

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Una de las partes más importantes de una carretera, calle o aeropuerto es su pavimento, sin esta estructura no se puede pensar en tránsito rápido, cómodo y seguro. La Red Vial de Bolivia en la actualidad, el país posee una de las más extensas redes viales de América Latina con alrededor de 189.850 kilómetros de caminos, hasta el año 2019, de los 189.850 kilómetros, por lo menos unos 30.396 kilómetros son caminos completamente pavimentados, otros 49.668 kilómetros aún son caminos de ripio, unos 102.088 kilómetros son todavía caminos de tierra y finalmente otros 4.051 kilómetros están empedrados.

La mezcla asfáltica en caliente para pavimentos de carreteras está compuesta por una combinación de agregados minerales y un cemento asfáltico, ambos con cualidades muy particulares, cuyas proporciones en la mezcla más la efectividad del proceso de compactación implicarán propiedades que pudiesen ser muy variables.

Si bien en la actualidad existen diversos métodos para el diseño de mezclas asfálticas, desde hace varias décadas es usual en el país el método Marshall, concebido hace más de medio siglo para tránsito y cargas muy inferiores a las actuales, y con un enfoque empírico que no considera el comportamiento o desempeño de la mezcla asfáltica a lo largo del tiempo.

Parte de la solución al problema radica en garantizar un diseño de mezcla asfáltica con adecuado contenido de ligante asfáltico y de vacíos. Se proyecta incorporar en el presente trabajo la aplicación de la metodología denominada RAMCODES como alternativa de diseño para la obtención del contenido óptimo de asfalto de mezclas asfálticas en forma analítica, prescindiendo de ajustes, o rediseños de mezcla debido al incumplimiento de

requerimientos principalmente vacíos, y que a su vez permite desarrollar un mejor criterio para la elección del contenido óptimo de asfalto en la etapa de diseño.

La Metodología RAMCODES desarrollado por Freddy J. Sánchez-Leal desde 1998, fusiona racionalmente las especificaciones de diseño con los criterios de control en campo, mediante la representación gráfica de un área delimitada donde se garantiza el cumplimiento de todas las especificaciones de vacíos (Va, VAM y VFA).

1.2 Justificación

Bolivia es un país que aún no emplea la metodología RAMCODES en el diseño de mezclas asfálticas, la misma que propone un diseño de contenido óptimo de asfalto de mezclas asfálticas en forma analítica, prescindiendo de ajustes, o rediseños de mezcla, la cual permite desarrollar un mejor criterio para la elección del contenido óptimo de asfalto en la etapa de diseño, por tal motivo representa una optimización de recursos y tiempo, que pueden ser de mucho beneficio en nuestro medio como una nueva metodología a utilizar en el diseño de mezclas asfálticas.

Los avances tecnológicos en cualquier ámbito traen consigo innumerables beneficios a la sociedad, y este podría no ser la excepción. El incremento de seguridad en el tránsito vehicular, mayor rendimiento financiero y vida útil más prolongada, son algunos de los beneficios que se podrían obtener con la metodología RAMCODES. Todo esto se resume en un mejor servicio para el usuario.

Se espera que esta investigación sea un aporte a las instituciones públicas y privadas dedicadas a la construcción de vías, para aplicar otros métodos innovadores de diseño de mezclas asfálticas calientes en Bolivia.

1.3 Situación problemática

En la actualidad en Bolivia , no existe una actualización de nuevos métodos de diseño de mezclas asfálticas en caliente, teniendo en cuenta que el método Marshall es usado tradicionalmente ya desde hacía varias décadas en el país, a diferencia de otros países que utilizan muchos métodos de diseño de mezclas asfálticas, con los avances tecnológicos

algunos países han desarrollado y empleado metodologías que se han convertido en unas verdaderas soluciones técnicas, en la mayoría de los casos desde el punto de vista económico más rentables, de ahí la necesidad de encontrar soluciones propias que se adapten a nuestra realidad nacional.

Al observar que se necesita emplear nuevas metodologías de diseño de mezclas asfálticas se propone en esta investigación la metodología RAMCODES diseño de mezclas asfálticas enlazando las especificaciones de diseño principalmente de vacíos (VFA, vacíos rellenos de asfalto; VAM, vacíos en el agregado mineral; Va, vacíos en la mezcla compactada), su creador Sánchez Leal la describe como una metodología económica, ya que este método de diseño permite la optimización y el uso racional de los materiales, obteniendo productos más confiables, considerando la respuesta de la mezcla asfáltica como son las propiedades mecánicas Estabilidad y Fluencia.

Es necesario hacer la comparación de nuevas metodologías para el diseño de mezclas asfálticas en caliente y densas como ser la metodología RAMCODES con la metodología Marshall, teniendo como referencia de comparación la respuesta de sus propiedades mecánicas como ser la Estabilidad y la fluencia.

1.3.1 Determinación del problema

¿Cuál de los métodos en comparación RAMCODES y Marshall proponen mejores resultados de Estabilidad y fluencia (flujo)?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Comparar las propiedades mecánicas de los diseños de mezclas asfálticas en caliente y densas, aplicando las metodologías Marshall y RAMCODES con los mismos agregados pétreos y tipo de asfalto; para establecer los mejores resultados de estabilidad y fluencia (flujo).

1.4.2 Objetivos específicos

- Determinar la caracterización de los agregados pétreos y del cemento asfáltico.
- Elaborar especímenes en laboratorio basado en el método Marshall.
- Realizar los cálculos del diseño de mezclas mediante la metodología RAMCODES (polígono de vacíos).
- Efectuar la comprobación en laboratorio de la metodología RAMCODES.
- Comparar los resultados obtenidos de los especímenes elaborados en laboratorio entre la metodología Marshall y RAMCODES.
- Establecer una posición sobre ventajas y desventajas de la metodología RAMCODES.
- Comparar el costo de las mezclas asfálticas diseñadas con las metodologías Marshall y RAMCODES.
- Emitir las conclusiones y recomendaciones del empleo de la metodología RAMCODES.

1.5 Formulación de la hipótesis

1.5.1 Hipótesis

Aplicando la metodología RAMCODES en el diseño de mezclas asfálticas en caliente y densas se obtienen mejores resultados de estabilidad y fluencia.

1.5.2 Identificación de las variables

1.5.2.1 Variables independientes

Método Marshall.

Metodología RAMCODES.

1.5.2.2 Variables dependientes

Estabilidad.

Fluencia (flujo).

1.5.3 Conceptualización y operacionalización

Tabla 1.1 Operacionalización de las variables independientes.

Variable Independiente	Concepto	Dimensión	Indicador	Valor /Acción
Método Marshall	Método empírico para el diseño de mezclas asfálticas en caliente.	Diseño de mezclas asfálticas.	Propiedades mecánicas.	Norma ASTM D-1559
Metodología RAMCODES	Metodología analítica para el diseño de mezclas asfálticas en caliente.	Diseño de mezclas asfálticas.	Especificaciones de vacíos.	Polígono de vacíos

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1.2 Operacionalización de las variables dependientes.

Variable Dependiente	Concepto	Dimensión	Indicador	Valor /Acción
Estabilidad	La estabilidad se ejecuta con el fin de medir la resistencia a la deformación de la mezcla.	Estabilidad	Mínima de 1800 N. a 75 golpes.	El proceso se realiza conforme a la norma ASTM D-1559
Fluencia	Es la deformación que va a sufrir la muestra al medir su estabilidad.	Fluencia	8mm-14mm (0,01 pulgadas) a 75 golpes.	El proceso se realiza conforme a la norma ASTM D-1559

Fuente: Elaboración propia.

1.6 Alcance de la investigación

La presente investigación se realiza en la ciudad de Tarija, la misma que tiene un nivel de alcance causal explicativa en un diseño experimental con categoría de cuasi experimento, porque los grupos experimentales son asignados o impuestos para recién proceder al desarrollo de los resultados.

El trabajo de investigación pretende proporcionar la metodología de diseño RAMCODES para la elaboración de mezcla asfáltica en caliente y densas, la misma que tendrá una utilidad para las empresas constructoras e ingenieros civiles y público en general dedicados a la construcción de carreteras para adquirir conocimiento de esta nueva alternativa de diseño de mezcla asfáltica, ya que en nuestro país Bolivia aún no se emplea este tipo de metodología de diseño.

Para el desarrollo y ejecución se utilizarán las instalaciones de laboratorio de Asfaltos y el laboratorio de Hormigones y Resistencia de materiales de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, donde se proporciona el equipo necesario para la realización de los ensayos. Los materiales de la mezcla (agregados y cemento asfáltico) son obtenidos del Gobierno Autónomo Municipal de Tarija, esto con el fin de tener una mezcla que cumpla con todos los requisitos como lo disponen en las especificaciones técnicas del Gobierno Autónomo Municipal de Tarija.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 Definición de mezcla asfáltica

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

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

Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.

2.2 Clasificación de las mezclas asfálticas

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

Por fracciones de agregado pétreo empleado

Masilla asfáltica: Polvo mineral más ligante.

Mortero asfáltico: Agregado fino más masilla.

Concreto asfáltico: Agregado grueso más mortero.

Macadam asfáltico: Agregado grueso más ligante asfáltico.

Por la temperatura de puesta en obra

Mezclas asfálticas en caliente: Se fabrican con asfaltos a unas temperaturas elevadas, en el rango de los 150 grados centígrados, según la viscosidad del ligante. Se calientan también los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos. La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores a la ambiente, pues en caso contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente.

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

Por la proporción de vacíos en la mezcla asfáltica

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

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

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

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

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

Por el tamaño máximo del agregado pétreo

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

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

Por la estructura del agregado pétreo

Mezclas con esqueleto mineral: Poseen un esqueleto mineral resistente, su componente de resistencia debida al rozamiento interno de los agregados es notable. Ejemplo, las

mezclas abiertas y los que genéricamente se denominan concretos asfálticos, aunque también una parte de la resistencia de estos últimos, se debe a la masilla.

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

Por la granulometría

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

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

Tabla 2.1 Clasificación de mezclas asfálticas.

Parámetro de clasificación	Tipo de mezcla
Fracciones de agregado empleado	Masilla
	Mortero
	Concreto
	Madacam
Temperatura de puesta en obra	En frío
	En caliente
Huecos en la mezcla (V_a)	Densas y cerradas ($V_a < 6\%$)
	Semidensas o semicerradas ($6\% < V_a < 12\%$)
	Abiertas ($12\% < V_a < 18\%$)
	Porosas ($V_a > 20\%$)
Tamaño máximo del agregado (T máx.)	Gruesas (T máx. > 10 mm)
	Finas (T máx. < 10 mm)
Estructura del agregado	Con esqueleto mineral
	Sin esqueleto mineral
Granulometría	Continuas
	Discontinuas

Fuente: Elaboración propia.

2.3 Propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas

En general, todos los betunes presentan una serie de características físicas comunes tales como su color oscuro, la facultad de presentar buena adhesividad con la superficie de las partículas minerales o su inmiscibilidad con el agua.

En cuanto a su comportamiento mecánico, debe decirse que es muy complejo y que depende de varios factores, como son la sollicitación aplicada, el tiempo durante el que esta actúa o la temperatura ambiente.

Las propiedades más destacables de los betunes desde el punto de vista de la técnica de construcción de carreteras son las siguientes:

- **Adhesividad**

Facilidad que presenta el betún para adherirse a la superficie de una partícula mineral. Esta característica es muy importante en mezclas asfálticas, donde betún y áridos deben formar un conjunto homogéneo y continuo. Para mejorarla, puede recurrirse al uso de activantes.

- **Viscosidad**

Se define como la resistencia que oponen las partículas a separarse, debido a los rozamientos internos que ocurren en el seno del fluido. En el caso de los betunes varían con la temperatura, lo que da una idea de su susceptibilidad térmica.

- **Susceptibilidad térmica**

Indica la propensión que presenta el betún a variar propiedades reológicas especialmente la viscosidad con la temperatura. Gracias a esta propiedad pueden manejarse con facilidad a altas temperaturas, presentando una mayor estabilidad a temperatura ambiente.

- **Plasticidad**

Define el comportamiento mecánico del betún ante diferentes estados físicos y temporales de carga. Un betún poco plástico no soportara deformaciones excesivas sin que se produzca grietas.

- **Durabilidad**

La mezcla contiene suficiente cemento asfáltico, asegurando un adecuado espesor de película rodeando las partículas de agregados, así se minimiza el endurecimiento del cemento asfáltico. El curado durante la producción y la puesta en servicio también contribuye a esta característica. Por otro lado, la mezcla compactada no debería tener altos porcentajes de vacíos que aceleren el proceso de curado.

Tabla 2.2 Causas y efectos de una poca durabilidad.

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

Fuente: Elaboración propia.

- **Trabajabilidad**

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

Tabla 2.3 Causas y efectos de problemas en trabajabilidad.

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

Fuente: Elaboración propia.

2.4 Características y comportamiento de la mezcla

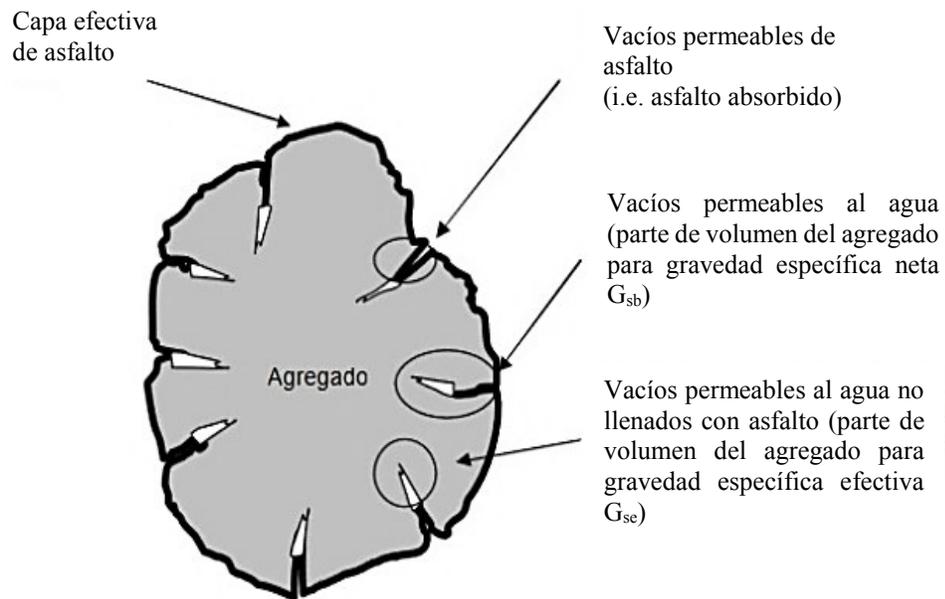
Una muestra de mezcla de pavimentación preparada en el laboratorio puede ser analizada para determinar su posible desempeño en la estructura del pavimento. El análisis está enfocado hacia cuatro características de la mezcla, y la influencia que estas puedan tener en el comportamiento de la mezcla. Las cuatro características son la densidad de la mezcla, vacíos de aire, o simplemente vacíos, vacíos en el agregado mineral y el contenido de asfalto.

2.5 Parámetros volumétricos dentro de la mezcla asfáltica

2.5.1 Gravedad específica neta del agregado (G_{sb})

Representa la relación, medida a una misma temperatura, entre la masa en el aire de un volumen unitario de agregado y la masa de igual volumen de agua; incluye únicamente los poros permeables al agua, normado por ASTM C 127 o ASTM C 128.

Figura 2.1 Parámetro del diseño volumétrico.



Fuente: Análisis comparativo de los métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas.

Se considera las fracciones separadas de agregados que conforman la mezcla final, cada una con sus diferentes gravedades específicas. Se calcula usando la siguiente ecuación:

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_N}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_N}{G_N}}$$

Donde:

G_{sb} = Gravedad específica neta de la combinación final de agregados, (gr/cm^3).

P_1, P_2, P_N = Porcentajes de cada fracción individual de las masas de los agregados, (%).

G_1, G_2, G_N = Gravedad específica neta de las fracciones individuales de los agregados, (gr/cm^3).

2.5.2 Gravedad específica aparente del agregado (G_{sa})

Representa la relación, medida a una misma temperatura, entre la masa en el aire de un volumen unitario de agregado y la masa de igual volumen de agua; incluye únicamente el volumen del sólido del agregado, normado por ASTM C 127 o ASTM C 128.

Se considera las fracciones separadas de agregados que conforman la mezcla final, cada una con sus diferentes gravedades específicas, se determina con la misma expresión para obtener el G_{sb} , obviamente utilizando las gravedades específicas aparentes de cada componente.

2.5.3 Gravedad específica efectiva del agregado (G_{se})

Representa la relación, medida a una misma temperatura, entre la masa en el aire de un volumen unitario de agregado y la masa de igual volumen de agua; incluye únicamente el volumen de los poros permeables al agua no llenos con asfalto. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - CA}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{CA}{G_b}}$$

Donde:

G_{se} = Gravedad específica efectiva del agregado, (gr/cm^3).

G_{mm} = Gravedad específica teórica máxima de la mezcla, (gr/cm^3).

P_{mm} = Porcentaje del peso de la mezcla total suelta, igual a 100, (%).

CA = Contenido de asfalto con respecto a la masa, (%).

G_b = Gravedad específica del asfalto, (gr/cm^3).

2.5.4 Gravedad específica máxima de las mezclas del agregado (G_{mm})

Representa la relación medida a una misma temperatura entre la masa de un volumen dado de mezcla asfáltica sin vacíos de aire y la masa de igual volumen de agua. Se determina para cada contenido de asfalto mediante ASTM D-2041 / AASHTO T-209.

Para obtener la gravedad específica máxima para cualquier otro contenido de asfalto que contenga la misma mezcla de agregados, la cual supone que la gravedad específica efectiva del agregado es constante; es válida puesto que la absorción del asfalto no varía apreciablemente con los cambios en el contenido de asfalto. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{CA}{G_b}}$$

Donde:

G_{se} = Gravedad específica efectiva del agregado.

G_{mm} = Gravedad específica teórica máxima.

P_{mm} = Porcentaje del peso de la mezcla total suelta igual a 100.

CA = Contenido de asfalto con respecto a la masa.

2.5.5 Asfalto absorbido (P_{ba})

Se determina mediante la siguiente ecuación

$$P_{ba} = 100 \times \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} \times G_{sb}} \times G_b$$

Donde:

P_{ba} = Asfalto absorbido, % por masa de agregado, (%).

G_{sb} = Gravedad específica bruta de la combinación de agregados, (gr/cm^3).

G_{se} = Gravedad específica efectiva de la combinación de agregados, (gr/cm^3).

G_b = Gravedad específica del asfalto, (gr/cm^3).

2.5.6 Contenido de asfalto efectivo en la mezcla (P_{be})

Representa una porción del total del asfalto de la mezcla, y que recubre exteriormente el agregado. Influye de gran manera en el desempeño de la mezcla asfáltica. Se determina mediante la siguiente ecuación:

$$P_{be} = CA - \frac{P_{ba}}{100} \times P_s$$

Donde:

P_{be} = Contenido efectivo de asfalto, % del total de la masa de la mezcla, (%).

P_{ba} = Asfalto absorbido, % por masa de agregado, (%).

CA = contenido de asfalto con respecto a la masa, (%).

P_s = Contenido del agregado, % del total de la masa de la mezcla asfáltica, (%).

2.5.7 Porcentaje de vacíos en el agregado mineral de la mezcla (VAM)

Representan el vacío intergranular entre las partículas del agregado pétreo, utilizado en la mezcla asfáltica compactada, se expresa como un porcentaje del volumen total e incluye el contenido de asfalto efectivo y los vacíos de aire.

Si la composición de la mezcla se determina como el porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica, se utiliza para su determinación la siguiente ecuación:

$$VAM = 100 - \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}}$$

Donde:

VAM = Porcentaje de vacíos en el agregado mineral, (%).

G_{sb} = Gravedad específica bruta de la combinación de agregados, (gr/cm^3).

G_{mb} = Gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada, (gr/cm^3).

P_s = Contenido del agregado, % del total de la masa de la mezcla asfáltica, (%).

2.5.8 Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada (Va)

Consiste en el volumen total de aire contenido entre las partículas de agregado ya cubiertas de asfalto dentro de la mezcla compactada, se expresa como el porcentaje del volumen neto de la mezcla.

$$Va=100 \times \frac{G_{mm}-G_{mb}}{G_{mm}}$$

Donde:

Va = Vacíos de aire de la mezcla compactada, % del volumen total, (%).

G_{mm} = Gravedad específica teórica máxima, (gr/cm³).

G_{mb} = Gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada, (gr/cm³).

2.5.9 Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto de la mezcla compactada (VFA)

Corresponde al porcentaje del volumen total de vacíos, que es ocupado por el asfalto efectivo, entre las partículas de agregado (ver Figura 2.1). Este parámetro no incluye el asfalto absorbido, se determina mediante la siguiente ecuación:

$$VFA = \frac{VAM - Va}{VAM} \times 100$$

Donde:

VFA = Vacíos rellenos de asfalto, porcentaje del VAM, (%).

VAM = porcentaje de vacíos en el agregado mineral, (%).

Va = Vacíos en la mezcla compactada, % del volumen total, (%).

2.5.10 Porcentaje de polvo (relación filler-asfalto) (DP)

$$DP = \frac{P_{0.075}}{P_{be}}$$

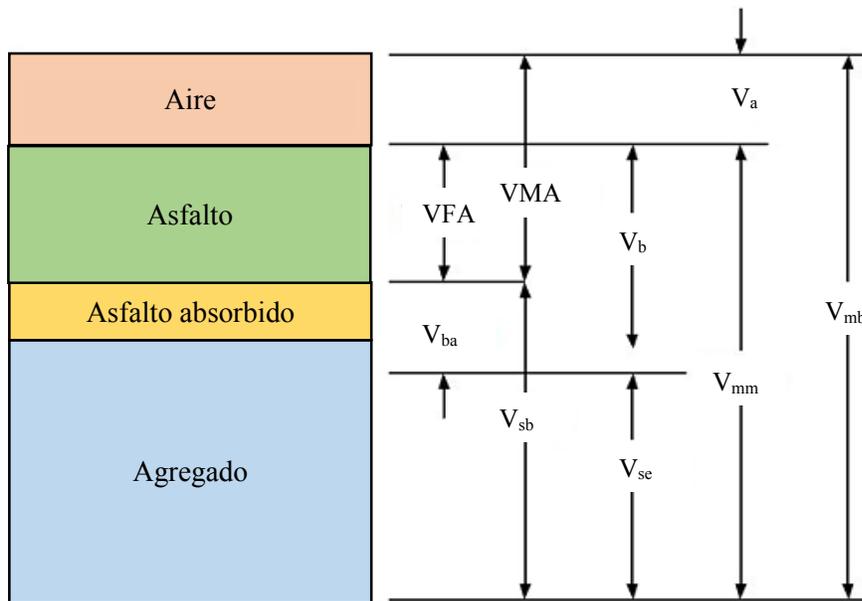
Donde:

DP = Proporción de polvo de la mezcla asfáltica.

$P_{0.075}$ = Porcentaje del material que pasa la malla 200 (0.075mm).

P_{be} = Porcentaje de asfalto efectivo del total de la mezcla.

Figura 2.2 Componentes de la mezcla de asfalto en caliente compactada.



Fuente: Análisis comparativo de los métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas.

Donde:

VAM= Volumen de vacíos en agregado mineral.

V_{mb} = Volumen total de la mezcla asfáltica.

V_{mm} = Volumen de la mezcla asfáltica sin vacíos.

VFA= Volumen de vacíos llenados con asfalto.

V_a = Volumen de vacíos con aire.

V_b = Volumen de asfalto.

V_{ba} = Volumen de asfalto absorbido.

V_{sb} = Volumen neto de agregado mineral (gravedad específica de la masa).

V_{se} = Volumen específico de agregado mineral (gravedad específica efectiva).

La importancia de las propiedades volumétricas de una mezcla de pavimento compactado (VA, VAM y VFA) radica en que proporcionan una indicación del posible funcionamiento de la mezcla asfáltica. (Instituto Mexicano del Transporte, 2004).

2.6 Método Marshall

El método Marshall para mezclas asfálticas fue desarrollado por el Ingeniero del Departamento de Carreteras del Estado de Mississippi, Bruce Marshall, y posteriormente, el Cuerpo de Ingenieros Civiles de los Estados Unidos, a través de estudios investigativos y estudios de correlación, mejor o el procedimiento de prueba Marshall (Garnica Anguas et al., 2005).

Tiene como propósito determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación de agregados, esta metodología se rige por dos características principales dentro de la mezcla, las cuales son: el análisis de densidad-vacíos y la prueba de la estabilidad y fluidez de las muestras compactadas (Garnica Anguas et al., 2004).

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

Los procedimientos de la prueba de Marshall son aplicables para mezclas asfálticas en caliente para pavimentación que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm o menor. Este procedimiento se puede realizar tanto como para diseño en el laboratorio de mezclas como para realizar el control de calidad del pavimento in situ. Para la aplicación del método de Marshall, lo primordial es la fabricación de las briquetas de ensayo, siendo las pautas preliminares las siguientes (Méndez González et al., 2014):

- Los materiales empleados deben cumplir los requerimientos de las especificaciones.
- Determinar la gravedad específica de los agregados que se van a combinar y del cemento asfáltico empleado, para su uso en el cálculo de densidad y análisis de vacíos.

Los requisitos volumétricos y mecánicos de diseño Marshall se muestran en la tabla 2.4, estos son función del nivel de tránsito esperado durante la vida útil del pavimento, sea este ligero, medio y pesado. La tabla 2.5 presenta el porcentaje mínimo de vacíos en agregado mineral en función de los vacíos de aire y del tamaño nominal de la partícula.

Tabla 2.4 Criterio de diseño de mezclas Marshall. ASTM D-1315.

Método Marshall	Tráfico ligero carpeta y base		Tráfico medio carpeta y base		Tráfico pesado carpeta y base	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Compactación, numero de golpes en cada uno de los especímenes	35		50		75	
Estabilidad (N)	3336	-	5538	-	8006	-
Estabilidad (lb)	750	-	1200	-	1800	-
Porcentaje de vacíos	8	18	8	16	8	14
Flujo(0,25mm) (0,01in)	3	5	3	5	3	5
Porcentaje de vacíos en los agregados minerales	Ver tabla 2.5					
Porcentajes de vacíos rellenos de asfalto	75	80	65	78	65	75

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.5 Mínimo porcentaje de vacíos de agregado mineral. ASTM D-1315.

Tamaño máximo nominal de la partícula		Porcentaje mínimo VMA		
		Porcentaje de diseño de vacíos de aire		
mm	in	3	4	5
1,18	N°16	21,5	22,5	23,5
2,36	N°8	19	20	21
4,75	N°6	16	17	18
9,5	3/8"	14	15	16
12,5	1/2"	13	14	15
19	3/4"	12	13	14
25,40	1	11	12	13
37,5	1/ 1/2"	10	11	12

Fuente: Elaboración propia.

2.6.1 Procedimiento del ensayo

Dentro de la metodología Marshall existen tres procedimientos a seguir:

- Determinación de la gravedad específica total.
- Análisis de la densidad y el contenido de vacíos.
- Medición de la estabilidad y fluencia de Marshall.

2.6.2 Determinación de la gravedad específica total

Este ensayo se puede realizar una vez que se haya enfriado el espécimen de acuerdo a la norma ASTM D-2726, peso específico empleando de mezclas asfálticas compactadas, o bajo la norma ASTM D-1188, peso específico empleando parafina en mezclas asfálticas compactadas. En este caso, como no se cuenta con la parafina se realizará el primer procedimiento señalado. Normalmente, para saber que normativa se debe emplear es necesario ejecutar pruebas de absorción, y si este es mayor al 2 % se empleará la norma ASTM D-1188, y si no es el caso, se empleará la norma ASTM D-2726 (Pincay Bermello et al., 2018).

2.6.3 Análisis de la densidad y el contenido de vacíos

Una vez fabricadas las briquetas, y que estas han alcanzado la temperatura ambiente, es necesario determinar la gravedad específica neta de la briqueta, la cual influye en los valores de vacíos.

Es conveniente determinar la gravedad específica teórica máxima de al menos dos contenidos de asfalto conforme la norma ASTM D-2041, preferiblemente de aquellos que estén cerca del contenido óptimo de asfalto. De estos dos valores se debe definir un promedio y determinar el valor de la gravedad específica efectiva total del agregado (G_{se}) (Pincay Bermello et al., 2018).

Utilizando el promedio de las gravedades específicas netas de las mezclas compactadas, la gravedad específica efectiva total del agregado, la gravedad específica del asfalto, y los diferentes porcentajes de asfalto usados, se determina el porcentaje de vacíos (V_a); el porcentaje de vacíos llenados con asfalto (VFA) y el porcentaje de vacíos del agregado mineral (VMA).

2.6.4 Determinación de la estabilidad y flujo Marshall

El ensayo de estabilidad se ejecuta con el fin de medir la resistencia a la deformación de la mezcla y se expresa en unidades de fuerza (lb o kg). El valor del flujo es la deformación

que va a sufrir la muestra al medir su estabilidad, se expresa en unidades de 0,25 mm o en unidades de 0,01 in. El proceso se realiza conforme la norma ASTM D-1559.

Después de determinar la gravedad específica, se desarrolla la prueba de estabilidad y flujo, primero es necesario sumergir el espécimen en baño María a $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ durante 30 a 40 minutos antes de la prueba. Una vez que todo el equipo esté listo, se debe remover el espécimen de prueba del baño María y se seca cuidadosamente la superficie del mismo, se coloca y se centra en la mordaza inferior, posteriormente se coloca la mordaza superior y se centrara completamente el aparato de carga.

Con todo esto listo se comienza a aplicar la carga al espécimen a una deformación constante de 50 mm por minuto hasta que ocurra la falla, la carga máxima obtenida está definida por el punto de falla y este valor se deberá registrar como el valor de Estabilidad de Marshall.

Mientras se realiza la prueba de estabilidad, un deformímetro debe medir el flujo del espécimen, cuando la carga empiece a disminuir habrá que tomar la lectura y registrarla como el flujo del espécimen.

2.6.5 Porcentaje óptimo de asfalto

Existen dos métodos para determinar el contenido óptimo de asfalto, uno es el método NAPA, el cual consiste en verificar que porcentaje de asfalto tiene un porcentaje de vacíos de 4 % y partiendo de este valor se comprueban todas las demás propiedades de la briqueta. El otro, el Asphalt American Method en cambio, indica que se debe sacar un promedio entre el porcentaje de asfalto que genere mayor estabilidad, el que, de una mayor densidad en la mezcla, el que dé la media entre los límites de vacíos de aire, y el que dé el valor medio entre los límites de vacíos llenos de asfalto.

2.7 Metodología RAMCODES

2.7.1 Definición

RAMCODES es un acrónimo por el nombre en inglés de Rational Methodology for Compacted geomaterial's Density and Strength analysis que traducido al español significa metodología racional para el análisis de densificación y resistencia de geomateriales compactados, es una metodología para diseñar suelos y mezclas asfálticas. Esta es una metodología que ha sido estudiada y desarrollada por Freddy J Sánchez Leal desde 1998 en siete fases que se explicaran más adelante.

La metodología RAMCODES, estudia cómo se relaciona la humedad, densidad y resistencia de la mezcla asfáltica; y, la correlación que existe entre el potencial de densificación y la resistencia a través de la clasificación cuantitativa, obtenida según el factor característico.

El objetivo principal de RAMCODES es establecer un desarrollo confiable entre la teoría y la práctica en el proceso de diseño y control de colocación de geomateriales compactados (subrasante, subbase, base), manteniendo un control recurrente y continuo en la obra.

RAMCODES es una metodología basada en experimentos factoriales, este método combina la experiencia práctica de diseño y el control para análisis de densificación y resistencia de geomateriales compactados.

Esta metodología se basa en siete fases que a continuación se describen:

- La fase uno, dedicada a la clasificación de geomateriales.
- La fase dos trata sobre el estudio de la relación humedad, densidad, y resistencia (CBR) en suelos compactados.
- La fase tres, programada para el análisis de resistencia con equipo sofisticado.
- La fase cuatro, programada para el estudio de cambio volumétrico bajo hidratación.
- La fase cinco está dedicada al análisis de mezclas asfálticas.

- La fase seis corresponde a un software para facilitar la implementación de RAMCODES (Licencia con costo).
- La fase siete, dedicada al desarrollo de una metodología estadística de control de calidad.

La presente investigación abarca únicamente la aplicación directa de la fase cinco de RAMCODES. Como se mencionó anteriormente la fase cinco de RAMCODES está dedicado al análisis de mezclas asfálticas, para su desarrollo, F.J. Sánchez Leal se basó en un experimento factorial de dos niveles o factores que son:

- El contenido de asfalto (%CA), y
- El peso específico bulk (Gmb).

La selección de ambos parámetros se da debido a que como geomaterial, RAMCODES, considera que el comportamiento de resistencia y deformabilidad de una mezcla asfáltica puede ser ilustrado bajo la concepción de Coulomb, cohesión y fricción; el Gmb mide la fricción o trabazón entre partículas; y el %CA mide la cohesión. Adicionalmente ambas variables son comúnmente utilizadas en el diseño y control de mezclas asfálticas.

La metodología RAMCODES aplicado a mezclas asfálticas logra enlazar las especificaciones de diseño principalmente de vacíos (V_a , VAM y VFA) con los criterios de control en campo mediante sus expresiones. Los vacíos son función del %CA y del Gmb y se trazan en mapas como isolíneas para los valores de especificación, la intersección que se genera entre líneas produce una construcción gráfica en el espacio %CA-Gmb, que da lugar a una figura geométrica que el autor denomina “polígono de vacíos” en cuya área interior se cumplen todas las especificaciones de vacíos.

Según Sánchez et al. (2011) el método del polígono de vacíos es una herramienta analítica, usada para encontrar el contenido óptimo de ligante para el diseño de una mezcla asfáltica en caliente (HMA - Hot Mixture Asphalt), en base a las especificaciones de vacíos (V_a , VMA, y VFA). Los valores correspondientes a estas especificaciones se encuentran en las Tablas 2.4 y 2.5, las mismas que pertenecen a la norma ASTM D 3515.

Esta metodología basa en aplicar al diseño de HMA, las relaciones volumétricas y gravimétricas, originarias de la mecánica de suelos. Los valores de vacíos están en función de la cantidad de asfalto presente en la mezcla (P_b), expresado como porcentaje y la gravedad específica neta de la misma mezcla (G_{mb}).

El polígono formado está delimitado por las intersecciones entre las isolíneas trazadas en la gráfica (P_b vs G_{mb}) usando los valores de vacíos especificados. Cualquier punto, dentro del polígono establecido, que represente a una combinación entre el contenido de asfalto y la gravedad específica neta de la mezcla, estará cumpliendo al mismo tiempo con todas las especificaciones de vacíos (Sánchez et al., 2011).

2.7.2 Ecuaciones de la metodología RAMCODES

Las isolíneas de vacíos denominadas así por su creador Sánchez Leal son la representación de las especificaciones de vacíos, la intersección de estas líneas produce la construcción grafica llamada polígono de vacíos.

Las expresiones o formulas definidas por RAMCODES y que se utilizan para el trazo de las isolíneas se presentan a continuación:

- 1) **Isolíneas de vacíos de aire (V_a):** Se utiliza la ecuación siguiente ecuación y sirve para determinar el G_{mb} en función del V_a de las especificaciones de diseño y del %CA, interviene adicionalmente el G_b y el G_{se} .

$$G_{mb} = \frac{1 - \frac{V_a}{100}}{\frac{\%CA}{100} + \frac{1 - \frac{\%CA}{100}}{G_{se}}}$$

Donde:

%CA = Porcentaje de cemento asfáltico con respecto a la mezcla total, (%).

V_a = Porcentaje de vacíos de aire, (%).

G_{mb} = Gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada, (gr/cm^3).

G_{se} = Gravedad específica efectiva de la combinación de agregados, (gr/cm^3).

G_b = Gravedad específica del asfalto, (gr/cm^3).

