

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Como sabemos hoy en día las capas de rodadura de las vías pavimentadas del país de Bolivia en su mayoría son del tipo flexible a base de mezcla asfáltica en caliente. La mayoría de mezclas asfálticas son de tipo densa, y el principal método de diseño que se utiliza es el país es el método Marshall, este método fue desarrollado por Bruce Marshall, Ex-Ingeniero de Bitúmenes del Departamento de Carreteras del Estado de Mississippi.

En nuestro presente el pavimento asfáltico es la alternativa más usada en la infraestructura vial en Bolivia, razón por la cual es importante conocer y estar al tanto de nuevos avances que permitan incrementar la vida útil y la calidad del mismo.

Los principales factores de daño de las vías son los siguientes: La lluvia y las elevadas cargas de tránsito dañando las estructuras de pavimento y reduciendo su vida útil, generando mayores gastos para su mantenimiento y reparación.

Con el fin de mejorar la calidad de la mezcla asfáltica y mantener su vida útil se diseñó un nuevo método de diseño de mezclas asfálticas en caliente, el cual es conocido a nivel mundial como SUPERPAVE. De los resultados del programa estratégico de investigación de carreteras de los EE.UU., surgieron las especificaciones SUPERPAVE (Superior Performance Asphalt Pavements). Creadas por el programa SHRP (Strategic Highway Research Program) o programa estratégico de investigación de carreteras, desarrollado entre 1987 y 1993 en los Estados Unidos. Parte fundamental del desarrollo del programa es que entre las investigaciones llevadas a cabo revelaron que era necesario:

Realizar cambios completos en especificaciones y ensayos, respecto a los ligantes asfálticos debido a su comportamiento Visco-Elástico. No se efectuó casi ningún cambio en los ensayos sobre los agregados pétreos, el cambio realizado es en la curva de graduación.

Se hicieron cambios esenciales en los procedimientos para el establecimiento del diseño de una mezcla asfáltica, los cambios fueron establecidos en lo que se conoce como SUPERPAVE, que representa un sistema mejorado para el diseño de mezclas asfálticas en caliente, el cual incluye especificaciones para ligantes asfálticos, equipo y procedimiento de ensayo, criterios de selección de materiales, análisis y diseño de mezclas asfálticas, software de apoyo y modelos de predicción, basados en el comportamiento de los pavimentos asfálticos.

Actualmente SUPERPAVE establece tres niveles de utilización basados en la cantidad esperada de ejes equivalentes de carga durante el periodo de diseño del pavimento. El primer nivel, conocido como proporcionamiento volumétrico, es el que actualmente se desarrolla en algunos estados de la unión Americana. Los 2 niveles superiores siguen siendo investigados.

La implementación completa de este nuevo sistema, en los EE.UU., en el mundo entero y sobre todo en Bolivia, requiere inversiones para adquisición de equipos de laboratorio así mismo para el desarrollo consistente de los niveles superiores.

1.2. Justificación

Significa un aporte académico muy importante ya que su estudio es muy vago en las materias de la carrera de ingeniería civil, por lo que se hace imperioso la necesidad de profundizar para que el documento resulte un producto de consulta.

En los tiempos actuales el incremento de los parques automotores en los países ha originado el incremento de cargas estructurales que desde el punto de vista técnico debe ser satisfecho por el pavimento asfáltico.

Para lograr una mejor mezcla asfáltica que responda a las necesidades de los pavimentos se propone el diseño volumétrico de las mezclas utilizando en su metodología las granulometrías planteadas por el Superpave y comprobar su resistencia a fatiga de las mezclas asfálticas, por lo que se propondrá utilizar en nuestro país especialmente en el departamento de Tarija, de acuerdo a los resultados obtenidos.

Particularmente en nuestro medio la importancia de la durabilidad de la mezcla asfáltica ante la exposición de la carga que genera diferentes rangos de fatiga en la mezcla

asfáltica es muy importante, para lo cual la utilización de agregados naturales y triturados con granulometría especificada son de vital importancia, además de la metodología de dosificación de la mezcla, que resista las condiciones de carga adecuadas de acuerdo a la fatiga.

1.3. Situación problemática

En Bolivia las mezclas asfálticas son uno de los materiales más utilizados en la construcción de carreteras, sin embargo, en los últimos años han demostrado un desempeño inferior al deseable, presentándose actualmente en la red vial un alto número de fallas y deficiencias asociadas a estas. Para el diseño de mezclas asfálticas en Bolivia por lo general se utiliza la metodología Marshall, esta metodología ha sido difundida a nivel mundial por su facilidad de ejecución, así como por la economía de sus equipos requeridos. No obstante, esta metodología no diseña en función del desempeño esperado de la mezcla asfáltica (por ejemplo: fatiga, resistencia a las cargas, etc.), sino que establece un diseño basado en volumetría, en el cual se considera un diseño satisfactorio aquel que cumpla con especificaciones relacionadas al volumen ocupado por cada una de las partes que conforman la mezcla asfáltica (por ejemplo: volumen de aire, volumen de asfalto, volumen del agregado).

Estas especificaciones, que definen la aceptación o rechazo de una mezcla asfáltica, han sido establecidas por medio de consenso (p.ej. resultados históricos satisfactorios), y en algunos casos no tienen correlación con el comportamiento mecánico.

Una alternativa al diseño Marshall, es el método SUPERPAVE (acrónimo de Superior Performing Asphalt Pavements). Este método establece una nueva serie de ensayos, tanto del ligante asfáltico como de los agregados, que permiten emular con mayor precisión las condiciones de campo (por ejemplo: la compactación).

Este método fue empleado en el año 1987, el Strategic Highway Research Program (SHRP) fue establecido por el congreso de los Estados Unidos, iniciando el desarrollo de un nuevo sistema para especificar materiales asfálticos, el producto final del programa es un nuevo sistema llamado SUPERPAVE (*Superior Performing Asphalt Pavement*). Representa una tecnología de tal manera provista que pueda especificar cemento

asfáltico y agregado mineral, desarrollar diseños de mezclas asfálticas; analizar y establecer predicciones del desempeño del pavimento.

Los criterios de aceptación del diseño son relacionados a desempeño, sin embargo, esta metodología presenta dos grandes inconvenientes: El elevado costo de los equipos de laboratorio, así como la necesidad de entrenamiento de personal y transferencia de tecnología para su correcta aplicación. El diseño es fundamentado (al igual que el Marshall) en especificaciones de volumetría, lo que limita optimizar el diseño en función del desempeño esperado durante la vida útil de la mezcla.

El diseño de mezclas asfálticas a nivel mundial se ha aplicado mayormente de forma empírica, sin embargo, recientemente se han realizado investigaciones sobre la utilidad de los meta modelos para la simulación de propiedades complejas asociadas al desempeño mecánico de las mezclas asfálticas, tales como el módulo dinámico. Esto da paso al uso de técnicas de optimización que permitan mejorar significativamente el diseño de mezclas asfálticas, así como la evaluación de la incertidumbre en el proceso.

Por ello se hace necesario analizar la utilización de una nueva metodología en la producción de mezclas asfálticas, conocida como SUPERPAVE (granulometría), ya que esta servirá para mejorar sus propiedades mecánicas y así dar respuesta al fenómeno que se sufre con la fatiga.

1.3.1. Problema

¿Cómo un análisis de la granulometría SUPERPAVE de una mezcla asfáltica puede reducir la fatiga y potenciar su forma de uso?

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Determinar en laboratorio un análisis de las briquetas obtenido en base a la granulometría SUPERPAVE, de tal manera que se pueda realizar un análisis de resistencia a la fatiga en las mezclas asfálticas, con la cual podamos establecer una comparación con una mezcla asfáltica densa convencional con el fin de encontrar una opción más favorable para la construcción de pavimentos flexibles.

1.4.2. Objetivos específicos

- Efectuar una revisión bibliográfica de la mezcla asfáltica, utilizando la metodología SUPERPAVE.
- Elaborar la caracterización de los agregados pétreos y del cemento asfáltico.
- Determinar las mezclas asfálticas dosificadas utilizando agregados con granulometría especificada por SUPERPAVE, en función a la metodología previamente diseñada.
- Obtener el contenido óptimo de cemento asfáltico para el diseño de la granulometría SUPERPAVE.
- Realizar una evaluación del comportamiento de la mezcla asfáltica a través de la resistencia a fatiga para la dosificación de la mezcla asfáltica con la curva granulométrica SUPERPAVE.

1.5. Hipótesis

Sí, es posible realizar el análisis de la resistencia a la fatiga en base al diseño volumétrico de una mezcla asfáltica utilizando la granulometría SUPERPAVE para su aplicabilidad.

1.6. Operacionalización de las variables

1.6.1. Variable independiente

X_1 = Vacíos de aire (Va).

X_2 = Volumen efectivo de ligante (RVB).

X_3 = Vacíos en el agregado mineral (VAM).

1.6.2. Variable dependiente

Y_1 = Resistencia a la fatiga.

1.6.3. Variable interviniente

Calidad de los materiales.

Precisión de la curva granulométrica Superpave.

1.7. Alcance de la investigación

La presente investigación se realizó en el departamento de Tarija, para lo cual se utilizó áridos propios de la región, donde se determinó ver el efecto de la implementación de la granulometría SUPERPAVE en la mezcla asfáltica convencional y así analizar la resistencia a la fatiga con el método del ensayo de tracción indirecta, con el equipo de Marshall.

Se desarrollará todo lo que se pretende hacer en la investigación como los objetivos que se tienen para la elaboración del proyecto, el objetivo final al cual se pretende llegar como también la justificación que se dará en la investigación para que tenga validez.

También estará enfocado en la información necesaria para la realización de la investigación, como conceptos necesarios para estudiar sus propiedades mecánicas y la normativa que se aplicará para este tipo de mezclas asfálticas, con la metodología Superpave. De igual manera se comenzó con la selección del material de la cantera de Charajas, como también se realizó la caracterización de los agregados pétreos a través de los ensayos necesarios; también se realizó la caracterización del cemento asfáltico 85 – 100, con sus respectivos ensayos, para obtener su caracterización correspondiente. Posteriormente se comenzó con la parte práctica, dando así inicio a la etapa del cálculo de diseño de la mezcla asfáltica convencional realizando briquetas, para encontrar su contenido óptimo de cemento asfáltico, el cual se lo estudiará con los ensayos correspondientes. Una vez se encuentre el porcentaje óptimo de cemento asfáltico, se procedió a realizar el diseño de la mezcla asfáltica con la curva granulométrica Superpave, para realizar el análisis estadístico y evaluar sus propiedades mecánicas para dar cumplimiento a los objetivos de la investigación. También se realizó la comparación del análisis de precios unitarios de la mezcla asfáltica convencional y una mezcla asfáltica con granulometría Superpave para ver la económica de la misma. Finalmente se dará a conocer las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

CAPÍTULO II
FUNDAMENTO TEÓRICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Agregados pétreos en una mezcla asfáltica

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

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

2.1.1. Graduación y tamaño máximo de la partícula

Graduación

Todas las especificaciones de pavimento asfáltico de mezcla en caliente requieren que las partículas de agregado estén dentro de un cierto margen de tamaños y que cada tamaño de partículas esté presente en ciertas proporciones. Esta distribución de varios tamaños de partículas dentro del agregado es comúnmente llamada graduación del agregado o graduación de la mezcla. Es necesario entender cómo se mide el tamaño de partículas y la graduación para determinar si la graduación del agregado cumple o no con las especificaciones.

La granulometría del tamaño que pasa el tamiz N°200 tiene un efecto importante en las propiedades volumétricas de la mezcla, a mayor contenido de llenante mayor va a ser el porcentaje de asfalto requerido, debido a su mayor área superficial.

Tamaño máximo de partícula

El tamaño de las partículas más grandes en la muestra debe ser determinado, debido a que las especificaciones hablan de un tamaño máximo de partículas para cada agregado usado. Existen dos formas de designar tamaños máximos de partículas:

Tamaño máximo nominal del agregado

Designado como un tamiz más grande que el primer tamiz que retiene más del 10 % de las partículas de agregado, en una serie normal de tamices.

Tamaño máximo del agregado

Designado como el tamiz más grande que el tamaño máximo nominal de partícula. Típicamente, este es el tamiz más pequeño por el cual pasa el 100 por ciento de las partículas de agregado.

2.1.1.1. Limpieza

Las especificaciones de la obra generalmente ponen un límite a los tipos y cantidades de materiales indeseables (vegetación, arcilla esquistosa, partículas blandas, terrones de arcilla, etcétera) en el agregado. Las cantidades excesivas de estos materiales pueden afectar desfavorablemente el comportamiento del pavimento.

La limpieza del agregado puede determinarse, usualmente, mediante inspección visual, pero un tamizado por lavado de acuerdo a la norma AASHTO T 11-97 (2000) y su equivalente ASTM 117-95 (donde el peso de la muestra de agregado antes de ser lavada es comparado con su peso después de ser lavada) proporciona una medida exacta del porcentaje de material indeseable más fino que 0.075 mm (N° 200). El ensayo “Finos plásticos en agregados graduados y suelos por el uso del ensayo del equivalente de Arena” (AASHTO T 176-02) es un método para determinar la proporción indeseable de polvo fino y arcilla en la fracción de agregado que pasa el tamiz de 4.75 mm (N° 4).

2.1.1.2. Dureza

Los agregados deben ser capaces de resistir la abrasión (desgaste irreversible) y degradación durante la producción, colocación, compactación de la mezcla de pavimentación y durante la vida de servicio del pavimento. Los agregados que están en o cerca de la superficie deben de tener mayor resistencia que los agregados usados en las capas inferiores de la estructura del pavimento. Esto se debe a que las capas superficiales reciben los mayores esfuerzos y el mayor desgaste por parte de las cargas del tránsito.

El ensayo de desgaste de los ángeles (AASHTO T 96-2002, equivalencia ASTM C-131-2001) mide la resistencia de un agregado al desgaste y a la abrasión.

2.1.1.3. Forma de la partícula

La forma de la partícula afecta la trabajabilidad de la mezcla de pavimentación durante su colocación, así como la cantidad de fuerza necesaria para compactar la mezcla a la densidad requerida. La forma de la partícula también afecta la resistencia de la estructura del pavimento durante su vida.

Las partículas irregulares y angulares generalmente resisten el desplazamiento (movimiento) en el pavimento, debido a que tienden a entrelazarse cuando son compactadas. El mejor entrelazamiento generalmente con partículas de bordes puntiagudos y de forma cúbica, producidas, casi siempre, por trituración. Muchas de las mezclas asfálticas de pavimentación contienen partículas angulares y redondas. Las partículas gruesas (grandes) de agregado proporcionan la resistencia en el pavimento y provienen generalmente de piedra o grava triturada. Las partículas finas de agregado suministran la trabajabilidad necesaria en la mezcla y provienen generalmente de arenas naturales.

El ensayo de forma de la partícula (ASTM D 5821) mide la forma de las partículas.

2.1.1.4. Textura superficial

La textura superficial de las partículas de agregado es otro factor que determina no solo la trabajabilidad y resistencia final de la mezcla de pavimentación, sino también las características de resistencia al deslizamiento en la superficie del pavimento. Algunos consideran que la textura superficial es más importante que la forma de la partícula. Una textura áspera, como la del papel de lija, aumenta la resistencia en el pavimento debido a que evita que las partículas se muevan unas respecto a otras, y a la vez provee un coeficiente alto de fricción superficial que hace que el movimiento del tránsito sea más seguro.

Adicionalmente, las películas de asfalto se adhieren más fácilmente a las superficies rugosas que a las superficies lisas. Las gravas naturales son frecuentemente trituradas durante su procesamiento, debido a que generalmente contienen superficies lisas. El

tritramiento produce texturas superficiales rugosas en las caras fracturadas, así como cambios en la forma de la partícula.

No existe un método directo para evaluar la textura superficial. Es tan solo una característica, como la forma de la partícula, que está reflejada en los ensayos de resistencia y en la trabajabilidad de la mezcla durante la construcción.

2.1.1.5. Capacidad de absorción

El ensayo sigue las normativas: Agregado grueso: AASHTO T 85-91 y ASTM C 127-88, agregado fino: AASHTO T 84-00 y ASTM C 128-97.

Todos los agregados son porosos, y algunos más que otros. La cantidad de líquido que un agregado absorbe cuando es sumergido en un baño determina su porosidad.

La capacidad de un agregado de absorber agua (o asfalto) es un elemento importante de información. Si un agregado es altamente absorbente, entonces continuará absorbiendo asfalto después del mezclado inicial en la planta, dejando así menos asfalto en su superficie para ligar las demás partículas de agregado. Debido a esto, un agregado poroso requiere cantidades muchos mayores de asfalto que las que requiere un agregado menos poroso.

Los agregados altamente porosos y absorbentes no son normalmente usados, a menos de que posean otras características que los hagan deseables, a pesar de su alta capacidad de absorción.

2.1.1.6. Afinidad con el asfalto

La afinidad de un agregado con el asfalto es la tendencia del agregado a aceptar y retener una capa de asfalto con el fin de evitar deslizamientos relativamente altos entre las partículas, que deformen las capas asfálticas o eviten el desprendimiento de los fragmentos de roca que componen el esqueleto mineral de las mezclas asfálticas. En general la afinidad en términos de adherencia depende de: de la composición química, de la forma, de la rugosidad, de la limpieza del agregado y del tipo y cantidad de ligante asfáltico. (Beltrán Valencia & Muñoz Valencia, 2008).

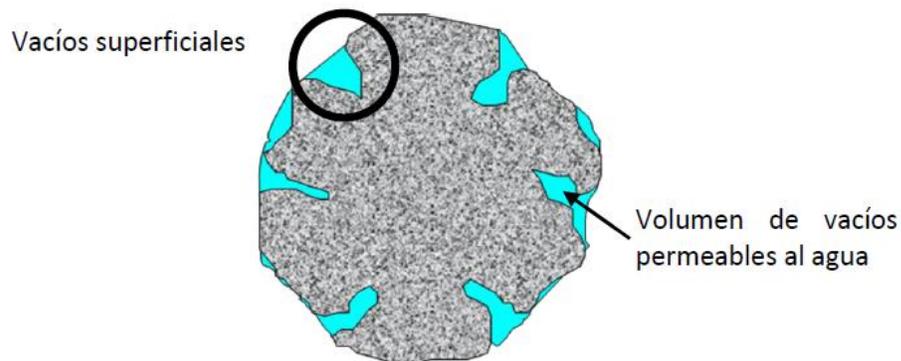
2.1.1.7. Peso específico

El ensayo sigue la normativa ASTM D 70, AASHTO T 228.

El peso específico de un agregado (también conocido como gravedad específica) es la proporción entre el peso de un volumen dado de agregado y el peso de un volumen igual de agua. El peso específico es una forma de expresar las características de peso y volumen de los materiales. Estas características son especialmente importantes en la producción de mezclas de pavimentación debido a que el agregado y el asfalto son proporcionados, en la mezcla, de acuerdo al peso.

Otra razón importante por la cual es necesario conocer el peso específico de los agregados usados es, que este ayuda en el cálculo de porcentaje de vacíos de aire (espacios de aire) de las mezclas compactadas. Se han definido cuatro tipos de gravedad específica, dependiendo del volumen considerado, incluyendo o sin incluir el volumen de los poros permeables. Algunos de ellas se requieren en mezclas asfálticas para encontrar asfalto absorbido y las relaciones volumétricas de las mezclas mostrada en la Figura 1. (Beltrán Valencia & Muñoz Valencia, 2008).

Figura 1. Poros permeables en una partícula de agregado

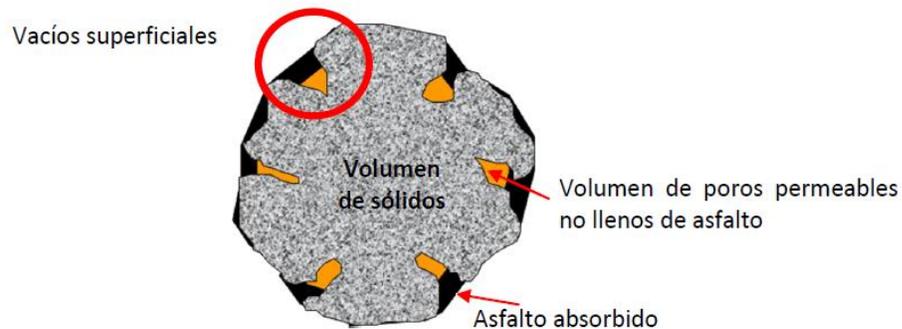


Fuente: Susceptibilidad de las mezclas asfálticas a cambios volumétricos generados por la compactación adicional en condiciones de servicio

Gravedad específica aparente (G_{sa}), no incluye, como parte del volumen de la muestra, los poros que se llenarían de agua al mojar la partícula, V_s . Gravedad específica bulk (G_{sb}), incluye en el volumen todos los poros de la partícula, (V_{sb}).

Gravedad específica bulk en condición saturada y superficialmente seca (G_{sbss}), incluye el peso del agua que llena los poros permeables de la partícula luego de inmersión. Gravedad específica efectiva (G_{se}), incluye el volumen de sólidos más el volumen de los poros permeables no llenos de asfalto, V_{se} , como se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Ilustración del volumen V_{se} , de volumen de sólidos más volumen de los poros no llenos de asfalto



Fuente: Susceptibilidad de las mezclas asfálticas a cambios volumétricos generados por la compactación adicional en condiciones de servicio

2.2. Ligante asfáltico en las mezclas asfálticas

2.2.1. Composición química del asfalto

El asfalto es considerado un sistema coloidal complejo de hidrocarburos (combinaciones moleculares de hidrógeno y carbono) de alto peso molecular, en el cual es difícil establecer una distinción clara entre la fase continua y la dispersa. (Marin Uribe & Guzman Melendez, 2003).

El modelo adoptado inicialmente para configurar la estructura del asfalto se denomina modelo micelar, el cual provee de una razonable explicación de dicha estructura, en el cual existen dos fases; una discontinua (aromática) formada por los asfáltenos y una continua que rodea y solubiliza a los asfáltenos, denominada máltenos. (Marin Uribe & Guzman Melendez, 2003).

Los asfáltenos son usualmente de color negro o pardo oscuro, los cuales son los responsables de su color y dureza de los asfaltos. Los máltenos son líquidos viscosos

compuestos de resinas y aceites; las resinas son por lo general, líquidos pesados de color pardo oscuro y le proporcionan sus características cementantes (pegajosidad) en el asfalto, mientras que los aceites le dan la consistencia necesaria para hacerlos trabajables. Los aceites son líquidos poco viscosos, de color claro, no adherentes muy estables. (Marin Uribe & Guzman Melendez, 2003).

2.2.2. Propiedades físicas del asfalto

Las propiedades físicas del asfalto, de mayor importancia para el diseño, construcción, y mantenimiento de carreteras son: susceptibilidad térmica, adhesión, reología, viscosidad y susceptibilidad al envejecimiento. (Marin Uribe & Guzman Melendez, 2003).

2.2.2.1. Durabilidad o susceptibilidad al envejecimiento

Durabilidad es la propiedad relacionada con que tanto puede mantener un asfalto sus características originales cuando es expuesto a procesos normales de construcción y exposición al medio ambiente durante la vida útil de los proyectos. La durabilidad real o efectiva de un asfalto depende además de las características del asfalto, de las condiciones de trabajo en el pavimento, por lo tanto, es difícil de definir en términos de las propiedades del asfalto. Debido a que el comportamiento del concreto asfáltico está afectado por el diseño de la mezcla, las características del agregado, la mano de obra en la construcción etc. Sin embargo, las características del cemento asfáltico es un factor primordial en la durabilidad de las capas de rodadura. En el proceso de envejecimiento se presentan las siguientes reacciones: (Marin Uribe & Guzman Melendez, 2003).

La evaporación de los componentes volátiles.

La acción química del oxígeno de la atmósfera.

El endurecimiento por envejecimiento.

La polimerización producida por los cambios químicos en el asfalto.

Los cementos asfálticos se envejecen básicamente por dos mecanismos diferentes: la pérdida de los aceites ligeros presentes en el betún (volatilización) y la reacción con el oxígeno del aire; al reaccionar con el oxígeno, la estructura del asfalto se hace más dura

y frágil (endurecimiento por oxidación o por envejecimiento). (Marin Uribe & Guzman Melendez, 2003).

La oxidación se origina más rápidamente a altas temperaturas, por lo tanto parte del endurecimiento se produce en los procesos de fabricación de las mezclas asfálticas en caliente (en planta) y puesta en obra, debido a las altas temperaturas a las que es sometido el ligante, el endurecimiento más severo ocurre en la etapa de mezclado, debido a que se conjugan dos condiciones críticas: alta temperatura y a que el ligante se encuentra en película delgada mientras está recubriendo las partículas de agregado. Este es también el motivo por el cual la oxidación es más crítica en ligantes asfálticos utilizados en pavimentos en climas cálidos y desérticos. (Marin Uribe & Guzman Melendez, 2003).

El envejecimiento del asfalto continua en el pavimento después de construido, originado principalmente por la oxidación; este proceso puede ser retardado si se tiene, en el pavimento terminado, una cantidad pequeña de vacíos (de aire) interconectados, junto con una capa gruesa de asfalto cubriendo las partículas de agregado. (Marin Uribe & Guzman Melendez, 2003).

