

CAPÍTULO I
GENERALIDADES

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

Los métodos numéricos resultan de interés creciente en varias aplicaciones de la ingeniería, mediante los cuales es posible formular problemas matemáticos, de tal forma que puedan resolverse utilizando operaciones aritméticas. Aunque existen muchos métodos numéricos (diferencias finitas, elementos finitos, etc) estos están relacionados con las habilidades de programación y el uso de algoritmos para su desarrollo.

Desde la perspectiva de la solución de un problema de ingeniería, el sistema es aún más útil cuando el problema se expresa por medio de un modelo matemático. Un modelo matemático es aquél que describe un proceso y representa una idealización simplificada de la realidad.

Esto en la ingeniería permite sistematizar la información hacia un proceso más técnico conocido como modelización. Es así que la modelización toma un papel importante dentro de la ingeniería ya que permite aproximar los resultados a los del laboratorio o de campo, en la medida en la que el modelo se adecue a las condiciones reales, será mayor la aproximación con la que se caracterice la respuesta real.

Del proceso de modelización se desprende el trabajo de simulación, es así que la simulación realizada a través de procedimientos numéricos permite reproducir la realidad.

1.2 ANTECEDENTES

En la actualidad con la capacidad de análisis de las computadoras se han desarrollado programas de análisis que utilizan la metodología de elementos finitos para la realización de análisis complejos en la determinación de los parámetros mecánicos de la mezcla asfáltica.

Las tendencias más recientes en la modelación de mezclas asfálticas, incluyen la caracterización de sus propiedades viscoelásticas que definen la dependencia del módulo como función de la velocidad de aplicación de la carga y la temperatura a través de los parámetros de las series de Prony.

La modelación surge como una transformación de los procesos empíricos hacia procesos matemáticos que aproximen la realidad dentro de un modelo teórico, Este modelo busca ser representativo de la mayor cantidad de variables que intervengan en esa realidad y al mismo tiempo ser lo suficientemente simple para que facilite su cálculo.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Las mezclas asfálticas destinadas a la construcción de pavimentos flexibles, se componen de agregados inertes, inmersos en una matriz cohesiva constituida por ligantes asfálticos. Estas mezclas no son extremadamente compactas y una fracción de su volumen está constituida por vacíos, sus propiedades mecánicas y físicas resultantes dependerán esencialmente de las proporciones y características de los componentes que la conforman.

La enorme variedad de mezclas posibles y el grado de complejidad que pueda presentar su comportamiento, conjugado con el costo de los ensayos, justifica la utilización de técnicas de modelación numérica, como herramientas complementarias de la realización de los ensayos normalizados.

Dando lugar a realizar estudios a nivel local, para contar con datos más aproximados a nuestra realidad y entender el comportamiento de los materiales locales para al diseño de mezclas asfálticas en nuestra región.

1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.4.1 Situación problemática

Podemos observar que en la actualidad los laboratorios de asfaltos continúan usando métodos convencionales para el diseño de mezclas asfálticas, muchas veces incurriendo en errores de diversos tipos que nos llevan a obtener resultados no deseados. Al ser una mezcla asfáltica un material con un comportamiento difícil de predecir es necesario proponer simplificaciones que permitan facilitar su análisis mediante métodos numéricos y herramientas computacionales para enfocar el problema de una manera más adecuada a la realidad del material estudiado.

1.4.2 Problema

¿De qué manera un análisis de la metodología del elemento finito, permitirá simular los factores del ensayo Marshall para el diseño de mezclas asfálticas?

1.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1 Objetivo general

Analizar la simulación del ensayo Marshall mediante la metodología del elemento finito para la elaboración de mezclas asfálticas y determinación del contenido óptimo de asfalto, de manera que se puedan utilizar los valores encontrados para aproximar estos resultados a los propuestos por el método convencional.

1.5.2 Objetivos específicos

- Establecer una base de conocimiento del método de los elementos finitos.
- Establecer una base de conocimiento del ensayo Marshall.
- Utilizar el programa Matlab con la metodología del elemento finito mediante ecuaciones diferenciales ordinarias.
- Presentar una alternativa de diseño computacional complementario al método Marshall para mezclas asfálticas en caliente.
- Realizar una comparación del modelo con el ensayo experimental.

