Este procedimiento consiste en que la materia prima, a la cual se le adicionan agentes que favorecen la expansión o agentes reguladores para obtener homogenización de tal manera que ésta pasa inicialmente por una “criba” con perforaciones circulares, que resultan en cilindros que son cortados automáticamente en forma de “pequeños corchos” por la rotación de hilos de acero a alta velocidad. Estos trozos de arcilla son cortados con una longitud de 10 a 12 mm de largo. El material moldeado se lleva previamente a un canal de secado o a un tambor secador. El hecho de que se pueda controlar el tamaño de los agregados de arcilla por medio del corte de las tiras, ha ocasionado que este método sea cada día más utilizado.

En el siguiente gráfico se ilustra de manera general el procedimiento de producción de la arcilla expandida térmicamente mediante el método del proceso semihúmedo.

Figura 2.4. Horno rotatorio para producir arcilla expandida térmicamente proceso semihúmedo.



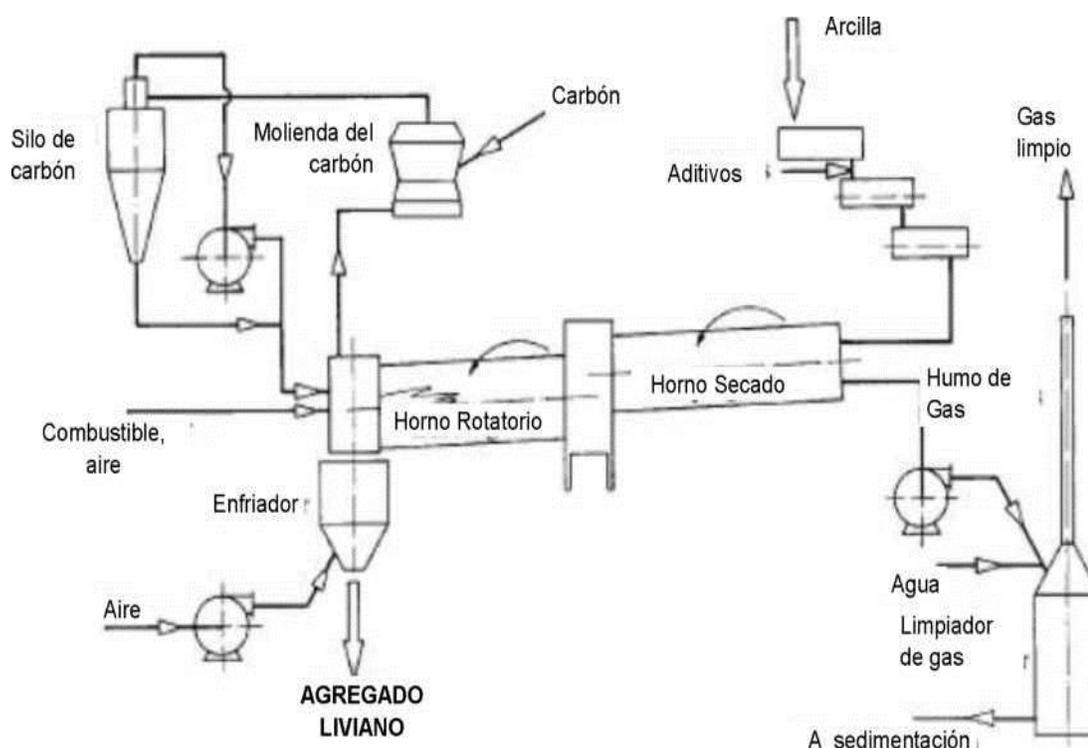
- | | |
|---------------------------------|------------------------------|
| 1. Silo de materia prima. | 9. Laminador. |
| 2. Laminador. | 10. Tambor granulador. |
| 3. Cajón de carga. | 11. Horno rotatorio. |
| 4. Prensa para hacer pastillas. | 12. Quemador. |
| 5. Chimenea. | 13. Circulación de FUEL-OIL. |
| 6. Despolvadora. | 14. Tambor de enfriamiento. |
| 7. Precalentamiento. | 15. Molino. |
| 8. Polvo. | |

Fuente: Concreto liviano estructural con arcilla expandida térmicamente extraída de canteras localizadas en el Sur de la Sabana de Bogotá.

2.3.4.4 Proceso húmedo

Este proceso es el más usado en el mundo para la fabricación de arcillas expandidas térmicamente (AET). Los agregados livianos de arcilla expandida se producen en un horno rotatorio de quema, donde previamente se introduce la arcilla con una humedad aproximada de un 25 % en forma de finas láminas en un horno de secado, con el fin de formar los gránulos de arcilla, evaporar el contenido de agua y precalentar el material antes de pasar al horno de quema.

Figura 2.5. Horno rotatorio para producir arcilla expandida térmicamente proceso húmedo.



Fuente: Concreto liviano estructural con arcilla expandida térmicamente extraída de canteras localizadas en el Sur de la Sabana de Bogotá.

Las arcillas expandidas son hechas de una mezcla de arcilla y agua que conforma una pasta, la cual es depositada en el horno rotatorio, donde se convierte en “pellets” de varios tamaños y formas, donde son sinterizados a un material vitrificado.

En Suecia, las arcillas expandidas se fabrican bajo el nombre de Leca, donde las arcillas son hechas de partículas finas pobres en limos, y se produce en todo el país por la compañía AB Svensk Leca TM. Las arcillas secan y expanden en hornos rotatorios a altas temperaturas, comprendidas entre 1100-1200°C, cuando pasan a través de la zona de quemado. El producto final es una arcilla expandida sellada exteriormente, que interiormente presenta hoyos de diferentes tamaños donde en la mayoría de los casos se encuentran interconectado

2.3.5 Ensayos realizados a los agregados

2.3.5.1 Granulometría (ASTM E 40 AASHTO T27-99)

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

Tabla 2.3. Serie de tamices utilizados para realizar la granulometría.

Designación de tamices			
Para agregados gruesos		Para agregados finos	
Sistema métrico	Sistema habitual norteamericano	Sistema métrico	Sistema habitual norteamericano
63,00 mm	2 ½ plg	2,36 mm	N°8
50,00 mm	2 plg	1,18 mm	N°16
37,50 mm	1 ½ plg	0,60 mm	N°30
25,00 mm	1 plg	0,30 mm	N°50
19,00 mm	¾ plg	0,150 mm	N°100
12,50 mm	1/2 plg	0,075 mm	N°200
9,50 mm	3/8 plg		
4,75 mm	N°4		

Fuente: Guía básica de diseño, control de producción y colocación de mezclas asfálticas en caliente, pág. 36.

2.3.5.2 Densidad real, densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos y finos (AASHTO T85, AASHTO T84)

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

Es aplicable a los áridos gruesos y finos de densidad neta entre 2000 y 3000 kg/m³, se emplean en la elaboración de hormigones y obras asfálticas.

2.3.5.3 Equivalente de arena (ASTM D 2419 AASHTO T176-00)

Este método establece un procedimiento rápido para determinar las proporciones relativas de finos plásticos o arcillosos en los áridos que pasan por el tamiz N° 4 (4.75 mm).

2.3.5.4 Desgaste mediante la máquina de los Ángeles (ASTM E 131 AASHTO T96-99)

Este método establece el procedimiento para determinar la resistencia al desgaste de los áridos mayores a 2.36 mm, de densidad neta entre 2000 y 3000 kg/m³, mediante la máquina de los Ángeles.

2.3.5.5 Desintegración sulfato de sodio (ASTM E 88 AASHTO T104-99)

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

Este método se aplica a los áridos de densidad neta entre 2000 y 3000 kg/m³, que se utilizan en la elaboración de morteros, hormigones y, mezclas asfálticas.

2.3.5.6 Caras fracturadas en los áridos (ASTM D 5821)

Este método describe el procedimiento para determinar el porcentaje, en peso de material que presenta una o más caras fracturadas de las muestras de áridos.

2.3.6 Especificaciones que deben cumplir los agregados

2.3.6.1 Agregado grueso

Este material debe consistir en grava de buena calidad triturada (Retenidos en la malla de 4.75 mm) y mezclada de manera que el producto obtenido corresponda a uno de los tipos de granulometría estipulados y llene además los requisitos siguientes:

Tabla 2.4. Especificaciones que debe cumplir el agregado grueso.

N°	Parámetro	Norma	Especificación
1	Abrasión de los Ángeles	AASHTO T 96	40 % máx.
2	Durabilidad, sulfato de sodio	AASHTO T 104	12 % máx.
3	Caras fracturadas	ASTM D 5821	75 % min.

Fuente: Guía básica de diseño, control de producción y colocación de mezclas asfálticas en caliente

2.3.6.2 Agregado fino

Este material está formado por arenas naturales, arena de piedra chancada tamizada, o su combinación y deberá tener una granulometría que (material que pasa la malla 4.75 mm), al combinarse con otras fracciones en la proporción adecuada, la mezcla resultante puede satisfacer la granulometría requerida según **AASHTO M 29** incluyendo la pérdida en sulfato, y que llene además los requisitos siguientes:

Tabla 2.5. Especificaciones que debe cumplir el agregado fino.

Nº	Parámetro	Norma	Especificación
1	Índice de durabilidad (fino)	AASHTO T 210	35 % min
2	Equivalente de arena	AASHTO T 176	45 % min
3	Durabilidad, sulfato de sodio	AASHTO T 104	15 % máx.

Fuente: Guía básica de diseño, control de producción y colocación de mezclas asfálticas en caliente.

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

Tabla 2.6. Graduación del agregado fino de acuerdo a AASHTO M 29.

Graduación del agregado fino						
Tamaño de tamiz		Cantidad más fina que pasa cada tamiz de laboratorio (aberturas cuadradas), Masa, %				
		Graduación N°1	Graduación N°2	Graduación N°3	Graduación N°4	Graduación N°5
3/8"	9,50 mm	100	-	-	100	100
N°4	4,75 mm	95 a 100	100	100	80 a 100	80 a 100
N°8	2,36 mm	70 a 100	75 a 100	95 a 100	65 a 100	65 a 100
N°16	1,18 mm	40 a 80	50 a 74	85 a 100	40 a 80	40 a 80
N°30	0,60 mm	20 a 65	28 a 52	65 a 90	20 a 65	20 a 65
N°50	0,30 mm	7 a 40	8 a 30	30 a 60	7 a 40	7 a 46
N°100	0,15 mm	2 a 20	0 a 12	5 a 25	2 a 20	2 a 30
N°200	0,075 mm	0 a 10	0 a 5	0 a 5	0 a 10	-

Fuente: Tabla 1 norma AASHTO M 29.

2.3.7 Filler (llenante mineral)

El filler consiste en material finamente dividido donde sus partículas pasan a través del tamiz 0,075 mm (No. 200), generalmente son provenientes de rocas, cal hidratada, cemento hidráulico, cenizas volantes u otro material adecuado.

El Filler o llenante mineral es el material que es incorporado a las mezclas asfálticas con el fin de modificar sus propiedades mecánicas y complementar la fracción granulométrica, para generar una mezcla bien gradada y un mejor comportamiento de esta.

2.3.7.1 Influencia del filler en las propiedades de las mezclas asfálticas

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

Mejorar el cerrado de 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 se obtendrían mezclas pobres de ligante de menor durabilidad.

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

Incrementar la durabilidad de 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 el agua, aire; además de que es el principal aglomerante dentro de la mezcla asfáltica y mantiene unidos a los agregados.

2.3.7.2 Ensayos realizados al filler

2.3.7.2.1 Granulometría del filler (ASTM D 246)

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

2.3.7.2.2 Índice de plasticidad (ASTM D 4318 – AASHTO T 90)

Este método establece el procedimiento para determinar el índice de plasticidad del material fino (filler).

2.3.7.3 Especificaciones del filler

La granulometría debe cumplir con lo establecido en la siguiente tabla.

Tabla 2.7. Granulometría que debe cumplir el filler de acuerdo con la norma ASTM.

Tamaño del tamiz	Porcentaje pasante (%)
Nº 16 (1.18 mm)	100
Nº 30 (600 µm)	97 – 100
Nº 50 (300 µm)	95 – 100
Nº 200 (75 µm)	70 - 100

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

Tabla 2.8. Especificaciones que debe cumplir el filler.

Nº	Parámetro	Norma	Especificación
1	Índice de plasticidad	ASTM D 4318 AASHTO T 90	4 % máx.

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

2.4 DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS, MÉTODO MARSHALL

2.4.1 Metodología

El método de diseño de mezclas Marshall fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del departamento de autopistas del estado de Mississippi. Posteriormente, el cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos, a través de una extensiva investigación y estudios de correlación, mejoró el procedimiento de prueba Marshall.

La estabilidad del espécimen de prueba es la máxima resistencia en N (lb) que desarrollará cuando es ensayado a una temperatura de 60 °C. 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.

El método Marshall sólo establece requisitos para la granulometría y los parámetros volumétricos de la mezcla. Los requisitos de calidad del agregado y del asfalto los fijan las dependencias encargadas del desarrollo de la infraestructura.

2.4.2 Propósito de la metodología

El propósito del método Marshall es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. El método también provee información sobre propiedades de la mezcla asfáltica en caliente, y establece densidades y contenidos óptimos de vacío que deben ser cumplidos durante la elaboración de la mezcla.

El método original de Marshall, sólo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1 plg) o menor. El método puede ser usado para el diseño en laboratorio, como para el control de campo de mezclas asfálticas en caliente.

2.4.3 Descripción general

El método Marshall usa muestras de ensayo (probetas) de 64 mm (2.5 plg) de espesor por 102 mm (4 plg) de diámetro. Una serie de muestras de ensayo, cada una con la misma combinación de agregados, pero con diferentes contenidos de asfalto, es preparada usando un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar la mezcla asfáltica. Los dos aspectos principales del método de diseño son: análisis de densidad vacíos y el ensayo de estabilidad y flujo de los especímenes compactados.

Preparación para efectuar los procedimientos Marshall

Los agregados y asfaltos presentan diferentes características, que tienen un impacto directo sobre la naturaleza del pavimento. El primer paso en el método de diseño, es determinar las cualidades que se necesita en una determinada mezcla asfáltica, y posteriormente seleccionar el tipo de agregado y un tipo compatible de asfalto que puedan combinarse para producir esas cualidades. Una vez hecho esto, se puede empezar con la preparación de los ensayos.

Selección de las muestras de material

La primera preparación para los ensayos consta de reunir muestras de asfalto y del agregado que van a ser utilizados en la mezcla asfáltica. Es importante que las muestras

de asfalto tengan características idénticas a las del asfalto que va a ser usado en la mezcla final. Lo mismo debe ocurrir con las muestras de agregado. La razón es simple, los datos de los procedimientos de diseño de la mezcla determinan la "receta" para la elaboración de la mezcla final usada en el proceso de pavimentación. La receta será exacta solamente si los ingredientes ensayados en laboratorio tienen características idénticas a los usados en el producto final.

Preparación del agregado

La relación viscosidad-temperatura del cemento asfáltico que va ser usado debe ser ya conocida con el propósito de establecer las temperaturas de mezclado y compactación en el laboratorio. En consecuencia, los procedimientos preliminares se enfocan hacia el agregado, con el propósito de identificar claramente sus características. Estos procedimientos incluyen secar el agregado, determinar su peso específico y efectuar un análisis granulométrico, con la finalidad de preparar una serie de briquetas que tengan diferentes contenidos de asfalto.

Se prepara una dosificación por el método de tanteo, en función de una faja de trabajo que se adecue al proyecto, y de una granulometría conocida de los agregados disponibles (grava de 3/4, gravilla de 3/8, arena natural y filler).

Como indica el nombre del método, se tantea con diferentes porcentajes de agregado, hasta que se encuentre una combinación que se adecue de mejor manera posible a la faja de trabajo.

Sabiendo que la muestra final se tiene que elaborar con briquetas con un peso de 1200 g; se determina el contenido de asfalto en peso equivalente a un porcentaje del peso total' de la briqueta, conociendo el peso del agregado que tiene que ocupar cada briqueta por la diferencia en peso entre el total de la briqueta y el peso del asfalto, se separa una dosificación en pesos retenidos, que aporta cada tamiz.

Se prepara un número determinado de muestras de agregado para cada contenido de asfalto para elaborar un punto en la curva de dosificación Marshall y se separa cada uno en fuentes o bandejas correctamente identificadas.

Es importante mencionar que, para la elaboración del método tradicional de mezcla asfáltica en caliente, el agregado tiene que estar seco, para tal fin, antes de efectuar el pesado se deja el material en horno a 110 °C durante 24 horas.

Preparación de las muestras de ensayo (briquetas)

Las briquetas de ensayo de las posibles mezclas de pavimentos son preparadas haciendo que cada una contenga una ligera cantidad diferente de asfalto, como se mencionó anteriormente. Este margen le da al laboratorio un punto de partida para determinar el contenido óptimo de asfalto en la mezcla final. La proporción de agregado en las mezclas está formulada por los resultados de análisis granulométrico.

Las muestras son preparadas de la siguiente manera:

El asfalto y el agregado se calientan por separado y se mezclan completamente hasta que todas las partículas de agregado estén recubiertas (esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta).

La mezcla se vierte en los moldes pre-calentados, luego se procede a la compactación con el martillo, el número de golpes se especifica en la **tabla 2.9**. Después de completar la compactación, las briquetas se dejan enfriar para luego proceder a su extracción de los moldes.

2.4.4 Especificaciones de la metodología

La selección del contenido óptimo de cemento asfáltico depende de muchos criterios. Un punto inicial para el diseño es escoger el porcentaje de asfalto para el promedio de los límites de vacíos de aire, el cual es 4%. El rango de vacíos de aire es de 3% al 5%. Todas las propiedades medidas y calculadas bajo este contenido de asfalto deberán ser evaluadas comparándolas con los criterios para el diseño de mezclas (**Tabla 2.10**). Si todos los criterios se cumplen, entonces se tendrá el diseño preliminar de la mezcla asfáltica, en caso de que un criterio no se cumpla, se necesitará hacer ajustes, o rediseñar la mezcla.

2.4.4.1 Granulometría

La selección de una curva granulométrica para el diseño de una mezcla asfáltica cerrada o densa, está en función de dos parámetros: el tamaño máximo nominal del agregado y el de las líneas de control (superior e inferior), Las líneas de control son puntos de paso

obligado para la curva granulométrica. La **Tabla 2.9** presenta los tamaños máximos nominales más utilizados, así como sus líneas de control de acuerdo con la norma AASHTO.

Tabla 2.9. Granulometrías que deben cumplir los agregados para el diseño Marshall.

Granulometría para el diseño Marshall						
Malla en mm	Porcentaje por peso que pasa por la malla estándar (AASHTO T 27 Y AASHTO T 11)					
	A	B	C	D	E	F
37,50 mm	100					
25,00 mm	97 a 100	100	100			
19,00 mm	-	97 a 100	97 a 100	100	100	
12,50 mm	-	76 a 88	(±5)	97 a 100	97 a 100	
9,50 mm	53 a 70	-	(±6)	-	(±5)	100
4,75 mm	40 a 52	49 a 59	(±7)	57 a 69	(±6)	37 a 47
2,36 mm	-	-		-	-	-
1,18 mm	25 a 39	36 a 45	(±5)	41 a 49	(±5)	7 a 13
0,60 mm	12 a 22	20 a 28	(±4)	22 a 30	(±4)	-
0,30 mm	8 a 16	13 a 21	(±3)	13 a 21	(±3)	-
0,15 mm	-	-		-	-	-
0,075 mm	3 a 8	3 a 7	3 a 8	3 a 8	3 a 8	2 a 4

Fuente: Materiales, mezclas asfálticas y técnicas de preservación, división 400, tabla 403-1.

2.4.4.2 Golpes de compactación

El proceso de compactación se realiza mediante una serie de golpes con el martillo Marshall sobre ambas caras de la muestra, según el propósito y tránsito esperado de la mezcla que se está diseñando.

Tabla 2.10. Número de golpes en cada cara del espécimen de ensayo.

Numero de golpes			
Condicion de tránsito que resultan en un ESALs de diseño (millones)	Alto	Medio	Bajo
	> 10 hasta 30	Entre 0,3 hasta 30	<0,3
Numero de golpes en cada cara del espécimen de ensayo	75,00	50,00	35,00

Fuente: Materiales, mezclas asfálticas y técnicas de preservación, división 400.

2.4.4.3 Parámetros volumétricos de diseño Marshall

La volumetría de la mezcla para encontrar el contenido de asfalto óptimo debe cumplir los parámetros establecidos en las tablas 2.11 y 2.12. El flujo y estabilidad Marshall se tienen que medir de acuerdo con el método AASHTO T 245.

Tabla 2.11. Requisitos para la mezcla asfáltica Marshall (AASHTO T 2459).

Criterios para mezclas método Marshall	Transito liviano Carpeta y base		Transito mediano Carpeta y base		Tránsito pesado Carpeta y base	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Compactación, numero de golpes en cada cara de la probeta	35	35	50	50	75	75
Estabilidad N (lb)	336,00 (750,00)	-	5358,00 (1200,00)	-	8006,00 (1800,00)	-
Flujo, 0,25mm (0,01plg)	8,00	18,00	8,00	16,00	8,00	14,00
% de vacíos	3,00	5,00	3,00	5,00	3,00	5,00
% VMA	Ver tabla 2.12					
% VFA	70,00	80,00	65,00	78,00	65,00	75,00

Fuente: Guía básica de diseño, control de producción y colocación de mezclas asfálticas en caliente, pág. 414.

Tabla 2.12. Porcentajes mínimos de vacíos en el agregado mineral (VMA).

Tamaño máximo en mm		VMA mínimo, por ciento		
		Vacíos de diseño, por ciento		
mm	plg	3,00	4,00	5,00
1,18	N°16	21,50	22,50	23,50
2,36	N°8	19,00	20,00	21,00
4,75	N°4	16,00	17,00	18,00
9,50	3/8	14,00	15,00	16,00
12,50	1/2	13,00	14,00	15,00
19,00	3/4	12,00	13,00	14,00
25,00	1.00	11,00	12,00	13,00
37,50	1.50	10,00	11,00	12,00
50,00	2,00	9,50	10,50	11,50
63,00	2,50	9,00	10,00	11,00

Fuente: Guía básica de diseño, control de producción y colocación de mezclas asfálticas en caliente, pág. 415.

2.4.5 Ensayos realizados a la mezcla asfáltica compactada

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

2.4.5.1 Determinación de la gravedad específica bulk

El ensayo de gravedad específica bulk de mezclas asfálticas compactadas utilizando especímenes saturados superficialmente secos puede desarrollarse tan pronto como el espécimen se haya enfriado. Este ensayo se desarrolla de acuerdo con la norma AASHTO T 166-05, para la gravedad específica bulk de mezclas asfálticas compactadas usando especímenes cubiertos con parafina la norma AASHTO T 275 es aplicada. Para determinar cuál norma se debe utilizar, se realizarán pruebas de absorción a la mezcla asfáltica compactada; si la absorción es mayor al 2%, se utiliza la norma AASHTO T 166-05, en caso contrario, se recurre a la norma AASHTO T 275.

2.4.5.2 Ensayo de estabilidad y flujo

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

Las briquetas confeccionadas con cemento asfáltico se deben sumergir en un baño María a $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($140\text{ }^{\circ}\text{F} \pm 1.8\text{ }^{\circ}\text{F}$) de 30 a 40 minutos antes de la prueba. Remueva el espécimen de ensayo del baño María y cuidadosamente se secará la superficie. Colocándolo y centrándolo en la mordaza inferior, se procederá a colocará la mordaza superior y se centrará completamente en el aparato de carga. Posteriormente se aplica la carga de prueba al espécimen a una velocidad constante de $50 \pm 1\text{ mm/min}$ (2 plg/min), hasta que ocurra la falla. El punto de falla está definido por la lectura de carga máxima obtenida. El número total de Newtons (lb) requeridos para que se produzca la falla del espécimen deberá registrarse como el valor de estabilidad Marshall.

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

fluencia, comenzando desde el momento en que se retira la probeta del agua, no debe durar más de 30 segundos.

2.4.5.3 Análisis de densidad y vacíos

Después de completar las pruebas de estabilidad y flujo, se realiza el análisis de densidad y vacíos para cada serie de especímenes de prueba. Resulta conveniente determinar la gravedad específica teórica máxima (AASHTO T 209) para al menos dos contenidos de asfalto, preferentemente aquellos que estén cerca del contenido óptimo de asfalto. Un valor promedio de la gravedad específica efectiva del total del agregado se calculará de estos valores. Utilizando la gravedad específica y la gravedad específica efectiva del total del agregado; el promedio de las gravedades específicas de las mezclas compactadas; la gravedad específica del asfalto y la gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica, se calcula el porcentaje de asfalto absorbido en peso del agregado seco, porcentaje de vacíos (Va); porcentaje de vacíos llenados con asfalto (VFA) y el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA).

2.5 MEZCLAS ASFÁLTICAS CON AGREGADOS LIVIANOS

La ausencia de materiales pétreos en ciertas zonas es un hecho por todos conocido, donde no se disponen otras fuentes de agregados comerciales que puedan utilizarse satisfactoriamente en carpetas, bases y sub-bases de pavimentos. el costo del transporte influye tan decididamente que obliga al proyectista a restringir su uso o a buscar soluciones por el lado de la estabilización o del empleo de materiales de peor calidad. En bases y sub-bases estos conceptos se han llevado a la práctica, con éxito variable, a través de los denominados materiales "subnormales" cuya durabilidad en servicio ha sido en la mayoría de los casos el factor decisivo en su comportamiento.

La degradación del material original bajo tránsito, la heterogeneidad que los caracteriza y algunos de los procesos constructivos empleados han obligado a la reconsideración de muchos proyectos, son incorporándoles agentes estabilizantes o disponiéndolos en niveles estructurales menos solicitados. En este último caso, y como consecuencia de lo anterior, se han incrementado los espesores de mezclas asfálticas en caliente (bases granulares y carpetas) con lo que en definitiva se vuelven a presentar los problemas de disponibilidad de piedra.

La realización de planes de obra ambiciosos por las instituciones de vialidad, conjuntamente con los cortos plazos de obra estipulados, constituyen en la actualidad un serio agravante para el problema, que se ha visto agudizado en los últimos tiempos por el hecho demostrado de que las canteras comerciales, sea por el estado de sus equipos, los inconvenientes en la importación de repuestos o por la misma rentabilidad de las inversiones realizadas, no trabajan al 100 % de su capacidad productiva. Estos argumentos y la falta de planificación entre los entes estatales hacen pensar que en breve término se presentarán insalvables problemas de acopio, cuya solución y consecuencias no resulta fácil de prever.

Por otro lado, y desde el punto de vista estrictamente técnico, el uso cada vez mayor de mezclas en caliente es la resultante de su elevado valor estructural puesto repetidamente en evidencia, para reducir los espesores totales de estructura, disminuir las deflexiones elásticas y aliviar la sollicitación de las capas granulares y de la subrasante.

La aparición en el mercado de ciertos materiales denominados genéricamente "agregados livianos", y cuyo uso en la construcción se ha intensificado en los últimos años, ha motivado la realización de trabajos relacionados con este tipo de agregados, con el objetivo básico de estudiar sus características físicas y mecánicas hacia un probable uso como material de estructuras camineras.

La Industria de los "agregados livianos", relativamente nueva en nuestro país, tiene aplicación en EE. UU. y en Europa desde 1930 y nace como consecuencia de la necesidad de encontrar un material liviano, resistente y aislante, para ser utilizado en la producción de elementos prefabricados, particularmente para viviendas. Se ha desarrollado especialmente en EE. UU., Mississippi, Louisiana y Texas (zonas relativamente escasas en materiales pétreos) y en Europa en Dinamarca, (país de origen) Suecia, Noruega, Inglaterra, Bélgica y Alemania, donde la prefabricación está muy evolucionada. En la construcción de estructuras de hormigón ya existe bastante experiencia en nuestro medio, habiéndose apreciado sus incuestionables ventajas por disminución de peso, aislamiento térmico y acústico y gasto más reducido que el de los materiales pétreos convencionales. Su reducido peso no impide que se obtengan muy buenas resistencias a la compresión

cuando se elige convenientemente su granulometría y se controla en obra la relación agua-cemento.

Pudiéndose obtener resistencias variables ($100-300 \text{ kg/cm}^2$) a 28 días, resulta apto para construcciones de cualquier espesor, con la ventaja de brindar estructuras más livianas. Su peso específico bajo (alrededor de $1,50 \text{ kg/m}^3$ en estructuras con armadura normal) permite ahorros significativos en el proyecto de hormigones (disminución de peso propio, contrapisos aislantes, cuantías menores, encofrados, etc.) constatándose en general que a igualdad de resistencia, el hormigón de arcilla expandida es más liviano y más aislante y a igualdad de peso es más resistente; existen ventajas adicionales en los hormigones de baja densidad ya que pueden clavarse, agujerearse y aserrarse con más facilidad. Su menor módulo de deformación los hace más "elásticos" soportando mayores deformaciones a igualdad de resistencias. Su forma y granulometrías le dan buena trabajabilidad y manipuleo en obra, pudiéndose colar sin dificultad en vigas y columnas.

En la técnica vial su aplicación comenzó en estructuras de puentes y en la actualidad se ha extendido a pavimentos de hormigón (EE.UU.) con resultados altamente satisfactorios en cruces e interconexiones donde la acción abrasiva del tránsito es más intensa. En el Estado de Mississippi se ha utilizado, con el nombre comercial GRAVELITE, en un tramo experimental en las cuatro trochas de la carretera estadual 190 (ver C.F. Marchetti, publicación D, V. D. A. N°21) como concreto asfáltico de 7 cm de espesor. Después de tres años de servicio la mezcla (Estabilidad Marshall 1.200 kg y fluencia 13/100") no aprecia fallas notables, asignándosele buen comportamiento. El costo de aplicación fue de un 78 % del calculado para una mezcla de similares características inutilizando agregados pétreos con igual distancia de transporte.

Si bien la experimentación extranjera con estos materiales aún es escasa para mezclas asfálticas en caliente, los resultados logrados abren un panorama muy interesante en nuestro medio, por las limitaciones arriba mencionadas y por las consecuencias económicas que puede originar su uso.

Como todo material en la etapa de experimentación, su uso en nuestras condiciones obligará en definitiva al conocimiento de la durabilidad en servicio, previo análisis de sus

características, procesos de elaboración, facilidades del mercado, costos, etc. Sólo así podrá aconsejarse en las obras actualmente a proyectarse, anticipándose en esta forma, mediante adecuada experimentación, a las decisiones que, en el futuro cercano, y bajo el riesgo de tener que paralizar las obras, deberán adoptarse.

2.5.1 Características de la arcilla para la fabricación de arcilla expandida térmicamente.

Los suelos utilizados en el proceso son precisamente aquéllos que presentan inconvenientes para su empleo en sub-rasantes naturales, ya que sus plasticidades no son nunca inferiores a 25 (en general 35 a 50 %).