- 2) **Isolíneas de vacíos en el agregado mineral (VAM):** Se utiliza la siguiente ecuación y sirve para determinar el G_{mb} en función del VAM de las especificaciones de diseño y del %CA, interviene adicionalmente el G_{sb} .

$$G_{mb} = \left(\frac{1 - \frac{VAM}{100}}{1 - \frac{\%CA}{100}} \right) \times G_{sb}$$

Donde:

%CA = Porcentaje de cemento asfáltico con respecto a la mezcla total, (%).

VAM = Vacíos de aire en el agregado mineral, (%).

G_{mb} = Gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada, (gr/cm^3).

G_{sb} = Gravedad específica total de la combinación de agregados, (gr/cm^3).

- 3) **Isolíneas de vacíos llenos de asfalto (VFA):** Sirve para determinar el G_{mb} en función del VFA de las especificaciones de diseño y del %CA, interviene adicionalmente el G_b , G_{se} y el G_{sb} . Se utiliza la siguiente ecuación:

$$G_{mb} = \frac{\frac{VFA}{100}}{\frac{\%CA}{100} \frac{1}{G_b} + \frac{1 - \%CA}{100} \frac{1}{G_{se}} - \left(1 - \frac{VFA}{100}\right) \times \left(\frac{1 - \%CA}{100} \frac{1}{G_{sb}}\right)}$$

Donde:

%CA = Porcentaje de cemento asfáltico con respecto a la mezcla total, (%).

VFA = Vacíos de aire llenos de asfalto, (%).

G_{mb} = Gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada, (gr/cm^3).

G_{sb} = Gravedad específica total de la combinación de agregados, (gr/cm^3).

G_{se} = Gravedad específica efectiva de la combinación de agregados, (gr/cm^3).

G_b = Gravedad específica del asfalto, (gr/cm^3).

2.7.3 Elaboración del polígono de vacíos RAMCODES

Para la elaboración del polígono de vacíos se tendrán que seguir los siguientes pasos:

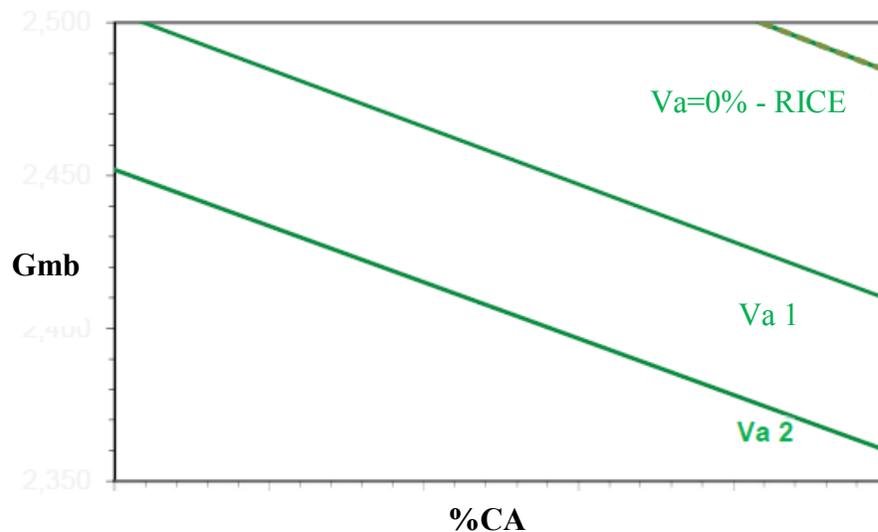
Paso 1.- Definir las especificaciones de Vacíos.

Va, (Cero, Mínimo y Máximo) – VAM (Mínimo) y VFA (Mínimo y Máximo). No especifica un límite superior en el VAM, sin embargo, varios autores consideran evitar valores muy altos si se desea que la mezcla presente resistencia a deformación permanente (Garnica Amguas et al., 2005). Siguiendo las recomendaciones de varios autores se tomó un máximo de 2 puntos adicionales al mínimo, como rango del VAM.

Paso 2.- Trazado de las isolíneas de vacíos de aire (Va).

Se define un rango teórico de %CA a emplear en el cálculo, los valores de densidades G_b y G_{se} son datos característicos de los materiales utilizados y Va depende de las especificaciones ya definidas en el paso 1. Para cada valor de %CA definido y de vacío especificado se calcula el G_{mb} aplicando la ecuación para las isolíneas de vacíos Va. La representación gráfica en el espacio %CA- G_{mb} , da lugar a las tres isolíneas de vacíos de aire, como se muestra en la Figura 2.3.

Figura 2.3 Isolíneas de vacíos de aire Va.

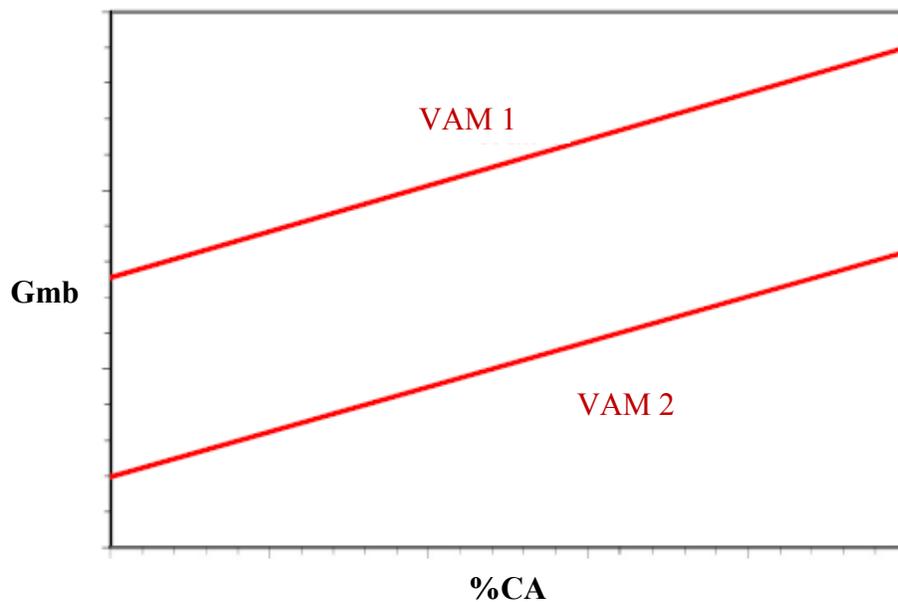


Fuente: Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018.

Paso 3.- Trazado de las isolíneas de vacíos en el agregado mineral (VAM).

Para el mismo rango de %CA definido en el paso 2, con el rango de VAM definido en el paso 1 y Gb conocido, se procede a calcular el gmb aplicando la ecuación 2.11. La representación gráfica en el espacio %CA – Gmb, da lugar a las dos isolíneas de vacíos en el agregado mineral, como se muestra en la figura 2.4.

Figura 2.4 Isolíneas de vacíos en el agregado mineral (VAM).

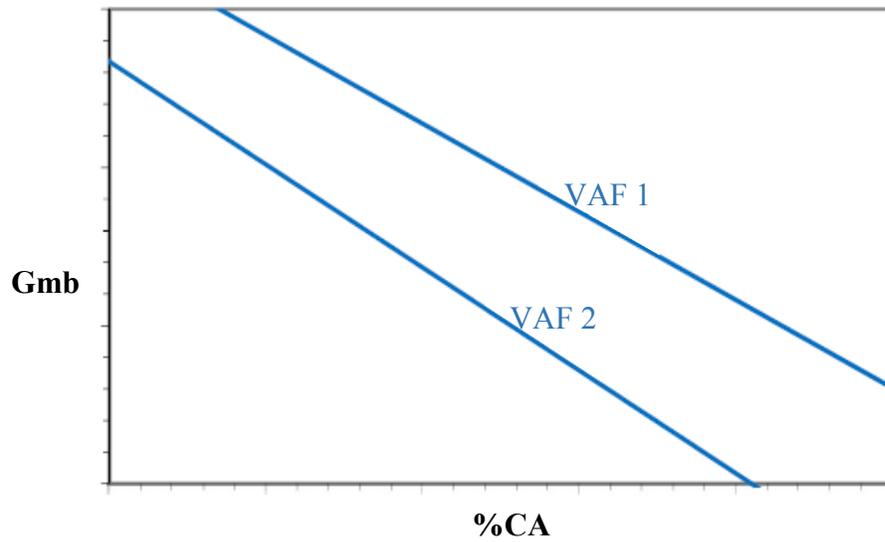


Fuente: Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018.

Paso 4.- Determinación del trazado de las isolíneas de vacíos llenados con asfalto (VFA).

Siguiendo los pasos se utiliza para el mismo rango de %CA definido en el paso 2, con el rango de VFA definido en el paso 1 y Gb, Gsb y Gse conocidos, se procede a calcular el Gmb aplicando la ecuación 2.12. La representación gráfica en el espacio %CA-Gmb, da lugar a las dos isolíneas de vacíos llenados con asfalto, como se muestra en el gráfico 2.5. (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018).

Figura 2.5 Isolíneas de vacíos llenados con asfalto (VFA).

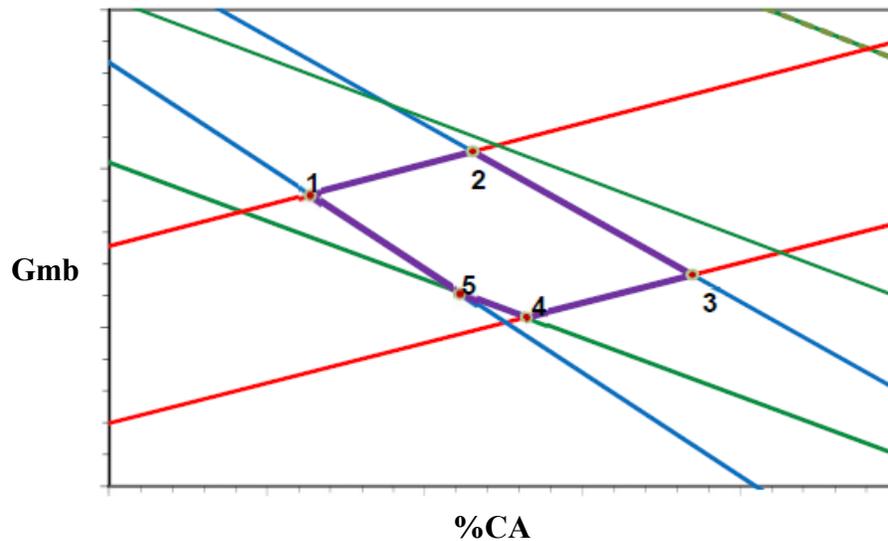


Fuente: Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018.

Paso 5.- Finalmente el trazado del polígono de vacíos por el Método de RAMCODES.

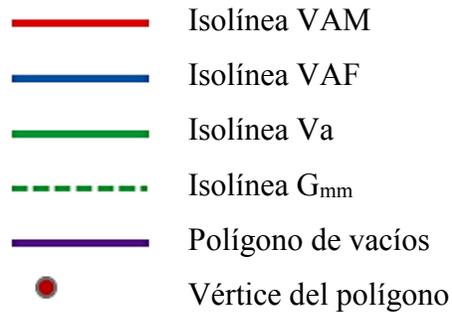
La superposición de todos los mapas de respuesta devuelve una visión de la variación de las propiedades mecánicas dentro de un área que se debe cumplir las especificaciones de vacíos, lo que da lugar al polígono de vacíos, como se muestra en el gráfico 2.6.

Figura 2.6 Polígono de vacíos RAMCODES.



Fuente: Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018.

Figura 2.7 Simbología polígono de vacíos RAMCODES.



Fuente: Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018.

2.7.4 Interpretación de resultados de la metodología RAMCODES

RAMCODES plantea la implementación del polígono de vacíos conformado por la intersección de las isolíneas antes mencionadas y que define el área donde se cumplen todas las especificaciones de vacíos; a sabiendas de lo anterior el creador de esta metodología determina el punto central del polígono de vacíos como el valor del porcentaje óptimo de asfalto y su correspondiente densidad bulk; es necesario entonces determinar las coordenadas de cada punto que lo conforma. Estas varían en función de cada uno de los parámetros mencionados.

Para determinar las coordenadas de cada vértice del polígono de vacíos, RAMCODES ha desarrollado un software al cual se accede únicamente mediante la compra de licencia. Otra alternativa para resolver el problema es la creación de una hoja de cálculo programada.

Conociendo las coordenadas del polígono de vacíos, se determina el centroide que básicamente corresponde al valor promedio de los porcentajes de asfalto y de los pesos específicos bulk de cada vértice. Para determinarlos se emplean las siguientes ecuaciones:

Porcentaje contenido de asfalto.

$$\%CA_{opt} = \sum_{i=1}^n \frac{(\%CA)_i}{n}$$

Peso específico bulk de la mezcla.

$$G_{mb} = \sum_{i=1}^n \frac{(G_{mb})_i}{n}$$

Donde:

$(\%CA)_i$ = Porcentaje de asfalto de cada vértice, (%).

$(G_{mb})_i$ = Peso específico bulk de la muestra de cada vértice, y “n”, es el número de vértices, (gr/cm³).

Determinado el %Ca ópt y su correspondiente G_{mb} se procede a calcular los parámetros V_a , VAM y VFA finales de diseño mediante las siguientes ecuaciones respectivamente, dadas por RAMCODES.

Vacíos en la mezcla.

$$V_a = 100 - \left[\left(\frac{G_{mb}}{G_{mm}} \right) \times 100 \right]$$

Gravedad teórica máxima.

$$G_{mm} = \frac{100}{\frac{100 - \%CA_{opt}}{G_{se}} + \frac{\%CA_{opt}}{G_b}}$$

Vacíos de aire en el agregado mineral.

$$VAM=100-\frac{G_{mb}(100-\%CA_{opt})}{G_{sb}}$$

Vacíos de aire llenos de asfalto.

$$VFA=\left(\frac{VAM-V_a}{VAM}\right)\times 100$$

Donde:

%CA = Porcentaje de cemento asfáltico con respecto a la mezcla total, (%)

V_a = Porcentaje de vacíos de aire, (%)

VAM = Vacíos de aire en el agregado mineral, (%)

VFA = Vacíos de aire llenos de asfalto, (%)

G_{mb} = Gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada, (gr/cm³).

G_{sb} = Gravedad específica total de la combinación de agregados, (gr/cm³).

G_{se} = Gravedad específica efectiva de la combinación de agregados, (gr/cm³).

G_b = Gravedad específica del asfalto, (gr/cm³)

RAMCODES por recomendación solicita la comprobación de estos resultados ensayando un total de 3 briquetas por mezcla diseñada. Todo el proceso antes descrito se vuelve largo desarrollar sin las herramientas tecnológicas, valiéndose de las existentes, como por ejemplo Excel, el proceso se simplifica, únicamente basta determinar las especificaciones de vacíos de diseño y las gravedades de cada uno de los materiales que intervienen G_b, G_{se} y G_{sb} para calcular el porcentaje óptimo de asfalto.

2.8 Comparación de los parámetros de diseño por las metodologías Marshall y RAMCODES

En la siguiente tabla se comparan los parámetros de diseño por las metodologías Marshall y RAMCODES en el diseño de mezclas asfálticas tomando en cuenta para un tráfico pesado.

Tabla 2.6 Comparación de diseño de las metodologías Marshall y RAMCODES.

Parámetros	Método Marshall		Metodología RAMCODES	
	Min.	Max.	Min.	Max.
Estabilidad (lb)	1800	-	1800	-
Fluencia (flujo) 0,01pulg (0,25mm)	8	14	8	14
Va Vacíos de aire (%)	3	5	3	5
V.A.M. Vacíos agregado mineral (%)	13	-	13	15
VAF Vacíos rellenos de asfalto (%)	65	75	65	75
Compactación N° golpes/cara.	75		75	
Numero de especímenes o briquetas por mezcla.	18		3	

Fuente: Elaboración propia.

2.9 Marco referencial

Este trabajo de investigación se influenció en varios trabajos previos realizados se mencionará los 2 más influyentes:

Evaluación de alternativas de diseño de mezclas asfálticas en caliente, basadas en la metodología del polígono de vacíos (RAMCODES) teniendo como autores a Daniela Mishell Idrovo León y Paola Estefanía Guzmán Agudo.

Revisión y análisis de mezclas asfálticas en caliente diseñadas por el método Marshall, a través de la metodología racional de análisis de densificación y resistencia de geomateriales compactados (RAMCODES); Managua, mayo 2017 universidad nacional de ingeniería facultad de tecnología de la construcción elaborado por: Br. marcos Lenin roque Mendoza. Br. james francisco herrera Largaespada.

2.10 Marco normativo

Dentro de las normas aplicadas en esta investigación se tiene las siguientes:

Tabla 2.7 Ensayos de caracterización del cemento asfáltico.

Cemento asfáltico		
Ensayos	Norma ASTM	Norma AASHTO
Penetración	D-5	T-49
Punto de inflamación	D-92	T-48
Ductilidad	D-113	T-51
Peso específico	D-70	T-43
Punto de ablandamiento	D-36	T-53
(RICE) Densidad máxima teórica sin compactar	D-2041	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.8 Ensayos de caracterización del agregado grueso y fino.

Agregado grueso y fino		
Ensayos	Norma ASTM	Norma AASHTO
Granulometría	C-136	T-27
Desgaste mediante la máquina de los ángeles	C-131	T-96
Peso específico y absorción de agua en agregados gruesos	C-127	T-85
Peso específico y absorción de agua en agregados finos	C-128	T-84
Peso unitario	C-29	T-19
Equivalente de arena	D-2419	T-176
Porcentaje de caras fracturadas	D-5821	-
Determinación de partículas largas y achatadas	D-4791	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.9 Criterio de mezclas método Marshall.

Criterio de mezclas método Marshall	Tráfico pesado	
	Mínimo	Máximo
Compactación N° golpes/cara	75	
Estabilidad, lb(N)	1800 (8000)	-
Flujo 0,01pulg (0,25mm)	8	14
Vacíos de aire %	3	5
V.A.M. (Vacíos agregado mineral) %	13	-
VAF (Vacíos rellenos de asfalto) %	65	75

Fuente: Elaboración propia.

2.11 Análisis y posición del investigador

A partir de la teoría estudiada en la presente investigación que se enfoca directamente en el diseño de mezclas asfálticas teniendo en cuenta que la metodología Marshall es la más utilizada en nuestro país, la cual es de naturaleza empírica, la misma que sigue un procedimiento normalizado ASTM D-1559, el cumplimiento de la norma mencionada para obtener los resultados es de vital importancia en términos de estimar el comportamiento en laboratorio. El análisis está enfocado en tres parámetros, densidad, vacíos y contenido de asfalto.

Tomando en cuenta que se necesita estudiar metodologías nuevas y eficaces para el diseño de mezclas asfálticas es que esta investigación propone la Metodología RAMCODES la misma que garantiza el cumplimiento de los parámetros volumétricos exigidos por las especificaciones. Además, existen varios beneficios al utilizar esta metodología como ahorro de tiempo, recursos y dinero, gracias a que sólo es necesario realizar tres briquetas en comparación con 18 briquetas de la metodología Marshall.

CAPÍTULO III

RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

3.1.1 Criterios del diseño metodológico

3.1.2 Unidad de Estudio

La unidad de estudio será un ensayo realizado en el laboratorio de asfaltos.

3.1.3 Población

En este proyecto de investigación la población a tomarse en cuenta serán todos los ensayos realizados en el laboratorio de asfaltos.

3.1.4 Muestra

La muestra que representa la población de este trabajo de investigación será:

- Ensayo de granulometría de áridos.
- Ensayo desgaste mediante la máquina de los ángeles.
- Ensayo peso específico y absorción de agua en agregados gruesos.
- Ensayo peso específico y absorción de agua en agregados finos.
- Ensayo peso unitario agregados gruesos
- Ensayo peso unitario agregados finos.
- Ensayo equivalente de arena.
- Ensayo porcentaje de caras fracturadas.
- Ensayo determinación de caras chatas y alargadas.
- Ensayo penetración del cemento asfáltico.
- Ensayo peso específico del cemento asfáltico.
- Ensayo punto de ablandamiento del cemento asfáltico.
- Ensayo punto de inflamación del cemento asfáltico.
- Ensayo estabilidad de la mezcla asfáltica.
- Ensayo fluencia de la mezcla asfáltica.

3.1.5 Tamaño de muestra

Se utilizará la técnica de muestreo estratificado donde:

Tabla 3.1 Datos nivel de confianza 95%.

Datos nivel de confianza 95%	
z	1,96 (valor del NC)
p	0,5 (probabilidad de que ocurra el suceso)
q	0,5 (no probabilidad de que ocurra el suceso)
e	0,05 (error probable)

Fuente: Elaboración propia.

Calculando N

N= Población.

$$N = \frac{z^2 \times p \times q}{e^2} = 408 \text{ ensayos}$$

Calculando n para la muestra estratificada:

$$n = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \times p_i \times q_i}{N \times \frac{e^2}{z^2} + \sum_{i=1}^n N_i \times p_i \times q_i} = 199 \text{ ensayos}$$

Numero de muestras para un nivel de confianza del 95 % y un error del 5%.

Tabla 3.2 Planilla de muestreo.

Ensayos	Cantidad (Ni)	pi	qi	pi*qi	Ni*Pi*qi	wi	ni	Asumido
Granulometría de áridos	6,00	0,50	0,50	0,25	1,50	0,01	2,82	3,00
Desgaste mediante la máquina de los ángeles	2,00	0,50	0,50	0,25	0,50	0,00	0,94	1,00
Peso específico y absorción de agua en agregados gruesos	6,00	0,50	0,50	0,25	1,50	0,01	2,82	3,00
Peso específico y absorción de agua en agregados finos	6,00	0,50	0,50	0,25	1,50	0,01	2,82	3,00
Peso unitario	6,00	0,50	0,50	0,25	1,50	0,01	2,82	3,00
Equivalente de arena	2,00	0,50	0,50	0,25	0,50	0,00	0,94	1,00
Porcentaje de cara fracturadas	2,00	0,50	0,50	0,25	0,50	0,00	0,94	1,00
Determinación de caras chatas y alargadas	2,00	0,50	0,50	0,25	0,50	0,00	0,94	1,00
Caracterización del cemento asfáltico								
Penetración	3,00	0,50	0,50	0,25	0,75	0,01	1,41	2,00
Peso específico	3,00	0,50	0,50	0,25	0,75	0,01	1,41	2,00
Punto de ablandamiento	3,00	0,50	0,50	0,25	0,75	0,01	1,41	2,00
Punto de inflamación	3,00	0,50	0,50	0,25	0,75	0,01	1,41	2,00
Ductilidad	3,00	0,50	0,50	0,25	0,75	0,01	1,41	2,00
(Rice) Densidad máxima teórica	6,00	0,50	0,50	0,25	1,50	0,01	2,82	3,00
Propiedades mecánicas								
Estabilidad	71,00	0,50	0,50	0,25	17,75	0,17	33,43	34,00
Fluencia	71,00	0,50	0,50	0,25	17,75	0,17	33,43	34,00
% De vacíos de aire	71,00	0,50	0,50	0,25	17,75	0,17	33,43	34,00
% De vacíos de V.A.M. (Vacíos de agregado mineral)	71,00	0,50	0,50	0,25	17,75	0,17	33,43	34,00
Peso unitario	71,00	0,50	0,50	0,25	17,75	0,17	33,43	34,00
Total	408,00				102,00	1,00		199,00

Fuente: Elaboración propia.

3.2 Criterios de selección, uso y aplicación

3.2.1 Criterios de selección de agregados pétreos

En nuestro medio, en la ciudad de Tarija, se cuenta con numerosas plantas chancadoras de materiales pétreos y de varios lugares de extracción. Siendo el criterio de ubicar bancos que son utilizados para el diseño de mezclas asfálticas, se decidió utilizar material proveniente de la planta separadora de la pintada perteneciente al gobierno autónomo municipal de Tarija, cuyo material es procedente del desemboque del río Sella, el cual según los estudios previos realizados han demostrado tener muy buenas características y condiciones para el diseño de mezclas asfálticas.

3.2.2 Criterios de selección del asfalto

El asfalto utilizado en la investigación es el del tipo 85-100 de procedencia colombiana, empleado por el Gobierno Autónomo Municipal de Tarija.

3.3 Criterios del número de ensayos

3.3.1 Criterio del número de ensayos para el agregado pétreo

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

Granulometría. - Se realizan 3 ensayos para los agregados arena, grava 3/4" y grava 3/8" (gravilla).

Abrasión del agregado grueso máquina de los ángeles. - Se realiza 1 ensayo de los agregados de grava 3/4" y grava 3/8" (gravilla).

Peso específico y absorción del agregado grueso. - Se realizan 3 ensayos de peso específico y absorción del agregado grueso como ser de la grava 3/4" y la grava 3/8" (gravilla) y se sacara su promedio.

Peso específico del agregado fino. - Se realizan 3 ensayos del agregado fino y se sacara su promedio.

Peso unitario. - Se realizan 3 ensayos por cada agregado arena, grava 3/4” y grava 3/8” (gravilla).

Equivalente de arena. - Se realizan 3 ensayos de equivalente de arenas, de los cuales se saca un promedio.

Porcentaje de caras fracturadas. - Se realiza 1 ensayo para el agregado de Grava 3/4” y grava 3/8” (gravilla).

Determinación de partículas largas y chatas. - Se realiza 1 ensayo para el agregado de Grava 3/4” y grava 3/8” (gravilla).

Tabla 3.3 Número de ensayos de los agregados pétreos.

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

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2 Criterios del número de ensayos para el cemento asfáltico

Ensayo de penetración. - Se realizan 3 ensayos de peso específico del cemento asfáltico 85-100 del cual se obtendrá su promedio.

Ensayo de punto de inflamación. - Se realizan 3 ensayos el punto de inflamación del cemento asfáltico 85-100 del cual se obtendrá su promedio.

Ensayo de peso específico. - Se realizan 3 ensayos de peso específico del cemento asfáltico 85-100 del cual se obtendrá su promedio.

Ensayo de punto de ablandamiento. - Se realizan 3 ensayos de punto de ablandamiento del cemento asfáltico 85-100 del cual se obtendrá su promedio.

Ensayo de ductilidad. - Se realizan 3 ensayos de ductilidad del cemento asfáltico 85-100 del cual se obtendrá su promedio.

Ensayo de viscosidad Saybolt furor. - Se realizan 3 ensayos de viscosidad del cemento asfáltico 85-100 del cual se obtendrá su promedio.

Ensayo RICE. - Se realizarán 6 ensayos rice para 6 tipos de muestras con diferentes porcentajes de cemento asfáltico 85-100.

Tabla 3.4 Número de ensayos para la caracterización del cemento asfáltico.

Ensayo	Cantidad de ensayos a realizar
Penetración	3
Punto de ablandamiento	3
Punto de inflamación	3
Peso específico	3
Ductilidad	3
Viscosidad Saybolt furor	3
RICE	6

Fuente: Elaboración propia.

3.4 Caracterización de materiales

3.4.1 Criterios de extracción

Agregado pétreo. - Los materiales pétreos de la investigación son provenientes de la planta de acopio “La Pintada”, que pertenece al Gobierno Autónomo Municipal de Tarija, Se verificara si los agregados son de buena calidad mediante los ensayos de caracterización.

Se toma en cuenta como agregado pétreo a los materiales:

- Grava 3/4”
- Grava 3/8” (gravilla)
- Arena triturada.

Figura 3.1 Ubicación de los agregados pétreos.



Leyenda: Entrega del material pétreo por el personal del G.A.M.T.

Coordenadas:

Tabla 3.5 Coordenadas zona de acopio La Pintada.

Coordenadas	
Geográficas	Latitud: 21°60'42" S Longitud: 64°64'08" W
UTM	Este: 330137,09 Norte: 7610138,57

Fuente: Elaboración propia.

Cemento asfáltico. - El cemento asfáltico a utilizarse es de tipo 85-100 colombiano, el cual fue obtenido del Gobierno Autónomo Municipal de Tarija para poder realizar esta investigación.

Figura 3.2 Ubicación del cemento asfáltico.



Leyenda: Entrega del cemento asfáltico por personal del G.A.M.T.

Coordenadas:

Tabla 3.6 Coordenadas instalaciones de obras públicas municipales del G.A.M.T.

Coordenadas	
Geográficas	Latitud: 21°52'63" S Longitud: 64°74'10" W
UTM	Este: 319645,43 Norte: 7618611,93

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.7 Especificaciones técnicas del cemento asfáltico 85-100.

Propiedad	Normativa		Especificación		Resultado
	AASHTO	ASTM	Min.	Max.	
Gravedad específica a 25°C, (gr/cm ³).	T-229	D-70	1,00	1,05	1,015
Penetración muestra original a 25°C, (mm/10).	T-49	D-5	85	100	89
Punto de ablandamiento, anillo-bola, (°C).	T-53	D-36	43	53	47
Punto de inflamación, vaso abierto de Cleveland, (°C).	T-48	D-92	232	-	275
Solubilidad en Tricloroetileno, (%).	T-44	D-2042	99	-	99,98
Ductilidad a 25°C, (cm).	T-51	D-113	100	-	>140
Viscosidad absoluta a 60°C, (P).	T-316	D-4402	800	-	1210
Viscosidad Saybolt Furor a 135°C, (seg).	T-72	D-88	85	-	121
Ensayo de la mancha Heptano-Xilol, (20%maximo de Xilol).	T-102	-	negativo	-	negativo
Ensayo en horno película delgada (AASHTO T-179/ASTM D-1754)					
Cambio de masa perdida por calentamiento, (%).	T-240	D-1754	-	<1,0	-0,34
Penetración del residuo, porcentaje de la penetración original, (%).	T-49	D-5	50	-	51
Ductilidad del residuo a 25°C, (cm).	T-51	D-113	100	-	>140
Contenido de agua, (%).	T-55	D-95	-	<0,2	0,0

Fuente: Especificaciones técnicas del fabricante.

3.4.2 Ensayo de granulometría AASHTO T-27 (ASTM C-136)

3.4.2.1 Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos

Una propiedad clave de los agregados que se usan en las carreteras es la distribución de los tamaños de partículas al mezclarlos. La graduación de los agregados es la combinación de tamaños de partículas en la mezcla que afecta la densidad, la resistencia y la economía de la estructura del pavimento.

El objetivo es determinar los tamaños de las partículas de agregado grueso y fino de un material seco, por medio de tamices dispuestos sucesivamente de mayor a menor abertura.

Figura 3.3 Proceso del pesaje para el tamizado del agregado.



Leyenda: Pesaje del agregado para su caracterización.

Procedimiento:

- a. Seleccionar un grupo de tamices de tamaños adecuados para cumplir con las especificaciones del material que se va ensayar.
- b. Colocar los tamices en orden, por tamaño de abertura.

- c. Limitar la cantidad de material en un tamiz dado, de tal forma que todas las partículas puedan alcanzar las aberturas del tamiz durante la operación del tamizado.
- d. Determinar el peso de la muestra retenida en cada tamiz, con una balanza, el cual se expresa como un porcentaje de la muestra original.

En el método T-27 de la AASHTO (ASTM C-136) se dan los procedimientos detallados para ejecutar un análisis granulométrico de agregados gruesos y finos.

A la porción de material agregado que queda retenida en la malla N°10 (esto es, con partículas mayores de 2,00 mm) se le conoce como agregado grueso. Al material que pasa por la malla N°10, pero queda retenido en la malla N°200 (partículas mayores que 0,075 mm) se le conoce como agregado fino. El material que pasa por la malla N°200 se llama fino y corresponde a impurezas, limo y arcilla. Se realizaron 3 análisis granulométricos por tamizado para cada uno de los agregados, tanto para la grava, gravilla y arena.

Figura 3.4 Proceso del tamizaje del agregado.



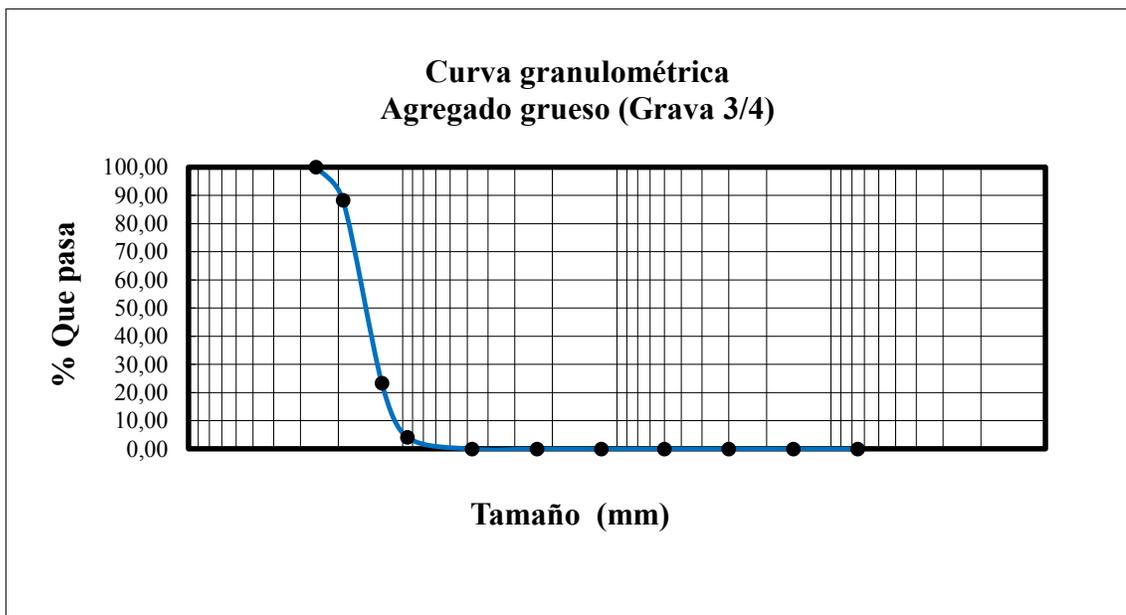
Leyenda: Proceso de tamizaje de los agregados.

Tabla 3.8 Planilla de la granulometría para la grava 3/4".

Peso total (gr)			5000		% Que pasa del total
Tamices N.º	Tamaño (mm)	Peso ret. (gr)	Retenido acumulado (gr)	(%)	
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,00	585,10	585,10	11,70	88,30
1/2"	12,50	3246,60	3831,70	76,63	23,37
3/8"	9,50	960,40	4792,10	95,84	4,16
Nº4	4,75	207,90	5000,00	100,00	0,00
Nº8	2,36	0,00	5000,00	100,00	0,00
Nº16	1,18	0,00	5000,00	100,00	0,00
Nº30	0,60	0,00	5000,00	100,00	0,00
Nº50	0,30	0,00	5000,00	100,00	0,00
Nº100	0,15	0,00	5000,00	100,00	0,00
Nº200	0,075	0,00	5000,00	100,00	0,00
Base	-	0,00	5000,00	100,00	0,00

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.1 Curva granulométrica agregado grueso grava 3/4".