2.2.2.2. Adhesión y cohesión

Adhesión

Adhesión es la capacidad que tiene el asfalto para adherirse al agregado. (Marin Uribe & Guzman Melendez, 2003).

Cohesión

Cohesión es la capacidad que tiene el asfalto para mantener unidas las partículas de agregado en el pavimento terminado. (Marin Uribe & Guzman Melendez, 2003).

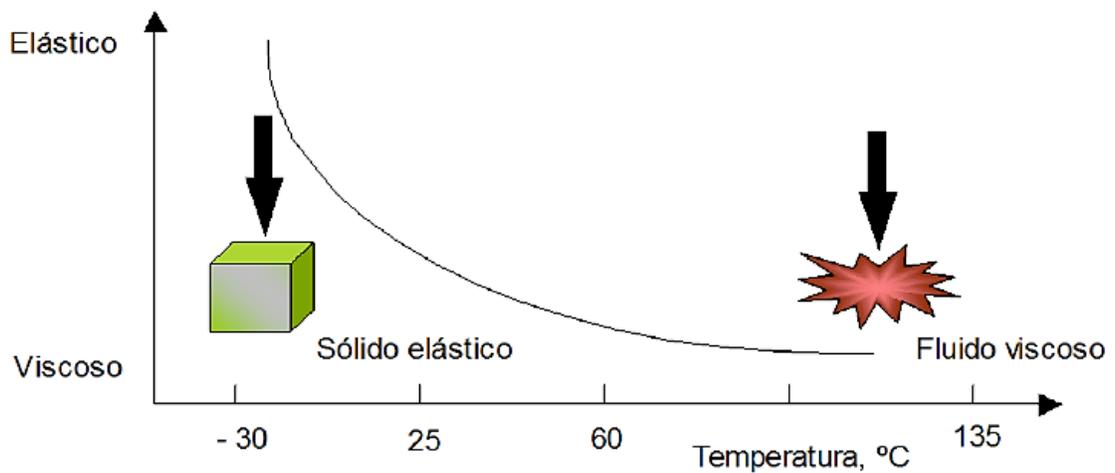
2.2.2.3. Susceptibilidad a la temperatura

Es una de las características más importantes, muchas veces una ventaja y en otras ocasiones una desventaja; esto es que sus propiedades dependen de la temperatura. Por esta razón casi todos los ensayos de caracterización de los cementos asfálticos y mezclas asfálticas deben especificar la temperatura; sin una temperatura dada no se podría

adoptar ningún criterio con respecto al ensayo. (Marin Uribe & Guzman Melendez, 2003).

El cemento asfáltico es a veces llamado material visco-elástico porque exhibe a temperaturas de trabajo en pavimentos, simultáneamente características viscosas y elásticas como se ve en la Figura 3. A altas temperaturas, el cemento asfáltico actúa casi como un fluido viscoso; es decir, calentado a elevadas temperaturas muestra la consistencia de un lubricante utilizado como aceite para motores. A muy baja temperatura, se comporta casi como un sólido elástico. Es decir, como una banda de goma. A una temperatura intermedia, que es la condición prevista en el pavimento, el cemento asfáltico tiene las características de ambos estados, un fluido viscoso y un sólido elástico. (Marin Uribe & Guzman Melendez, 2003).

Figura 3. Comportamiento visco-elástico del asfalto



Fuente: Comparación de las mezclas diseñadas por el método Marshall y las diseñadas por el método Superpave

2.2.2.4. Métodos modernos para medir las propiedades de los asfaltos propuesta SHRP, Superpave.

En 1987, el programa Estratégico de Investigación de Carreteras (SHRP), comenzó el desarrollo de nuevos ensayos para medir las propiedades físicas de los ligantes asfálticos. Uno de los resultados de este programa de Investigación, es una nueva

especificación para ligantes bituminosos, que incluye también nuevos ensayos, tanto para asfaltos modificados como para asfaltos sin modificar. (Marin Uribe & Guzman Melendez, 2003).

El resultado final de esta investigación SHRP sobre materiales bituminosos es un nuevo sistema al que se le ha dado el nombre de Superpave (Superior Performance Pavements), que incluye nuevas especificaciones para asfalto y agregado, un nuevo método de diseño de mezclas asfálticas en caliente y un modelo de predicción del comportamiento de pavimentos asfálticos. Dentro del sistema se definen los equipos, métodos de ensayo y los criterios a aplicar a los resultados. Los nuevos ensayos Superpave miden propiedades que pueden ser directamente relacionadas, mediante principios de ingeniería, con el comportamiento en obra. (Marin Uribe & Guzman Melendez, 2003).

Tabla 1. Nuevos ensayos Superpave para el ligante asfáltico

Procedimiento	Objetivo
Reómetro de corte dinámico (DSR)	Medir propiedades a temperaturas altas e intermedias
Viscosímetro rotacional Brookfield (RV).	Medir propiedades a altas temperaturas
Reómetro de viga de flexión (BBR). Ensayo de tracción directa (DDT)	Medir propiedades a bajas temperaturas
Horno de película delgada rotatoria (RTFO).	Simular el endurecimiento durante la etapa constructiva
Envejecimiento en recipiente presurizado (PAV).	Simular el envejecimiento durante la vida útil

Fuente: Comparación de las mezclas diseñadas por el método Marshall y las diseñadas por el método Superpave

Reómetro de Corte Dinámico (DSR). El DSR es utilizado para caracterizar el comportamiento viscoelástico (no Newtoniano) de las carpetas asfálticas. El reómetro aplica un patrón sinusoidal de tensiones de corte sobre una muestra asfáltica (de dimensiones de 1 mm de espesor por 25 mm de diámetro ó de 2mm de espesor por 8

mm de diámetro), midiendo su respuesta (deformación) entre platos metálicos paralelos, donde uno de ellos oscila con respecto al otro a frecuencia y amplitudes de deformación rotacional preseleccionadas. La respuesta del asfalto presenta un patrón de la misma frecuencia, pero de distinta amplitud, desfasada en el tiempo. Dicha muestra es mantenida a la temperatura de ensayo mediante calentamiento y enfriamiento de los platos superior e inferior. Comparando ambos patrones se obtienen dos importantes parámetros reológicos del asfalto: 1. Módulo de Corte Dinámico (G^*): que es un indicador de la rigidez o resistencia del ligante asfáltico a la deformación por esfuerzos de corte. 2. Angulo de Fase (δ): que es un indicador de las cantidades relativas de deformaciones elástica (recuperable) y viscosa (no recuperable). Ambos parámetros permiten determinar la resistencia a la deformación de corte de un ligante asfáltico, además de otras propiedades que tienen directa relación con ellos. Son sumamente dependientes de la temperatura y de la frecuencia de carga (10 rad/s). El DSR está pensado para determinar las propiedades visco-elásticas (no Newtonianas) de los ligantes asfálticos para requerimientos de especificación. Además, es apropiado para materiales tanto en estado original como envejecido y no es aplicable a ligantes asfálticos que contengan material particulado de dimensiones mayores a los 250 μm , ni a aquellos que presenten valores de G^* fuera del rango entre los 100 Pa y los 10 MPa (obtenidos usualmente con temperaturas entre los 5° C y 85° C). Figura 2. Reómetro de Corte Dinámico (DSR). Durante los tres primeros años de servicio, y especialmente en períodos calurosos, la mezcla es propensa a sufrir ahuellamiento, el cual se define como la acumulación de pequeñas deformaciones no recuperables en la mezcla. Para minimizar la contribución del asfalto al ahuellamiento se exige que éste tenga una alta rigidez frente a temperaturas de servicio elevadas y que presente un comportamiento predominantemente elástico. Así para controlar el ahuellamiento, SUPERPAVE exige que: $G^* / \sin(\delta) > 2.20 \text{ kPa}$ en el rango alto de temperaturas de servicio, en muestras envejecidas previamente en RTFO. Por otro lado, tras varios años de servicio el asfalto alcanzará una condición de envejecimiento de largo plazo, por lo cual su rigidez habrá aumentado. En esta etapa el ahuellamiento ya no es un modo de falla probable, sino más bien es posible que se presenten problemas asociados al comportamiento sólido-frágil del asfalto, como agrietamiento por fatiga y agrietamiento térmico. Para prevenir

el desarrollo de grietas por fatiga SUPERPAVE exige que: $G^* \sin(\delta) < 5000 \text{ kPa}$ en el rango alto de temperaturas de servicio, en muestras envejecidas previamente en RTFO y PAV.

Viscosímetro Rotacional Brookfield (RV). Durante la construcción de la mezcla asfáltica se requiere manejar el cemento asfáltico a temperaturas que permitan su bombeo. Estas temperaturas deben ser tales que el asfalto pueda ser inyectado en el tambor mezclador y sea capaz de cubrir uniformemente las partículas de agregado. Para este propósito se utiliza el RV. El RV cuenta con el sistema Thermosel y permite evaluar la trabajabilidad del asfalto (mediante la determinación de la viscosidad) frente a temperaturas comprendidas entre los 60° C y 200° C . Los valores medidos mediante este procedimiento se utilizan para desarrollar 2.1. MÉTODO SUPERPAVE. 9 diagramas temperatura – viscosidad, los que son utilizados para estimar las temperaturas de mezclado y compactación a utilizar durante el diseño de las mezclas asfálticas en caliente. Este equipo determina la viscosidad rotacional mediante la medición del torque necesario para mantener una velocidad rotacional constante de un eje cilíndrico que gira sumergido en una muestra termostáticamente controlada. Este torque está directamente relacionado a la viscosidad del ligante. Vale la pena destacar que es aplicable a una extensa diversidad de asfaltos, tanto modificados como no modificados. El RV permite medir las propiedades del asfalto en su estado líquido (Newtoniano). Figura 1. Viscosímetro Rotacional Brookfield (RV).

Reómetro de Viga de Flexión (BBR). Como consecuencia de que los ligantes asfálticos son rígidos a bajas temperaturas, en algún punto a lo largo del estado de tensiones se excederá la resistencia del material provocando grietas en la capa asfáltica. Las pruebas realizadas en la viga de flexión describen como se comportará la carpeta asfáltica frente a bajas temperaturas, más como un sólido elástico. El BBR mide la deflexión en el punto medio de una viga de ligante asfáltico que se encuentra simplemente apoyada, la cual es sometida a una carga constante aplicada durante 240 s y a temperatura controlada (relacionada con la temperatura experimentada por el pavimento en el área geográfica en la cual se considera usar). Dos parámetros son evaluados con el ensayo BBR: 1. El valor m : que es una medida de cómo la rigidez del asfalto cambia en función de las cargas

aplicadas y corresponde a la pendiente de la curva generada por el logaritmo de la rigidez versus el logaritmo del tiempo. 2. La rigidez o fluencia en flexión (S): que es una medida de cómo el asfalto resiste la constante aplicación de cargas. El ensayo opera en un rango de temperaturas desde los -36° C hasta los 22° C, siendo aplicable a materiales con valores de rigidez en flexión entre 20 MPa y 1 GPa y además pueden ser utilizados materiales en estado original o envejecido. La rigidez o la deformabilidad flexural en creep describen la respuesta tensión – deformación - tiempo de ligantes asfálticos frente a bajas temperaturas dentro del rango de respuesta viscoelástica lineal. 12 Para minimizar la tendencia al agrietamiento térmico SUPERPAVE controla los siguientes aspectos: $S < 300$ MPa, $\text{valor-m} = d \log(S(t)) / d \log(t) \leq 0.3$ en muestras envejecidas en RTFO y PAV. Figura 2.3. Reómetro de Viga de Flexión (BBR).

Ensayo de Tracción Directa (DTT). El DTT permite determinar la deformación y tensión de falla en ligantes asfálticos sometidos a velocidad de deformación constante con bajas temperaturas, contenidas dentro del rango entre 6° C hasta -36° C, en las cuales el asfalto muestra un comportamiento quebradizo. Para la prueba se deben confeccionar probetas vaciando ligante asfáltico en un molde adecuado para ello. Para poder traspasar el esfuerzo de tracción desde la máquina de ensayo a la probeta de ligante se utilizan dos terminales plásticos hechos de polimetilmetacrilato, a los cuales el asfalto se adhiere en forma fácil. Un transductor de desplazamiento mide la elongación de la probeta al ser estirada a una tasa constante de 1 mm/minuto, registrándose la carga máxima alcanzada, la deformación de falla y tensión de falla. El DTT fue desarrollado para ligantes asfálticos a temperaturas en las cuales muestran una falla frágil o frágil – dúctil, produciéndose esta cuando surge una fractura en la probeta; una falla dúctil se genera cuando la probeta simplemente se alarga sin generar la fractura. En ningún caso esta prueba es aplicable en temperaturas donde se produce una falla por fluencia dúctil. Vale la pena destacar que este ensayo sólo se requiere cuando los resultados obtenidos en BBR no son totalmente satisfactorios. 13 Para minimizar la tendencia al agrietamiento térmico SUPERPAVE controla los siguientes aspectos: $300 \text{ Mpa} < S < 600 \text{ Mpa}$, $\text{valor-m} < 0.3$ y $\epsilon > 0.01$ en muestras envejecidas en RTFO y PAV. Figura 4. Ensayo de Tracción Directa (DTT).

Horno de Película Delgada Rotatoria (RTFO). Los ligantes asfálticos envejecen ante todo debido a dos diferentes mecanismos: la pérdida de aceites contenidos en el asfalto mediante procesos de volatilización y por la reacción con el oxígeno presente en el medio ambiente (oxidación). Durante la fabricación de la mezcla asfáltica en la planta en caliente y la colocación de esta, los ligantes asfálticos envejecen debido a las altas temperaturas y al aire involucrado en el proceso. El RTFO es usado para simular esta forma de envejecimiento. Así, este ensayo es usado para medir el efecto de la continua exposición al calor y a la circulación de aire en una película en movimiento de materiales asfálticos semisólidos. Dicha muestra se calienta en un horno durante 75 minutos a una temperatura de 163° C. Los efectos de este tratamiento se determinan en base a mediciones de las propiedades del asfalto antes y después del ensayo. El RTFO sirve principalmente para dos propósitos: 1. Proveer y envejecer los productos asfálticos para ser usados en futuros ensayos o para la determinación de propiedades físicas. 2. Determinar la cantidad de masa asociada a las pérdidas volátiles desde el asfalto durante la prueba. 14 Figura 5. Horno de Película Delgada Rotatoria (RTFO)

Envejecimiento en Recipiente Presurizado (PAV). Después que el pavimento asfáltico es construido y abierto al tráfico, el envejecimiento continuará principalmente por la oxidación provocada por la acción de temperaturas. Para simular esta clase de envejecimiento en servicio al largo plazo, SHRP desarrolló el PAV. Este método está diseñado para simular el envejecimiento (por oxidación) acelerado que ocurre en ligantes asfálticos durante la vida de servicio del pavimento, mediante aire presurizado (a 2.10 MPa) y temperaturas elevadas. Para poder efectuar este ensayo se necesita una muestra de asfalto previamente envejecida en un Horno de Película Delgada Rotatoria (RTFO), muestra que se colocará en bandejas de acero inoxidable para ser envejecida a la temperatura deseada (según el grado del ligante asfáltico) durante un tiempo aproximado de 20 horas. De esta manera, las propiedades físicas del ligante asfáltico son medidas para determinar su estado tras varios años de servicio. Figura 2.6. Envejecimiento en Recipiente Presurizado (PAV).

2.3. Diseño SUPERPAVE

En 1987, el SHRP (Strategic Highway Research Program) comenzó el desarrollo de un nuevo sistema de especificación para materiales asfálticos. El producto final es un sistema conocido como SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavement). Este sistema además de ser una potente herramienta computacional que ayuda en la selección de materiales asfálticos y diseño de la mezcla, representa un sistema más avanzado de especificación de los materiales componentes, diseño de mezclas asfálticas y su análisis y la predicción de la performance de los pavimentos, incluyendo equipos de ensayo, métodos de ensayo y criterios. (Marin Uribe & Guzman Melendez, 2003).

El método Superpave además de incluir un procedimiento más profundo para seleccionar los materiales con base a las condiciones del proyecto, de utilizar un mecanismo de compactación más representativo, inicia el diseño seleccionando la granulometría del agregado. Tanto la selección de la granulometría como el porcentaje de asfalto se hace utilizando un paquete de especificaciones mucho más completa que la de los otros métodos; incluye especificaciones volumétricas, de relación filler/porcentaje de asfalto efectivo, de susceptibilidad al agua y de requerimientos mecánico o de comportamiento para los niveles II y III. (Marin Uribe & Guzman Melendez, 2003).

En este método se presentan tres niveles de diseño de mezcla, incluyendo el diseño volumétrico en cada uno de estos niveles.

Nivel 1

Se presentan especificaciones volumétricas y controles de diseño volumétrico.

Nivel 2

Parte del diseño volumétrico y se realizan ensayos basados en el comportamiento mecánico de las mezclas, esto permite la optimización del diseño de la mezcla para que resista la deformación permanente, agrietamiento por fatiga y fisuración por bajas temperaturas.

Nivel 3

Los ensayos del nivel 3 proveen una predicción más confiable del comportamiento del pavimento. Los alcances y los ensayos requeridos para los tres niveles se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Niveles de diseño de mezclas Superpave

Tránsito, ESALs	Nivel de diseño	Requerimiento de ensayo
ESALs < 10 ⁶	1	Diseño volumétrico
10 ⁶ < ESALs < 10 ⁷	2	Diseño volumétrico + ensayos de predicción de desempeño
ESALs > 10 ⁷	3	Diseño volumétrico + aumento de los ensayos de predicción de desempeño
En todos los casos, la susceptibilidad a la humedad debe ser evaluada usando la norma AASTHO T 283		

Fuente: Comparación de las mezclas diseñadas por el método Marshall y las diseñadas por el método Superpave

2.4. Evaluación Superpave para los agregados minerales

Dentro del sistema Superpave se especifican dos tipos de propiedades de los agregados: las propiedades consideradas de origen y propiedades de consenso.

2.4.1. Propiedades de origen

Las propiedades de origen son las que se suelen utilizar para calificar los agregados de origen local. Los investigadores SHRP creyeron que alcanzar estas propiedades era importante, pero no especificaron valores críticos por ser estos muy específicos del origen. Las propiedades de origen son: (Marin Uribe & Guzman Melendez, 2003).

Tenacidad, Durabilidad, Alterabilidad, y materiales perjudiciales.

2.4.1.1. Tenacidad

La tenacidad es el porcentaje de pérdida de material en una mezcla de agregados durante el ensayo de abrasión los Ángeles. La norma es AASHTO T 96, “Resistencia a la abrasión del agregado grueso de pequeño tamaño mediante el uso de la máquina de los Ángeles”. Este ensayo estima la resistencia del agregado grueso a la abrasión y degradación mecánica durante el manipuleo, construcción y servicio. Se realiza

sometiendo al agregado grueso, usualmente mayor de 2.36 mm, a impacto y triturado por medio de esferas de acero. El resultado del ensayo es el porcentaje de pérdida, esto es el porcentaje en peso del material grueso degradado durante el ensayo como el resultado de la acción mecánica. Los valores típicos de pérdida máximos están aproximadamente entre 35 y 45 %. (Marin Uribe & Guzman Melendez, 2003).

2.4.1.2. Durabilidad

Es el porcentaje de pérdida del material en una mezcla de agregados durante el ensayo de durabilidad de los áridos sometidos al ataque con sulfato de sodio o sulfato de magnesio (Sodium or magnesium sulfate soundness test). La norma es la AASHTO T 104, "Soundness of aggregate by use by of sodium or magnesium sulfate". Este ensayo estima la resistencia del agregado al deterioro por la acción de los agentes climáticos durante la vida útil del pavimento. Puede aplicarse tanto a agregados gruesos como finos. El ensayo se realiza exponiendo a una muestra de agregado a ciclos alternativos de baños de inmersión en una solución saturada de sulfato de sodio o magnesio y secado en horno. Una inmersión y un secado se consideran un ciclo de durabilidad. Durante la fase del secado, las sales precipitan en los vacíos permeables del agregado. En la re inmersión las sales se rehidratan y ejercen fuerzas de expansión interna que simulan las fuerzas de expansión del agua congelada. El resultado del ensayo es el porcentaje total de pérdida sobre varios tamices para un número requerido de ciclos. Los valores máximos de pérdida son aproximadamente de 10 a 20 % para cinco ciclos. (Marin Uribe & Guzman Melendez, 2003).

2.4.2. Propiedades de consenso Superpave

Los agregados juegan un papel fundamental en el comportamiento de las mezclas bituminosas. Aunque en el programa SHRP no se desarrollaron nuevos métodos de ensayo, si se adecuaron los existentes para adaptarlos al sistema Superpave. (Marin Uribe & Guzman Melendez, 2003).

Las propiedades de consenso de los agregados son aquellas que los investigadores SHRP creyeron críticas para conseguir mezclas bituminosas de buen comportamiento. Deben alcanzar valores que varían con la intensidad del tráfico y con la posición de la capa en

el pavimento. Las intensidades de tráfico más elevadas y las mezclas bituminosas para capas más superficiales necesitan cumplir unas prescripciones más estrictas en las propiedades de consenso como son: (Marin Uribe & Guzman Melendez, 2003).

Angularidad del agregado grueso.

Angularidad del agregado fino.

Partículas largas y aplanadas.

Contenido en arcillas (equivalente arena).

2.4.2.1. Angularidad del agregado grueso

Esta propiedad asegura un alto grado de fricción interna del agregado y resistencia al ahuellamiento. Se define como el porcentaje en peso del agregado mayor de 4.75 mm con una o más caras fracturadas. (Marin Uribe & Guzman Melendez, 2003).

Usualmente deben contarse las partículas manualmente para determinar las caras fracturadas. Una cara fracturada se define como alguna superficie fracturada que ocupa más del 25 % del área del contorno de la partícula del agregado visible en esa orientación. (Marin Uribe & Guzman Melendez, 2003).

Tabla 3. Requerimiento Superpave para la angularidad del agregado fino

Tránsito en 10⁶ ESALs	Profundidad desde la sup < 100 mm	Profundidad desde la sup > 100 mm
< 0.30	55/-	-/-
< 1	65/-	-/-
< 3	75/-	50/-
< 10	85/80	60/-
< 30	95/90	80/75
< 100	100/100	95/90
≥ 100	100/100	100/100

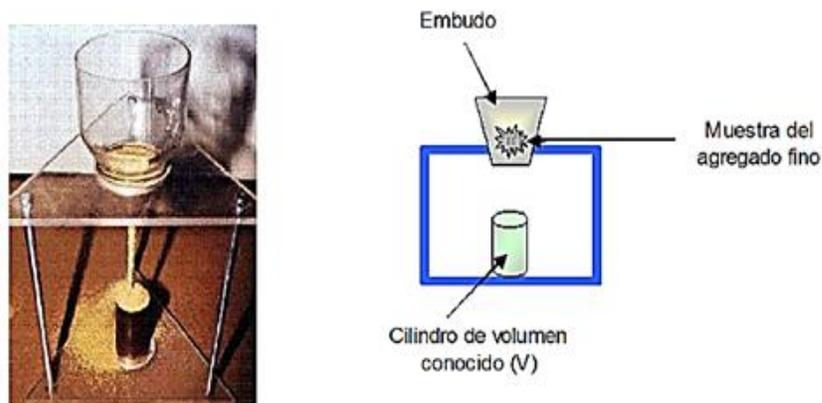
Fuente: Comparación de las mezclas diseñadas por el método Marshall y las diseñadas por el método Superpave

2.4.2.2. Angularidad del agregado fino

Esta propiedad asegura un alto grado de la fricción interna del agregado fino y alta resistencia al ahuellamiento. Se define como el porcentaje de vacíos de aire presente en los agregados, menores de 2.36 mm, levemente compactados. Contenido de vacíos mayores significan más caras fracturadas. (AASHTO TP 33, Test Method for uncompacted void content of fine aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading) (Method A)). (Marin Uribe & Guzman Melendez, 2003).

Determinando el peso del agregado fino (W) que llena el cilindro de volumen conocido (V), el contenido de vacíos puede calcularse como la diferencia entre el volumen del cilindro y el volumen del agregado fino en el cilindro. La gravedad específica bruta del agregado fino (G_{sb}) se emplea para calcular el volumen del agregado fino. (Marin Uribe & Guzman Melendez, 2003).

Figura 4. Ensayo para la determinación de la angularidad del agregado fino



Fuente: Comparación de las mezclas diseñadas por el método Marshall y las diseñadas por el método Superpave

$$V_v = \frac{W}{G_{sb}}$$

Donde:

W= Peso de la arena seca.

G_{sb} = Gravedad específica del agregado fino.

Tabla 4. Requerimiento Superpave para la angularidad del agregado fino

Tránsito en 10⁶ ESALs	Profundidad desde la sup < 100 mm	Profundidad desde la sup > 100 mm
< 0.30	-	-
< 1	40	-
< 3	40	40
< 10	45	40
< 30	45	40
< 100	45	45
≥ 100	45	45

Fuente: Comparación de las mezclas diseñadas por el método Marshall y las diseñadas por el método Superpave

Los valores especificados son los porcentajes de vacíos para los agregados finos levemente compactados.