Los suelos que se usa en la fabricación del material expandido objeto de este trabajo es una arcilla orgánica con un alto índice de plasticidad. Sus características son relativamente variables y los ensayos realizados sobre una muestra representativa tomada en fábrica arrojan los siguientes valores:

Pasa tamiz 200	88	%
Limite líquido	69	%
Limite plástico	32	%
Índice de plasticidad	37	%
Límite de contracción	16	%

2.5.2 Características de las arcillas de la ciudad de Tarija

La ciudad de Tarija y sus alrededores en su mayoría está situada sobre terrenos arcillosos de diferentes características, por lo que se cuenta con una gran cantidad de bancos de suelos arcillosos, una pequeña parte de esta arcilla es usada como materia prima para la elaboración de cerámicas como ser ladrillos tejas, etc. obteniendo productos de buena calidad destinada a la construcción.

el agregado denominando arcilla expandida térmicamente es fabricado a base de arcilla con características físicas, químicas y mineralógicos particulares que potencian su expansión obteniendo así un agregado liviano de baja densidad, suponiendo una posible elaboración de este agregado con arcilla de nuestro medio es importante conocer las características de las arcillas y verificar si estas cumplen con los requerimientos que sea mencionado anteriormente.

De acuerdo al estudio realizado “Zonificación del tipo de suelo en la ciudad de Tarija para zonas periféricas en los distritos 7, 10, 11 y 13” se ha determinado las características de los suelos que se indican en la siguiente tabla

Tabla 2.13 Características de las arcillas de la ciudad de Tarija.

Distrito	Pasa tamiz 200 (%)	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice de Plasticidad (%)
7	96,15	48,00	31,00	16,00
10	88,62	51,55	23,44	28,11
11	97,33	63,00	34,00	29,00
13	90,21	53,86	22,93	30,93

Fuente: Tesis “Zonificación del tipo de suelo en la ciudad de Tarija para zonas periféricas en los distritos 7, 10, 11 y 13”.

Las características de la arcilla con mayor potencial de expansión durante la cocción de acuerdo a la revista de vialidad de la provincia de Buenos Aires Argentina son las que se indican a continuación.

Tabla 2.14 Características de la arcilla para la elaboración de arcilla expandida térmicamente.

Pasa tamiz 200 (%)	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice de Plasticidad (%)
88,00	69,00	32,00	37,00

Fuente: Dirección de vialidad provincia de Buenos Aires Argentina.

De acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio las características de estos suelos son similares a las características de las arcillas que indica la bibliografía consultada, por lo tanto, es factible la elaboración de este agregado artificial con arcilla disponible en nuestra ciudad.

CAPÍTULO III

RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

3.1 CRITERIOS A UTILIZARSE

3.1.1 Criterios de selección del agregado arcilla expandida térmicamente (Leca)

Las arcillas expandidas es un material desconocido en nuestro medio local y no se tiene conocimiento sobre su uso en obras civiles por lo que no se encuentra a la venta en tiendas de materiales en nuestra ciudad.

En la presente investigación se utilizó arcilla expandida (Leca) debido a que es el material más conocido y se puede encontrar en mayor cantidad y más económico, la adquisición de este material fue del exterior Buenos Aires argentina lugar donde está ubicada su planta de producción.

Figura 3.1. Arcilla expandida Leca.



Fuente: Elaboración propia.

3.1.2 Criterios de selección de banco de materiales

La ciudad de Tarija cuenta con varios bancos de materiales ubicados en diferentes ríos de esta zona los cuales nos proporcionan seguridad para el diseño que se realice, para la presente investigación se utilizara los agregados de la constructora Erika S.R.L. que cuenta con una gran cantidad de áridos que cumple con las especificaciones propuestas por las normas ASTM y AASHTO.

Figura 3.2. Zona de muestreo Rancho Sud.



Fuente: Elaboración propia.

La planta de acopio de agregados de la constructora Erika S.R.L. se encuentra ubicada en el Km. 8 carretera a San Lorenzo, en la comunidad del Rancho Sud de la provincia Méndez

Figura 3.3. Agregado pétreo.



Fuente: Elaboración propia.

3.1.3 Criterios de Selección de Asfalto

El cemento asfáltico que se utilizará para realizar los ensayos será el convencional 85-100 de industria brasilera, es un producto de buena calidad que actualmente es usado por el Servicios Departamental de Caminos (SEDECA) en los diferentes proyectos que se ejecutan en nuestro departamento.

El cemento asfáltico a utilizarse es el convencional de penetración 85-100 adjunto con la ficha técnica.

Tabla 3.1. Especificación técnica del cemento asfáltico convencional 85-100.

N°	Características	Detalle		Exigencia
		AASHTO	ASTM	
1	Penetración a 25°C	T-49-97	D-5	85-100
2	Vaso abierto Cleveland punto de inflamación °C	T-48	D92	>a 232°C
3	Viscosidad saybol furol a 135°C, seg.	T-72	D-102	>85seg
4	Solubilidad en tricloro etileno %	T-44	D-2042	>a 99.00%
5	Ductibilidad 25°C	T-51	D-113	>a 100cm
6	Ensayo de la mancha heptaxilol, (20% máximo de xilol)	T-102	-	(-) Negativo
7	Ensayo de horno película delgada	T-179	D-1757	<a 1
8	Penetración del residuo de perdida, x calentamiento % original	T-49	D-5	>a 50
9	Porcentaje de agua	T-55	-	<a 0.2

Fuente: Especificaciones técnicas del fabricante.

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS

Los agregados pétreos que se van a utilizar en la investigación, son provenientes de la planta chancadora Erika ubicada en Rancho Sud y los agregados arcilla expandida (Leca) es de origen argentina.

Los materiales empleados en los diseños de mezclas asfálticas deben cumplir ciertas especificaciones propuestas por las normas ASTM y AASHTO para lo cual se realizarán los ensayos de caracterización que se detallan a continuación.

Todos los ensayos se realizarán de acuerdo al manual técnico para el diseño de carreteras propuesta por la ABC la misma que se basa en las normas ASTM y AASHTO.

3.2.1 Ensayo de granulometría (AASTHO T-27) (ASTM C-136)

Figura 3.4. Proceso de tamizado agregado grueso



Fuente: Elaboración propia.

Este método de ensayo tiene por objeto determinar cuantitativamente la distribución de los tamaños de las partículas de agregado grueso y fino de un material, por medio de tamices de abertura cuadrada progresivamente decreciente. Este método también se puede aplicar usando mallas de laboratorio de abertura redonda, y no se empleará para agregados recuperados de mezclas asfálticas.

Por granulometría o análisis granulométrico de un agregado se entenderá todo procedimiento manual o mecánico por medio del cual se pueda separar las partículas constitutivas del agregado según tamaños, de tal manera que se puedan conocer las cantidades en peso de cada tamaño que aporta el peso total. Para separar por tamaños se utilizan las mallas de diferentes aberturas, las cuales proporcionan el tamaño máximo de agregados en cada una de ellas. En la práctica los pesos de cada tamaño máximo de agregado en cada una de ellas. En la práctica los pesos de cada tamaño se expresan como porcentaje retenidos en cada malla con respecto al total de la muestra. Estos porcentajes retenidos se calculan tanto parciales como acumulados, en cada malla, ya que con estos últimos se procede a trazar la gráfica de los valores de material (granulometría)

Las mallas de prueba que se usan comúnmente para los proyectos de carreteras con aquellas con abertura de 2½, 2, 1½, 1, ¾, ½, 3/8 de pulgada cuadrada para las fracciones grandes y con 4, 10, 40, 80, 100 y 200 mallas por pulgada para las fracciones más pequeñas. Estas últimas mallas se designan como N° 4, N°10, etc.

A la porción de material agregado que queda retenida en la malla No. 10 (esto es, con partículas mayores de 2,00 mm) se le conoce como agregado grueso. Al material que para por la malla No. 10 pero queda retenido en la malla N° 200 (partículas mayores que 0.075) se le conoce como agregado fino. El material que pasa por la malla No. 200 se llama fino y corresponde a impurezas, limos y arcillas.

Granulometría de agregados arcilla expandida (Leca)

A continuación, se muestran los resultados de la granulometría de los 3 ensayos realizados.

Tabla 3.2. Granulometrías de la grava, gravilla y arena (Leca) del ensayo 1.

Peso total seco	3000,00 gr		2000,00 gr		500,00 gr	
Tamiz	Grava (Leca)		Gravilla (Leca)		Arena (Leca)	
N°	Peso Ret.	% que pasa	Peso Ret.	% que pasa	Peso Ret.	% que pasa
1"	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
3/4"	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
1/2"	174,18	94,19	0,00	100,00	0,00	100,00
3/8"	2995,80	0,14	1,60	99,92	0,00	100,00
N° 4	2995,80	0,14	1624,40	18,78	0,00	100,00
N° 8	2995,80	0,14	1997,60	0,12	142,63	71,47
N° 16	2995,80	0,14	1997,60	0,12	232,17	53,57
N° 30	2995,80	0,14	1997,60	0,12	290,13	41,97
N° 50	2995,80	0,14	1997,60	0,12	371,07	25,79
N° 100	2995,80	0,14	1997,60	0,12	411,57	17,69
N° 200	2995,80	0,14	1997,60	0,12	462,33	7,53

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.3. Granulometrías de la grava, gravilla y arena (Leca) del ensayo 2.

Peso total seco	3000,00 gr		2000,00 gr		500,00 gr	
Tamiz	Grava (Leca)		Gravilla (Leca)		Arena (Leca)	
Nº	Peso Ret.	% que pasa	Peso Ret.	% que pasa	Peso Ret.	% que pasa
1"	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
3/4"	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
1/2"	121,09	96,09	0,00	100,00	0,00	100,00
3/8"	3097,21	0,09	2,99	99,87	0,00	100,00
Nº 4	3097,21	0,09	1824,36	20,68	0,00	100,00
Nº 8	3097,21	0,09	2298,39	0,07	154,31	71,42
Nº 16	3097,21	0,09	2298,39	0,07	240,48	55,47
Nº 30	3097,21	0,09	2298,39	0,07	314,42	41,77
Nº 50	3097,21	0,09	2298,39	0,07	390,49	27,69
Nº 100	3097,21	0,09	2298,39	0,07	445,57	17,49
Nº 200	3097,21	0,09	2298,39	0,07	489,06	9,43

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.4. Granulometrías de la grava, gravilla y arena (Leca) del ensayo 3.

Peso total seco	3000,00 gr		2000,00 gr		500,00 gr	
Tamiz	Grava (Leca)		Gravilla (Leca)		Arena (Leca)	
Nº	Peso Ret.	% que pasa	Peso Ret.	% que pasa	Peso Ret.	% que pasa
1"	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
3/4"	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
1/2"	114,97	95,89	0,00	100,00	0,00	100,00
3/8"	2798,04	0,07	3,00	99,85	0,00	100,00
Nº 4	2798,04	0,07	1590,40	20,48	0,00	100,00
Nº 8	2798,04	0,07	1999,00	0,05	134,40	71,40
Nº 16	2798,04	0,07	1999,00	0,05	210,25	55,27
Nº 30	2798,04	0,07	1999,00	0,05	281,66	40,07
Nº 50	2798,04	0,07	1999,00	0,05	340,81	27,49
Nº 100	2798,04	0,07	1999,00	0,05	395,80	15,79
Nº 200	2798,04	0,07	1999,00	0,05	426,60	9,23

Fuente: Elaboración propia.

Granulometría de agregados pétreos (Erika)

Tabla 3.5. Granulometrías de la grava, gravilla y arena (Erika) del ensayo 1.

Peso total seco	5100,00 gr		3500,00 gr		550,00 gr	
Tamiz	Grava (Erika)		Gravilla (Erika)		(Arena Erika)	
N°	Peso Ret.	% que pasa	Peso Ret.	% que pasa	Peso Ret.	% que pasa
1"	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
3/4"	94,35	98,15	0,00	100,00	0,00	100,00
1/2"	2904,45	43,05	42,00	98,80	0,00	100,00
3/8"	4378,35	14,15	98,00	97,20	0,00	100,00
N° 4	5077,05	0,45	2436,00	30,40	0,76	99,86
N° 8	5084,70	0,30	3451,00	1,40	95,75	82,59
N° 16	5084,70	0,30	3461,50	1,10	201,46	63,37
N° 30	5084,70	0,30	3472,00	0,80	295,89	46,20
N° 50	5084,70	0,30	3475,50	0,70	367,06	33,26
N° 100	5084,70	0,30	3475,50	0,70	456,05	17,08
N° 200	5089,80	0,20	3475,50	0,70	488,72	11,14

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.6. Granulometrías de la grava, gravilla y arena (Erika) del ensayo 2.

Peso total seco	5100,00 gr		3500,00 gr		550,00 gr	
Tamiz	Grava (Erika)		Gravilla (Erika)		Arena (Erika)	
N°	Peso Ret.	% que pasa	Peso Ret.	% que pasa	Peso Ret.	% que pasa
1"	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
3/4"	71,55	98,65	0,00	100,00	0,00	100,00
1/2"	3044,85	42,55	24,00	99,40	0,00	100,00
3/8"	4587,15	13,45	140,00	96,50	0,00	100,00
N° 4	5278,80	0,40	2756,00	31,10	0,95	99,81
N° 8	5284,10	0,30	3936,00	1,60	77,55	84,49
N° 16	5284,10	0,30	3960,00	1,00	184,15	63,17
N° 30	5284,10	0,30	3972,00	0,70	259,50	48,10
N° 50	5284,10	0,30	3976,00	0,60	334,70	33,06
N° 100	5284,10	0,30	3976,00	0,60	405,09	18,98
N° 200	5289,40	0,20	3976,00	0,60	445,29	10,94

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.7. Granulometrías de la grava, gravilla y arena (Erika) del ensayo 3.

Peso total seco	5100,00 gr		3500,00 gr		550,00 gr	
Tamiz	Grava (Erika)		Gravilla (Erika)		Arena (Erika)	
Nº	Peso Ret.	% que pasa	Peso Ret.	% que pasa	Peso Ret.	% que pasa
1"	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
3/4"	74,10	98,70	0,00	100,00	0,00	100,00
1/2"	3277,50	42,50	33,30	99,10	0,00	100,00
3/8"	4896,30	14,10	111,00	97,00	0,00	100,00
Nº 4	5680,05	0,35	2567,80	30,60	1,05	99,79
Nº 8	5682,90	0,30	3644,50	1,50	78,55	84,29
Nº 16	5682,90	0,30	3655,60	1,20	192,65	61,47
Nº 30	5682,90	0,30	3666,70	0,90	260,50	47,90
Nº 50	5682,90	0,30	3670,40	0,80	343,20	31,36
Nº 100	5682,90	0,30	3670,40	0,80	406,09	18,78
Nº 200	5688,60	0,20	3670,40	0,80	453,79	9,24

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2 Ensayo de desgaste por medio de la máquina de los Ángeles (AASHTO T-96) (ASTM C-131)

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

Debido a las condiciones de esfuerzo-deformación, la carga de la rueda es transmitida a la superficie del pavimento a través de la llanta como una presión vertical aproximadamente uniforme y alta. La estructura del pavimento distribuye los esfuerzos de la carga, de una máxima intensidad en la superficie hasta una mínima en la subrasante.

Por esta razón los agregados que están en, o de la superficie, como son los materiales de base y carpetas asfálticas, deben ser más resistentes que los agregados usados en las capas inferiores, sub base, de la estructura del pavimento, la razón se debe a que las capas superficiales reciben los mayores esfuerzos y el mayor desgaste por parte de cargas del tránsito.

Por otro lado, los agregados transmiten los esfuerzos a través de los puntos de contacto donde actúan presiones altas. El ensayo de desgaste de los Ángeles, ASTM C-131 o

ASTHO T-96, mide básicamente la resistencia de los puntos de contacto de un agregado al desgaste y/o a la abrasión.

Este método describe el procedimiento para determinar el porcentaje de desgaste de los agregados de tamaños menores a 37.5 mm (1 ½”) y agregados gruesos de tamaños mayores de 19 mm (¾”), por medio de la máquina de los Ángeles.

Los aparatos y procedimiento para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos AASTHO T-96 y ASTM C-131.

Figura 3.5. Proceso del ensayo desgaste por medio de la máquina de los Ángeles.



Fuente: Elaboración propia.

Desgaste de agregados arcilla expandida Leca

Tabla 3.8. Datos y resultados del ensayo de desgaste para la gravilla 3/8” (Leca).

Gradación C		
Carga abrasiva con 8 esferas a 32.5 rpm, revoluciones		
Pasado	Retenido	Cantidad tomada
1/8	1/4	2500,00
1/4	N°4	2500,00
Retenido tamiz de corte n° 12 (1,7 mm)		4085,00
Diferencia		915,00

Fuente: Elaboración propia.

Cálculos:

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{\text{Diferencia}}{5000} * 100 \quad \text{Ec. (6)}$$

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{915\text{gr}}{5000} * 100$$

$$\% \text{ de desgaste} = 18,30\%$$

Desgaste de agregados pétreos (Erika)*Tabla 3.9. Datos y resultados del ensayo de desgaste para la grava 3/4" (Erika).*

Gradación C		
Carga abrasiva con 11 esferas a 32.5 rpm, revoluciones		
Pasado	Retenido	Cantidad tomada
3/4	1/2	2500,00
1/2	3/8	2500,00
Retenido tamiz de corte n° 12 (1,7 mm)		3722,00
Diferencia		1278,00

*Fuente: Elaboración propia.***Cálculos:**

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{\text{Diferencia}}{5000} * 100$$

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{1278}{5000} * 100$$

$$\% \text{ de desgaste} = 25,56 \%$$

Tabla 3.10. Datos del ensayo de desgaste para la gravilla 3/8" (Erika).

Gradación B		
Carga abrasiva con 11 esferas a 32.5 rpm, revoluciones		
Pasado	Retenido	Cantidad tomada
3/4	1/2	2500,00
1/2	3/8	2500,00
Retenido tamiz de corte n° 12 (1,7 mm)		3615,00
Diferencia		1385,00

Fuente: Elaboración propia.

Cálculos:

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{1385}{5000} * 100$$

$$\% \text{ de desgaste} = 27,70\%$$

3.2.3 Ensayo de durabilidad por el método de los sulfatos para determinar la desintegración (AASTHO T-104) (ASTM C-88)

Es el porcentaje de pérdida de material en una mezcla de agregados durante el ensayo de durabilidad de los áridos sometidos al ataque con sulfuro de sodio o sulfato de magnesio. Este ensayo estima la resistencia del agregado al deterioro por acción de los agentes climatológicos durante la vida útil de la obra. Puede aplicarse tanto en agregado grueso como fino.

El ensayo se realiza exponiendo una muestra de agregado a ciclos alternativos de baño de inmersión en una solución de sulfato de sodio o magnesio y secado en horno. Una inmersión y un secado se consideran ciclos de durabilidad. Durante la fase de secado, las sales precipitaban en los vacíos del agregado. En la reinmersión las sales se rehidratan y ejercen fuerzas de expansión internas que simulan las fuerzas de expansión del agua congelada.

El resultado del ensayo es el porcentaje total de pérdida de peso sobre varios tamices para un número requerido de ciclos. Los valores máximos de pérdida son aproximadamente de 10 a 20% para cinco ciclos de inmersión-secado. En nuestro ensayo realizo utilizando el sulfato de sodio.

Los aparatos y procedimiento para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos AASTHO T-104 y ASTM C-88

Figura 3.6. Colocando las muestras en los recipientes para posteriormente colocar el sulfato de sodio.



Fuente: Elaboración propia

Ensayo de durabilidad por el método de los sulfatos a los agregados pétreos

Tabla 3.11. Datos del ensayo de durabilidad para el agregado grueso (Erika).

Granulometría				Peso de materiales	
Tamiz N°	Tamiz pasa	Tamiz ret.	Material	Antes ensayo (gr.)	Después ensayo (gr.)
1"	1"	3/4"	99,50	756,00	745,00
3/4"	3/4"	1/2"	82,60	500,20	495,60
1/2"	1/2"	3/8"	73,40	300,00	294,30
3/8"	3/8"	N° 4	53,40	300,00	296,50
N° 4	N° 4	N° 8	40,00	0,00	0,00

Fuente: Elaboración propia.

Procedimiento de cálculo para el tamizado 3/4"

$$\text{Pérdida por diferencia} = 11 \text{ gr.}$$

$$\% \text{Pasa al tamiz} = \% \text{Tamiz Pasa} - \% \text{Tamiz Retenido} \quad \text{Ec. (7)}$$

$$\% \text{Pasa al tamiz} = 16.90\%$$

$$\% \text{de pérdida respecto al tamiz} = \frac{\text{Pérdida por diferencia}}{\text{Peso antes del ensayo}} * 100\% \quad \text{Ec. (8)}$$

$$\% \text{de pérdida respecto al tamiz} = 1.46\%$$

$$\% \text{de p. r. a muestra total} = \frac{\% \text{pérdida respecto tamiz}}{100} * \frac{\% \text{Pasa}}{100} * 100\% \quad \text{Ec. (9)}$$

$$\% \text{ de pérdida respecto a la muestra total} = 0.25\%$$

Para las demás muestras de cada tamiz se realizó la misma memoria de cálculo, se muestra a continuación la tabla de resultados.

Tabla 3.12. Resultados del ensayo de durabilidad para agregado grueso (Erika).

Tamiz N°	pérdida por diferencia (gr.)	% pasa al tamiz más fino	% pérdida respecto tamiz	% pérdida respecto muestra total
1"	11,00	16,90	1,46	0,25
3/4"	4,60	9,20	0,92	0,08
1/2"	5,70	20,00	1,90	0,38
3/8"	3,50	13,40	1,17	0,16
N° 4	0,00	40,00	0,00	0,00
total % pérdida de peso				0,87

Fuente: Elaboración propia

$$\% \text{Total de pérdida (Grueso)} = \sum \% \text{ de pérdida respecto a la muestra total}$$

$$\% \text{Total de pérdida (Grueso)} = 0,87\%$$

Tabla 3.13. Datos del ensayo de durabilidad para agregado fino (Erika).

Granulometría				Pesos materiales	
Tamiz N°	Tamiz pasa	Tamiz ret.	Material	Antes ensayo(gr.)	Después ensayo(gr.)
3/8"	3/8"	N° 4			
N° 4	N° 4	N° 8	40,00	100,00	99,30
N° 8	N° 8	N° 16	31,50	100,00	98,50
N° 16	N° 16	N° 40	19,00	100,00	99,50
N° 40	N° 40	N° 100	11,40	100,00	98,20
N° 100	N° 100			0,00	0,00

Fuente: Elaboración propia.

Para el agregado fino se realiza la misma memoria de cálculo que se mostró anteriormente, a continuación, se muestra la tabla de resultados.

Tabla 3.14. Resultados del ensayo de durabilidad para agregado fino (Erika).

tamiz n°	pérdida por diferencia (gr.)	% pasa al tamiz más fino	% pérdida respecto tamiz	% pérdida respecto muestra total
n° 4	0,7	40,0	0,70	0,28
n° 8	1,5	31,5	1,50	0,47
n° 16	0,5	19,0	0,50	0,10
n° 40	1,8	11,4	1,80	0,21
n° 100	0,0	0,0	0,00	0,00
total % pérdida de peso				1,05

Fuente: Elaboración propia.

$$\% \text{Total de pérdida (Fino)} = \sum \% \text{ de pérdida respecto a la muestra total}$$

$$\% \text{Total de pérdida (Fino)} = 1,05\%$$

$$\% \text{Total de pérdida} = \% \text{Total pérdida (Grueso)} + \% \text{Total de pérdida (Fino)}$$

$$\% \text{Total de pérdida} = 2,92\%$$

Ensayo de durabilidad por el método de los sulfatos a los agregados arcilla expandida (Leca)

Tabla 3.15. Datos y resultados del ensayo de durabilidad para agregado fino (Leca).

Granulometría				Pesos materiales	
Tamiz N°	Tamiz pasa	Tamiz ret.	Material	Antes ensayo (gr.)	Después ensayo (gr.)
1"	1"	3/4"			
3/4"	3/4"	1/2"	99,5	500,20	500,30
1/2"	1/2"	3/8"	89,0	300,00	300,02
3/8"	3/8"	N° 4	61,2	300,00	300,03
N° 4	N° 4	N° 8	43,8	0,00	0,00

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos en este caso particular la pérdida de peso es nula (0.00%) no observándose roturas; se hace notar, sin embargo, que el método no será aplicable a este tipo de agregados ya que el sulfato de sodio cristaliza en el interior de los poros aumentando el peso de la muestra sin producir degradación física.

3.2.4 Ensayo de peso específico y absorción de agua en agregados gruesos (AASTHO T-85) (ASTM C-127)

Este ensayo establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos. Para este ensayo se realizó la medición del peso específico para la gravilla 3/8" y para la grava 3/4"

La muestra se lava inicialmente con agua hasta eliminar completamente el polvo u otras sustancias extrañas adheridas a la superficie de las partículas; se seca a continuación en un horno a 100° - 110°C. Después se lo sumerge en agua, se seca la muestra del agua y se secan partículas redondas sobre un paño a continuación, se determina el peso de la muestra en el estado de saturación con superficie seca (S.S.S.).

A continuación, se coloca la muestra en el interior de la canastilla metálica y se determina su peso sumergida en el agua, a la temperatura de 25°C de temperatura ambiente.

Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos AASTHO T-85 y ASTM C-127.

Figura 3.7. Proceso del peso sumergido.



Fuente: Elaboración propia.

Ensayo de peso específico y absorción de agua a los agregados pétreos (Erika)

Tabla 3.16. Datos del ensayo de peso específico para agregado grueso (Erika).

Determinación	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
A (Peso en el aire de la muestra seca (gr))	3220,00	3555,00	3430,00	
B (Peso de muestra saturada-superficie seca (gr))	3280,00	3624,00	3496,00	
Peso canastillo + muestra sumergida en agua (gr)	2017,00	2225,00	2148,00	
Peso canastillo sumergido en agua (gr)	0,00	0,00	0,00	
C (Peso sumergido de la muestra saturada (gr))	2017,00	2225,00	2148,00	
D = B – C (gr)	1263,00	1399,00	1348,00	
E = A – C (gr)	1203,00	1330,00	1282,00	
F = B – A (gr)	60,00	69,00	66,00	
"DN" Densidad neta (gr/cm ³)	2,68	2,67	2,68	
"DRS" Densidad real del árido seco (gr/cm ³)	2,55	2,54	2,54	2,55
"DRT" Densidad real del árido S.S.S (gr/cm ³)	2,60	2,59	2,59	2,59
Porcentaje de absorción (%)	0,02	0,02	0,02	1,91

Fuente: Elaboración propia.

Cálculos:

$$\text{Peso específico del agregado seco} = \frac{b}{a - c} \quad \text{Ec. (10)}$$

$$\text{Peso específico del agregado seco} = 2.55 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{P.E.A. saturado de superficie seca} = \frac{a}{a - c} \quad \text{Ec. (11)}$$

$$\text{P.E.A. saturado de superficie seca} = 2.60 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{b}{b - c} \quad \text{Ec. (12)}$$

$$\text{Peso específico aparente} = 2.68 \text{ gr/cm}^3$$

$$\% \text{ de absorcion} = \frac{a - b}{b} * 100\% \quad \text{Ec. (13)}$$

$$\% \text{ de absorcion} = 2,03\%$$

Ensayo de peso específico y absorción de agua a los agregados arcilla expandida (Leca)

Tabla 3.17. Resultados de ensayo de peso específico de la grava 1/2" (Leca).

Determinación	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
A (Peso en el aire de la muestra seca (gr))	1773,00	1779,00	1785,00	
B (Peso de muestra saturada-superficie seca (gr))	2074,00	2080,00	2086,00	
Peso canastillo + muestra sumergida en agua (gr)	602,00	608,00	614,00	
Peso canastillo sumergido en agua (gr)	0,00	0,00	0,00	
C (Peso sumergido de la muestra saturada (gr))	602,00	608,00	614,00	
D = B - C (gr)	1472,00	1472,00	1472,00	
E = A - C (gr)	1171,00	1171,00	1171,00	
F = B - A (gr)	301,00	301,00	301,00	
"DN" Densidad neta (gr/cm ³)	1,51	1,52	1,52	1,52
"DRS" Densidad real del árido seco (gr/cm ³)	1,20	1,21	1,21	1,21
"DRT" Densidad real del árido S.S.S (gr/cm ³)	1,41	1,41	1,42	1,41
Porcentaje de absorción (%)	0,17	0,17	0,17	16,92

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.18. Resultados de ensayo de peso específico de la gravilla 3/8" (Leca).

Determinación	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
A (Peso en el aire de la muestra seca (gr))	1698,9	1704,9	1710,9	
B (Peso de muestra saturada-superficie seca (gr))	1994	2000	2006	
Peso canastillo + muestra sumergida en agua (gr)	630,0	636	642	
Peso canastillo sumergido en agua (gr)	0,00	0,00	0,00	
C (Peso sumergido de la muestra saturada (gr))	630,00	636,00	642,00	
D = B – C (gr)	1364,00	1364,00	1364,00	
E = A – C (gr)	1068,90	1068,90	1068,90	
F = B – A (gr)	295,10	295,10	295,10	
"DN" Densidad neta (gr/cm ³)	1,59	1,60	1,60	
"DRS" Densidad real del árido seco (gr/cm ³)	1,25	1,25	1,25	1,25
"DRT" Densidad real del árido S.S.S (gr/cm ³)	1,46	1,47	1,47	1,47
Porcentaje de absorción (%)	0,17	0,17	0,17	17,31

Fuente: Elaboración propia.

3.2.5 Ensayo de peso específico y absorción de agua del agregado fino (AASTHO T-84) (ASTM C-128)

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

El peso específico aparente es la relación entre el peso del agua correspondiente a su volumen aparente, este ensayo establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua de los áridos finos.

Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos AASTHO T-84 y ASTM C-128.

Figura 3.8. Determinando el peso específico de la arena.



Fuente: Elaboración propia.

Ensayo de peso específico y absorción de agua a los agregados pétreos (Erika)

Tabla 3.19. Datos del ensayo peso específico del agregado fino (Erika).

Determinación	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
Picnómetro	1,00	2,00	3,00	
Temperatura °C	25,00	25,00	25,00	
A (Peso en el aire de la muestra seca (gr))	494,20	494,20	494,20	
B (Peso muestra saturada superficie seca (gr))	500,00	500,00	500,00	
X (Peso del picnómetro + agua + muestra (gr))	981,50	982,00	981,80	
J (Peso del picnómetro + agua (gr))	667,90	667,90	668,00	
$E = X - J$	313,60	314,10	313,80	
$F = B - A$	5,80	5,80	5,80	
$H = A - E$	180,60	180,10	180,40	
$I = B - E$	186,40	185,90	186,20	
"DN" Densidad neta (gr/cm^3)	2,74	2,74	2,74	
"DRS" Densidad real del árido seco (gr/cm^3)	2,65	2,66	2,65	2,65
"DRT" Densidad real del árido S.S.S (gr/cm^3)	2,68	2,69	2,69	2,69
(%) Porcentaje de absorción	0,01	0,01	0,01	1,17
				2,70

Fuente: Elaboración propia.