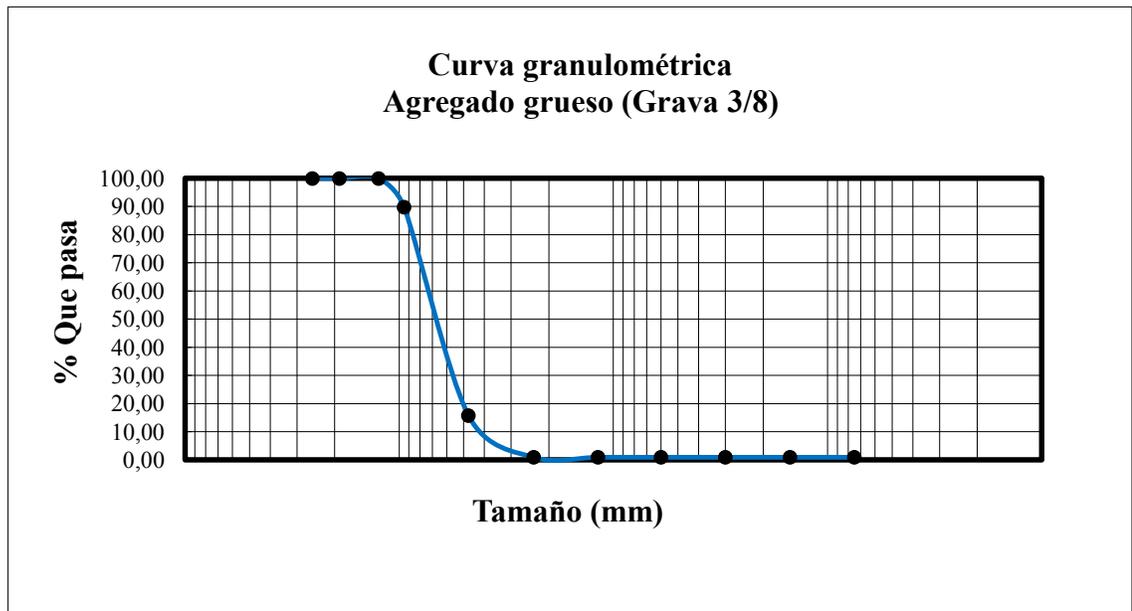
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.9 Planilla de la granulometría grava 3/8".

Peso total (gr)		5000		% Ret.	% Que pasa del total
Tamices N.º	Tamaño (mm)	Retenido acumulado			
		(gr)	(%)		
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,00	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,50	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,50	509,10	509,10	10,18	89,82
Nº4	4,75	3748,40	4257,50	84,21	15,79
Nº8	2,36	742,50	5000,00	100,00	0,00
Nº16	1,18	0,00	5000,00	100,00	0,00
Nº30	0,60	0,00	5000,00	100,00	0,00
Nº50	0,30	0,00	5000,00	100,00	0,00
Nº100	0,15	0,00	5000,00	100,00	0,00
Nº200	0,075	0,00	5000,00	100,00	0,00
Base	-	0,00	5000,00	100,00	0,00

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.2 Curva granulométrica agregado grueso grava 3/8".



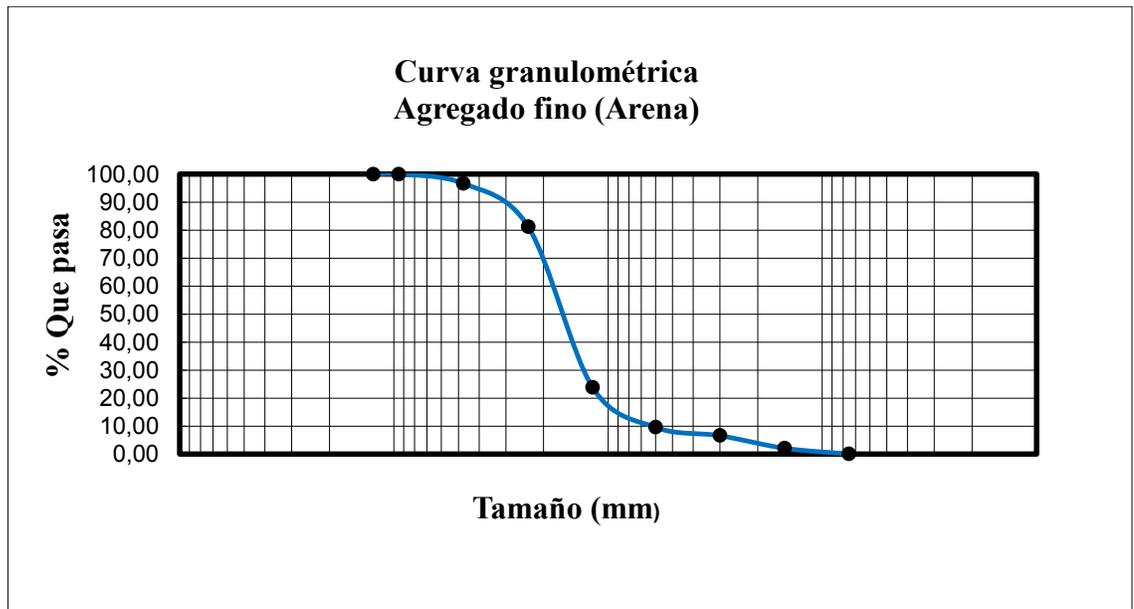
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.10 Planilla de la granulometría del agregado fino.

Peso total (gr)			5000		% Que pasa del total
Tamices N.º	Tamaño (mm)	Peso ret. (gr)	Retenido acumulado		
			(gr)	(%)	
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,00	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2	12,50	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº4	4,75	165,60	165,60	3,31	96,69
Nº8	2,36	771,30	936,90	18,74	81,26
Nº16	1,18	2870,30	3807,20	76,14	23,86
Nº30	0,60	712,80	4520,00	90,40	9,60
Nº50	0,30	148,70	4668,70	93,37	6,63
Nº100	0,15	223,70	4892,40	97,85	2,15
Nº200	0,075	103,60	4996,00	99,92	0,08
Base	-	4,00	5000,00	100,00	0,00

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.3 Curva granulométrica agregado fino.



Fuente: Elaboración propia.

3.4.3 Ensayo de desgaste mediante la máquina de los ángeles AASHTO T-96 (ASTM C-131)

Los materiales que se usan en los pavimentos de carreteras deberán ser duros y resistir el desgaste debido al efecto de pulido del tránsito y a los efectos abrasivos internos de las cargas repetidas. La estimación más comúnmente aceptada de la dureza de los agregados es la prueba de abrasión de los Ángeles. La máquina que se usa en la prueba de los Ángeles consta de un cilindro de acero hueco, cerrado en ambos extremos y montado en ejes de posición horizontal.

Figura 3.5 Máquina de desgaste por abrasión.



Leyenda: Ensayo de desgaste de los ángeles.

La muestra y la carga abrasiva correspondiente se colocan en la máquina de los ángeles, y se hace girar el cilindro a una velocidad comprendida entre 30 y 33 rpm; el número total de vueltas deberá ser 500. La máquina deberá girar de manera, uniforme para mantener la velocidad constante. Una vez cumplido el número de vueltas prescrito, se descarga el material del cilindro y se procede con una separación preliminar de la muestra ensayada en el tamiz N°12.

El material retenido en el tamiz se lava, se seca hasta alcanzar una masa constante y se pesa. Se reporta como porcentaje de desgaste la diferencia entre la masa original y la masa fina de la muestra expresada como un porcentaje de la masa original. El método T-96 de AASHTO (ASTM C-1319) da un procedimiento detallado para esta prueba.

El tipo de abrasión que se efectuó es de tipo B para la grava mientras que para la gravilla se realizó del tipo C, donde se realizó un solo ensayo para cada uno de los agregados.

Tabla 3.11 Datos del ensayo de desgaste para la grava 3/4”.

Datos de laboratorio		
Pasa tamiz	Retenido tamiz	Peso retenido
3/4”	1/2”	2500,00 gr
1/2”	3/8”	2500,00 gr
Retenido tamiz de corte N°12 (1,7 mm)		3701,60 gr
Diferencia		1298,40
Numero de ensayos		1
Tipo de gradación		B
Carga abrasiva		11 esferas a 32,5 Rpm 500 revoluciones

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo:

$$\% \text{ De desgaste} = (\text{Diferencia} / \text{Peso total}) \times 100$$

$$\% \text{ De desgaste} = (1298,40 / 5000,00) \times 100$$

$$\% \text{ De desgaste} = 25,97\%$$

Tabla 3.12 Datos del ensayo de desgaste para grava 3/8".

Datos de laboratorio		
Pasa tamiz	Retenido tamiz	Peso retenido
3/8"	1/4"	2500,00 gr
1/4"	Nº4	2500,00 gr
Retenido tamiz de corte Nº12 (1,7 mm)		3796,40
Diferencia		1203,60
Numero de ensayos		1
Tipo de gradación		C
Carga abrasiva		8 esferas a 32,5 Rpm 500 revoluciones

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo:

$$\% \text{ De desgaste} = (\text{Diferencia/Peso total}) \times 100$$

$$\% \text{ De desgaste} = (1203,60/5000,00) \times 100$$

$$\% \text{ De desgaste} = 24,07\%$$

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

El peso específico y la absorción de los agregados son propiedades importantes que se requieren para el diseño de concreto y de mezclas bituminosas. La densidad relativa de un sólido es la razón de su masa a la de un volumen igual de agua destilada a una temperatura específica.

Figura 3.6 Medición del peso sumergido del agregado.



Leyenda: Pesando el peso sumergido del agregado $\frac{3}{4}$ ".

Procedimiento:

Para realizar el ensayo se deberá realizar:

- Cuartear el agregado grueso más o menos 5 kg lavados y retenidos en la malla N°4 (4,75 mm), se secan a peso constante.
- La muestra seca se sumerge por 24 horas en agua.
- Los agregados se sacan del agua.
- Se obtiene el peso de la muestra en su condición

- e. La muestra saturada superficialmente seca se coloca en una cesta de alambre y se determina el peso sumergido en agua.
- f. La muestra se seca al horno hasta obtener peso constante.

Para este ensayo se realizó la medición del peso específico tanto para la grava 3/4” como para la gravilla 3/8”.

Tabla 3.13 Datos del ensayo de peso específico para agregado grueso grava 3/4”.

Muestra N.º	Peso muestra secada “A” (gr)	Peso muestra saturada con sup. Seca “B” (gr)	Peso muestra saturada dentro del agua “C” (gr)
1	4945,70	5000,30	3078,00
2	4946,00	5000,12	3086,00
3	4938,90	5000,10	3075,00

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo para la grava 3/4”

$$\text{Peso específico del agregado seco} = \frac{a}{b - c}$$

$$\text{Peso específico del agregado seco} = \frac{4945,70}{5000,30 - 3078,00}$$

$$\text{Peso específico del agregado seco} = 2,57 \text{ gr/cm}^3$$

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

$$\text{P.E.A. saturado de superficie seca} = \frac{5000,30}{5000,30 - 3078,00}$$

$$\text{P.E.A saturado de superficie seca} = 2,60 \text{ gr/cm}^3$$

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

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{4945,70}{4945,70 - 3078,00}$$

$$\text{Peso específico aparente} = 2,60 \text{ gr/cm}^3$$

$$\% \text{ De absorción} = ((b - a) / a) \times 100$$

$$\% \text{ De absorción} = ((5000,30 - 4945,70) / 4945,70) \times 100$$

$$\% \text{ De absorción} = 1,10\%$$

Tabla 3.14 Resultados del ensayo de peso específico para grava 3/4".

Muestra N°	Peso específico a granel (gr/ cm ³)	Peso específico saturado con sup. seca (gr/cm ³)	Peso específico aparente (gr/cm ³)	% De absorción
1	2,57	2,60	2,65	1,10
2	2,58	2,61	2,66	1,09
3	2,57	2,60	2,65	1,24

Fuente: Elaboración propia.

Para el agregado 3/8" (gravilla) se sigue el mismo procedimiento de cálculo que se hizo para la grava 3/4".

Tabla 3.15 Datos del ensayo de peso específico para agregado grueso 3/8".

Muestra N.º	Peso muestra secada "A" (gr)	Peso muestra saturada con sup. Seca "B" (gr)	Peso muestra saturada dentro del agua "C" (gr)
1	4940,30	5000,00	3063,00
2	4931,15	5000,00	3077,00
3	4938,50	5000,10	3084,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.16 Resultados del ensayo de peso específico para la grava 3/8".

Muestra N.º	Peso específico a granel (gr/ cm ³)	Peso específico saturado con sup. seca (gr/cm ³)	Peso específico aparente (gr/cm ³)	% De absorción
1	2,55	2,58	2,63	1,21
2	2,56	2,60	2,66	1,40
3	2,58	2,61	2,66	1,25

Fuente: Elaboración propia.

3.4.5 Ensayo peso específico y absorción de agua en agregados finos AASHTO T-84 (ASTM C-128)

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

Figura 3.7 Ensayo peso específico del agregado fino.



Leyenda: Verificando la humedad de la muestra para empezar el ensayo.

Tabla 3.17 Datos obtenidos del ensayo peso específico para agregado fino.

Muestra N°	Peso muestra (gr)	Peso de matraz (gr)	Muestra+ matraz+ agua (gr)	Peso del agua agregado al matraz "W" (gr)	Peso muestra secada "A" (gr)	Volumen del matraz "V" (ml)
1	500,00	195,5	1005,2	309,70	493,00	500,00
2	500,00	191,8	1003,5	311,70	494,00	500,00
3	500,00	219,0	1025,5	306,50	492,00	500,00

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo de peso específico agregado fino:

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

$$\text{Peso específico seco} = \frac{493,00}{(500,00 - 309,70)}$$

$$\text{Peso específico seco} = 2,59 \text{ gr/cm}^3$$

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

$$\text{P.E.A. saturado superficial seco} = \frac{500,00}{500,00 - 309,70}$$

$$\text{P.E.A. saturado superficial seco} = 2,63 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{a}{(x - w) - (x - a)}$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{493,00}{(500,00 - 309,70) - (500,00 - 493,00)}$$

$$\text{Peso específico aparente} = 2,69 \text{ gr/cm}^3$$

$$\% \text{ De absorción} = ((x - a) / a) \times 100\%$$

$$\% \text{ De absorción} = ((500,00 - 493,00) / 500,00) \times 100\%$$

$$\% \text{ De absorción} = 1,40\%$$

Tabla 3.18 Resultados del ensayo de peso específico para agregado fino.

Muestra N°	P. E. A granel (gr/cm ³)	P. E. Saturado con sup. Seca (gr/cm ³)	P.E. Aparente (gr/cm ³)	% De absorción
1	2,59	2,63	2,69	1,40
2	2,62	2,66	2,71	1,20
3	2,54	2,58	2,65	1,60

Fuente: Elaboración propia.

3.4.6 Ensayo de peso unitario agregados AASHTO T-19 (ASTM C-29)

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

Procedimiento:

Se deberá realizar de la siguiente manera:

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

Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos AASHTO T-19 Y ASTM C-29.

Figura 3.8 Peso unitario compactado grava 3/8”.



Leyenda: Ensayo Peso unitario de la gravilla.

Tabla 3.19 Datos del ensayo de peso unitario suelto de la grava 3/4”.

Peso unitario suelto grava 3/4"				
Muestra N.º	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm ³)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)
1	5840,00	9875,00	20605,00	14765,00
2	5840,00	9875,00	20600,00	14760,00
3	5840,00	9875,00	20595,00	14755,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.20 Datos del ensayo de peso unitario compactado de la grava 3/4".

Peso unitario compactado grava 3/4"				
Muestra N.º	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm ³)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)
1	5840,00	9875,00	21345,00	15505,00
2	5840,00	9875,00	21340,00	15500,00
3	5840,00	9875,00	21335,00	15495,00

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo de peso unitario:

$$\text{Peso unitario} = \frac{\text{Peso del agregado seco}}{\text{Volumen del recipiente}}$$

$$\text{Peso unitario} = \frac{14765,00}{9875,00}$$

$$\text{Peso unitario} = 1,495 \text{ gr/cm}^3$$

Tabla 3.21 Resultados del ensayo de peso unitario de la grava 3/4".

Numero de ensayo	Unidad	1	2	3
Peso unitario suelto	gr/cm ³	1,495	1,495	1,494
Promedio	gr/cm ³	1,495		
Peso unitario compactado	gr/cm ³	1,570	1,570	1,569
Promedio	gr/cm ³	1,570		
Peso unitario de la grava 3/4"	gr/cm ³	1,532		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.22 Datos del peso unitario suelto de la grava 3/8".

Peso unitario suelto grava 3/8" (gravilla)				
Muestra N.º	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm ³)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)
1	5840,00	9875,00	19970,00	14130,00
2	5840,00	9875,00	19965,00	14125,00
3	5840,00	9875,00	19970,00	14130,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.23 Datos del peso unitario compactado de la grava 3/8".

Peso unitario compactado grava 3/8" (gravilla)				
Muestra N.º	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm ³)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)
1	5840,00	9875,00	20960,00	15120,00
2	5840,00	9875,00	20955,00	15115,00
3	5840,00	9875,00	20950,00	15110,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.24 Resultados del ensayo de peso unitario de la grava 3/8".

Numero de ensayo	Unidad	1	2	3
Peso unitario suelto	gr/cm ³	1,431	1,430	1,431
promedio	gr/cm ³	1,431		
Peso unitario compactado	gr/cm ³	1,531	1,531	1,530
Promedio	gr/cm ³	1,531		
Peso unitario de la grava 3/8"	gr/cm ³	1,481		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.25 Datos del peso unitario suelto de la arena.

Peso unitario suelto de la arena				
Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm ³)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)
1	2605,00	3005,00	6960,00	4355,00
2	2605,00	3005,00	6955,00	4350,00
3	2605,00	3005,00	6960,00	4355,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.26 Datos del peso unitario compactado de la arena.

Peso unitario compactado de la arena				
Muestra N.º	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm ³)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)
1	2605,00	3005,00	7660,00	5055,00
2	2605,00	3005,00	7655,00	5050,00
3	2605,00	3005,00	7660,00	5055,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.27 Resultados del ensayo peso unitario de la arena.

Numero de ensayo	Unidad	1	2	3
Peso unitario suelto	gr/cm ³	1,449	1,448	1,449
promedio	gr/cm ³	1,449		
Peso unitario compactado	gr/cm ³	1,682	1,681	1,682
Promedio	gr/cm ³	1,682		
Peso unitario de la arena	gr/cm ³	1,565		

Fuente: Elaboración propia.

3.4.7 Ensayo de equivalente de arena AASHTO T-176 (ASTM D-2419)

Este ensayo, indica la proporción relativa de polvo fino o materiales arcillosos perjudiciales contenidos en los áridos empleados en las mezclas asfálticas para pavimentación y en los suelos empleados en capas de base. El ensayo se aplica a la fracción que pasa por el tamiz N°4.

Se coloca una muestra del material en estudio en un cilindro graduado transparente que contiene una solución de cloruro de cálcico, glicerina y formaldehído en agua. La muestra y la solución se agitan vigorosamente de una forma normalizada.

Se emplea la misma solución para impulsar el material arcilloso hacia arriba, haciéndolo salir de la muestra a medida que se llena el cilindro, introduciéndola a presión en el fondo mediante un tubo delgado. Después de un periodo de sedimentación de 20 minutos se lee en la graduación del recipiente la altura máxima de la suspensión de arcilla.

Figura 3.9 Ensayo equivalente de arena.



Leyenda: Realizando el ensayo equivalente de arena.

A continuación, se introduce en el cilindro un disco pesado de metal que se hace bajar hasta que descansa sobre la parte superior de la arena limpia y se lee la altura de la superficie inferior del disco.

Se llama equivalente de arena a la relación de la lectura correspondiente a la superficie superior de la arena a la correspondiente a la capa superior de la arcilla multiplicada por 100. Los aparatos y procedimiento para la realización de este ensayo se describen en el método AASHTO T-176.

Tabla 3.28 Datos del ensayo equivalente de arena.

Descripción	Ensayo		
	1	2	3
Lectura nivel superior	15,40	15,50	15,60
Lectura nivel inferior	11,40	11,50	11,40

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo:

$$\% \text{ De arena} = (\text{Lectura nivel inferior} / \text{Lectura nivel superior}) \times 100\%$$

$$\% \text{ De arena} = (11,40 / 15,40) \times 100\%$$

$$\% \text{ De arena} = 74,03\%$$

Tabla 3.29 Resultados del ensayo equivalente de arena.

Descripción	Ensayo		
	1	2	3
Arena (%)	74,03	74,19	73,08
Promedio (%)	73,77		

Fuente: Elaboración propia.

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

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

Figura 3.10 Partículas de caras fracturadas.



Leyenda: En la figura se muestra en una bandeja las partículas con caras fracturadas y en la otra bandeja las partículas sin caras fracturadas del agregado grueso.

Tabla 3.30 Datos del ensayo de caras fracturadas.

Descripción		Unidad	Lecturas
Grava 3/4"	Peso total de muestra	gr	1000,00
	Peso de caras fracturadas retenidas	gr	810,00
Gravilla 3/8"	Peso total de muestra	gr	1000,00
	Peso de caras fracturadas retenidas	gr	870,70
Numero de ensayos		1	

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo:

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

Peso caras no fracturadas = 1000,00 – 810,00

Peso de caras no fracturadas = 190,00 gr

% De caras fracturadas = (Peso de caras fracturadas / Peso total de muestra) x 100%

% De caras fracturadas = (810,00 / 1000,00) x 100%

Porcentaje de caras fracturadas = 81,00%

Tabla 3.31 Resultados del ensayo de caras fracturadas.

Descripción		Unidad	Lecturas
Grava 3/4"	Peso caras no fracturadas	gr	190,00
	Porcentaje de caras fracturadas	%	81,00
Gravilla 3/8"	Peso caras no fracturadas	gr	129,30
	Porcentaje de caras fracturadas	%	87,07

Fuente: Elaboración propia.

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

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

También se define como índice de alargamiento de una fracción del agregado al porcentaje en peso de las partículas que la forman cuya dimensión máxima (longitud) es

superior a $9/5$ de la dimensión medida de la fracción. Este método no es aplicable para fracciones de agregado inferior a $1/4''$ (6,3 mm).

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

Procedimiento:

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

Figura 3.11 Determinación de partículas largas y achatadas.



Leyenda: Tamizado del agregado grueso para la realización del ensayo.

Tabla 3.32 Datos del ensayo partículas chatas y alargadas.

Material	Peso total de la muestra (gr)	Peso retenido de partículas chatas y alargadas (gr)
Grava 3/4"	1000,00	73,50
Gravilla 3/8"	1000,00	46,30

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo del ensayo de partículas chatas y alargadas:

$$\% \text{ Total de partículas chatas y alargadas} = (\text{Peso retenido partículas chatas y alargadas} / \text{Peso total de la muestra}) \times 100\%$$

$$\% \text{ Total de partículas chatas y alargadas} = (73,50/1000,00) \times 100\%$$

$$\% \text{ Total de partículas chatas y alargadas} = 7,35\%$$

Tabla 3.33 Resultados del ensayo partículas chatas y alargadas.

Material	Total, de partículas chatas y alargadas (%)
Grava 3/4"	7,35
Gravilla 3/8"	4,63

Fuente: Elaboración propia.

3.4.10 Cemento asfáltico

Para caracterizar y evaluar el comportamiento del cemento asfáltico 85-100 colombiano, es necesario realizar los diversos ensayos, para conocer el comportamiento a escala real, en este capítulo realizaremos una breve descripción de los diversos ensayos sobre el cemento asfáltico.

3.4.11 Ensayo de penetración AASHTO T-49 (ASTM D-5)

El ensayo de penetración determina la dureza o consistencia relativa de un betún asfáltico, midiendo la distancia que una guja normalizada penetra verticalmente en una muestra de asfalto en condiciones especificadas de temperatura, carga y tiempo. Cuando no se mencionan específicamente otras condiciones, se entiende que la medida de la penetración se hace a 25°C, que la aguja está cargada con 100 gr y que la carga se aplica durante 5 seg.

Figura 3.12 Realización del ensayo de penetración del cemento asfáltico.



Leyenda: Medición de la penetración del cemento asfáltico

La penetración determinada en estas ocasiones se llama penetración normal. La unidad penetración es la décima de milímetro. Es evidente que cuando más blando sea el betún asfáltico mayor será la cifra que indique su penetración.

Los betunes asfálticos se clasifican en grados según su dureza o consistencia por medio de la penetración. El instituto de asfalto ha adoptado cuatro grados de betún asfáltico para pavimentación con penetraciones comprendidas dentro de los argenes siguientes: 60-70, 85-100, 120-150 y 200-300. Además, el instituto tiene especificaciones para un betún

asfáltico de penetración comprendida en el margen 40-50, que se usa en aplicaciones especiales e industriales.

Los aparatos y procedimientos para realizar el ensayo de penetración se describen en el método AASHTO T-49 y en el ASTM D-5.

Tabla 3.34 Datos del ensayo penetración del cemento asfáltico 85-100.

Descripción		Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Especificaciones	
						Min.	Max.
Penetración a 25°C, 100gr. 5seg. (0,1mm) AASHTO T-49	Lectura N°1	0,1mm	96	94	87	85	100
	Lectura N°2	0,1mm	95	90	89		
	Lectura N°3	0,1mm	80	84	87		
Resultado		0,1mm	89			85	100

Fuente: Elaboración propia.

Resultado: Se tiene como resultado una penetración de 89.

3.4.12 Ensayo punto de inflamación AASHTO T-48 (ASTM D-92)

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

El punto de inflamación de un betún asfáltico se mide por el ensayo del vaso abierto Cleveland según condiciones normalizadas prescritas en los métodos AASHTO T-48 y ASTM D-92. Un vaso abierto de latón se llena parcialmente sobre la superficie de la muestra una pequeña llama, y se define como punto de llama la temperatura a la que han desprendido vapores suficientes para producir una llamarada repentina.

Figura 3.13 Realización del ensayo punto de inflamación.



Leyenda: Punto de inflamación del cemento asfáltico.

Tabla 3.35 Datos del ensayo punto de inflamación.

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	290	280	279
Numero de ensayos		3		
Resultado	°C	283		

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los datos obtenidos se procederá a realizar un promedio de las lecturas para tener un valor representativo del ensayo.

Resultado: Se tiene como resultado un punto de inflamación de 283°C.

3.4.13 Ensayo peso específico del asfalto AASHTO T-43 (ASTM D-70)

Aunque normalmente no se especifica, es deseable conocer el peso específico del betún asfáltico que se emplea. Este conocimiento es útil para hacer las correcciones de volumen cuando este se mide a temperaturas elevadas.

Se emplea como uno de los factores para la determinación de los huecos en las mezclas asfálticas para pavimentación compactadas.

El peso específico es la relación del peso de un volumen determinado del material al peso de igual volumen de agua, estando ambos materiales a temperaturas especificadas. Así, un peso específico de 1,05 significa que el material pesa 1,05 veces lo que el agua a la temperatura fijada.

El peso específico del betún asfáltico se determina normalmente por el método del picnómetro, descrito en los métodos AASHTO T-43 y ASTM D-70.

Figura 3.14 Ensayo del peso específico del cemento asfáltico.



Leyenda: Tomando la temperatura del ensayo peso específico del cemento asfáltico.

Tabla 3.36 Datos del ensayo peso específico.

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Peso picnómetro	gr	36,30	35,70	35,30
Peso picnómetro + agua (25°C)	gr	87,70	86,30	84,70
Peso picnómetro + muestra	gr	68,80	67,20	64,40
Peso picnómetro + agua + muestra	gr	87,90	86,80	85,20

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de cálculo:

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

$$\text{Peso específico cemento asfáltico} = ((68,80 - 36,30) / (87,70 + (68,80 - 36,30) - 87,90)) \times 0,997077$$

$$\text{Peso específico cemento asfáltico} = 1,003 \text{ gr/cm}^3$$

Tabla 3.37 Resultado del ensayo peso específico del cemento asfáltico.

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Peso específico de cemento asfáltico	gr/cm ³	1,003	1,013	1,015
Promedio	gr/cm ³	1,010		

Fuente: Elaboración propia.

Resultado: Se tiene como resultado el peso específico de 1,010 gr/cm³.

3.4.14 Ensayo punto de ablandamiento AASHTO T-53 (ASTM C-36)

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

Consiste en llenar de asfalto un anillo de latón de dimensiones normalizadas. La muestra así preparada se suspende en un baño de agua y sobre el centro de la muestra se sitúa una bola de acero de dimensiones y peso especificados. A continuación, se calienta el baño a una velocidad determinada y se anota la temperatura en el momento en que la bola de acero toca el fondo del vaso de cristal. Esta temperatura se llama punto de ablandamiento del asfalto. Los procedimientos y aparatos necesarios para la realización del ensayo se describen con detalle en los métodos ASSHTO T-53 y ASTM D-36.

Figura 3.15 Ensayo punto de ablandamiento.



Leyenda: Tomando la temperatura del ensayo de punto de ablandamiento.

Tabla 3.38 Datos del ensayo punto de ablandamiento.

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Punto de ablandamiento	°C	45	44	45,5
Promedio	°C	45		
Resultado	°C	45		

Fuente: Elaboración propia.

Resultado: Se tiene como resultado un punto de ablandamiento de 45°C.

3.4.15 Ensayo de ductilidad AASHTO T-51 (ASTM D-113)

Este ensayo consiste en moldear en condiciones y con dimensiones normalizadas una probeta de betún asfáltico que después se somete, a la temperatura establecida, a un alargamiento con una velocidad especificada hasta que el hilo que une los dos extremos rompa. La longitud (en cm) a la que el hilo de material se rompe define su ductilidad

La ductilidad de un material bituminoso es medida por la distancia en centímetros a la cual se alargará antes de romper cuando se tiran dos extremos de un espécimen de la briqueta del material, estos extremos son separados a una velocidad especificada y a una temperatura especificada.

Figura 3.16 Ensayo de ductilidad del cemento asfáltico.



Leyenda: Medición del ensayo de ductilidad del cemento asfáltico.

Este ensayo consiste en armar el molde en el plato bajo, y para prevenir que el material de ensayo se pegue, cubrir la superficie del plato con glicerina. Verter el cemento asfáltico en un delgado chorro de un lado a otro, de principio a fin hasta que el material cubra el nivel lleno del molde dejar que se enfríen para un periodo de 30 a 40 minutos y entonces poner el plato base y el molde lleno en el baño de agua a 25°C, por 30 minutos.

Los materiales asfálticos dúctiles tienen mejores propiedades aglomerantes que aquellos que les falta esta característica. Es más importante la existencia de la ductilidad que el valor obtenido en el ensayo. Por otra parte, si estos materiales poseen una ductilidad muy elevada son usualmente más susceptibles a los cambios de temperatura.

Tabla 3.39 Datos del ensayo de ductilidad del cemento asfáltico.

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Ductilidad a 25°C	cm	115	112	110
Promedio	cm	112		
Resultado	cm	112		

Fuente: Elaboración propia.

Resultado: Se tiene como resultado una ductilidad de 112 cm.

3.4.16 Ensayo de viscosidad Saybolt furor AASHTO T-72 (ASTM D-88)

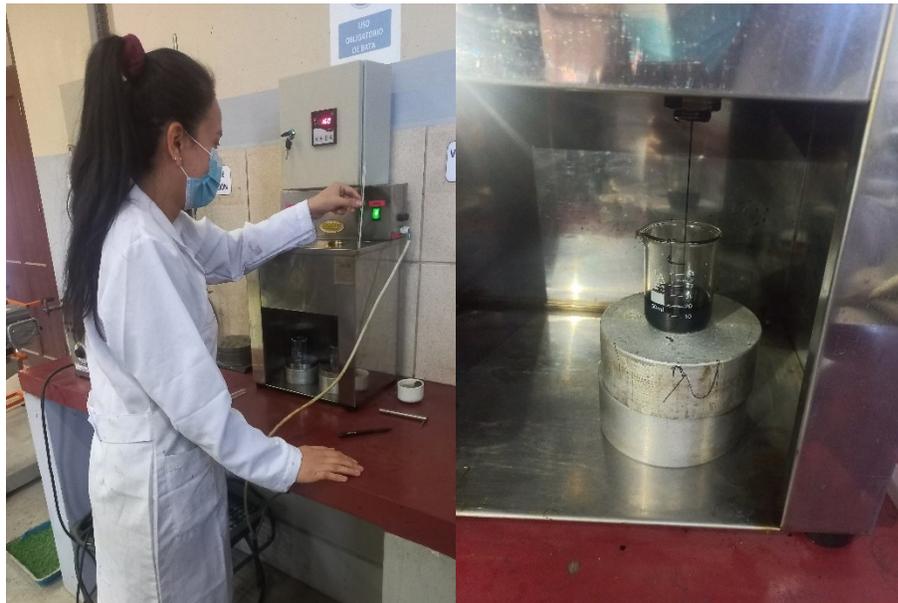
La viscosidad se define como la resistencia al flujo de un líquido. Se utiliza este ensayo como una medida de consistencia y los resultados son reportados en segundos Saybolt-Furor. La viscosidad “Furor” está considerada como un décimo de la viscosidad “universal”, cuanto más alta es la viscosidad de un líquido, este se aproxima en sus propiedades de consistencia, a un semisólido y la designación “Furor” resulta de una contracción del (aceite de combustión) de productos que requieren temperaturas superiores a 100°C (212°F)).

Se comienza el ensayo limpiando perfectamente el recipiente con un disolvente eficaz, por ejemplo, gasolina, teniendo cuidado de que no quede disolvente en el interior del cilindro sino causara errores en ensayo debido a que la gasolina puede diluirse con el asfalto y modificara su propiedad.

Se coloca la muestra en el tubo dejándolo ahí un tiempo, la temperatura del baño se debe controlar que se mantenga constante. Se coloca el frasco calibrado de 60 ml cuidadosamente debajo del orificio del equipo de manera que este centrado con ello, se debe de tomar en cuenta que cuando fluya la muestra no deberá chocar con las paredes

del frasco, el ensayo se empieza sacando violentamente el tapón del corcho del tubo, al mismo tiempo se deberá iniciar con el cronometraje hasta que fluya totalmente la muestra en el frasco de vidrio.

Figura 3.17 Ensayo viscosidad de Saybolt furor.



Leyenda: Realización del ensayo de viscosidad de Saybolt furor.

Tabla 3.40 Resultados del ensayo de viscosidad Saybolt furor.

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Especificaciones	
					Min	Max
Viscosidad de C.A 85-100	sSF	263	265,8	260		
Promedio	sSF	262,9				
Resultado	sSF	262,9			85	-

Fuente: Elaboración propia.

Resultado: Se tiene como resultado de 262,9 sSF, (segundos Saybolt furor).

3.4.17 Ensayo RICE densidad máxima de mezclas sin compactar (ASTM D-2041)

Este método permite determinar la densidad máxima teórica de mezclas asfálticas sin compactar, a 25°C, así como el porcentaje de ligante absorbido por los áridos de la mezcla de modo de cuantificar la cantidad total o efectiva de asfalto requerida por la misma.

El peso de la muestra para este ensayo depende del tamaño nominal del agregado empleado en la mezcla, tomando en cuenta que la muestra no sea mayor que la capacidad del recipiente a ser usada en el ensayo.

La mezcla debe encontrarse a temperatura ambiente y ser disgregada antes de ser ensayada, tomando en cuenta no romper las partículas de agregado, en el caso de que no sea posible separar las partículas de manera manual, la mezcla puede ser ligeramente calentada. Luego se procede a pesar la muestra y se la registra como M_m .

Coloque la muestra en el recipiente y agregue agua destilada casi al tope de este y aplique vacío por 10 min. Agitando su contenido periódicamente con un vibrador mecánico.

Inmediatamente después de remover el aire atrapado, se procede a llenar completamente el recipiente con agua destilada a 25°C. Se pesa el recipiente lleno con agua y muestra este valor se registra como M_{pam} . Se registra la temperatura del agua al final del ensayo.

Se presenta a continuación la ecuación empleada para la obtención de la densidad máxima de la mezcla sin compactar.

$$G_{mm} = \frac{M_m}{M_m + M_{pa} - M_{pam}} * \rho_t$$

Donde:

G_{mm} = Densidad máxima de la mezcla sin compactar, (kg/m^3).

M_m = Masa de la muestra a temperatura ambiente, (gr).

M_{pa} = Masa del recipiente lleno con agua, (gr).

M_{pam} = Masa del recipiente lleno con agua y la muestra, (gr).

ρ_t = Densidad del agua a la temperatura del ensayo, (kg/m^3).

Figura 3.18 Desarrollo del ensayo RICE.



Leyenda: Realización del ensayo rice determinación de la gravedad específica máxima de la mezcla sin compactar.

Figura 3.19 Ensayo RICE.



Leyenda: Equipo del ensayo RICE/ Pesaje del equipo del ensayo RICE.

Tabla 3.41 Datos del ensayo RICE.