2.4.2.3. Partículas alargadas y planas

El concepto es el porcentaje en peso del agregado grueso de las partículas que se clasifiquen como largas o planas según las que se estén evaluando. Se define como largas las partículas cuya relación longitud-ancho supere un valor (Superpave establece 5). Como plana aquellas partículas cuya relación espesor-ancho sea menor que un valor determinado (Superpave establece 0.2). Las partículas alargadas son indeseables porque tienden a quebrarse durante la construcción y bajo tránsito. El procedimiento es la Norma ASTM D 4791, “Partículas alargadas y chatas en agregados gruesos” y se aplica a agregados gruesos mayores de 4.75 mm. (Marin Uribe & Guzman Melendez, 2003).

Se miden dos valores: el porcentaje de partículas planas y el porcentaje de partículas alargadas. En la Tabla 4, se muestran los valores especificados para las partículas planas y alargadas en el sistema Superpave.

Tabla 5. Requerimiento Superpave para las partículas planas y alargadas

Tránsito en 10⁶ ESALs	Promedio
< 0.30	-
< 1	-
< 3	10
< 10	10
< 30	10
< 100	10
≥ 100	10

Fuente: Comparación de las mezclas diseñadas por el método Marshall y las diseñadas por el método Superpave

2.4.2.4. Contenido de arcilla o prueba de equivalente de arena

El contenido de arcilla es el porcentaje de material arcilloso presente en la fracción de agregado menor de 4.75 mm (norma AASHTO T 176, “Finos plásticos en agregados graduados y suelos usando el ensayo del equivalente de arena”).

En este ensayo, una muestra de agregado fino se vierte en un cilindro graduado que contiene una solución floculante; el cilindro se agita para separar los finos de arcilla presentes en el agregado. La solución floculante fuerza al material arcilloso a quedar en suspensión por encima del agregado granular. Después de un periodo que permite la sedimentación, se mide la altura de arcilla suspendida y la altura de la arena sedimentada. El valor del equivalente de

arena se calcula como el cociente entre la altura de la arena y la lectura de la altura de la arcilla, expresada en porcentaje. (Marin Uribe & Guzman Melendez, 2003).

Tabla 6. Requerimiento Superpave para el contenido de arcilla (E.A)

Tránsito en 10⁶ ESALs	Promedio
< 0.30	40
< 1	40
< 3	40
< 10	45
< 30	45
< 100	50
≥ 100	50

Fuente: Comparación de las mezclas diseñadas por el método Marshall y las diseñadas por el método Superpave

Especificación Superpave para un nivel de tránsito entre 10 - 30 millones de ejes equivalentes y una profundidad desde la superficie menor 100 mm.

Tabla 7. Especificaciones Superpave para los agregados

Característica	Especificaciones Superpave
Angularidad del agregado fino	45 % mín.
Angularidad del agregado grueso	95/90 %
Partículas alargadas y planas	10 % máx.
Equivalente de arena	45 % mín.
Desgaste en la máquina de los ángeles	35 % máx.

Fuente: Elaboración propia

2.5. Análisis de la granulometría Superpave

En el presente capítulo se discuten los diferentes criterios establecidos por el método Superpave para la evaluación de una granulometría para mezclas asfálticas en caliente.

Los puntos a discutir en el presente capítulo son:

Gráfica elevada al exponente 0,45.

Línea de máxima densidad.

Mecanismos de control de la granulometría.

La zona restringida.

2.5.1. Gráfica elevada al exponente 0,45

Para especificar la granulometría, Superpave ha modificado el enfoque de la granulometría Marshall, tomando en consideración recomendaciones de la FHWA.

Emplea el exponente 0.45 en la carta de granulometría para definir la granulometría permitida (gráfica de Fuller), mediante una técnica gráfica única para juzgar la distribución de tamaños acumulados de partículas de una mezcla de agregados. Las ordenadas de la carta son los porcentajes que pasan, en escala aritmética, las abscisas representan las aberturas de los tamices en mm, elevadas a la potencia 0.45.

Origen de la gráfica de Fuller

La curva de distribución granulométrica de un material grueso, no uniforme, o gráfica de Fuller tiene su origen en la ecuación de Fuller, la cual representa condiciones de máxima densidad y mínimo de vacíos en el agregado mineral (VMA). La ecuación se describe a continuación:

$$P_i = \left(\frac{D_i}{D_{\text{máx}}} \right)^N$$

Donde:

P_i = Acumulado que pasa, en decimal, para el diámetro de la partícula D_i .

D_i = Diámetro de la partícula.

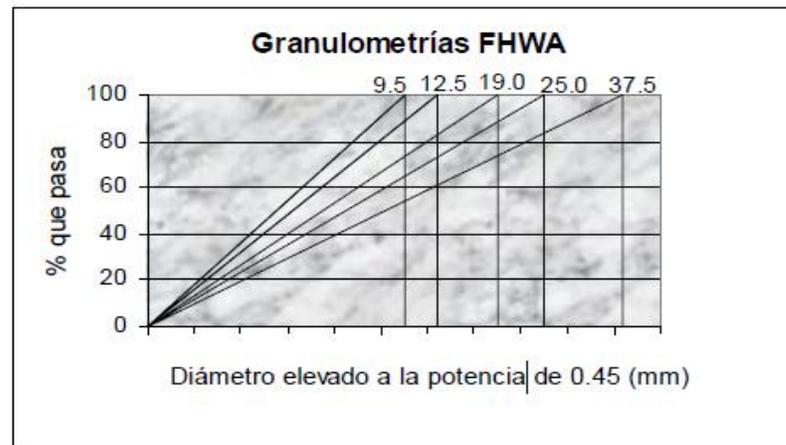
$D_{\text{máx}}$ = Tamaño máximo del material.

N = Valor asociado a la forma de la curva.

Con la expresión de Fuller, la graduación de agregados para una mezcla asfáltica se puede expresar por un par de números, esto es un coeficiente de forma (n) y el tamaño máximo ($D_{\text{máx}}$). La literatura sugiere que cuando el factor de forma tiene un valor de 0.45 la mezcla es capaz de alcanzar las máximas densidades cuando se compacta.

La Figura 5, muestra la representación con el diámetro elevado a la potencia de 0.45 que fue introducida en los años 60 por la FHWA (Federal Highway Association) de Estados Unidos. Esta representación permite visualizar la línea de máxima densificación y evitar que la curva de graduación de diseño caiga encima de ella

Figura 5. Representación de granulometría según FHWA



Fuente: Influencia de la granulometría en las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica. Publicación técnica N° 299

Un rango importante de esta carta es la granulometría de máxima densidad; corresponde a una línea recta extendida desde la abscisa de tamaño máximo de agregado y ordenada 100 %, hasta el origen (0 %, 0 mm).

Importancia de la Gráfica de Fuller

La importancia de usar la gráfica de Fuller, es que permite expresar la graduación de agregados en una mezcla asfáltica con dos números (n_i/D_i). el primero está referido a la forma de la curva y a la estructura y arreglo geométrico de la potencial masa compactada, y el otro al tamaño máximo del agregado. Esto facilita la expresión y manejo de la graduación, de las especificaciones granulométricas y hasta la definición de la buena graduación y el potencial de densificación de la mezcla.

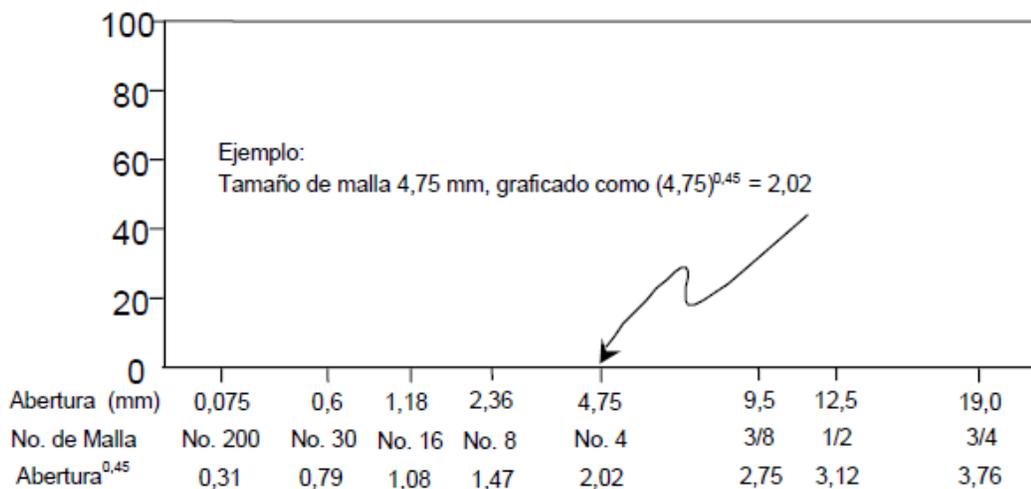
El ajuste de Fuller también puede servir para controlar la variabilidad de la producción diaria de la mezcla en planta. Este método para evaluar la variabilidad de una granulometría aventaja al método tradicional de tolerancias de mallas individuales pues

aquel considera a la graduación de manera integral; las tolerancias individuales introducen de por sí un sesgo muy significativo que afecta principalmente al contratista. Una combinación de agregados es un todo, de esto pueden dar fe los manejadores de plantas trituradoras y cribadoras que cuando intentan modificar el porcentaje que pasa de un tamaño los otros se alteran irremediabilmente.

Se observa que hay una influencia igualitaria de $D_{m\acute{a}x}$ y n en la trabajabilidad. En el \u00e1mbito de las graduaciones de Superpave, la facilidad de manejo y colocaci\u00f3n aumenta a medida que las mezclas tienen a la vez tama\u00f1o m\u00e1ximo m\u00e1s peque\u00f1os y estructuras m\u00e1s densas. Una mezcla densa y otra abierta tienen significativamente diferentes trabajabilidades para un mismo tama\u00f1o m\u00e1ximo.

Regresando a la t\u00e9cnica gr\u00e1fica \u00fanica para juzgar la distribuci\u00f3n de tama\u00f1os acumulados de part\u00edculas de una mezcla de agregados, en la Figura 6, se ilustra c\u00f3mo se calcula el valor de la abscisa. En el ejemplo la malla de 4.75mm se grafica como 2.02.

Figura 6. Ilustraci\u00f3n de c\u00f3mo se grafican las abscisas



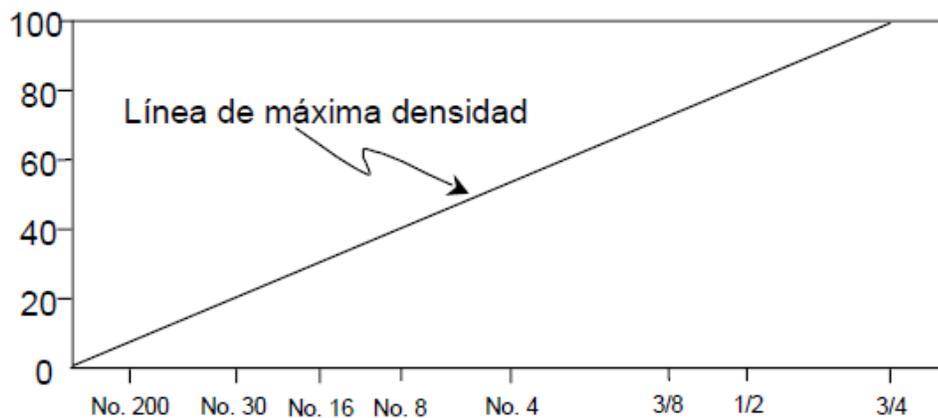
Fuente: Influencia de la granulometr\u00eda en las propiedades volum\u00e9tricas de la mezcla asf\u00e1ltica. Publicaci\u00f3n t\u00e9cnica N\u00b0 299

2.5.2. Línea de máxima densidad

Línea de máxima densidad

Corresponde a una línea recta extendida desde la abscisa de tamaño máximo de agregado y ordenada 100 %, hasta el origen (0 %, 0 mm), como se observa en la Figura 7.

Figura 7. Gradación de máxima densidad para tamaño máximo de 19 mm



Fuente: Influencia de la granulometría en las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica. Publicación técnica N° 299

La granulometría de máxima densidad representa la graduación para la cual las partículas de agregado se acomodan entre sí, conformando el arreglo volumétrico más compacto posible. Evidentemente, esta granulometría debe evitarse porque habría muy poco espacio entre los agregados como para permitir el desarrollo de una película de asfalto lo suficientemente gruesa, como para obtener una mezcla durable.

2.5.3. Mecanismos de control de la granulometría

Para especificar la granulometría del agregado, se emplearon dos conceptos:

Los puntos de control y la zona restringida. Los puntos de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica y corresponden al tamaño máximo nominal, un tamaño intermedio (2.36 mm) y un tamaño de finos (0.075 mm).

Los puntos de control fueron seleccionados para cumplir objetivos específicos, los cuatro puntos de control superiores, mínimo 100 % que pasa la malla de tamaño

máximo, 90 a 100 % pasando la malla del tamaño máximo nominal y 90 % máximo que pasa la malla menor inmediata que la del tamaño máximo nominal, se utilizan para verificar que se cumpla con la definición de tamaño máximo nominal y tamaño máximo.

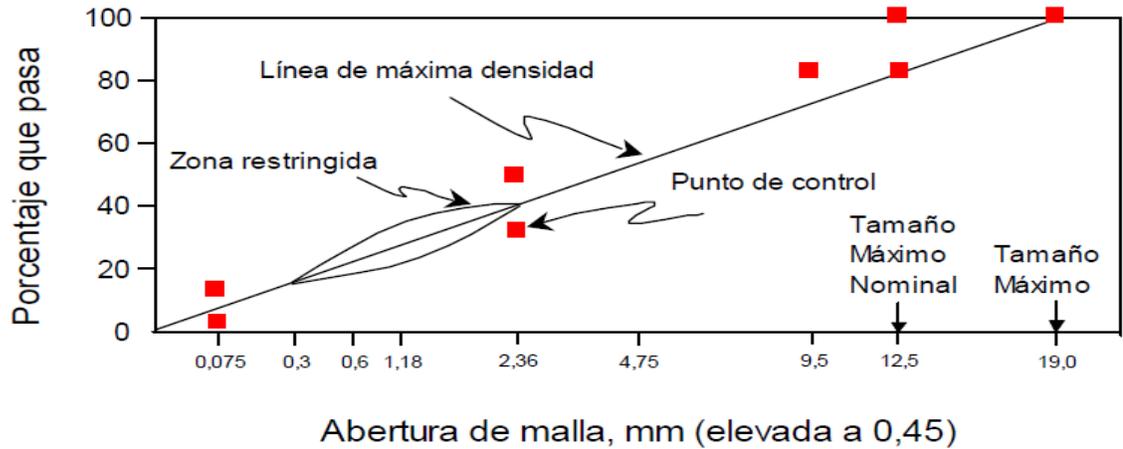
Los cuatro puntos de control inferiores sirven para propósitos diferentes. Los requerimientos máximos y mínimos para la malla N° 200 (75 μm), son típicamente para mezclas asfálticas de granulometría cerrada. Otras mezclas como las SMA, las cuales tienen porcentajes que pasan la malla N° 200 de 10 a 14 % no cumplen con esta especificación.

Los puntos de control para la malla N° 8 (2.36 mm), son utilizados para controlar partículas con tamaño de arena en la mezcla. El punto superior limita la cantidad de arena en la mezcla con el fin de evitar mezclas asfálticas arenosas las cuales generalmente no cumplen con las especificaciones. El punto inferior asegura una cantidad de arena adecuada en la mezcla para cumplir con los requerimientos de una granulometría densa. Una granulometría con granulometría abierta (open graded) o mezcla porosa no cumplirá con estos puntos de control.

La zona restringida ha sido especificada para asegurarse que se desarrolla una adecuada estructura en la mezcla. La zona restringida se ubica entre los tamaños intermedios (4.75 o 2.36 mm) y 0.30 mm. Forma una banda por la cual la curva granulométrica no deberá pasar. Se especifica que las granulometrías deben pasar ya sea abajo o arriba de la zona. Mezclas que pasan por arriba tenderán a ser arenosas y a tener estructuras de agregado débiles en comparación con las que pasan debajo de la zona restringida.

Granulometrías que pasan a través de la zona de restricción (desde abajo), se llaman "humped graduations" (graduaciones con joroba) por la forma característica de joroba que se forma en la curva al pasar por aquella zona. En la mayoría de los casos, estas curvas indican una mezcla con mucha arena fina en relación con el total de la arena. Las granulometrías que violan la zona restringida poseen un esqueleto granular débil que depende demasiado de la rigidez del cemento asfáltico para alcanzar una mezcla con resistencia al corte. La Figura 7, muestra un esquema para un tamaño máximo de agregado de 19 mm.

Figura 8. Límites para las granulometrías Superpave



Fuente: Influencia de la granulometría en las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica. Publicación técnica N° 299

Un diseño de la estructura del agregado que pase entre los puntos de control y evite la zona de restricción, satisface los requerimientos granulométricos de Superpave.

En la Tabla 9, se presentan las designaciones propuestas en la metodología Superpave.

Tabla 8. Graduaciones para mezclas Superpave

Designación Superpave	Tamaño máximo nominal	Tamaño máximo
37.50 mm	37.50	50.00
25.00 mm	25.00	37.50
19.00 mm	19.00	25.00
12.50 mm	12.50	19.00
9.50 mm	9.50	12.50

Fuente: Influencia de la granulometría en las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica. Publicación técnica N° 29

Tabla 9. Distintos tipos de requerimientos para granulometrías Superpave

Tamiz		Tamaño máximo nominal 37.50 mm				Tamaño máximo nominal 25.00 mm				Tamaño máximo nominal 19.00 mm				Tamaño máximo nominal 12.50 mm				Tamaño máximo nominal 9.00 mm			
		Puntos de control		Zona restringida		Puntos de control		Zona restringida		Puntos de control		Zona restringida		Puntos de control		Zona restringida		Puntos de control		Zona restringida	
Pulg	mm	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
	50.00		100.00																		
	37.50	90.00	100.00				100.00														
1"	25.00		90.00			90.00	100.00				100										
3/4"	19.00						90.00			90	100				100.00						
1/2"	12.50										90			90.00	100.00					100	
3/8"	9.50														90.00				90	100	
N° 4	4.75			34.70	34.70			39.5	39.5											90	
N° 8	2.36	15.00	41.00	23.30	27.30	19.00	45.00	26.8	30.8	23	49	34.6	34.6	28.00	58.00	39.10	39.10	32	67	47.2	47.2
N° 16	1.18			15.50	21.50			18.1	24.1			22.3	28.3			25.60	31.60			31.6	37.6
N° 30	0.60			11.70	15.70			13.6	17.6			16.7	20.7			19.10	23.10			23.5	27.5
N° 50	0.30			10.00	10.00			11.4	11.4			13.7	13.7			15.50	15.50			18.7	18.7
N° 200	0.075	0.00	6.00			1.00	7.00			2	8			2.00	10.00			2	10		

Fuente: Evaluación de la influencia de la granulometría en el desempeño de las mezclas asfálticas en caliente

2.6. Parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica

El contenido de vacíos de aire es una propiedad importante que se utiliza como base en la selección del contenido del ligante asfáltico.

Superpave define los vacíos del agregado mineral (VAM), como la suma del volumen de vacíos de aire y del asfalto efectivo, en una muestra compactada. (Delgado Alamilla & Garnica Anguas, 2006).

El VAM representa los vacíos entre las partículas del agregado. Los valores mínimos especificados para el VAM en cuanto al porcentaje de diseño de vacíos de aire del 4 % son una función del tamaño máximo nominal del agregado. La Tabla 10, muestra los requerimientos del Superpave para el VAM. (Delgado Alamilla & Garnica Anguas, 2006).

Tabla 10. Criterios para VAM

Tamaño máximo de agregado	Porcentaje de VAM mínimo
9.50 mm	15.00
12.50 mm	14.00
19.00 mm	13.00
25.00 mm	12.00
37.50 mm	11.00

Fuente: Influencia de la granulometría en las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica

Los vacíos llenos de asfalto (VFA) son el porcentaje de VAM que contiene ligante asfáltico. Consecuentemente, VFA es el volumen de ligante asfáltico efectivo expresado como el porcentaje de VAM. (Marin Uribe & Guzman Melendez, 2003).

El rango aceptable del VFA de diseño para 4 % de vacíos de aire es una función del nivel de tránsito.

Tabla 11. Criterios para VFA

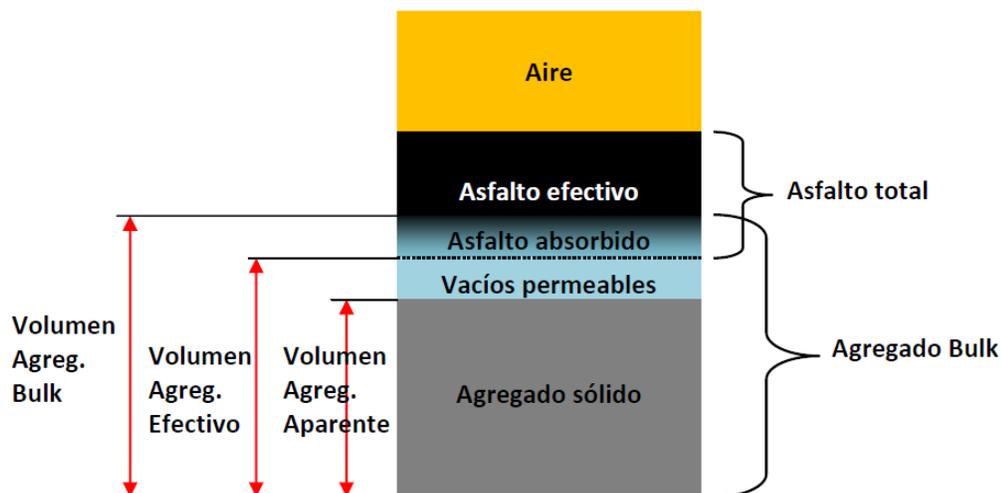
Tránsito, ESALs (millones)	Porcentaje de VFA de diseño
< 0.30	70 – 80
< 1	65 – 78
< 3	65 – 78
< 10	65 – 75
< 30	65 – 75
< 100	65 – 75
> 10	65 – 75

Fuente: Influencia de la granulometría en las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica

Relación de polvo, llenante – asfalto efectivo ($P_{0.075} / P_{be}$)

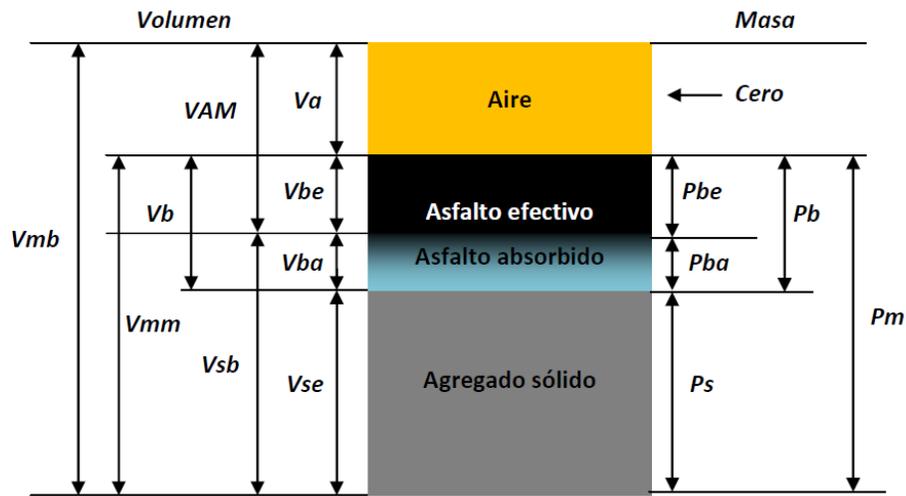
Los valores de estas propiedades son calculados a partir de medidas de las gravedades específicas de los materiales constitutivos, (ligante, agregado grueso, agregado fino y de la llenante), de la MAC compactada y sin compactar y además, de las proporciones de los materiales constitutivos en la fórmula de trabajo de MAC. (Beltrán Valencia & Muñoz Valencia, 2008).

Figura 9. Diagrama de fases



Fuente: Susceptibilidad de las mezclas asfálticas a cambios volumétricos generados por la compactación adicional en condiciones de servicio

Figura 10. Diagrama de fases (volúmenes y masas considerados en los análisis volumétricos)



Fuente: Susceptibilidad de las mezclas asfálticas a cambios volumétricos generados por la compactación adicional en condiciones de servicio

2.6.1. Vacíos de Aire (Va)

Son las bolsas de aire que se encuentran entre las partículas de agregados cubiertos con asfalto, en una mezcla asfáltica compactada. Se expresa como porcentaje del volumen total del espécimen. (Beltrán Valencia & Muñoz Valencia, 2008).

Se calcula el porcentaje de vacíos de aire (Va), en la MAC compactada, con la siguiente expresión:

$$V_a = \frac{G_{em} - G_{eb}}{G_{em}} * 100$$

Donde:

G_{em}= Gravedad específica máxima teórica.