Cálculos:

$$\text{Peso específico del agregado seco} = \frac{a}{(X + w) - b} \quad \text{Ec. (14)}$$

$$\text{Peso específico del agregado seco} = 2.65 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{P. E. A. saturado superficial seco} = \frac{x}{(x + w) - b} \quad \text{Ec. (15)}$$

$$\text{P. E. A. saturado superficial seco} = 2.68 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{a}{(a + b) - b} \quad \text{Ec. (16)}$$

$$\text{Peso específico aparente} = 2.74 \text{ gr/cm}^3$$

$$\% \text{ de absorcion} = \frac{x - a}{a} * 100\% \quad \text{Ec. (17)}$$

$$\% \text{ de absorcion} = 1.05\%$$

Para la muestra 2 y 3 se realizan el mismo procedimiento.

Se tomo la media de los datos representativos 2,62 gr/cm³

Ensayo de peso específico y absorción de agua a los agregados arcilla expandida (Leca)

Tabla 3.20. Datos del ensayo peso específico del agregado fino (Leca).

Determinación	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
Picnómetro	1,00	2,00	3,00	
Temperatura °C	25,00	25,00	25,00	
A (Peso en el aire de la muestra seca (gr))	419,90	422,90	425,90	
B (Peso muestra saturada superficie seca (gr))	500,00	500,00	500,00	
X (Peso del picnómetro + agua + muestra (gr))	866,30	869,30	872,30	
J (Peso del picnómetro + agua (gr))	681,70	681,70	681,70	
E = X - J	184,60	187,60	190,60	
F = B - A	80,10	77,10	74,10	
H = A - E	235,30	235,30	235,30	
I = B - E	315,40	312,40	309,40	
"DN" Densidad neta (gr/cm ³)	1,78	1,80	1,81	1,80
"DRS" Densidad real del árido seco (gr/cm ³)	1,33	1,35	1,38	1,35
"DRT" Densidad real del árido S.S.S (gr/cm ³)	1,59	1,60	1,62	1,60
(%) Porcentaje de absorción	0,19	0,18	0,17	18,24
				1,58

Fuente: Elaboración propia.

3.2.6 Ensayo de peso unitario de los agregados (AASTHO T-19) (ASTM C-29)

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

Los volúmenes empleados son normalmente 0,1 – 0,5 1,0 pies³ (2,83 -14,16 -28,31litros), según el tamaño de los áridos ensayados.

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 por un 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 en el ensayo.

Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos AASTHO T19 y ASTM C29.

Figura 3.9. Realizando el ensayo de peso unitario del agregado 3/8”.



Fuente: Elaboración propia.

Ensayo de peso unitario a los agregados pétreos (Erika)

Tabla 3.21. Datos y resultados del ensayo de peso unitario de la grava $3/4$ (Erika).

Descripción		Unidad	1	2	3
Peso unitario suelto	Peso muestra + recipiente	gr.	19570,00	19530,00	19445,00
	Peso del recipiente	gr.	5845,00	5845,00	5845,00
	Peso del agregado seco	gr.	13725,00	13685,00	13600,00
	Volumen recipiente	cm ³	9977,16	9977,16	9977,16
	Peso unitario seco	gr./cm ³	1,38	1,37	1,36
	Promedio	gr./cm ³	1,37		
Peso unitario compactado	Peso muestra + recipiente	gr.	20533,00	20580,00	20495,00
	Peso del recipiente	gr.	5845,00	5845,00	5845,00
	Peso del agregado seco	gr.	14688,00	14735,00	14650,00
	Volumen recipiente	cm ³	9977,16	9977,16	9977,16
	Peso unitario seco	gr./cm ³	1,47	1,48	1,47
	Promedio	gr./cm ³	1,47		
Peso unitario de la grava		gr./cm ³	1.42		

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo de peso unitario.

$$\text{Peso unitario} = \frac{\text{peso del agregado seco}}{\text{volumen del recipiente}} \quad \text{Ec. (18)}$$

$$\text{Peso unitario} = \frac{13725}{9977,16}$$

$$\text{Peso unitario} = 1.38 \text{ gr/cm}^3$$

Para los demás ensayos se realizó los mismos procedimientos de cálculo.

Tabla 3.22. Datos y resultados del peso unitario de la gravilla 3/8" (Erika).

Descripción		Unidad	1	2	3
Peso unitario suelto	Peso muestra + recipiente	gr.	19441,00	19345,00	19430,00
	Peso del recipiente	gr.	5845,00	5845,00	5845,00
	Peso del agregado seco	gr.	13596,00	13500,00	13585,00
	Volumen recipiente	cm ³	9977,16	9977,16	9977,16
	Peso unitario seco	gr./cm ³	1,36	1,35	1,36
	Promedio	gr./cm ³	1,36		
Peso unitario compactado	Peso muestra + recipiente	gr.	20445,00	20490,00	20511,00
	Peso del recipiente	gr.	5845,00	5845,00	5845,00
	Peso del agregado seco	gr.	14600,00	14645,00	14666,00
	Volumen recipiente	cm ³	9977,16	9977,16	9977,16
	Peso unitario seco	gr./cm ³	1,46	1,47	1,47
	Promedio	gr./cm ³	1,47		
Peso unitario de la gravilla		gr./cm ³	1.41		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.23. Datos y resultados del peso unitario de la arena triturada (Erika).

Descripción		Unidad	1	2	3
Peso unitario suelto	Peso muestra + recipiente	gr.	7405,00	7522,00	7508,00
	Peso del recipiente	gr.	2605,00	2605,00	2605,00
	Peso del agregado seco	gr.	4800,00	4917,00	4903,00
	Volumen recipiente	cm ³	2994,06	2994,06	2994,06
	Peso unitario seco	gr./cm ³	1,60	1,64	1,64
	Promedio	gr./cm ³	1,63		
Peso unitario compactado	Peso muestra + recipiente	gr.	7930,00	7993,00	8005,00
	Peso del recipiente	gr.	2605,00	2605,00	2605,00
	Peso del agregado seco	gr.	5325,00	5388,00	5400,00
	Volumen recipiente	cm ³	2994,06	2994,06	2994,06
	Peso unitario seco	gr./cm ³	1,78	1,80	1,80
	Promedio	gr./cm ³	1,79		
Peso unitario de la arena		gr./cm ³	1.71		

Fuente: Elaboración propia.

Ensayo de peso unitario a los agregados arcilla expandida (Leca)

Tabla 3.24. Datos y resultados del peso unitario de la grava 1/2" (Leca).

Descripción		Unidad	1	2	3
Peso unitario suelto	Peso muestra + recipiente	gr.	13140,00	13125,00	13225,00
	Peso del recipiente	gr.	5845,00	5845,00	5845,00
	Peso del agregado seco	gr.	7295,00	7280,00	7380,00
	Volumen recipiente	cm ³	9977,16	9977,16	9977,16
	Peso unitario seco	gr./cm ³	0,73	0,73	0,74
	Promedio	gr./cm ³	0,73		
Peso unitario compactado	Peso muestra + recipiente	gr.	13595,00	13625,00	13630,00
	Peso del recipiente	gr.	5845,00	5845,00	5845,00
	Peso del agregado seco	gr.	7750,00	7780,00	7785,00
	Volumen recipiente	cm ³	9977,16	9977,16	9977,16
	Peso unitario seco	gr./cm ³	0,78	0,78	0,78
	Promedio	gr./cm ³	0,78		
Peso unitario de la grava		gr./cm ³	0,75		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.25. Datos y resultados del peso unitario de la arena (Leca).

Descripción		Unidad	1	2	3
Peso unitario suelto	Peso muestra + recipiente	gr.	5425,00	5490,00	5450,00
	Peso del recipiente	gr.	2605,00	2605,00	2605,00
	Peso del agregado seco	gr.	2820,00	2885,00	2845,00
	Volumen recipiente	cm ³	2994,06	2994,06	2994,06
	Peso unitario seco	gr./cm ³	0,94	0,96	0,95
	Promedio	gr./cm ³	0,95		
Peso unitario compactado	Peso muestra + recipiente	gr.	5880,00	5970,00	5920,00
	Peso del recipiente	gr.	2605,00	2605,00	2605,00
	Peso del agregado seco	gr.	3275,00	3365,00	3315,00
	Volumen recipiente	cm ³	2994,06	2994,06	2994,06
	Peso unitario seco	gr./cm ³	1,09	1,12	1,11
	Promedio	gr./cm ³	1,11		
Peso unitario de la arena		gr./cm ³	1,03		

Fuente: Elaboración propia.

3.2.7 Ensayo de equivalente de arena (AASTHO T-176) (ASTM D-2419)

El ensayo de equivalente de arena y agregados finos asigna un valor empírico a la cantidad relativa, figura y características del material fino que está presente en una muestra de ensayo granular que pasa el tamiz N°4 (4.75mm). El equivalente de arena es una relación de la altura de arena con arena respecto a la altura de arcilla, expresada en porcentaje. Primeramente, se debe de tener una muestra del material y tamizarlo por el tamiz N°4 para poder tener la muestra que se utiliza para este ensayo colocarlo en un recipiente. Luego se debe de colocar la muestra que se utilizara de arena en el cilindro, se deberá verter la muestra en el cilindro con la ayuda de un embudo y hacer momento del cilindro para que se puedan perder todas las burbujas que tenga, dejar en reposo durante 10 minutos.

Colocar el tubo irrigador en la parte superior del cilindro y lavar el material de las paredes del cilindro, dejar el cilindro y el contenido en reposo por $20 \text{ min} \pm 15$ segundos comenzar a medir el tiempo inmediatamente después de retirar el tubo irrigador. Al final los 20 minutos del periodo de sedimentación, leer y anotar los niveles alcanzados.

Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos AASTHO T-176 y ASTM D-2419.

Figura 3.10. Mezcla de la arena con la solución para el equivalente de arena.



Fuente: Elaboración propia.

Datos obtenidos en la práctica:

Tabla 3.26. Datos y resultados del ensayo de equivalente de arena.

N° de Muestra	H1	H2	Equivalente de arena (%)
	(cm)	(cm)	
1	9,9	11,10	89,19
2	10,3	11,3	91,15
3	9,5	11,30	84,07
Promedio			88,14

Fuente: Elaboración propia.

Cálculos:

Utilizando el promedio para realizar los cálculos:

$$\text{Equivalente de la arena} = \frac{\text{Lectura de nivel inferior}}{\text{Lectura de nivel superior}} * 100 \quad \text{Ec. (19)}$$

$$\text{Equivalente de la arena} = \frac{9,90}{11,10} * 100$$

$$\text{Equivalente de la arena} = 89,19\%$$

3.3 CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO

Para realizar el diseño óptimo se realizó la evaluación y la caracterización del cemento asfáltico 85-100 los mismos que se detallan a continuación.

3.3.1 Ensayo de penetración (AASHTO T49-97) (ASTM D-5)

La penetración se define como la distancia, expresada en decimas de milímetro hasta la cual penetra verticalmente en el material una aguja normalizada en condiciones definidas de carga, tiempo y temperatura. Normalmente, el ensayo se realiza a 25°C durante un tiempo de 5 segundos y con una carga móvil total. Incluida la aguja, de 100 gramos, aunque pueden emplearse otras condiciones previamente definidas. Es evidente que cuando más blando sea el betún asfáltico mayor será la cifra que indique su penetración. Se coloca una muestra a calentar que se colocaran en un recipiente hasta que este fluido se lo coloca en 2 moldes.

Se lo deja enfriar por una hora a temperatura ambiente y se lo coloca en baño María por una hora a 25°C.

Una vez transcurrido los tiempos de inmersión, se aproxima la aguja del penetrómetro hasta que su punta toque justamente la superficie de la muestra, sin que penetre. Se suelta seguidamente el mecanismo que libera la aguja durante el tiempo específico.

Finalmente, se lee y anota la distancia, expresada en decimas de milímetro, que haya penetrado la aguja en la muestra.

Los aparatos y procedimientos para realizar el ensayo de penetración se describen en el Método AASTHO T49-97 y en el ASTM D-5.

Figura 3.11. Penetración de la muestra



Fuente: Elaboración propia

Datos obtenidos del ensayo:

Tabla 3.27. Datos y resultados del ensayo de penetración cemento asfáltico 85-100.

Descripción		Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Penetración a 25°C, 5seg AASHTO T- 49	Lectura N°1	mm.	96,00	95,00	92,00
	Lectura N°2	mm.	87,00	92,00	97,00
	Lectura N°3	mm.	97,00	87,00	81,00
	Promedio	mm.	93,33	91,33	90,00
Penetración promedio		mm.	91,56		

Fuente: Elaboración propia.

Realizando la media se tiene como valor de penetración de 91.5mm a 25°C, 5seg.

3.3.2 Ensayo punto de inflamación (AASTHO T-48) (ASTM D-92)

El punto de inflamación de un ligante asfáltico es la temperatura más baja a la cual se separa materiales volátiles de la muestra, y crean un “destello” en presencia de una llama abierta.

El punto de inflamación del betún asfáltico indica la temperatura a que puede calentarse el material sin peligro de inflamación en presencia de llama libre. Esta temperatura es usualmente muy inferior a aquella a que el material ardería. Esta última temperatura se llama punto de fuego, pero rara vez se incluye en las especificaciones de los betunes asfálticos.

Llenar la copa con el cemento asfáltico y se aplica calor inicialmente de tal manera que se incremente la temperatura. Pasar la llama de ensayo a través del centro de la copa. Se registra como punto de inflamación, la lectura de temperatura sobre el termómetro cuando aparezca una llama en cualquier punto sobre la superficie.

Los aparatos y procedimientos para realizar el ensayo de punto de inflamación se describen en el Método AASTHO T-18 y en el ASTM D-92

Figura 3.12 Punto de inflamación en proceso de ensayo.



Fuente: Elaboración propia.

Datos obtenidos:

Tabla 3.28. Datos del ensayo punto de inflamación-cemento asfáltico 85-100.

Ensayo	Unidad	Ensayo 1
Punto de inflamación AASTHO T-48	°C	>272
Número de ensayos		1

Fuente: Elaboración propia.

Calculo:

Realizando el cálculo de la media de los ensayos realizados.

Resultados: 272°C.

3.3.3 Ensayo peso específico del asfalto (AASTHO T-43) (ASTM D-70)

El peso específico de un material a la relación de su peso en el aire a una temperatura dada, al paso de un volumen igual de agua a la misma temperatura, a los 25°C. 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 específicas. Así, un peso específico de 1,05 significa que el material pesa 1,05 veces lo que el agua a la temperatura fijada. Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos AASTHO T-43 y ASTM D-70.

Figura 3.13. Picnómetro más muestra a 25°C.



Fuente: Elaboración propia.

Datos:

Tabla 3.29. Datos y resultados del ensayo de peso específico cemento asfáltico 85-100.

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 2
Peso picnómetro	gr	32,88	34,03	33,78
Peso picnómetro + agua (25°C)	gr	78,73	80,95	81,42
Peso picnómetro + muestra	gr	69,67	70,54	70,36
Peso picnómetro + agua + muestra	gr	79,27	81,38	81,88
Peso específico	gr/cm ³	1,012	1,009	1,010
Promedio	gr/cm ³	1,010		

Fuente: Elaboración propia.

Calculo:

a = Peso picnómetro

b = Muestra

c = Agua

$$\text{Peso específico C.A.} = \frac{a + b}{(a + c) + (a + b - c) + (a + c + b)} * 0997077 \quad \text{Ec. (20)}$$

$$\text{Peso específico CA.} = \frac{69,67 \text{ gr}}{((78,73 \text{ gr}) + (69,67 \text{ gr} - 45,85 \text{ gr})) - (79,27 \text{ gr})} * 0997077$$

$$\text{Peso Esp. del cemento asfáltico} = 1.012 \text{ gr/cm}^3$$

De la misma manera se calcula el peso específico de cemento asfáltico con los datos de los ensayos 2 y 3.

Resultado:

El resultado final del peso específico del cemento asfáltico será el promedio de los tres ensayos realizados.

$$\text{Peso específico del CA} = 1.010 \text{ gr/cm}^3$$

3.3.4 Ensayo punto de ablandamiento (AASTHO T-53) (ASTM D-36)

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

En general, con materiales de este tipo, el ablandamiento no ocurre a una temperatura definida; a medida que la temperatura aumenta, el material cambia gradual e imperceptiblemente, de un estado quebradizo o excesivamente espeso y de poca fluidez, a líquidos blandos y menos viscosos. Por esta razón, la determinación del punto de ablandamiento se debe efectuar mediante un método arbitrario, pero bien definido, de manera de comparar resultados. 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 equipos a utilizar se describen con detalle en los métodos AASTHO T53 y ASTM D36.

Figura 3.14. Muestra calentando a baño María.



Fuente: Elaboración propia.

Datos:

Tabla 3.30. Datos y resultados del ensayo punto de ablandamiento cemento asfáltico 85-100.

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2
Punto de ablandamiento	°C	44,00	47,00

Fuente: Elaboración propia.

Calculo:

Se realizó un promedio de ambas muestras obteniendo como resultado del ensayo 45,50°C.

3.3.5 Ductilidad (AASTHO T51-00) (ASTM D-113)

La ductilidad de un material bituminoso es la medida de la distancia a la cual dos extremos de la briqueta de muestra se estiran, hasta que se rompe, es halado separándolos a una velocidad y temperatura especificada. Salvo indicación contraria, el ensayo se realizará a una temperatura de 25 ± 0.5 °C y a una velocidad de 5 cm/min \pm 5.0%. A otras temperaturas la velocidad deberá ser especificada.

Los procedimientos y equipos a utilizar se describen con detalle en los métodos AASTHO T51 y ASTM D-113.

Figura 3.15. Muestra calentando a baño María.



Fuente: Elaboración propia.

Datos:

Tabla 3.31. Resultados del ensayo de ductilidad del cemento asfáltico 85-100.

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Ductilidad	Cm.	115	105	107

Fuente: Elaboración propia.

Calculo:

Se realizó un promedio de ambas muestras obteniendo como resultado 109 cm.

CAPÍTULO IV

DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 RESULTADOS DEL LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN

4.1.1 Caracterización de los agregados

Se presenta los resultados obtenidos de la recolección de información, los mismos que se realizaron de acuerdo a las especificaciones propuestas por la norma AASHTO detallado en el capítulo anterior.

Agregados arcilla expandida (Leca)

Tabla 4.1. Resultados de los ensayos de caracterización de los agregados arcilla expandida (Leca).

Ensayo	AASHTO	Agregado	Especificación	Resultado
Desgaste mediante la máquina de los Ángeles	T-96	Grava	40 % max	18,30
Durabilidad por el método de los sulfatos para determinar la desintegración	T-104	Grava	12 % max	0,00
		Arena	12 % max	0,00
Peso específico y absorción de agua en agregados gruesos	T-85	Grava	-	1,56
Peso específico y absorción de agua del agregado fino	T-84	Arena	-	1,58
Peso unitario de los agregados	T-19	Grava	-	0,75
		Gravilla	-	0,75
		Arena	-	1,03
Equivalente de arena	T-176		45 % min	91.15

Fuente: Elaboración propia.

Agregados pétreos (Erika)

Tabla 4.2. Resultados de los ensayos de caracterización de los agregados pétreos.

Ensayo	AASHTO	Agregado	Especificación	Resultado
Desgaste mediante la máquina de los ángeles	T-96	Grava	40 % Max	25.56
Durabilidad por el método de los sulfatos para determinar la desintegración	T-104	Grava	12 % Max	0.87
		Arena	12 % Max	1.05
Peso específico y absorción de agua en agregados gruesos	T-85	Grava	-	2.67
Peso específico y absorción de agua del agregado fino	T-84	Arena	-	2.69
Peso unitario de los agregados	T-19	Grava	-	1.42
		Gravilla	-	1.41
		Arena	-	1.71
Equivalente de arena	T-176		45 % Min	88.14

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2 Cemento asfáltico

Se presenta los resultados obtenidos de la recolección de información, los mismos que son con las especificaciones propuestas por la norma AASHTO.

Tabla 4.3. Resultados de los ensayos de caracterización del cemento asfáltico.

Ensayo	Norma	Especificaciones		Resultado
		Mínimo	Máximo	
Peso específico	AASHTO T-43	1	1,05	1,01
Punto de ablandamiento	AASHTO T-53	30	200	56,60
Punto de inflamación	AASHTO T-48	230	-	272,00
Penetración	AASHTO T-49	85	100	91,56
Ductilidad	AASHTO T-51	75	-	109,00

Fuente: Elaboración propia.

4.2 COMBINACIÓN DE AGREGADOS

A continuación, se muestra los resultados de la granulometría de los agregados para realizar la combinación.

Agregado arcilla expandida (Leca)

Tabla 4.4. Granulometría de grava (Leca) de 1/2”.

N°	% que pasa por tamiz									
	3/4"	1/2"	3/8"	N° 4	N° 8	N° 16	N° 30	N° 50	N° 100	N° 200
1	100,00	94,19	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
2	100,00	96,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
3	100,00	95,89	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
Prom.	100,00	95,39	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.5. Granulometría de gravilla (Leca) de 3/8”.

N°	% que pasa por tamiz									
	3/4"	1/2"	3/8"	N° 4	N° 8	N° 16	N° 30	N° 50	N° 100	N° 200
1	100,00	100,00	99,92	18,78	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
2	100,00	100,00	99,87	20,68	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
3	100,00	100,00	99,85	20,48	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Prom.	100,00	100,00	99,88	19,98	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.6. Granulometría de la arena (Leca).

N°	% que pasa por tamiz									
	3/4"	1/2"	3/8"	N° 4	N° 8	N° 16	N° 30	N° 50	N° 100	N° 200
1	100,00	100,00	100,00	100,00	71,47	53,57	41,97	25,79	17,69	7,53
2	100,00	100,00	100,00	100,00	71,42	55,47	41,77	27,69	17,49	9,43
3	100,00	100,00	100,00	100,00	71,40	55,27	40,07	27,49	15,79	9,23
Prom.	100,00	100,00	100,00	100,00	71,43	54,77	41,27	26,99	16,99	8,73

Fuente: Elaboración propia.

Agregados pétreos (Erika).*Tabla 4.7. Granulometría de gravilla (Erika) de 3/4".*

N°	% que pasa por tamiz										
	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N° 4	N° 8	N° 16	N° 30	N° 50	N° 100	N° 200
1	100,00	98,15	43,05	14,15	0,45	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,20
2	100,00	98,65	42,55	13,45	0,40	0,30	0,30	0,30	0,30	0,20	0,20
3	100,00	98,70	42,50	14,10	0,35	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,20
Prom.	100,00	98,50	42,70	13,90	0,40	0,30	0,30	0,30	0,30	0,27	0,20

*Fuente: Elaboración propia.**Tabla 4.8. Granulometría de gravilla (Erika) de 3/8".*

N°	% que pasa por tamiz										
	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N° 4	N° 8	N° 16	N° 30	N° 50	N° 100	N° 200
1	100,00	100,00	98,80	97,20	30,40	1,40	1,10	0,80	0,70	0,70	0,70
2	100,00	100,00	99,40	96,50	31,10	1,60	1,00	0,70	0,60	0,60	0,60
3	100,00	100,00	99,10	97,00	30,60	1,50	1,20	0,90	0,80	0,80	0,80
Prom.	100,00	100,00	99,10	96,90	30,70	1,50	1,10	0,80	0,70	0,70	0,70

*Fuente: Elaboración propia.**Tabla 4.9. Granulometría de la arena triturada (Erika).*

N°	% que pasa por tamiz									
	3/4"	1/2"	3/8"	N° 4	N° 8	N° 16	N° 30	N° 50	N° 100	N° 200
1	100,00	100,00	100,00	99,86	82,59	63,37	46,20	33,26	17,08	11,14
2	100,00	100,00	100,00	99,81	84,49	63,17	48,10	33,06	18,98	10,94
3	100,00	100,00	100,00	99,79	84,29	61,47	47,90	31,36	18,78	9,24
Prom.	100,00	100,00	100,00	99,82	83,79	62,67	47,40	32,56	18,28	10,44

Fuente: Elaboración propia.

4.2.1 Combinación de agregados arcilla expandida (Leca) para el diseño 1

Para este diseño se realizó una combinación utilizando agregado grueso y agregado fino arcilla expandida (Leca), para lo cual se ha determinado que la faja granulométrica de mezcla es de tipo D de las especificaciones de la norma AASHTO.

Para el diseño de dicha faja se mezcló los agregados gruesos y finos mediante tanteos haciendo variar los porcentajes de cada material de manera que la curva granulométrica este dentro de los parámetros establecidos por las especificaciones.

Tabla 4.10. Dosificación de agregados arcilla expandida (Leca).

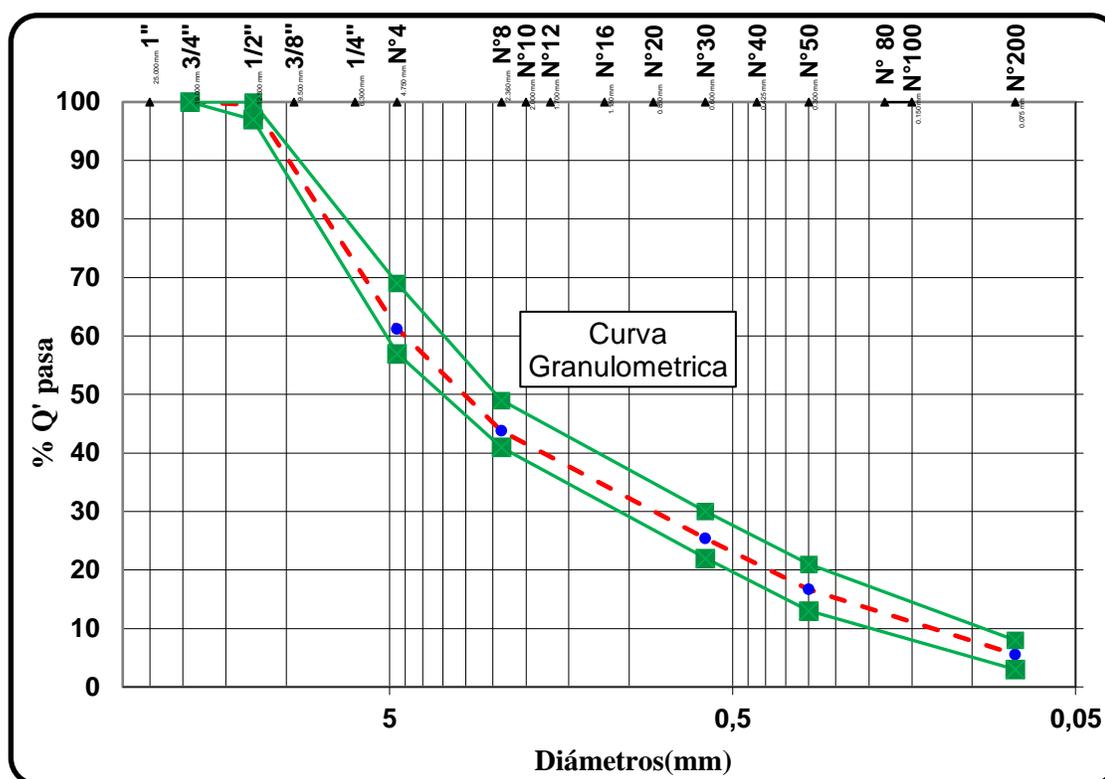
Agregado		Grava (Leca)		Gravilla (Leca)		Arena (Leca)		% que pasa	Faja D	
% usado		11%		28%		61%			Especif. Grad.	
Tamices		% total	% enc.	% total	% enc.	% total	% enc.			
Pulg.	mm.								Inf.	Sup.
1"	25,40	100,00	11,00	100,00	28,00	100,00	61,00	100,00	100	100
3/4"	19,10	100,00	11,00	100,00	28,00	100,00	61,00	100,00	100	100
1/2"	12,50	95,39	10,49	100,00	28,00	100,00	61,00	99,49	97	100
3/8"	9,50	0,10	0,01	100,00	28,00	100,00	61,00	89,01		
#4	4,75	0,10	0,01	0,80	0,22	100,00	61,00	61,24	57	69
#8	2,36	0,10	0,01	0,80	0,22	71,43	43,57	43,81	41	49
#16	1,18	0,10	0,01	0,80	0,22	54,77	33,41	33,64		
#30	0,60	0,10	0,01	0,80	0,22	41,27	25,18	25,41	22	30
#50	0,30	0,10	0,01	0,80	0,22	26,99	16,46	16,70	13	21
#100	0,15	0,10	0,01	0,80	0,22	16,99	10,36	10,60		
#200	0,08	0,10	0,01	0,80	0,22	8,73	5,33	5,56	3	8

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los resultados se estableció que la mezcla de agregados estará compuesta por el 11% de grava de 1/2", 28% de gravilla de 3/8" y 61% de arena.

La gráfica que se muestra a continuación resulta de esta combinación de agregados con los porcentajes mencionados anteriormente.

Figura 4.1. Curva granulométrica de agregados arcilla expandida (Leca).



Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 Combinación de agregado grueso arcilla expandida (Leca) y agregado fino arena triturada (Erika) para el diseño 2

Para este diseño se realizará una combinación donde se utilizará como agregado grueso arcilla expandida (Leca) y como agregado fino arena triturada (Erika), para lo cual se ha determinado que la faja granulométrica de mezcla es de tipo D de las especificaciones de la norma AASHTO.

Para el diseño de dicha faja se mezcló los agregados gruesos y finos mediante tanteos haciendo variar los porcentajes de cada material de manera que la curva granulométrica este dentro de los parámetros establecidos por las especificaciones.

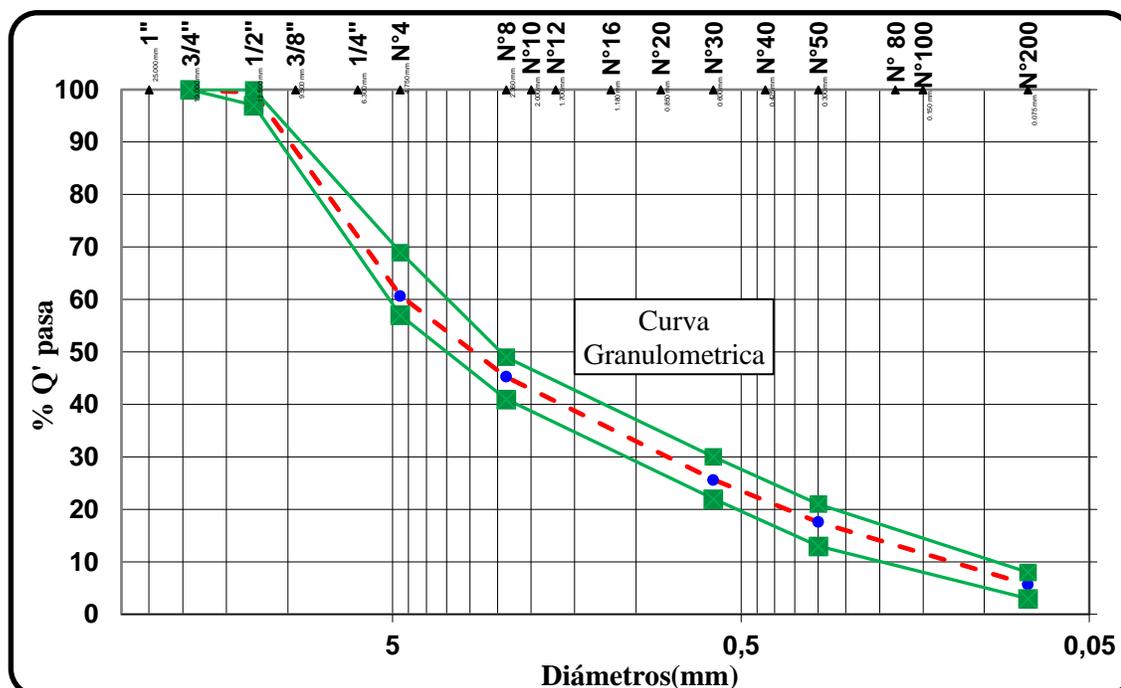
De acuerdo a los resultados se estableció que la mezcla de agregados estará compuesta por el 12% de grava de 1/2", 34% de gravilla de 3/8" y 54% de arena.