Muestra N.º	% de asfalto	Mm (gr)	Mpa (gr)	Mpam (gr)	T (°C)
1	4,50	2010,10	18550,00	19774,00	23,00
2	5,00	2012,50	18550,00	19775,00	25,00
3	5,50	2006,80	18550,00	19770,00	24,00
4	6,00	2004,80	18550,00	19768,00	25,00
5	6,50	2009,90	18550,00	19770,00	24,00
6	7,00	2002,60	18550,00	19765,00	24,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.42 Resultados del ensayo RICE.

Muestra N.º	Mm (gr)	Mpa (gr)	Mpam (gr)	ρ_t (Kg/m ³)	Gmm (Kg/m ³)
1	2010,10	18550,00	19774,00	997,60	2550,917
2	2012,50	18550,00	19775,00	997,10	2548,144
3	2006,80	18550,00	19770,00	997,30	2543,698
4	2004,80	18550,00	19768,00	997,10	2540,653
5	2009,90	18550,00	19770,00	997,30	2537,629
6	2002,60	18550,00	19765,00	997,30	2535,796

Fuente: Elaboración propia.

3.5 Resultado del levantamiento de información

3.5.1 Agregados pétreos

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

Tabla 3.43 Resultados de la caracterización de los agregados pétreos.

Ensayo	Agregados	Especificación		Resultado	ASTM
		Min.	Max.		
Desgaste mediante la máquina de los ángeles	Grava 3/4"	-	40 %	25,97%	C-131
	Grava 3/8"	-	40 %	24,07%	
Peso específico y absorción de agua en agregados grueso	Grava 3/4"	-	-	2,65 gr/cm ³	C127
	Grava 3/8"	-	-	2,65 gr/cm ³	
Peso específico y absorción de agua en agregados finos	Arena	-	-	2,68 gr/cm ³	C-128
Peso unitario	Grava 3/4"	-	-	1,532 gr/cm ³	C-29
	Grava 3/8"	-	-	1,481 gr/cm ³	
	Arena	-	-	1,565 gr/cm ³	
Equivalente de arena	Arena	50%	-	73,77%	D-2419
Porcentaje de caras Fracturadas	Grava 3/4"	75%	-	81%	D-5821
	Grava 3/8"	75%	-	87,07%	
Determinación de partículas largas y achatadas	Grava 3/4"	-	10%	7,35%	D-4791
	Grava 3/8"	-	10%	4,63%	

Fuente: Elaboración propia.

3.5.2 Cemento asfáltico

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

Tabla 3.44 Resultados de la caracterización del cemento asfáltico.

Ensayo	Unidad	Especificación		Resultado	Norma	
		Mín.	Máx.		ASTM	AASHTO
Peso específico	gr/cm ³	1	1,05	1,010	D-70	T-43
Punto de ablandamiento	°C	43	53	45	C-36	T-53
Punto de inflamación	°C	232	-	283	D-92	T-48
Penetración	0,01 mm	85	100	89	D-5	T-49
Ductilidad	cm	100	-	112	D-113	T-51
Viscosidad saybolt furor	sSF	85	-	262,9	D-88	T-72

Fuente: Elaboración propia.

3.5.3 Ensayo RICE densidad máxima de mezclas sin compactar

Los resultados de las 6 muestras de mezclas asfálticas del ensayo RICE son las siguientes:

Tabla 3.45 Resultados ensayo RICE densidad máxima de mezclas sin compactar.

Muestra n	Gmm Kg/m ³	Gmm gr/cm ³
1	2550,917	2,551
2	2548,144	2,548
3	2543,698	2,544
4	2540,653	2,541
5	2537,629	2,538
6	2535,796	2,536

Fuente: Elaboración propia.

3.5.4 Determinación de las gravedades efectivas de la mezcla

De acuerdo a los 6 ensayos RICE realizados se procedió a sacar los cálculos para la gravedad específica máxima sin compactar (Gmm), y luego con ese valor se procedió a sacar la gravedad específica efectiva del agregado (Gse), como también la gravedad específica neta de la combinación final de los agregados (Gsb).

Como ejemplo del cálculo realizado se tomará en cuenta la muestra N°1, se procederá a calcular la gravedad específica efectiva del agregado.

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - CA}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{CA}{G_b}}$$

Donde:

G_{se} = Gravedad específica efectiva del agregado, (gr/cm³).

G_{mm} = Gravedad específica teórica máxima de la mezcla, (gr/cm³)

P_{mm} = Porcentaje del peso de la mezcla total suelta, igual a 100, (%).

CA = Contenido de asfalto con respecto a la masa, (%).

G_b = Gravedad específica del asfalto, (gr/cm³).

Reemplazando en la ecuación:

$$G_{se} = \frac{100 - 4,5}{\frac{100}{2,551} - \frac{4,5}{1,010}} = 2,749 \text{ gr/cm}^3$$

La gravedad específica efectiva del agregado de la muestra N°1 es de 2,749 gr/cm³, se siguió el mismo procedimiento para el cálculo de las demás muestras.

Gravedad Específica Neta de la Combinación Final de Agregados

$$G_{sb} = \frac{P1+P2+\dots+PN}{\frac{P1}{G1} + \frac{P2}{G2} + \dots + \frac{PN}{GN}}$$

Donde:

Gsb= Gravedad específica neta de la combinación final de agregados, (gr/cm³).

P1, P2, PN= Porcentajes de cada fracción individual de las masas de los agregados, (%).

G1, G2, GN= Gravedad específica neta de las fracciones individuales de los agregados, (gr/cm³).

Reemplazando los datos en la ecuación:

$$G_{sb} = \frac{27+28+45}{\frac{27}{2,65} + \frac{28}{2,65} + \frac{45}{2,68}} = 2,663 \text{ gr/cm}^3$$

Se tiene como resultado de la gravedad específica neta de la combinación final de agregados 2,663 gr/cm³, ya que la misma granulometría se utilizó en las 6 mezclas preparadas la densidad neta de la combinación final de agregados será la misma para las 6 mezclas.

Tabla 3.46 Resultados de la determinación de gravedades específicas de la mezcla.

Muestra n	% De cemento asfáltico	G _{mm} gr/cm ³	G _{se} gr/cm ³	G _{sb} gr/cm ³
1	4,50	2,551	2,749	2,663
2	5,00	2,548	2,770	2,663
3	5,50	2,544	2,791	2,663
4	6,00	2,541	2,813	2,663
5	6,50	2,538	2,836	2,663
6	7,00	2,536	2,861	2,663

Fuente: Elaboración propia.

3.5.5 Combinación de los agregados

A continuación, se muestra el resumen de las granulometrías formadas a través del promedio que se realizaron.

Tabla 3.47 Resumen de la granulometría formada.

Tamices	Tamaño (mm)	Grava peso retenido a 5000 gr	Gravilla peso retenido a 5000 gr	Arena peso retenido a 5000 gr
1"	25,40	0,00	0,00	0,00
3/4"	19,00	585,10	0,00	0,00
1/2"	12,50	3246,60	0,00	0,00
3/8"	9,50	960,40	509,10	0,00
Nº4	4,75	207,90	3748,40	165,60
Nº8	2,36	0,00	742,50	771,30
Nº16	1,18	0,00	0,00	2874,30
Nº30	0,60	0,00	0,00	712,80
Nº50	0,30	0,00	0,00	148,70
Nº100	0,15	0,00	0,00	223,70
Nº200	0,075	0,00	0,00	103,60
Base	-	0,00	0,00	0,00
Suma		5000,0	5000,0	5000,0

Fuente: Elaboración propia.

En la presente investigación se realizará la mezcla de agregados provenientes de la zona de acopio “La pintada” perteneciente al G.A.M.T, ubicada en la Pintada, para la cual se ha determinado la faja granulométrica de la mezcla convencional.

Para el diseño de dicha faja se utilizarán los materiales de los que se disponía, tanto para el agregado grueso como para el fino, con lo cual se estableció que la mezcla de agregados estará compuesta por el 27% de agregado grueso grava 3/4”, 28% de grava 3/8”, 40% de arena y 5% de filler natural para la granulometría de la mezcla.

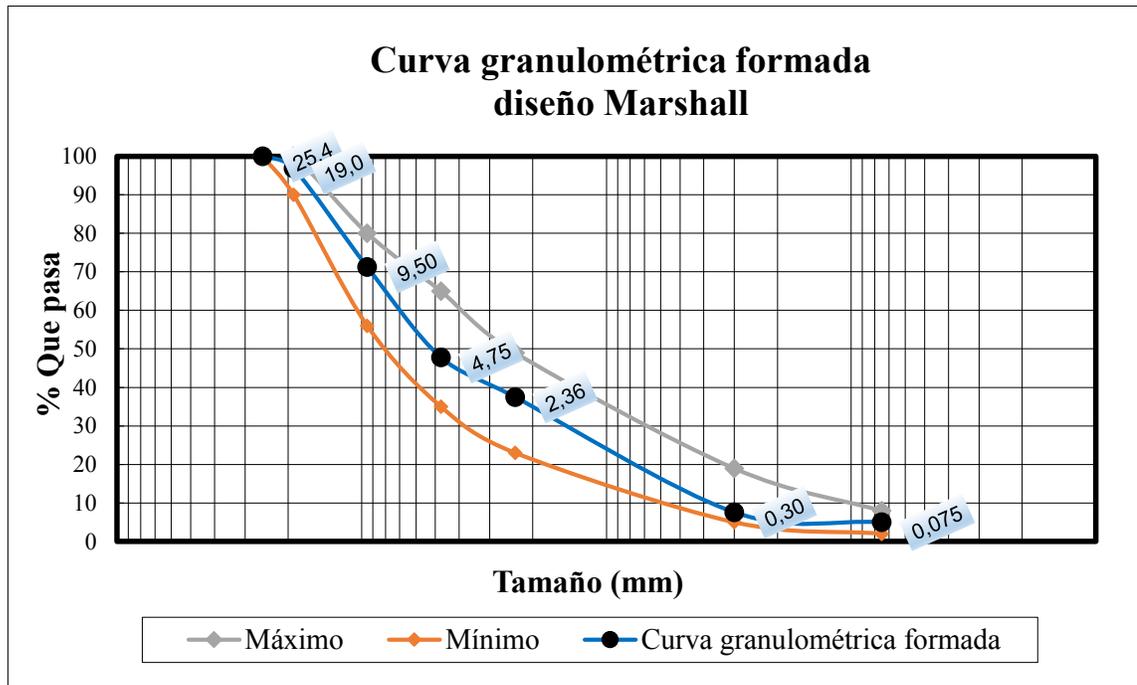
En la siguiente tabla se presentan los pesos del material retenido y el peso del material que pasa cada tamiz tanto para el agregado grueso y fino.

Tabla 3.48 Dosificación materiales pétreos.

Tamices Nº	Tamaño (mm)	Grava al 0,27	Gravilla al 0,28	Arena al 0,40	Filler al 0,05	% Ret	% Que pasa del total	Especificaciones ASTM – D 3515	
								Mínimo	Máximo
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4"	19,00	157,98	0,00	0,00	0,00	3,16	96,84	90	100
1/2"	12,50	876,58	0,00	0,00	0,00	20,69	79,31	-	-
3/8"	9,50	259,31	142,55	0,00	0,00	28,73	71,27	56	80
Nº4	4,75	56,13	1049,55	66,24	0,00	52,17	47,83	35	65
Nº8	2,36	0,00	207,90	308,52	0,00	62,50	37,50	23	49
Nº16	1,18	0,00	0,00	1149,72	0,00	85,49	14,51	-	-
Nº30	0,60	0,00	0,00	285,12	0,00	91,19	8,81	-	-
Nº50	0,30	0,00	0,00	59,48	0,00	92,38	7,62	5	19
Nº100	0,15	0,00	0,00	89,48	0,00	94,17	5,83	-	-
Nº200	0,075	0,00	0,00	41,44	0,00	95,00	5,00	2	8
Base	-	0,00	0,00	0,00	250,00	100,00	0,00	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3.4 Curva granulométrica formada por el diseño Marshall.



Fuente: Elaboración propia.

3.6 Criterio del número de briquetas

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

Tabla 3.49 Variaciones del porcentaje asfáltico para obtener el porcentaje óptimo.

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

Fuente: Elaboración propia.

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

Detalle de Investigación. -

Mezclas Asfálticas Convencionales elaboradas por la Metodología Marshall.- Se elaboran 35 briquetas con mezcla asfáltica basada en la metodología Marshall, cuyo cemento asfáltico será 85-100, las cuales procederemos a evaluar su comportamiento y variaciones de las propiedades mecánicas de los ensayos analizados.

Mezclas Asfálticas Convencionales elaboradas por la Metodología RAMCODES. - Se elaboran 18 briquetas de comprobación de la metodología RAMCODES después de haber obtenido los datos del diseño analíticamente, es decir después de obtener los resultados de la hoja de Excel de la metodología.

Tabla 3.50 Total de briquetas para la investigación.

Descripción	Cantidad
Briquetas de mezclas convencionales para determinar el porcentaje óptimo.	18
Briquetas de mezcla convencional con el porcentaje optimo metodología Marshall.	35
Briquetas de mezcla convencional con el porcentaje optimo metodología RAMCODES.	18
Total, briquetas elaboradas para los ensayos	71

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV

DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

4.1 Diseño de la mezcla asfáltica convencional 85-100 por el método Marshall

4.1.1 Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico

Para la determinación del contenido óptimo del cemento asfáltico se procede a realizar el diseño de 18 briquetas mediante el método Marshall, con porcentajes de diferentes de cemento asfáltico para conocer el porcentaje óptimo a utilizar.

Determinación de la cantidad aproximada de asfalto.

$$A = 0,0035 * a + 0,045 * b + K * c + F$$

Donde:

A= % de asfalto en la mezcla

a= % Retenido tamiz N°8

b= % Pasante tamiz N°8

c= % de agregado que pasa la malla N. ° 200

K= 0,15, si el que retiene el tamiz 3/4" esta entre 11% y 15%

0,18, si el % que retiene esta entre 6 y 10 %

0,20, si el % que retiene es el 5% o menos

F= de 0 a 2% que varía según la absorción de la materia (se puede asumir 0,7)

Proceso de cálculo:

a= 62,23%

b= 37,77%

c= 5,30%

K= 0,20 debido a que el porcentaje retenido en tamiz N.° 3/4" es 3,16% lo cual es menor al 5%

F=0,7

$$A = 0,035 (62,23) + 0,045(37,77) + 0,2(5,30) + 0,7$$

$$A = 5,637\%$$

El contenido aproximado de asfalto es de 5,637%, debido a este resultado se trabajarán en las diferentes dosificaciones con los siguientes porcentajes de cemento asfáltico: 4,5%, 5%, 5,5%, 6%, 6,5% y 7%.

4.1.2 Dosificación con variaciones del contenido de asfalto

Tabla 4.1 Dosificación del cemento asfáltico en diferentes porcentajes de cemento asfáltico.

Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla						
Porcentaje del cemento asfáltico (%)	4,50%	5,00%	5,50%	6,00%	6,50%	7,00%
Porcentaje de agregado (%)	95,50%	95,00%	94,50%	94,00%	93,50%	93,00%
Peso de cemento asfáltico (gr)	54,00	60,00	66,00	72,00	78,00	84,00
Grava (gr)	309,42	307,80	306,18	304,56	302,94	301,32
Gravilla (gr)	320,88	319,20	317,52	315,84	314,16	312,48
Arena (gr)	458,40	456,00	453,60	451,20	448,80	446,40
Filler (gr)	57,30	57,00	56,70	56,40	56,10	55,80
Peso total de la briqueta (gr)	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

4.2 Guía metodológica para la elaboración de briquetas y ensayo Marshall

Para el desarrollo de la elaboración de las briquetas se tendrá que tener el equipo y las siguientes herramientas:

Equipo y herramientas:

- Martillo de compactación.

- Dispositivo para moldear probetas.
- Extractor de probetas.
- Balanza A $\pm 0,1$ gr.
- Bandejas metálicas.
- Asfalto 85-100.
- Equipo Marshall.
- Agregados (Grava 3/4", gravilla 3/8" y arena).
- Guantes de cuero.
- Cuchara.
- Badilejo.
- Taras metálicas.
- Termómetro de 360°C.
- Espátula.
- Medidor de Estabilidad.
- Cocina o placa de calentamiento.

Procedimiento:

- En primer lugar, antes de preparar la mezcla, el conjunto del molde y la base de compactación se limpian y calientan a una temperatura entre 100 y 150°C.
- Por un lado, se pesan en bandejas separadas diversas fracciones de áridos calculado para un grupo de briquetas, luego cada bandeja es colocada en la placa de calentamiento para calentar su contenido a una temperatura de 105°C a 140°C. Al mismo tiempo se calienta el cemento asfáltico a una temperatura de 120 a 140°C. Durante su calentamiento el agregado y el cemento asfáltico deben agitarse para evitar sobrecalentamientos locales.
- Se pesan luego en una bandeja fracciones de áridos de acuerdo con los pesos acumulativos. Se mezclan perfectamente los agregados y se forma un cráter en la mezcla, se coloca la bandeja sobre la balanza y se vierte sobre los agregados el asfalto caliente, hasta completar el peso total de agregados más asfalto calculado para un porcentaje de la mezcla total.

- Se mezcla el asfalto con los agregados hasta tener una mezcla homogénea, la temperatura de la mezcla debe alcanzar los 160°C para poder someterse a compactación, en ningún caso debe someterse a recalentamiento.
- Se compacta la mezcla en un molde abierto por ambos extremos y que tienen 4” de diámetro interior y 3” de altura. La compactación se hace usando un partillo especial compuesto de:
 - Un disco circular que se fija sobre la superficie de la mezcla a compactarse;
 - un martillo en forma de cilindro hueco que se desliza a lo largo de una guía y cae sobre el disco, el peso del martillo es de 10 libras y la altura de caída libre es de 18”.
- Para el diseño de esta mezcla se aplicaron 75 golpes por cada cara de la briqueta en la compactación, proyectadas para vías de tráfico pesado y se fabricaron 18 briquetas. El molde, conteniendo la briqueta se dejó enfriar a temperatura ambiente durante unos 30 minutos. Y luego se extrajo la briqueta con la ayuda de un gato hidráulico.

Figura 4.1 Elaboración de las briquetas.



Leyenda: Proceso del mezclado del cemento asfáltico y los agregados.

Figura 4.2 Mezcla asfáltica.



Leyenda: Mezcla asfáltica lista antes de llevar a compactación.

Figura 4.3 Proceso de compactación de la briqueta.



Leyenda: Proceso de compactación de la mezcla asfáltica.

Figura 4.4 Extracción de la briqueta.



Leyenda: Extracción de la briqueta con la ayuda de un gato hidráulico.

4.3 Desarrollo del ensayo de estabilidad y fluencia

Después de todo el proceso de elaboración de las briquetas se debe desarrollar el ensayo de estabilidad y fluencia a cada una de las briquetas elaboradas, los pasos a seguir son los siguientes:

- Una vez extraídas las briquetas de los moldes, se procede a realizar el ensayo de flujo y estabilidad en la prensa.
- Primero se debe medir con un vernier las alturas en cuatro puntos de la briqueta y de esta manera determinar su altura media que será corregida mediante un factor de corrección.
- Antes de realizar el ensayo las briquetas se deben pesar en seco, saturado superficialmente seco y sumergido en agua, antes de su ruptura debe ser sumergidas en baño de agua a $60^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ durante un tiempo no inferior a 30 minutos ni mayor a 40 minutos.

- Se limpian perfectamente las superficies interiores de las mordazas. La temperatura de las mismas se debe mantener entre 21°C y 38°C. Si es inferior, deberán calentarse en baño de agua hasta alcanzar la temperatura indicada. Se debe verificar previamente a la aplicación de la carga que el indicador del dial del anillo de carga se encuentre en la posición correspondiente a cero.
- Se coloca las briquetas en la mordaza y se aplica la carga, a una velocidad de deformación constante de 50,8 mm por minuto hasta que se produce la rotura. El punto de rotura se define por la carga máxima obtenida. El número total de libras necesarias para producir la rotura de la muestra a 60°C se anota como valor de estabilidad Marshall.
- Mientras se realiza el ensayo de estabilidad, se mantiene el medidor de deformaciones (flujo) en posición sobre la varilla de guía y se lo quita cuando se obtiene la carga máxima; se lee y se anota esta lectura como valor de flujo de la briqueta, expresado en centésimas de pulgada.

Figura 4.5 Medición de las alturas de las briquetas.



Leyenda: Se tomaron cuatro medidas de las alturas de las briquetas, para luego realizar un promedio y utilizarlo en el llenado de las planillas del ensayo Marshall.

Figura 4.6 Pesado en seco de la briqueta.



Leyenda: Pesaje de la briqueta en seco.

Figura 4.7 Briqueta sumergida en el agua.



Leyenda: Obtención de datos del pesado de la briqueta totalmente sumergida en agua.

Figura 4.8 Prensa Marshall para el ensayo de estabilidad y fluencia.



Leyenda: Realización de la rotura de la briqueta en el equipo Marshall.

4.4 Proceso de cálculo de propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica

Solo se realizará un cálculo demostrativo para la briqueta con porcentaje óptimo de cemento asfáltico 4,5%.

4.4.1 Identificación de briquetas

Para la identificación de briquetas se procedió a enumerar de acuerdo el porcentaje en estudio 4,5%, se las identifico como 1,2 y 3.

4.4.2 Altura de las briquetas

Se miden las alturas dividiendo a la briqueta en cuatro para poder determinar cuatro alturas y sacar un promedio que represente el valor significativo de las alturas. En la siguiente tabla se encuentran las alturas para el porcentaje de asfalto de 4,5%.

Tabla 4.2 Alturas medidas de cada briqueta.

Identificación	Alturas (cm)	Promedio (cm)
1	6,68	6,65
	6,68	
	6,62	
	6,63	
2	6,53	6,58
	6,62	
	6,64	
	6,53	
3	6,57	6,50
	6,45	
	6,47	
	6,51	

Fuente: Elaboración propia.

4.4.3 Base de mezcla y agregado

Para la base de mezcla se toma el porcentaje de asfalto para elaborar las 3 briquetas en este cálculo el porcentaje de asfalto es de 4,5%. Mientras que para la base de agregado se realiza el siguiente procedimiento de cálculo.

$$\text{Base de agregado} = \frac{\text{Base de mezcla} \times 100}{100 - \text{Base de mezcla}}$$

$$\text{Base de agregado} = \frac{4,5 \times 100}{100 - 4,5}$$

$$\text{Base de agregado} = 4,71$$

4.4.4 Peso de la briqueta en el aire

El peso de la briqueta en el aire consiste en medir su peso una vez desmoldada la misma y limpiada en su superficie.

Tabla 4.3 Peso en el aire de las briquetas.

Identificación	Peso de briqueta en el aire (gr)
1	1172,70
2	1184,80
3	1176,60

Fuente: Elaboración propia.

4.4.5 Peso de la briqueta en el aire saturado superficialmente seco (S.S.S)

El peso de la briqueta saturado superficialmente seco consiste en medir su peso una vez secada la briqueta después de estar sumergida en agua por un lapso de 5 minutos a 25°C.

Tabla 4.4 Peso de la briqueta saturada superficialmente seca (S.S.S).

Identificación	Peso de briqueta en el aire S.S.S (gr)
1	1174,7
2	1186,3
3	1177,4

Fuente: Elaboración propia.

4.4.6 Peso de la briqueta sumergida en el agua

El peso de la briqueta sumergida en agua consiste en medir su peso en el agua sumergida.

Tabla 4.5 Peso de la briqueta sumergida en el agua.

Identificación	Peso de briqueta sumergida en agua (gr)
1	660,00
2	675,00
3	671,00

Fuente: Elaboración propia.

4.4.7 Volumen de la briqueta

Este proceso de cálculo se realiza para la briqueta identificada como 1 con un porcentaje de asfalto del 4,5%.

Vol. de briqueta= Peso briqueta en el aire S.S.S – peso de briqueta sumergida

$$\text{Vol. de briqueta} = 1174,70 - 660,00$$

$$\text{Vol. de briqueta} = 515,20 \text{ gr}$$

Debido a que el peso es del agua y su peso específico es 1 gr/cm^3 se considera:

$$\text{Vol. de la briqueta} = 515,20 \text{ cm}^3$$

4.4.8 Densidad de la briqueta

Este proceso de cálculo se realiza para la briqueta identificada como 1, la misma que tiene el porcentaje de asfalto de 4,5%.

Densidad real de la briqueta

$$\text{Densidad real} = \frac{\text{Peso de la briqueta en el aire}}{\text{Volumen de la muestra}}$$

$$\text{Densidad real} = \frac{1172,70}{515,20}$$

$$\text{Densidad real} = 2,276 \text{ gr/ cm}^3$$

Densidad máxima teórica de la briqueta

$$\text{Densidad máx.} = \frac{100}{\frac{\% \text{ De asfalto}}{\text{Peso específico asfalto}} + \frac{100 - \% \text{ De asfalto}}{\text{Peso específico agregado grueso}}}$$

$$\text{Densidad máx.} = \frac{100}{\frac{4,5}{1,010} + \frac{100-4,5}{2,79}}$$

$$\text{Densidad máx.} = 2,584 \text{ gr/cm}^3$$

4.4.9 Porcentaje de vacíos

Este proceso de cálculo se realiza para la briqueta con el porcentaje de 4,5% de asfalto e identificada como 1.

Porcentaje de vacíos de la mezcla

$$V_v = \frac{\text{Densidad máx.} - \text{Densidad real}}{\text{Densidad máx.}} \times 100\%$$

$$V_v = \frac{2,584 - 2,276}{2,584} \times 100\%$$

$$V_v = 11,91\%$$

Porcentaje de Vacíos de los Agregados Minerales (V.A.M)

$$V.A.M = \frac{\% \text{ De asfalto} \times \text{Densidad real}}{\text{Peso específico del asfalto}} + \% \text{ De vacíos (Vv)}$$

$$V.A.M = \frac{4,5 \times 2,276}{1,010} + 11,91\%$$

$$V.A.M = 22,05\%$$

4.4.10 Estabilidad y fluencia

La estabilidad y la fluencia son propiedades medidas a partir del ensayo la prensa Marshall.

Tabla 4.6 Datos del ensayo de estabilidad y fluencia.

Identificación	Lectura dial	
	Estabilidad (lb)	Fluencia (1/100 plg)
1	1743	11
2	1972	8
3	1960	8

Fuente: Elaboración propia.

Después del cálculo de estabilidad real se procede a corregir por la altura de la briqueta con la siguiente formula:

Estabilidad corregida = Estabilidad * Factor corrección de altura

Donde:

Factor de corrección de altura = Es el factor de corrección de acuerdo a la altura de la briqueta según el método Marshall cuando la altura es diferente de 63,5 mm.

Tabla 4.7 Alturas promedio y factor de corrección por altura.

Identificación	Promedio de alturas (cm)	Factor de corrección por altura	Promedio del factor de corrección
1	6.65	0,934	0,948
2	6.58	0,947	
3	6.50	0,963	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.8 Estabilidad corregida.

Identificación	Estabilidad real promedio (lb)	Promedio del factor de corrección	Estabilidad corregida (lb)
1	1743	0,948	1793,8
2	1972		
3	1960		

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, se tiene los siguientes resultados:

Tabla 4.9 Resultados de la estabilidad y fluencia.

Identificación	Estabilidad (lb)		Fluencia	
	Real	Promedio	1/100''	Promedio
1	1627,6	0,948	11	9
2	1867,3		8	
3	1886,5		8	

Fuente: Elaboración propia.

4.5 Resultados del diseño de la mezcla asfáltica convencional 85-100 diseñada por el método Marshall

Tabla 4.10 Resultados del diseño de la mezcla convencional por el método Marshall.

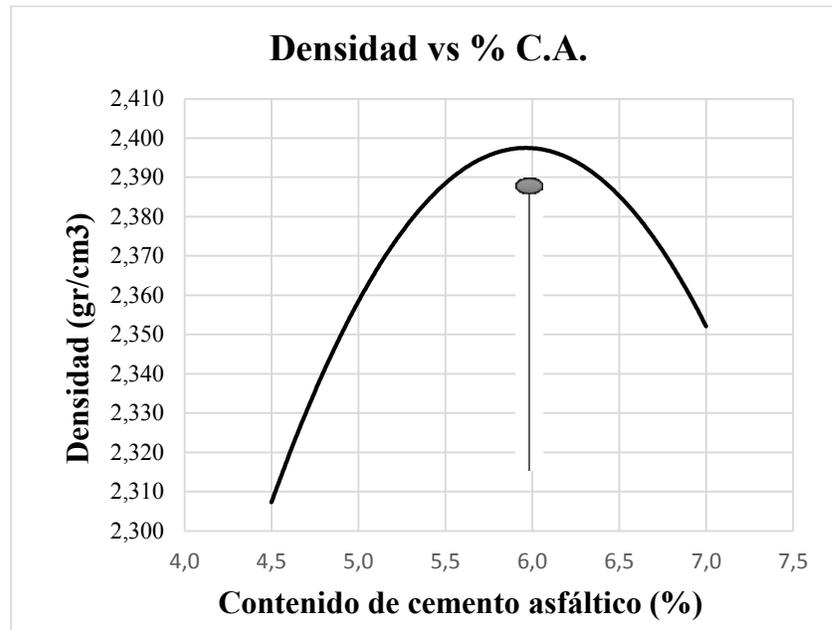
% De asfalto	Identificación	Altura promedio (cm)	Densidad real promedio (gr/cm ³)	% De vacíos en la mezcla (V _v)	% De vacíos del agregado mineral (V.A.M)	Estabilidad corregida promedio (Lb)	Fluencia promedio (1/100")
4,5	1	6,65	2,30	7,09	17,36	1794	9,00
	2	6,58					
	3	6,50					
5,0	1	6,50	2,36	4,14	15,82	1903	9,33
	2	6,37					
	3	6,35					
5,5	1	6,41	2,39	2,04	15,08	2060	10,67
	2	6,32					
	3	6,41					
6,0	1	6,37	2,40	1,17	15,41	1937	12,00
	2	6,49					
	3	6,23					
6,5	1	6,37	2,38	1,25	16,55	1837	14,33
	2	6,45					
	3	6,31					
7,0	1	6,23	2,36	1,38	17,71	1521	19,67
	2	6,33					
	3	6,42					

Fuente: Elaboración propia.

Obtenido todos los valores se procedió a dibujar las curvas correspondientes a las siguientes relaciones.

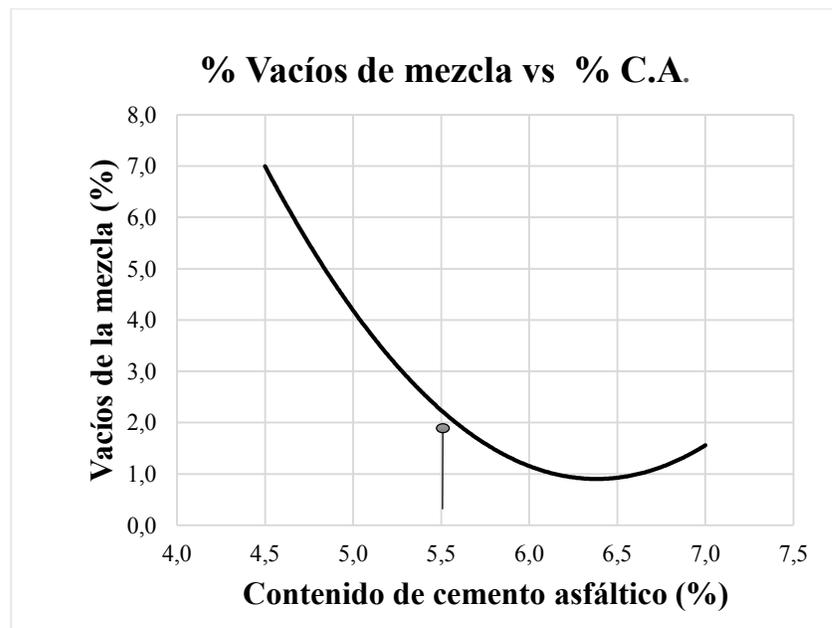
- Porcentaje de cemento asfáltico (C.A) vs. Densidad de la briqueta.
- Porcentaje de cemento asfáltico (C.A) vs. Porcentaje de vacíos en aire con respecto a la mezcla total.
- Porcentaje de cemento asfáltico (C.A) vs. Vacíos de agregado mineral (V.A.M).
- Porcentaje de cemento asfáltico (C.A) vs. Estabilidad corregida.
- Porcentaje de cemento asfáltico (C.A) vs Fluencia (flujo).

Gráfico 4.1 Porcentaje de cemento asfáltico (C.A) vs. Densidad de la briqueta.



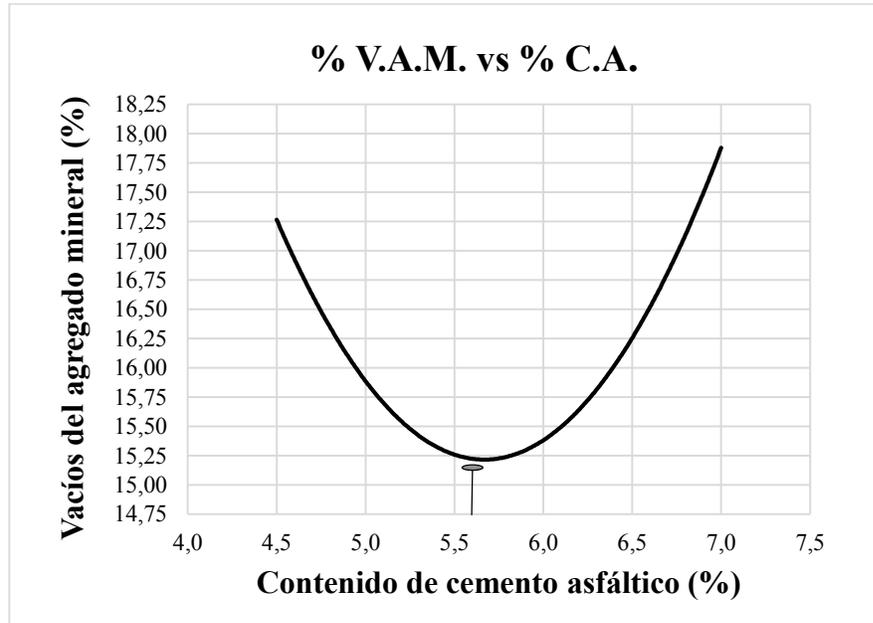
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.2 Porcentaje de cemento asfáltico vs. Porcentaje de vacíos en aire con respecto a la mezcla.



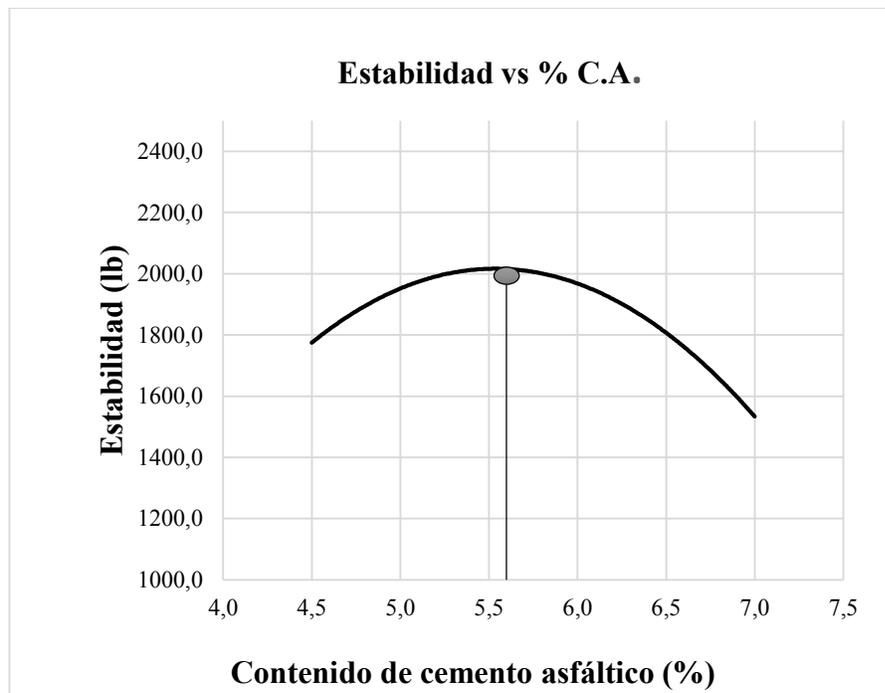
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.3 Porcentaje de cemento asfáltico (C.A) vs. Vacíos de agregado mineral (V.A.M).