G_{eb}= Gravedad específica bulk.

2.6.2. Vacíos en el Agregado Mineral (VAM)

Es el volumen inter granular de vacíos entre partículas del agregado de una MAC compactada (incluye vacíos de aire y el volumen de asfalto efectivo). Se expresa como

porcentaje del volumen total del espécimen. (Beltrán Valencia & Muñoz Valencia, 2008).

Se calcula el porcentaje de vacíos entre las partículas del agregado mineral (VAM), con la siguiente expresión:

$$\text{VAM} = 100 - \frac{\text{Geb} * \text{Ps}}{\text{Geb}}$$

Donde:

Geb= Gravedad específica bulk del agregado combinado.

Ps= Porcentaje de agregado respecto al peso total de la mezcla.

$$\text{Geb} = \frac{\text{P1} + \text{P2} + \text{P3}}{\frac{\text{P1}}{\text{G1}} + \frac{\text{P2}}{\text{G2}} + \frac{\text{P3}}{\text{G3}}}$$

Donde:

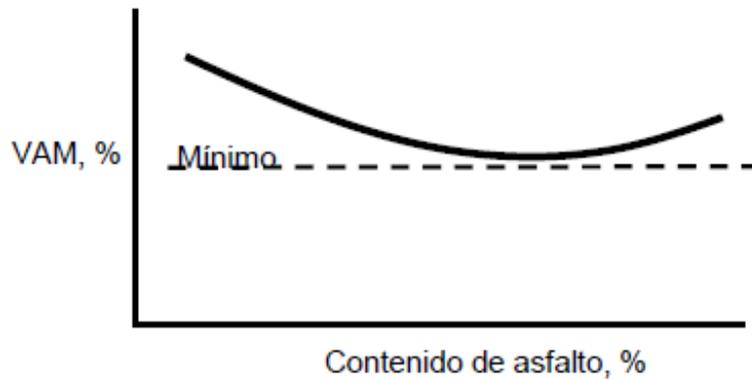
P1, P2 y P3= Porcentaje de agregado grueso, agregado fino y llenante mineral respectivamente, respecto al peso total del agregado.

G1, G2 y G3= Gravedad específica del agregado grueso, agregado fino y llenante mineral respectivamente.

Los valores de VAM generalmente disminuyen hasta un valor mínimo, y luego aumenta con incrementos en el contenido de asfalto, exhibiendo una curva en forma de U, como se observa en la Figura 11. Esto parece ser una contradicción a la definición, sin embargo, debemos recordar que el VAM está íntimamente relacionado con la gravedad específica de la mezcla compactada (Gmb). (Marin Uribe & Guzman Melendez, 2003)

A medida que se incrementa el contenido de asfalto en la mezcla, ésta se vuelve más trabajable y se compacta más fácilmente, es decir, mayor masa puede ser comprimida en menos volumen. Por consiguiente, hasta cierto punto, la gravedad específica de la mezcla incrementa y el VAM disminuye. (Marin Uribe & Guzman Melendez, 2003)

Figura 11. Curva típica de VAM contra contenido de asfalto



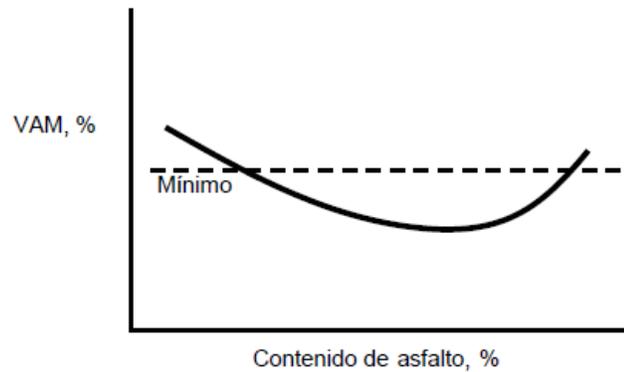
Fuente: Comparación de las mezclas diseñadas por el método Marshall y las diseñadas por el método Superpave

En algún punto, cuando el contenido de asfalto sigue aumentando, el VAM empieza a incrementarse debido a que material más denso (agregado) es desplazado relativamente por material menos denso (asfalto). Dado lo anterior, se recomienda evitar valores de VAM para contenidos de asfalto que se ubican dentro de la rama húmeda o parte derecha de la curva. (Marin Uribe & Guzman Melendez, 2003).

Contenidos de asfalto seleccionados en este rango pueden traer como consecuencia mezclas con cierta tendencia a presentar exudación o flujo plástico. En algunas mezclas la parte inferior de la curva es demasiado plana, esto significa que la compactibilidad de la mezcla es poco sensitiva al contenido de asfalto en ese rango. (Marin Uribe & Guzman Melendez, 2003).

Cuando parte de la curva cae considerablemente por debajo del criterio mínimo, como se ve en la Figura 12, el contenido de asfalto no debe ser seleccionado en los extremos de la curva, aunque los valores de VAM sean aceptables. En la parte izquierda, la mezcla se considera con muy poco asfalto y propensa a la segregación. En la parte derecha, se podría esperar la aparición de roderas en la mezcla. (Marin Uribe & Guzman Melendez, 2003).

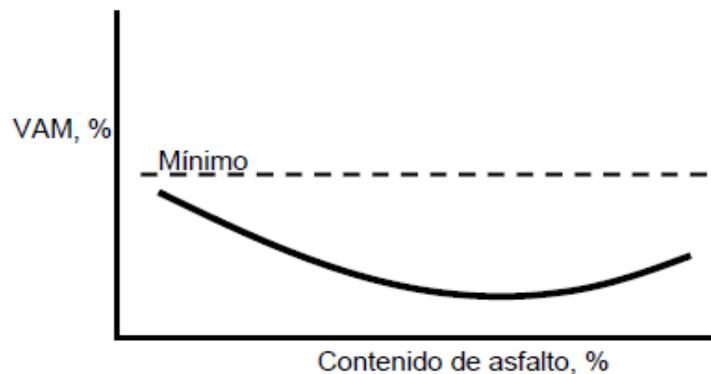
Figura 12. Evaluación de la curva de VAM



Fuente: Comparación de las mezclas diseñadas por el método Marshall y las diseñadas por el método Superpave

Si la curva cae totalmente por debajo del criterio mínimo como se muestra en la Figura 13, se debe considerar realizar un nuevo diseño, cambiando la graduación de la mezcla y en algunos casos, el tipo de agregado. (Marin Uribe & Guzman Melendez, 2003).

Figura 13. Evaluación de la curva de VAM



Fuente: Comparación de las mezclas diseñadas por el método Marshall y las diseñadas por el método Superpave

2.6.3. El Contenido Efectivo de Asfalto (Pbe)

Es el contenido total de asfalto menos la fracción de ligante asfáltico absorbida por las partículas del agregado. Se expresa como porcentaje del peso de la mezcla de pavimento compactada. (Beltrán Valencia & Muñoz Valencia, 2008).

Se calcula el contenido de asfalto efectivo, P_{be} , como porcentaje del peso de la MAC, con la siguiente expresión:

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba} * P_s}{100}$$

Donde:

P_b = Porcentaje de ligante asfáltico.

P_{ba} = Porcentaje de asfalto absorbido.

$$P_{ba} = \frac{G_b * (G_{se} - G_{sb})}{G_{sb} * G_{se}} * 100$$

Donde:

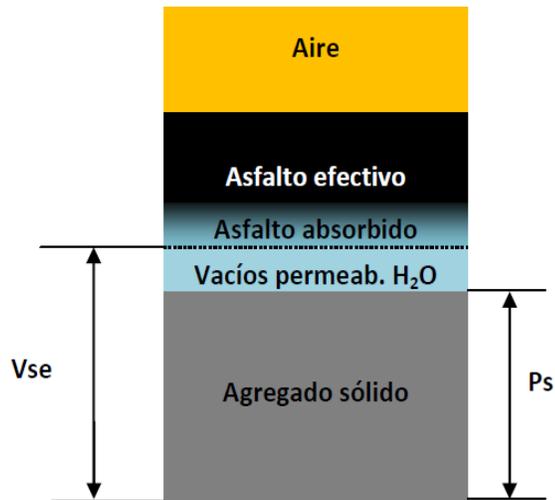
G_b = Gravedad específica del ligante asfáltico.

G_{se} = Gravedad específica efectiva del agregado.

Gravedad específica efectiva del agregado (G_{se})

La Gravedad específica efectiva del agregado (G_{se}), es la relación entre la masa en estado seco (o el peso seco en el aire - P_s) de una unidad de volumen de agregado, incluyendo los vacíos permeables no llenos de asfalto y los impermeables, o sea excluyendo los vacíos permeables al asfalto, y la masa de un igual volumen de agua (V_{se}), ambos a la misma temperatura establecida. Su valor es adimensional. (Beltrán Valencia & Muñoz Valencia, 2008).

Figura 14. Diagrama de fases para Gse



Fuente: Susceptibilidad de las mezclas asfálticas a cambios volumétricos generados por la compactación adicional en condiciones de servicio

Se calcula la gravedad específica efectiva del agregado (G_{se}), con la siguiente expresión:

$$G_{se} = \frac{100 - P_b}{\frac{100}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}$$

2.6.4. Vacíos llenos de asfalto (RBV)

Los vacíos llenos de asfalto (RBV), son la fracción de los vacíos entre agregados minerales que contiene ligante asfáltico. Se expresa como porcentaje de los vacíos entre agregados minerales o VAM. Estos representan el volumen de asfalto efectivo presente en la mezcla. (Beltrán Valencia & Muñoz Valencia, 2008).

Se calcula el porcentaje de vacíos llenos de ligante asfáltico (RBV) como una porción de los vacíos en el agregado mineral, con la siguiente expresión:

$$RBV = \frac{VAM - V_a}{VAM} * 100$$

Volumen de asfalto absorbido (Vba)

El volumen de asfalto absorbido (Vba), es el volumen de ligante asfáltico en una MAC que ha sido absorbido en los poros de las partículas de agregados. El Vba es un volumen de ligante asfáltico en la MAC que permite calcular el contenido de asfalto efectivo. (Beltrán Valencia & Muñoz Valencia, 2008).

2.6.5. Relación de polvo o relación llenante efectivo, (P_{0.075} / Pbe)

La relación de polvo o relación llenante efectivo, (P_{0.075} / Pbe), es la relación en masa, entre el porcentaje de agregado que pasa el tamiz de 0.075 mm (N° 200), P_{0.075}, y el contenido de asfalto efectivo (Pbe). (Beltrán Valencia & Muñoz Valencia, 2008).

Se calcula la relación de polvo, relación entre la llenante y el asfalto efectivo, con la siguiente expresión:

$$R. P = \frac{P_{0.075}}{Pbe}$$

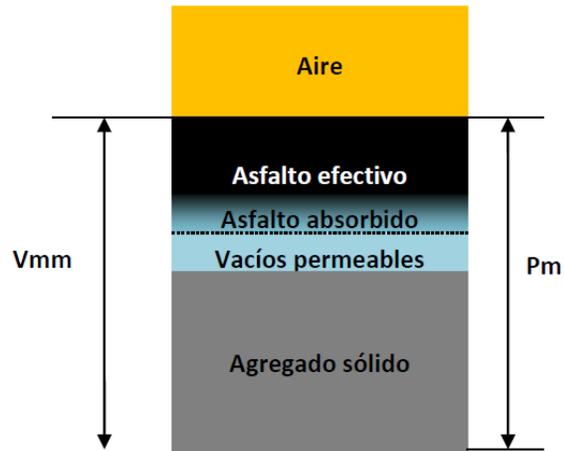
Donde:

P_{0.075}= Porcentaje de agregado que pasa el tamiz de 0.075 mm (N° 200)

Gravedad máxima teórica a 25 °C (Gem)

Es la relación entre la masa (o peso seco en el aire - Pm) de un volumen de mezcla sin compactar (sin tener en cuenta los vacíos que quedan entre las partículas cubiertas de asfalto, Va = 0) y la masa de un volumen igual de agua (Vmm) a una temperatura establecida, en este caso a 25 °C. Su valor es adimensional. (Beltrán Valencia & Muñoz Valencia, 2008).

Figura 15. Diagrama de fases para Gem



Fuente: Susceptibilidad de las mezclas asfálticas a cambios volumétricos generados por la compactación adicional en condiciones de servicio

Se calcula la gravedad máxima teórica (Gem) de la mezcla sin compactar con la siguiente expresión:

$$Gem_{25\text{ }^{\circ}\text{C}} = \frac{A}{A + D - E}$$

Donde:

A= Masa en el aire de la muestra seca al horno, gr.

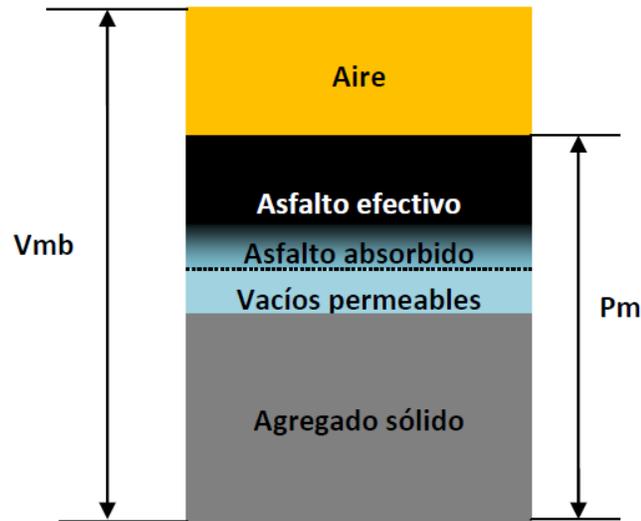
D= Masa del recipiente lleno con agua a 25°C, gr.

E= Masa del recipiente lleno con agua y muestra a 25°C, gr.

Gravedad específica bulk a 25 °C (Geb)

Es la relación entre la masa (peso en el aire-Pm) de un volumen dado de material (mezcla compactada) a una determinada temperatura, generalmente a 25°C para mezclas asfálticas, y la masa de un volumen igual de agua destilada (Vmb), libre de gas, a la misma temperatura. Su valor es adimensional. (Beltrán Valencia & Muñoz Valencia, 2008).

Figura 16. Diagrama de fases para Geb



Fuente: Susceptibilidad de las mezclas asfálticas a cambios volumétricos generados por la compactación adicional en condiciones de servicio

Se calcula la gravedad específica bulk (G_{mb}) del espécimen con la siguiente expresión:

$$G_{eb} = \frac{A}{B - C}$$

Donde:

A= Masa del espécimen seco en el aire, gr.

B-C= Masa del volumen de agua correspondiente al volumen del espécimen a 25°C, gr.

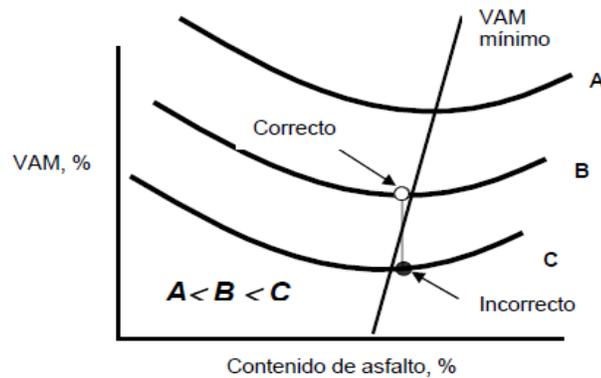
B= Masa en el aire del espécimen saturado con superficie seca, gr.

C= Masa del espécimen en agua, gr.

Efecto del nivel de compactación en el diseño

Para un mismo contenido de asfalto, los vacíos de aire (V_a) y los vacíos en el agregado mineral (V_{AM}) disminuyen para un alto nivel de compactación. En las Figuras 17 y 18 se muestran tres niveles de compactación (A,B y C) para ilustrar las consecuencias de este efecto. A,B y C representan los niveles de compactación en el laboratorio que simulan las condiciones de densificación de la mezcla en campo, para niveles de tránsito bajo, medio y alto respectivamente.

Figura 17. Evaluación de la curva de VAM

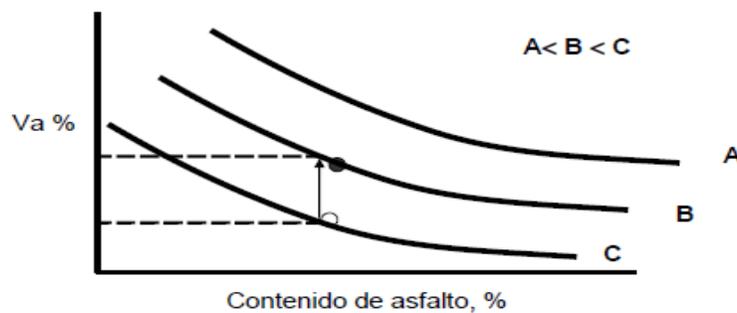


Fuente: Comparación de las mezclas diseñadas por el método Marshall y las diseñadas por el método Superpave

Si la mezcla asfáltica se diseña en el laboratorio con un nivel de compactación B cuando realmente el pavimento estará sometido a niveles de tránsito altos, como se ve en la Figura 2.18, se pueden cometer errores en la selección del contenido óptimo de asfalto.

Se puede seleccionar un valor de VAM aparentemente dentro de las especificaciones del método, pero que en realidad se ubique en la rama húmeda de valores para las condiciones de densificación reales de la mezcla asfáltica en servicio. Esta equivocación tendría como consecuencia una carpeta asfáltica propensa a presentar ahuellamiento (deformación permanente).

Figura 18. Efecto del nivel de compactación en los vacíos de aire



Fuente: Comparación de las mezclas diseñadas por el método Marshall y las diseñadas por el método Superpave

Por otro lado, si la mezcla es diseñada para un nivel de compactación C, y es colocada en un pavimento en donde el nivel de tránsito es mucho menor del que se esperaba, el porcentaje final de vacíos de aire será considerablemente mayor que el planeado como se ve en la Figura 2.18. Esta condición puede conducir a tener una carpeta asfáltica demasiado permeable, que permita el paso del agua y del aire a través de ella fácilmente. Esto tendría como consecuencia el endurecimiento prematuro del ligante asfáltico que compone a la mezcla convirtiéndose en frágil y quebradizo, produciéndose el desprendimiento del agregado de la mezcla a causa de la falta de adhesión.

Por estas razones resulta de gran importancia simular en el laboratorio, los esfuerzos de compactación producidos en el sitio donde la carpeta asfáltica va a ser colocada. Además, la mezcla asfáltica deberá ser construida con los equipos de compactación adecuados, de tal manera, que se produzcan los niveles de vacíos de aire iniciales (al menos 8 por ciento) que se consideran en los diseños.

Es importante notar que los criterios de diseño de VAM, independiente del método que se trate, no se basan en el nivel de compactación. La razón es la de proveer suficiente espacio al asfalto y al aire, a reserva del nivel de tránsito que se espere en el pavimento.

2.7. Análisis de falla por fatiga de la carpeta asfáltica

2.7.1. Resistencia a la fatiga

Es la capacidad que tiene una mezcla asfáltica para resistir la aplicación repetida de cargas debida al flujo vehicular. Esta característica depende mucho del nivel de rigidez de la mezcla, al ser más rígida se volverá frágil ante la deformación debida a las cargas aplicadas, es decir que el contenido de asfalto también es un factor importante en esta propiedad, mayor contenido de asfalto le dará una mayor fluidez evitando el agrietamiento en la parte inferior.

2.7.2. Deformación permanente

Esta falla es el resultado de acumulación de deformaciones remanentes, una vez que la carga es aplicada y luego retirada, la mezcla se deforma de la misma forma, comprime con la carga y se recupera en el ciclo de descarga, pero no se recupera del todo una pequeña deformación queda. Este tipo de falla está íntimamente ligado al contenido de vacíos (menores 4%) y a la viscosidad del cementante asfáltico.

2.7.3. Forma de aplicación de carga en la prueba

Se han definido dos modalidades de aplicación de carga para caracterizar el comportamiento a fatiga en mezclas asfálticas, estos son: bajo deformación controlada y bajo esfuerzo controlado.

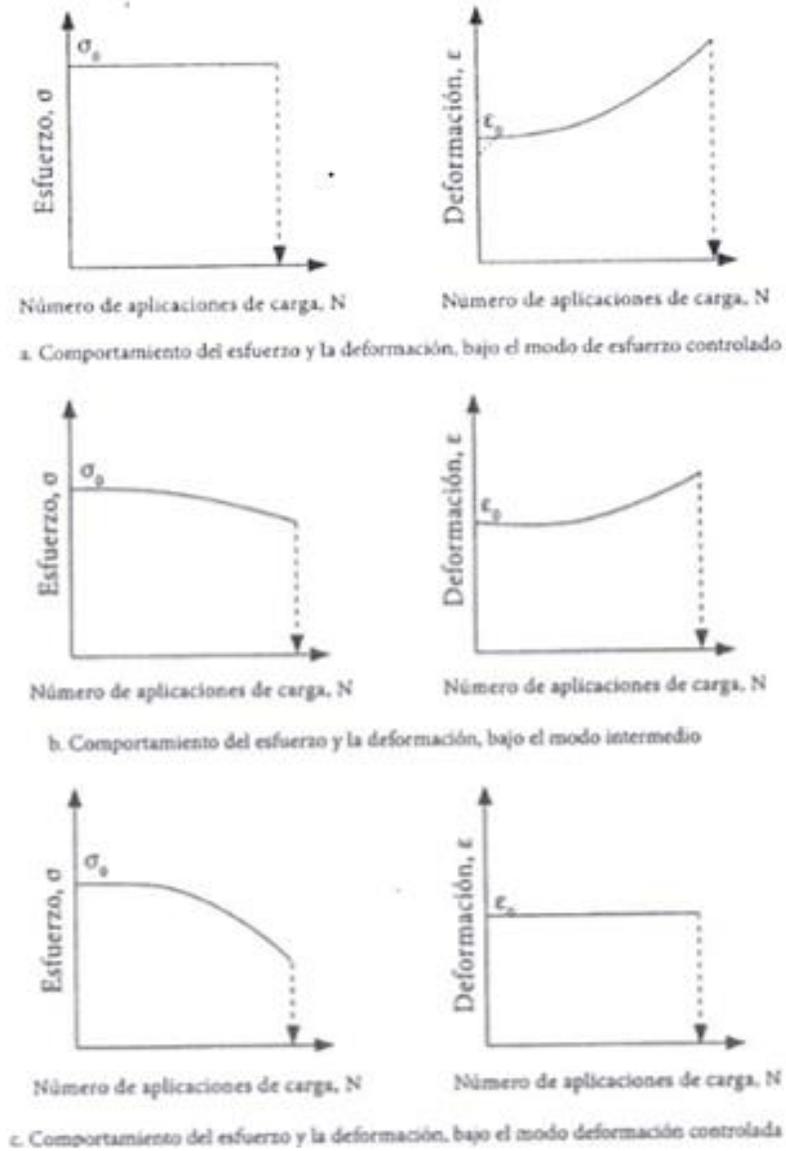
La finalidad de realizar estos ensayos es, poder emular el escenario en campo, por lo tanto, el conocer bajo qué modo de carga trabaja una mezcla es imperioso.

Se ha determinado una relación entre el modo de carga y el espesor de la capa asfáltica

- Capas con espesores igual o menor a 5 cm (2 pulgadas) se comportan similar al ensayo bajo deformación controlada. Esto se debe a que la deformación que se da en la fibra inferior debido a la tracción, está en estrecha relación con la rigidez o respuesta resiliente de la capa subyacente.
- Las capas asfálticas de espesores mayores 15 cm (6 pulgadas) se comportan similar al ensayo bajo esfuerzo controlado, ya que debido a los ciclos de carga y descarga su rigidez disminuirá resultando en deformaciones cada vez mayores.

- Las capas asfálticas con espesores entre 5 y 15 cm (2 y 6 pulgadas) tienen un comportamiento intermedio.

Figura 19. Representación esquemática del comportamiento a la fatiga de las mezclas asfálticas con distintos modos de carga



Fuente: Estudio comparativo de pruebas de fatiga dinámicas y pruebas de tracción indirecta bajo cargas monotónicas en mezclas asfálticas

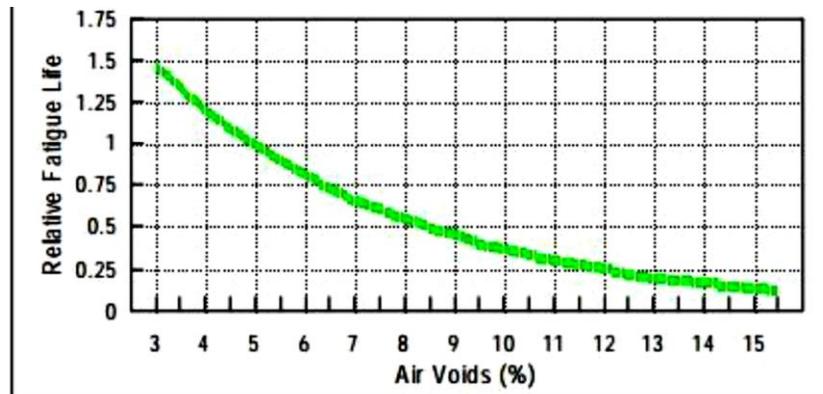
2.7.4. Efecto del tiempo de receso

Comúnmente durante los ensayos dinámicos la aplicación de carga se realiza de forma constante, aunque este no es el escenario en campo. Cuando las cargas se aplican de forma discontinua permiten tener un “tiempo de receso” a la mezcla, la cual tiende a recuperarse. Su rigidez disminuye con la carga y vuelve a elevarse en el tiempo de receso.