1.6 HIPÓTESIS

Al considerar las condiciones de borde de las propiedades en diferentes mezclas asfálticas, se podrá aplicar la metodología del elemento finito, para generar una simulación de las curvas en las mismas propiedades.

1.5 DEFINICIÓN DE VARIABLES EN ESTUDIO

1.5.1 Variables independientes

Condiciones de borde de las propiedades de una mezcla asfáltica.

1.5.2 Variables dependientes

Curvas simuladas de las propiedades de las mezclas asfálticas

1.5.3 Conceptualización y operacionalización de las variables.

Tabla1. 1 Conceptualización y operacionalización de variables independientes

Variable nominal	Conceptualización	Operacionalización		
		Dimensión	Indicador	Valor acción o técnica
Condiciones de borde de las propiedades de una mezcla asfáltica.	Se refiere a los valores propios de cada mezcla asfáltica correspondiente a los factores estudiados por el ensayo Marshall para una dosificación inicial y final.	Densidad	gr/cc	Ensayo método Marshall
		Vacíos totales	%	Ensayo método Marshall
		Relación betún vacíos	%	Ensayo método Marshall
		Vacíos de agregado mineral	%	Ensayo método Marshall
		Estabilidad	lb	Ensayo método Marshall
		Flujo	pulg	Ensayo método Marshall

Fuente: Elaboración propia

Tabla1. 2 Conceptualización y operacionalización de variables dependientes

Variable nominal	Conceptualización	Operacionalización		
		Dimensión	Indicador	Valor acción o técnica
Curvas simuladas de las propiedades de las mezclas asfálticas.	Se refiere a los pasos desarrollados con la metodología del elemento finito para obtener la curva de cada factor.	Densidad	gr/cc	Metodología del elemento finito
		Vacíos totales	%	Metodología del elemento finito
		Relación betún vacíos	%	Metodología del elemento finito
		Vacíos del agregado mineral	%	Metodología del elemento finito
		Estabilidad	lb	Metodología del elemento finito
		Fluencia	pulg	Metodología del elemento finito

Fuente: Elaboración propia

1.6 DISEÑO METODOLÓGICO

1.6.1 Componentes

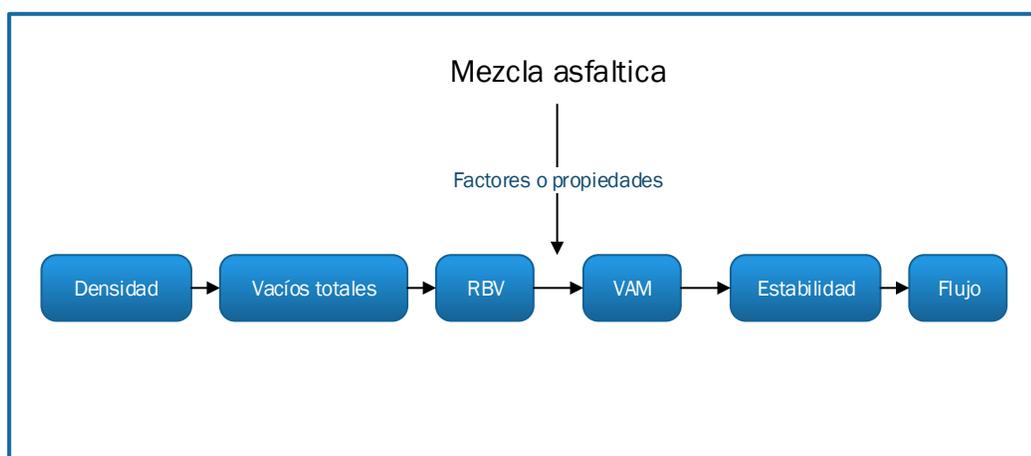
1.6.1.1 Unidad de estudio

Las propiedades de las mezclas asfálticas del ensayo Marshall con la metodología del elemento finito.