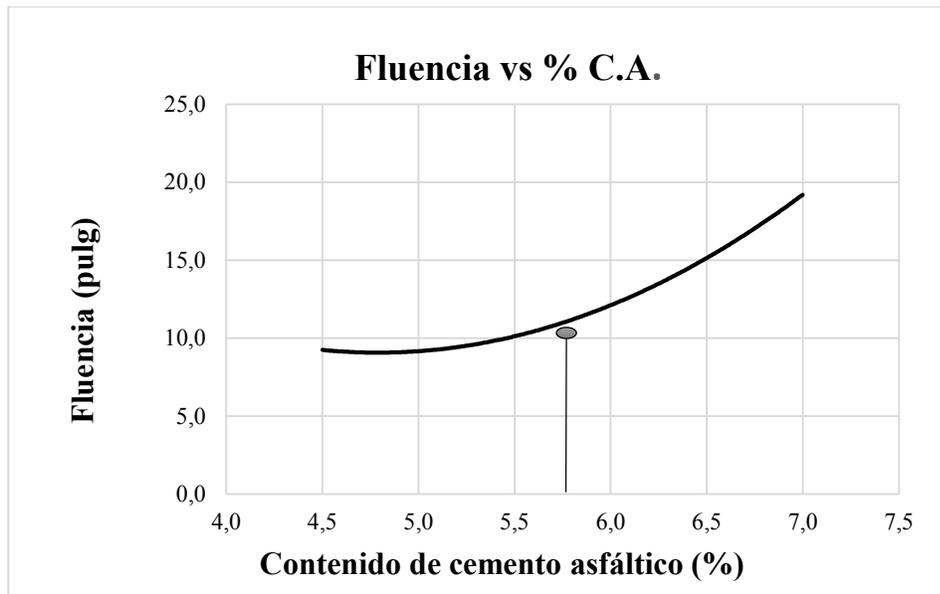
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.4 Porcentaje de cemento asfáltico (C.A) vs. Estabilidad.



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.5 Porcentaje de cemento asfáltico (C.A) vs Fluencia (flujo).



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a las gráficas obtenidas se tiene:

Tabla 4.11 Resultados de las gráficas del ensayo Marshall.

Valores				
Características	% De asfalto	Obtenidos de gráficos	Especificaciones técnicas	
			Mínima	Máxima
Densidad	5,64	2,393	-	-
% De vacíos	5,83	4,000	3	5
V.A.M	5,70	15,216	13	-
Estabilidad	5,67	2012,826	>1800 (75 golpes)	
Fluencia	5,75	10,992	8	14
Promedio (%)	5,71	Determinación del contenido óptimo de asfalto promedio de las graficas		

Fuente: Elaboración propia.

El porcentaje óptimo de asfalto es de 5,71% que será utilizado para la realización de las mezclas convencionales diseñadas por la metodología Marshall.

4.5.1 Preparación de briquetas con el porcentaje óptimo de cemento asfáltico

Después de calcular el porcentaje óptimo del cemento asfáltico que es igual a 5,71% del total de la briketa de 1200 gramos, se procede a pesar las muestras para su respectiva comparación, en la siguiente tabla se muestran los pesos repartidos de manera homogénea para la realización de briquetas convencionales con cemento asfáltico 85-100 manteniendo la combinación de agregados de 27% de grava, 28% de gravilla ,40 % de arena y 5% de filler.

Tabla 4.12 Dosificación con el contenido óptimo de asfalto de 5,71%.

Porcentaje óptimo de cemento asfáltico en la mezcla (%)	5,71%
Porcentaje de agregado (%)	94,3%
Peso del cemento asfáltico (gr)	68,52
Peso de grava (gr)	305,50
Peso de gravilla (gr)	316,81
Peso de arena (gr)	509,17
Peso total de la briketa (gr)	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.13 Datos obtenidos del ensayo Marshall del contenido óptimo de asfalto.

% De cemento asfáltico	Identificación	Altura promedio (cm)	Peso seco al aire (gr)	Peso saturado superficialmente seco (gr)	Peso sumergido en agua (gr)	Estabilidad lectura dial (Lb)	Lectura dial del flujo (1/100)
5,71	1	6,33	1169,1	1172,3	672,5	1743	11
	2	6,36	1166,0	1167,8	675,5	1972	8
	3	6,45	1188,1	1190,0	687,5	1960	8
	4	6,39	1185,8	1187,2	684,0	1859	10
	5	6,35	1173,0	1174,7	680,5	1980	10
	6	6,30	1174,7	1174,9	679,0	1950	8
	7	6,39	1173,5	1174,4	680,0	2052	8
	8	6,32	1178,6	1179,1	683,0	2080	14
	9	6,32	1169,3	1170,6	680,5	2095	10
	10	6,52	1195,4	1195,6	692,0	1964	13
	11	6,49	1188,0	1189,2	675,0	2018	11
	12	6,35	1185,3	1185,5	681,0	1849	12
	13	6,43	1165,7	1166,2	660,0	1850	14
	14	6,34	1186,9	1187,0	680,0	1763	12
	15	6,69	1215,9	1217,2	690,0	1929	17
	16	6,32	1170,2	1170,3	670,0	1559	19
	17	6,37	1180,6	1181,1	679,5	1414	22
	18	6,37	1160,3	1161,8	675,0	1560	18
	19	6,33	1171,5	1172,8	673	1815	13
	20	6,36	1192,8	1195,7	691	2097	8
	21	6,45	1170,2	1172,0	675	2165	10
	22	6,39	1180,0	1181,2	683,5	1804	8
	23	6,35	1181,4	1182,4	680,5	2032	17
	24	6,30	1147,7	1148,2	663,5	1854	11
	25	6,39	1195,7	1196,1	694	1871	13
	26	6,32	1179,6	1181,0	683,5	2021	11
	27	6,32	1187,1	1188,0	685,5	1712	9
	28	6,52	1170,4	1170,5	670,5	1769	9
	29	6,49	1179,4	1180,8	679	1189	12
	30	6,35	1193,1	1193,6	692,5	2639	14
	31	6,43	1191,6	1195,2	689,5	2171	8
	32	6,34	1183,8	1188,2	686,5	3453	8
	33	6,69	1168,9	1172,4	677	2274	20
	34	6,32	1191,7	1194,9	681,5	3175	12
	35	6,37	1173,3	1174,3	675	3075	15

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.14 Resultados de la mezcla convencional diseñada por Marshall.

Descripción	Altura promedio (cm)	densidad real (gr/cm ³)	% vacíos en la mezcla (Vv)	% Vacíos de agregado mineral (V.A.M)	Estabilidad real corregida (Lb)	fluencia real I/100
1	6,33	2,34	3,97	17,19	1751,72	11
2	6,36	2,37	2,76	16,15	1967,07	8
3	6,45	2,36	2,93	16,30	1911,00	8
4	6,39	2,36	3,25	16,57	1840,41	10
5	6,35	2,37	2,55	15,97	1980,00	10
6	6,3	2,37	2,75	16,14	1975,35	8
7	6,39	2,37	2,55	15,97	2031,48	8
8	6,32	2,38	2,46	15,89	2096,64	14
9	6,32	2,39	2,05	15,54	2111,76	10
10	6,52	2,37	2,55	15,97	1881,71	13
11	6,49	2,31	5,15	18,21	1947,37	11
12	6,35	2,35	3,54	16,82	1849,00	12
13	6,43	2,30	5,46	18,47	1813,00	14
14	6,34	2,34	3,89	17,12	1768,29	12
15	6,69	2,31	5,31	18,35	1784,33	17
16	6,32	2,34	3,97	17,20	1571,47	19
17	6,37	2,35	3,37	16,68	1406,93	22
18	6,37	2,38	2,14	15,62	1552,20	18
19	6,33	2,34	3,86	17,10	1824,08	13
20	6,36	2,36	2,97	16,33	2091,76	8
21	6,45	2,35	3,33	16,65	2110,88	10
22	6,39	2,37	2,66	16,07	1840,41	8
23	6,35	2,35	3,36	16,67	1980,00	17
24	6,30	2,37	2,79	16,17	1975,35	11
25	6,39	2,38	2,23	15,69	2031,48	13
26	6,32	2,37	2,66	16,06	2096,64	11
27	6,32	2,36	3,01	16,37	2111,76	9
28	6,52	2,34	3,90	17,13	1881,71	9
29	6,49	2,35	3,51	16,79	1947,37	12
30	6,35	2,38	2,25	15,71	1849,00	14
31	6,43	2,36	3,26	16,58	1813,00	8
32	6,34	2,36	3,13	16,47	1768,29	8
33	6,69	2,36	3,13	16,47	1784,33	20
34	6,32	2,32	4,70	17,83	1571,47	12
35	6,37	2,35	3,52	16,81	1406,93	15

Fuente: Elaboración propia.

4.6 Diseño de la mezcla asfáltica convencional por la metodología RAMCODES

La metodología de RAMCODES basa su técnica en la estadística de análisis que toma como estudio la influencia de dos factores (G_{mb} y %CA) en el comportamiento de la mezcla asfáltica. Este planteamiento, que utiliza la metodología resulta de gran beneficio en las acciones de control de calidad para la mezcla asfáltica compactada.

La herramienta estrella que utiliza la metodología RAMCODES en el diseño de mezclas asfálticas es el polígono de vacíos, la cual se trata de una construcción grafica realizada en el espacio contenido de asfalto (P_b) versus la densidad de la mezcla asfáltica (G_{mb}) que representa el área más grande donde se cumplen todas las especificaciones de vacíos requeridos de aire, vacíos en el agregado mineral, y vacíos llenados con asfalto. La coordenada que está en sentido horizontal del centroide de esta área es el contenido de asfalto óptimo tentativo. Este polígono se lo traza a partir de la intersección de las diferentes curvas de vacíos halladas, que se grafican con las funciones correspondientes a cada definición de vacíos, valoradas de manera respectiva, en cada uno de las estimaciones especificada. Para realizar la aplicación del polígono de vacíos se puede usar una hoja de cálculo en MS Excel que fue creada por RAMCODES, con el propósito de hacer un análisis mucho más rápido usando herramientas tecnológicas.

Para la dosificación de la mezcla asfáltica convencional 85-100 se procedió a utilizar la misma granulometría formada para Marshall, ya que los equipos utilizados para obtener la dosificación RAMCODES son los mismos utilizados por Marshall, debido a la comprobación que se debe realizar siguiendo el procedimiento ASTM D-1559.

4.6.1 Especificaciones de vacíos metodología RAMCODES

Las especificaciones de vacíos para la metodología RAMCODES son las siguientes:

$V_a=3\%$ como valor mínimo, poniendo como el máximo de 5% .

$V_{AM}= 13\%$ en este caso el límite máximo a recomendación del autor de la metodología RAMCODES, se debe sumar de 2 a 3 % al valor mínimo. En este caso se obtiene, el valor máximo de 15% .

VFA= 65% como el valor mínimo y el valor máximo de 75%.

4.6.2 Gravedades específicas metodología RAMCODES

En el procedimiento de diseño a nivel de volumetría con el polígono de vacíos es necesario la determinación de las gravedades específicas de la combinación de agregado pétreo de la fórmula de trabajo como ser las siguientes:

- Gravedad específica bulk (G_{sb})
- Gravedad específica efectiva (G_{se})

Todos estos datos se obtienen en el ensayo de densidad máxima teórica (RICE) con el cemento asfáltico escogido. Además de tomar en cuenta la gravedad específica del cemento asfáltico.

Las gravedades específicas a utilizar en el diseño de las mezclas son las siguientes:

Tabla 4.15 Gravedades específicas de las mezclas.

Muestra N.º	Gse gr/cm ³	Gsb gr/cm ³	Gb gr/cm ³
1	2,749	2,663	1,010
2	2,770	2,663	1,010
3	2,791	2,663	1,010
4	2,813	2,663	1,010
5	2,836	2,663	1,010
6	2,861	2,663	1,010

Fuente: Elaboración propia.

4.6.3 Proceso de cálculo analítico de la mezcla asfáltica convencional 85-100 metodología RAMCODES (polígono de vacíos)

4.6.4 Cálculo del polígono de vacíos RAMCODES para la muestra N°1

Se procederá a realizar el cálculo analítico de la muestra N°1 ya teniendo los datos de las gravedades específicas y las especificaciones de vacíos.

Tabla 4.16 Gravedades específicas muestra N°1.

Gravedades específicas	
Gb, Gravedad específica del asfalto (gr/cm ³)	1,010
Gsb, Gravedad específica bruta de la combinación de agregados (gr/cm ³)	2,663
Gse, Gravedad específica efectiva de la combinación de agregados (gr/cm ³)	2,749

Fuente: Polyvoids calculator/Software RAMCODES.

Tabla 4.17 Especificaciones de vacíos metodología RAMCODES.

Especificaciones de vacíos		
Definición	Mín.	Máx.
Va, porcentaje de vacíos de aire para el porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla. (%)	3	5
VAM, vacíos de aire en el agregado mineral de diseño. (%)	13	15
VFA, vacíos de aire llenos de asfalto de diseño. (%)	65	75

Fuente: Polyvoids calculator/Software RAMCODES.

Tabla 4.18 Vértice de las isolíneas.

Puntos	Pb (%)	Gmb
5	4,64	2,430
6	5,15	2,443
7	5,85	2,404
4	5,34	2,391
10	5,03	2,404
5	4,64	2,430

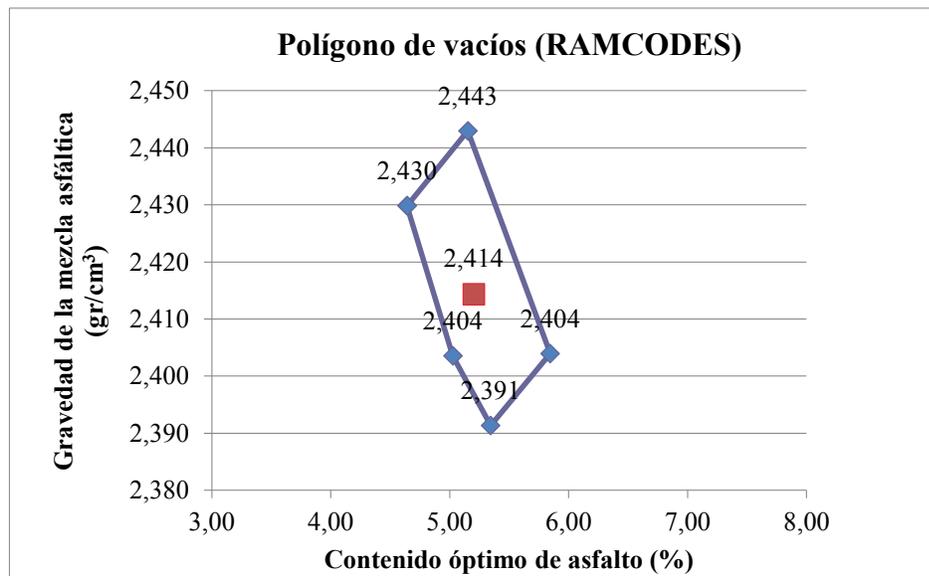
Fuente: Polyvoids calculator/Software RAMCODES.

Tabla 4.19 Coordenadas del centroide.

n	5,00
Pb (%)	5,19
Gmb (gr/cm ³)	2,414

Fuente: Polyvoids calculator/Software RAMCODES.

Gráfico 4.6 Polígono de vacíos de la metodología RAMCODES.



Fuente: Polyvoids calculator/Software RAMCODES.

4.6.5 Cálculo del polígono de vacíos RAMCODES para la muestra N°2.

Tabla 4.20 Gravedades específicas de la muestra N°2.

Gravedades específicas	
Gb, Gravedad específica del asfalto (gr/cm ³)	1,010
Gsb, Gravedad específica bruta de la combinación de agregados (gr/cm ³)	2,663
Gse, Gravedad específica efectiva de la combinación de agregados (gr/cm ³)	2,770

Fuente: Polyvoids calculator/Software RAMCODES.

Tabla 4.21 Especificaciones de vacíos metodología RAMCODES.

Especificaciones de vacíos		
Definición	Mín.	Máx.
Va, porcentaje de vacíos de aire para el porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla. (%)	3	5
VAM, vacíos de aire en el agregado mineral de diseño. (%)	13	15
VFA, vacíos de aire llenos de asfalto de diseño. (%)	65	75

Fuente: Polyvoids calculator/Software RAMCODES.

Tabla 4.22 Vértices de las isolíneas.

Puntos	Pb (%)	Gmb (gr/cm ³)
5	4,90	2,436
6	5,41	2,449
7	6,09	2,410
4	5,59	2,398
10	5,28	2,410
5	4,90	2,430

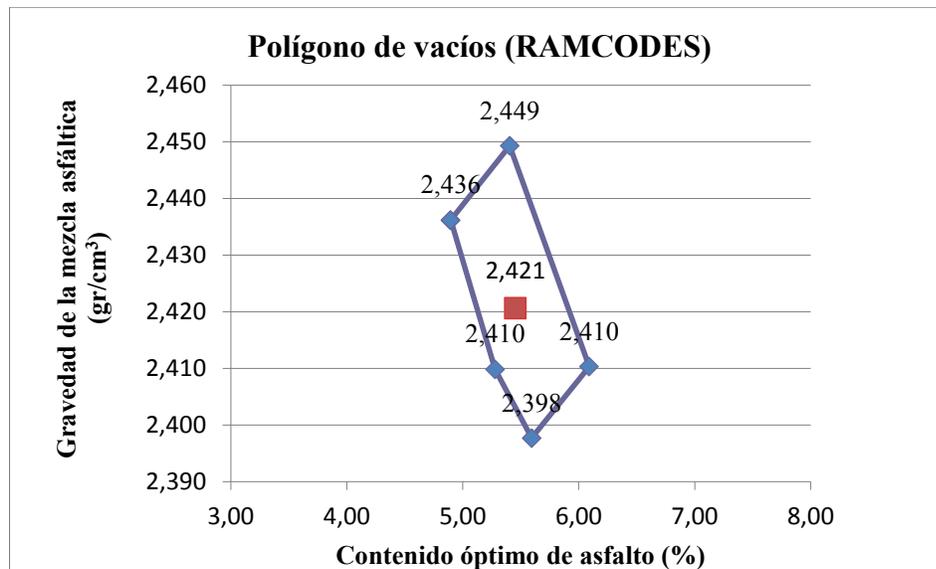
Fuente: Polyvoids calculator/Software RAMCODES.

Tabla 4.23 Coordenadas del centroide.

n	5,00
Pb (%)	5,45
Gmb (gr/cm ³)	2,421

Fuente: Polyvoids calculator/Software RAMCODES.

Gráfico 4.7 Polígono de vacíos de la metodología RAMCODES.



Fuente: Polyvoids calculator/Software RAMCODES.

4.6.6 Cálculo del polígono de vacíos RAMCODES para la muestra N°3.

Tabla 4.24 Gravedades específicas para la mezcla N°3.

Gravedades específicas	
Gb, Gravedad específica del asfalto (gr/cm ³)	1,010
Gsb, Gravedad específica bruta de la combinación de agregados (gr/cm ³)	2,663
Gse, Gravedad específica efectiva de la combinación de agregados (gr/cm ³)	2,791

Fuente: Polyvoids calculator/Software RAMCODES.

Tabla 4.25 Especificaciones de vacíos metodología RAMCODES.

Especificaciones de vacíos		
Definición	Mín.	Máx.
Va, porcentaje de vacíos de aire para el porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla. (%)	3	5
VAM, vacíos de aire en el agregado mineral de diseño. (%)	13	15
VFA, vacíos de aire llenos de asfalto de diseño. (%)	65	75

Fuente: Polyvoids calculator/Software RAMCODES.

Tabla 4.26 Vértices de las isolíneas.

Puntos	Pb (%)	Gmb (gr/cm ³)
5	5,12	2,442
6	5,60	2,456
7	6,31	2,416
4	5,83	2,404
10	5,54	2,414
5	5,12	2,442

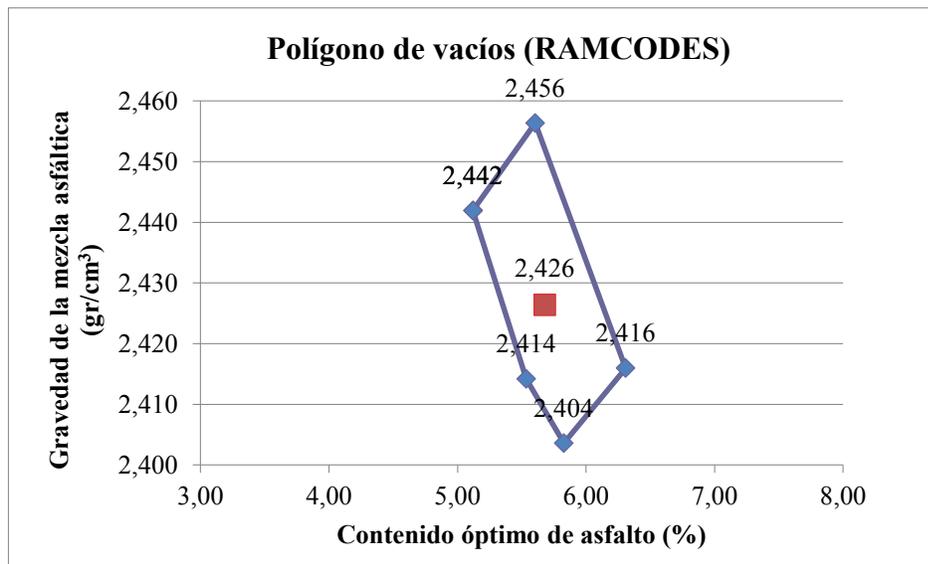
Fuente: Polyvoids Calculator/ Software RAMCODES.

Tabla 4.27 Coordenadas del centroide.

n	5,00
Pb (%)	5,68
Gmb (gr/cm ³)	2,426

Fuente: Polyvoids calculator/Software RAMCODES.

Gráfico 4.8 Polígono de vacíos de la metodología RAMCODES.



Fuente: Polyvoids calculator/Software RAMCODES.

4.6.7 Cálculo del polígono de vacíos RAMCODES para la muestra N°4

Tabla 4.28 Gravedades específicas de la muestra N°4.

Gravedades específicas	
Gb, Gravedad específica del asfalto (gr/cm ³)	1,010
Gsb, Gravedad específica bruta de la combinación de agregados (gr/cm ³)	2,663
Gse, Gravedad específica efectiva de la combinación de agregados (gr/cm ³)	2,813

Fuente: Polyvoids calculator/Software RAMCODES.

Tabla 4.29 Especificaciones de vacíos metodología RAMCODES.

Especificaciones de vacíos		
Definición	Mín.	Máx.
Va, porcentaje de vacíos de aire para el porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla. (%)	3	5
VAM, vacíos de aire en el agregado mineral de diseño. (%)	13	15
VFA, vacíos de aire llenos de asfalto de diseño. (%)	65	75

Fuente: Polyvoids calculator/Software RAMCODES.

Tabla 4.30 Vértices de las isolíneas.

Puntos	Pb (%)	Gmb (gr/cm ³)
5	5,40	2,449
6	5,90	2,462
7	6,58	2,423
4	5,09	2,410
10	5,78	2,423
5	5,40	2,449

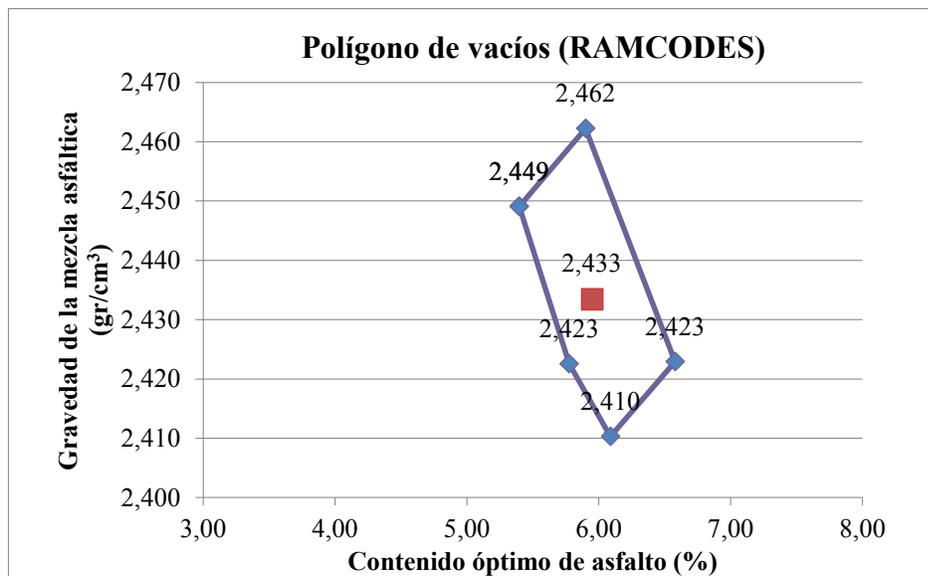
Fuente: Polyvoids calculator/Software RAMCODES.

Tabla 4.31 Coordenadas del centroide.

n	5,00
Pb (%)	5,95
Gmb (gr/cm ³)	2,433

Fuente: Polyvoids calculator/Software RAMCODES.

Gráfico 4.9 Polígono de vacíos de la metodología RAMCODES.



Fuente: Polyvoids calculator/Software RAMCODES.

4.6.8 Cálculo del polígono de vacíos RAMCODES para la muestra N°5

Tabla 4.32 Gravedades específicas de la muestra N°5.

Gravedades específicas	
Gb, Gravedad específica del asfalto (gr/cm ³)	1,010
Gsb, Gravedad específica bruta de la combinación de agregados (gr/cm ³)	2,663
Gse, Gravedad específica efectiva de la combinación de agregados (gr/cm ³)	2,836

Fuente: Polyvoids calculator/Software RAMCODES.

Tabla 4.33 Especificaciones de vacíos metodología RAMCODES.

Especificaciones de vacíos		
Definición	Mín.	Máx.
Va, porcentaje de vacíos de aire para el porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla. (%)	3	5
VAM, vacíos de aire en el agregado mineral de diseño. (%)	13	15
VFA, vacíos de aire llenos de asfalto de diseño. (%)	65	75

Fuente: Polyvoids calculator/Software RAMCODES.

Tabla 4.34 Vértices de las isolíneas.

Puntos	Pb (%)	Gmb (gr/cm ³)
5	5,66	2,456
6	6,16	2,469
7	6,83	2,430
4	6,34	2,417
10	6,03	2,429
5	5,66	2,456

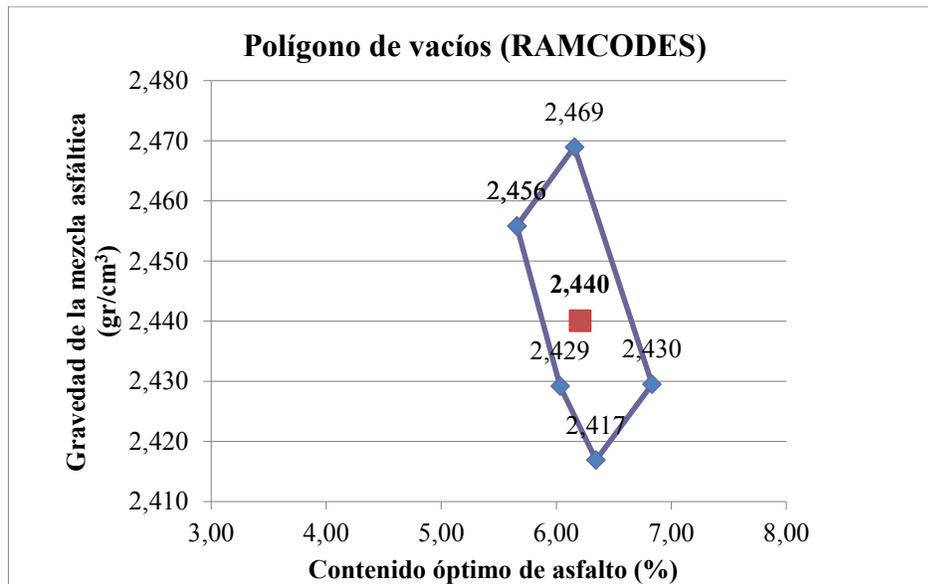
Fuente: Polyvoids calculator/Software RAMCODES.

Tabla 4.35 Coordenadas del centroide.

n	5,00
Pb (%)	6,21
Gmb (gr/cm ³)	2,440

Fuente: Polyvoids calculator/Software RAMCODES.

Gráfico 4.10 Polígono de vacíos de la metodología RAMCODES.



Fuente: Polyvoids calculator/Software RAMCODES.

4.6.9 Cálculo del polígono de vacíos RAMCODES para la muestra N°6

Tabla 4.36 Gravedades específicas para la muestra N°6.

Gravedades específicas	
Gb, Gravedad específica del asfalto (gr/cm ³)	1,010
Gsb, Gravedad específica bruta de la combinación de agregados (gr/cm ³)	2,663
Gse, Gravedad específica efectiva de la combinación de agregados (gr/cm ³)	2,861

Fuente: Polyvoids calculator/Software RAMCODES.

Tabla 4.37 Especificaciones de vacíos metodología RAMCODES.

Especificaciones de vacíos		
Definición	Mín.	Máx.
Va, porcentaje de vacíos de aire para el porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla. (%)	3	5
VAM, vacíos de aire en el agregado mineral de diseño. (%)	13	15
VFA, vacíos de aire llenos de asfalto de diseño. (%)	65	75

Fuente: Polyvoids calculator/Software RAMCODES.

Tabla 4.38 Vértices de las isolíneas.

Puntos	P _b (%)	Gmb (gr/cm ³)
5	5,93	2,463
6	6,43	2,476
7	7,10	2,437
4	6,62	2,424
10	6,31	2,436
5	5,93	2,463

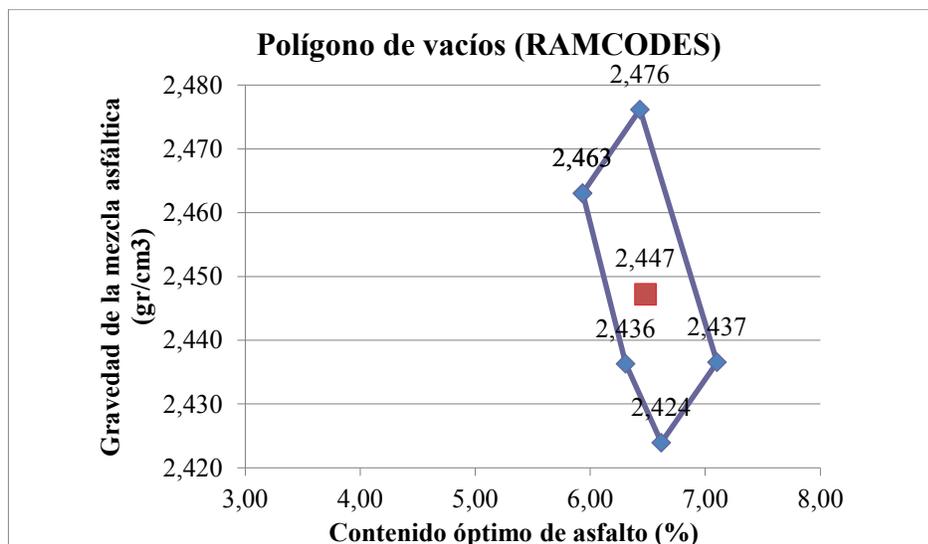
Fuente: Polyvoids calculator/Software RAMCODES.

Tabla 4.39 Coordenadas del centroide.

n	5,00
P _b (%)	6,48
Gmb (gr/cm ³)	2,447

Fuente: Polyvoids calculator/Software RAMCODES.

Gráfico 4.11 Polígono de vacíos de la metodología RAMCODES.



Fuente: Polyvoids calculator/Software RAMCODES.

4.7 Cálculo del polígono de vacíos RAMCODES elaboración propia

Para la elaboración del polígono de vacíos se tomaron en cuenta las fórmulas empleadas en la metodología RAMCODES, se realizó una hoja de Excel basada en las mismas formulas.

En la siguiente tabla se muestra cada muestra con los datos obtenidos de G_{se} , G_{sb} y G_b obtenidos de los ensayos realizados en laboratorio.

Tabla 4.40 Datos de las gravedades específicas de cada muestra.

Muestra N.º	G_{se} gr/cm ³	G_{sb} gr/cm ³	G_b gr/cm ³
1	2,749	2,663	1,010
2	2,770	2,663	1,010
3	2,791	2,663	1,010
4	2,813	2,663	1,010
5	2,836	2,663	1,010
6	2,861	2,663	1,010

Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente tabla se muestra los datos de las especificaciones de vacíos, teniendo en cuenta el mínimo y máximo como lo indica la metodología RAMCODES.

Tabla 4.41 Datos de las especificaciones de vacíos.

Especificaciones de vacíos		
Definición	Mín.	Máx.
Va, porcentaje de vacíos de aire para el porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla. (%)	3	5
VAM, vacíos de aire en el agregado mineral de diseño. (%)	13	15
VFA, vacíos de aire llenos de asfalto de diseño. (%)	65	75

Fuente: Elaboración propia.

4.7.1 Cálculo del polígono de vacíos RAMCODES para la muestra N°1

Para la siguiente muestra se realizarán todos los cálculos paso a paso.

- Inicialmente determinaremos el G_{mm} .

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

Donde:

G_{mm} = Gravedad específica teórica máxima de la mezcla, (gr/cm^3).

G_{se} = Gravedad específica efectiva del agregado, (gr/cm^3)

P_b = Porcentaje de cemento asfáltico con respecto a la mezcla total. (%)

G_b = Gravedad específica del asfalto = $1,010 \text{ gr}/\text{cm}^3$.

Reemplazando en ecuación para un contenido de asfalto de 4,5:

$$G_{mm} = \frac{100}{\frac{100 - 4,5}{2,749} - \frac{4,5}{1,010}} = 2,551 \text{ gr}/\text{cm}^3$$

Se seguirá el mismo procedimiento para los demás contenidos de asfalto 5,5, 6,6.5 y 7.

Tabla 4.42 Datos del G_{mm} (Gravedad específica teórica máxima de la mezcla).

% P_b	G_{mm} (gr/cm^3)
4,50	2,551
5,00	2,531
5,50	2,511
6,00	2,492
6,50	2,472
7,00	2,453

Fuente: Elaboración propia.

- Determinaremos las isolíneas de vacíos V_a

Se aplicará la siguiente ecuación:

$$G_{mb} = \left(1 - \frac{V_a}{100}\right) \times G_{mm}$$

Donde:

G_{mb} = Gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada, (gr/cm^3).

V_a = Porcentaje de vacíos de aire, (%).

G_{mm} = Gravedad específica teórica máxima de la mezcla, (gr/cm^3).

Reemplazando en ecuación para un 3% de vacíos y un 4,5 de contenido de asfalto:

$$G_{mb} = \left(1 - \frac{3}{100}\right) \times 2,551 = 2,475 \text{ gr}/\text{cm}^3$$

Se vuela a realizar el mismo procedimiento para todos los valores de contenidos de asfaltos 5, 5.5, 6,6.5 y 7.

Reemplazando en ecuación para un 5% de vacíos y un 4,5 de contenido de asfalto:

$$G_{mb} = \left(1 - \frac{5}{100}\right) \times 2,551 = 2,424 \text{ gr}/\text{cm}^3$$

Se vuela a realizar el mismo procedimiento para todos los valores de contenidos de asfaltos 5, 5.5, 6,6.5 y 7.