2.7.5. Vacíos de aire

La resistencia a la fatiga es directamente proporcional al porcentaje de vacíos que posee la mezcla, el cual a su vez depende del nivel de compactación de la mezcla. Los vacíos en la mezcla disminuyen considerablemente la resistencia a la fatiga, esto se debe a que los vacíos no pueden absorber esfuerzos.

Figura 20. Curva de vida de fatiga relativa contra porcentaje de vacíos de aire



Fuente: Estudio comparativo de pruebas de fatiga dinámicas y pruebas de tracción indirecta bajo cargas monotónicas en mezclas asfálticas

2.7.6. Métodos de estimación de leyes de fatiga

La determinación de la ley de fatiga de una mezcla bituminosa es una cuestión compleja que requiere muchos y costosos ensayos de laboratorio y calibraciones y calados posteriores del modelo in situ. Por ello se suele recurrir a los estudios genéricos realizados por laboratorios nacionales o por organizaciones con grandes recursos. Para el caso que nos ocupa se describen los dos métodos más conocidos, aunque solo se aplica

el método del Instituto del Asfalto para determinar las características de fatiga de la mezcla de Alto Módulo.

Los dos métodos que se recogen son los desarrollados por la SHELL y por el Instituto del Asfalto (AI). La expresión simplificada que establece la SHELL para definir una ley de fatiga de una mezcla bituminosa es:

$$N = ((0.856 * Vb + 1.08) * (10^6 * E)^{-0.36})^5 * \epsilon^{-5}$$

Donde:

Vb es el % de betún en volumen y E es el módulo de la mezcla en mega pascales.

Por su parte el Instituto del Asfalto (AI) establece la siguiente expresión:

$$N = 0.0796 * (\epsilon^{-3.291}) * (0.145 * E)^{-0.854}$$

Ecuaciones empíricas

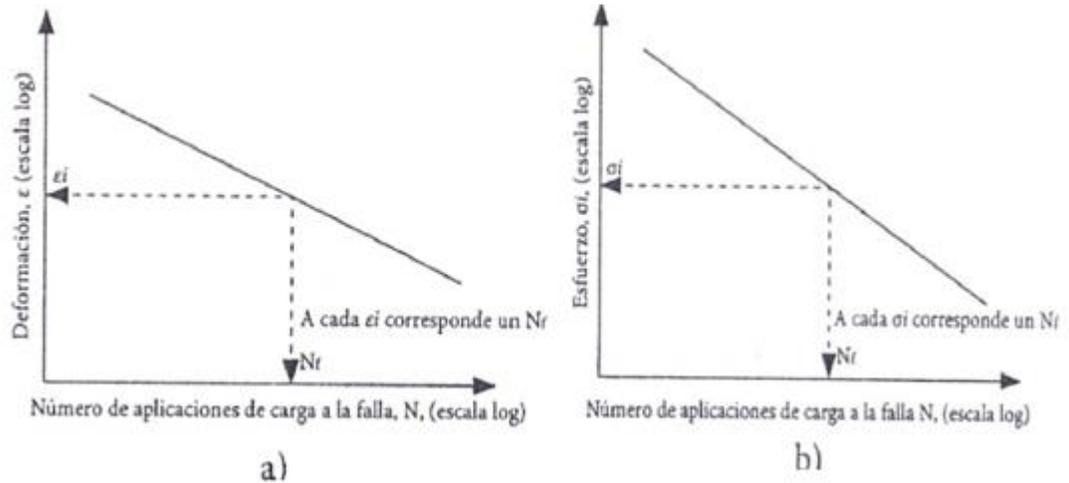
Son las ecuaciones matemáticas que se emplean para predecir el comportamiento a la fatiga, tanto en laboratorio como en campo.

Las ecuaciones calcular el número máximo de aplicaciones de carga que soporta una mezcla antes de la falla con un esfuerzo o deformación aplicado, en función de su rigidez y su composición volumétrica.

La respuesta a fatiga de las mezclas asfálticas se determina de forma empírica a través de relaciones lineales en gráficos logarítmicos que, según la naturaleza del ensayo, se grafica la deformación tensión o el esfuerzo de tracción contra el número de aplicaciones de carga (Nf).

Los primeros estudios de este fenómeno fueron realizados por Wholer en 1852, por lo cual a la curva a la que se hace relación en el párrafo anterior se la conoce como el diagrama de Wholer.

Figura 21. Curva de Wholer (ley de fatiga) para ensayos a) bajo deformación controlada y b) bajo esfuerzo controlado



Fuente: Estudio comparativo de pruebas de fatiga dinámicas y pruebas de tracción indirecta bajo cargas monotónicas en mezclas asfálticas

Las curvas se definen por las ecuaciones mostradas a continuación;

Para ensayos a deformación controlada

$$N = K \left(\frac{1}{\epsilon} \right)^{K2}$$

Tabla 12. Coeficientes de regresión de la ecuación

Investigador / Instituto	K1	K2
Medina et al (1982)	6.64×10^{-7}	2.93
Thompson (1987) / Illinois Department of Transportation	5.0×10^{-6}	3
Brown y Pell (1972)	3.8×10^{-10}	3.8
Majidzadeh et al (1983) / Federal Highway Administration	7.56×10^{-12}	4.68
Mamlouk et al (1990) / Arizona Department of Transportation	9.33×10^{-7}	3.84

Fuente: Estudio comparativo de pruebas de fatiga dinámicas y pruebas de tracción indirecta bajo cargas monotónicas en mezclas asfálticas

Estudios recientes de investigación han demostrado que los coeficientes de fatiga pueden ser calculados a partir de datos de ensayos de tracción indirecta. Maupin (1976) demostró que las características de fatiga de concretos asfálticos densos responden a estas expresiones.

Para ensayos a deformación controlada

$$N = K2 \left(\frac{1}{\epsilon} \right)^n$$

Donde:

ϵ = deformación radical específica en la capa asfáltica

$$K2 = 10^{(7.92 - 0.0122 * Sit)}$$

$$n = 0.0374 * Sit - 0.744$$

Sit = resistencia a la tracción indirecta, en psi

Para ensayos a esfuerzo controlado

$$N = K1 \left(\frac{1}{\sigma} \right)^n$$

Donde:

σ = tensión radical específica en la capa asfáltica

$$n = 11.6 - 0.000396 * Eit$$

Eit = rigidez al 75% de la deformación de rotura, en psi

$$K1 = e^{(n * \ln(12.6 * Sit - 558))}$$

Sit = resistencia a la tracción indirecta, en psi

La representación de datos de fatiga a deformación constante es la más usada. El ensayo a tensión constante es más útil para ensayar y diseñar pavimentos más gruesos.

El comportamiento a fatiga se determinará graficando el nivel de deformación y el número de repeticiones de carga a la falla, ya sea esta por rotura o por deformación (superior a 5 mm de deformación vertical).

Según el criterio expuesto (Vila et al, 2015) si al plotear el resultado de un ensayo, este se ubica encima de la recta (Ver figura) se puede decir que dicha mezcla tendrá un comportamiento bueno ante la fatiga. Si el punto se ubica entre la línea promedio y

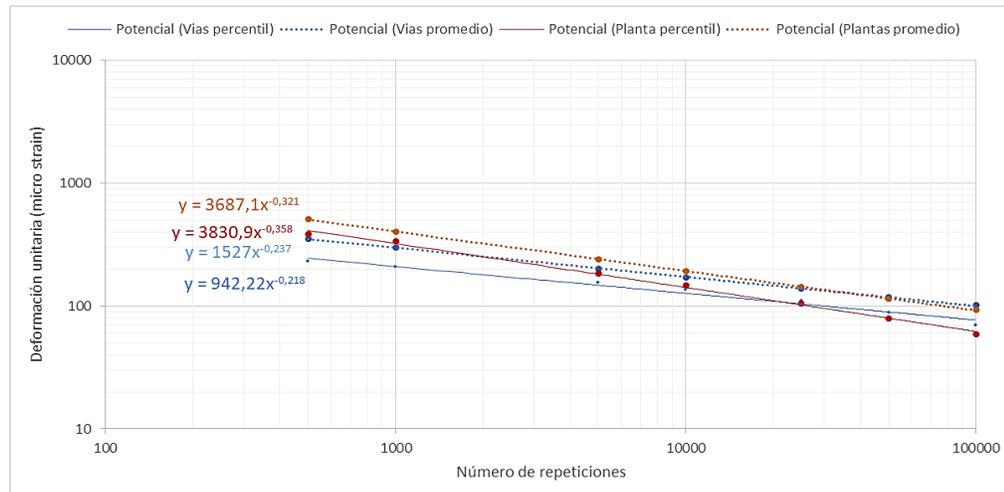
percentil 15, la mezcla tendrá un comportamiento tolerable. La mezcla tendrá un mal comportamiento si el punto se ubica por debajo de dichas rectas.

Tabla 13. Deformaciones correspondientes a los promedios y percentiles 15

Repeticiones	Vías		Plantas	
	Percentil	Promedio	Percentil	Promedio
	Deformaciones unitarias (microstrain)			
500	230	353	386	507
1000	207	298	337	403
5000	154	202	184	239
10000	135	171	147	191
25000	110	138	105	143
50000	89	118	79	115
100000	70	101	59	93
Coeficientes de las leyes de fatiga				
a	947.53	1523,73	3850,08	3687,49
b	0,218	0,237	0,359	0,320

Fuente: Estudio comparativo de pruebas de fatiga dinámicas y pruebas de tracción indirecta bajo cargas monotónicas en mezclas asfálticas

Figura 22. Relaciones Nf vs ε correspondientes a promedios y percentiles 15



Fuente: Elaboración propia

2.7.7. Ensayos de fatiga dinámicos

Para estudiar el comportamiento a fatiga de las mezclas asfálticas se utilizan ensayos de cargas dinámicos, que simulan un estado cercano a la situación a la que estarán sometidos.

Existen algunos factores que afectan el comportamiento a fatiga de las mezclas asfálticas, que a su vez afectan también la rigidez de la mezcla, tales como los vacíos con aire, tipo y contenido de asfalto, espesor de la capa delgada, propiedades reológicas, características del agregado y granulometría. Es importante también tener en cuenta que ciertos parámetros del ensayo también afectaran los resultados como lo son la magnitud y frecuencia de esfuerzo, periodos de recuperación y temperatura.

Existen dos modalidades de estas pruebas dinámicas, estas son:

Ensayo con desplazamiento controlado. Ensayo con esfuerzo controlado

Ensayo con desplazamiento controlado

En este ensayo la amplitud de desplazamiento o deformación se mantienen constantes, lo que varía durante la ejecución es el esfuerzo aplicado a la muestra. Se determina un nivel de deformación inicial y el esfuerzo ira disminuyendo a lo largo del ensayo, esto se debe a que las repeticiones la muestra se fatigara ofreciendo cada vez menos resistencia para alcanzar el nivel de deformación inicial.

El ensayo termina cuando la muestra falla, o se dice que la muestra llevo a su fallo cuando la rigidez es la mitad de la rigidez al inicio del ensayo.

Esta modalidad de ensayo simula muy bien el comportamiento de mezclas asfálticas de espesores menores a 100 mm.

b.- Ensayo con esfuerzo controlado

En esta modalidad de ensayo se define la magnitud del esfuerzo que será aplicado a la muestra, el cual se mantendrá constante durante todo el ensayo. Como resultado las deformaciones irán aumentando, esto se debe a que las constantes repeticiones fatigan la muestra, su resistencia disminuye y ante una misma sollicitación se deformara cada vez más.

El término del ensayo se da cuando la muestra falla o su deformación es el doble de la deformación inicial.

Esta modalidad es más sensible a las variables de la mezcla y representa de mejor el comportamiento de mezclas con espesores mayores a 100 mm.

2.7.8. Factores que afectan la respuesta a la fatiga

Dentro de los cuales podemos contemplar:

Métodos de fabricación de las probetas.

Consideraciones del modo de carga.

La influencia de las variables de la mezcla en la performance a la fatiga.

La influencia en las variables de carga y medio ambiente en la respuesta a la fatiga.

2.7.8.1. Métodos de fabricación de las probetas

El objetivo primario de la fabricación o compactación de probetas es producir ensayos "realistas", que sean razonablemente duplicados de la correspondiente mezcla de pavimento en el sitio en el mejor de los aspectos como su composición, densidad y propiedades ingenieriles. El efecto del método de ensayo es expuesto más adelante.

Como se expuso en la parte de compactación de mezclas en el laboratorio los métodos utilizados para fabricar probetas son:

Estática, por impacto, por amasado, giratoria, Rolling - Wheel (Rueda rodante).

2.7.8.2. Modo de carga

En los ensayos de laboratorio, la respuesta a la fatiga ha sido vista en función del modo de carga, esto es, que el método por el cual los esfuerzos y deformaciones son permitidos varía durante la carga repetida. Los límites para las condiciones de carga para el modo de esfuerzo controlado, donde la amplitud de carga o esfuerzo es mantenida constante. Dependiendo de la temperatura y por ende de la rigidez de la mezcla, los resultados de estos ensayos pueden ser muy diferentes. Varias investigaciones se han hecho para determinar cuál modo de carga simula mejor las condiciones actuales del pavimento (Monismith y Deacon, 1969; y Monismith et al, 1977).

2.7.8.3. Variables de la mezcla

Así, desde el punto de vista del diseño de la mezcla, debe ser incorporada la mayor cantidad de asfalto como sea posible. Existe un límite superior de contenido de asfalto por requerimientos de estabilidad, sin embargo, este límite superior debe ser un camino para incrementar la resistencia a la fatiga.

Además, una “adecuada compactación” se requiere para mejorar la resistencia a la fatiga, esto es, que la mezcla debe ser compactada a la densidad de diseño durante el período de construcción (por ejemplo, el contenido de vacíos de aire en la mezcla compactada debe ser del orden del 4 %).

En general, para las mezclas de gradación continua, los dos principales factores que afectan la respuesta a la fatiga son el contenido de asfalto y el contenido de vacíos de aire; el tipo de agregado parece tener una menor influencia.

2.7.8.4. Variables de carga y medio ambiente

Las variables de carga y medio ambiente tienen implicaciones directas e indirectas.

Las directas incluyen la forma y duración del pulso de carga usado en el laboratorio y la temperatura. La relación entre el tiempo de carga y el espesor de las capas bituminosas para varias velocidades de vehículos ha sido estudiada y se ha concluido que un tiempo de carga en el rango de 0.04 a 0.1 seg es apropiado para ensayos a la fatiga.

En pavimentos de tráfico pesado, un incremento en la rigidez de la mezcla aumenta la vida a la fatiga, mientras otras variables permanezcan constantes. Epps (1969) comparó la performance a la fatiga de probetas obtenidas en pavimentos sometidos a cargas de tráfico actuales (en el momento) con probetas de laboratorio de similar composición.

Sin embargo, debe señalarse que la rigidización del asfalto debido al envejecimiento podría reducir su habilidad para resistir el fisuramiento (por incremento de fragilidad) en temperaturas frías.

La densificación de una mezcla de pavimento por el tráfico en servicio también afecta su respuesta a la fatiga. Raithby y Ramshan (1972) encontraron, por ejemplo, que la compactación por tráfico de un tramo en un ensayo incrementó la vida a la fatiga para un

nivel de esfuerzos dado, por un factor de 3 e incrementó la rigidez dinámica en un 60 %. El efecto en la vida a la fatiga se debe al incremento en la rigidez y a la disminución en los vacíos de aire.

2.8. Métodos de ensayo a la fatiga

Se mencionan los principales métodos y una descripción de los mismos:

2.8.1. Flexión simple

Con una relación directa entre la vida a la fatiga y el esfuerzo/deformación desarrollada por vigas sometidas a pulsaciones o cargas sinusoidales con una configuración de punto central o al tercio, vigas rotatorias en cantiléver y vigas trapezoidales en cantiléver a carga sinusoidal.

2.8.2. Flexión soportada

Con relación directa entre la vida a la fatiga y el esfuerzo/deformación desarrollada por vigas cargadas o placas que están soportadas de varias maneras para simular directamente los modos in-situ de carga y algunas veces simular un estado de esfuerzos más representativo.

2.8.3. Axial directa

Con una relación directa entre la vida a la fatiga y el esfuerzo/deformación desarrollada por pulsaciones aplicadas a cargas sinusoidales, uniaxialmente con o sin inversión (cambio total) de esfuerzos.

2.8.4. Triaxial

Con una relación directa entre la vida a la fatiga y esfuerzo/deformación desarrollada en probetas similares al ensayo de axial directo, pero con confinamiento.

2.8.5. Ensayos de fractura

El uso de principios de mecánica de fracturas para predecir la vida a la fatiga.

2.8.6. Wheel –Tracking test

Incluye arreglos en laboratorio y a escala natural, con una relación directa entre la cantidad de fisuras, el número de aplicaciones de carga y la medida y/o registro del

esfuerzo/deformación. Para ensayos a gran escala, algunas configuraciones de pistas lineales y circulares han sido usadas.

2.8.7. Diametral

Con una relación directa entre la vida a la fatiga y el esfuerzo/deformación desarrollada por cargas de pulsaciones aplicadas a especímenes cilíndricos en la dirección diametral.

2.8.8. Ensayo de tracción indirecta

El ensayo de tracción indirecta fue desarrollado por Thomas Kennedy, es un ensayo que se destaca por su sencillez de ejecución y confiabilidad en sus resultados al mostrar poca dispersión.

Este ensayo se utiliza especímenes o briquetas similares a las utilizadas en el ensayo Marshall, siendo sus dimensiones las siguientes: diámetro de 102 ± 1 mm y altura aproximada de 67 mm (depende de la cantidad de material utilizado).

La aplicación de carga mediante el cabezal Lottman genera sobre la biqueta un estado de esfuerzos biaxial de tensiones. A lo largo del eje vertical se puede observar que los esfuerzos son prácticamente constantes, lo cual explica la forma de rotura que tiene el espécimen cuando los esfuerzos superan la resistencia que esta ofrece, el máximo esfuerzo soportado es denominado tensión de rotura.

El fallo inicial se produce por rotura a tracción, por lo tanto, la resistencia a tracción indirecta en el momento de la rotura está dada por la siguiente expresión:

$$St = \frac{2 * P_{max}}{\pi * t * d}$$

Donde:

St= resistencia a la rotura por tracción indirecta

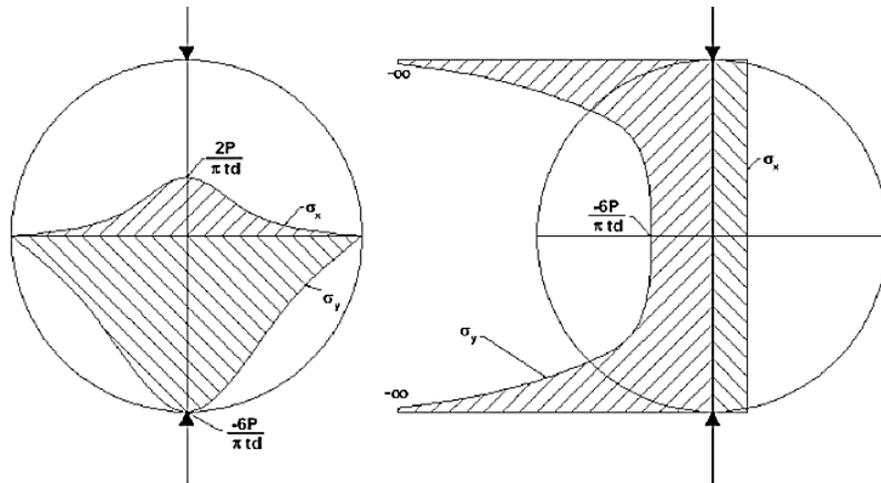
Pmax= carga máxima o carga de rotura

t= espesor de la biqueta

d= diámetro de la biqueta

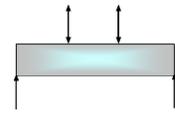
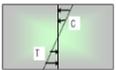
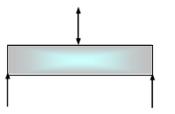
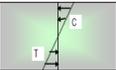
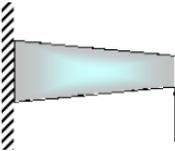
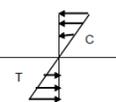
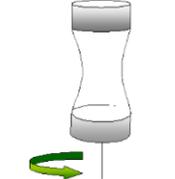
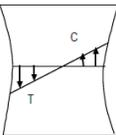
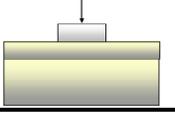
Este ensayo no solo brinda información de la resistencia a tracción indirecta, sino que también es útil para conocer propiedades elásticas resilientes, tales como, módulo de elasticidad estático o dinámico, dependiendo de la naturaleza de la aplicación de carga utilizada durante el ensayo, figuración térmica, figuración por fatiga, deformación permanente y para evaluar el efecto de la humedad en mezclas.

Figura 23. Distribución de esfuerzos durante ensayo de tracción indirecta



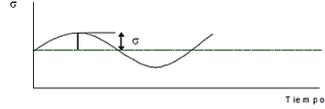
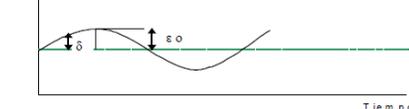
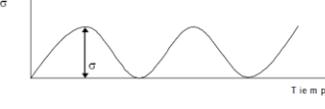
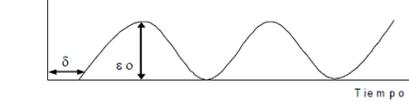
Fuente: Estudio comparativo de pruebas de fatiga dinámicas y pruebas de tracción indirecta bajo cargas monotónicas en mezclas asfálticas

Tabla 14. Resumen de las características de los ensayos a la fatiga

Ensayo	Configuración de la carga	Distribución de esfuerzos	Forma de la onda de carga	Frecuencia de la carga cps	Deformación permitida	Estado de esfuerzos	La falla ocurre en una zona de momentos de flexión uniforme o esfuerzo de tensión
Flexión tercer punto			Carga semisinusoidal con reposo 1.9	1.00 1.67	No	Uniaxial	Si
Flexión punto central			Sinusoidal rectangular, triangular con reposo 1:100 máx.	1:100	No	Uniaxial	No
Viga en voladizo (cantilév er)			Sinusoidal (Bonnot) sinusoidal, triangular con reposo 1:100 (Van Dijk) máx.	25 (Bonnot) 1:100 (Van Dijk)	No	Uniaxial	No
Viga en voladizo rotatoria			-	16,67	No	Uniaxial	Si
Axial			-	8.33 – 25.00	No	Auniaxial	Si
Diametra l			-	1.00	Si	Biaxial	No
Flexión soportada (viga)			Semisinusoidal	0.75	No	Uniaxial	No

Fuente: Comparación de las mezclas diseñadas por el método Marshall y las diseñadas por el método Superpave

Tabla 15. Tipos de patrones de carga

Tipo de patrón de carga	Esfuerzo - Tiempo	Deformación – Tiempo
Sinusoidal		
Semisinusoidal		
Carga cíclica		
Carga ciclica		

Fuente: Comparación de las mezclas diseñadas por el método Marshall y las diseñadas por el método Superpave

El ensayo de fatiga diametral es un ensayo de tensión indirecta conducido por una carga repetitiva en una probeta cilíndrica con una carga compresiva, la cual actúa paralela y a lo largo del plano diametral vertical. El ensayo es simple de hacer y es considerado por algunos como un método efectivo para caracterizar materiales en términos de las propiedades fundamentales. Un gran número de investigadores han utilizado este método para la evaluación de materiales y análisis de pavimentos (Kennedy et al; 1983 y 1968; Scholz; Hicks et al; 1989; Khosla y Omer; 1985; Schmidt; 1971; etc).

Equipos y procedimientos

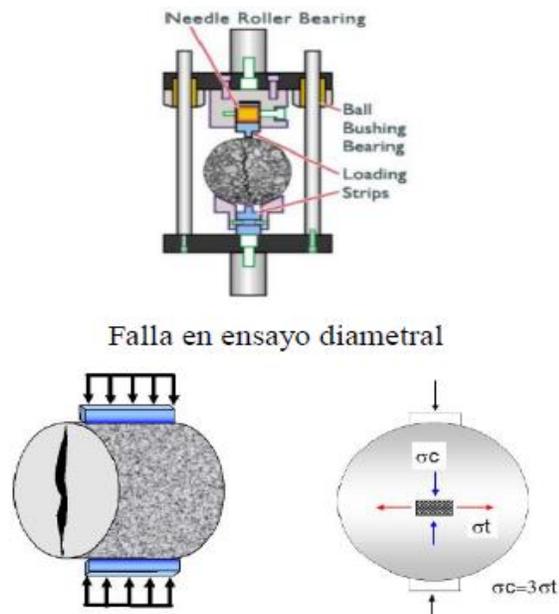
Procedimientos de ensayo. Dos tipos de carga controlada pueden ser aplicadas: esfuerzo constante y deformación constante.