Tabla 4.11. Dosificación de agregados pétreos y arcilla expandida (Leca).

Agregado		Grava (Leca)		Gravilla (Leca)		Arena (Erika)		% que pasa	Faja D		
% usado		12%		34%		54%			Especif. Grad.	Inf.	Sup.
Tamices		% total	% enc.	% total	% enc.	% total	% enc.				
Pulg.	mm.							Inf.	Sup.		
3/4"	19,10	100,00	12,00	100,00	34,00	100,00	54,00	100,00	100	100	
1/2"	12,50	95,39	11,45	100,00	34,00	100,00	54,00	99,45	97	100	
3/8"	9,50	0,00	0,00	99,88	33,96	100,00	54,00	87,96			
#4	4,75	0,00	0,00	19,98	6,79	99,82	53,90	60,70	57	69	
#8	2,36	0,00	0,00	0,08	0,03	83,79	45,25	45,27	41	49	
#16	1,18	0,00	0,00	0,08	0,03	62,67	33,84	33,87			
#30	0,60	0,00	0,00	0,08	0,03	47,40	25,60	25,62	22	30	
#50	0,30	0,00	0,00	0,08	0,03	32,56	17,58	17,61	13	21	
#100	0,15	0,00	0,00	0,08	0,03	18,28	9,87	9,90			
#200	0,08	0,00	0,00	0,08	0,03	10,44	5,64	5,67	3	8	

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.2. Curva granulométrica de agregados pétreos y arcilla expandida (Leca).



Fuente: Elaboración propia.

4.2.3 Combinación de agregados arcilla expandida (Leca) con su granulometría comercial

Para este diseño se utilizará como agregado grueso y fino arcilla expandida (Leca), para lo cual se ha determinado que la faja granulométrica de la mezcla es de tipo drenante la misma se diseñara sin modificar su granulometría comercial del agregado en estudio.

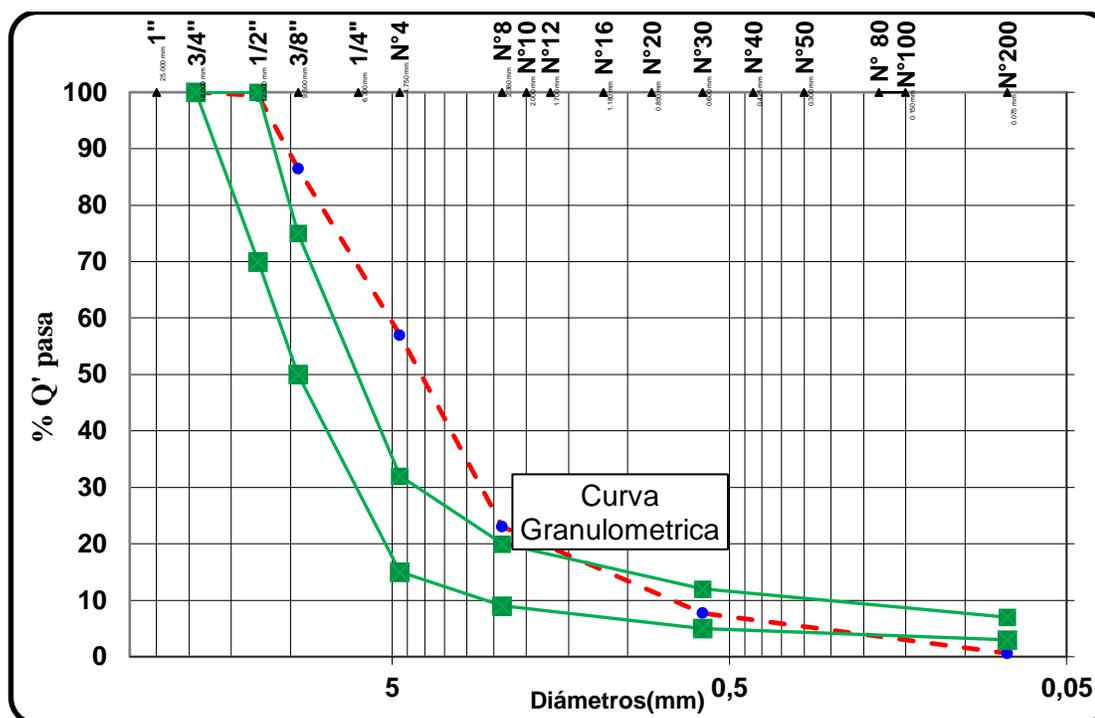
De acuerdo a los resultados del ensayo granulométrico se estableció que la mezcla de agregados está compuesta por el 47% de grava y gravilla y 57% de arena.

Tabla 4.12. Dosificación de agregados arcilla expandida (Leca).

Agregado		Grava (Leca)		Arena (Leca)		% que pasa	Faja		
% usado		43%		57%			Especif. Grad.	Inf.	Sup.
Tamices		% total	% enc.	% total	% enc.				
Pulg.	mm.								
3/4"	19,10	100,0	43,0	100,0	57,0	100,0	97	100	
1/2"	12,50	98,6	42,4	100,0	57,0	99,4	76	88	
3/8"	9,50	68,7	29,5	100,0	57,0	86,5			
#4	4,75	0,1	0,0	100,0	57,0	57,0	49	59	
#8	2,36	0,1	0,0	40,4	23,0	23,0	36	45	
#16	1,18	0,1	0,0	16,2	9,3	9,3			
#30	0,60	0,1	0,0	13,5	7,7	7,7	20	28	
#50	0,30	0,1	0,0	8,1	4,6	4,6	13	21	
#100	0,15	0,1	0,0	2,2	1,3	1,3			
#200	0,08	0,1	0,0	1,0	0,6	0,6	3	7	

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.3. Curva granulométrica de agregados arcilla expandida (Leca).



Fuente: Elaboración propia.

4.2.4 Combinación de agregados pétreos para el diseño 3 (mezcla convencional)

Para el diseño de la mezcla convencional se realizará una combinación de agregados provenientes de la constructora (Erika) S.R.L. el Rancho, para lo cual se ha determinado que la faja granulométrica de mezcla es de tipo C de las especificaciones de la norma AASHTO.

Para el diseño de dicha faja se mezcló los agregados gruesos y finos mediante tanteos haciendo variar los porcentajes de cada material de manera que la curva granulométrica este dentro de los parámetros establecidos por las especificaciones.

De acuerdo a los resultados se estableció que la mezcla de agregados estará compuesta por el 30% de grava de 1/2", 24% de gravilla de 3/8" y 46% de arena.

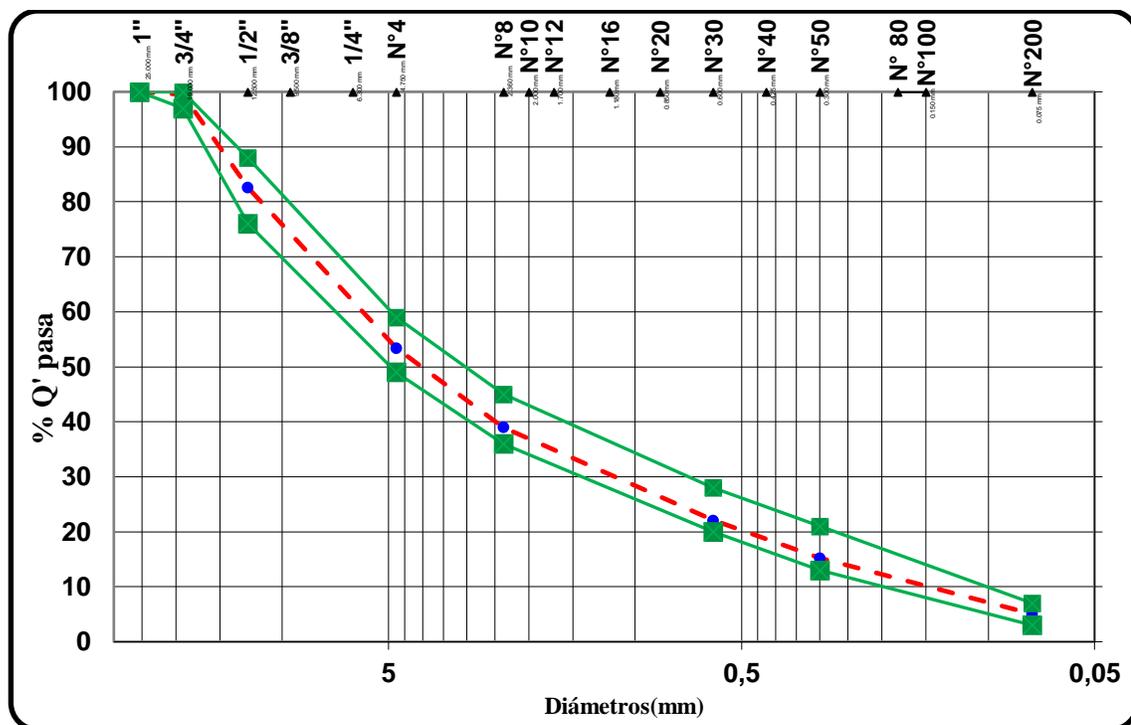
La gráfica que se muestra a continuación resulta de esta combinación de agregados con los porcentajes mencionados anteriormente.

Tabla 4.13. Dosificación de agregados pétreos.

Agregado		Grava (Erika)		Gravilla (Erika)		Arena (Erika)		% que pasa	Faja C		
% usado		30%		24%		46%			Especif. Grad.	Inf.	Sup.
Tamices		% total	% enc.	% total	% enc.	% total	% enc.				
Pulg.	mm.							Inf.	Sup.		
1"	25,40	100,00	30,00	100,00	24,00	100,00	46,00	100,00	100	100	
3/4"	19,10	98,47	29,54	100,00	24,00	100,00	46,00	99,54	97	100	
1/2"	12,50	42,72	12,82	99,06	23,78	100,00	46,00	82,59	76	88	
3/8"	9,50	13,93	4,18	96,91	23,26	100,00	46,00	73,44			
#4	4,75	0,37	0,11	30,68	7,36	99,82	45,92	53,39	49	59	
#8	2,36	0,35	0,10	1,50	0,36	83,79	38,54	39,01	36	45	
#16	1,18	0,32	0,09	1,12	0,27	62,67	28,83	29,19			
#30	0,60	0,29	0,09	0,80	0,19	47,40	21,80	22,08	20	28	
#50	0,30	0,26	0,08	0,75	0,18	32,56	14,98	15,24	13	21	
#100	0,15	0,23	0,07	0,70	0,17	18,28	8,41	8,65			
#200	0,08	0,23	0,07	0,70	0,17	10,44	4,80	5,04	3	7	

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.4. Curva granulométrica de agregados pétreos.



Fuente: Elaboración propia.

4.3 DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA UTILIZANDO AGREGADO GRUESO Y FINO ARCILLA EXPANDIDA (LECA).

4.3.1 Dosificación de los especímenes (briquetas)

Para la determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico se procede a realizar el diseño de 21 especímenes (briquetas) mediante el método Marshall, se prepararán 7 grupos de briquetas con diferentes contenidos de cemento asfáltico, se hace variar un 1 % del peso del cemento asfáltico para la mezcla de agregados de forma que las curvas que representen los resultados de los ensayos muestren un valor óptimo bien definido.

Para la dosificación de las briquetas se utiliza la granulometría ya establecida anteriormente para los diferentes diseños.

Los porcentajes de cemento asfáltico para los que se preparara la mezcla son de: 4%, 5%, 6%, 7%, 8%, 9% y 10%.

Los porcentajes de los agregados se distribuirán de la siguiente manera:

Ponderación de grava	11%
Ponderación de gravilla	28%
Ponderación de arena	61%

Tabla 4.14. Peso de los agregados y cemento asfáltico para la mezcla asfáltica utilizando agregado grueso y fino arcilla expandida (Leca).

Porcentaje de cemento asfáltico (%)	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00	10,00
Porcentaje de agregado (%)	96,00	95,00	94,00	93,00	92,00	91,00	90,00
Peso del cemento asfáltico (gr)	32,00	40,00	48,00	56,00	64,00	72,00	80,00
Peso de grava (gr)	84,48	83,60	82,72	81,84	80,96	80,08	79,20
Peso de gravilla (gr)	215,04	212,80	210,56	208,32	206,08	203,84	201,60
Peso de arena (gr)	468,48	463,60	458,72	453,84	448,96	444,08	439,20
Peso total de la briqueta (gr)	800,00	800,00	800,00	800,00	800,00	800,00	800,00

Fuente: Elaboración propia.

La tabla mostrada anteriormente nos muestra las cantidades de agregados y cemento asfáltico con las que se realizará el diseño y así poder obtener el contenido óptimo del cemento asfáltico.

4.3.2 Desarrollo de la elaboración de las briquetas

Equipo:

Martillo de compactación.

Dispositivo para moldear probetas.

Varilla metálica

Extractor de probetas.

Balanza.

Bandejas metálicas.

cuchara

Hornilla eléctrica.

Horno.

Termómetro.

Espátula.

Procedimiento de ensayo:

Antes de preparar la mezcla, el conjunto del molde y la base de compactación se limpian y calientan a una temperatura entre 100 y 150 °C. Por un lado, se pesan en bandeja las diversas fracciones de áridos calculados para un grupo de briquetas, luego cada bandeja es colocada a una hornilla para calentar su contenido a una temperatura de 175 a 190 °C. Por otro lado, se calienta el cemento asfáltico a una temperatura de 120 a 140 °C.

Durante su calentamiento el agregado y sobre todo el asfalto deben agitarse para evitar sobrecalentamientos locales.

Se pesan luego sobre un plato las diversas fracciones de áridos de acuerdo con los pesos acumulativos. Se mezclan perfectamente los agregados y se forma un cráter en la mezcla,

se coloca la bandeja sobre la balanza y se vierte sobre los agregados el asfalto caliente hasta completar el peso el peso total de agregados más asfalto calculado para un porcentaje de mezcla total.

Se mezcla el asfalto con los agregados hasta tener una mezcla homogénea, la temperatura de mezcla no debe ser inferior a 110 °C ni en ningún caso someter a recalentamiento.

Se compacta la mezcla en un molde abierto por ambos extremos que tiene 4" de diámetro interior y 3" de altura. La compactación se hace usando un martillo especial compuesto de un disco circular de 3 7/8" de diámetro 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 21 briquetas.

Figura 4.5. Colocación de la mezcla en los moldes para el compactado.



Fuente: Elaboración propia.

El molde, conteniendo la briqueta se dejó enfriar a temperatura ambiente durante una noche y luego se extrajo la briqueta mediante un gato hidráulico.

4.3.3 Ensayo de Marshall

Una vez extraído las briquetas de los moldes se proceden a realizar el ensayo de flujo y estabilidad en la prensa.

Primero se debe 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.

Antes de realizar el ensayo las muestras deben ser sumergidas en baño de agua a $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($140 \pm 1.8\text{ }^{\circ}\text{F}$) durante un tiempo no inferior a 30 minutos ni mayor a 40 minutos.

Se limpian perfectamente las superficies interiores de las mordazas. La temperatura de las mismas se debe mantener entre $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ (70 a $100\text{ }^{\circ}\text{F}$). Si es interior deberán calentarse en baño de agua hasta alcanzar la temperatura indicada. Se lubrican las varillas de guía con una película delgada de aceite de tal forma que la mordaza superior deslice fácilmente sin pegarse. Se debe verificar previamente a la aplicación de la carga que el indicador del dial del anillo de carga se encuentre en la posición correspondiente a cero.

Se coloca la briqueta en las mordazas y aplica la carga, a una velocidad de deformación constante de $50.8\text{ mm por minuto}$ ($2''/\text{minuto}$) 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 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($150\text{ }^{\circ}\text{F}$) 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 4.6. Ensayo Marshall de estabilidad y fluencia.



Fuente: Elaboración propia.

4.3.4 Proceso de cálculo de propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica

Se desarrollará el proceso de cálculo para una briqueta en el cual se indicará paso a paso como se obtuvo los resultados que posteriormente se muestra en una tabla.

La demostración de cálculo se realizará con las briquetas elaboradas con el 4% de cemento asfáltico.

4.3.4.1 Identificaciones de briquetas

Para la identificación de las briquetas se las enumeró en el caso del porcentaje en estudio 4% se identificó como 1, 2 y 3.

4.3.4.2 Altura de las briquetas

después de haber procedido a la compactación con el martillo se extrae de los moldes y se deja enfriar para posteriormente realizar las mediciones de la altura con el vernier, obteniendo cuatro alturas de cada briqueta.

Para el porcentaje de asfalto de 4% sus alturas correspondientes son las siguientes:

Identificación	Altura (cm)	Promedio de altura (cm)
1	7.08	7,07
	7.09	
	7.05	
	7.04	
2	7.07	7,07
	70.8	
	7.07	
	7.06	
3	7.03	7,02
	7.02	
	7.01	
	7.01	

4.3.4.3 Porcentaje de asfalto

Base de la mezcla: Se toma el valor del porcentaje de asfalto para elaborar las 3 briquetas.

$$Base\ del\ agregado = \frac{Base\ de\ la\ mezcla * 100}{100 - Base\ de\ la\ mezcla} \quad Ec. (21)$$

$$Base\ del\ agregado = \frac{4 * 100}{100 - 4}$$

$$Base\ del\ agregado = 4.17$$

4.3.4.4 Peso de la briketa al aire

El peso en el aire se obtiene pesando directamente las briquetas en una balanza.

Identificación	Peso (gr)
1	765,30
2	787,80
3	786,50

4.3.4.5 Peso de la briketa en el aire saturada superficialmente seco (SSS)

El peso de la briketa SSS se lo mide saturando la briketa en el agua durante 30 min. a 25°C y secándola superficialmente.

Identificación	Peso (gr)
1	771,60
2	792,20
3	791,00

4.3.4.6 Peso de la briketa sumergida en agua

El peso sumergido se lo mide cuando se sumerge la briketa en el agua a 25°C.

Identificación	Peso (gr)
1	217,00
2	222,00
3	218,00

4.3.4.7 Volumen de la briqueta

$$\text{Vol. briqueta} = \text{Peso S.S.S.} - \text{Peso sumergido} \quad \text{Ec. (22)}$$

$$\text{Vol. briqueta} = 771,60 - 270,00$$

$$\text{Vol. briqueta} = 554,60 \text{ cm}^3$$

Cálculo realizado para la briqueta identificada como “1”.

4.3.4.8 Densidad de la briqueta

Densidad real.

$$\text{Densidad real} = \frac{\text{Peso briqueta en aire}}{\text{Volumen de briqueta}} \quad \text{Ec. (23)}$$

$$\text{Densidad real} = \frac{765,30}{554,60}$$

$$\text{Densidad real} = 1,38 \text{ kg/cm}^3$$

Densidad máxima teórica de la briqueta.

$$D_{maxT} = \frac{100}{\left(\frac{\%asfalto}{\text{Peso esp asf}}\right) + \left(\frac{100 - \%asf}{\text{Peso esp agr grueso}}\right)} \quad \text{Ec. (24)}$$

$$D_{maxT} = \frac{100}{\left(\frac{4}{1,01}\right) + \left(\frac{100 - 4}{1,54}\right)}$$

$$D_{maxT} = 1,53 \text{ kg/cm}^3$$

4.3.4.9 Porcentaje de vacíos

Porcentaje de vacíos de la mezcla (Vv)

$$Vv = \left(\frac{D_{maxT} - \text{Dens prom}}{D_{maxT}}\right) * 100 \quad \text{Ec. (25)}$$

$$Vv = \left(\frac{1,53 - 1,38}{1,53}\right) * 100$$

$$Vv = 10,01\%$$

Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM)

$$VAM = \left(\frac{\% \text{ de asf} * \text{Dens prom}}{\text{Peso esp del asf}} \right) + Vv \quad \text{Ec. (26)}$$

$$VAM = \left(\frac{4 * 1,38}{1,01} \right) + 10,01\%$$

$$VAM = 15,46 \%$$

Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (RBV)

$$RBV = \left(\frac{VAM - Vv}{VAM} \right) * 100 \quad \text{Ec. (27)}$$

$$RBV = \left(\frac{15,46 - 10,01}{15,46} \right) * 100$$

$$RBV = 35,29 \%$$

4.3.4.10 Estabilidad y fluencia

Identificación	Lectura dial	
	Estabilidad	Fluencia
1	580,00	155,00
2	705,00	175,00
3	796,00	140,00

Se debe realizar la corrección con la fórmula de calibración de la prensa Marshall.

Estabilidad

$$\text{Estabilidad Real} = (\text{Lectura dial} * 0,012 - 0,0812) * 102 * 2,2) \quad \text{Ec. (28)}$$

$$\text{Estabilidad Real} = (580 * 0,012 - 0,0812) * 102 * 2,2)$$

$$\text{Estabilidad Real} = 1543,60 \text{ Lb}$$

Resumen.

Identificación	Estabilidad (dial)	Estabilidad real(lb)
1	580,00	1543,60
2	705,00	1880,20
3	796,00	2125,25
Promedio		1849,68

Corrección por altura

El factor de corrección por la altura para las briquetas se lo realiza con la tabla que se encuentra en anexos.

Identificación	Factor de corrección
1	0,85
2	0,86
3	0,85
Promedio	0,85

$$\text{Estabilidad corregida} = \text{Estabilidad real prom} * \text{Factor de c.} \quad \text{Ec. (29)}$$

$$\text{Estabilidad corregida} = 1849,68 * 0,85$$

$$\text{Estabilidad corregida} = 1575,93 \text{ Lb}$$

Fluencia

$$\text{Fluencia } 1/100 = (\text{Lectura dial}/(25,4)) \quad \text{Ec. (30)}$$

$$\text{Fluencia } 1/100 = (155/(25,4))$$

$$\text{Fluencia } 1/100 = 6,10$$

Identificación	Factor de corrección
1	6,10
2	6,89
3	5,51
Promedio	6,17

Nota: de igual manera se realiza los cálculos para los demás datos, a continuación, se presenta una planilla general cálculos y de resultados.

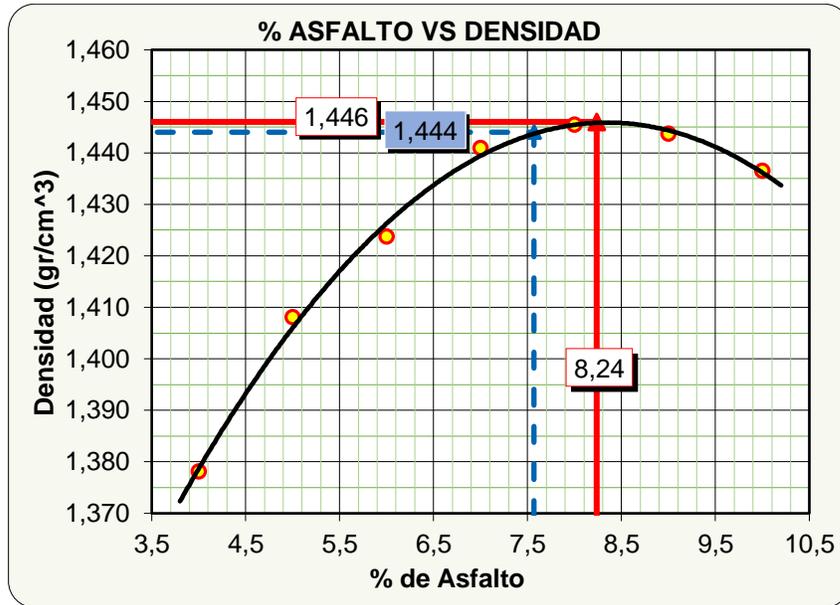
Tabla 4.15. Resultados de la dosificación para el diseño de la mezcla asfáltica con agregado grueso y fino (Leca).

Pesos Específicos (AASHTO T-100 , T-85)		% de Agregados		C. Asfáltico AASHTO M-20		Docificación							Grava		Gravilla		Arena triturada					
Mat. Retenido Tamiz N° 4	1,542	gr/cm ³	38,8	Tipo de asfalto AASHTO M 20	85-100								3/4"	3/8"	N°4							
Mat. Pasa Tamiz N° 4	1,580	gr/cm ³	61,2	P. Específico Total AASHTO T-228	1,010	% De agregados :							11%	28%	61%							
P. Esp. Agregado Total (Gag):	1,565	gr/cm ³	100	Origen de agregados :							Planta de producción de arcilla expandida (Leca) Buenos Aires Argentina											
N° Golpes:		75		Temperatura de Compactación 130 °C																		
Identificación	ALTURA BRIQUETA (CM)	% De asfalto		PESO BRIQUETA EN EL AIRE	PESO BRIQUETA EN EL AIRE S.S.S.	PESO BRIQUETA SUMERGIDA EN AGUA	VOLUMEN BRIQUETA	Densidad de la briqueta			% Vacíos			Estabilidad (Lb)					Lect. Dial	Flujo 1/100	Media	
		Base agregado	Base mezcla					(gr)	(gr)	(gr)	(cm3)	REAL (Dr.)	PROMEDIO (Drm.)	MAXIMA TEORICA	MEZCLA	AGREGADOS	LLENOS DE ASFALTO	Lec. Dial				Real
				(kg/cm3)	(kg/cm3)	(kg/cm3)	(Vv)					(VAM)	(RBV)	mm								
		a	b	c	r	d	e	f	g	h	i	j	k		l	m	n	o	p			
1	7,07	4,17	4,00	765,30	771,60	217,00	554,60	1,38						580,00	1543,60		0,85			155,00	0,06	
2	7,01	4,17	4,00	787,80	792,20	222,00	570,20	1,38						705,00	1880,20		0,86			175,00	0,07	
3	7,02	4,17	4,00	786,50	791,00	218,00	573,00	1,37	1,38	1,53	10,01	15,47	35,28	796,00	2125,25	1849,68	0,85	0,85	1575,93	140,00	0,06	6,17
4	7,12	5,26	5,00	766,30	771,60	229,00	542,60	1,41						815,00	2176,41		0,84			155,00	0,06	
5	7,01	5,26	5,00	788,80	792,20	230,00	562,20	1,40						860,00	2297,59		0,86			180,00	0,07	
6	6,98	5,26	5,00	763,30	768,80	227,00	541,80	1,41	1,41	1,52	7,56	14,53	47,98	902,00	2410,68	2294,89	0,86	0,85	1952,95	190,00	0,07	6,89
7	7,31	6,38	6,00	790,30	795,80	238,00	557,80	1,42						1012,00	2706,89		0,81			210,00	0,08	
8	7,29	6,38	6,00	792,20	796,60	240,00	556,60	1,42						967,00	2585,72		0,81			200,00	0,08	
9	6,67	6,38	6,00	785,20	790,70	242,00	548,70	1,43	1,42	1,52	6,03	14,49	58,38	1097,00	2935,78	2742,80	0,93	0,85	2331,38	220,00	0,09	8,27
10	7,07	7,53	7,00	786,00	791,10	245,00	546,10	1,44						1191,00	3188,90		0,85			225,00	0,09	
11	7,16	7,53	7,00	794,10	799,50	249,00	550,50	1,44						1125,00	3011,18		0,83			230,00	0,09	
12	7,02	7,53	7,00	795,80	799,30	247,00	552,30	1,44	1,44	1,51	4,39	14,38	69,47	992,00	2653,04	2951,04	0,85	0,84	2487,73	215,00	0,08	8,79
13	7,08	8,70	8,00	800,20	808,10	251,00	557,10	1,44						1145,00	3065,03		0,84			250,00	0,10	
14	6,83	8,70	8,00	792,90	801,30	254,00	547,30	1,45						1108,00	2965,40		0,89			235,00	0,09	
15	6,91	8,70	8,00	796,90	805,10	256,00	549,10	1,45	1,45	1,50	3,58	15,03	76,19	1097,00	2935,78	2988,74	0,88	0,87	2597,21	240,00	0,09	9,51
16	6,90	9,89	9,00	792,90	800,00	252,00	548,00	1,45						1052,00	2814,60		0,88			310,00	0,12	
14	6,92	9,89	9,00	790,50	797,30	250,00	547,30	1,44						1178,00	3153,90		0,87			290,00	0,11	
15	6,92	9,89	9,00	790,10	796,80	248,00	548,80	1,44	1,44	1,49	3,19	16,06	80,12	1108,00	2965,40	2977,97	0,87	0,87	2602,74	305,00	0,12	11,88
16	6,85	11,11	10,00	783,10	787,30	238,00	549,30	1,43						896,00	2394,53		0,89			360,00	0,14	
14	6,89	11,11	10,00	789,50	790,70	242,00	548,70	1,44						955,00	2553,40		0,88			375,00	0,15	
15	6,93	11,11	10,00	793,00	795,80	247,00	548,80	1,44	1,44	1,48	3,17	17,39	81,78	1008,00	2696,12	2548,02	0,87	0,88	2239,71	390,00	0,15	14,76

Fuente: Elaboración propia.

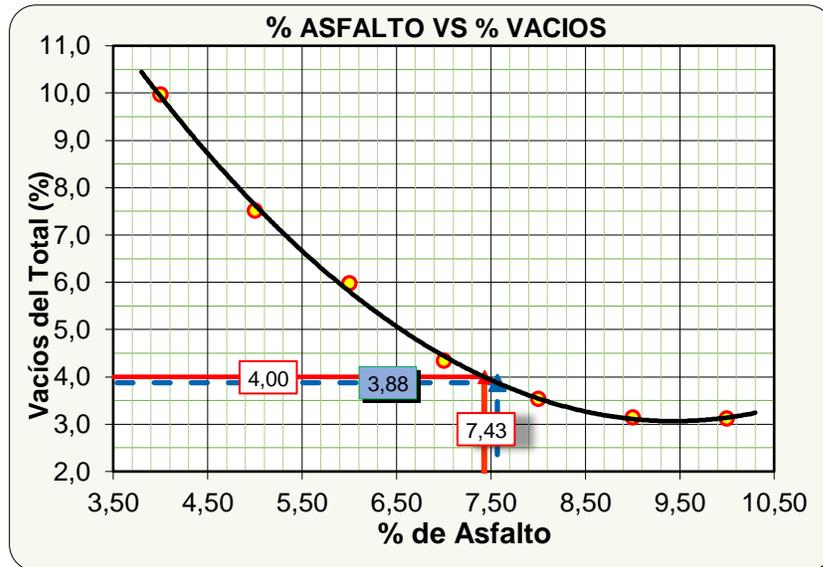
Con los valores obtenidos de la tabla de resultados se procede a graficar las curvas correspondientes a las siguientes relaciones:

Figura 4.7. % de asfalto vs densidad del diseño de la mezcla con agregados (Leca).