1.6.1.2 Población

Son las propiedades de densidad, vacíos totales, relación betún vacíos, vacíos de agregado mineral, estabilidad y flujo que presentan las mezclas asfálticas en el departamento de Tarija.

Figura 1. 1 Población



Fuente: Elaboración propia.

1.6.1.3 Muestra

Las propiedades cuyas características son la densidad, vacíos totales, relación betún vacíos, vacíos de agregado mineral, estabilidad, y flujo.

1.6.1.4 Muestreo

Se recopilan datos de diseños de mezclas asfálticas convencionales con la metodología Marshall para obtener las condiciones de borde que se utilizara para la simulación de las propiedades con las curvas a partir de elementos finitos.

1.7 MÉTODOS Y TÉCNICAS EMPLEADAS

1.7.1 Método

El método utilizado en este estudio será el correlacional mediante el cual se analizarán las propiedades físico - mecánicas de las mezclas asfálticas con la metodología del elemento finito cumpliendo con las especificaciones técnicas del ensayo Marshall.

1.7.2 Técnica

La técnica empleada será mediante el análisis matemático con la metodología del elemento finito para cada factor que estudia el ensayo Marshall.

Se usarán los cálculos correspondientes al procedimiento de los elementos finitos y se resolverán las ecuaciones formuladas para cada factor mediante un análisis matricial por gauss Jordán.

Se utilizará el programa Matlab para la integración, resolución de las ecuaciones por medio de matrices y graficas de los valores simulados.

Los parámetros asumidos para la metodología del elemento finito provienen del tramo carretero (Tolomosa - Pampa Redonda) que cuenta con agregados provenientes de la planta de asfaltos del SEDECA de la ciudad de Tarija, ubicada en la comunidad de San José de Charaja, que tiene como banco a la chancadora de Charaja.

El betún con el que se realizó el tramo Tolomosa – Pampa Redonda tiene como procedencia el país de Brasil y también fue proporcionado por el SEDECA.

Por otra parte, los agregados para el diseño convencional provinieron del río Camacho, pero fueron obtenidos en el lugar de acopio ubicado en la localidad de La Pintada perteneciente a la Honorable Alcaldía Municipal de la Provincia Cercado para los cuales se hicieron los siguientes ensayos:

Tabla1. 3 Ensayos propuestos

Asfalto Convencional	Penetración	Ductilidad	Viscosidad	Punto de ablandamiento	Punto de inflamación	Peso específico
	✘	✘	✘	✘	✘	✘
Agregados	Granulometría	Peso unitario	Peso específico	Equivalente de arena	Desgaste de los ángeles	Límites de atterberg
	✘	✘	✘	✘	✘	