En el ensayo de esfuerzo constante, el esfuerzo permanece constante pero la deformación aumenta con el número de repeticiones. En el ensayo de deformación constante, la deformación permanece igual y la carga o esfuerzo disminuye con el número de repeticiones. La configuración de la carga, ilustrada en la Figura 2.24, es

relativamente simple y las cargas pueden ser aplicadas con diversos dispositivos y sistemas.

El ensayo se lo emplea para predicción de fractura por fatiga de mezclas. Las temperaturas de ensayo son -10.40 y $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Figura 24. Configuración de la carga para ensayo de tracción indirecta



Fuente: Comparación de las mezclas diseñadas por el método Marshall y las diseñadas por el método Superpave

2.9. Diseño Marshall

Tabla 16. Especificaciones del diseño Marshall

Descripción	Número de golpes		
	Alto	Medio	Bajo
Condición de tránsito que resultan en un ESALs de diseño (millones)	> 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
Porcentaje de vacíos	3-5	3-5	3-5
Porcentaje de vacíos en el agregado mineral VAM	Según el tamaño máximo tabla 2.15		
Porcentaje de vacíos de la llenante mineral RBV	65-75	65-78	70-80

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

Tabla 17. Porcentajes mínimos de vacíos en el agregado mineral

Tamaño máximo del agregado (mm)		VAM mínimo, por ciento		
		Vacíos de diseño, por ciento		
mm	pulg	3.00	4.00	5.00
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"	11.00	12.00	13.00
37.50	1.5"	10.00	11.00	12.00

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

CAPÍTULO III
ANÁLISIS, CÁLCULOS Y DISEÑO

CAPÍTULO III

ANÁLISIS, CÁLCULOS Y DISEÑO

3.1. Introducción

Para el desarrollo de esta investigación, se inició con la ubicación de fuentes de materiales a utilizar, tomando los criterios correspondientes para su utilización, posteriormente se realizó la caracterización de los materiales que se emplearán para la construcción de mezclas asfálticas, donde se mostrará si cumplen o no con las especificaciones técnicas.

Una vez se tenga la caracterización de los materiales a utilizar se comenzará con el diseño de la mezcla asfáltica, donde posteriormente se pueda realizar los ensayos necesarios para realizar en análisis a cada una de las variables.

3.2. Ubicación de la fuente de los materiales a utilizarse

3.2.1. Ubicación y coordenadas del agregado pétreo

Los agregados pétreos a utilizarse en la presente investigación, fueron provenientes de la planta chancadora Charajas, la cual está ubicada en el kilómetro 45 de la provincia de Uriondo, del departamento de Tarija. Sus coordenadas correspondientes son:

Lat-Long (dms)

Latitud: 21°46'55''S; Longitud: 64°46'12'' W

De la planta chancadora Charajas, se tomó la grava 3/4", gravilla 3/8" y arena triturada.

Imagen 1. Ubicación planta chancadora de Charajas



Fuente: Elaboración propia

3.2.2. Ubicación del cemento asfáltico

El cemento asfáltico a utilizarse en la presente investigación es de la marca Betunel 85-100 cuyo distribuidor es la empresa Brasil, el cual se obtuvo por la Posta Municipal de la ciudad de Tarija.

3.3. Ensayos de caracterización de los agregados

3.3.1. Resumen de las características de los agregados a utilizar

Tabla 18. Resumen de resultados de las características de los agregados

Análisis	Resultados	Especificación		Norma
		Mínimo	Máximo	
Porcentaje de caras fracturadas en los agregados (%)	94.76	Mínimo una cara/dos caras 95/90	Cumple	ASTM D 5821
Abrasión de agregado grueso máquina de los ángeles (%)	23.69	Máximo 35	Cumple	ASTM C 131
Índice de aplanamiento de agregados (%)	10.23	Máximo 10	Cumple	ASTM D 4791
Índice de alargamiento de agregados (%)	10.33	Máximo 10	Cumple	ASTM D 4791
Peso específico del agregado grueso (gr/cm ³)	2.71	–	NE	ASTM C 127
Peso específico del agregado fino (gr/cm ³)	2.35	–	NE	ASTM C 128
Equivalente de arena (%)	85.84	Mínimo 45	Cumple	ASTM D 2419

Fuente: Elaboración propia

3.4. Ensayos de caracterización del cemento asfáltico

3.4.1. Resumen de las características del cemento asfáltico a utilizar

Tabla 19. Resumen de resultado de las características del cemento asfaltico

Ensayos realizados al asfalto de grado de penetración 80/100					
Análisis	Resultados		Especificación		Norma
			Mín	Máx	
Peso específico (gr/cm ³)	1.03	Cumple	1	1.05	ASTM D 70
Punto de inflamación (°C)	311	Cumple	232	–	ASTM D 92
Penetración (mm/10)	94	Cumple	85	100	ASTM D 5
Ductilidad (cm)	102	Cumple	100	–	ASTM D 113
Punto de ablandamiento (°C)	49	Cumple	41.4	53.2	ASTM D 36
Pérdida de masa (%)	0.46	Cumple	–	1	ASTM D 175
Viscosidad Saybolt Furol 135°C	155	-	-	-	ASTM D 244

Fuente: Elaboración propia

Una vez realizado la caracterización de los agregados pétreos como del cemento asfáltico se realizará el diseño de la mezcla asfáltica con granulometría Superpave, seguidamente se comenzará con el diseño de la mezcla asfáltica convencional densa.

3.5. Diseño de la mezcla asfáltica Superpave

El proceso para preparar las mezclas asfálticas con el método Superpave, se fabricarán con un peso de 1200 gr. Para este objetivo se pesa sucesivamente las fracciones de cada tipo de agregado hasta obtener la cantidad total requerida.

La compactación que se realizará para el diseño Superpave, se tomará el criterio del diseño Marshall para un tráfico pesado, ya que en la universidad no se cuenta con el equipo Superpave, el cual se compactará 75 golpes por cara y se tendrá una condición de tránsito que resultan en un ESAL's de diseño (millones) >10 hasta 30.

3.5.1. Combinación de agregados

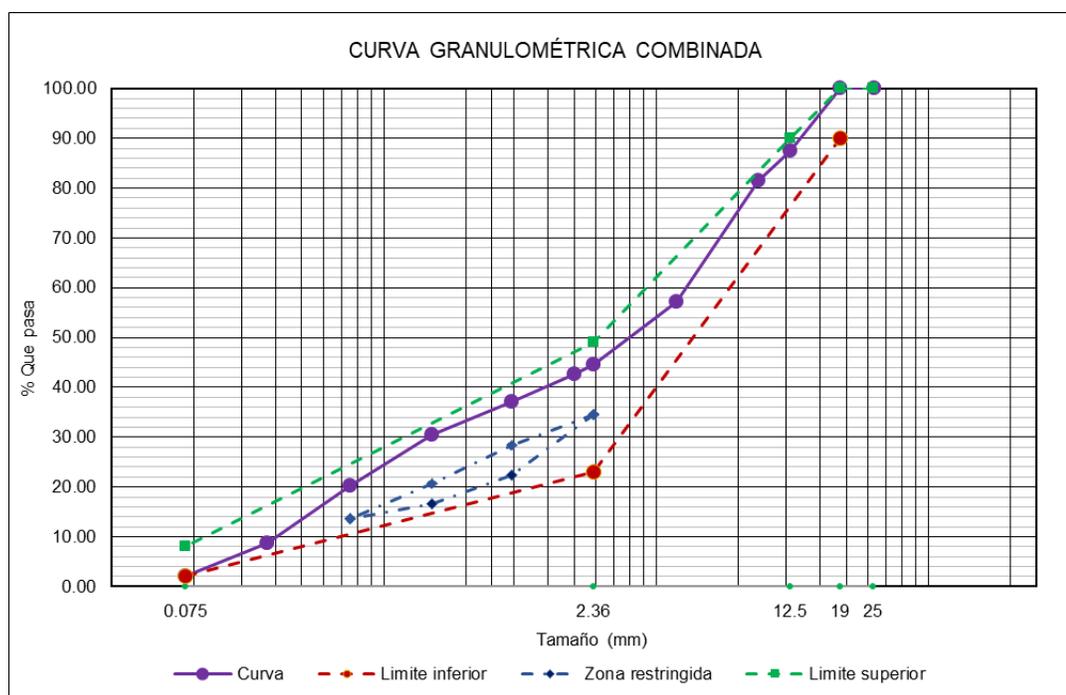
De acuerdo a la combinación de agregados, la línea solida es la que corresponde a la granulometría del material usado para la presente investigación; las líneas paralelas a esta corresponden a los puntos de control para la mezcla asfáltica según la especificación técnica relacionada en la anterior Tabla 7. Como se puede observar, la granulometría del material usado se encuentra en los límites de los puntos de control, cumpliendo con la gradación requerida de un tamaño máximo nominal de 19 mm (3/4 pulg).

Tabla 20. Combinación de agregados pétreos Superpave

Tamices		Puntos de control		Zona restringida		Grava	Gravilla	Arena	Peso Ret.	% que pasa
(pulg)	(mm)	Mín	Máx	Mín	Máx	20 %	15 %	65 %	100 %	
1"	25.4	-	100.00	-	-	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.0	90.00	100.00	-	-	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.5	-	90.00	-	-	618.59	2.42	0.00	621.01	87.58
3/8"	9.50	-	-	-	-	250.89	51.38	0.00	302.27	81.53
N° 4	4.75	-	-	-	-	126.81	583.79	507.54	1218.13	57.17
N° 8	2.36	23.00	49.00	34.60	34.60	3.23	108.15	523.25	669.23	44.48
N° 10	2.00	-	-	-	-	0.00	2.40	92.97	95.37	42.57
N° 16	1.18	-	-	22.30	28.30	0.00	0.21	272.26	300.77	37.12
N° 30	0.60	-	-	16.70	20.70	0.00	0.06	329.05	349.81	30.54
N° 50	0.30	-	-	13.70	13.70	0.00	0.07	514.26	528.02	20.25
N° 100	0.15	-	-	-	-	0.00	0.07	580.32	580.39	8.65
N° 200	0.075	2.00	8.00	-	-	0.00	0.03	329.70	329.73	2.05
BASE	-	-	-	-	-	0.38	1.33	100.30	102.01	0.01

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 1. Curva granulométrica combinada Superpave



Fuente: Elaboración propia

3.5.2. Dosificación para la elaboración de briquetas Superpave

Para incorporar el cemento asfáltico se realizará desde el 4.00 % al 6.50 %.

Tabla 21. Dosificación Superpave

Peso total de briqueta (gr)	1200	Porcentaje total de briqueta	100%
Ponderación de grava	20	Porcentaje total de cemento asfáltico	X %
Ponderación de gravilla	15	Porcentaje total del agregado	100 - X %
Ponderación de arena	65		
Ponderación de filler	0		

Descripción	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla					
	4.0%	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	6.5%
Porcentaje de agregado (%)	96.0%	95.5%	95.0%	94.5%	94.0%	93.5%
Peso del cemento asfáltico (gr)	48.00	54.00	60.00	66.00	72.00	78.00
Peso de grava (gr)	230.40	229.20	228.00	226.80	225.60	224.40
Peso de gravilla (gr)	172.80	171.90	171.00	170.10	169.20	168.30
Peso de arena (gr)	748.80	744.90	741.00	737.10	733.20	729.30
Peso de filler (gr)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Peso total de la briqueta (gr)	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia

3.5.3. Elaboración de briquetas

3.5.3.1. Preparación de la mezcla

Con la dosificación realizada se procede a calentar los agregados en el horno, a una temperatura de 120 a 130 °C; de igual forma, el cemento asfáltico debe ser calentado hasta que tenga una viscosidad que permita un fácil mezclado con los agregados.

Posteriormente son mezclados en un recipiente grande para facilitar su manipulación, controlando la temperatura de mezclado, donde no aparezca escurrimiento del cemento asfáltico y obtener una mezcla homogénea y cubierta totalmente.

Imagen 2. Mezclado de los agregados con el cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia

3.5.3.2. Compactación de la muestra

Para la compactación de las mezclas Superpave no se cuenta con el equipo necesario para realizar el mismo, el cual se realizará con la metodología Marshall ya que se cuenta con el equipo necesario para llevar a cabo la compactación, lo cual se hace necesario tomar un parámetro de estabilidad para su diseño, donde este está ligado al número de golpes, que se tomó para un tráfico pesado, con un número de 75 golpes por cada cara. Cabe recordar que no se tomó como especificaciones técnicas lo indicado en la Tabla 2.14, sino más bien se consideraron como parámetros para su diseño.

Imagen 3. Compactación de la muestra



Fuente: Elaboración propia

3.5.4. Relevamiento de información de las briquetas realizadas

3.5.4.1. Alturas y diámetros de las briquetas

Una vez desmoldadas las briquetas se procede a tomar el peso de cada una de las briquetas a través de una balanza de 0.1 gr de precisión, como también se sacó cuatro medidas de altura de las briquetas tomadas por medio de un Vernier.

Imagen 4. Medición de alturas y diámetros de briquetas



Fuente: Elaboración propia

Tabla 22. Alturas y diámetros de las briquetas

Ident. de briquetas	C.A (%)	Prom. alturas (cm)	Prom. diámetros (cm)
B1	4.00	6.60	10.15

Fuente: Elaboración propia

3.5.4.2. Pesos de las briquetas secas

Imagen 5. Pesos de las briquetas



Fuente: Elaboración propia

Tabla 23. Pesos de las briquetas

Ident. de briquetas	C.A (%)	Pesos (gr)
B1	4.00	1189.50
B2		1181.30
B3		1180.50

Fuente: Elaboración

propia

3.5.4.3. Peso de la briqueta en el aire saturada superficialmente S.S.S

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

Tabla 24. Pesos de briquetas en el aire saturada superficialmente seca

Ident. de briquetas	C.A (%)	Pesos (gr)
B1	4.00	1191.50
B2		1184.10
B3		1181.00

Fuente: Elaboración propia

3.5.4.4. Peso de la briqueta sumergida

Tabla 25. Pesos de briquetas sumergidas

Ident. de briquetas	C.A (%)	Pesos (gr)
B1	4.00	678.00
B2		666.00
B3		660.00

Fuente: Elaboración propia

3.5.5. Proceso de cálculo para las briquetas compactadas

Cada briqueta compactada se sometió a los siguientes ensayos:

Densidad bulk.

Densidad máxima teórica.

Porcentaje de vacíos.

Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM).

Porcentaje de vacíos de la llenante mineral (RBV).

Fatiga.

3.5.5.1. Determinación de la densidad bulk de las probetas compactadas

Para la determinación de la densidad se debe calcular su volumen de cada briqueta.

Cálculo del volumen:

Volumen = Peso S. S. S – Peso sumergido

Volumen = 1191.50 – 678.00

$$\text{Volumen} = 513.50 \text{ (cm}^3\text{)}$$

A efecto de demostración, se realiza un ejemplo de cálculo:

Briqueta al 4.00 % del contenido de asfalto.

Peso seco briqueta = 1189.50 gr.

$D_{\text{promedio}} = 10.15 \text{ cm.}$

$h_{\text{promedio}} = 6.60 \text{ cm.}$

Cálculo de la densidad bulk:

$$\text{Densidad} = \frac{\text{Masa seca}}{\text{Volumen}}$$

$$\text{Densidad} = \frac{1189.50}{513.50}$$

$$\text{Densidad} = 2.32 \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right)$$

Tabla 26. Resultados de gravedad específica bulk

C.A (%)	Gravedad específica bulk (gr/cm ³)	Promedio G _{eb} (gr/cm ³)
4.00	2.32	2.29
	2.28	
	2.27	

Fuente: Elaboración propia

Como el proceso de cálculo es similar para las demás briquetas, en los anexos 3, se detallan todas las mediciones, pesos y cálculos realizados.

3.5.5.2. Determinación de la densidad máxima teórica de las probetas compactadas

Para determinar la densidad máxima teórica primero se procede a calcular el promedio del peso específico del agregado total.

$$P. E_{\text{agr}} = \frac{100}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3} + \dots + \frac{P_n}{G_n}}$$

Donde:

$P_1+P_2+P_3+...P_n$ = Porcentaje en peso de cada una de las fracciones de material que intervienen en el total del agregado.

$G_1+G_2+G_3+...G_n$ = Pesos específicos de los materiales a los que corresponde las fracciones del agregado.

Se calcula la densidad máxima teórica de la muestra para cada porcentaje de asfalto, la cual corresponde al que teóricamente se obtendría si fuera posible comprimir la muestra hasta obtener una masa de asfalto y agregados carentes de vacíos con aire.

$$G_{em} = \frac{100}{\frac{\% \text{ agregados}}{P.E_{agr}} + \frac{\% \text{ cemento asfáltico}}{P.E_{C.A}}}$$

A efecto de demostración, se realiza un ejemplo de cálculo:

Briqueta al 4.00 % del contenido de asfalto.

Promedio $P.E_{agr} = 2.59 \text{ gr/cm}^3$.

$P.E_{C.A} = 1.02 \text{ gr/cm}^3$.

$$G_{em} = \frac{100}{\frac{\% \text{ agregados}}{P.E_{agr}} + \frac{\% \text{ cemento asfáltico}}{P.E_{C.A}}}$$

$$G_{em} = \frac{100}{\frac{100 - 4.00}{2.59} + \frac{4.00}{1.02}}$$

$$G_{em} = 2.44 \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right)$$

3.5.5.3. Porcentaje de vacíos de las briquetas compactadas (Va)

El porcentaje de vacíos se calcula con los valores de la gravedad específica bulk y la densidad máxima teórica, para cada contenido de cemento asfáltico.

$$V = 100 * \left(1 - \frac{G_{eb}}{G_{em}}\right)$$

Donde:

G_{eb} = Gravedad específica bulk.

G_{em} = Densidad máxima teórica.

A efecto de demostración, se realiza un ejemplo de cálculo:

Briqueta al 4.00 % del contenido de asfalto.

$$G_{eb} = 2.29 \text{ gr/cm}^3.$$

$$G_{em} = 2.44 \text{ gr/cm}^3.$$

$$V = 100 * \left(1 - \frac{G_{eb}}{G_{em}}\right)$$

$$V = 100 * \left(1 - \frac{2.29}{2.44}\right)$$

$$V = 6.30 (\%)$$

3.5.5.4. Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM)

$$VAM = \left(\frac{\% C. A * Densidad promedio}{Peso específico C. A}\right) + V$$

$$VAM = \left(\frac{4.00 * 2.29}{1.02}\right) + 6.30$$

$$VAM = 15.21 \%$$

3.5.5.5. Porcentaje de vacíos de la llenante mineral (RBV)

$$RBV = \left(\frac{VAM - V}{VAM} \right) * 100$$

$$RBV = \left(\frac{15.21 - 6.30}{15.21} \right) * 100$$

$$RBV = 58.56 \%$$

3.5.5.6. Fatiga

Para el cálculo de la fatiga, lo que se hará es realizar una gráfica para ver el comportamiento de cada porcentaje de cemento asfáltico, como se mostrara más adelante.

3.6. Análisis de resultados para encontrar el contenido óptimo de cemento asfáltico para la mezcla con granulometría Superpave

Los ensayos que se realizaron en las diferentes briquetas de las mezclas asfálticas Superpave arrojaron resultados mostrados en la Tabla 3.10; en base a estos valores se determinó el contenido óptimo de cemento asfáltico.

Tabla 27. Resumen de resultado de ensayos realizados a las briquetas

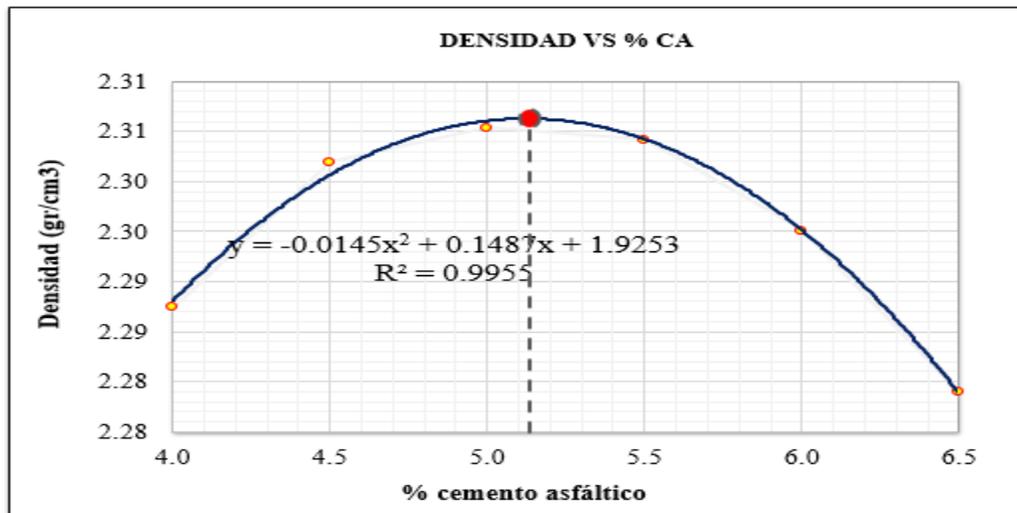
Resumen de resultados				
C.A (%)	Densidad real (gr/cm³)	V (%)	VAM (%)	RBV (%)
4.00	2.29	6.30	15.21	58.56
4.50	2.30	5.03	15.12	66.70
5.00	2.31	4.22	15.44	72.69
5.50	2.30	3.59	15.93	77.47
6.00	2.30	3.30	16.70	80.27
6.50	2.28	3.31	17.73	81.35

Fuente: Elaboración propia

En las siguientes gráficas, se puede observar la tabulación de los datos de la tabla anterior para una mejor interpretación, de esta manera se puede apreciar cómo varía el

comportamiento de la mezcla asfáltica Superpave en cada ensayo dependiendo del contenido del cemento asfáltico.

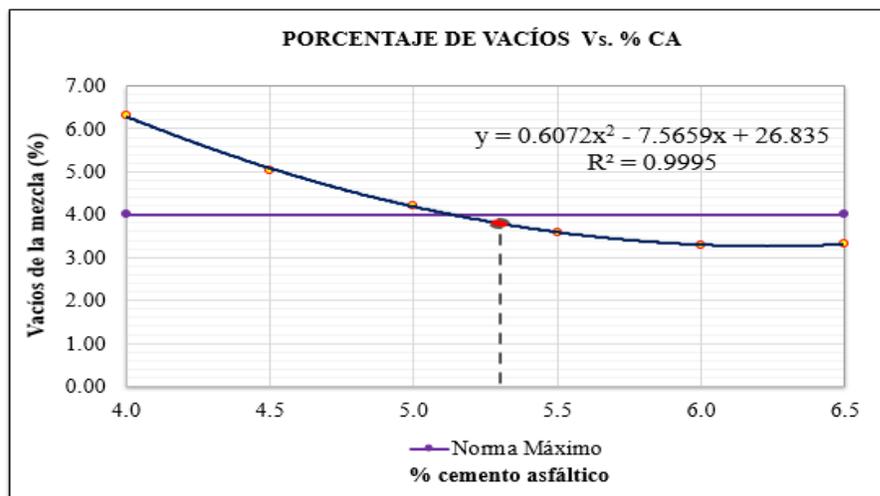
Gráfica 2. Densidad real de la mezcla asfáltica Superpave



Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la Gráfica 3.2, la densidad va en incremento, a medida que se aumenta el porcentaje de cemento asfáltico, posteriormente esta disminuye bruscamente a partir del 5.5 % de cemento asfáltico.

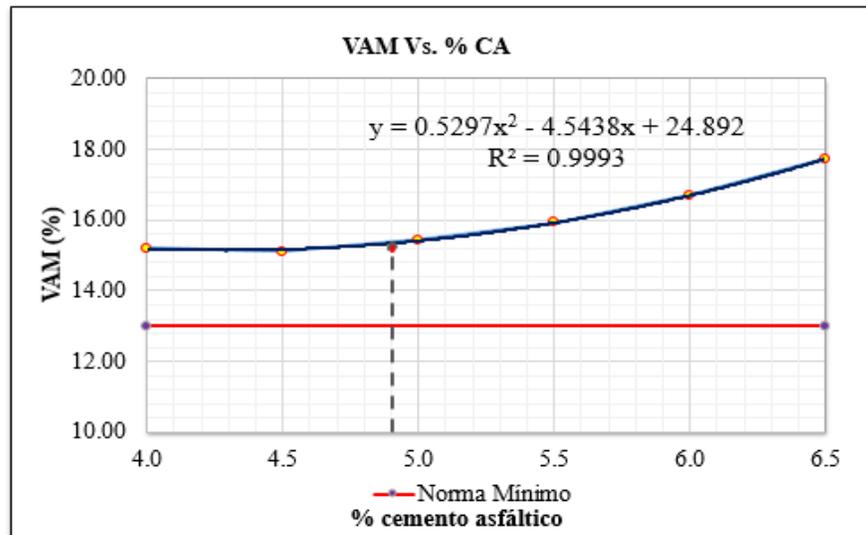
Gráfica 3. Porcentaje de vacíos de la mezcla asfáltica Superpave



Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la Gráfica 3, el porcentaje de vacíos va disminuyendo a medida que se aumenta el porcentaje de cemento asfáltico.