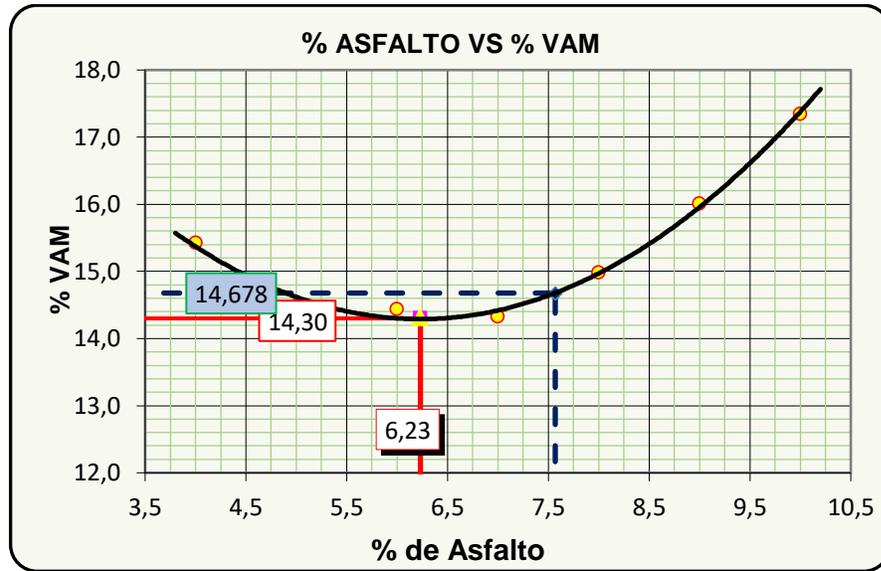
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.8. % de asfalto vs % de vacíos del diseño de la mezcla con agregados (Leca).



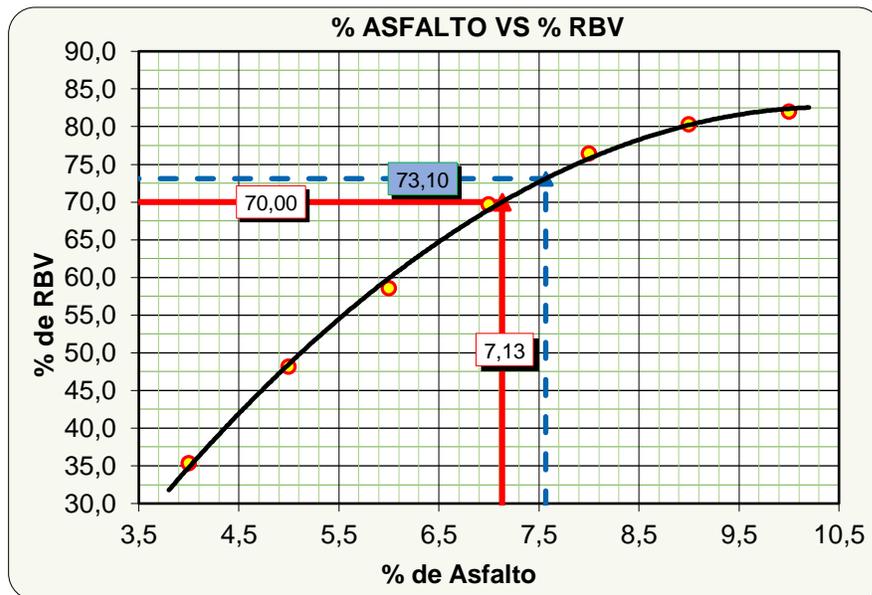
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.9. % de asfalto vs % VAM del diseño de la mezcla asfáltica con agregados (Leca).



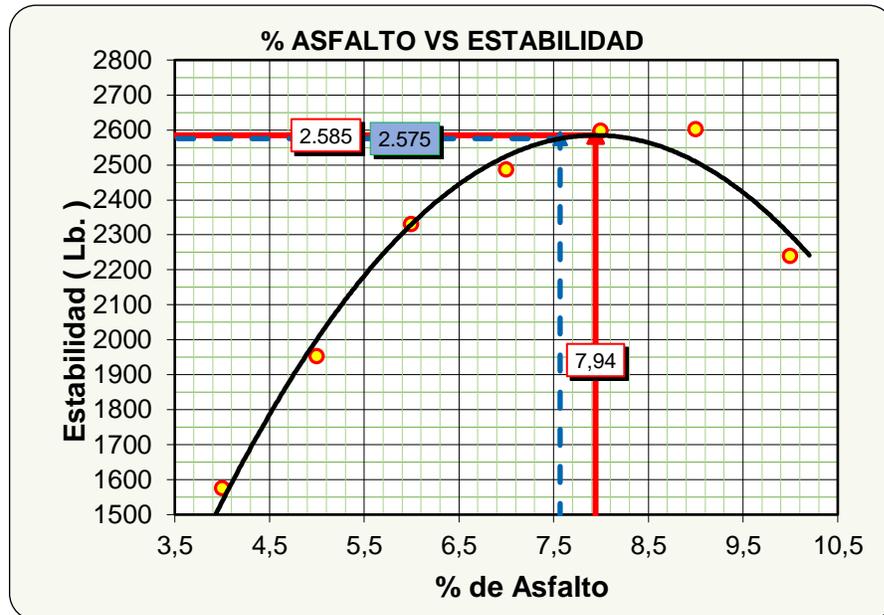
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.10. % de asfalto vs % RBV del diseño de la mezcla asfáltica con agregados (Leca).



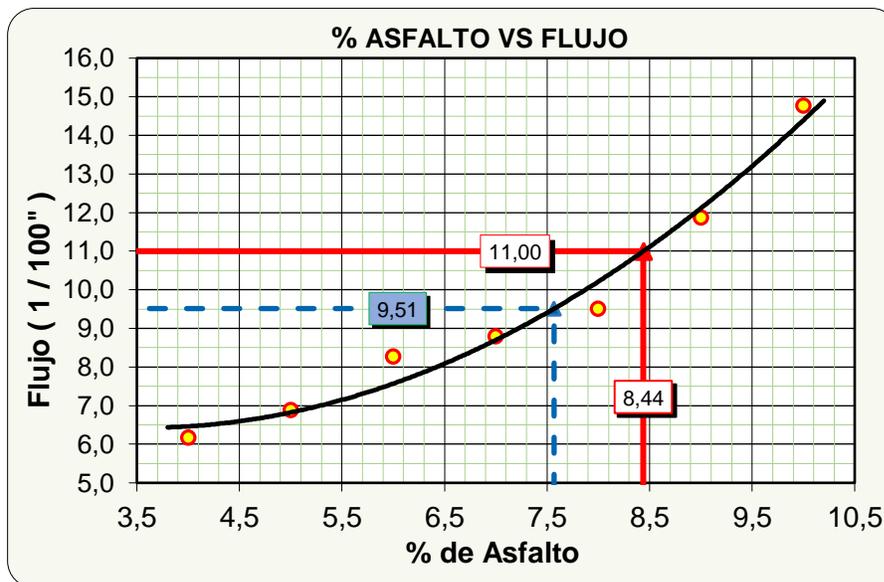
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.11. % de asfalto vs estabilidad del diseño de la mezcla asfáltica con agregados (Leca)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.12 % de asfalto vs flujo del diseño de la mezcla asfáltica con agregados (Leca).



Fuente: Elaboración propia.

Con la ayuda de las gráficas podemos definir nuestro contenido óptimo de cemento asfáltico, el criterio para determinar el contenido óptimo es realizando un promedio de los óptimos parciales de cada gráfica como se muestra a continuación:

Tabla 4.16. Resultados del diseño de la mezcla asfáltica con agregado grueso y fino arcilla expandida (Leca).

Valores				
Características	% parcial de asfalto	Obtenidos de gráficos	Especificaciones técnicas	
Densidad	8,24	1,45	-----	-----
% vacíos	7,43	4,00	3	5
R.B.V.	7,13	70,00	65	75
V.A.M	6,23	14,30		
Estabilidad (lb)	7,94	2584,70	> 1800 Lb.	
Fluencia 1/100"	8,44	11,00	8	14
Promedio (%)	7,57	Determinación del contenido óptimo de asfalto promedio de las graficas		

Fuente: Elaboración propia.

Una vez que se determina el contenido óptimo de cemento asfáltico y con la ayuda de las mismas gráficas, podemos encontrar los valores de las características de la mezcla asfáltica.

Tabla 4.17. Resultados del diseño óptimo de la mezcla asfáltica con agregado grueso y fino arcilla expandida (Leca).

Valores obtenidos diseño Marshall				
Características	% de asfalto	Valores con él % óptimo	Especificaciones técnicas	
Densidad	7,57	1,44	-----	-----
% vacíos	7,57	3,88	2	4
R.B.V.	7,57	73,10	75	82
V.A.M	7,57	14,68		
Estabilidad (lb)	7,57	2575,00	> 1500 Lb.	
Fluencia 1/100"	7,57	9,51	8	18
% óptimo de asfalto propuesto			7,57	

Fuente: Elaboración propia.

4.4 DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA UTILIZANDO AGREGADO GRUESO ARCILLA EXPANDIDA (LECA) Y FINO ARENA TRITURADA (ERIKA)

Para este diseño se seguirá el procedimiento de cálculo demostrado anteriormente.

4.4.1 Dosificación de los especímenes (briquetas)

Para la determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico se procede a realizar el diseño de 21 especímenes (briquetas) mediante el método Marshall, se prepararán 7 grupos de briquetas con diferentes contenidos de cemento asfáltico, se hace variar un 1 % del peso del cemento asfáltico para la mezcla de agregados de forma que las curvas que representen los resultados de los ensayos muestren un valor óptimo bien definido.

Para la dosificación de las briquetas se utiliza la granulometría ya establecida anteriormente la misma que está distribuida de la siguiente manera:

Ponderación de grava	12%
Ponderación de gravilla	34%
Ponderación de arena	54%

Los porcentajes de cemento asfáltico para los que se preparara la mezcla son de: 4%, 5%, 6%, 7%, 8%, 9% y 10%,

Tabla 4.18. Peso de los agregados y cemento asfáltico para la mezcla asfáltica con agregado grueso (Leca) y agregado fino arena triturada (Erika)

Porcentaje de cemento asfáltico (%)	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00	10,00
Porcentaje de agregado (%)	96,00	95,00	94,00	93,00	92,00	91,00	90,00
Peso cemento asfáltico (gr)	40,00	50,00	60,00	70,00	80,00	90,00	100,00
Peso de grava (gr)	63,36	62,70	62,04	61,38	60,72	60,06	59,40
Peso de gravilla (gr)	227,52	225,15	222,78	220,41	218,04	215,67	213,30
Peso de arena (gr)	669,12	662,15	655,18	648,21	641,24	634,27	627,30
Peso total de la briqueta (gr)	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0

Fuente: Elaboración propia.

La tabla anterior nos muestra las cantidades de agregados y cemento asfáltico con las que se realizará el diseño y así poder obtener el contenido óptimo del cemento asfáltico.

4.4.2 Resultados de las muestras

Una vez que se hayan extraído las briquetas de los moldes de compactación se procederá a realizar los ensayos de gravedad específica, estabilidad y fluencia.

A continuación, se muestra los resultados obtenidos de los diseños de la mezcla asfáltica utilizando como agregado grueso arcilla expandida (Leca) y agregado fino arena triturada (Erika).

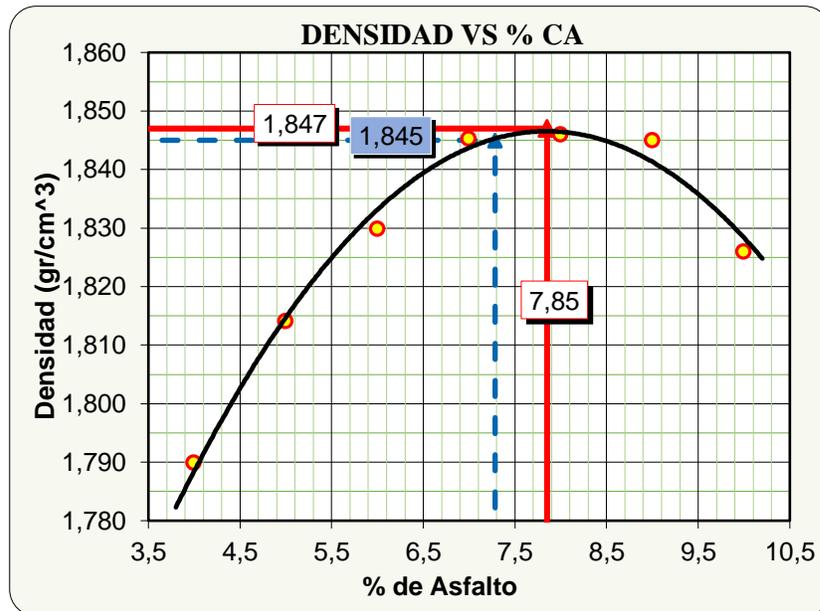
Tabla 4.19. Resultados del diseño de la mezcla asfáltica con agregado grueso (Leca) y agregado fino arena triturada (Erika).

Pesos Especificos (AASHTO T-100, T-85)			% de Agregados		C. Asfáltico AASHTO M-20				Docificación				Grava		Gravilla		Arena triturada					
Mat. Retenido Tamiz Nº 4			1,542	gr/cm ³	39,3	Tipo de asfalto AASHTO M 20				85-100				3/4"		3/8"		Nº4				
Mat. Pasa Tamiz Nº 4			2,687	gr/cm ³	60,7	P. Especifico Total AASHTO T-228				1,010				% De agregados :		12%		34%		54%		
P. Esp. Agregado Total (Gag.)			2,080	gr/cm ³	100									Origen de agregados :		Planta de produccion de arcilla expandida (Leca) Buenos Aires argentina						
Nº Golpes:			75	Temperatura de Cmpactacion 130 °C								Material de acopio planta de asfaltos (Erika).										
Identificación	ALTURA BRIQUETA (CM)	% De asfalto		PESO BRIQUETA EN ELAIRE	PESO BRIQUETA EN ELAIRE S.S.S.	PESO BRIQUETA SUMERGIDA EN AGUA	VOLUMEN BRIQUETA	Densidad de la briqueta			% Vacios			Estabilidad (Lb)								
		Base agregado	Base mezcla					REAL	PROMEDIO	MAXIMA	MEZCLA	AGREGADO	LEENOS DE	Lect. Dial	Real	Media	FACTOR DE CORRECCION (ALTURA)	Media f.c.	Corregida	Lect. Dial	Flujo 1/100	Media
				(kg/cm3)	(kg/cm3)	(kg/cm3)	(Vv)	(VAM)	(RBV)	mm												
		a	b	c	r	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p				
1	7,53	4,17	4,00	992,20	996,30	441,00	555,30	1,787					777,00	2074,08		0,77			220,00	0,09		
2	7,44	4,17	4,00	991,90	995,10	439,00	556,10	1,784					627,00	1670,16		0,78			160,00	0,06		
3	7,13	4,17	4,00	981,30	984,40	439,00	545,40	1,799	1,790	2,00	10,30	17,39	40,77	702,00	1872,12	1872,12	0,83	0,80	1490,21	190,00	0,07	7,48
4	7,40	5,26	5,00	985,90	990,50	444,00	546,50	1,804						878,00	2346,06		0,79			220,00	0,09	
5	7,43	5,26	5,00	990,30	992,50	447,00	545,50	1,815						979,00	2618,03		0,79			215,00	0,08	
6	7,43	5,26	5,00	991,90	995,10	451,00	544,10	1,823	1,814	1,98	8,16	17,14	52,39	915,00	2445,69	2469,93	0,79	0,79	1943,83	195,00	0,08	8,27
7	7,34	6,38	6,00	1004,20	1007,80	457,00	550,80	1,823						1194,00	3196,98		0,80			220,00	0,09	
8	7,15	6,38	6,00	986,90	989,10	451,00	538,10	1,834						1248,00	3342,39		0,83			230,00	0,09	
9	7,25	6,38	6,00	992,10	996,40	455,00	541,40	1,832	1,830	1,96	6,43	17,30	62,83	1221,00	3269,69	3269,69	0,82	0,82	2668,07	205,00	0,08	8,60
10	7,23	7,53	7,00	992,70	994,70	457,00	537,70	1,846						1269,00	3398,94		0,82			225,00	0,09	
11	7,02	7,53	7,00	989,30	991,20	455,00	536,20	1,845						1473,00	3948,27		0,85			250,00	0,10	
12	6,98	7,53	7,00	981,20	984,90	453,00	531,90	1,845	1,845	1,94	4,70	17,49	73,11	1351,00	3619,75	3655,66	0,86	0,85	3089,03	245,00	0,10	9,45
13	6,98	8,70	8,00	995,80	997,00	460,00	537,00	1,854						1514,00	4058,68		0,86			295,00	0,12	
14	7,07	8,70	8,00	997,30	999,70	461,00	538,70	1,851						1323,00	3544,35		0,85			260,00	0,10	
15	6,93	8,70	8,00	990,30	992,50	452,00	540,50	1,832	1,846	1,92	3,73	18,35	79,68	1359,00	3641,29	3748,11	0,87	0,86	3219,63	275,00	0,11	10,89
16	6,85	9,89	9,00	986,60	987,20	451,00	536,20	1,840						1220,00	3266,99		0,89			307,00	0,12	
17	6,82	9,89	9,00	986,20	986,80	454,00	532,80	1,851						1343,00	3598,21		0,89			325,00	0,13	
18	6,98	9,89	9,00	990,50	992,10	455,00	537,10	1,844	1,845	1,90	2,84	19,28	85,28	1292,00	3460,88	3442,03	0,86	0,88	3028,98	316,00	0,12	12,44
19	6,83	11,11	10,00	987,60	988,00	447,00	541,00	1,83						1100,00	2943,86		0,89			390,00	0,15	
20	6,85	11,11	10,00	991,90	995,10	453,00	542,10	1,83						1210,00	3240,07		0,89			370,00	0,15	
21	6,81	11,11	10,00	981,30	984,40	446,00	538,40	1,82	1,83	1,88	2,91	20,99	86,12	1011,00	2704,20	2962,71	0,90	0,89	2636,81	380,00	0,15	14,96

Fuente: Elaboración propia.

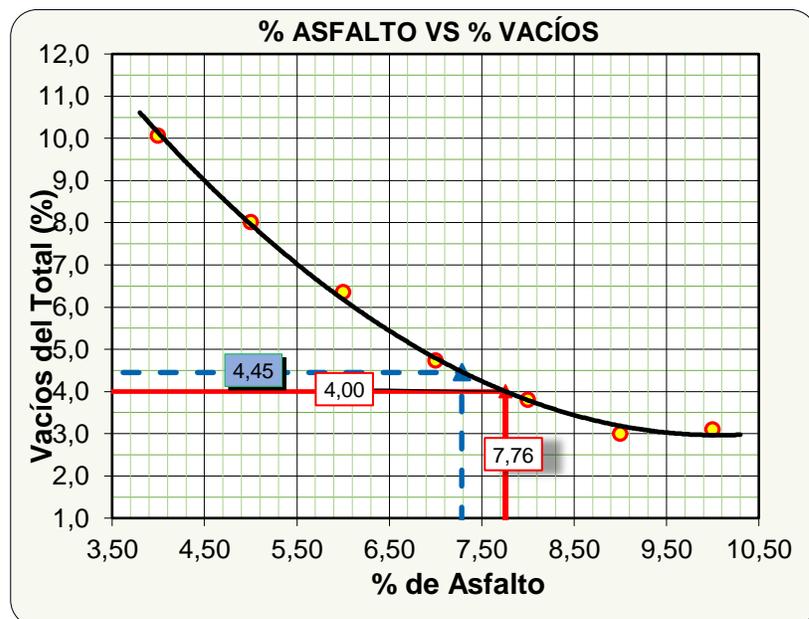
Con los valores obtenidos de la tabla de resultados se procede a graficar las curvas correspondientes a las siguientes relaciones:

Figura 4.13. % de asfalto vs densidad.



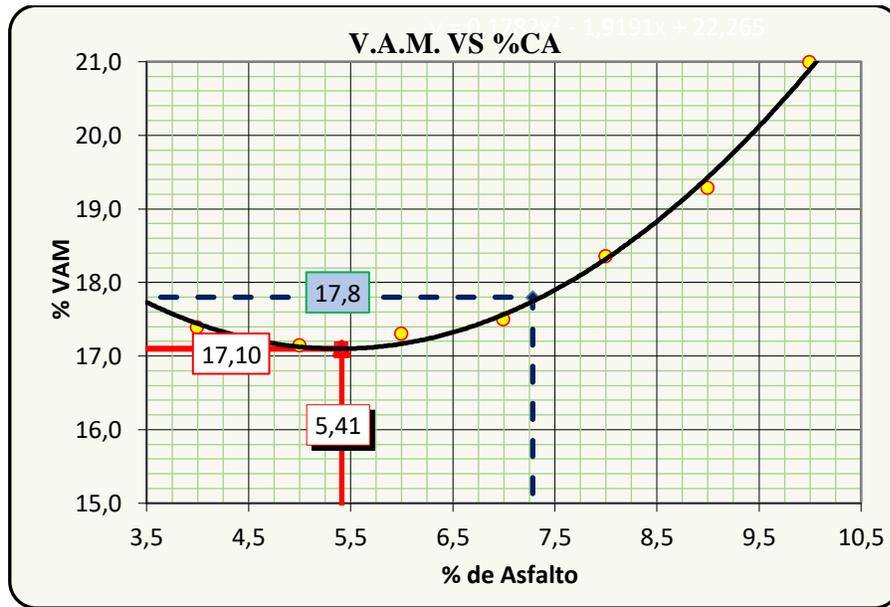
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.14. % de asfalto vs % de vacíos.



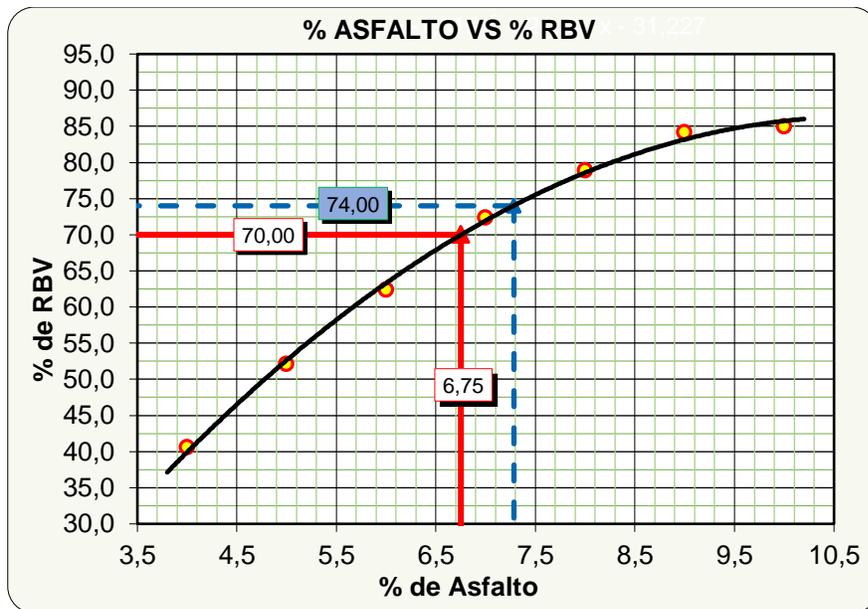
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.15. % de asfalto vs % VAM.



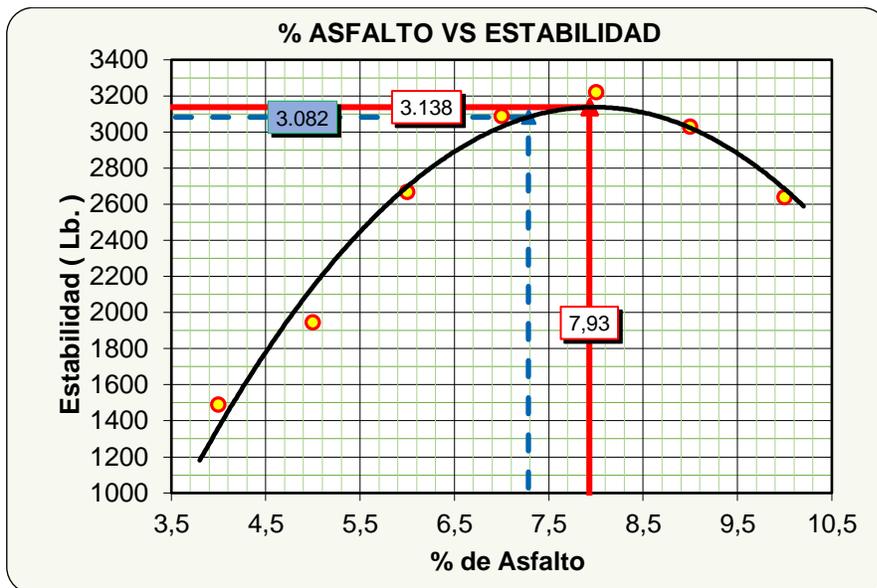
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.16. % de asfalto vs % RBV.



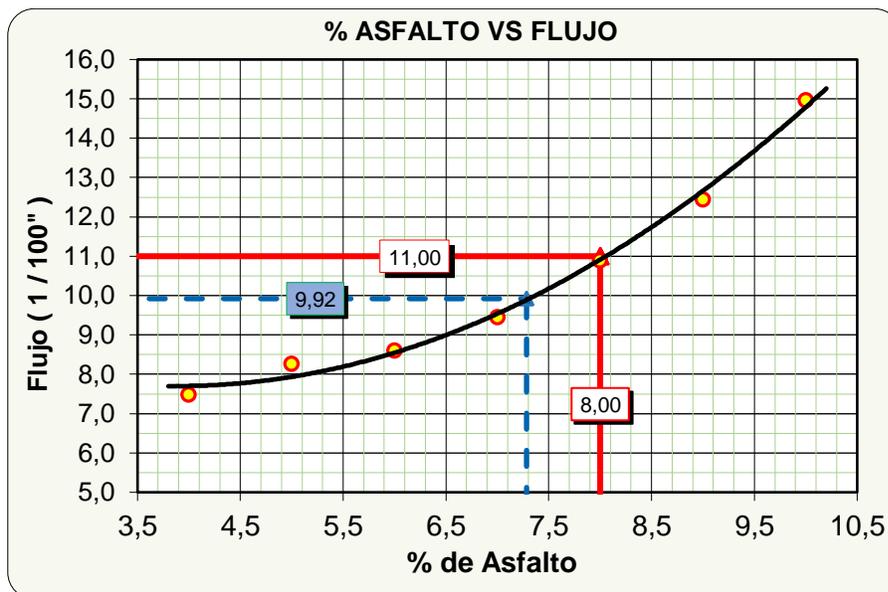
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.17. % de asfalto vs estabilidad.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.18. % de asfalto vs flujo.



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a las gráficas se tiene lo siguiente:

Tabla 4.20. Resultados del diseño de la mezcla asfáltica con agregado grueso (Leca) y agregado fino arena triturada (Erika).

Valores				
Características	% parcial de asfalto	Obtenidos de gráficos	Especificaciones técnicas	
Densidad	7,85	1,85	-----	-----
% vacíos	7,76	4,00	3	5
R.B.V.	6,75	70,00	65	75
V.A.M	5,41	17,10		
Estabilidad (lb)	7,93	3137,55	> 1800 Lb.	
Fluencia 1/100"	8,00	11,00	8	14
Promedio (%)	7,28	Determinación del contenido óptimo de asfalto promedio de las graficas		

Fuente: Elaboración propia.

Una vez que se determina el contenido óptimo de cemento asfáltico y con la ayuda de las mismas gráficas, podemos encontrar los resultados de las características de la mezcla asfáltica.

Tabla 4.21. Resultados del diseño óptimo de la mezcla asfáltica con agregado grueso (Leca) y agregado fino arena triturada (Erika).

Valores obtenidos diseño Marshall				
Características	% de asfalto	Valores con él % optimo	Especificaciones técnicas	
Densidad	7,28	1,85	-----	-----
% vacíos	7,28	4,45	3	5
R.B.V.	7,28	74,00	65	75
V.A.M	7,28	17,80		
Estabilidad (lb)	7,28	3082,00	> 1800 Lb.	
Fluencia 1/100"	7,28	9,92	8	14
% óptimo de asfalto propuesto			7,39	

Fuente: Elaboración propia.

4.5 DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA CON AGREGADO ARCILLA EXPANDIDA (LECA) GRANULOMETRÍA COMERCIAL

De igual forma que para los anteriores diseños, se procederá a realizar el diseño para la mezcla asfáltica con agregado arcilla expandida (Leca) granulometría comercial.

4.5.1 Dosificación de los especímenes (briquetas)

Para la determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico se procede a realizar el diseño de 15 especímenes (briquetas) mediante el método Marshall, se prepararán 5 grupos de briquetas donde se hace variar un 0.5% del peso del cemento asfáltico para la mezcla de agregados de forma que las curvas que representen los resultados de los ensayos muestren un valor óptimo bien definido.

Para la dosificación de las briquetas se utiliza la granulometría ya establecida anteriormente la misma que está distribuida de la siguiente manera:

Ponderación de grava	43%
Ponderación de gravilla	0,0%
Ponderación de arena	57%

Los porcentajes de cemento asfáltico para los que se preparara la mezcla son de: 5%, 5.5%, 6%, 6.5% y 7%

Tabla 4.22. Peso de los agregados y cemento asfáltico para la mezcla asfáltica con agregado (Leca) granulometría comercial.

Porcentaje de cemento asfáltico (%)	5,00	5,50	6,00	6,50	7,00	7,50
Porcentaje de agregado (%)	95,00	94,50	94,00	93,50	93,00	92,50
Peso cemento asfáltico (gr)	33,75	37,13	40,50	43,88	47,25	50,63
Peso de grava (gr)	275,74	274,29	272,84	271,38	269,93	268,48
Peso de gravilla (gr)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Peso de arena (gr)	365,51	363,59	361,67	359,74	357,82	355,89
Peso total de la briqueta (gr)	675,00	675,00	675,00	675,00	675,00	675,00

Fuente: Elaboración propia.

La tabla anterior nos muestra las cantidades de agregados y cemento asfáltico con las que se realizará la elaboración de las briquetas.

4.5.2 Resultados de las muestras

Una vez que se hayan extraído las briquetas de los moldes de compactación se procederá a realizar los ensayos de gravedad específica, estabilidad y fluencia.

A continuación, se muestra los resultados obtenidos del diseño de la mezcla asfáltica con agregado arcilla expandida (Leca) granulometría comercial.