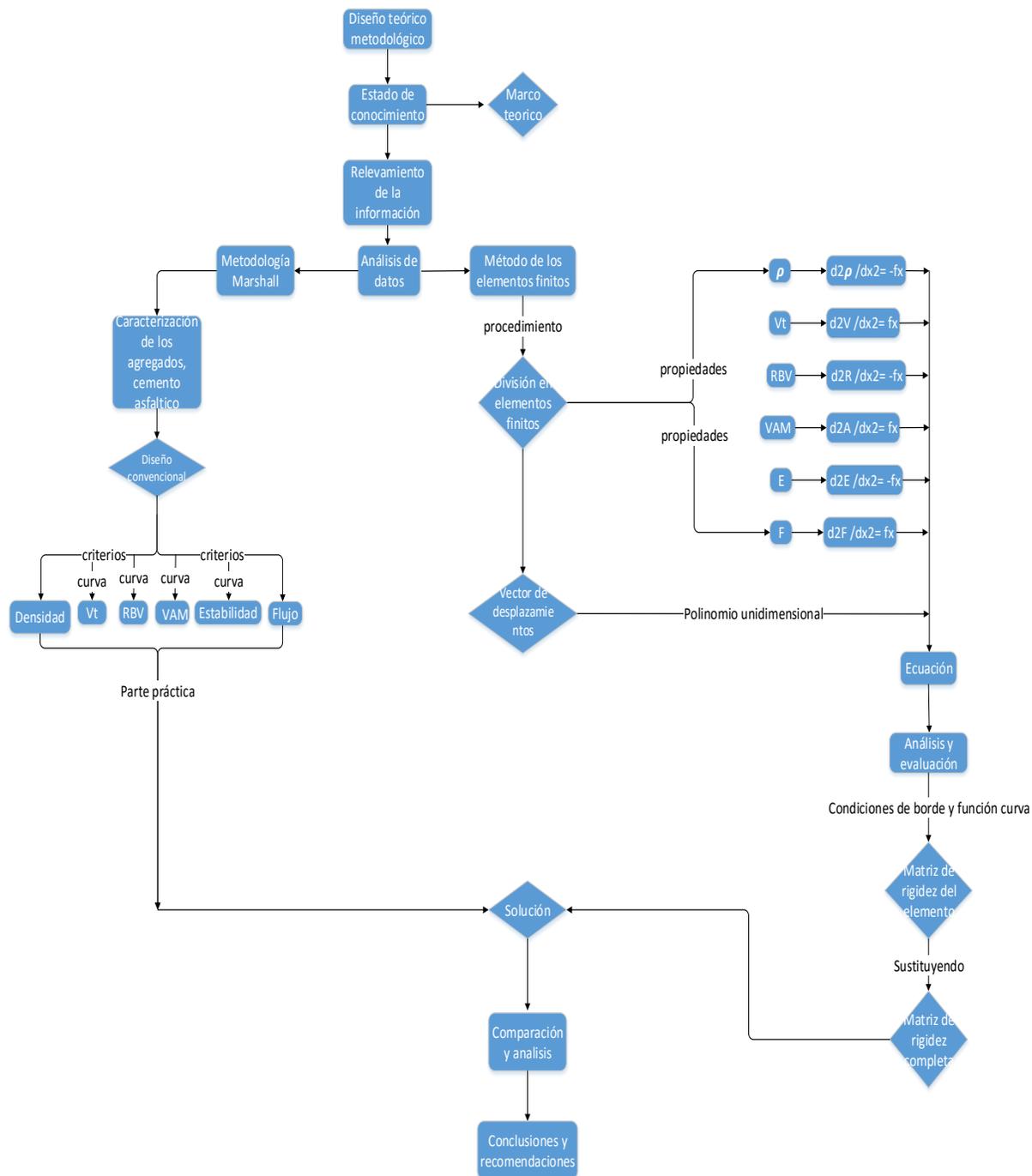
Fuente: Elaboración propia.

1.7.3 Técnica de muestreo

La técnica de muestreo es no probabilística por que se seleccionaron mezclas asfálticas que cumplieran con las especificaciones técnicas de la metodología Marshall para el desarrollo del modelo. También se utilizará un análisis estadístico y descriptivo para analizar el comportamiento de cada factor de la mezcla.

1.8 ESQUEMA METODOLÓGICO

Figura 1. 2 Esquema metodológico



Fuente: Elaboración propia

1.9 DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS E INSTRUMENTOS

Para la parte que corresponde a la parte práctica se seguirá el siguiente procedimiento:

a.- Caracterización de los agregados

Horno eléctrico.- El horno eléctrico es utilizado para el secado de los agregados de aportación y debe contar con una temperatura constante de 100 a 110 °C.

Balanza.- La balanza es usada para obtener los distintos pesos que se requiera.

Juego de tamices.- El juego de tamices debe seguir la norma ASTM E-11, la cual contiene los tamices 3", 2 1/2", 2, 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", N°4, N°10, N°40, N°200, tapa y fondo.

b.- Para la caracterización del cemento asfáltico

Penetrometro de asfalto.- Que sirve para determinar la penetración del betún en estudio.

Viscosímetro del asphalt institute.- Con los cuales se determina la viscosidad del betún en estudio.

Aparato para la determinación del punto de inflamación Cleveland de copa abierta.- Con el cual se determina el punto de ignición o punto de llama del betún en estudio.