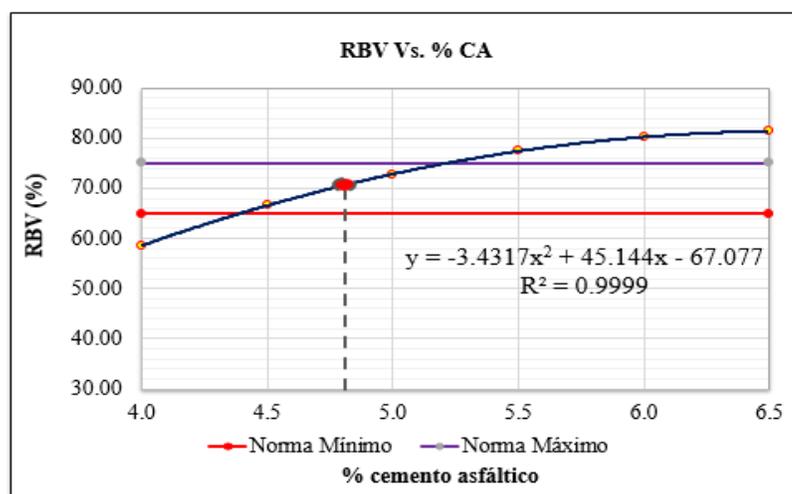
Gráfica 4. Porcentajes de vacíos en el agregado mineral de la mezcla asfáltica Superpave



Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la Gráfica 3.4, que la incorporación de porcentajes de cemento asfáltico del 4.50 % al 6.50 %, poseen un porcentaje de vacíos en el agregado mineral está dentro de lo especificado por el diseño de la mezcla asfáltica Superpave.

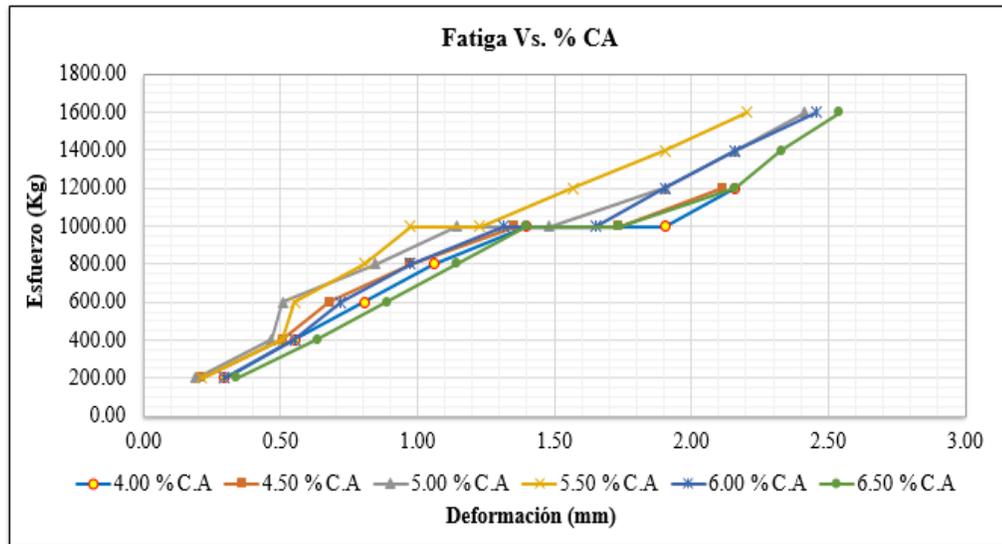
Gráfica 5. Porcentaje de vacíos de la llenante mineral en la mezcla asfáltica Superpave



Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la Gráfica 5, que la incorporación de porcentajes de cemento asfáltico del 4.50 % al 5.00 %, poseen un porcentaje de vacíos de la llenante mineral está dentro de lo especificado por el diseño de la mezcla asfáltica Superpave.

Gráfica 6. Fatiga de la mezcla asfáltica Superpave

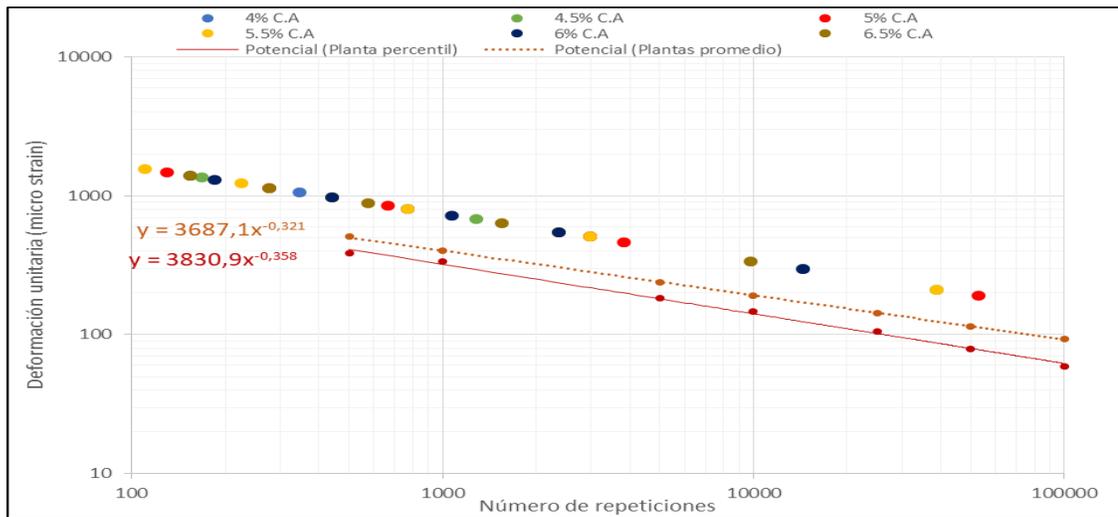


Fuente: Elaboración propia

En la Gráfica 6, se ve que una mezcla asfáltica Superpave, con un porcentaje de cemento asfáltico del 5.50 % tiene una menor deformación en relación del esfuerzo que fue aplicado a las briquetas, con los demás porcentajes de cemento asfáltico.

Para el cálculo del número de repeticiones se tomó las ecuaciones empíricas mostradas en el apartado 2.7.6, como también se tomó los coeficientes de regresión de la ecuación de Medina et al (1982).

Gráfica 7. Fatiga



Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que con un porcentaje de cemento asfáltico del 5.50 % tiene un mejor comportamiento en relación al número de repeticiones en relación del esfuerzo que fue aplicado a las briquetas, con los demás porcentajes de cemento asfáltico.

El porcentaje óptimo de cemento asfáltico, será calculado por el promedio de los siguientes parámetros:

Tabla 28. Resumen de resultados del porcentaje óptimo de cemento asfáltico

	Ensayo	Valor de diseño	Valor calculado	C.A (%)
Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Densidad real (gr/cm ³)	-	2.31	5.20
	Vacíos de la mezcla (%)	4.00	3.91	5.20
	Vacíos del agregado mineral VAM (%)	13.00	15.35	4.90
	Vacíos de la llenante mineral RBV (%)	65-75	70.55	4.80
	Fatiga (mm)	-	-	5.50
	Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio		5.12

Fuente: Elaboración propia

Realizando un análisis comparativo de cada gráfica, podemos observar que para un porcentaje del 5.12 % del cemento asfáltico, presenta mejoras en sus propiedades mecánicas en relación a los demás porcentajes por lo cual concluimos que el porcentaje óptimo de cemento asfáltico en el diseño de la mezcla asfáltica Superpave es del 5.12 %.

3.7. Diseño de la mezcla asfáltica densa

El proceso para preparar la mezcla asfáltica convencional densa, se fabricó con un peso de 1200 gr. Para este objetivo se pesa sucesivamente las fracciones de cada tipo de agregado hasta obtener la cantidad total requerida.

Para la compactación del tráfico pesado se tomó 75 golpes por cara.

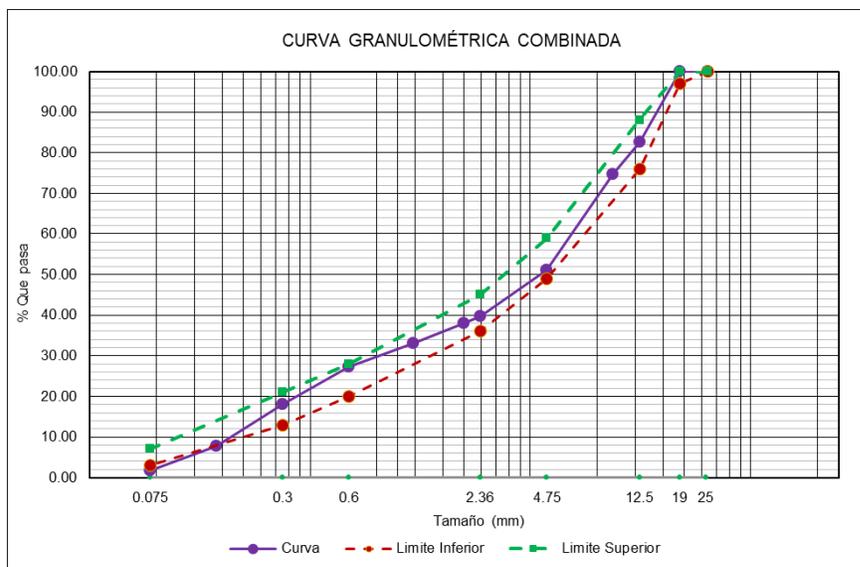
3.7.1. Combinación de agregados pétreos mezcla asfáltica densa

Tabla 29. Combinación de agregados pétreos mezcla asfáltica densa

Tamices		Puntos de control		Grava	Gravilla	Arena	Peso Ret.	% que pasa
(pulg)	(mm)	Mín	Máx	28 %	14 %	58 %	100 %	
1"	25.4	100	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.0	97.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.5	76.00	88.00	866.03	2.26	0.00	868.29	82.63
3/8"	9.50	-	-	351.24	47.95	0.00	399.20	74.65
Nº 4	4.75	49.00	59.00	177.53	544.87	452.88	1175.28	51.14
Nº 8	2.36	36.00	45.00	4.53	100.94	466.90	572.37	39.70
Nº 10	2.00	-	-	0.00	2.24	82.96	85.19	37.99
Nº 16	1.18	-	-	0.00	0.19	242.94	243.13	33.13
Nº 30	0.60	20.00	28.00	0.00	0.06	293.62	293.67	27.26
Nº 50	0.30	13.00	21.00	0.00	0.06	458.88	458.94	18.08
Nº 100	0.15	-	-	0.00	0.06	517.82	517.88	7.72
Nº 200	0.075	3.00	7.00	0.00	0.03	294.20	294.22	1.84
BASE	-	-	-	0.53	1.24	89.49	91.27	0.01

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 8. Curva granulométrica combinada Marshall



Fuente: Elaboración propia

3.7.2. Dosificación para la elaboración de briquetas convencionales

Tabla 30. Dosificación mezcla densa

Peso total de briketa (gr)	1200
Ponderación de grava	28
Ponderación de gravilla	14
Ponderación de arena	58
Ponderación de filler	0

Porcentaje total de briketa	100%
Porcentaje total de cemento asfáltico	X %
Porcentaje total del agregado	100 - X %

Descripción	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla					
	4.0%	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	6.5%
Porcentaje de agregado (%)	96.00%	95.50%	95.00%	94.50%	94.00%	93.50%
Peso del cemento asfáltico (gr)	48.00	54.00	60.00	66.00	72.00	78.00
Peso de grava (gr)	322.56	320.88	319.20	317.52	315.84	314.16
Peso de gravilla (gr)	161.28	160.44	159.60	158.76	157.92	157.08
Peso de arena (gr)	668.16	664.68	661.20	657.72	654.24	650.76
Peso de filler (gr)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Peso total de la briketa (gr)	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia

Para los cálculos correspondientes se sigue los mismos puntos del apartado 3.5.5

3.7.3. Análisis de resultados para encontrar el contenido óptimo de cemento asfáltico para la mezcla densa convencional

Los ensayos que se realizaron en las diferentes briquetas de las mezclas asfálticas arrojaron resultados mostrados en la Tabla 31; en base a estos valores se determinó el contenido óptimo de cemento asfáltico.

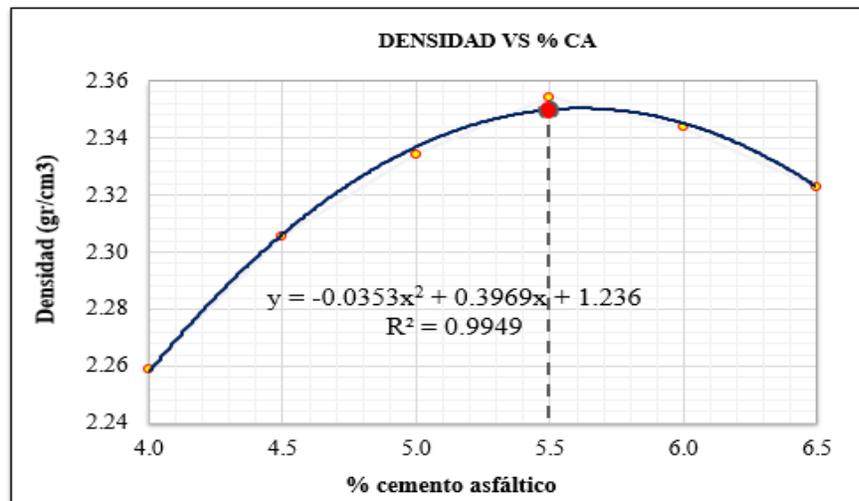
Tabla 31. Resumen de resultado de ensayos realizados a las briquetas

Resumen de resultados				
C.A (%)	Densidad real (gr/cm ³)	V (%)	VAM (%)	RBV (%)
4.00	2.26	7.47	16.27	54.08
4.50	2.31	4.89	14.99	67.40
5.00	2.33	3.02	14.38	79.02
5.50	2.35	1.50	14.10	89.39
6.00	2.34	1.25	14.94	91.62
6.50	2.32	1.45	16.15	91.01

Fuente: Elaboración propia

En las siguientes gráficas se puede observar la tabulación de los datos de la tabla anterior para una mejor interpretación, de esta manera se puede apreciar cómo varía el comportamiento de la mezcla asfáltica densa convencional en cada ensayo, dependiendo siempre del contenido de cemento asfáltico.

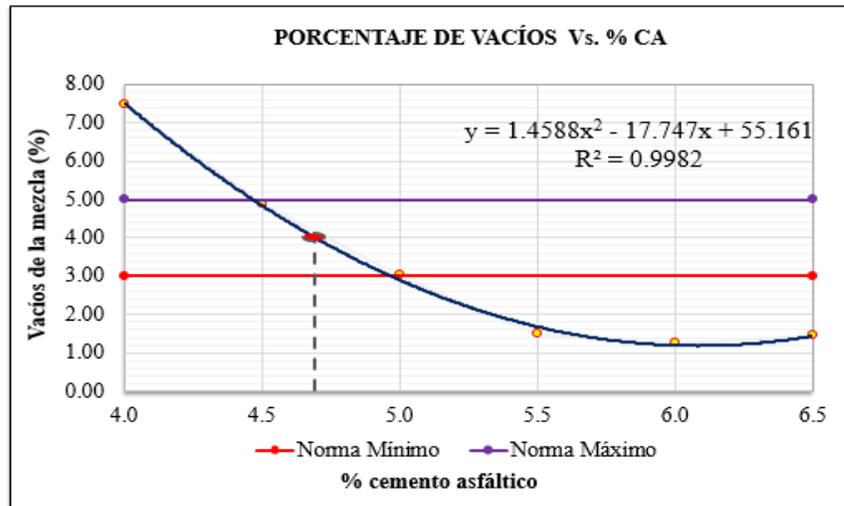
Gráfica 9. Densidad real de la mezcla asfáltica densa



Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la Gráfica 9, la densidad va en incremento a medida que se aumenta el porcentaje de cemento asfáltico, posteriormente esta disminuye bruscamente a partir del 5.5 % de cemento asfáltico.

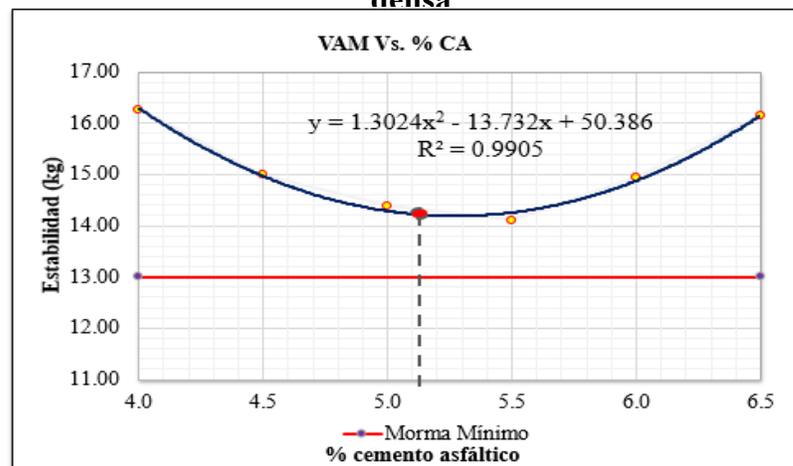
Gráfica 10. Porcentaje de vacíos de la mezcla asfáltica densa



Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la Gráfica 10, el porcentaje de vacíos va disminuyendo a medida que se aumenta el porcentaje de cemento asfáltico.

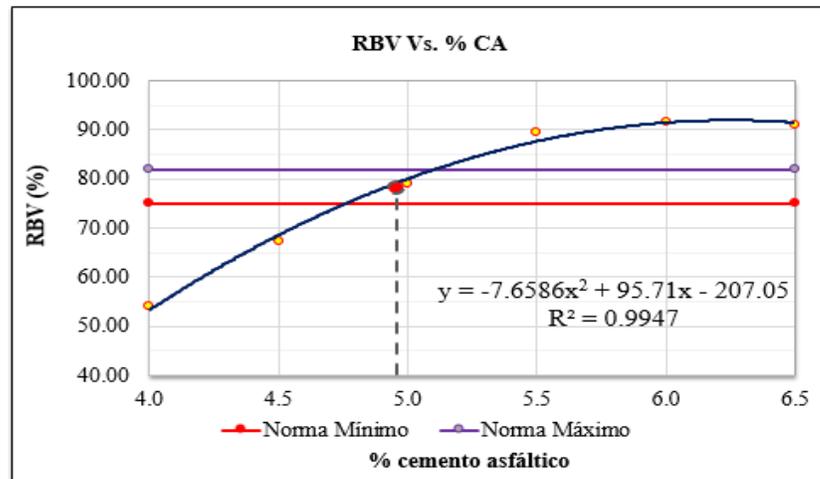
Gráfica 11. Porcentaje de vacíos en el agregado mineral de la mezcla asfáltica densa



Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la Gráfica 11, que la incorporación de porcentajes de cemento asfáltico del 4.50 % al 6.50 %, poseen un porcentaje de vacíos en el agregado mineral está dentro de lo especificado por el diseño de la mezcla asfáltica densa.

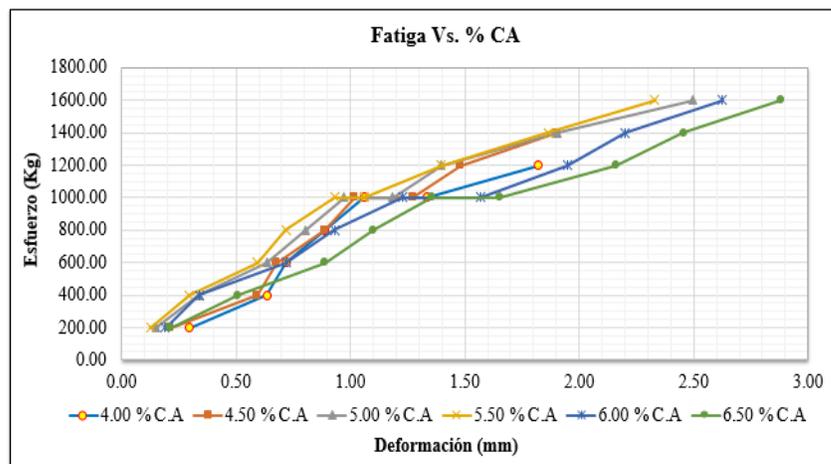
Gráfica 12. Porcentajes de vacíos de la llenante mineral de la mezcla asfáltica densa



Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la Gráfica 12, que la incorporación de porcentajes de cemento asfáltico del 4.50 % al 5.00 %, poseen un porcentaje de vacíos de la llenante mineral está dentro de lo especificado por el diseño de la mezcla asfáltica densa.

Gráfica 13. Fatiga de la mezcla asfáltica densa

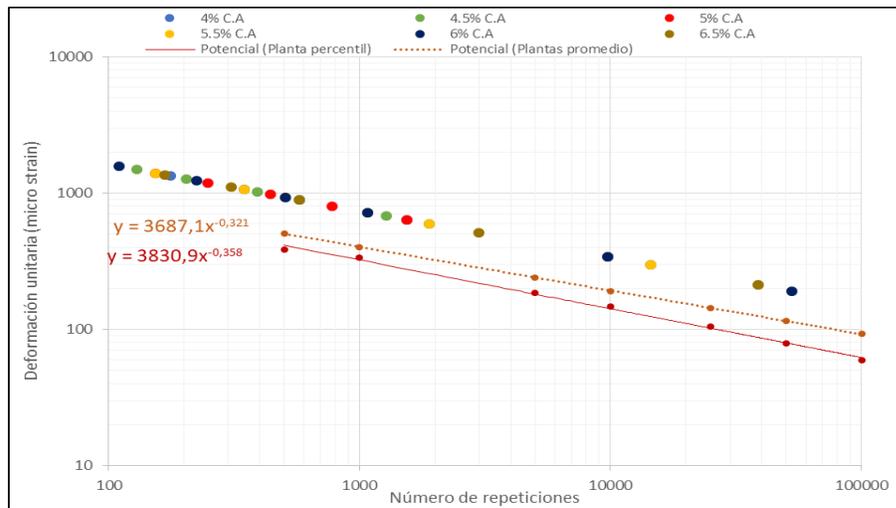


Fuente: Elaboración propia

En la Gráfica 13, se ve que una mezcla asfáltica densa, con un porcentaje de cemento asfáltico del 5.00 y 5.50 %, tiene una menor deformación en relación del esfuerzo que fue aplicado a las briquetas, con los demás porcentajes de cemento asfáltico.

Para el cálculo del número de repeticiones se tomó las ecuaciones empíricas mostradas en el apartado 2.7.6, como también se tomó los coeficientes de regresión de la ecuación de Medina et al (1982).

Gráfica 14. Fatiga mezcla densa



Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que con un porcentaje de cemento asfáltico del 5.50 % tiene un mejor comportamiento en relación al número de repeticiones en relación del esfuerzo que fue aplicado a las briquetas, con los demás porcentajes de cemento asfáltico.

El porcentaje óptimo de cemento asfáltico, será calculado por el promedio de los siguientes parámetros:

Tabla 32. Resumen de resultados del porcentaje óptimo de cemento asfáltico

	Ensayo	Valor de diseño	Valor calculado	C.A (%)
Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Densidad real (gr/cm ³)	-	2.35	5.50
	Vacíos de la mezcla (%)	3-5	3.97	4.70
	Vacíos del agregado mineral VAM (%)	13	14.20	5.20
	Vacíos de la llenante mineral RBV (%)	75-82	80.03	5.00
	Fatiga (mm)	-	-	5.50
	Porcentaje óptimo de C.A.	Promedio		5.18

Fuente: Elaboración propia

Realizando un análisis comparativo de cada gráfica, podemos observar que para un porcentaje del 5.18 % del cemento asfáltico, presenta mejoras en sus propiedades mecánicas en relación a los demás porcentajes por lo cual concluimos que el porcentaje óptimo de cemento asfáltico en el diseño de la mezcla asfáltica densa convencional es del 5.18 %.

3.8. Tratamiento estadístico de los resultados

Para el análisis del tratamiento estadístico se debe seguir una secuencia de pasos la cual nos llevará a la confiabilidad de los resultados del diseño para las mezclas asfálticas porosas.

Los pasos a seguir son los siguientes:

Paso 1: Desviación estándar.

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

$$S = \sqrt{\frac{0.24}{30 - 1}}$$

$$S = 0.09 \text{ (mm)}$$

Tabla 33. Desviación estándar de resultados para el diseño

n	$(X_i - \bar{X})^2$
1	0.001
2	0.010
3	0.001
4	0.001
5	0.001
6	0.010
7	0.001
8	0.079
9	0.024
10	0.001
11	0.052
12	0.001
13	0.001
14	0.001
15	0.001
16	0.001
17	0.001
18	0.001
19	0.001
20	0.001
21	0.010
22	0.010
23	0.001
24	0.010
25	0.001
26	0.010
27	0.010
28	0.001
29	0.001
30	0.001
Total	0.24

Fuente: Elaboración propia

Paso 2: Varianza.

$$S^2 = \sigma^2$$

$$\sigma^2 = 0.01(\text{seg})$$

Paso 3: Error medio de la media.

$$E_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}}$$

$$E_{\bar{x}} = \frac{0.09}{\sqrt{30}}$$

$$E_{\bar{x}} = \mathbf{0.02 \text{ (seg)}}$$

Paso 4: Error probable.

$$E_p = Z * E_{\bar{x}}$$

NC = Nivel de confianza = 95 % $\rightarrow Z = 1.96$ (De tabla, distribución normal)

$$E_p = 1.96 * 0.02$$

$$E_p = \mathbf{0.03}$$

Paso 5: Intervalo de confianza.