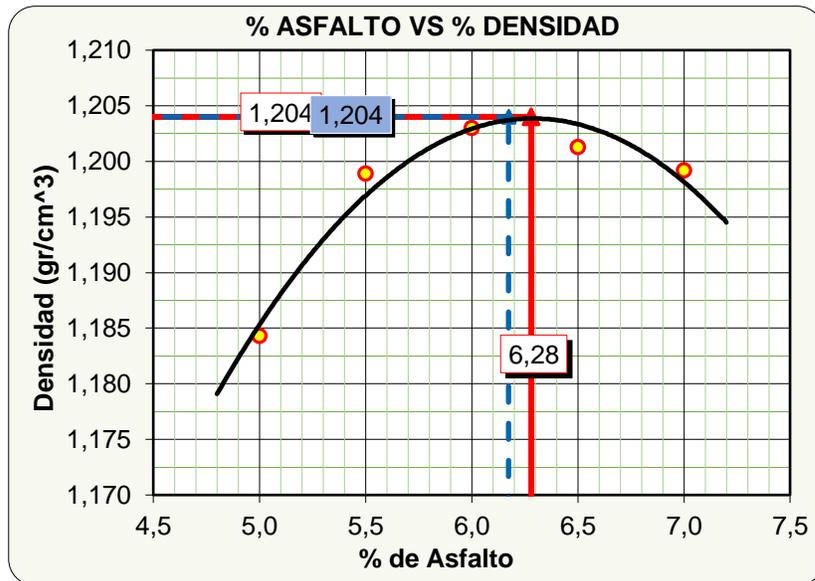
Tabla 4.23. Resultados de la dosificación para el diseño de la mezcla asfáltica con arcilla expandida (Leca)

Pesos Específicos (AASHTO T-100, T-85)			% de Agregados		C. Asfáltico AASHTO M-20			Dosisificación						Grava		Gravilla		Arena triturada				
Mat. Retenido Tamiz N° 4	1,542	gr/cm ³	50	Tipo de asfalto AASHTO M20	85-100									3/4"		3/8"		N°4				
Mat. Pasa Tamiz N° 4	1,580	gr/cm ³	50	P. Especifico Total AASHTO T-228	1,010			% De agregados :						25%		25%		50%				
P. Esp. Agregado Total (Cag.)	1,561	gr/cm ³	100				Origen de agregados :						Planta de producción de arcilla expandida (Leca) Buenos Aires Argentina									
N° Golpes: 75			Temperatura de Cmpactacion 130 °C																			
Identificación	ALTURA BRIQUETA (CM)	% De asfalto		PESO BRIQUETA EN EL AIRE	PESO BRIQUETA EN EL AIRE S.S.S.	PESO BRIQUETA SUMERGIDA EN AGUA	VOLUMEN BRIQUETA	Densidad de la briqueta			% Vacios			Estabilidad (Lb)					Lect. Dial	Flujo 1/100	Media	
		Base agregado	Base mezcla					REAL (Dr.)	PROMEDIO (Drm)	MAXIMA TEORICA	MEZCLA	AGREGADOS (VAM)	LLENOS DE ASFALTO (RBV)	Lec. Dial	Real	Media	FACTOR DE CORRECCION (ALTURA)	Media f.c.				Corregida
				(gr)	(gr)	(kg/cm3)	(kg/cm3)												(kg/cm3)	(Vv)	(VAM)	
		a	b	c	r	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p				
1	6,95	5,26	5,00	651,00	684,50	137,00	547,50	1,19						339,00	894,64		0,87			145,00	0,06	
2	7,01	5,26	5,00	655,00	688,50	140,00	548,50	1,19						305,00	803,08		0,86			135,00	0,05	
3	6,89	5,26	5,00	648,00	681,00	127,00	554,00	1,17	1,18	1,52	22,05	27,92	21,00	360,00	951,19	882,97	0,88	0,87	766,42	170,00	0,07	5,91
4	6,81	5,82	5,50	661,30	694,70	142,00	552,70	1,20						388,00	1026,59		0,90			165,00	0,06	
5	6,92	5,82	5,50	653,00	682,20	144,00	538,20	1,21						410,00	1085,83		0,87			185,00	0,07	
6	7,08	5,82	5,50	657,10	688,60	135,00	553,60	1,19	1,20	1,52	20,88	27,41	23,82	370,00	978,11	1030,18	0,84	0,87	896,25	150,00	0,06	6,56
7	6,90	6,38	6,00	668,00	706,90	147,00	559,90	1,19						425,00	1126,22		0,88			170,00	0,07	
8	6,87	6,38	6,00	675,10	715,00	152,00	563,00	1,20						398,00	1053,51		0,88			190,00	0,07	
9	6,93	6,38	6,00	678,10	717,30	160,00	557,30	1,22	1,20	1,51	20,40	27,55	25,94	417,00	1104,68	1094,80	0,87	0,88	960,14	175,00	0,07	7,02
10	7,10	6,95	6,50	677,70	715,90	149,00	566,90	1,20						445,00	1180,07		0,84			260,00	0,10	
11	6,98	6,95	6,50	680,20	727,40	163,00	564,40	1,21						410,00	1085,83		0,86			195,00	0,08	
12	7,02	6,95	6,50	673,80	717,00	157,00	560,00	1,20	1,20	1,51	20,30	28,04	27,58	432,00	1145,07	1136,99	0,85	0,85	968,72	240,00	0,09	9,12
13	6,89	7,53	7,00	697,90	732,50	155,00	577,50	1,21						374,00	988,89		0,88			250,00	0,10	
14	6,93	7,53	7,00	689,10	725,90	148,00	577,90	1,19						388,00	1026,59		0,87			270,00	0,11	
15	7,05	7,53	7,00	693,00	729,10	150,00	579,10	1,20	1,20	1,50	20,23	28,54	29,12	405,00	1072,36	1029,28	0,85	0,87	891,35	280,00	0,11	10,50

Fuente: Elaboración propia.

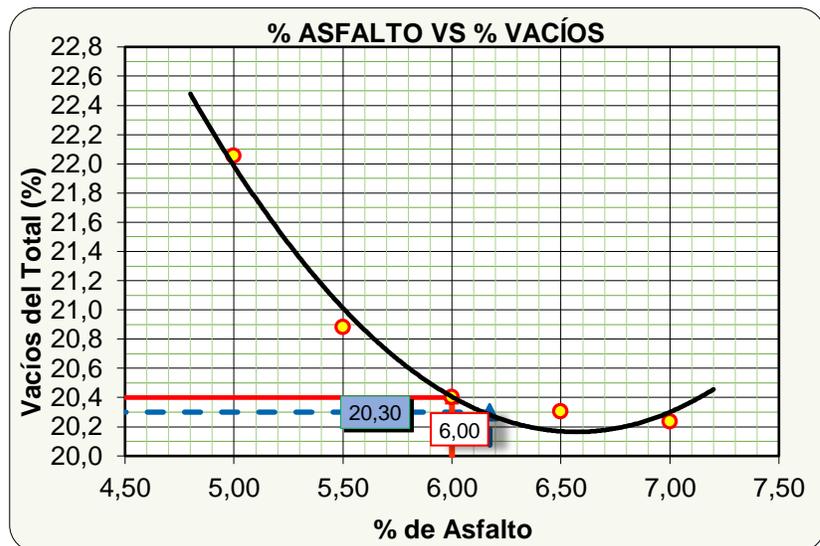
Con los valores obtenidos de la tabla de resultados se procede a graficar las curvas correspondientes a las siguientes relaciones:

Figura 4.19. % de asfalto vs densidad.



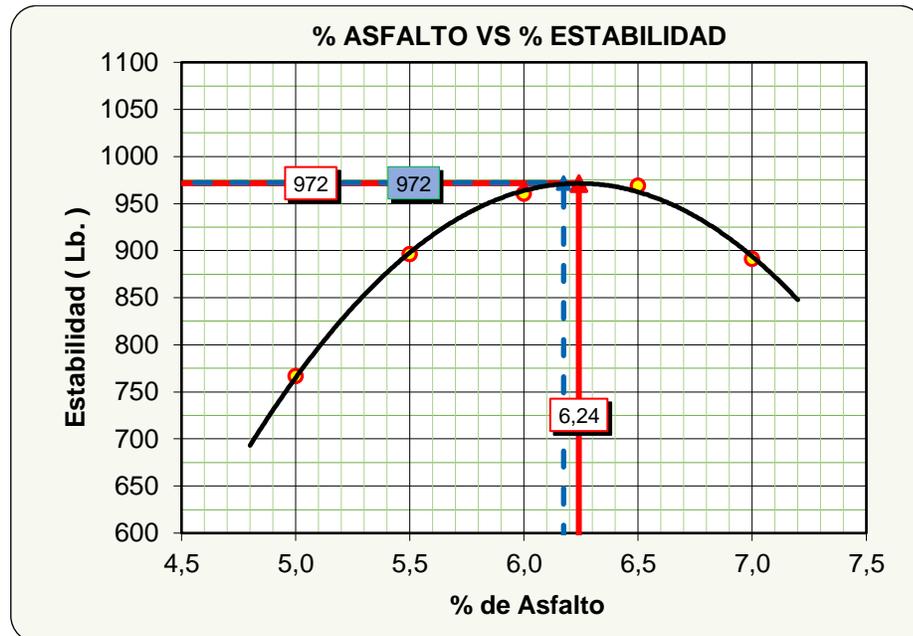
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.20. % de asfalto vs % de vacíos.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.21. % de asfalto vs estabilidad.



Fuente: Elaboración propia.

Con la ayuda de las gráficas podemos definir nuestro contenido óptimo de cemento asfáltico, el criterio para determinar el contenido óptimo es realizando un promedio de los óptimos parciales de cada gráfica.

Tabla 4.24. Resultados del diseño óptimo de la mezcla asfáltica con arcilla expandida (Leca).

Valores			
Características	% parcial de asfalto	Obtenidos de gráficos	Especificaciones técnicas
Densidad	6,28	1,20	-----
% vacíos	6,00	20,40	>20
Estabilidad (lb)	6,24	971,60	> 1800 lb.
Promedio (%)	6,17	determinación del contenido óptimo de asfalto promedio de las graficas	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.25. Resultados del diseño óptimo de la mezcla asfáltica con arcilla expandida (Leca) granulometría comercial.

Valores obtenidos diseño Marshall				
Características	% de asfalto	Valores con él % óptimo	Especificaciones técnicas	
Densidad	6,17	1,204	-----	-----
% vacíos	6,17	20,30	>20	-----
Estabilidad (lb)	6,17	972	> 1800 lb.	
% óptimo de asfalto propuesto			6,17	

Fuente: Elaboración propia.

4.6 DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL CON AGREGADOS PÉTREOS

De igual forma que para los anteriores diseños, se procederá a realizar el diseño para la mezcla asfáltica con agregados pétreos provenientes de Rancho Sud de la chancadora perteneciente a la empresa Erika.

4.6.1 Dosificación de los especímenes (briquetas).

Para la determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico se procede a realizar el diseño de 15 especímenes (briquetas) mediante el método Marshall, se prepararán 5 grupos de briquetas donde se hace variar un 0.5% del peso del cemento asfáltico para la mezcla de agregados de forma que las curvas que representen los resultados de los ensayos muestren un valor óptimo bien definido.

Para la dosificación de las briquetas se utiliza la granulometría ya establecida anteriormente la misma que está distribuida de la siguiente manera:

Ponderación de Grava	30%
Ponderación de Gravilla	24%
Ponderación de Arena	46%

Los porcentajes de cemento asfáltico para los que se preparara la mezcla son de: 4,5%, 5%, 5.5%, 6% y 6.5%.

Tabla 4.26. Peso de los agregados y cemento asfáltico para la mezcla asfáltica convencional.

Porcentaje del cemento asfáltico (%)	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50
Porcentaje de agregado (%)	95,50	95,00	94,50	94,00	93,50
Peso del cemento asfáltico (gr)	54,00	60,00	66,00	72,00	78,00
Peso de grava (gr)	343,80	342,00	340,20	338,40	336,60
Peso de gravilla (gr)	275,04	273,60	272,16	270,72	269,28
Peso de arena (gr)	527,16	524,40	521,64	518,88	516,12
Peso total de la briqueta (gr)	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

La tabla anterior nos muestra las cantidades de agregados y cemento asfáltico con las que se realizará la elaboración de las briquetas.

4.6.2 Resultados de las muestras

Una vez que se hayan extraído las briquetas de los moldes de compactación se procederá a realizar los ensayos de gravedad específica, estabilidad y fluencia.

A continuación, se muestra los resultados obtenidos del diseño de la mezcla asfáltica convencional con agregados pétreos.

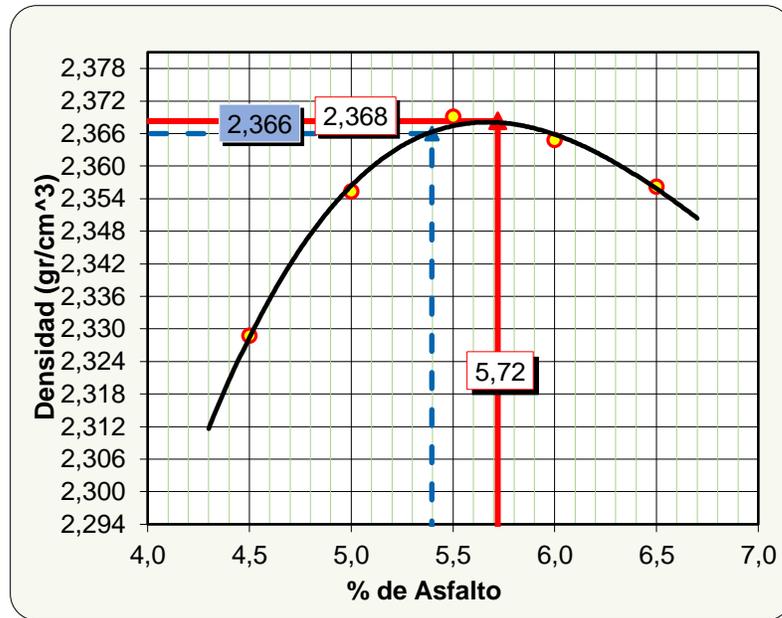
Tabla 4.27. Resultados de la dosificación para el diseño de la mezcla asfáltica convencional.

Pesos Específicos (AASHTO T-100 , T-85)		% de Agregados		C. Asfáltico AASHTO M-20			Docificación			Grava	Gravilla	Arena triturada										
Mat. Retenido Tamiz N° 4		2,675	gr/cm ³	46,6	Tipo de asfalto AASHTO M 20			85-100			3/4"	3/8"	N°4									
Mat. Pasa Tamiz N° 4		2,687	gr/cm ³	53,4	P. Especifico Total AASHTO T-228			1,010			% De agregados :			30%	24%	46%						
P. Esp. Agregado Total (Gag.):		2,681	gr/cm ³	100							Origen de agregados :			Material de acopio planta de asfaltos Erika S. R. L.								
N° Golpes:		75	Temperatura de Cmpactacion 130 °C																			
Identificación	ALTURA BRIQUETA (CM)	% De asfalto		PESO BRIQUETA EN ELAIRE (gr)	PESO BRIQUETA EN ELAIRE S.S.S. (gr)	PESO BRIQUETA SUMERGIDA EN AGUA (gr)	VOLUMEN BRIQUETA (cm3)	Densidad de la briqueta			% Vacíos			Estabilidad (Lb)					Lect. Dial	Flujo 1/100	Media	
		Base agregado	Base mezcla					REAL (Dm.)	PROMEDIO (Dm.)	MAXIMA TEORICA (kg/cm3)	MEZCLA (Vv)	AGREGADOS (VAM)	LLENOS DE ASFALTO (RBV)	Lec. Dial	Real	Media	FACTOR DE CORRECCION (ALTURA) mm	Media f.c.				Corregida
1	6,30	4,71	4,50	1185,20	1187,20	677,00	510,20	2,32						88,00	2170,91		1,01			8,00	8,00	
2	6,22	4,71	4,50	1192,50	1194,10	683,20	510,90	2,33						90,00	2220,25		1,04			8,50	8,50	
3	6,33	4,71	4,50	1189,20	1192,60	682,00	510,60	2,33	2,33	2,51	7,08	17,06	58,50	96,00	2368,27	2253,15	1,01	1,02	2293,70	9,50	9,50	8,67
4	6,35	5,26	5,00	1200,00	1198,50	692,90	505,60	2,37						102,00	2516,29		1,00			9,50	9,50	
5	6,39	5,26	5,00	1203,80	1207,50	694,00	513,50	2,34						103,00	2540,96		0,99			10,60	10,60	
6	6,35	5,26	5,00	1197,30	1201,20	691,30	509,90	2,35	2,36	2,49	5,34	16,55	67,75	107,00	2639,63	2565,63	1,00	1,00	2557,93	9,80	9,80	9,97
7	6,29	5,82	5,50	1192,50	1194,10	687,40	506,70	2,35						105,00	2590,29		1,02			11,40	11,40	
8	6,28	5,82	5,50	1199,80	1200,70	695,90	504,80	2,38						105,00	2590,29		1,02			12,40	12,40	
9	6,28	5,82	5,50	1200,60	1202,10	697,00	505,10	2,38	2,37	2,47	4,10	16,51	75,18	108,00	2664,30	2614,96	1,02	1,02	2662,03	12,00	12,00	11,93
10	6,35	6,38	6,00	1217,50	1218,60	706,40	512,20	2,38						101,00	2491,62		1,00			12,90	12,90	
11	6,37	6,38	6,00	1191,40	1193,70	686,40	507,30	2,35						90,00	2220,25		1,00			14,30	14,30	
12	6,40	6,38	6,00	1214,70	1216,40	703,60	512,80	2,37	2,36	2,45	3,59	17,10	79,02	98,00	2417,61	2376,49	0,99	0,99	2362,23	13,00	13,00	13,40
13	6,35	6,95	6,50	1203,30	1204,70	694,30	510,40	2,36						77,00	1899,55		1,00			15,50	15,50	
14	6,47	6,95	6,50	1223,80	1225,10	705,40	519,70	2,35						69,00	1702,19		0,97			16,00	16,00	
15	6,29	6,95	6,50	1186,20	1187,00	683,50	503,50	2,36	2,36	2,44	3,26	17,84	81,74	82,00	2022,90	1874,88	1,02	1,00	1865,51	15,20	15,20	15,57

Fuente: Elaboración propia.

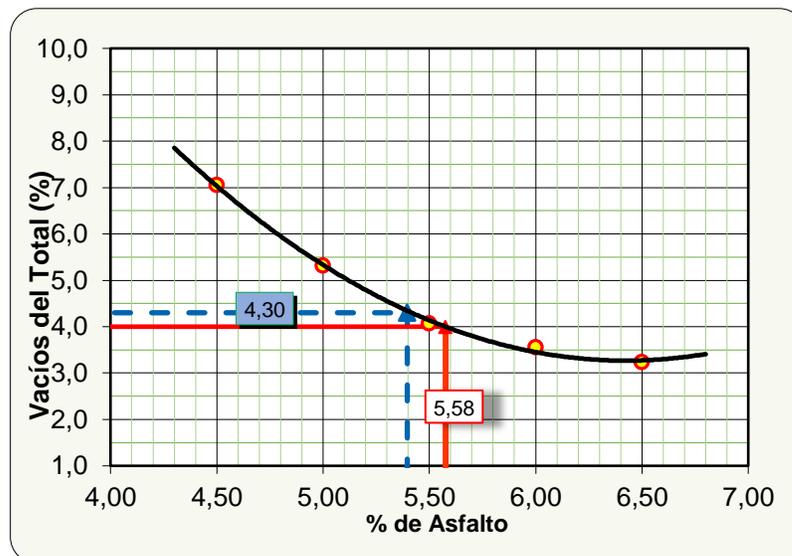
Con los valores obtenidos de la tabla de resultados se procede a graficar las curvas correspondientes a las siguientes relaciones:

Figura 4.22. % de asfalto vs densidad.



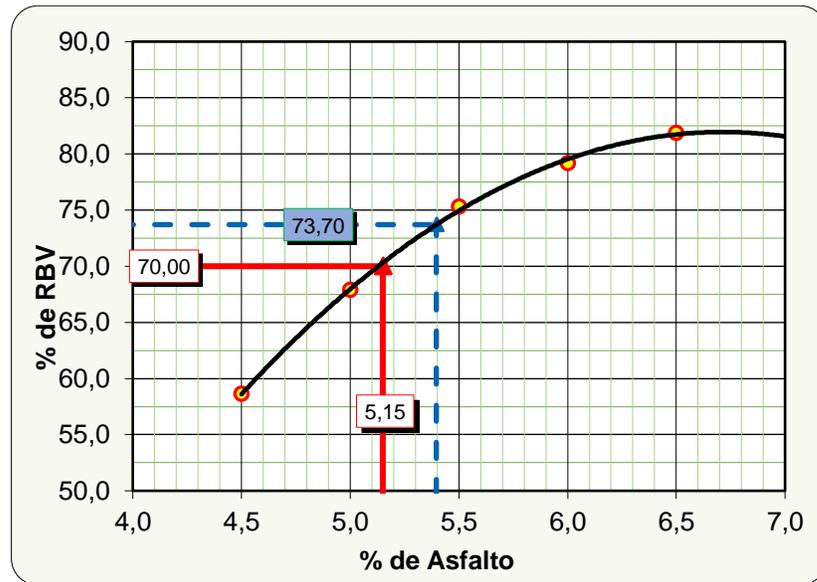
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.23. % de asfalto vs % de vacíos.



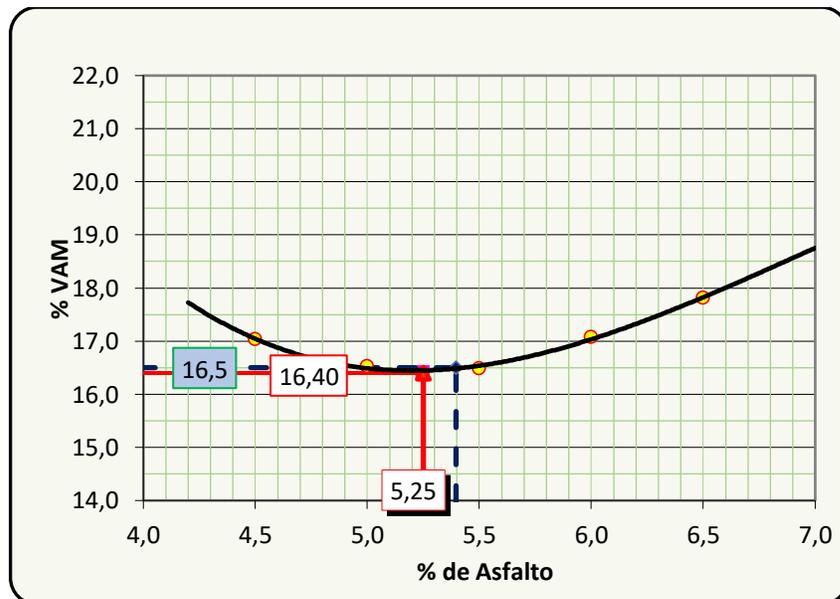
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.24. % de asfalto vs % de vacíos.



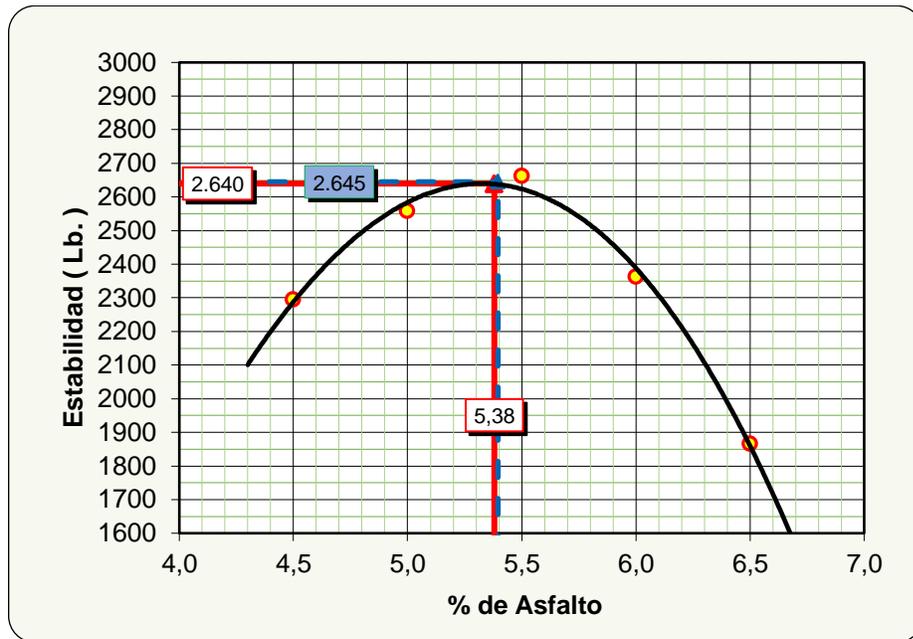
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.25. % de asfalto vs %VAM.



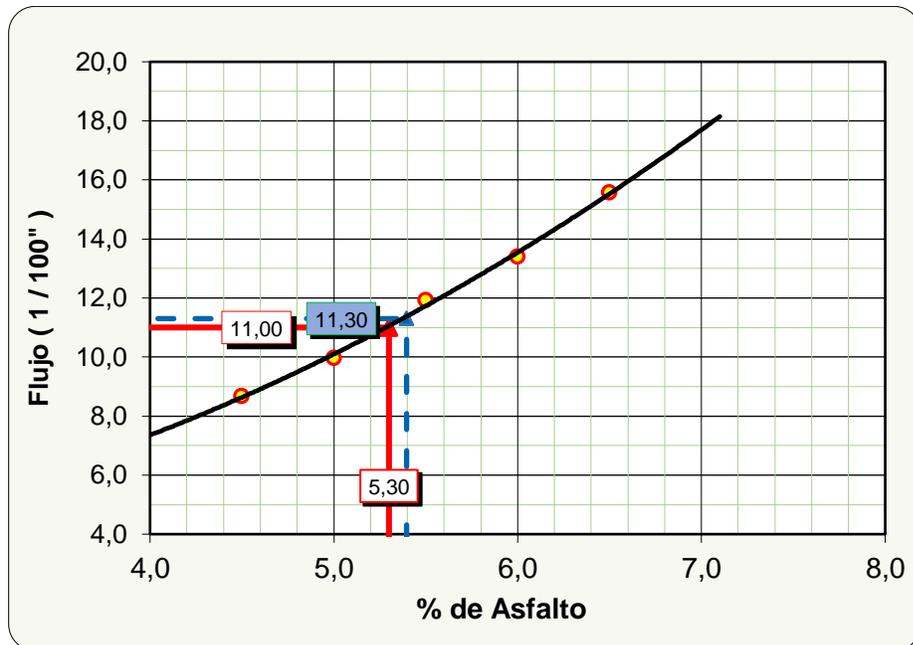
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.26. % de asfalto vs estabilidad



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.27. % de asfalto vs fluencia



Fuente: Elaboración propia.

Con la ayuda de las gráficas podemos definir nuestro contenido óptimo de cemento asfáltico, el criterio para determinar el contenido óptimo es realizando un promedio de los óptimos parciales de cada gráfica.

Tabla 4.28. Resultados del diseño óptimo de la mezcla asfáltica convencional.

Valores				
Características	% parcial de asfalto	Obtenidos de gráficos	Especificaciones técnicas	
Densidad	5,72	2,37	-----	-----
% vacíos	5,58	4,00	3	5
R.B.V.	5,15	70,00	65	75
V.A.M	5,25	16,40		
Estabilidad (lb)	5,38	2639,81	> 1800 Lb.	
Fluencia 1/100"	5,30	11,00	8	14
Promedio (%)	5,40	Determinación del contenido óptimo de asfalto promedio de las graficas		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.29. Resultados del diseño óptimo de la mezcla asfáltica convencional.

Valores obtenidos diseño Marshall				
Características	% de asfalto	Valores con él % óptimo	Especificaciones técnicas	
Densidad	5,40	2,37	-----	-----
% vacíos	5,40	4,30	3	5
R.B.V.	5,40	73,70	65	75
V.A.M	5,40	16,50		
Estabilidad (lb)	5,40	2645,00	> 1800 Lb.	
Fluencia 1/100"	5,40	11,30	8	14
% óptimo de asfalto propuesto			5,40	

Fuente: Elaboración propia.

4.7 DISEÑO DE LA MEZCLAS ASFÁLTICAS CON CONTENIDO ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO

Una vez determinados los contenidos óptimos de cemento asfáltico de cada diseño de las mezclas asfálticas, se elaboró 15 briquetas de cada diseño para realizar un análisis de los resultados.

4.7.1 diseño con % óptimo de la mezcla asfáltica utilizando agregado grueso y fino arcilla expandida (Leca).

Para la dosificación de las briquetas se utiliza la granulometría ya establecida anteriormente la misma que está distribuida de la siguiente manera:

Ponderación de grava	11%
Ponderación de gravilla	28%
Ponderación de arena	61%

El porcentaje óptimo de cemento asfáltico obtenido es de 7.5%.

Tabla 4.30. Dosificación con el contenido óptimo de cemento asfáltico 7,57%.

Porcentaje del cemento asfáltico (%)	7,57
Porcentaje de agregado (%)	92,40
Peso del cemento asfáltico (gr)	60,56
Peso de grava (gr)	81,34
Peso de gravilla (gr)	207,04
Peso de arena (gr)	451,06
Peso total de la briketa (gr)	800,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.31. Datos obtenidos del ensayo Marshal con el contenido óptimo de cemento asfáltico 7,57%.

% de asfalto	Identificación	Altura de probeta (cm)	Peso seco (gr)	Peso Sat. Sup. seca (gr)	Peso Sumergido en agua (gr)	Lectura dial estabilidad	Lectura dial fluencia
7,57	1	7,17	812,77	817,33	254,00	1218,00	280,00
7,57	2	7,21	798,45	804,47	251,00	1090,00	240,00
7,57	3	7,09	803,53	808,22	252,00	1152,00	260,00
7,57	4	7,17	786,00	791,10	245,00	1210,00	250,00
7,57	5	7,21	794,10	799,50	249,00	1176,00	240,00
7,57	6	6,42	795,80	799,30	247,00	1142,00	265,00
7,57	7	6,85	792,90	800,00	252,00	1144,00	230,00
7,57	8	6,89	790,50	797,30	250,00	1118,00	270,00
7,57	9	6,93	790,10	796,80	248,00	1121,00	250,00
7,57	10	6,90	783,10	787,30	238,00	1145,00	240,00
7,57	11	6,92	789,50	790,70	242,00	1108,00	290,00
7,57	12	6,92	793,00	795,80	247,00	1097,00	300,00
7,57	13	7,08	812,77	817,33	255,00	1191,00	270,00
7,57	14	6,83	798,45	804,47	250,00	1125,00	240,00
7,57	15	6,91	803,53	808,22	252,00	1092,00	260,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.32. Resultados de las propiedades mecánicas con el contenido óptimo de cemento asfáltico 7,57%.

% de asfalto	Identificación	Altura de probeta (cm)	Densidad real (gr/cm ³)	% vacíos en la mezcla (Vv)	% vacíos de agregado (VAM)	% vacíos llenos de asfalto (RBV)	Estabilidad corregida (lb)	Fluencia 1/100
7,57	1	7,17	1,44	3,93	14,75	73,33	2810,40	11,02
7,57	2	7,21	1,44				2173,26	9,45
7,57	3	7,09	1,44				2594,47	10,24
7,57	4	7,17	1,44	4,10	14,90	72,49	2725,72	9,84
7,57	5	7,21	1,44				2213,13	9,45
7,57	6	6,42	1,44				3003,46	10,43
7,57	7	6,85	1,45	3,91	14,73	73,43	2833,49	9,06
7,57	8	6,89	1,44				2937,30	10,63
7,57	9	6,93	1,44				2848,88	9,84
7,57	10	6,90	1,43	4,39	15,16	71,03	2687,73	9,45
7,57	11	6,92	1,44				2589,39	11,42
7,57	12	6,92	1,44				2563,52	11,81
7,57	13	7,08	1,45	3,94	14,75	73,33	2688,56	10,63
7,57	14	6,83	1,44				2679,95	9,45
7,57	15	6,91	1,44				2321,41	10,24
Promedio			1,44	4,068	14,87	72,65	2644,71	10,19

Fuente: Elaboración propia.