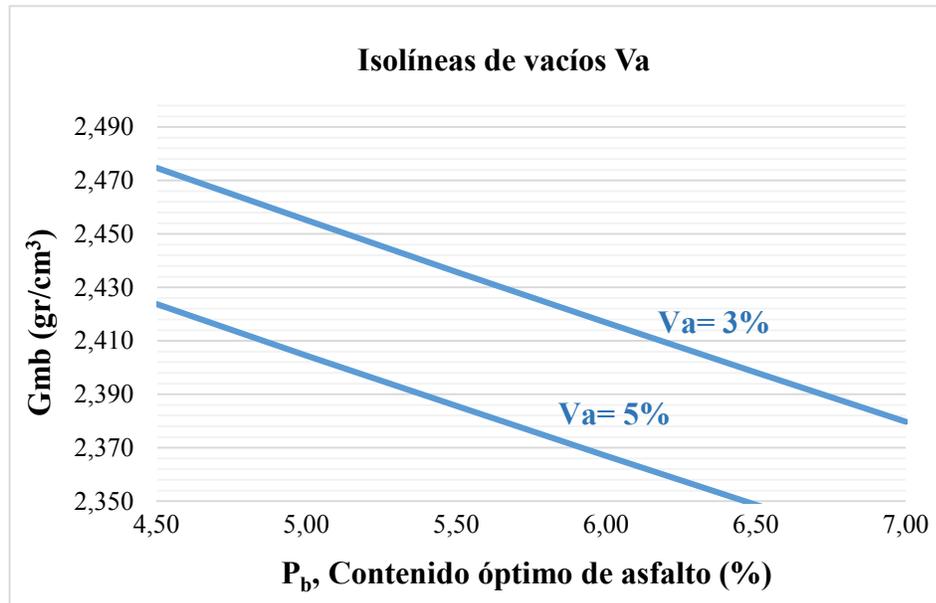
Tabla 4.43 Datos para las isolíneas de vacíos V_a .

P_b	G_{mm}	Vacíos V_a	
		3%	5%
%	gr/cm^3	gr/cm^3	gr/cm^3
4,50	2,551	2,475	2,424
5,00	2,531	2,455	2,405
5,50	2,511	2,436	2,386
6,00	2,492	2,417	2,367
6,50	2,472	2,398	2,349
7,00	2,453	2,380	2,331

Fuente: Elaboración Propia.

Después, de la obtención de los datos para los vacíos de V_a de 3% y 5% se procede a graficar las isóneas de vacíos V_a .

Gráfico 4.12 Isóneas de vacíos V_a .



Fuente: Elaboración propia.

- Determinación de las isóneas de vacíos VAM.

Aplicaremos la siguiente ecuación:

$$G_{mb} = \left(\frac{100 - VAM}{100 - P_b} \right) \times G_{sb}$$

Donde:

G_{mb} = Gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada, (gr/cm^3).

VAM = Vacíos de aire en el agregado mineral, (%).

G_{sb} = Gravedad específica neta del agregado, (gr/cm^3).

P_b = Porcentaje de cemento asfáltico con respecto a la mezcla total, (%).

Reemplazando en ecuación para un 13% de vacíos VAM para un 4,5 % de contenido de asfalto:

$$G_{mb} = \left(\frac{100 - 13}{100 - 4,6} \right) \times 2,663 = 2,426 gr/cm^3$$

Reemplazando en ecuación para un 15% de vacíos VAM:

$$G_{mb} = \left(\frac{100 - 15}{100 - 4,6} \right) \times 2,663 = 2,370 \text{ gr/cm}^3$$

Se seguirá el mismo procedimiento para todos los valores de contenido de asfalto.

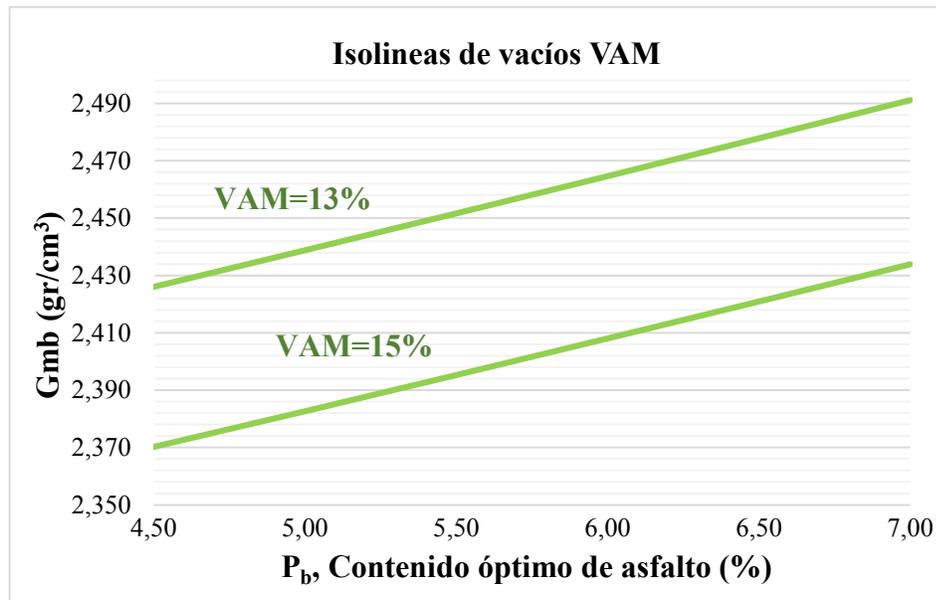
Tabla 4.44 Datos para las isóneas de vacíos VAM.

P _b	Vacíos VAM	
	13%	15%
%	gr/cm ³	gr/cm ³
4,50	2,426	2,370
5,00	2,439	2,383
5,50	2,452	2,395
6,00	2,465	2,408
6,50	2,478	2,421
7,00	2,491	2,434

Fuente: Elaboración propia.

Se realiza el grafico de las isóneas de vacíos VAM.

Gráfico 4.13 Isóneas de vacíos VAM.



Fuente: Elaboración propia.

- Determinación de las isolíneas de vacíos VAF:

$$G_{mb} = \left(\frac{\text{VAF}}{\frac{100}{G_{mm}} + \frac{\text{VFA}(100-P_b)}{100 \times G_{sb}} - \frac{100-P_b}{G_{sb}}} \right)$$

Reemplazando en ecuación para un 65% de vacíos VAF para un 4,5 % de contenido de asfalto:

$$G_{mb} = \left(\frac{65}{\frac{100}{2,551} + \frac{65(100-4,5)}{100 \times 2,663} - \frac{100-4,5}{2,663}} \right) = 2,439 \text{ gr/cm}^3$$

Reemplazando en ecuación para un 75% de vacíos VAF para un 4,5% de contenido de asfalto:

$$G_{mb} = \left(\frac{75}{\frac{100}{2,551} + \frac{75(100-4,5)}{100 \times 2,663} - \frac{100-4,5}{2,663}} \right) = 2,481 \text{ gr/cm}^3$$

Se seguirá el mismo procedimiento para todos los valores de contenido de asfalto, 5%, 5,5%, 6%, 6,5% y 7%.

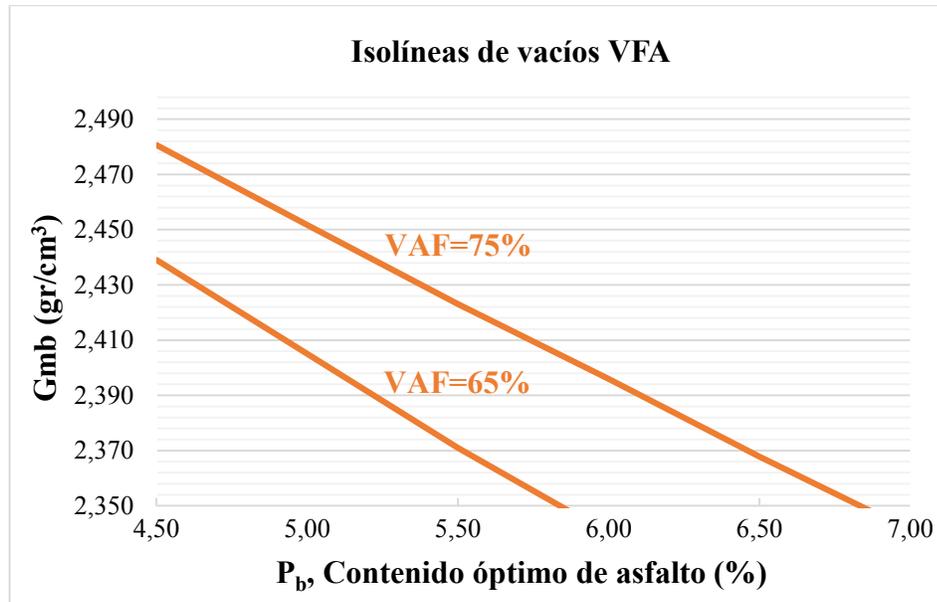
Tabla 4.45 Datos para las isolíneas de vacíos VAF.

P _b	G _{mm}	Vacíos VAF	
		65%	75%
%	gr/cm ³	gr/cm ³	gr/cm ³
4,50	2,551	2,439	2,481
5,00	2,531	2,405	2,452
5,50	2,511	2,371	2,423
6,00	2,492	2,340	2,396
6,50	2,472	2,307	2,368
7,00	2,453	2,277	2,341

Fuente: Elaboración propia.

Se procede a realizar el gráfico de las isolíneas de vacíos VAF.

Gráfico 4.14 Isolíneas de vacíos VAF.



Fuente: Elaboración propia.

Con todos los datos obtenidos de los vacíos VA, vacíos VAM y vacíos VAF, se realiza la siguiente tabla:

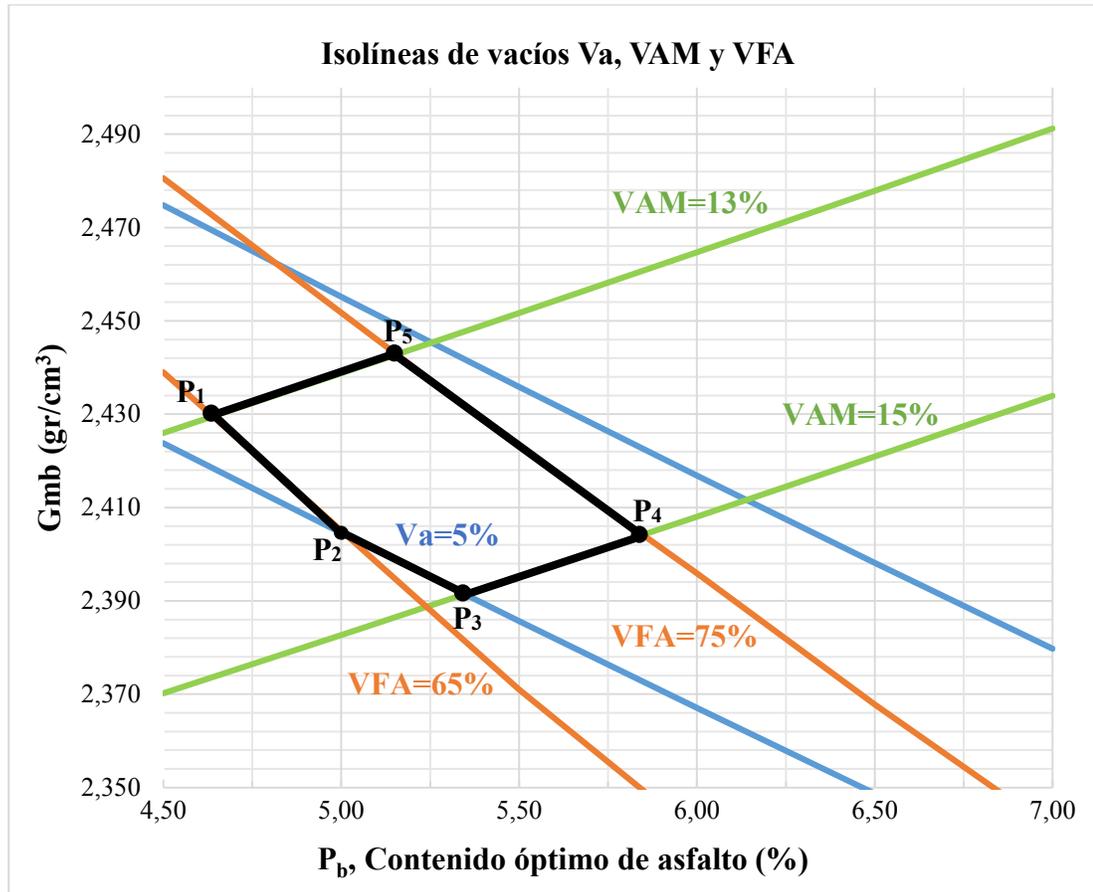
Tabla 4.46 Datos de las isolíneas de vacíos Va, VAM y VAF.

Parámetros volumétricos		Especificaciones de vacíos					
		Va%		VAM%		VFA %	
		3	5	13	15	65	75
%P _b	G _{mm} (gr/cm ³)	G _{mb} (gr/cm ³)					
4,50	2,551	2,475	2,424	2,426	2,370	2,439	2,481
5,00	2,531	2,455	2,405	2,439	2,383	2,405	2,452
5,50	2,511	2,436	2,386	2,452	2,395	2,371	2,423
6,00	2,492	2,417	2,367	2,465	2,408	2,340	2,396
6,50	2,472	2,398	2,349	2,478	2,421	2,307	2,368
7,00	2,453	2,380	2,331	2,491	2,434	2,277	2,341

Fuente: Elaboración propia.

La superposición de todos los gráficos obtenidos de isóneas de vacíos V_a , VAM y VFA, se crean vértices, los mismos que tienen un valor de porcentaje óptimo y su correspondiente densidad bulk, la unión de los puntos de los vértices da lugar al polígono de vacíos.

Gráfico 4.15 Intersección de isóneas V_a , VAM y VFA.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.47 Coordenadas de los vértices del polígono de vacíos.

Puntos	P_b (%)	$G_{mb}(gr/cm^3)$
1	4,65	2,429
2	5,00	2,405
3	5,32	2,392
4	5,82	2,404
5	5,20	2,443

Fuente: Elaboración propia.

Conociendo las coordenadas del polígono de vacíos, se determina el centroide que básicamente corresponde al valor promedio de los porcentajes de asfalto y de los pesos específicos bulk de cada vértice. Para determinarlos se emplean las siguientes ecuaciones:

$$\%CA_{opt} = \sum_{i=1}^n \frac{(\%CA)_i}{n}$$

$$G_{mb} = \sum_{i=1}^n \frac{(G_{mb})_i}{n}$$

Donde:

$(\%CA)_i$ = Porcentaje de asfalto de cada vértice.

$(G_{mb})_i$ = Peso específico bulk de la muestra de cada vértice, y “n”, es el número de vértices.

Reemplazando los datos de los porcentajes de asfalto obtenidos de la tabla 4.47, en la siguiente ecuación:

$$\%CA_{opt} = \frac{(4,65+5,00+5,32+5,82+5,20)}{5} = \frac{25,99}{5} = 5,20\%$$

De la misma manera se realiza el cálculo del peso específico bulk con la siguiente ecuación, utilizando los datos de la tabla 4.47.

$$G_{mb} = \frac{(2,429+2,405+2,392+2,404+2,443)}{5} = \frac{12,073}{5} = 2,415 \text{ gr/cm}^3$$

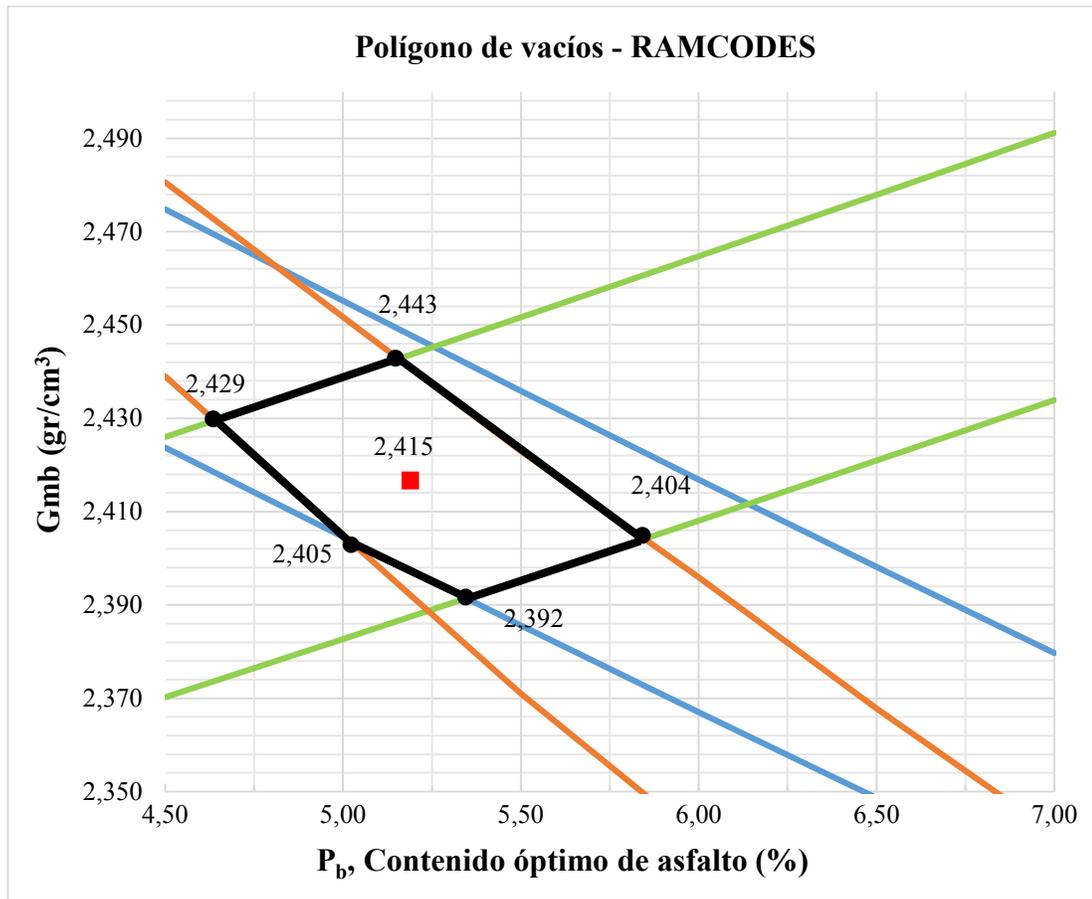
Obteniendo los valores de las coordenadas del centroide del polígono de vacíos se procede a graficar en el polígono de vacíos.

Tabla 4.48 Coordenadas del centroide polígono de vacíos.

Coordenadas centroide	
P _b (%)	5,20
G _{mb} (gr/cm ³)	2,415

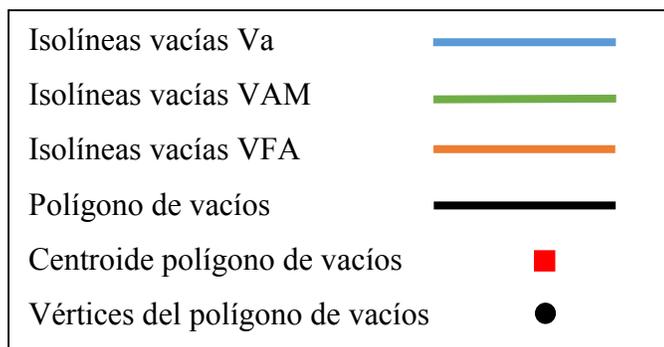
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.16 Polígono de vacíos RAMCODES muestra N°1.



Fuente Elaboración propia.

Figura 4.9 Simbología del polígono de vacíos.



Fuente: Elaboración propia.

4.7.2 Cálculo del polígono de vacíos RAMCODES para la muestra N°2

Para el cálculo del polígono de vacíos mediante la metodología RAMCODES para la muestra N° 2 se seguirán los mismos pasos que se realizaron detalladamente en la muestra N°1, esta vez se seguirá un proceso de cálculo más abreviado.

Tabla 4.49 Gravedades específicas para la muestra N°2.

Gravedades específicas	
Gb (gr/cm ³)	1,010
Gsb (gr/ cm ³)	2,663
Gse (gr/cm ³)	2,770

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.50 Especificaciones de vacíos para la muestra N°2.

Especificaciones de vacíos		
%	Mín.	Máx.
Va	3	5
VAM	13	15
VFA	65	75

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.51 Datos de las isolíneas de vacíos Va, VAM y VAF para la muestra N°2.

Parámetros volumétricos		Especificaciones de vacíos					
		Va%		VAM%		VFA %	
		3	5	13	15	65	75
%P _b	G _{mm} (gr/cm ³)	G _{mb} (gr/cm ³)					
4,50	2,569	2,492	2,440	2,426	2,370	2,464	2,503
5,00	2,548	2,472	2,421	2,439	2,383	2,429	2,473
5,50	2,528	2,452	2,401	2,452	2,395	2,395	2,444
6,00	2,508	2,433	2,382	2,465	2,408	2,362	2,415
6,50	2,488	2,414	2,364	2,478	2,421	2,330	2,388
7,00	2,469	2,395	2,345	2,491	2,434	2,298	2,360

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.52 Coordenadas de los vértices del polígono de vacíos.

Puntos	P _b (%)	G _{mb} (gr/cm ³)
1	4,90	2,437
2	5,30	2,410
3	5,55	2,398
4	6,10	2,410
5	5,40	2,448

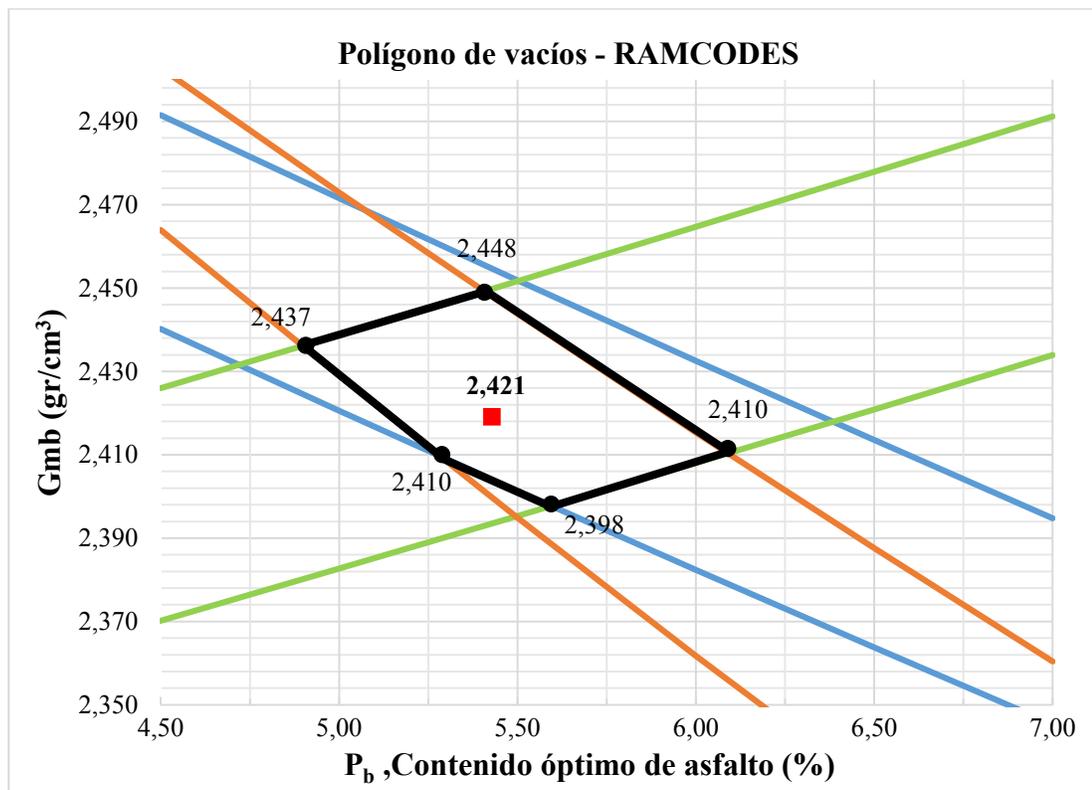
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.53 Coordenadas del centroide del polígono de vacíos.

Coordenadas centroide	
P _b (%)	5,45
G _{mb} (gr/cm ³)	2,421

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.17 Polígono de vacíos RAMCODES muestra N°2.



Fuente: Elaboración propia.

4.7.3 Cálculo del polígono de vacíos RAMCODES para la muestra N°3

Tabla 4.54 Gravedades específicas para la muestra N°3.

Gravedades específicas	
Gb (gr/cm ³)	1,010
Gsb (gr/ cm ³)	2,663
Gse (gr/cm ³)	2,791

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.55 Especificaciones de vacíos para la muestra N°3.

Especificaciones de vacíos		
%	Mín.	Máx.
Va	3	5
VAM	13	15
VFA	65	75

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.56 Datos de las isolíneas de vacíos Va, VAM y VAF para la muestra N°3.

Parámetros volumétricos		Especificaciones de vacíos					
		Va%		VAM%		VFA %	
		3	5	13	15	65	75
%P _b	G _{mm} (gr/cm ³)	G _{mb} (gr/cm ³)					
4,50	2,586	2,508	2,457	2,426	2,370	2,488	2,525
5,00	2,565	2,488	2,437	2,439	2,383	2,453	2,494
5,50	2,544	2,468	2,417	2,452	2,395	2,418	2,464
6,00	2,524	2,448	2,398	2,465	2,408	2,384	2,435
6,50	2,504	2,429	2,379	2,478	2,421	2,351	2,407
7,00	2,484	2,410	2,360	2,491	2,434	2,319	2,379

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.57 Coordenadas de los vértices del polígono vacíos.

Puntos	P _b (%)	G _{mb} (gr/cm ³)
1	5,14	2,442
2	5,55	2,418
3	5,72	2,401
4	6,30	2,417
5	5,75	2,455

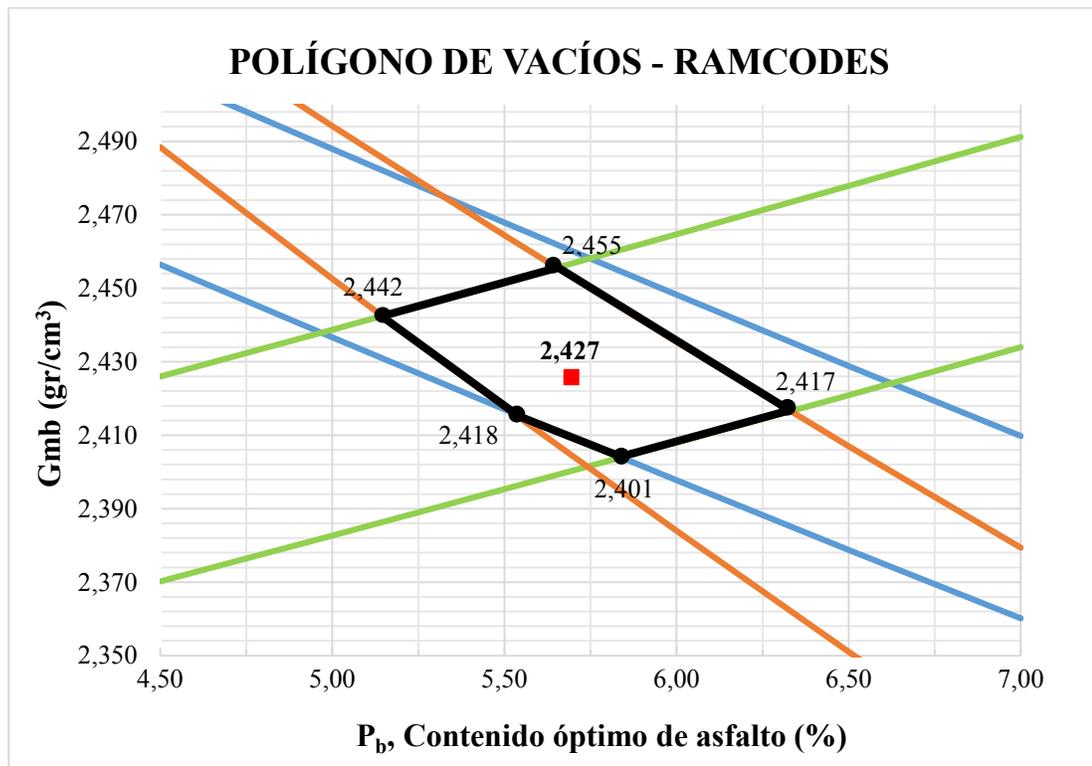
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.58 Coordenadas del centroide del polígono de vacíos.

Coordenadas centroide	
P _b (%)	5,69
G _{mb} (gr/cm ³)	2,427

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.18 Polígono de vacíos RAMCODES muestra N°3.



Fuente: Elaboración propia.

4.7.4 Cálculo del polígono de vacíos RAMCODES para la muestra N°4

Tabla 4.59 Gravedades específicas para la muestra N°4.

Gravedades específicas	
Gb (gr/cm ³)	1,010
Gsb (gr/ cm ³)	2,663
Gse (gr/cm ³)	2,813

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.60 Especificaciones de vacíos para la muestra N°4.

Especificaciones de vacíos		
%	Mín.	Máx.
Va	3	5
VAM	13	15
VFA	65	75

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.61 Datos de las isolíneas de vacíos Va, VAM y VAF para la muestra N°4.

Parámetros volumétricos		Especificaciones de vacíos					
		Va%		VAM%		VFA %	
		3	5	13	15	65	75
%P _b	G _{mm} (gr/cm ³)	G _{mb} (gr/cm ³)					
4,50	2,604	2,526	2,474	2,426	2,370	2,514	2,548
5,00	2,582	2,505	2,453	2,439	2,383	2,477	2,516
5,50	2,562	2,485	2,433	2,452	2,395	2,442	2,486
6,00	2,541	2,465	2,414	2,465	2,408	2,407	2,456
6,50	2,521	2,445	2,395	2,478	2,421	2,374	2,427
7,00	2,501	2,426	2,376	2,491	2,434	2,341	2,399

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.62 Coordenadas de los vértices del polígono de vacíos.

Puntos	P _b (%)	G _{mb} (gr/cm ³)
1	5,40	2,449
2	5,78	2,422
3	6,10	2,411
4	6,58	2,423
5	5,90	2,462

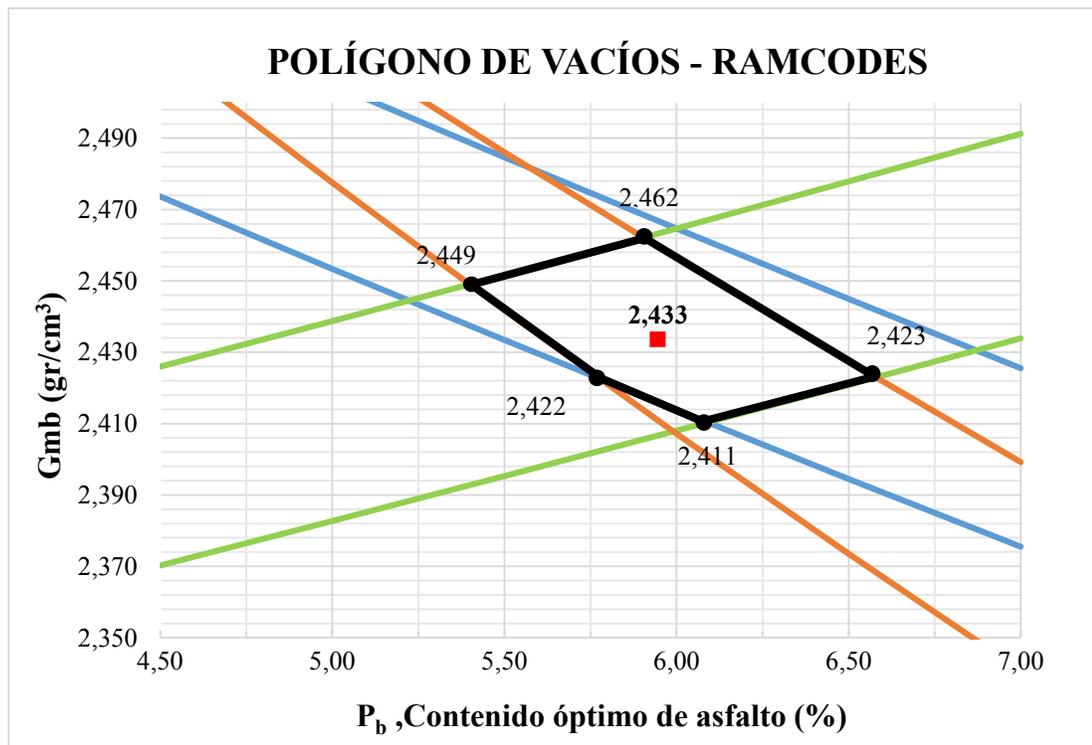
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.63 Coordenadas del centroide del polígono de vacíos.

Coordenadas centroide	
P _b (%)	5,95
G _{mb} (gr/cm ³)	2,433

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.19 Polígono de vacíos RAMCODES muestra N°4.



Fuente: Elaboración propia.

4.7.5 Cálculo del polígono de vacíos RAMCODES para la muestra N°5

Tabla 4.64 Gravedades específicas para la muestra N°5.

Gravedades específicas	
Gb (gr/cm ³)	1,010
Gsb (gr/ cm ³)	2,663
Gse (gr/cm ³)	2,836

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.65 Especificaciones de vacíos para la muestra N°5.

Especificaciones de vacíos		
%	Mín.	Máx.
Va	3	5
VAM	13	15
VFA	65	75

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.66 Datos de las isolíneas de vacíos Va, VAM y VFA para la muestra N°5.

Parámetros volumétricos		Especificaciones de vacíos					
		Va%		VAM%		VFA %	
		3	5	13	15	65	75
%P _b	G _{mm} (gr/cm ³)	G _{mb} (gr/cm ³)					
4,50	2,623	2,544	2,492	2,426	2,370	2,541	2,572
5,00	2,601	2,523	2,471	2,439	2,383	2,504	2,540
5,50	2,580	2,502	2,451	2,452	2,395	2,467	2,509
6,00	2,558	2,482	2,431	2,465	2,408	2,432	2,478
6,50	2,538	2,462	2,411	2,478	2,421	2,397	2,449
7,00	2,517	2,442	2,392	2,491	2,434	2,364	2,420

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.67 Coordenadas de los vértices del polígono de vacíos.

Puntos	P _b (%)	G _{mb} (gr/cm ³)
1	5,70	2,455
2	6,10	2,429
3	6,35	2,417
4	6,82	2,430
5	6,15	2,469

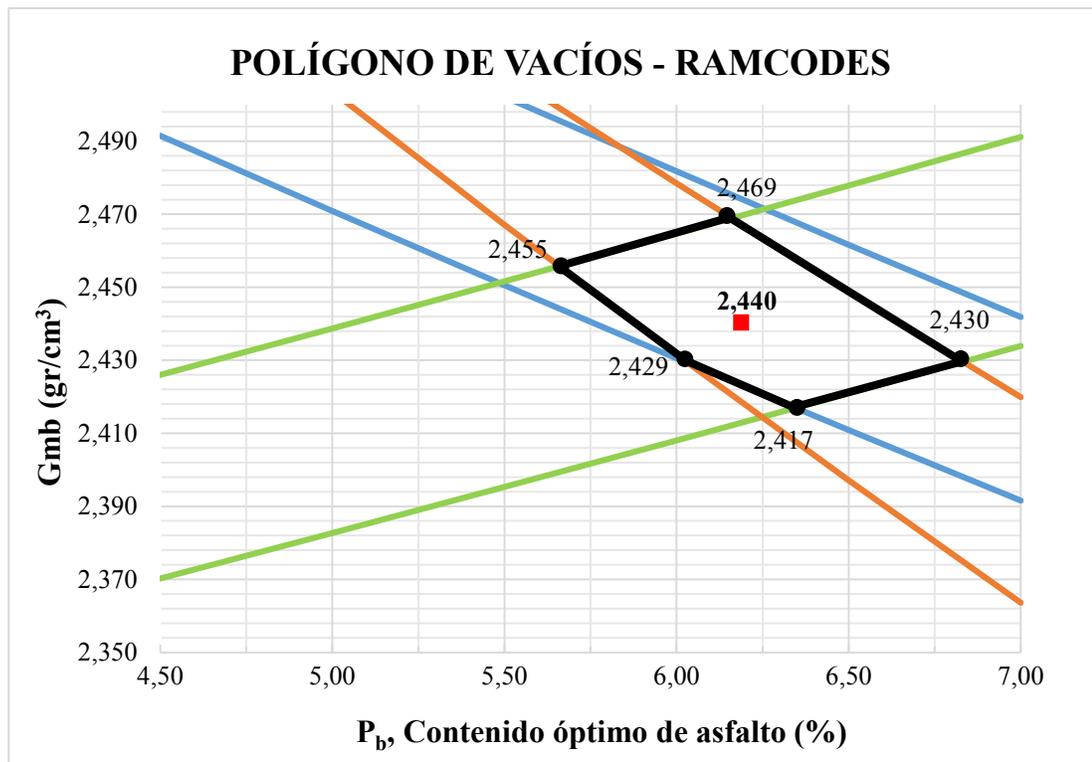
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.68 Coordenadas del centroide del polígono de vacíos.