\bar{X} = (Media aritmética) = 2.51 mm.

$$Va = \bar{X} \pm E_p$$

$$Va = 2.51 + 0.03 = \mathbf{2.55 \text{ mm}} \rightarrow \mathbf{\text{Valor máximo}}$$

$$Va = 2.51 - 0.03 = \mathbf{2.48 \text{ mm}} \rightarrow \mathbf{\text{Valor mínimo}}$$

Tabla 34. Tratamiento estadístico para el diseño de una mezcla asfáltica Superpave

Propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica Superpave					
n	Densidad real (gr/cm³)	Vacíos (%)	VAM (%)	RBV (%)	Fatiga (mm)
1	2.31	3.97	15.48	74.33	2.54
2	2.29	4.63	16.05	71.17	2.41
3	2.30	4.10	15.59	73.70	2.54
4	2.30	4.16	15.64	73.42	2.54
5	2.31	3.99	15.49	74.22	2.54
6	2.31	3.94	15.45	74.48	2.41
7	2.31	3.82	15.34	75.10	2.54
8	2.30	4.19	15.67	73.24	2.79
9	2.30	4.10	15.58	73.72	2.67
10	2.30	4.17	15.65	73.33	2.54
11	2.30	4.28	15.74	72.83	2.29
12	2.31	4.05	15.54	73.94	2.54
13	2.32	3.61	15.15	76.20	2.54
14	2.31	3.93	15.43	74.56	2.54
15	2.30	4.16	15.64	73.39	2.54
16	2.30	4.10	15.58	73.72	2.54
17	2.31	3.85	15.37	74.94	2.54
18	2.31	3.81	15.33	75.16	2.54
19	2.31	3.92	15.43	74.58	2.54
20	2.30	4.14	15.62	73.51	2.54
21	2.31	4.07	15.56	73.86	2.41
22	2.31	4.05	15.54	73.96	2.41
23	2.31	4.00	15.50	74.21	2.54
24	2.31	3.93	15.43	74.56	2.41
25	2.30	4.07	15.56	73.84	2.54
26	2.31	3.95	15.46	74.44	2.41
27	2.30	4.43	15.88	72.08	2.41
28	2.29	4.53	15.97	71.62	2.54
29	2.30	4.15	15.63	73.44	2.54
30	2.30	4.40	15.85	72.23	2.54
Media	2.30	4.08	15.57	73.79	2.51
Desviación estándar (S)	0.01	0.22	0.191	1.07	0.09
Varianza (S² = σ²)	2.73E-05	0.05	0.04	1.14	0.01
Error medio de la media (Ex)	0.00	0.04	0.03	0.19	0.02
Error probable (Ep)	0.00	0.08	0.07	0.38	0.03
Límite superior (M+Ep)	2.31	4.16	15.64	74.17	2.55
Límite inferior (M-Ep)	2.30	4.00	15.50	73.40	2.48

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se detalla un análisis de los resultados obtenidos por el tratamiento estadístico.

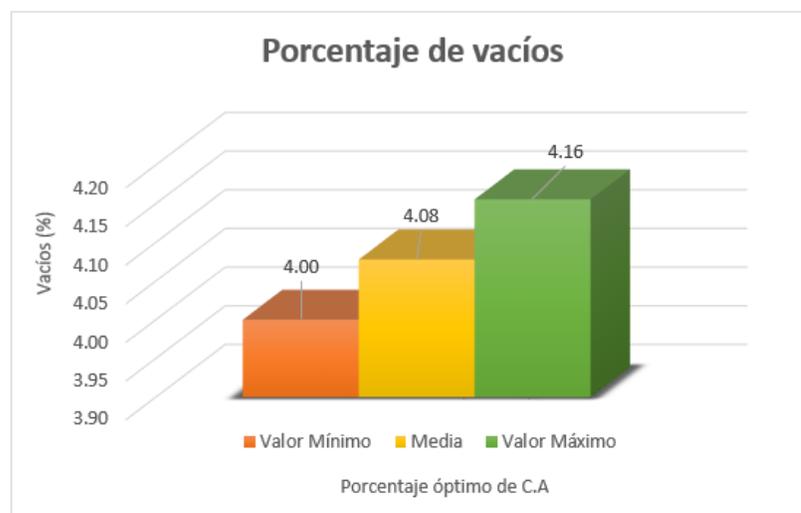
Gráfica 15. Densidad real para el diseño de la mezcla asfáltica Superpave



Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la Gráfica 15, que el valor de la media aritmética de la densidad real, se encuentra aún dentro del intervalo de confianza, dando así validez al resultado obtenido para nuestro diseño.

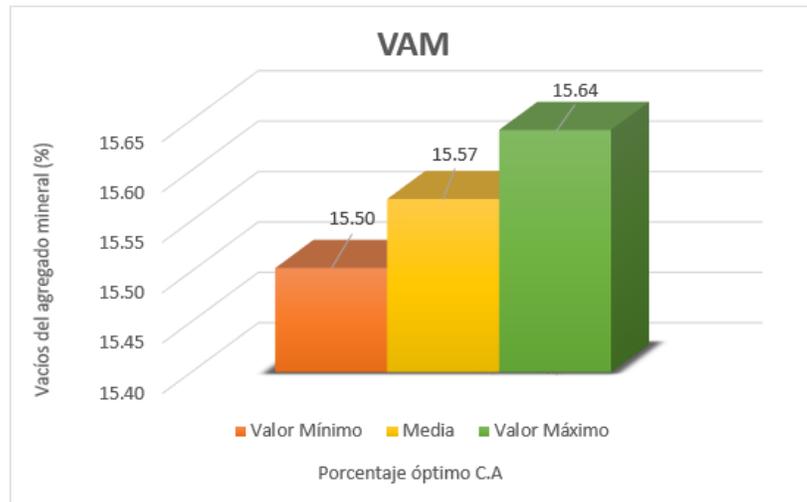
Gráfica 16. Porcentaje de vacíos de la mezcla para el diseño de la mezcla asfáltica Superpave



Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la Gráfica 16, que el valor de la media aritmética del porcentaje de vacíos de la mezcla, se encuentra aún dentro del intervalo de confianza, dando así validez al resultado obtenido para nuestro diseño.

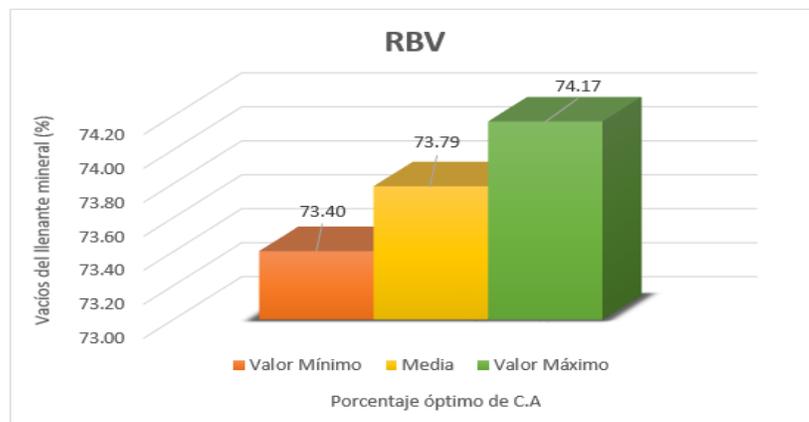
Gráfica 17. Porcentaje de vacíos del agregado mineral para el diseño de la mezcla asfáltica Superpave



Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la Gráfica 17, que el valor de la media aritmética del porcentaje de vacíos del agregado mineral, se encuentra aún dentro del intervalo de confianza, dando así validez al resultado obtenido para nuestro diseño.

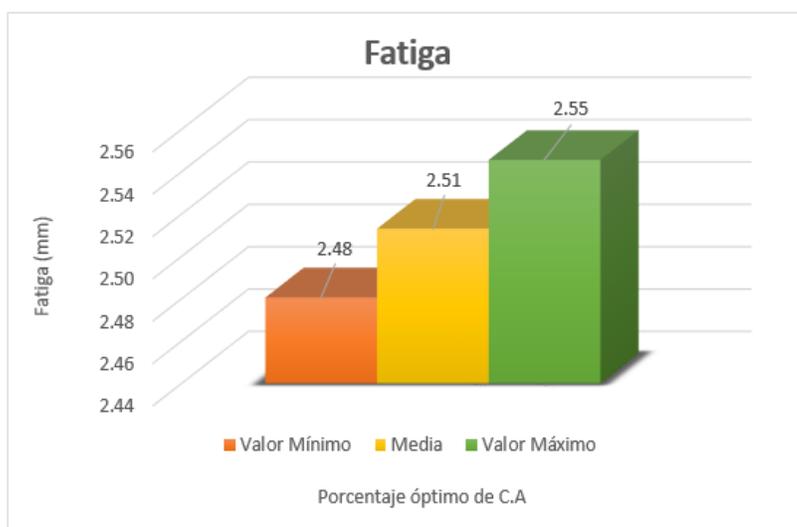
Gráfica 18. Porcentaje de vacíos de la llenante mineral para el diseño de la mezcla asfáltica Superpave



Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la Gráfica 18, que el valor de la media aritmética del porcentaje de vacíos de la llenante mineral, se encuentra aún dentro del intervalo de confianza, dando así validez al resultado obtenido para nuestro diseño.

Gráfica 19. Fatiga para el diseño de la mezcla asfáltica Superpave

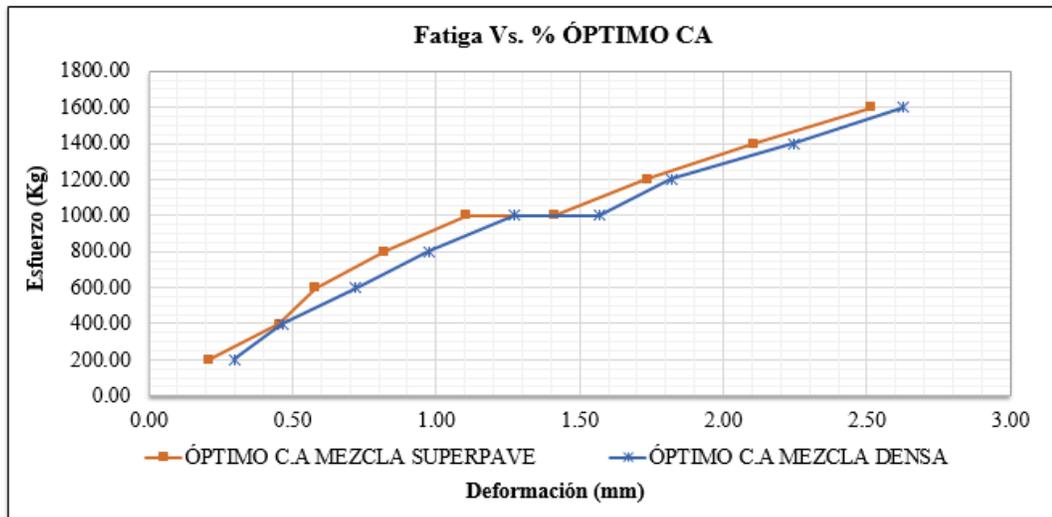


Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la Gráfica 19, que el valor de la media aritmética de la fatiga, se encuentra aún dentro del intervalo de confianza, dando así validez al resultado obtenido para nuestro diseño.

Realizando un análisis de la fatiga con el porcentaje óptimo de cemento asfáltico de las dos mezclas asfálticas, se puede observar que la mezcla Superpave tiene un porcentaje menor de deformación en relación a la mezcla densa, esto sucede por su composición granulométrica que tiene la mezcla, dando así validez que mejora en sus propiedades mecánicas en relación a una mezcla asfáltica densa convencional.

Gráfica 20. Fatiga de las dos mezclas asfálticas con su porcentaje óptimo de cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia

En el apartado 2.7.6. Nos indica que, según el criterio expuesto (Vila et al, 2015) si al plotear el resultado de un ensayo, este se ubica encima de la recta (Ver figura) se puede decir que dicha mezcla tendrá un comportamiento bueno ante la fatiga. Si el punto se ubica entre la línea promedio y percentil 15, la mezcla tendrá un comportamiento tolerable. La mezcla tendrá un mal comportamiento si el punto se ubica por debajo de dichas rectas.

Con lo que podemos concluir que nuestro diseño tendrá un comportamiento bueno en relación a la fatiga.

3.9. Justificación del ensayo de la tracción indirecta para la determinación de la fatiga

El ensayo de tracción indirecta fue desarrollado por Thomas Kennedy, es un ensayo que se destaca por su sencillez de ejecución y confiabilidad en sus resultados al mostrar poca dispersión. Este ensayo se utiliza especímenes o briquetas similares a las utilizadas en el ensayo Marshall, la cual también es usada en la prensa Marshall.

Este ensayo no solo brinda información de la resistencia a tracción indirecta, sino que también es útil para conocer propiedades elásticas resilientes, tales como, módulo de elasticidad estático o dinámico, dependiendo de la naturaleza de la aplicación de carga

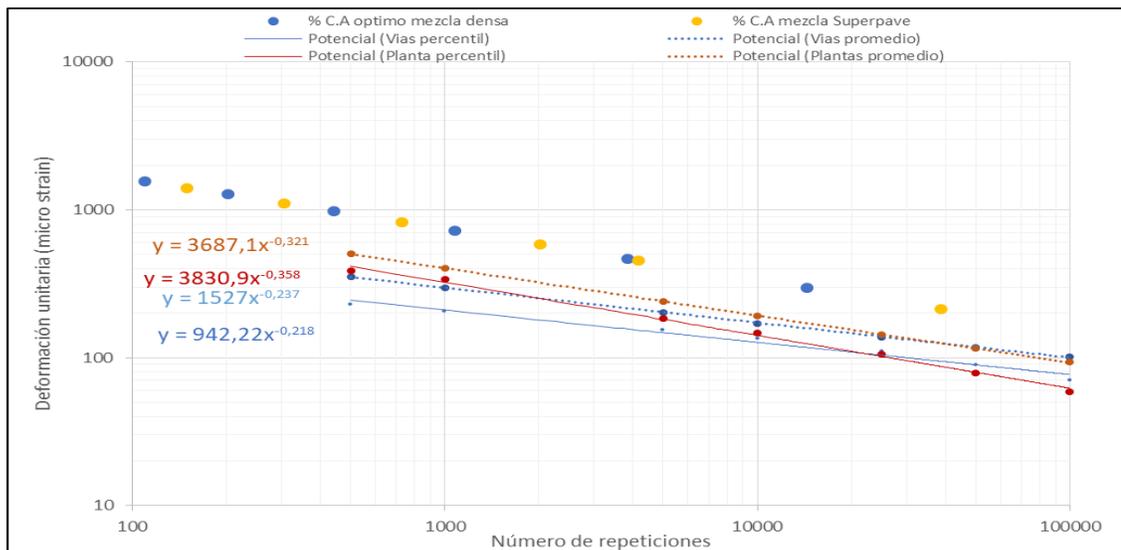
utilizada durante el ensayo, figuración térmica, figuración por fatiga, deformación permanente y para evaluar el efecto de la humedad en mezclas.

El término del ensayo se da cuando la muestra falla o su deformación es el doble de la deformación inicial.

Esta modalidad es más sensible a las variables de la mezcla y representa de mejor el comportamiento de mezclas con espesores mayores a 100 mm.

Según el criterio expuesto (Vila et al, 2015) si al plotear el resultado de un ensayo, este se ubica encima de la recta (Ver figura) se puede decir que dicha mezcla tendrá un comportamiento bueno ante la fatiga. Si el punto se ubica entre la línea promedio y percentil 15, la mezcla tendrá un comportamiento tolerable. La mezcla tendrá un mal comportamiento si el punto se ubica por debajo de dichas rectas.

Gráfica 21. Fatiga de las dos mezclas asfálticas con su porcentaje óptimo de cemento asfáltico y numero de repeticiones



Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la gráfica anterior se ploteo los resultados del ensayo de la fatiga del diseño de la mezcla Superpave y densa lo cual se puede concluir que dicha mezcla tendrá un comportamiento bueno ante la fatiga.

Por consiguiente, damos al resultado del ensayo como válido, ya que se puede validar el criterio expuesto por (Vila et al, 2015).

3.10. Precios unitarios de la mezcla asfáltica Superpave y una mezcla asfáltica densa

Se realiza el análisis de precios unitarios por metro cúbico para la mezcla asfáltica SUPERPAVE y una mezcla asfáltica densa.

El precio a tener en cuenta es el costo de producción, el cual es uno de los indicadores más importantes a considerar en los proyectos de ingeniería civil; por lo tanto, mientras más eficiente sea, menor será la inversión de los recursos en la producción de la mezcla y por ende menor será la cuantía de los gastos.

Para la ejecución y transporte de la carpeta asfáltica Superpave, el análisis de precios unitarios comprende los costos de materiales, mano de obra, equipo y herramientas, gastos generales e impuestos.

A continuación, se detallará la dosificación para una mezcla asfáltica Superpave:

Tabla 35. Dosificación para la mezcla asfáltica Superpave

Cálculo de la dosificación de la mezcla Superpave	
Materiales	(%)
Grava triturada 3/4"	20.00
Grava triturada 3/8"	15.00
Agregado triturado	65.00
Cemento asfáltico	5.12

Fuente: Elaboración propia

Se realizó un cálculo para una producción de 1 m³ de la mezcla asfáltica Superpave; a continuación, se muestran los respectivos cálculos:

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

Tabla 36. Dosificación de la mezcla asfáltica Superpave para un metro cubico

Dosificación para 1 m³ de la mezcla asfáltica Superpave				
Material	Peso (kg)	Materiales (%)	Peso específico (kg/m³)	Volumen (m³)
Grava triturada 3/4"	450.00	20.00	2710	0.166
Grava triturada 3/8"	337.50	15.00	2710	0.125
Agregado triturado	1462.50	65.00	2350	0.622
Cemento asfáltico	115.20	5.12	1027	-

Fuente: Elaboración propia

Tabla 37. Dosificación de la mezcla asfáltica densa

Dosificación para 1 m³ de la mezcla asfáltica densa				
Material	Peso (kg)	Materiales (%)	Peso específico (kg/m³)	Volumen (m³)
Grava triturada 3/4"	630.00	28.00	2710	0.232
Grava triturada 3/8"	315.00	14.00	2710	0.116
Agregado triturado	1305.00	58.00	2350	0.555
Cemento asfáltico	116.55	5.18	1027	-

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se resume el costo total para una mezcla asfáltica Superpave y una mezcla asfáltica densa. El análisis de datos se detalla en los Anexos 4.

Tabla 38. Resumen de precios unitarios para una mezcla asfáltica Superpave

Descripción	Costo total
1.- Materiales	
Total, materiales	1023.33
2.- Mano de obra	
Total, mano de obra	122.65
3.- Equipo, maquinaria y herramientas	
Total, equipo, maquinaria y herramientas	183.55
4.- Gastos generales	
Total, gastos generales	132.95
5.- Utilidad	
Total, utilidad	146.25
6.- Impuestos	
Total, impuestos	49.71
Total precio unitario	1658.44

Fuente: Elaboración propia

Tabla 39. Resumen de precios unitarios para una mezcla asfáltica densa

Descripción	Costo total
1.- Materiales	
Total, materiales	1030.22
2.- Mano de obra	
Total, mano de obra	122.65
3.- Equipo, maquinaria y herramientas	
Total, equipo, maquinaria y herramientas	183.55
4.- Gastos generales	
Total, gastos generales	133.64
5.- Utilidad	
Total, utilidad	147.01
6.- Impuestos	
Total, impuestos	49.97
Total, precio unitario	1667.04

Fuente: Elaboración propia

3.10.1. Análisis económico

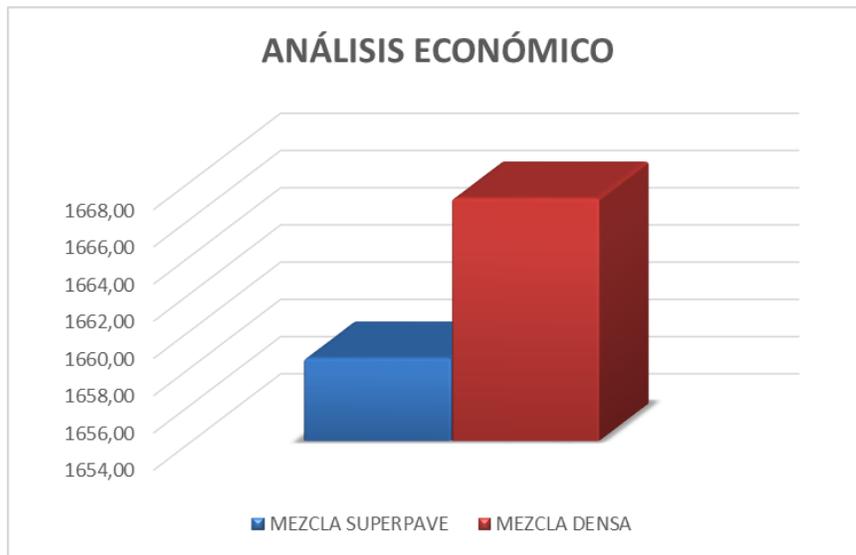
Se realizará un análisis económico para ver cómo varía el costo de una mezcla asfáltica Superpave y una densa, con el contenido óptimo de cemento asfáltico.

Como las mezclas asfálticas se caracterizan por su resistencia, este será el análisis que se realizará, para realizar su análisis económico.

En la Gráfica 24, se ve cómo varía el costo de una mezcla asfáltica Superpave y una densa convencional.

Se puede observar que el costo de una mezcla asfáltica Superpave, tiene una pequeña diferencia en precio; sin embargo, esta tiene una menor deformación en relación a la mezcla asfáltica densa convencional, dando así viabilidad para la construcción de una carpeta asfáltica con granulometría Superpave.

Gráfica 22. Análisis económico de una mezcla asfáltica Superpave y una densa convencional



Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Se revisó la bibliografía necesaria para realizar el análisis y diseño de la mezcla asfáltica con granulometría Superpave, cumpliendo sus especificaciones y parámetros.
- Se realizó con normalidad los diferentes ensayos de caracterización, como de los agregados pétreos de la planta chancadora de Charajas y el del cemento asfáltico, donde se pudo verificar que los mismos cumplen con las especificaciones de la norma ASTM para el diseño de la mezcla asfáltica Superpave.
- Se realizó la dosificación utilizando los agregados pétreos de la planta chancadora de Charajas y el cemento asfáltico de la posta municipal, con las cuales se realizó la mezcla asfáltica Superpave.
- Se estableció el contenido óptimo de CA, para que una mezcla asfáltica Superpave cumpla con los parámetros fijados por la normativa la cual nos dio un contenido óptimo del CA del 5.12 %. Con este porcentaje podemos concluir que obtuvimos mejores propiedades en la mezcla asfáltica Superpave.
- En el análisis de la fatiga, de una mezcla asfáltica Superpave y una mezcla asfáltica densa, con su contenido óptimo de cemento asfáltico. Podemos observar que una mezcla asfáltica Superpave, presenta una menor deformación, como también aumenta el número de repeticiones de carga en relación a una mezcla asfáltica densa convencional, esto sucede por su composición granulométrica que tiene la mezcla, y sus propiedades que la clasifican a la misma.
- De acuerdo a la hipótesis planteada se concluye que, si diseñamos una mezcla asfáltica Superpave, sus propiedades mecánicas cumplen con las especificaciones de diseño; por lo tanto, esta puede ser considerada como alternativa técnica para la elaboración de las mezclas asfálticas Superpave.

4.2. Recomendaciones

Una vez concluido el trabajo de investigación se tiene las siguientes conclusiones:

- Para facilitar la trabajabilidad al momento de realizar las briquetas con cada contenido de asfalto, se debe realizar el pesaje de los agregados pétreos en bandejas separadas, posteriormente a su elaboración.
- Realizar el mezclado de los agregados y 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 para la investigación.
- Al momento de la compactación con el martillo Marshall, ésta se debe realizar a una velocidad y una altura constante; debido a estas alteraciones podrían variar los resultados en el momento de realizar los ensayos correspondientes.
- Se recomienda que el proceso más habitual para el diseño de una mezcla asfáltica Superpave, se la debe realizar con sus equipos correspondientes para así obtener mejores resultados y más confiables.
- Tener mucho cuidado durante el proceso de medición y obtención de datos para poder verificar los resultados con las especificaciones del diseño de la mezcla asfáltica Superpave.
- El aporte de esta investigación estimula la necesidad de seguir investigando más a detalle el comportamiento de las propiedades de las mezclas asfálticas Superpave.