Ductilímetro.- Con el cual se determina la ductilidad del betún, a una temperatura estándar de 25°C.

Peso específico.- Que sirve para determinar la densidad del cemento asfáltico.

c.- Para la dosificación y diseño de briguetas

Moldes de compactación Marshall.- En estos moldes se vaciará la mezcla bituminosa reciclada, creando briguetas con distintos porcentajes de betún.

Compactador para moldes Marshall.- Este compactador sirve para compactar las briguetas según especificaciones técnicas.

d.- Para los ensayos de resistencia técnica

Marco de carga multiplex Marshall.- Este marco sirve para disponer en los distintos cabezales, según la prueba que se requiera.

Cabezal de rotura Marshall.- Este cabezal junto con el marco multiplex, permite realizar los ensayos de estabilidad y fluencia para las briguetas en análisis.

1.10 PROCEDIMIENTO DE APLICACIÓN

a.- Se hace un análisis de la correlación de los datos obtenidos en los diseños Marshall en el tramo Tolomosa - Pampa Redonda para analizar los parámetros que se asumirán en la aplicación de los elementos finitos.

b.- Se desarrolla la ecuación unidimensional que servirá para simular los factores Marshall mediante curvas, y obtener un procedimiento secuencial para resolverlo utilizando un software que trabaja con sistemas matriciales.

c.- Se realiza un ensayo en laboratorio de un diseño convencional.

d.- Una vez determinadas las curvas por elementos finitos se realiza una comparación con el diseño convencional, para analizar si los factores simulados son representativos del material.

1.11 PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Con los ensayos de caracterización se determina el cumplimiento de los requisitos mínimos según normas, que deben tener tanto el cemento asfáltico y los agregados.

Los resultados obtenidos a partir de la aplicación de los elementos finitos a los factores de Marshall se comparan con los resultados del diseño convencional en laboratorio, observando su variación y relación.

Densidad elementos finitos vs Densidad diseño convencional.

Vacíos totales elementos finitos vs Vacíos totales diseño convencional.

Relación betún vacíos elementos finitos vs Relación betún vacíos diseño convencional.

Vacíos de agregado mineral elementos finitos vs Vacíos de agregado mineral diseño convencional.

Flujo elementos finitos vs Flujo diseño convencional.

Estabilidad elementos finitos vs Estabilidad diseño convencional.

1.12 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

El diseño de mezclas asfálticas a partir de los elementos finitos tiene un amplio campo de investigación y desarrollo, en el presente estudio se hace un análisis de los elementos finitos para la obtención de los factores en una dimensión y se deja un precedente sobre los modelos para dos o tres dimensiones. Este análisis de la simulación del ensayo Marshall con la metodología del elemento finito permitirá tener un enfoque diferente sobre el diseño de mezclas asfálticas a partir del desarrollo de las curvas de cada factor y determinación de los parámetros que utiliza la metodología para el diseño de mezclas asfálticas.

El primer capítulo, se describe de manera general de que trata la investigación para la aplicación de los elementos finitos en el ensayo Marshall, donde se da a conocer, la situación problemática, los objetivos, la justificación y la hipótesis en el presente proyecto.

El segundo capítulo, está comprendida por la parte teórica donde se detalla el estado de conocimiento, es decir toda la información necesaria y relevante del proyecto, como es el estudio de los elementos finitos, las mezclas asfálticas con la metodología Marshall y las normas utilizadas.

El tercer capítulo, describe los medios y criterios para obtener los datos que se utilizaran para el desarrollo de los elementos finitos juntamente con la caracterización de los agregados y cemento asfáltico para la elaboración del diseño convencional.

El cuarto capítulo, comprende la aplicación de los parámetros determinados en el tramo Tolomosa - Pampa redonda que permitirá simular la curva de cada factor del ensayo Marshall mediante la metodología del elemento finito para posteriormente hacer un análisis final de los datos y poder aproximarlos al comportamiento real del material.

Posteriormente se hará una comparación del modelo con el diseño convencional mediante un análisis de los resultados simulados de cada factor realizando la propuesta final del proyecto.