Coordenadas centroide	
P _b (%)	6,22
G _{mb} (gr/cm ³)	2,440

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.20 Polígono de vacíos RAMCODES muestra N°5.



Fuente: Elaboración propia.

4.7.6 Cálculo del polígono de vacíos RAMCODES para la muestra N°6

Tabla 4.69 Gravedades específicas de la muestra N°6.

Gravedades específicas	
Gb (gr/cm ³)	1,010
Gsb (gr/ cm ³)	2,663
Gse (gr/cm ³)	2,861

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.70 Especificaciones de vacíos para la muestra N°6.

Especificaciones de vacíos		
%	Mín.	Máx.
Va	3	5
VAM	13	15
VFA	65	75

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.71 Datos de las isolíneas de vacíos Va, VAM y VAF para la muestra N°6.

Parámetros volumétricos		Especificaciones de vacíos					
		Va%		VAM%		VFA %	
		3	5	13	15	65	75
%P _b	G _{mm} (gr/cm ³)	G _{mb} (gr/cm ³)					
4,50	2,643	2,564	2,511	2,426	2,370	2,571	2,598
5,00	2,621	2,542	2,490	2,439	2,383	2,532	2,565
5,50	2,599	2,521	2,469	2,452	2,395	2,495	2,533
6,00	2,578	2,500	2,449	2,465	2,408	2,458	2,502
6,50	2,556	2,480	2,429	2,478	2,421	2,423	2,472
7,00	2,536	2,460	2,409	2,491	2,434	2,388	2,443
7,50	2,515	2,440	2,390	2,505	2,447	2,355	2,414

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.72 Coordenadas de los vértices del polígono de vacíos.

Puntos	P _b (%)	G _{mb} (gr/cm ³)
1	5,95	2,463
2	6.30	2,436
3	6,62	2,424
4	7,10	2,437
5	6,45	2,477

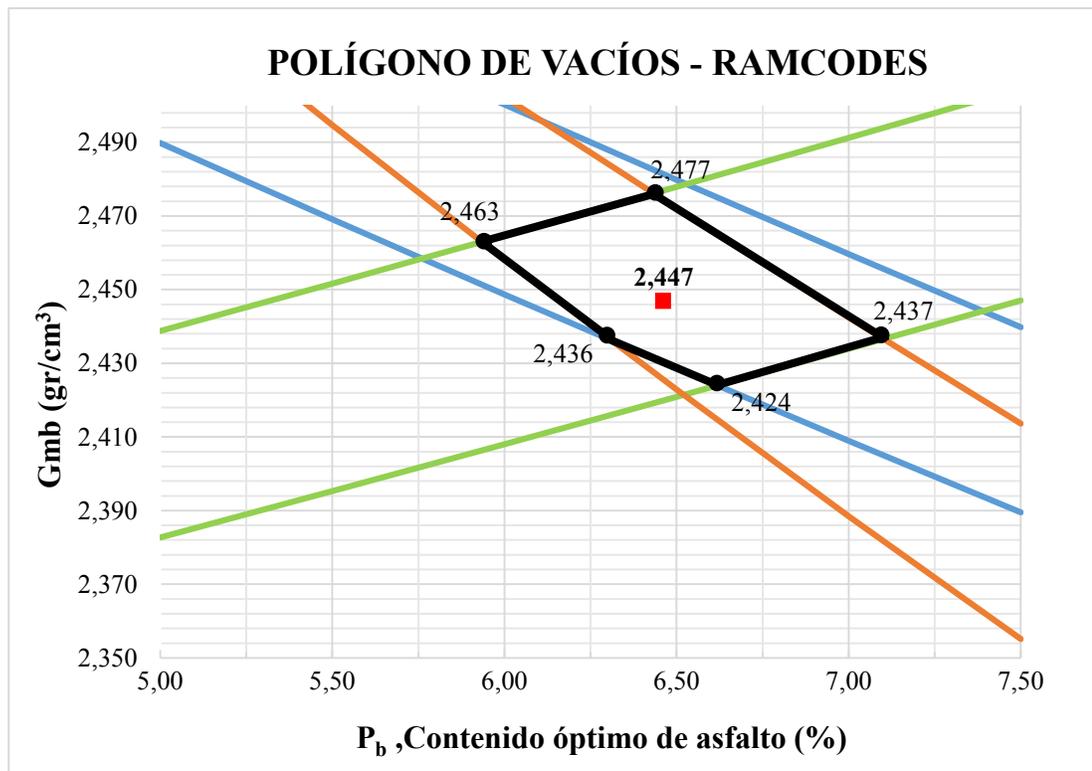
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.73 Coordenadas del centroide del polígono de vacíos.

Coordenadas centroide	
P _b (%)	6,48
G _{mb} (gr/cm ³)	2,447

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.21 Polígono de vacíos RAMCODES muestra N°6.



Fuente: Elaboración propia

4.7.7 Comparación de resultados obtenidos mediante el uso del software polígono de vacíos RAMCODES y la elaboración propia del polígono de vacíos RAMCODES

Tabla 4.74 Comparación de resultados de valores de contenidos óptimos de asfalto.

Identificación	Software polígono de vacíos RAMCODES	Polígono de vacíos RAMCODES elaboración propia
Muestra	Contenido óptimo de asfalto	Contenido óptimo de asfalto
N.º	P _b (%)	P _b (%)
1	5,19	5,20
2	5,45	5,45
3	5,68	5,69
4	5,95	5,95
5	6,21	6,22
6	6,48	6,48

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de resultados:

Al tomar en cuenta los resultados obtenidos mediante el Software de la metodología RAMCODES y la elaboración del polígono de vacíos RAMCODES elaborado por una hoja de cálculo de Excel, los resultados son similares, variando con decimales los resultados.

Para la comprobación de la metodología RAMCODES se tomarán en cuenta los resultados obtenidos por el Software RAMODES para tener valores más conservadores, ya que el software utilizado fue adquirido por tal motivo para poder realizar la comparación de resultados más precisos, para realizar posteriormente la comparación con la metodología Marshall.

4.8 Comprobación de la metodología RAMCODES

Luego de realizar los cálculos por el polígono de vacíos, por recomendación del autor de esta metodología se elaboró un total de tres especímenes hermanos con igual energía y método de compactación, mezclando con el contenido de asfalto óptimo del polígono de vacíos por mezcla analizada y cuyo valor se promedió de cada una de las propiedades.

Los ensayos se realizaron conforme el procedimiento indicado en ASTM D-1559.

4.8.1 Dosificación de la mezcla asfáltica convencional 85-100 por la metodología RAMCODES

Se diseñaron 3 briquetas por cada contenido óptimo de cemento asfáltico, resultado del polígono de vacíos para cual tenemos la siguiente dosificación:

Tabla 4.75 Dosificación de la mezcla convencional 85-100 metodología RAMCODES.

Porcentaje de asfalto (%)	5,19%	5,45%	5,68%	5,95%	6,21%	6,48%
Porcentaje de agregado (%)	94,8%	94,6%	94,3%	94,1%	93,8%	93,5%
Peso de cemento asfáltico (gr)	62,28	65,40	68,16	71,40	74,52	77,76
Grava (gr)	307,18	306,34	305,60	304,72	303,88	303,00
Gravilla (gr)	318,56	317,69	316,92	316,01	315,13	314,23
Arena (gr)	455,09	453,84	452,74	451,44	450,19	448,90
Filler (gr)	56,89	56,73	56,59	56,43	56,27	56,11
Peso total de la briqueta (gr)	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia.

4.9 Resultados del diseño de la mezcla asfáltica convencional 85-100 diseñada por la metodología RAMCODES

Tabla 4.76 Datos obtenidos del ensayo Marshall de mezclas asfálticas con porcentajes óptimos de cemento asfáltico obtenidos mediante la metodología RAMCODES.

% De asfalto	Identificación	Altura promedio (cm)	Peso seco al aire (gr)	Peso saturado superficialmente seco (gr)	Peso sumergido en agua (gr)	Lectura dial estabilidad (Lb)	Lectura dial fluencia (1/100")
5,19	1	6,65	1197,8	1198,9	686	2030	13
	2	6,58	1170,2	1171,8	674	2045	12
	3	6,50	1206,7	1207,7	690	2043	12
5,45	1	6,50	1183,0	1184,3	682,5	2130	14
	2	6,37	1171,3	1172,4	678,5	2115	13
	3	6,35	1186,4	1188,0	669,5	2130	13
5,68	1	6,41	1176,4	1177,6	673	2228	13
	2	6,32	1181,9	1182,6	668,5	2215	14
	3	6,41	1163,3	1164,8	675,5	2195	13
5,95	1	6,37	1186,6	1187,5	678,5	2238	14
	2	6,49	1210,0	1211,0	685,5	2130	13
	3	6,23	1198,2	1199,1	686,5	2126	14
6,21	1	6,37	1181,7	1182,2	670,5	2088	13
	2	6,45	1192,8	1193,4	672,5	2095	13
	3	6,31	1180,1	1181,5	673	2070	14
6,48	1	6,23	1183,7	1184,4	675,5	1895	13
	2	6,33	1174,0	1175,1	664	1892	13
	3	6,42	1194,6	1195,9	664,5	1885	12

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.77 Resultados de las mezclas asfálticas con porcentaje óptimo de asfalto obtenido de la metodología RAMCODES.

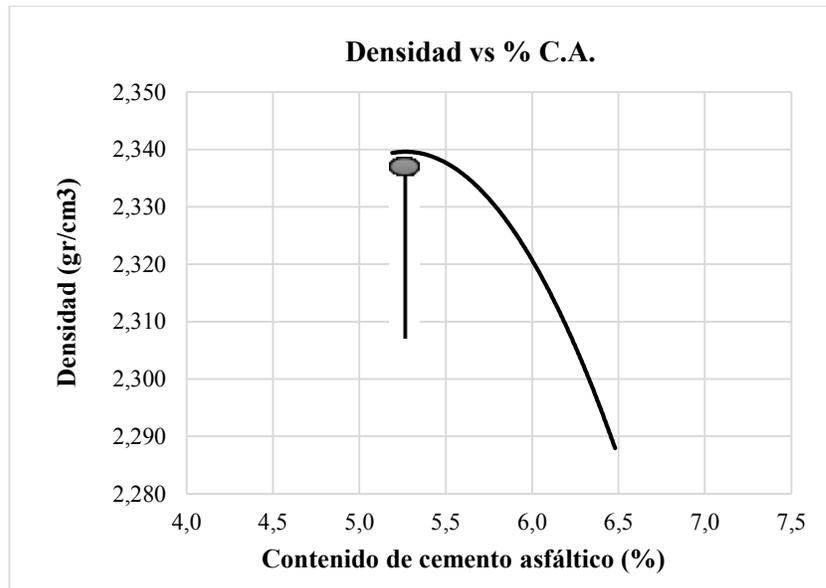
% De asfalto	Identificación	Altura promedio (cm)	densidad real promedio (gr/cm ³)	% Vacíos en la mezcla (Vv)	% Vacíos de agregado mineral (V.A.M.)	Estabilidad corregida promedio (Lb)	Fluencia promedio (1/100)
5,19	1	6,65	2,34	4,75	16,77	1933	12,33
	2	6,58					
	3	6,50					
5,45	1	6,50	2,34	4,34	16,96	2095	13,33
	2	6,37					
	3	6,35					
5,68	1	6,41	2,34	4,14	17,28	2196	13,33
	2	6,32					
	3	6,41					
5,95	1	6,37	2,32	4,25	17,94	2159	13,66
	2	6,49					
	3	6,23					
6,21	1	6,37	2,30	4,72	18,88	2071	13,33
	2	6,45					
	3	6,31					
6,48	1	6,23	2,29	4,89	19,58	1903	12,66
	2	6,33					
	3	6,42					

Fuente: Elaboración propia.

Obtenido todos los valores se procedió a dibujar las curvas correspondientes a las siguientes relaciones.

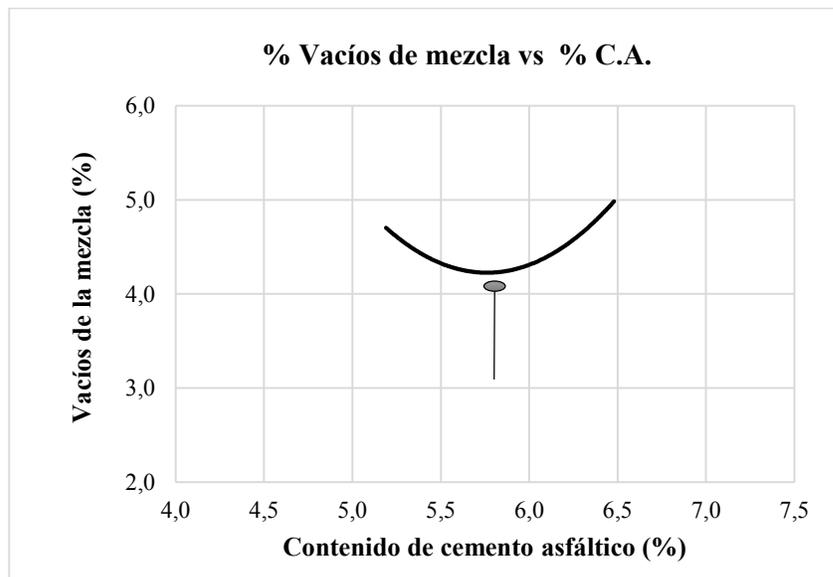
- Porcentaje de cemento asfáltico (C.A) vs. Densidad de la briqueta.
- Porcentaje de cemento asfáltico (C.A) vs. Porcentaje de vacíos en aire con respecto a la mezcla total.
- Porcentaje de cemento asfáltico (C.A) vs. Vacíos de agregado mineral (V.A.M).
- Porcentaje de cemento asfáltico (C.A) vs. Estabilidad corregida.
- Porcentaje de cemento asfáltico (C.A) vs Fluencia (flujo).

Gráfico 4.22 Porcentaje de cemento asfáltico (C.A) vs. Densidad de la briqueta.



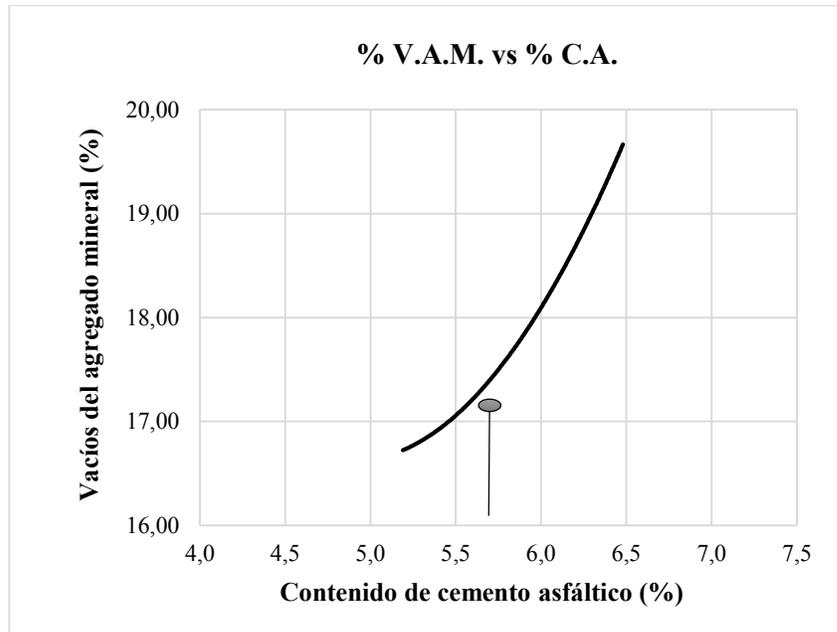
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.23 Porcentaje de cemento asfáltico (C.A) vs. Porcentaje de vacíos en aire con respecto a la mezcla total.



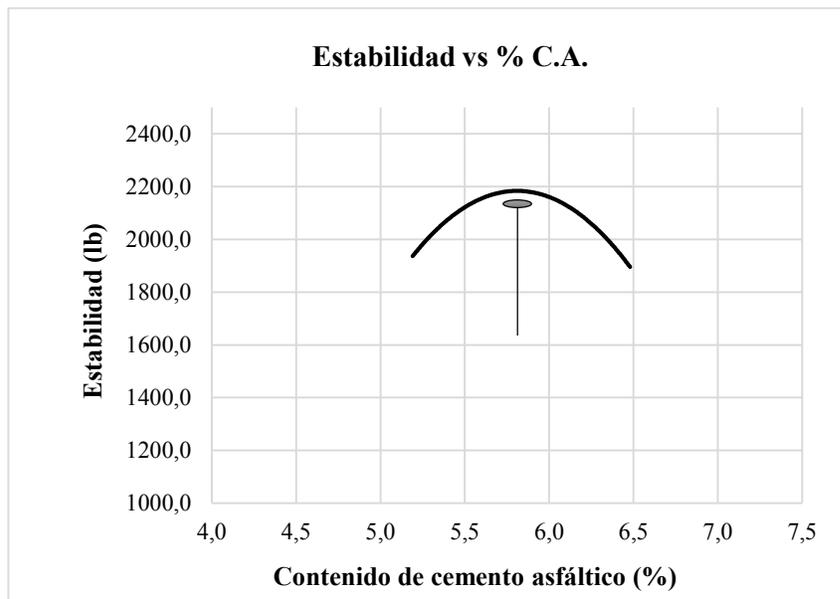
Fuente: Elaboración Propia.

Gráfico 4.24 Porcentaje de cemento asfáltico (C.A) vs. Vacíos del agregado mineral (V.A.M).



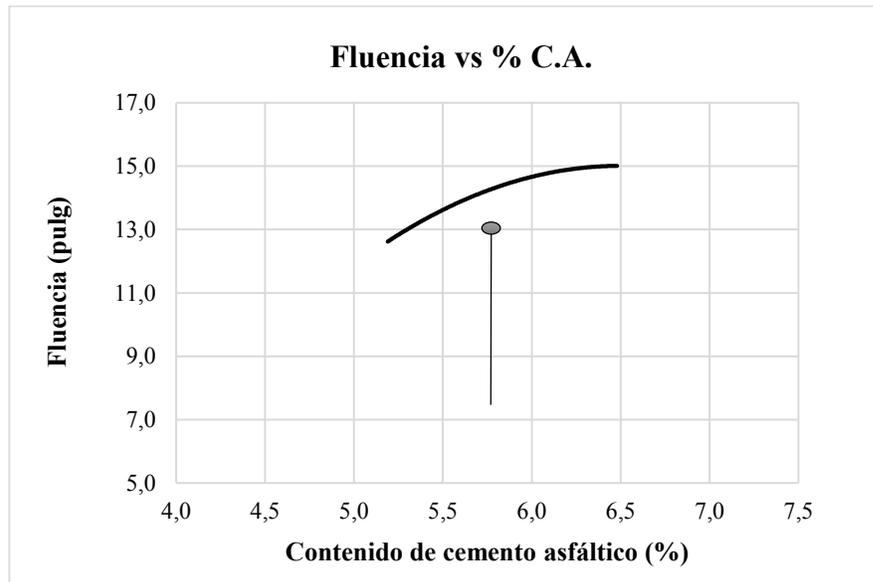
Fuente: Elaboración Propia.

Gráfico 4.25 Porcentaje de cemento asfáltico (C.A) vs. Estabilidad corregida.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.26 Porcentaje de cemento asfáltico (C.A) vs Fluencia (flujo).



Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo a las gráficas obtenidas se tiene:

Tabla 4.78 Resultados de las gráficas del ensayo Marshall para el contenido óptimo de la metodología RAMCODES.

Valores				
Características	% De asfalto	Obtenidos de gráficos	Especificaciones técnicas	
			Mínima	Máxima
Densidad	5,27	2,34	-	-
% De vacíos	5,94	4,27	3	5
V.A.M	5,86	14,98	13	-
Estabilidad	5,87	2183,28	>1800 (75 golpes)	
Fluencia	5,75	13,25	8	14
Promedio (%)	5,67	Determinación del contenido óptimo de asfalto promedio de las graficas		

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 4.79 Datos del ensayo Marshall para el contenido óptimo de asfalto de la mezcla convencional obtenido por la metodología RAMCODES.

% De asfalto	Identificación	Altura promedio (cm)	Peso seco al aire (gr)	Peso saturado superficialmente seco (gr)	Peso sumergido en agua (gr)	Lectura dial estabilidad (Lb)	Lectura dial fluencia (1/100")
5,68	1	6,41	1176,4	1177,6	673	2228	13
	2	6,32	1181,9	1182,6	668,5	2215	14
	3	6,41	1163,3	1164,8	675,5	2195	13

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.80 Resultado del ensayo Marshall del contenido óptimo de asfalto de la mezcla convencional obtenido por la metodología RAMCODES.

% De asfalto	Identificación	Altura promedio (cm)	densidad real promedio (gr/cm ³)	% Vacíos en la mezcla (Vv)	% Vacíos de agregado mineral (V.A.M.)	Estabilidad corregida promedio (Lb)	Fluencia promedio (1/100")
5,68	1	6,41	2,34	4,14	17,28	2196	13,33
	2	6,32					
	3	6,41					

Fuente: Elaboración propia.

4.10 Tratamiento estadístico de los resultados

Tenido los resultados de la estabilidad y la fluencia provenientes del ensayo Marshall, para las dos metodologías de diseño como son las metodologías Marshall y RAMCODES, se procede a evaluar el comportamiento estadístico de los mismos.

Tabla 4.81 Resumen de resultados de estabilidad y fluencia de las mezclas asfálticas con 5,71 % de contenido óptimo de asfalto obtenido por el método Marshall.

Descripción	Estabilidad (lb)	Fluencia (1/100")
1	1751,72	11,00
2	1967,07	8,00
3	1911,00	8,00
4	1840,41	10,00
5	1980,00	10,00
6	1975,35	8,00
7	2031,48	8,00
8	2096,64	14,00
9	2111,76	10,00
10	1881,71	13,00
11	1947,37	11,00
12	1849,00	12,00
13	1813,00	14,00
14	1768,29	12,00
15	1784,33	17,00
16	1571,47	19,00
17	1406,93	22,00
18	1552,20	18,00
19	1824,08	13,00
20	2091,76	8,00
21	2110,88	10,00
22	1840,41	8,00
23	1980,00	17,00
24	1975,35	11,00
25	2031,48	13,00
26	2096,64	11,00
27	2111,76	9,00
28	1881,71	9,00
29	1947,37	12,00
30	1849,00	14,00
31	1813,00	8,00
32	1768,29	8,00
33	1784,33	20,00
34	1571,47	12,00
35	1406,93	15,00
Error probable (Ep)	189,19	3,79
Valor máximo (M+Ep)	2111,76	22,00
Valor mínimo (M-Ep)	1406,93	8,00
Media	1866,40	12,09

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.82 Resumen de resultados de estabilidad y fluencia de las mezclas asfálticas con 5,68% de contenido óptimo de asfalto obtenido por la metodología RAMCODES.

Descripción	Estabilidad (lb)	Fluencia (1/100")
1	2030,00	13,00
2	2045,00	12,00
3	2043,00	12,00
4	2130,00	14,00
5	2115,00	13,00
6	2130,00	13,00
7	2228,00	13,00
8	2215,00	14,00
9	2195,00	13,00
10	2238,00	14,00
11	2130,00	13,00
12	2126,00	14,00
13	2088,00	13,00
14	2095,00	13,00
15	2070,00	14,00
16	1895,00	13,00
17	1892,00	13,00
18	1885,00	12,00
Error probable Ep	108,89	0,68
Valor máximo (M+Ep)	2238,00	14,00
Valor mínimo (M-Ep)	1885,00	12,00
Media	2086,11	13,11

Fuente: Elaboración propia.

4.11 Análisis del tratamiento estadístico de los resultados

Como los resultados son muy próximos entre la media y los cálculos, además teniendo en cuenta que se tiene treinta cinco datos para el porcentaje óptimo, y ver que los valores son similares se asumirá la media aritmética para continuar con el control y la evaluación de los resultados de la Estabilidad y la Fluencia de las mezclas asfálticas.

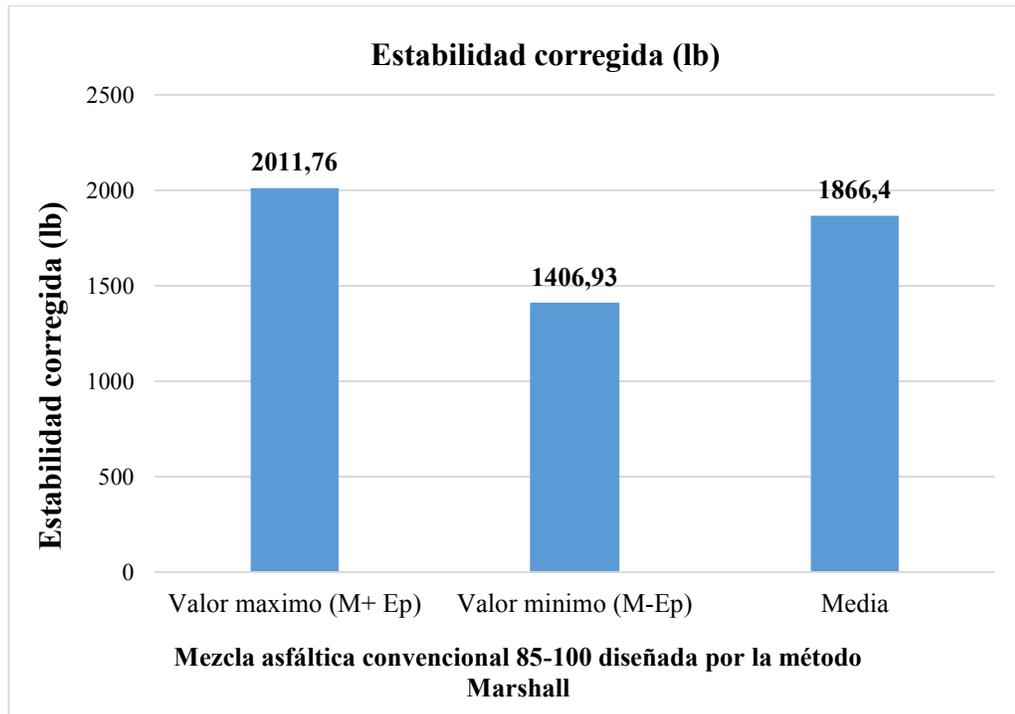
Tabla 4.83 Resultados de la evaluación de la estabilidad y la fluencia obtenida de la estadística.

N.º	Descripción	Estabilidad corregida (lb)	Fluencia (1/100 ^{''})
1	Mezcla asfáltica convencional 85-100 con 5,71 % de asfalto óptimo diseñada por el método Marshall.	1866,40	12,09
2	Mezcla asfáltica convencional 85-100 con 5,68 % de asfalto óptimo diseñada por la metodología RAMCODES.	2086,11	13,11

Fuente: Elaboración propia.

4.11.1 Estabilidad vs. Mezcla asfáltica convencional con 5,71% de asfalto óptimo - Método Marshall

Gráfico 4.27 Evaluación de estabildades para el método Marshall.



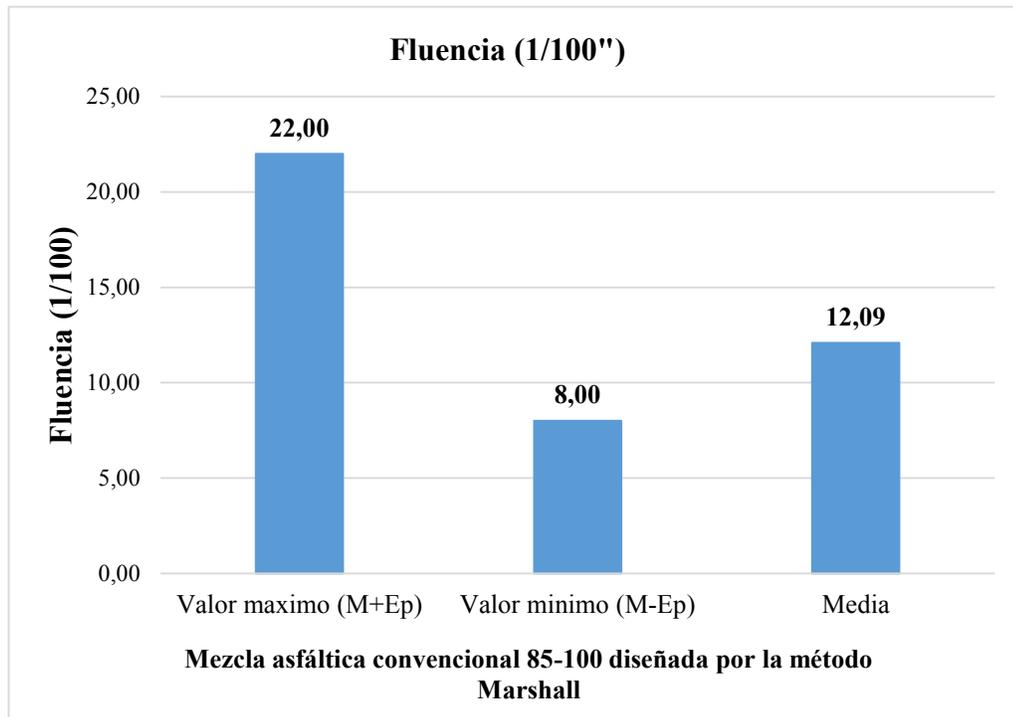
Fuente: Elaboración propia.

Análisis de resultados:

Observando la gráfica apreciamos que la estabilidad de la mezcla asfáltica convencional 85-100 con 5,71% de asfalto óptimo diseñadas por la Metodología Marshall se encuentra dentro de los parámetros de la misma norma, es decir se puede notar que la estabilidad es mayor a 1800 lb, que es el valor mínimo de estabilidad para tránsito pesado, establecido por la norma para el diseño de mezclas asfálticas por el método Marshall.

4.11.2 Fluencia vs. Mezcla Asfáltica convencional con 5,71% de asfalto óptimo - Método Marshall

Gráfico 4.28 Evaluación de la fluencia para el método Marshall.



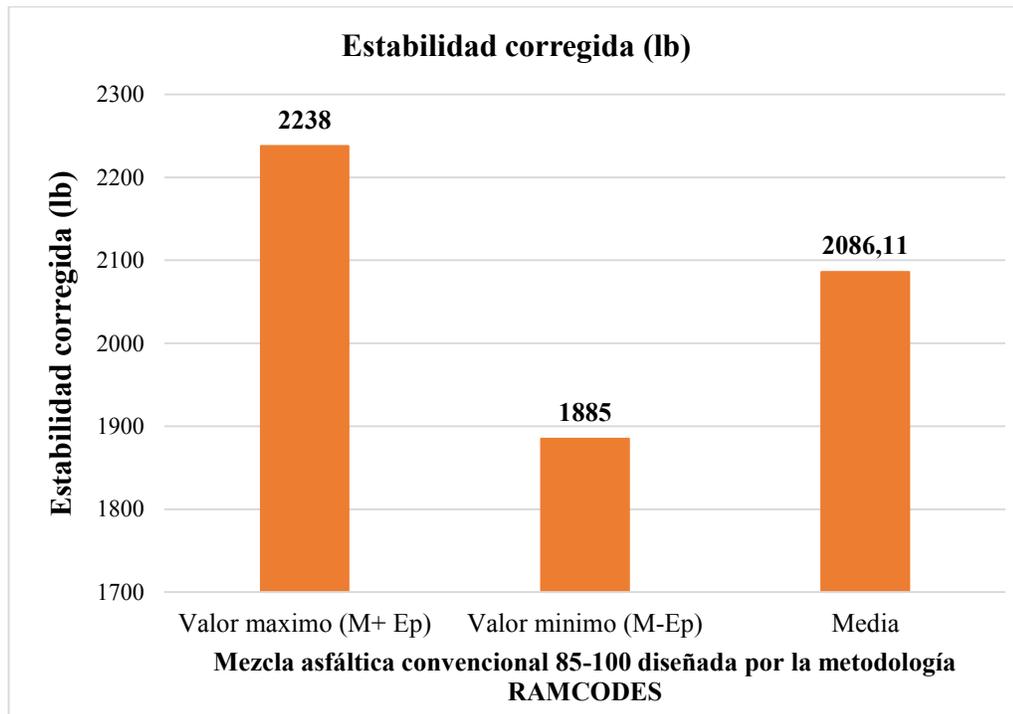
Fuente: Elaboración propia.

Análisis de resultados:

La fluencia cumple en el valor mínimo y en la media, teniendo como valor mínimo 8 ya que es el valor mínimo permitido por la normal Marshall, también se puede notar que el valor de la media es 12,09 que cumple al no pasar el límite dado por la norma del diseño de mezclas asfálticas por el método Marshall.

4.11.3 Estabilidad vs. Mezcla asfáltica convencional con 5,68% de asfalto óptimo - Metodología RAMCODES

Gráfico 4.29 Evaluación de estabildades para la metodología RAMCODES.



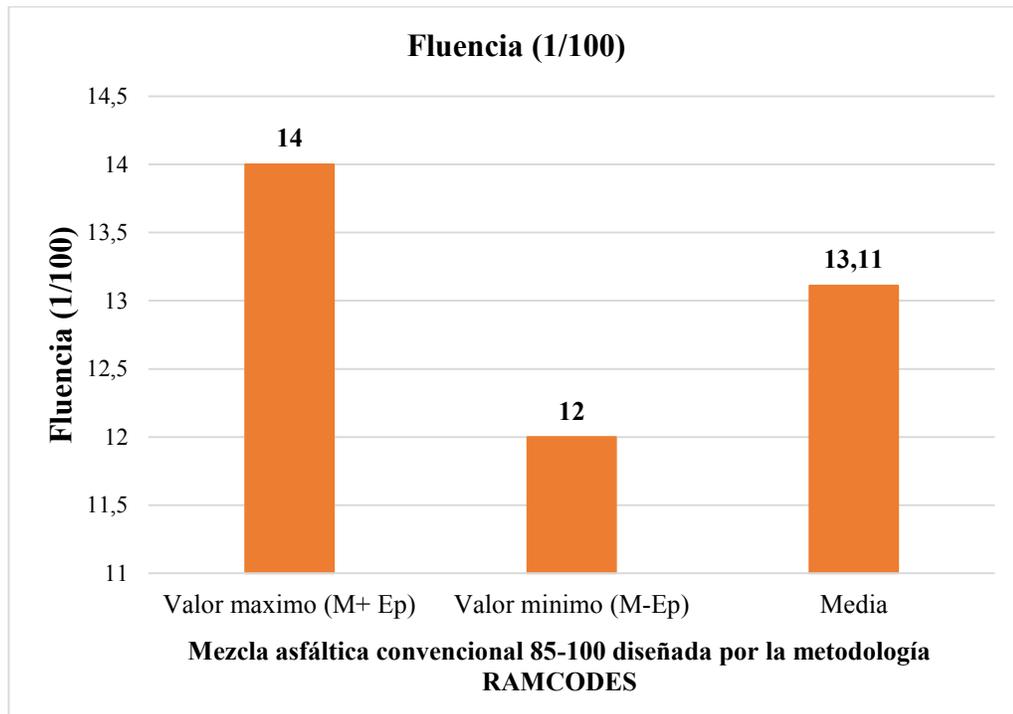
Fuente: Elaboración propia.