4.7.2 diseño con % óptimo de la mezcla asfáltica utilizando agregado grueso arcilla expandida (Leca) y fino arena triturada (Erika)

Para la dosificación de las briquetas se utiliza la granulometría ya establecida anteriormente la misma que está distribuida de la siguiente manera:

Ponderación de grava	12%
Ponderación de gravilla	34%
Ponderación de arena	54%

El porcentaje óptimo de cemento asfáltico obtenido es de 7.28%.

Tabla 4.33. Resultados de las propiedades mecánicas con el contenido óptimo de cemento asfáltico 7,57%.

Porcentaje del cemento asfáltico (%)	7,28%
Porcentaje de agregado (%)	92,7%
Peso del cemento asfáltico (gr)	72,80
Peso de grava (gr)	61,20
Peso de gravilla (gr)	219,75
Peso de arena (gr)	646,26
Peso total de la briketa (gr)	1000,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.34. Datos obtenidos del ensayo Marshal con el contenido óptimo de cemento asfáltico 7,28%.

% de asfalto	Identificación	Altura de probeta (cm)	Peso seco (gr)	Peso Sat. Sup. seca (gr)	Peso Sumergido en agua (gr)	Lectura dial estabilidad	Lectura dial fluencia
7,28	1	7,28	975,28	978,23	531,23	1289,00	220,00
7,28	2	7,28	996,91	999,95	541,95	1317,00	280,00
7,28	3	7,28	991,59	994,11	538,11	1334,00	290,00
7,57	4	7,28	987,60	988,00	534,00	1275,00	250,00
7,57	5	7,28	991,90	995,10	543,10	1290,00	230,00
7,57	6	7,28	981,30	984,40	534,40	1321,00	260,00
7,57	7	7,28	986,60	987,20	537,20	1290,00	270,00
7,57	8	7,28	986,20	986,80	533,80	1343,00	230,00
7,57	9	7,28	990,50	992,10	538,10	1292,00	250,00
7,57	10	7,28	995,80	997,00	538,00	1414,00	250,00
7,57	11	7,28	997,30	999,70	539,70	1323,00	240,00
7,57	12	7,28	990,30	992,50	541,50	1359,00	280,00
7,57	13	7,28	992,70	994,70	538,70	1369,00	250,00
7,57	14	7,28	989,30	991,20	537,20	1413,00	260,00
7,57	15	7,28	981,20	984,90	532,90	1351,00	260,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.35. Resultados de las propiedades mecánicas con el contenido óptimo de cemento asfáltico 7,28%.

% de asfalto	Identificación	Altura de probeta (cm)	Densidad real (gr/cm ³)	% vacíos en la mezcla (Vv)	% vacíos de agregado (VAM)	% vacíos llenos de asfalto (RBV)	Estabilidad corregida (lb)	Fluencia 1/100
7,28	1	6,78	1,84	4,40	17,19	74,43	3116,15	8,66
7,28	2	6,82	1,84				3148,92	11,02
7,28	3	6,86	1,84				3160,82	11,42
7,28	4	6,83	1,85	5,24	17,93	70,75	3039,44	9,84
7,28	5	6,85	1,83				3062,60	9,06
7,28	6	6,81	1,84				3167,38	10,24
7,28	7	6,85	1,84	4,28	17,09	74,94	3062,60	10,63
7,28	8	6,82	1,85				3211,40	9,06
7,28	9	6,98	1,84				2983,28	9,84
7,28	10	6,98	1,85	4,22	17,03	75,25	3266,46	9,84
7,28	11	7,07	1,85				2994,98	9,45
7,28	12	6,93	1,83				3172,66	11,02
7,28	13	7,13	1,84	4,27	17,08	75,00	3058,56	9,84
7,28	14	7,02	1,84				3235,36	10,24
7,28	15	6,98	1,84				3120,23	10,24
Promedio			1,84	4,49	17,27	74,04	3120,05	10,03

Fuente: Elaboración propia.

4.7.3 diseño con % óptimo de la mezcla asfáltica con agregado arcilla expandida (Leca) granulometría comercial.

Para la dosificación de las briquetas se utiliza la granulometría ya establecida anteriormente la misma que está distribuida con 43% de grava y 57% de arena

El porcentaje óptimo de cemento asfáltico obtenido es de 6,17%.

Tabla 4.36. Dosificación con el contenido óptimo de cemento asfáltico 6,17%.

Porcentaje del cemento asfáltico (%)	6,17
Porcentaje de agregado (%)	93,80
Peso del cemento asfáltico (gr)	41,65
Peso de grava (gr)	272,34
Peso de gravilla (gr)	0,00
Peso de arena (gr)	361,01
Peso total de la briqueta (gr)	675,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.37. Datos obtenidos del ensayo Marshal con el contenido óptimo de cemento asfáltico 6,17%.

% de asfalto	Identificación	Altura de probeta (cm)	Peso seco (gr)	Peso Sat. Sup. seca (gr)	Peso Sumergido en agua (gr)	Lectura dial estabilidad	Lectura dial fluencia
6,17	1	6,79	598,22	625,10	128,00	474,00	160
6,17	2	6,61	607,57	636,19	138,00	320,00	160
6,17	3	6,47	603,57	629,24	133,00	446,00	170
6,17	4	6,59	668,00	706,90	147,00	445,00	150
6,17	5	6,67	675,10	715,00	152,00	410,00	160
6,17	6	6,64	678,10	717,30	160,00	432,00	160

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.38. Resultados de las propiedades mecánicas con el contenido óptimo de cemento asfáltico 6,17%.

% de asfalto	Identificación	Altura de probeta (cm)	Densidad real (gr/cm ³)	% vacíos en la mezcla (Vv)	% vacíos de agregado (VAM)	% vacíos llenos de asfalto (RBV)	Estabilidad corregida (lb)	Fluencia 1/100
6,17	1	6,79	1,20	19,66	27,39	27,39	1132,35	6,30
6,17	2	6,61	1,22				793,96	6,30
6,17	3	6,47	1,22				1147,28	6,69
6,17	4	6,59	1,19	20,33	27,68	26,56	1115,17	5,91
6,17	5	6,67	1,20				1009,82	6,30
6,17	6	6,64	1,22				1071,44	6,30
Promedio		6,62	1,21	19,99	27,38	26,98	1077,96	6,30

Fuente: Elaboración propia.

4.7.4 diseño con % óptimo de la mezcla asfáltica convencionales con agregados pétreos

Para la dosificación de las briquetas se utiliza la granulometría ya establecida anteriormente la misma que está distribuida con 12% de grava 34% de gravilla y 54% de arena.

El porcentaje óptimo de cemento asfáltico obtenido es de 5,40%.

Tabla 4.39. Dosificación con el contenido óptimo de cemento asfáltico 5,40%.

Porcentaje del cemento asfáltico (%)	5,40
Porcentaje de agregado (%)	94,60
Peso del cemento asfáltico (gr)	64,80
Peso de grava (gr)	340,56
Peso de gravilla (gr)	272,45
Peso de arena (gr)	522,19
Peso total de la briketa (gr)	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.40. Datos obtenidos del ensayo Marshal con el contenido óptimo de cemento asfáltico 5,40%.

% de asfalto	Identificación	Altura de probeta (cm)	Peso seco (gr)	Peso Sat. Sup. seca (gr)	Peso Sumergido en agua (gr)	Lectura dial estabilidad	Lectura dial fluencia
5,40	1	6,22	1169,20	1170,60	675,60	941,22	280
5,40	2	6,23	1172,70	1174,30	680,20	959,54	260
5,40	3	6,20	1166,50	1167,80	673,20	968,70	300
5,40	4	6,25	1175,60	1176,20	676,40	922,89	325
5,40	5	6,24	1170,20	1172,60	678,00	987,02	280
5,40	6	6,26	1178,50	1179,30	680,20	959,54	310
5,40	7	6,40	1191,70	1192,00	685,50	904,57	270
5,40	8	6,32	1189,00	1190,20	689,00	977,86	300
5,40	9	6,35	1193,20	1194,00	690,20	922,89	290
5,40	10	6,28	1193,20	1193,60	688,00	996,18	260
5,40	11	6,36	1196,00	1196,50	692,10	1005,35	290
5,40	12	6,31	1190,20	1190,80	688,00	1014,51	300
5,40	13	6,40	1196,20	1197,10	692,00	996,18	300
5,40	14	6,32	1198,00	1198,80	691,10	977,86	280
5,40	15	6,27	1190,00	1191,20	688,10	977,86	275

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.41. Resultados de las propiedades mecánicas con el contenido óptimo de cemento asfáltico 5,40%.

% de asfalto	Identificación	Altura de probeta (cm)	Densidad real (gr/cm ³)	% vacíos en la mezcla (Vv)	% vacíos de agregado (VAM)	% vacíos llenos de asfalto (RBV)	Estabilidad corregida (lb)	Fluencia I/100
5,40	1	6,22	2,36	4,39	16,54	73,45	2604,36	11,02
5,40	2	6,23	2,37				2647,73	10,24
5,40	3	6,20	2,36				2693,91	11,81
5,40	4	6,25	2,35	4,59	16,72	72,55	2533,55	12,80
5,40	5	6,24	2,37				2716,18	11,02
5,40	6	6,26	2,36				2627,20	12,20
5,40	7	6,40	2,35	4,40	16,55	73,43	2387,39	10,63
5,40	8	6,32	2,37				2635,88	11,81
5,40	9	6,35	2,37				2466,95	11,42
5,40	10	6,28	2,36	4,33	16,49	73,73	2714,92	10,24
5,40	11	6,36	2,37				2682,25	11,42
5,40	12	6,31	2,37				2743,49	11,81
5,40	13	6,40	2,37	4,40	16,55	73,41	2631,00	11,81
5,40	14	6,32	2,36				2635,88	11,02
5,40	15	6,27	2,37				2669,88	10,83
Promedio			2,364	4,426	16,574	73,298	2626,038	11,339

Fuente: Elaboración propia.

4.8 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Estadística descriptiva

Tabla 4.42. Estadística descriptiva para la mezcla asfáltica con agregado grueso y fino (Leca).

Variable	Media	Mediana	Moda	Desv. est.	Varianza
Estabilidad (Lb)	2623,80	2641,85	*	36,54	1335,36
Flujo (1/100")	10,14	10,04	9,45	0,80	0,64
Densidad (gr/cm ³)	1,44	1,44	1,44	0,01	0,00
% Vacíos (%)	4,07	3,94	4,10	0,20	0,04
% VAM (%)	14,87	14,75	14,90	0,17	0,03
% RBV (%)	72,65	73,33	72,49	0,99	0,99

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.43. Estadística descriptiva para la mezcla asfáltica con agregado grueso (Leca) y agregado fino (Erika).

Variable	Media	Mediana	Moda	Desv. est.	Varianza
Estabilidad (Lb)	3120,06	3138,05	*	29,59	875,59
Flujo (1/100")	10,12	10,04	9,84	0,71	0,51
Densidad (gr/cm ³)	1,84	1,84	*	0,01	0,00
% Vacíos (%)	4,49	4,28	5,24	0,43	0,18
% VAM (%)	17,27	17,09	17,93	0,37	0,14
% RBV (%)	74,04	74,94	70,75	1,88	3,53

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.44. Estadística descriptiva para la mezcla asfáltica con agregado (Leca) granulometría comercial.

Variable	Media	Mediana	Moda	Desv. est.	Varianza
Estabilidad (Lb)	1077,96	1093,31	*	65,24	4256,01
Flujo (1/100")	6,30	6,30	6,30	0,25	0,06
Densidad (gr/cm ³)	1,21	1,21	*	0,01	0,00
% Vacíos (%)	19,99	19,99	*	0,47	0,22
% VAM (%)	27,38	27,38	*	0,43	0,18
% RBV (%)	26,98	26,98	*	0,58	0,34

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.45. Estadística descriptiva para la mezcla asfáltica con agregado pétreo convencional (Erika).

Variable	Media	Mediana	Moda	Desv. est.	Varianza
Estabilidad (Lb)	2626,04	2635,88	2635,88	96,91	9391,95
Flujo (1/100")	11,34	11,42	11,81	0,72	0,52
Densidad (gr/cm ³)	2,36	2,37	*	0,01	0,00
% Vacíos (%)	4,42	4,40	*	0,10	0,01
% VAM (%)	16,57	16,55	*	0,08	0,01
% RBV (%)	73,31	73,43	*	0,45	0,20

Fuente: Elaboración propia.

4.9 ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO COMO AGREGADO ARCILLA EXPANDIDA TÉRMICAMENTE.

Para el análisis de resultados se tomará los valores medios de cada una de las variables a analizar, se realizará para cada uno de las propiedades y características de las diferentes mezclas que se diseñaron mismas que serán comparadas cada una de ellas.

Tabla 4.46. Resumen de resultados de las características mecánicas de las mezclas con el porcentaje óptimo de cemento asfáltico.

Identificación	% óptimo de asfalto	Densidad real (gr/cm ³)	% vacíos en la mezcla (vv)	% vacíos de agregado (vam)	% vacíos llenos de asfalto (rbv)	Estabilidad corregida (lb)	Fluencia 1/100
Mezcla con agregado convencional (Erika)	5,40	2,36	4,42	16,57	73,31	2626,04	11,34
Mezcla con agregado (Leca) granulometría comercial	6,62	1,21	19,99	27,38	26,98	1077,96	6,30
Mezcla con agregado grueso (Leca) y agregado fino (Erika)	7,28	1,84	4,49	17,27	74,04	3120,06	10,01
Mezcla con agregado grueso y fino (Leca)	7,57	1,44	4,07	14,87	72,65	2623,8	10,14

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados calculados de los porcentajes óptimos de cemento asfáltico son porcentajes en peso respecto al pesos de la briqueta de cada diseño, debido a la diferencia de densidades de las mezclas estudiadas es necesario calcular los porcentajes en volumen para poder compararlos con respecto a una mezcla convencional.

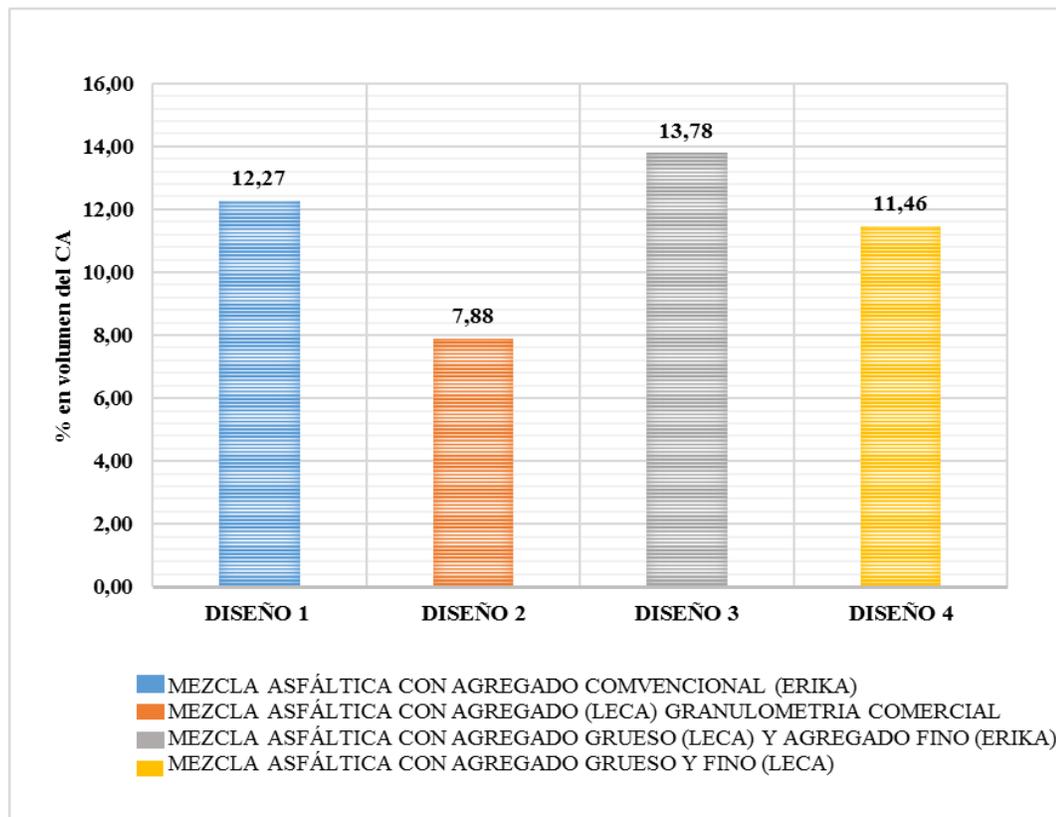
Los porcentajes en volumen de cemento asfáltico de las diferentes mezclas se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4.47. Porcentajes en volumen de cemento asfáltico de las diferentes mezclas

Identificación	volumen briqueta (cm ³)	Peso de briqueta (gr)	% en peso del C.A.	Peso del C.A. (gr)	% en volumen del C.A.
Mezcla con agregado convencional (Erika)	523	1200	5,40	64,80	12,27
Mezcla con agregado (Leca) granulometría comercial	523	675	6,62	41,65	7,88
Mezcla con agregado grueso (Leca) y agregado fino (Erika)	523	1000	7,28	72,80	13,78
Mezcla con agregado grueso y fino (Leca)	523	800	7,57	60,56	11,46

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.28. Comparación de % óptimos de cemento asfáltico en volumen.



Fuente: Elaboración propia.

Análisis de resultados:

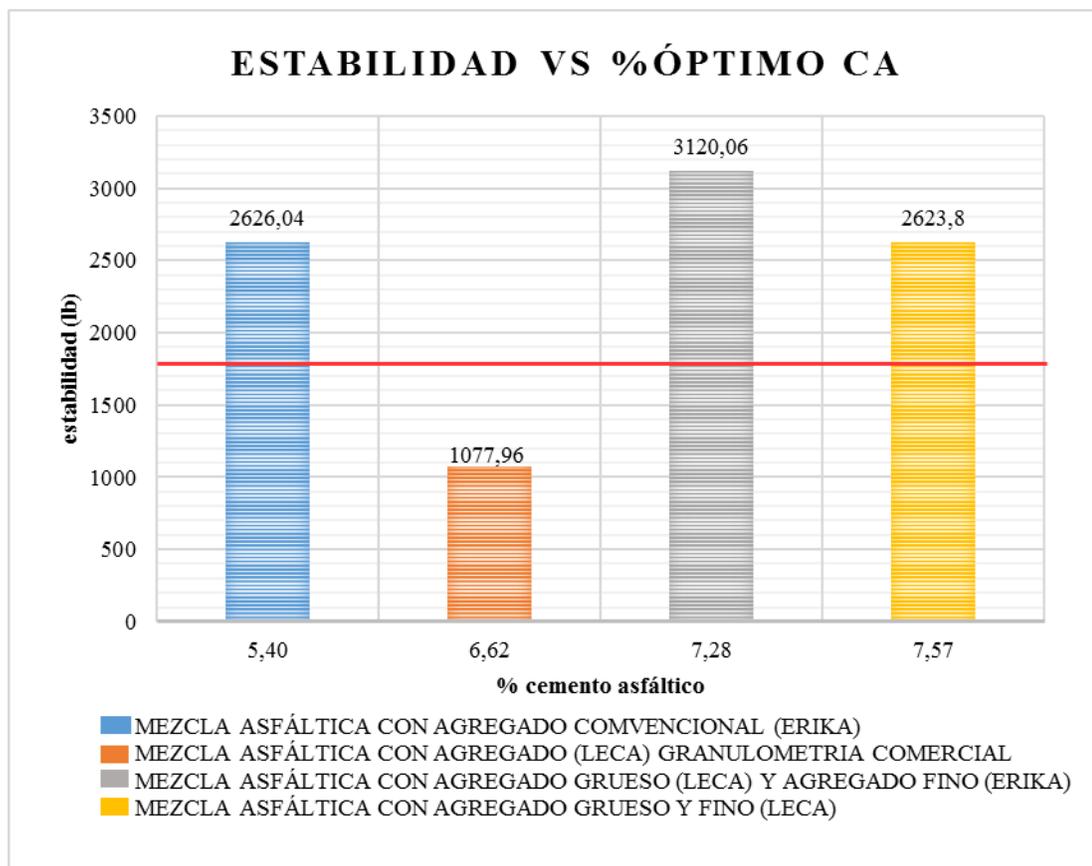
Como se puede observar en la figura 4.28 los porcentajes óptimos de las mezclas asfálticas donde se utilizó arcilla expandida muestran una variación con respecto a la mezcla asfáltica convencional.

Estas variaciones son debido a que cierto porcentaje del asfalto ha sido absorbido por el agregado ya que una de sus características particulares de este agregado artificial es la porosidad por lo tanto tiene mayor capacidad de absorción haciendo que los porcentajes óptimos de cemento asfáltico sean mayores con respecto a una mezcla asfáltica convencional.

En el diseño de mezcla asfáltica donde se utilizó agregado leca con su granulometría comercial el contenido óptimo de cemento asfáltico es muy bajo, esto debido a que su granulometría no cumple con ninguna especificación por lo que para su utilización necesariamente deberá ser graduada.

4.9.1 Estabilidad

Figura 4.29. Comparación de estabilidades.



Fuente: Elaboración propia.

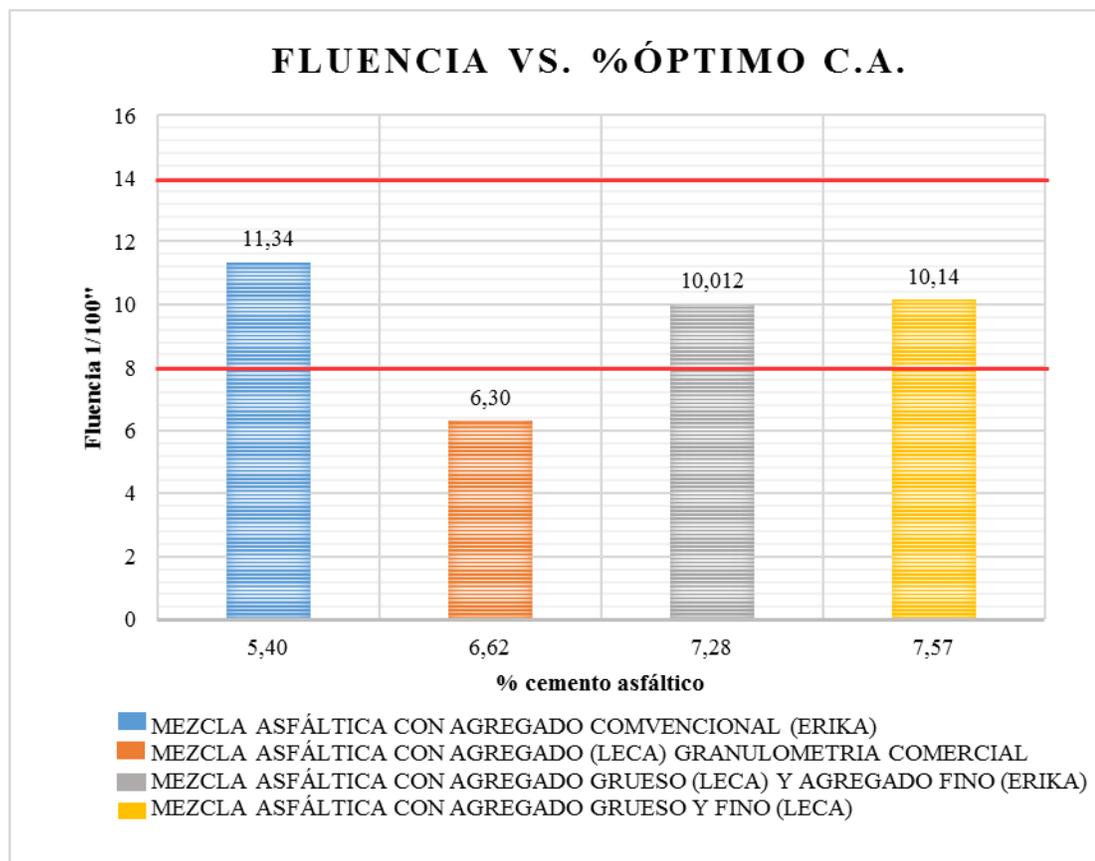
Análisis de resultados:

En el gráfico comparativo podemos observar el comportamiento de la estabilidad para cada uno de las mezclas asfálticas, obteniendo resultados satisfactorios debido a que cumplen las especificaciones para las que fue diseñada, en la mezcla asfáltica donde se combinó agregado grueso arcilla expandida Leca y agregado fino arena triturada nos da un 15,8% más que la obtenida de la mezcla convencional, evidenciando que este agregado artificial es una buena alternativa en obras viales. Las razones de las ventajas son precisamente por la textura superficial particular que presenta este agregado artificial haciendo que haya una mejor adherencia entre agregado y cemento asfáltico resultado de esto tenemos en uno de los diseños estabilidades superiores a las de las mezcla convencional.

El diseño de mezcla donde se utilizó agregado leca con su granulometría comercial no alcanza la estabilidad mínima, esto debido a que su granulometría no cumple con ninguna especificación por lo que para su utilización necesariamente deberá ser graduada.

4.9.2 Fluencia

Figura 4.30. Comparación de fluencias



Fuente: Elaboración propia.

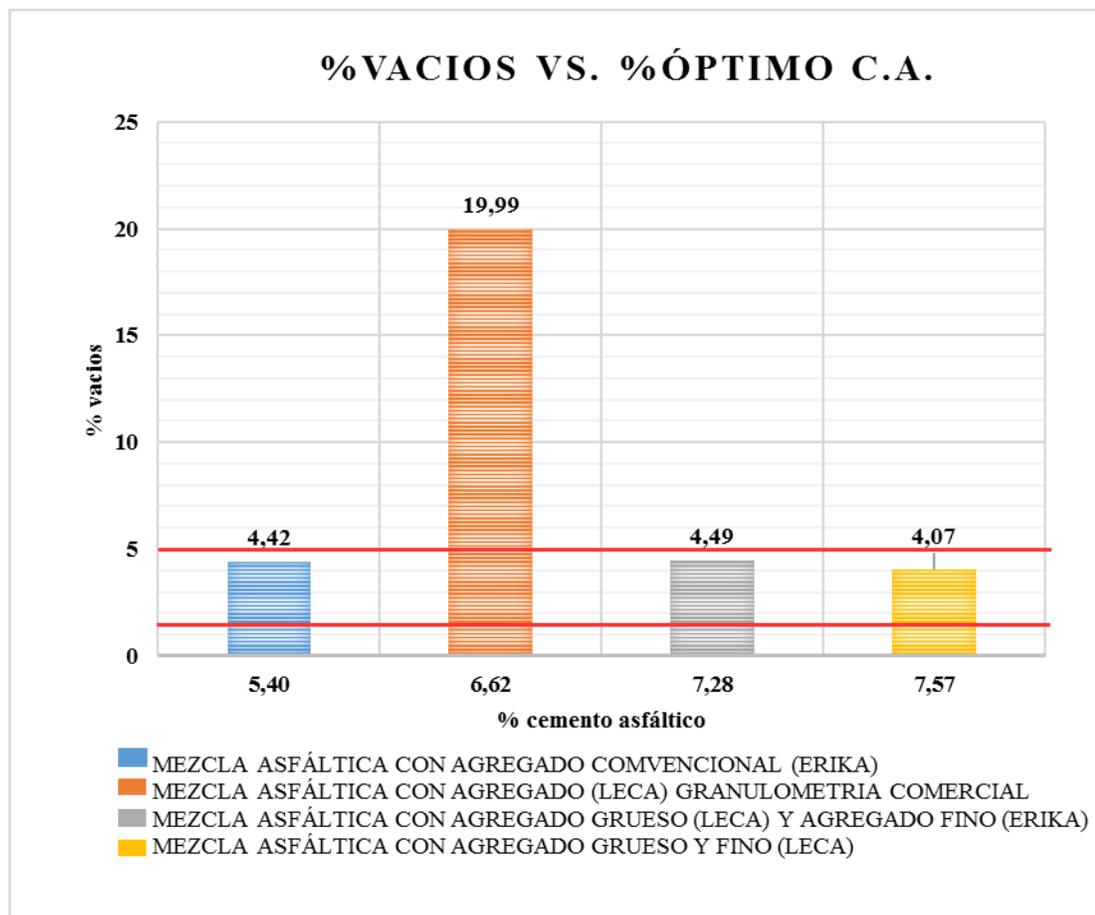
Análisis de resultados:

Se observa que la fluencia obtenida para dos diseños donde se utilizó arcilla expandida son más bajas que las obtenidas en la mezcla convencional, no obstante, las mismas están dentro de los límites establecidos y cumplen las especificaciones para las que fue diseñada, estos resultados pueden darse debido a que cierto porcentaje del asfalto ha sido absorbido por el agregado ya que el mismo tiene una alta porosidad haciendo que reduzca su capacidad de flexibilidad.

El resultado del diseño de mezcla donde se utilizó agregado Leca con su granulometría comercial no entra dentro los límites establecidos, esto debido a que su granulometría no cumple con ninguna especificación por lo que para su utilización necesariamente deberá ser graduada.

4.9.3 % de vacíos

Figura 4.31. comparación del % de vacíos.



Fuente: Elaboración propia.