El quinto capítulo, establecerá las conclusiones a partir de lo planteado en los objetivos, dándose a conocer los resultados finales que se tendrá del análisis de los factores simulados con los elementos finitos.

CAPÍTULO II
CONCEPTUALIZACIÓN DEL TEMA

CAPÍTULO II

CONCEPTUALIZACIÓN DEL TEMA

2.1 MODELOS MATEMÁTICOS

Los modelos numéricos constituyen técnicas mediante las cuales es posible formular problemas matemáticos, de tal forma que puedan resolverse utilizando operaciones aritméticas. Aunque existen muchos tipos de métodos numéricos, estos comparten una característica común: invariablemente requieren de un buen número de tediosos cálculos aritméticos. No es raro que con el desarrollo de computadoras digitales eficientes y rápidas, el papel de los métodos numéricos en la solución de problemas en ingeniería haya aumentado de forma considerable en los últimos años.

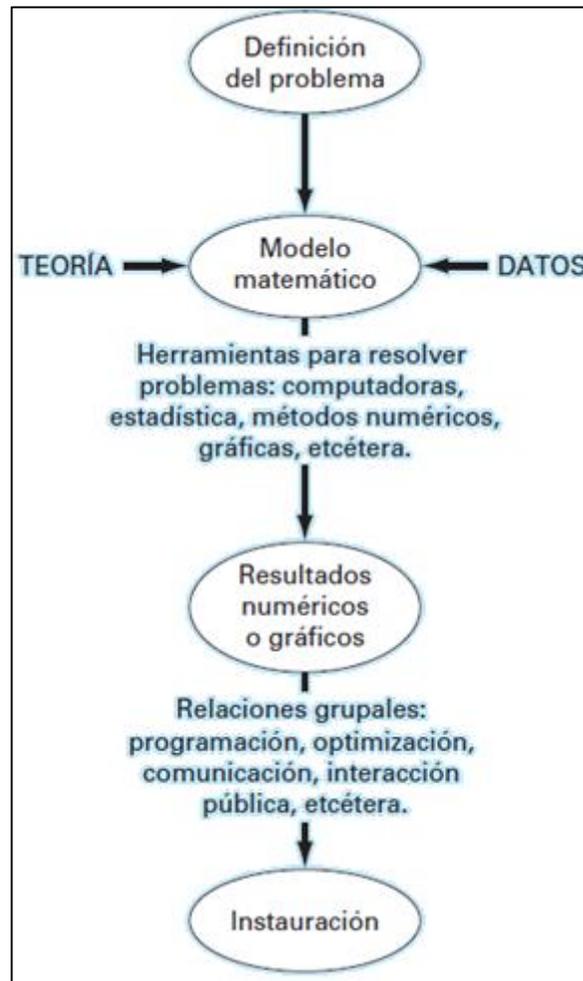
2.1.1 Modelo matemático simple

Un modelo matemático se define, de manera general, como una formulación o una ecuación que expresa las características esenciales de un sistema físico o de un proceso en términos matemáticos. En general, el modelo se representa mediante una relación funcional de la forma:

$$\frac{\textit{Variable}}{\textit{dependiente}} = f\left(\frac{\textit{variables}}{\textit{independiente}}, \textit{parámetros}, \frac{\textit{funciones}}{\textit{de fuerza}}\right)$$

Donde la variable dependiente es una característica que generalmente refleja el comportamiento o estado de un sistema; las variables independientes son, por lo común, dimensiones tales como el tiempo y espacio, a través de las cuales se determina el comportamiento del sistema. Figura 2.1