Análisis de resultados:

Observando la gráfica apreciamos que la estabilidad de la mezcla asfáltica convencional 85-100 con 5,68% de asfalto óptimo diseñadas por la Metodología RAMCODES se encuentra dentro de los parámetros de la misma norma, es decir se puede notar que la estabilidad es mayor a 1800 lb, que es el valor mínimo de estabilidad para tránsito pesado, establecido por la norma para el diseño de mezclas asfálticas por el método Marshall.

4.11.4 Fluencia vs. Mezcla Asfáltica convencional con 5,68% de asfalto óptimo - Metodología RAMCODES

Gráfico 4.30 Evaluación de la fluencia por la metodología RAMCODES.



Fuente: Elaboración propia.

Análisis de resultados:

La fluencia cumple en el valor mínimo y en la media, teniendo como valor mínimo 12, también se puede notar que el valor de la media es 13,11 que cumple al no pasar el límite dado por la norma del diseño de mezclas asfálticas por el método Marshall.

4.12 Comparación de la estabilidad y la fluencia de las mezclas asfálticas convencionales con el contenido óptimo de asfalto dado por las metodologías Marshall y RAMCODES

Se evaluarán las dos metodologías de diseño haciendo una comparación de ambas metodologías en sus propiedades mecánicas como ser la estabilidad y la fluencia.

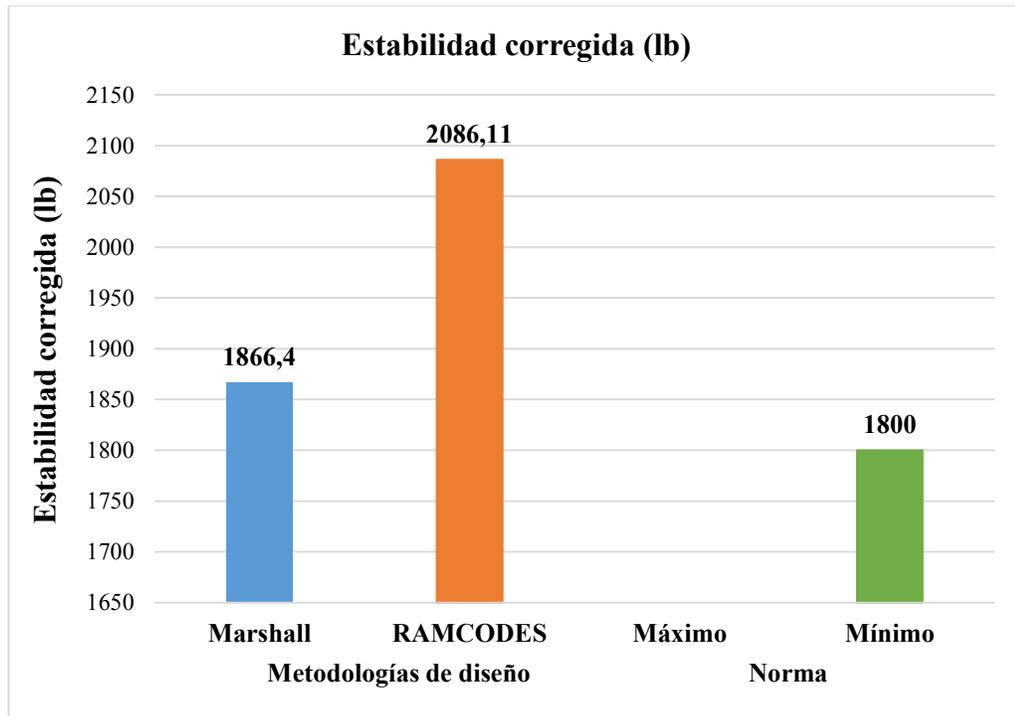
Tabla 4.84 Estabilidad y fluencia de las mezclas asfálticas convencional 85-100.

Nº	Descripción	Estabilidad corregida (lb)	Fluencia (1/100'')
1	Mezcla asfáltica convencional 85-100 con 5,71% de asfalto óptimo diseñada por el método Marshall.	1866,40	12,09
2	Mezcla asfáltica convencional 85-100 con 5,68% de asfalto óptimo diseñada por la metodología RAMCODES.	2086,11	13,11
3	Máximo permitido por la norma para el diseño Marshall.	-	14
4	Mínimo permitido por la norma para el diseño Marshall.	1800	8

Fuente: Elaboración propia.

4.12.1 Estabilidad vs. Porcentaje óptimo de la mezcla asfáltica convencional

Gráfico 4.31 Estabilidad obtenidas por la metodología Marshall y RAMCODES.



Fuente: Elaboracion propia.

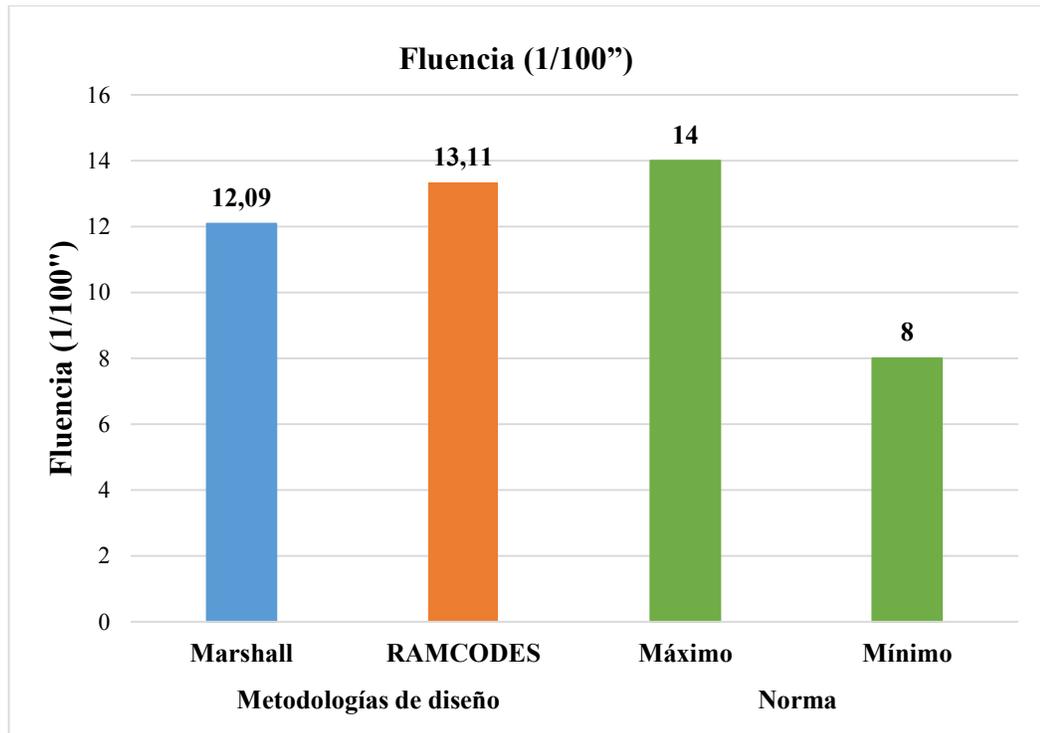
Análisis de resultados:

Se puede observar que ambas metodologías de diseños valores de la estabilidad se encuentran en el rango de las especificaciones de la norma Marshall.

También se puede evidenciar que en la metodología RAMCODES la estabilidad es de 2086,11 lb superando a la metodología Marshall, esto se puede deducir que la metodología RAMCODES obtiene mejores valores en estabilidad que la metodología Marshall.

4.12.2 Fluencia vs. Porcentaje óptimo de la mezcla asfáltica convencional

Gráfico 4.32 Fluencias obtenidas de las metodologías de diseño de mezclas asfálticas Marshall y RAMCODES.



Fuente: Elaboracion propia.

Análisis de resultados:

Se puede observar que ambas metodologías cumplen las especificaciones de la norma de diseño de mezclas, la metodología Marshall se encuentra dentro de las especificaciones pero se puede apreciar que es menor la fluencia que la metodología RAMCODES.

4.13 Validación de hipótesis

Dentro la presente investigación se presenta la siguiente hipótesis:

“Aplicando la metodología RAMCODES en el diseño de mezclas asfálticas en caliente y densas se obtienen mejores resultados de Estabilidad y fluencia”.

Distribución normal: Se realizará la prueba de hipótesis con la distribución normal por contar con 35 datos de estudio y se tomará solo la estabilidad para la validación de hipótesis.

Datos:

n= 18 briquetas

\bar{x} = 2086,11 lb.

S=108,88 lb.

u=1800 lb (por norma)

NC= 95% =0,95

Ho= hipótesis nula

H1= hipótesis alternativa

Tabla 4.85 Generando la hipótesis.

Ho	H1
\leq	$>$

Ho	$\bar{x} > \mu$	2020,37 > 1800 lb
H1	$\bar{x} \leq \mu$	2020,37 \leq 1800 lb.

Fuente: Elaboración propia.

Determinar el nivel de significancia:

$$NC + \alpha = 1$$

$$0,95 + \alpha = 1$$

$$\alpha = 1 - 0,95$$

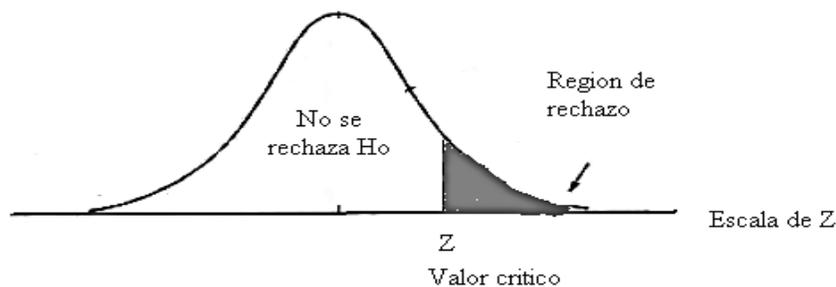
$\alpha = 0,05$ es el riesgo del 5% que no ocurra la hipótesis.

$$\alpha = \frac{0,05}{2} = 0,025$$

$$\text{Valor de ingreso de tabla} = 0,95 + 0,025 = 0,975$$

Ahora con los valores calculados de 0,975 se obtendrá por tabla los valores de Z correspondiente al 95% de confianza que es de $Z = 1,96$.

Figura 4.10 Formulación de la regla de decisiones.



Leyenda: Por el nivel de significancia y la generación de la hipótesis nuestra grafica tendra solo una región de rechazo ubicado a la derecha del grafico.

Fuente: Prueba de hipótesis para una muestra- Monografías.

Tabla 4.86 Resultados de Z.

Error poblacional	$G = \frac{S}{\sqrt{n}}$	$G = 25,66$
Z_c	$Z_c = \frac{\bar{x} - \mu}{G/\sqrt{n}}$	$Z_c = 2,63$

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones:

Observando el valor obtenido por la tabla Z y el valor calculado de Z_c , se puede verificar que el valor de Z_c se encuentra dentro de los rangos de la region de rechazo por lo que la hipotesis nula es rechazada y se acepta la hipotesis alternativa.

Al terminar el analisis de resultados se puede verificar que la hipotesis es valida ya que los resultados obtenidos de la estabilidad del diseño de mezclas asfálticas por la metodologia RAMCODES tienen mejores resultados que el Método Marshall.

4.14 Especificaciones técnicas

El diseño de mezclas asfálticas como todo diseño ingenieril debe ser tomado con el grado de responsabilidad e importancia necesaria, esto implica el conocimiento y cumplimiento de los procedimientos estandarizados, así como también un grado de experiencia sobre el comportamiento de cada uno de los componentes que lo conforman.

Las especificaciones técnicas que se llevaron a cabo por ambas metodologías de diseño de mezclas asfálticas son las siguientes:

4.14.1 Metodología Marshall

Caracterización de Agregados: En primer lugar, se debe establecer la caracterización de los materiales pétreos como ser el agregado grueso que son la grava 3/4", la grava 3/8" llamada también gravilla y el agregado fino como ser la arena.

La parte primordial de la caracterización es la obtención de la granulometría de los agregados ya que de estos dependerán la granulometría formada para el diseño Marshall, en esta investigación se utilizó una granulometría densa.

Para la caracterización de los agregados se llevaron a cabo cada ensayo siguiendo la norma ASTM en la siguiente tabla se puede evidenciar los resultados obtenidos y que se encuentran dentro de las especificación mínima y máxima de la misma norma.

Caracterización del cemento asfáltico: Para la caracterización del cemento asfáltico se realizaron los ensayos basados en la norma ASTM, los valores obtenidos en los ensayos realizados al cemento asfáltico cumplieron. Se procedió a diseñar las mezclas asfálticas con el cemento 85-100.

Granulometría formada para el diseño Marshall: Después de haber realizado el ensayo de granulometría de agregados se procede a elaborar la granulometría diseñada para Marshall, en este caso se diseñó una granulometría densa, con los porcentajes de agregados como ser 27 % de grava, 28% de gravilla, 40 % de arena y 5% de filler natural.

Determinación del contenido óptimo de asfalto.- Para la determinación del contenido óptimo del cemento asfáltico se procede a realizar el diseño de 18 briquetas mediante el método Marshall, con porcentajes de diferentes de cemento asfáltico para conocer el porcentaje óptimo a utilizar.

Dosificación de briquetas: Para la dosificación de las briquetas se tomó en cuenta el cálculo mencionado anteriormente se fue variando los porcentajes, teniendo en total 18 briquetas.

Ensayo de estabilidad y fluencia: Una vez extraídas las briquetas de los moldes, se procede a realizar el ensayo de flujo y estabilidad en la prensa. Primero se debe medir con un vernier las alturas en cuatro puntos de la biqueta y de esta manera determinar su altura media que será corregida mediante un factor de corrección.

Antes de realizar el ensayo las briquetas se deben pesar en seco, saturado superficialmente seco y sumergido en agua, antes de su ruptura debe ser sumergidas en baño de agua a $60^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ durante un tiempo no inferior a 30 minutos ni mayor a 40 minutos.

Se limpian perfectamente las superficies interiores de las mordazas. La temperatura de las mismas se debe mantener entre 21°C y 38°C . Si es inferior, deberán calentarse en baño de agua hasta alcanzar la temperatura indicada. Se debe verificar previamente a la

aplicación de la carga que es indicador del dial del anillo de carga se encuentre en la posición correspondiente a cero.

Cálculo del porcentaje óptimo de asfalto: Para el cálculo del contenido óptimo de asfalto se procede a utilizar la hoja excel de la metodología Marshall, con todos los datos obtenidos en laboratorio, además se realiza la corrección de la estabilidad y se generan las graficas según las ecuaciones dadas. El resultado del contenido óptimo esta dado por las graficas obtenidas. Teniendo el resultado de las graficas se procedio a diseñar 35 briquetas con el mismo contenido optimo de asfalto para luego realizar un analisis de las 35 briquetas.

4.14.2 Metodología RAMCODES

Para el diseño de mezclas asfálticas en caliente y densas por la metodología RAMCODES se deben seguir los siguientes pasos:

Agregados: Se utilizan los mismos agregados pétreos que la metodología Marshall.

Cemento asfáltico: Se utiliza el mismo cemento asfáltico que la metodología Marshall.

Granulometría: Para la granulometría se diseñó con la misma granulometría Marshall, el cual tiene una dosificación de 27% de grava, 28% de gravilla, 40% de arena y 5% de filler natural.

Ensayo RICE: Se realiza 6 ensayos rice tomando en cuenta para cada mezcla ensayada el valor del porcentaje de asfalto de 4,5%, 5% ,5,5%, 6%,6,5% y 7 %. Se tiene los siguientes resultados.

Para realizar este ensayo se debe tomar en cuenta la temperatura del agua destilada al momento de acabar el ensayo ya que si el valor no está en rango de 22 a 27°C se tiene que volver a realizar el ensayo. El ensayo consiste en aplicar vacío a una muestra dada por 10 minutos según la norma. Consiste en sacar todos los vacíos del agregado para así tener el resultado de la gravedad máxima teórica de una mezcla sin compactar.

Cálculo de las gravedades específicas: De acuerdo a los 6 ensayos RICE realizados se procedió a sacar los cálculos para la gravedad específica máxima sin compactar (G_{mm}), y luego con ese valor se procedió a sacar la gravedad específica efectiva del agregado (G_{se}), como también la gravedad específica neta de la combinación final de los agregados (G_{sb}).

Determinación del contenido óptimo: Para la determinación del contenido óptimo se utiliza el polígono de vacíos, el cual consiste en crear isocurvas de vacíos, las mismas que se entrelazan y crean vértices o puntos del polígono, si la combinación es la adecuada el valor del contenido óptimo de cemento asfáltico está en el centroide de dicho polígono.

Comprobación de la metodología RAMCODES: Para la comprobación de la metodología RAMCODES recomendada por el autor de la misma Freddy J. Sanchez Leal se debe realizar 3 briquetas con el mismo contenido óptimo de asfalto.

Resultados de la metodología RAMCODES: Las 16 briquetas se elaboraron y se determinaron sus propiedades mecánicas siguiendo la norma Marshall la cual se siguió el mismo procedimiento de cálculo y se obtuvo los resultados mediante la gráfica y nos dio un resultado de 5,67 % óptimo de asfalto. Se puede evidenciar que la metodología RAMCODES en el cálculo del polígono de vacíos se asemeja mucho a la metodología Marshall en la obtención del contenido óptimo y de las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica.

4.15 Análisis de los costos de mezclas asfálticas

Es preciso tener en cuenta que el costo de producción es uno de los indicadores más importantes a considerar en los proyectos de ingeniería. Por lo tanto, mientras más eficiente sea la labor de estas, menos recursos se invertirán en su producción y por consiguiente, menor será la cuantía de los gastos. El costo de producción debe establecerse en el aprovechamiento de los recursos de los materiales, labores y financieros en el proceso de producción porque estos determinan el nivel de ganancia que obtiene la organización.

Para el presente estudio, se analizan los costos de producción de las mezclas asfálticas diseñadas por las metodologías Marshall y RAMCODES.

- Carpeta asfáltica convencional 85-100 mezcla diseñada por el método Marshall.
- Carpeta asfáltica convencional 85-100 mezcla diseñada por la metodología RAMCODES.

4.15.1 Cálculos de costos para carpeta asfáltica convencional 85 - 100 mezcla diseñada por el método Marshall

1.-Cálculo de rendimientos

Datos:

Tipo de ligante asfáltico = Cemento asfáltico 85-100

Procedencia del agregado= Gobierno Autónomo Municipal de Tarija

Densidad de la mezcla= 2393 Kg/m³

Volumen de producción por m³

Unidad de producción = m³

Largo = 1 m

Ancho = 1m

Espesor = 5cm = 0,05 m

Volumen compactado = 1m * 1m * 0,05 = 0,05 m³

Determinación de cantidades según dosificación

Tabla 4.87 Cantidad total de asfalto y agregado para la mezcla asfáltica diseñada por el método Marshall.

Componente	Proporción en la mezcla (%)	Cantidad (Kg)
Asfalto 85-100	5,71	136,64
Agregado	94,29	152,30
Total	100	161,53

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.88 Cantidad total de cada tipo de agregado para la mezcla diseñada por el método Marshall.

Agregado	Proporción de diseño granulométrico (%)	Proporción en mezcla (%)	Cantidad (Kg)	Peso específico (%)	Volumen (m ³)
Grava	27,00	25,46	609,22	2.650	0,230
Gravilla	28,00	26,40	631,78	2.650	0,238
Arena	40,00	37,72	902,54	2.680	0,337
Filler	5,00	4,71	112,82	2.680	0,042
Total	100,00	94,29	2256,36	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Rendimiento para la producción de 1 m³ de carpeta asfáltica

Tabla 4.89 Rendimientos para una carpeta asfáltica convencional mezcla diseñada por el método Marshall.

Componente	Rendimiento	Unidad
Asfalto 85/100	136,64	Kg
Grava	0,230	m ³
Gravilla	0,238	m ³
Arena	0,337	m ³
Filler	0,042	m ³

Fuente: Elaboración propia.

2.- Planilla de precios unitarios

Con los rendimientos de los componentes de una mezcla asfáltica, de la maquinaria y la mano de obra, se procede a determinar la planilla de precios unitarios para un 1 m³ de mezcla compactada con un espesor de 5 cm, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4.90 Precios unitarios para una carpeta asfáltica convencional mezcla diseñada por el método Marshall.

Proyecto: "Comparación de la optimización entre las metodologías Marshall y RAMCODES en el diseño de mezclas asfálticas en caliente y densas"					
Actividad: Colocado de carpeta			Cantidad: 1		
Unidad: m ³			Moneda: Bolivianos		
A	MATERIALES	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
-	Cemento asfáltico 85/100	kg	136,64	11,00	1.502,49
-	Grava triturada clasificada 3/4"	m ³	0,230	120,00	27,60
-	Gravilla triturada clasificada 3/8"	m ³	0,238	130,00	30,94
-	Arena N°4	m ³	0,337	145,00	48,87
-	Filler	m ³	0,042	150,00	6,30
-	Gasolina	lt	0,85	3,74	3,18
D	TOTAL, MATERIALES			(A)	1.619,38
B	MANO DE OBRA				
-	Capataz	Hr	0,050	10,00	0,50
-	Operador de planta	Hr	0,085	9,00	0,77
-	Ayudante de planta	Hr	0,085	5,00	0,43
-	Operador de equipo liviano	Hr	0,075	8,00	0,60
-	Ayudante de maquinaria y equipo	Hr	0,075	4,50	0,34
-	Chofer	Hr	0,080	8,00	0,64
E	SUBTOTAL MANO DE OBRA			(B)	3,27
F	Cargas sociales	71,18%		(E)=	2,33
O	Impuestos al valor agregado	14,94%		(E+F) =	0,84
G	TOTAL, MANO DE OBRA			(E+F+O) =	6,43
C	EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
-	Terminadora de asfalto	Hr	0,0020	340,00	0,68
-	Cargador frontal de ruedas	Hr	0,0045	280,00	1,26
-	Compactador rodillo neumático	Hr	0,0090	220,00	1,98
-	Compactador rodillo liso	Hr	0,0400	250,00	10,00
-	Planta de concreto asfáltico	Hr	0,0050	1.250,00	6,25
-	Volquete 10 m ³	Hr	0,0700	150,00	10,50
	HERRAMIENTAS (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA)		5,00%	(G)	0,32
I	TOTAL, HERRAMIENTAS Y EQUIPOS			(C+H)	30,99
J	SUB TOTAL			(D+G+I)	1.654,24
L	GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS		16,00%	(J)	264,68
M	PARCIAL			(J+L)	1.918,92
N	UTILIDAD		10,00%	(M)	191,89
Q	TOTAL, PRECIO UNITARIO			(M+N)	2.110,81
	PRECIO FINAL				2.110,81

Fuente: Elaboración propia.

4.15.2 Cálculos de costos para carpeta asfáltica convencional 85-100 mezcla diseñada por la metodología RAMCODES

1.-Cálculo de rendimientos

Datos:

Tipo de ligante asfáltico = Cemento asfáltico 85-100

Procedencia del agregado= Gobierno Autónomo Municipal de Tarija

Densidad de la mezcla= 2396 Kg/m³

Volumen de producción por m³

Unidad de producción = m³

Largo = 1 m

Ancho = 1m

Espesor = 5cm = 0,05 m

Volumen compactado = 1m * 1m * 0,05 = 0,05 m³

Determinacion de cantidades según dosificación

Tabla 4.91 Cantidad total de cemento asfáltico y agregado para carpeta asfáltica convencional mezcla diseñada por la metodología RAMCODES.

Componente	Proporción en la mezcla (%)	Cantidad (Kg)
Asfalto 85-100	5,67	132,68
Agregado	94,33	148,99
Total	100	161,53

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.92 Cantidad total de cada tipo de agregado para carpeta asfáltica convencional mezcla diseñada por la metodología RAMCODES.

Agregado	Proporción de diseño granulométrico (%)	Proporción en mezcla (%)	Cantidad (Kg)	Peso específico (%)	Volumen (m ³)
Grava	27,0	25,47	595,98	2.650	0,225
Gravilla	28,0	26,41	618,05	2.650	0,233
Arena	40,0	37,73	882,93	2.680	0,329
Filler	5,0	4,72	110,37	2.680	0,041
Total	100	94,33	2207,32	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Rendimiento para la producción de 1 m³ de carpeta asfáltica.

Tabla 4.93 Rendimiento para una carpeta asfáltica convencional mezcla diseñada por la metodología RAMCODES.

Componente	Rendimiento	Unidad
Asfalto 85/100	132,7	Kg
Grava	0,225	m ³
Gravilla	0,233	m ³
Arena	0,329	m ³
Filler	0,041	m ³

Fuente: Elaboración propia.

2.- Planilla de precios unitarios

Con los rendimientos de los componentes de una mezcla asfáltica, de la maquinaria y la mano de obra, se procede a determinar la planilla de precios unitarios para un 1 m³ de mezcla compactada con un espesor de 5 cm, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4.94 Precios unitarios para una carpeta asfáltica convencional mezcla diseñada por la metodología RAMCODES.

Proyecto: "Comparación de la optimización entre las metodologías Marshall y RAMCODES en el diseño de mezclas asfálticas en caliente y densas"					
Actividad: Colocado de carpeta			Cantidad: 1		
Unidad: m ³			Moneda: Bolivianos		
A	MATERIALES	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
-	Cemento asfáltico 85/100	kg	132,70	11,00	1.459,17
-	Grava triturada clasificada 3/4"	m ³	0,225	120,00	27,00
-	Gravilla triturada clasificada 3/8"	m ³	0,233	130,00	30,29
-	Arena N°4	m ³	0,329	145,00	47,71
-	Filler	m ³	0,041	150,00	6,15
-	Gasolina	lt	0,85	3,74	3,18
D	TOTAL, MATERIALES			(A)	1.619,38
B	MANO DE OBRA				
-	Capataz	Hr	0,050	10,00	0,50
-	Operador de planta	Hr	0,085	9,00	0,77
-	Ayudante de planta	Hr	0,085	5,00	0,43
-	Operador de equipo liviano	Hr	0,075	8,00	0,60
-	Ayudante de maquinaria y equipo	Hr	0,075	4,50	0,34
-	Chofer	Hr	0,080	8,00	0,64
E	SUBTOTAL MANO DE OBRA			(B)	3,27
F	Cargas sociales	71,18%		(E)=	2,33
O	Impuestos al valor agregado	14,94%		(E+F) =	0,84
G	TOTAL, MANO DE OBRA			(E+F+O) =	6,43
C	EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
-	Terminadora de asfalto	Hr	0,0020	340,00	0,68
-	Cargador frontal de ruedas	Hr	0,0045	280,00	1,26
-	Compactador rodillo neumático	Hr	0,0090	220,00	1,98
-	Compactador rodillo liso	Hr	0,0400	250,00	10,00
-	Planta de concreto asfáltico	Hr	0,0050	1.250,00	6,25
-	Volquete 10 m ³	Hr	0,0700	150,00	10,50
	HERRAMIENTAS (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA)		5,00%	(G)	0,32
I	TOTAL, HERRAMIENTAS Y EQUIPOS			(C+H)	30,99
J	SUB TOTAL			(D+G+I)	1.610,91
L	GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS		16,00 %	(J)	257,75
M	PARCIAL			(J+L)	1.868,66
N	UTILIDAD		10,00%	(M)	186,87
Q	TOTAL, PRECIO UNITARIO			(M+N)	2.055,53
	PRECIO FINAL				2.055,53

Fuente: Elaboración propia.

4.15.3 Resultados finales de los costos de las carpetas asfálticas

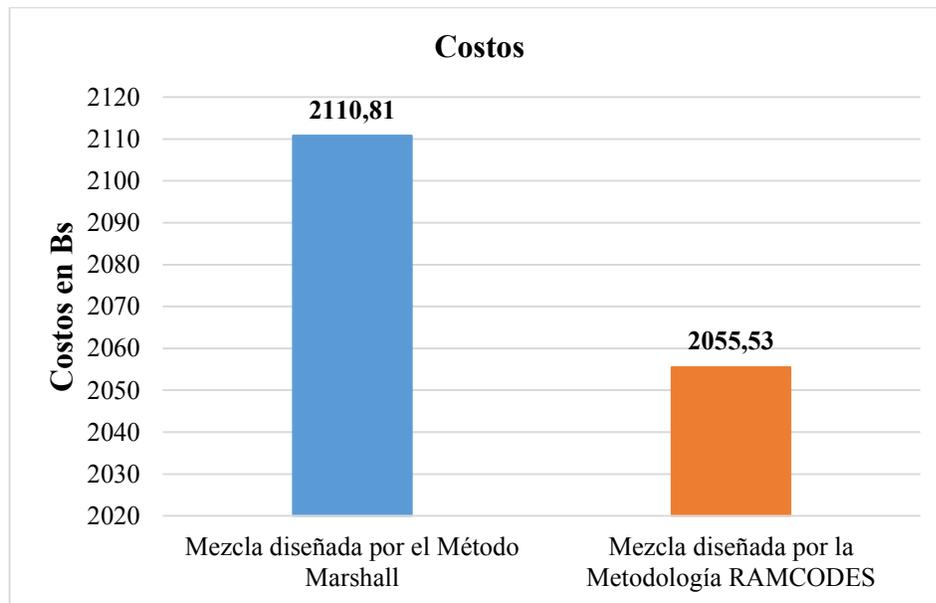
Tabla 4.95 Costos de producción.

Descripción	Precio total para 1 m ³ (Bs.)
Carpeta asfáltica convencional con asfalto 85-100 mezcla diseñada con el método Marshall	2.110,81
Carpeta asfáltica convencional con asfalto 85-100 mezcla diseñada con la metodología RAMCODES.	2.055,53

Fuente: Elaboración propia.

4.15.4 Análisis de resultados de los costos de las mezclas asfálticas

Gráfico 4.33 Costos de las mezclas asfálticas para un m³.



Fuente: Elaboracion propia.

Del siguiente grafico se puede apreciar que la carpeta asfáltica con la mezcla convencional 85 -100 diseñada por la metodología RAMCODES es más económica que la mezcla diseñada por el método Marshall.

4.16 Ventajas y desventajas de las metodologías Marshall y RAMCODES

Tabla 4.96 Ventajas y desventajas de las metodologías Marshall y RAMCODES.

Metodología	Ventajas	Desventajas
Marshall	<ul style="list-style-type: none"> • Es un ensayo estandarizado y normado. (ASTM D-1559) • Es el más utilizado para el diseño de mezclas asfálticas. • El método les da importancia a las propiedades densidad-vacíos. • El equipo requerido no es caro y portable. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se debe evaluar el cumplimiento de los requerimientos de vacíos, densidad, estabilidad y flujo, de no cumplirse algunas de ellas, se debe realizar ajustes o rediseñar la mezcla. • Al reajustarse o rediseñar la mezcla existe pérdida de tiempo y de recursos económicos. • No simula la densificación adicional de la mezcla que ocurre bajo tránsito en pavimento real. • Se deben realizar 18 especímenes o briquetas de cada mezcla ensayada.
RAMCODES	<ul style="list-style-type: none"> • El factor económico debido a la reducción de elaboración del número a tres especímenes o briquetas por cada mezcla ensayada, representa principalmente ahorro de tiempo en la obtención de resultados. • Es un método de diseño para conseguir la optimización y el uso racional de los materiales obteniendo productos más confiables y a menor costo. • Su herramienta el polígono de vacíos permite la obtención del contenido óptimo de asfalto de manera analítica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Al ser una nueva metodología en el país no se tiene mucho conocimiento de la misma. • La metodología no está normalizada. • No todos los laboratorios del país cuentan con el equipo para realizar el ensayo RICE.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Una vez terminada la investigación se tiene las siguientes conclusiones:

- La investigación cumplió con los objetivos planteados ya que se pudo realizar la comparación de ambas metodologías al realizar el diseño de las mezclas asfálticas convencionales 85-100.
- Los equipos utilizados para obtener la metodología RAMCODES prácticamente son los mismos utilizados por el método Marshall, debido a su comprobación que deben ser elaboradas y ensayadas siguiendo el procedimiento ASTM D-1559.
- Se realizó una hoja de cálculo de Excel aplicando las fórmulas de la metodología RAMCODES para la elaboración del polígono de vacíos la misma que fue comparada con el Software RAMCODES, los resultados de la hoja de cálculo Excel fueron aproximados con los obtenidos con el Software.
- En la obtención del contenido óptimo de asfalto la metodología Marshall tuvo como resultado el 5,71 % de contenido óptimo de asfalto para la mezcla asfáltica convencional, por su lado la metodología RAMCODES por medio de su herramienta estrella el polígono de vacíos se tuvo como resultado el valor de 5,68%, esto nos indica que la diferencia entre ambas metodologías al diseñar la mezcla asfáltica no es muy alejada la uno de la otra.
- El ahorro de tiempo en el diseño de la metodología RAMCODES es una ventaja muy importante, esto es debido al mínimo diseño de especímenes o briquetas que se deben elaborar para su comprobación.
- Los resultados de estabilidad de la mezcla asfáltica diseñada por el método Marshall fue de 1866,4 lb, para la metodología RAMCODES se obtuvo el resultado de estabilidad de la mezcla asfáltica de 2086,11 lb.

- Se pudo evidenciar la optimización de recursos económicos al comparar los costos de una carpeta asfáltica diseñada por la metodología RAMCODES con los costos de una carpeta diseñada por el método Marshall.
- La metodología RAMCODES es de gran utilidad al momento de diseñar mezclas asfálticas en caliente, ya que reduce el tiempo y costos de materiales, arrojando valores adecuados que cumplen con los parámetros de diseño estipulado en las especificaciones, tales como las propiedades volumétricas, estabilidad y flujo Marshall.

5.2 Recomendaciones

Una vez concluido el trabajo de investigación se tienen las siguientes recomendaciones:

- Se plantea como recomendación la utilización de la metodología RAMCODES ya sea como método independiente de diseño de mezclas asfálticas o como un complemento al diseño Marshall ya que esto permite desarrollar un mejor criterio para la elección del contenido óptimo de asfalto en la etapa de diseño.
- Se propone el polígono de vacíos RAMCODES como una herramienta no solo para proyectistas de mezclas asfálticas, sino también para investigadores, ya que es una metodología que optimiza el tiempo, recursos y establece resultados favorables al momento de su utilización.
- Se debe seguir lo expuesto en la norma AASHTO y ASTM, que es la guía para el diseño de las mezclas asfálticas en caliente, ensayos de los agregados y el cemento asfáltico.
- Para facilitar la trabajabilidad al momento de realizar las briquetas, se debe realizar un pesado previo de los agregados a utilizar en su fabricación y separarlas en recipientes, facilitando el mezclado.
- Se deberá realizar las mediciones cuidadosamente de los pesos de las muestras a diseñarse, de manera que pueda ser más exacto en el diseño para hallar el porcentaje óptimo.
- Evitar el enfriamiento de la mezcla asfáltica en la etapa de moldeo, para no obtener resultados alterados.

- Golpear el martillo compactador a una velocidad y altura constante debido a que el ensayo Marshall es una práctica demasiado cuidadosa por lo tal a un pequeño error puede hacer fallar los resultados.
- Evitar sobrecalentar varias veces el cemento asfáltico debido a que pierde sus propiedades, por lo que se debe calentar el material solo al momento de realizar los ensayos.
- Tener cuidado durante el proceso de medición y obtención de datos para que se pueda verificar si cumplen los parámetros establecidos.
- Para la elaboración de la mezcla asfáltica se debe contar con los equipos de protección adecuados, debido a que se trabaja a altas temperaturas.
- Al realizar el ensayo RICE se debe tomar en cuenta la temperatura del agua destilada al momento de empezar el ensayo y al finalizar, si no está en el rango de 22 a 27°C se debe repetir el ensayo.