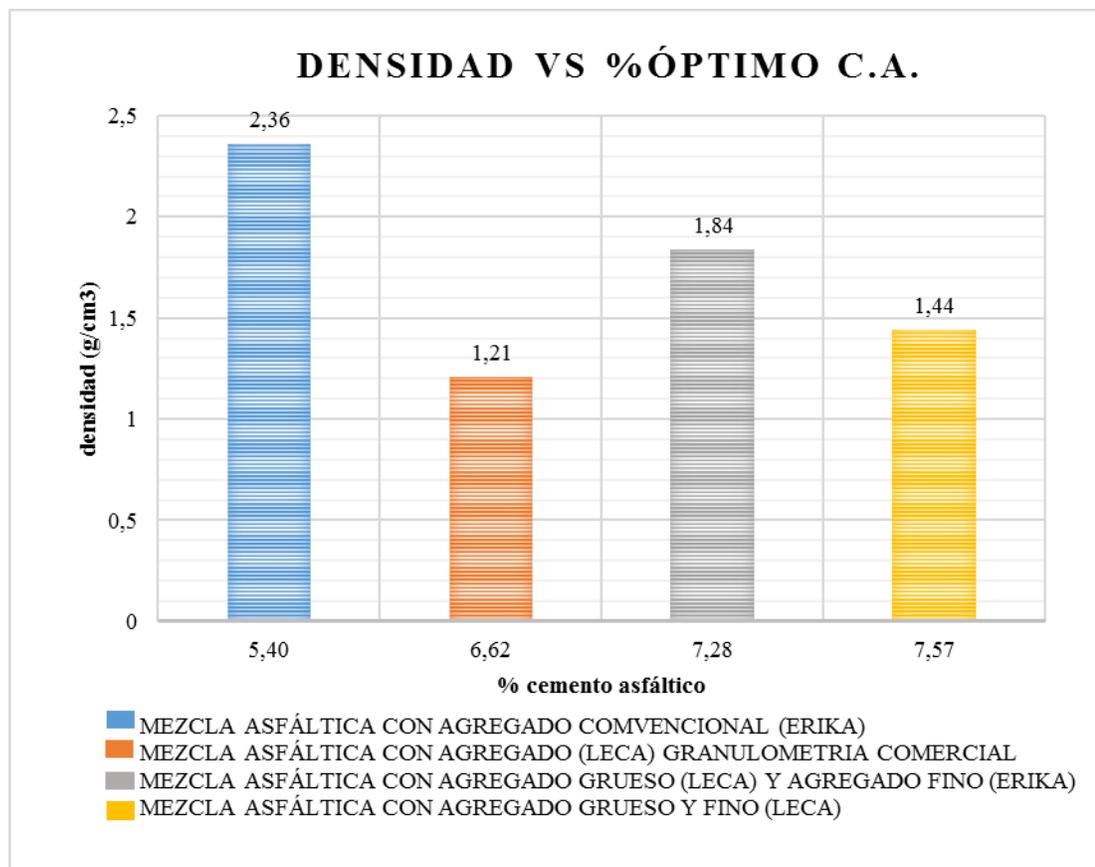
Análisis de resultados:

Se observa que el porcentaje de vacíos obtenido para dos diseños donde se utilizó arcilla expandida cumple las especificaciones para las que fue diseñada, esta característica es de mucha importancia ya que tiene relación con la duración de un pavimento asfáltico.

El resultado diseño de mezcla donde se utilizó agregado leca con su granulometría comercial no entra dentro los límites establecidos, esto debido a que su granulometría no cumple con ninguna especificación por lo que para su utilización necesariamente deberá ser graduada.

4.9.4 Densidad

Figura 4.32. comparación del densidades.



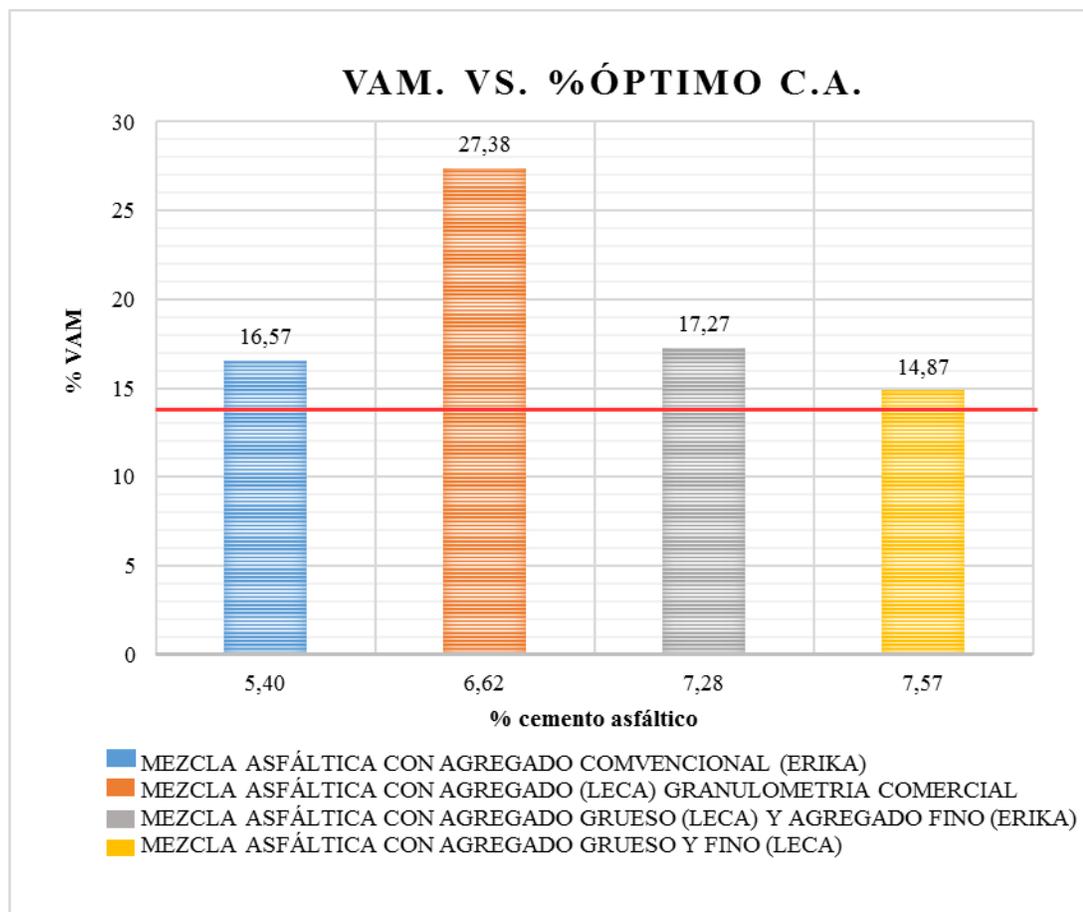
Fuente: Elaboración propia.

Análisis de resultados:

Una de las características más sobresalientes de la arcilla expandida es su baja densidad situación que se ve reflejada en los resultados de la densidad en las mezclas donde se utilizó este agregado artificial, siendo estos considerablemente más bajas con respecto a la mezcla con agregado convencional.

4.9.5 VAM

Figura 4.33. % comparación de VAM.



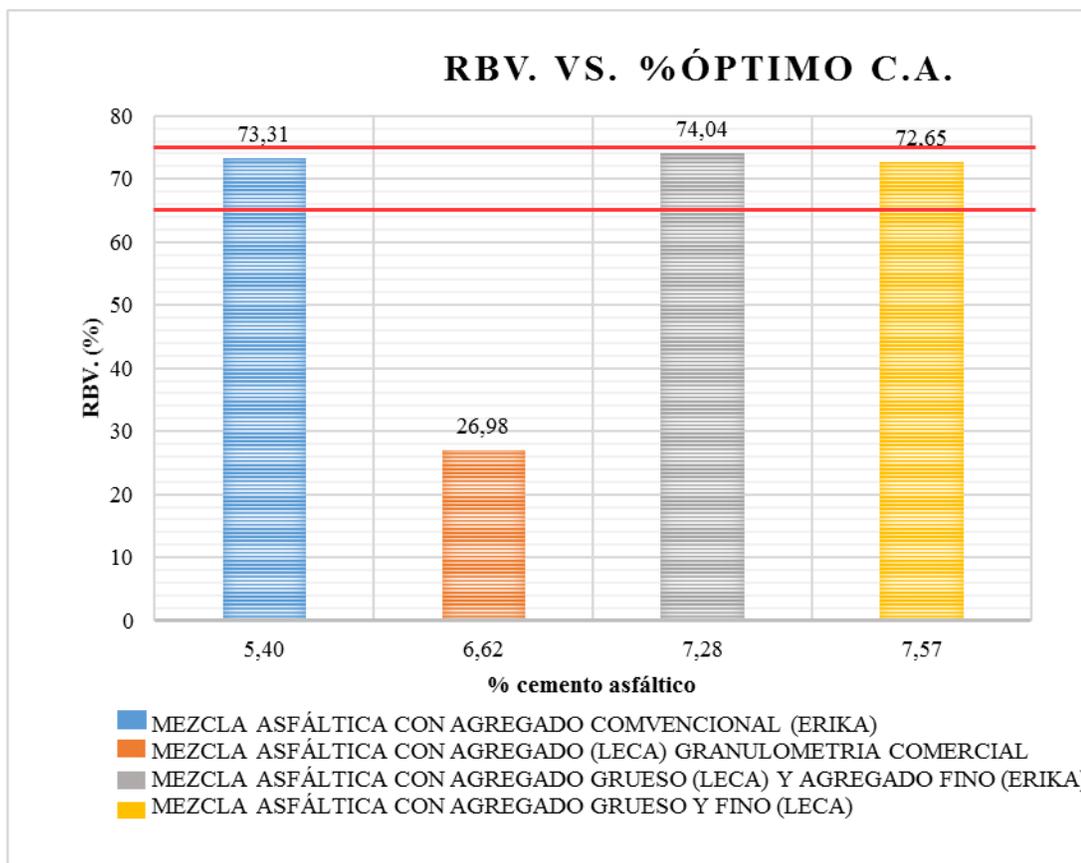
Fuente: Elaboración propia.

Análisis de resultados:

Se observa que el VAM obtenido para dos diseños donde se utilizó arcilla expandida cumple las especificaciones para las que fue diseñada, el resultado diseño de mezcla donde se utilizó agregado leca con su granulometría comercial no entra dentro los límites establecidos, esto debido a que su granulometría no cumple con ninguna especificación por lo que para su utilización de este agregado necesariamente deberá ser graduada.

4.9.6 RBV

Figura 4.34. Comparación de RBV.



Fuente: Elaboración propia.

Análisis de resultados:

Se observa que el RBV obtenido para dos diseños donde se utilizó arcilla expandida cumple las especificaciones para las que fue diseñada, el resultado del diseño de mezcla donde se utilizó agregado leca con su granulometría comercial no entra dentro los límites establecidos, esto debido a que su granulometría no cumple con ninguna especificación por lo que para su utilización de este agregado necesariamente deberá ser graduada.

4.10 ANÁLISIS DE PRECIOS DE PRODUCCIÓN PARA LAS DIFERENTES MEZCLAS ASFÁLTICAS

Es muy importante tener en cuenta que el precio de producción es uno de los factores más relevantes a considerar en los proyectos de ingeniería, por lo tanto, mientras más eficiente sea la labor de estas, menos recursos se invertirán en su producción y a su vez el precio final será menor.

Para la presente investigación se analizará los precios de producción para las diferentes mezclas asfálticas.

4.10.1 Análisis del precio de producción para la mezcla asfáltica convencional

Tabla 4.48. Dosificación para la mezcla asfáltica convencional.

Dosificación de mezcla asfáltica convencional	
Materiales	Porcentaje
Grava 1/2"	28,39
Grava de 3/8"	22,71
Arena triturada	43,53
Cemento asfáltico	5,40

Fuente: Elaboración propia.

El peso unitario estandarizado para el cálculo de dosificaciones = 2250 kg/m³.

Tabla 4.49. Dosificación para 1 m³ de la mezcla asfáltica convencional.

Dosificación para un metro cúbico				
Materiales	Peso (Kg)	Porcentaje (%)	Peso esp. (Kg/m³)	Volumen (m³)
cemento asfáltico	120,83	5,40	1010,00	
Grava de 1/2"	638,75	28,39	2675,00	0,24
Grava de 3/8"	511,00	22,71	2675,00	0,19
Arena triturada	979,42	43,53	2697,00	0,36

Fuente: Elaboración propia.

Se realizó un cálculo de los precios de producción para 1m³ de la mezcla asfáltica convencional, a continuación, se muestra los precios unitarios.

Tabla 4.50. Precio de producción para 1 m³ de la mezcla asfáltica convencional

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
Proyecto de Grado				Actividad N°	1.000
Actividad : Carpeta de concreto asfáltico 0% de polvo de roca			Cantidad :	1.00	
Unidad : m3			Moneda .	Bs	
Descripción	Unidad	Cantidad o rendimiento	Precio unitario	Costo total	
1 Materiales					
1	Grava de 3/4"	m ³	0.239	152.000	36.328
2	Grava de 3/8"	m ³	0.191	152.000	29.032
3	Arena triturada	m ³	0.363	145.000	52.635
4	Cemento asfáltico	kg	120.830	9.000	1087.470
5	Diessel	lt	18.000	3.740	67.320
Total materiales					1272.785
2 Mano de obra					
1	Ayudante de operador	hr	0.028	16.000	0.448
2	Capataz	hr	1.800	25.000	45.000
3	Operador	hr	0.820	20.000	16.402
4	Operador de equipo liviano	hr	0.082	18.000	1.476
5	Operador de planta	hr	0.090	23.190	2.087
6	Obrero	hr	0.072	12.070	0.869
7	Chofer	hr	0.001	18.000	0.022
Sub total mano de obra					66.304
Cargas sociales = (55% - 71.18%) del sub total M. O.				65.000%	43.097
Impuestos IVA M.O. = % (del sub total de M. O. + cargas sociales)				14.940%	16.345
Total mano de obra					125.746
3 Equipo, maquinaria y herramientas					
1	Compactador liso pata de cabra	hr	0.035	303.850	10.635
2	Distribuidor de agregados autop	hr	0.028	455.030	12.741
3	Esoba mecanica autop	hr	0.028	71.550	2.003
4	Planta calentamiento de asfalto	hr	0.090	965.230	86.871
5	Rodillo neumatico T sp1000	hr	0.084	332.810	27.956
6	Terminadora de asfalto	hr	0.075	669.060	50.180
7	Cargador frontal de ruedas=950m ³	hr	0.0001	421.290	0.042
8	Volqueta=12 m ³	hr	0.001	227.870	0.273
Herramientas = % de la mano de obra				5.000%	6.287
Total eq, maq. y herr.					196.988
4 Gastos generales y administrativos					
Gastos generales = % (1+2+3)				10.000%	159.552
5 Utilidad					
Utilidad = % (1+2+3+4)				10.000%	175.507
6 Impuestos					
Impuestos I. T. = % (1+2+3+4+5)				3.090%	59.655
Total precio unitario					1990.233

Fuente: Elaboración propia.

4.10.2 Análisis del precio de producción para la mezcla asfáltica con agregado grueso y fino arcilla expandida (Leca)

Tabla 4.51. Dosificación para la mezcla asfáltica con agregado grueso y fino arcilla expandida (Leca).

Dosificación de mezcla asfáltica con agregado grueso y fino (Leca)	
Materiales	Porcentaje
cemento asfáltico	7,57
Grava arcilla expandida (Leca)de 1/2"	10,17
Grava arcilla expandida (Leca)de 3/8"	25,88
Arena arcilla expandida (Leca)	56,38

Fuente: Elaboración propia.

El peso unitario estandarizado para el cálculo de dosificaciones = 1440 kg/m³.

Tabla 4.52. Dosificación para 1 m³ de la mezcla asfáltica con agregado grueso y fino arcilla expandida (Leca).

Dosificación de mezcla asfáltica con agregado grueso y fino (Leca)				
Materiales	Peso (Kg)	Porcentaje	Peso esp. (Kg/m ³)	Volumen (m ³)
cemento asfáltico	109,00	7,57	1010,00	0,07
Grava arcilla expandida (Leca)de 1/2"	146,40	10,17	1540,00	0,10
Grava arcilla expandida (Leca)de 3/8"	372,67	25,88	1540,00	0,25
Arena arcilla expandida (Leca)	811,90	56,38	1580,00	0,56

Fuente: Elaboración propia.

Se realizó un cálculo de los precios de producción para 1m³ de la mezcla asfáltica con adición de cal hidratada, a continuación, se muestra los precios unitarios.

Tabla 4.53. Precio de producción para 1 m³ de la mezcla asfáltica con arcilla expandida (Leca).

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS				
Proyecto de Grado			Actividad N° 2	
Actividad:	Carpeta de concreto asfáltica con AET (Leca)		Cantidad :	2,00
Unidad :	m³		Moneda .	Bs
Descripcion	Unidad	Cantidad o Rendimiento	Precio Unitario	Costo Total
1 Materiales				
1	Grava arcilla expandida (Leca)de 1/2"	m ³	0,10	348,00
2	Grava arcilla expandida (Leca)de 3/8"	m ³	0,26	348,00
3	Arena arcilla expandida (Leca)	m ³	0,56	348,00
4	Cemento asfáltico	kg	109,01	9,00
5	Diesel	lt	18,00	3,74
Total Materiales				1370,05
2 Mano de Obra				
1	Ayudante de operador	hr	0,03	16,00
2	Capataz	hr	1,80	25,00
3	Operador	hr	0,82	20,00
4	Operador de equipo liviano	hr	0,08	18,00
5	Operador de planta	hr	0,09	23,19
6	Obrero	hr	0,07	12,07
7	Chofer	hr	0,00	18,00
Sub total mano de obra				66,30
Cargas Sociales 65% del sub total M. O.			65,00	43,09
Impuestos IVA M.O. = 14,94% (del Sub Total de M. O. + Cargas Sociales)			14,94	16,34
Total Mano de Obra				125,74
3 Equipo, Maquinaria y Herramientas				
1	Compactador liso	hr	0,035	303,85
2	Distribuidor de agregados autop	hr	0,028	455,03
3	Escoba mecanica autop	hr	0,028	71,55
4	Planta de calentamiento de asfalto	hr	0,09	965,23
5	Compactador neumatico Tsp 1000	hr	0,084	332,81
6	Terminadora de asfalto	hr	0,075	669,06
7	Cargador frontal de ruedas = 950 m ³	hr	0,0001	421,29
8	Volqueta=12 m ³	hr	0,001	227,87
Herramientas Menores 5 % de la mano de obra			5,00	6,29
Total Eq, Maq. y Herr.				196,94
4 Gastos Generales y Adminsitrativos				
Gastos Generales 10% (1+2+3)				169,27
5 Utilidad				
Utilidad 10% (1+2+3+4)				186,20
6 Impuestos				
Impuestos I. T. 3,09% (1+2+3+4+5)				63,29
Total Item Precio Unitario				2111,49

Fuente: Elaboración propia.

4.10.3 Análisis del precio de producción para la mezcla asfáltica con agregado grueso arcilla expandida (Leca) y agregado fino arena triturada (Erika).

Tabla 4.54. Dosificación para la mezcla asfáltica con agregado grueso arcilla expandida (Leca) y agregado fino arena triturada (Erika).

Dosificación de mezcla asfáltica	
Materiales	Porcentaje
cemento asfáltico	7,28
Grava arcilla expandida (Leca)de 1/2"	10,00
Grava arcilla expandida (Leca)de 3/8"	21,97
Arena triturada (Erika)	64,63

Fuente: Elaboración propia.

El peso unitario estandarizado para el cálculo de dosificaciones = 1850 kg/m³.

Tabla 4.55. Dosificación para 1 m³ de la mezcla asfáltica con agregado grueso arcilla expandida (Leca) y agregado fino arena triturada (Erika).

Dosificación de mezcla asfáltica				
Materiales	Peso (Kg)	Porcentaje	Peso esp. (Kg/m ³)	Volumen (m ³)
cemento asfáltico	134,68	7,28	1010,00	0,13
Grava arcilla expandida (Leca)de 1/2"	113,21	6,12	1540,00	0,07
Grava arcilla expandida (Leca)de 3/8"	406,53	21,97	1540,00	0,26
Arena arcilla expandida (Leca)	1195,57	64,63	2687,00	0,44

Fuente: Elaboración propia.

Se realizó un cálculo de los precios de producción para 1m³ de la mezcla asfáltica con agregado grueso arcilla expandida (Leca) y agregado fino arena triturada (Erika), a continuación, se muestra los precios unitarios.

Tabla 4.56. Precio de producción para 1 m³ de la mezcla asfáltica con agregado grueso arcilla expandida (Leca) y agregado fino arena triturada (Erika).

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS				
Proyecto de Grado			Actividad N° 3	
Actividad: Carpeta de concreto asfáltica con agregado grueso AET (Leca) y fino petreo(Erika)		Cantidad :	1,00	
Unidad : m³		Moneda .	Bs	
Descripcion	Unidad	Cantidad o Rendimiento	Precio Unitario	Costo Total
1 Materiales				
1 Grava de 3/4"	m ³	0,07	348,00	25,58
2 Grava de 3/8"	m ³	0,26	348,00	91,87
3 Arena triturada	m ³	0,44	145,00	64,52
4 Cemento asfáltico	kg	134,68	9,00	1212,12
5 Diesel	lt	18,00	3,74	67,32
Total Materiales				1461,41
2 Mano de Obra				
1 Ayudante de operador	hr	0,03	16,00	0,45
2 Capataz	hr	1,80	25,00	45,00
3 Operador	hr	0,82	20,00	16,40
4 Operador de equipo liviano	hr	0,08	18,00	1,48
5 Operador de planta	hr	0,09	23,19	2,09
6 Obrero	hr	0,07	12,07	0,87
7 Chofer	hr	0,00	18,00	0,02
Sub total mano de obra				66,30
Cargas Sociales 65% del sub total M. O.			65,00	43,09
Impuestos IVA M.O. = 14,94% (del Sub Total de M. O. + Cargas Sociales)			14,94	16,34
Total Mano de Obra				125,74
3 Equipo, Maquinaria y Herramientas				
1 Compactador liso	hr	0,035	303,85	10,63
2 Distribuidor de agregados autop	hr	0,028	455,03	12,74
3 Escoba mecanica autop	hr	0,028	71,55	2,00
4 Planta de calentamiento de asfalto	hr	0,09	965,23	86,87
5 Compactador neumatico Tsp 1000	hr	0,084	332,81	27,96
6 Terminadora de asfalto	hr	0,075	669,06	50,18
7 Cargador frontal de ruedas = 950 m ³	hr	0,0001	421,29	0,04
8 Volqueta=12 m ³	hr	0,001	227,87	0,23
Herramientas Menores 5 % de la mano de obra			5,00	6,29
Total Eq, Maq. y Herr.				196,94
4 Gastos Generales y Adminsitrativos				
Gastos Generales 10% (1+2+3)				178,41
5 Utilidad				
Utilidad 10% (1+2+3+4)				196,25
6 Impuestos				
Impuestos I. T. 3,09% (1+2+3+4+5)				66,71
Total Item Precio Unitario				2225,45

Fuente: Elaboración propia.

Resumen de costos

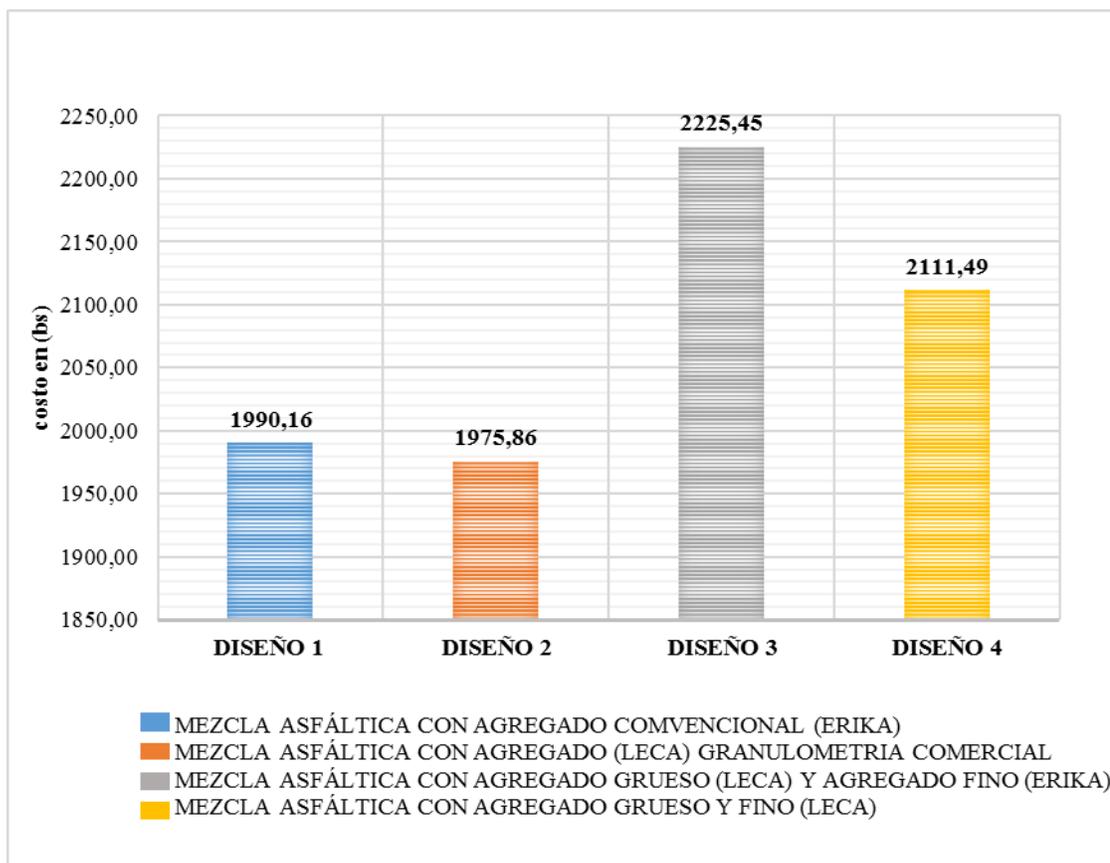
Tabla 4.57. Resumen de costos.

Identificación	Costo unitario (bs/m ³)
Mezcla con agregado convencional (Erika)	1990,16
Mezcla con agregado (Leca) granulometría comercial	1975,86
Mezcla con agregado grueso (Leca) y agregado fino (Erika)	2225,45
mezcla con agregado grueso y fino (Leca)	2111,49

Fuente: Elaboración propia.

Comparación de costos

Figura 4.35. Comparación de costos.



Fuente: Elaboración propia.

Análisis de resultados de costos

Se observa que el costo de las mezclas con arcilla expandida (Leca) son mayores respecto al costo de una mezcla convencional, esto debido al elevado costo del agregado artificial en comparación a los agregados pétreos convencionales.

La mezcla asfáltica con agregado grueso arcilla expandida y agregado fino arena triturada es el que mayor costo tiene un 11,82% más con respecto a una mezcla convencional mismas que se muestran en el gráfico comparativo.

La posibilidad de procesar este tipo de agregados local mente es un factor decisivo para el costo unitario en zonas alejadas de las fuentes de producción de agregados pétreos tradicionales; la materia prima utilizada básicamente es abundante precisamente en las zonas de escasez de piedra. Como una ventaja adicional, el bajo peso específico facilita su transporte, evitándose al mismo tiempo el efecto destructivo de las grandes cargas sobre los pavimentos.

Tomando en cuenta las tarifas vigentes de transporte de carga en el interior de nuestro país de 0,53 bs/km de una tonelada, podemos verificar y demostrar la ventaja económica del transporte de este agregado artificial debido a su baja densidad respecto a los agregados pétreo.

Tabla 4.58 Costo de transporte de agregados para una distancia de 210 km.

Identificación	Peso específico	Costo transporte 1 ton	Distancia	Costo transporte	Diferencia costo
	Kg/m ³	bs/km		Km.	Bs.
Agregado pétreo	2600	0,53	210	289,38	122,43
Agregado AET Leca	1500	0,53	210	166,95	-

Fuente: Elaboración propia.

Tomando en cuenta los resultados de la tabla anterior podemos hacer la siguiente valoración:

Sumando el costo de transporte de los agregados para una distancia de 210 km. al costo unitario de producción de una mezcla asfáltica, los costos prácticamente se equilibran dando nos como resultado de 2279,54 bs/m³ para una mezcla con agregados pétreos y 2278,44 bs/m³ para una mezcla con agregados arcilla expandida térmicamente.

Dada la simplicidad de su elaboración y su cierta similitud con los hornos de las usinas asfálticas, resulta igualmente previsible la posibilidad de su producción a cargo del contratista situación que ariá que se abaraten a un más los costos.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

De acuerdo con el trabajo de investigación correspondiente al estudio de las propiedades mecánicas de la arcilla expandida térmicamente para su utilización como agregado en mezclas asfálticas en base a los resultados obtenidos, se llegó a las siguientes conclusiones:

- ✓ Se realizó con normalidad los diferentes ensayos de caracterización de los agregados pétreos, agregados arcilla expandida térmicamente (Leca) y cemento asfáltico. Donde se pudo verificar que los mismos cumplen con las especificaciones de las normas AASHTO y ASTM para el diseño de mezclas asfálticas.
- ✓ Se realizó el diseño de las mezclas asfálticas empleando el método de diseño Marshall, donde se utilizó arcilla expandida térmicamente (Leca) en remplazo total y parcial de los agregados pétreos convencionales para cada diseño.
- ✓ De acuerdo a los ensayos realizados en laboratorio se determinó que las mezclas asfálticas con agregado grueso arcilla expandida y agregado fino arena triturada presentan contenidos de cemento asfáltico un poco más elevados que una mezcla asfáltica convencional, esto se puede evidenciar en la **figura 4.28**.
- ✓ Del análisis conjunto de la estabilidad y la fluencia de las mezclas asfálticas estudiadas, se puede establecer que los mejores comportamientos se producen en la mezcla asfáltica con agregado grueso arcilla expandida térmicamente (Leca) y agregado fino arena triturada.
- ✓ Del análisis del porcentaje de vacíos en las mezclas asfálticas se puede observar en la **figura 4.30** que en las mezclas asfálticas con agregado arcilla expandida leca, presentan porcentajes de vacíos levemente más altos que en una mezcla asfáltica convencional mismas que se encuentran dentro de los límites de las especificaciones de diseño.

- ✓ Para la variable fluencia de las mezclas asfálticas con agregado arcilla expandida (Leca) se evidencia que son levemente menores y que las mismas están dentro de lo especificado en el diseño.
- ✓ Desde el punto de vista económico, en la **figura 4.34** se puede evidenciar que los precios para las mezclas asfálticas con agregado arcilla expandida leca, son más elevados en comparación con la mezcla asfáltica normal debido al costo de este material artificial. Generalmente en los proyectos de ingeniería se busca realizar una actividad al menor costo posible pero que a su vez tenga las mejores características mecánicas, esto nos lleva a hacer un análisis más detallado del costo de transporte de los materiales ya que la utilización de este material se planteó para lugares donde se carece agregados pétreos.
- ✓ Su utilización resulta conveniente en zonas alejadas de los centros de producción de agregados pétreos, no descartándose la posibilidad de su fabricación por parte del contratista
- ✓ De acuerdo a la hipótesis planteada se concluye que, si diseñamos una mezcla asfáltica utilizando como agregado arcilla expandida térmicamente, sus propiedades cumplen con las especificaciones de diseño por lo tanto este agregado artificial puede ser considerado como alternativa técnica para la elaboración de mezclas.

5.2. RECOMENDACIONES

- ✓ Para garantizar la calidad de las mezclas asfálticas el personal encargado de laboratorio debe tener la preparación adecuada para evitar fallas de fabricación y colocación en obra
- ✓ Realizar el mezclado de los agregados con el cemento asfáltico de la manera más homogénea posible para evitar la variabilidad de los resultados de la mezcla en los distintos ensayos que se realicen.
- ✓ Se recomienda ser muy cuidadosos al momento de trabajar con mezclas asfálticas, ya que se trabaja a altas temperaturas, se debe utilizar el equipo de seguridad necesario para la manipulación de los materiales.
- ✓ Es necesario realizar una experimentación a escala real para poder observar cómo es su comportamiento de este agregado en las mezclas asfálticas.

- ✓ Tomar muy en cuenta sus características del agregado arcilla expandida térmicamente para su utilización en obras reales como también en laboratorio ya que son muy diferentes a los agregados pétreos

El aporte de esta investigación estimula la necesidad de seguir investigando más a detalle el comportamiento de las propiedades de las mezclas asfálticas utilizando como agregado arcilla expandida térmicamente, material artificial que sirve como alternativa para zonas donde no se tiene disponibles agregados pétreos.