Figura 2. 1 Esquema de un modelo matemático



Fuente: Métodos numéricos para ingenieros 5ta edición

2.2 MÉTODOS NUMÉRICOS Y LA PRÁCTICA EN INGENIERÍA

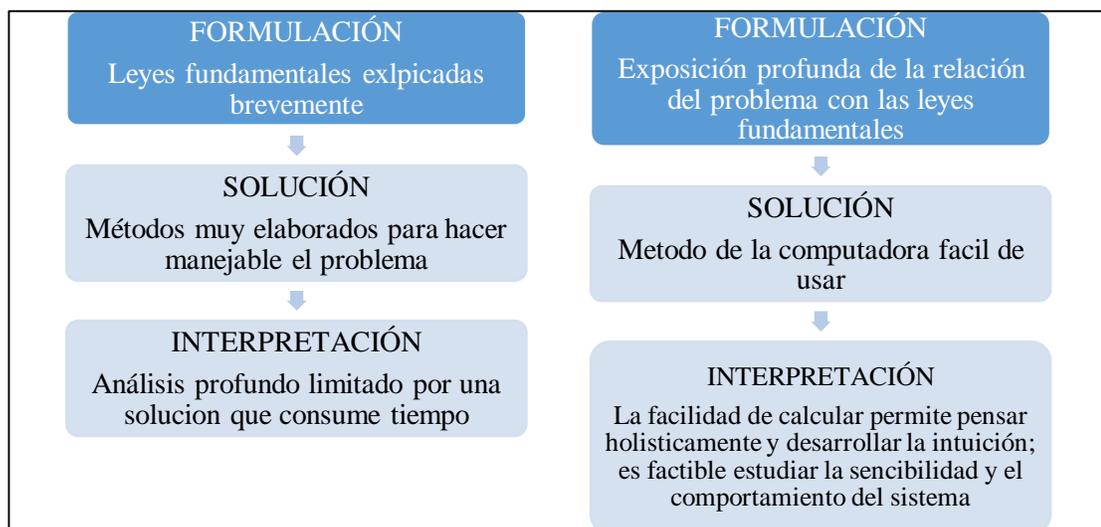
Las amplias disponibilidades de computadoras digitales han llevado a una verdadera explosión en el uso y desarrollo de los métodos numéricos. Al principio, este crecimiento estaba limitado por el costo del procesamiento de las grandes computadoras, por lo que muchos ingenieros seguían usando simples procedimientos analíticos en una buena parte de su trabajo. Vale la pena mencionar que la reciente evolución de computadoras personales de bajo costo ha permitido el acceso, de mucha gente, a las poderosas capacidades del cómputo.

Existiendo diversas razones por las cuales se deben estudiar los métodos numéricos:

a.- Los métodos numéricos son herramientas muy poderosas para la solución de problemas. Son capaces de manipular sistemas de ecuaciones grandes, manejar no linealidades y resolver geometrías complicadas, comunes en la práctica de la ingeniería y, a menudo, imposibles de resolver en forma analítica.

b.- Los métodos numéricos son un medio para reforzar su comprensión de las matemáticas, ya que una de sus funciones es convertir las matemáticas superiores en operaciones aritméticas básicas, de esta manera se puede profundizar en los temas que de otro modo resultarían oscuros. Esta perspectiva dará como resultado un aumento de su capacidad de comprensión en la materia. En la actualidad, las computadoras y los métodos numéricos ofrecen una alternativa para los cálculos complicados. Al usar la potencia de la computadora se obtienen soluciones directamente, de esta manera se pueden aproximar los cálculos sin tener que recurrir a consideraciones de simplificación o técnicas muy lentas. Aunque las soluciones analíticas aún son muy valiosas, tanto para resolver problemas como para brindar una mayor comprensión, los métodos numéricos representan opciones que aumentan, en forma considerable, la capacidad para enfrentar y resolver los problemas; como resultado, se dispone de más tiempo para aprovechar las habilidades creativas personales. En consecuencia, es posible dar más importancia a la formulación de un problema y a la interpretación de la solución, así como a su incorporación al sistema total. Figura 2.2

Figura 2. 2 Esquema de aplicación de los métodos numéricos



Fuente: Métodos numéricos para ingenieros 5ta edición

2.3 ANTECEDENTES MATEMÁTICOS

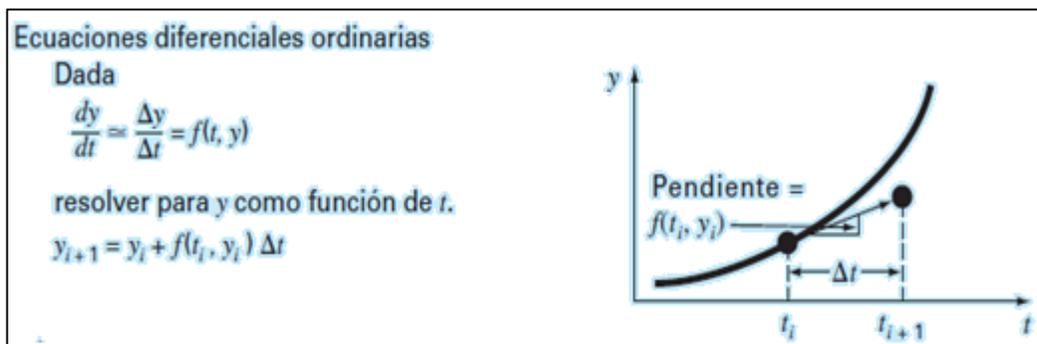
2.3.1 Ecuaciones diferenciales ordinarias

También llamada ecuación de razón, ya que expresa la razón de cambio de una variable como una función de variables o parámetros. Estas ecuaciones desempeñan un papel importante en ingeniería debido a que muchos fenómenos físicos se formulan matemáticamente en términos de su razón de cambio.

Cuando la función tiene una variable independiente, la ecuación se llama Ecuación Diferencial Ordinaria EDO. Esto contrasta con una Ecuación Diferencial Parcial EDP que involucra dos o más variables independientes. La integración subsecuente de estas ecuaciones diferenciales origina funciones matemáticas que describen el estado espacial y temporal en términos de variaciones de energía o masa.

Éstas tienen una enorme importancia en la práctica de la ingeniería, lo cual se debe a que muchas leyes físicas están expresadas en términos de la razón de cambio de una cantidad, más que en términos de la cantidad misma. Se tratan dos tipos de problemas: problemas con valor inicial y problemas con valores en frontera. Figura 2.3

Figura 2. 3 Representación gráfica de una EDO



Fuente: Métodos numéricos para ingenieros 5ta edición

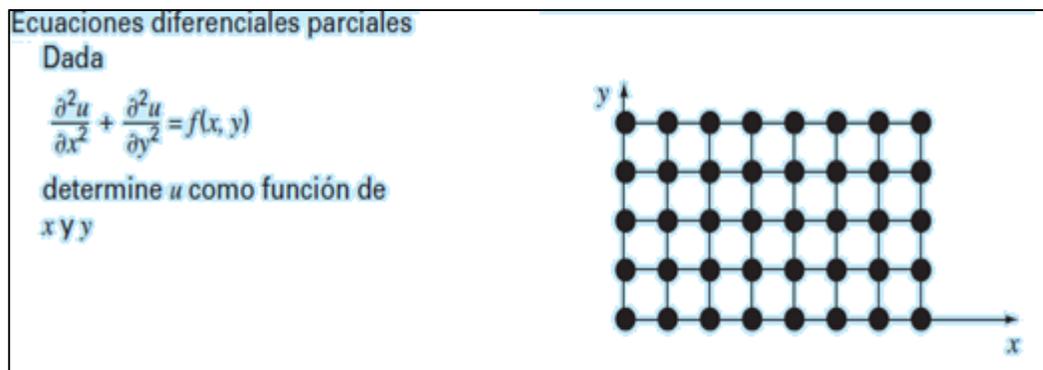
2.3.2 Ecuaciones diferenciales parciales

Una ecuación que tiene derivadas parciales de una función desconocida, de dos o más variables independientes, se denomina Ecuación Diferencial Parcial EDP. Figura 2.4

Se dice que una ecuación diferencial parcial es lineal, si es lineal en la función desconocida y en todas sus derivadas, con coeficientes que dependen sólo de las variables independientes.

Las ecuaciones diferenciales parciales sirven para caracterizar sistemas de ingeniería, en los que el comportamiento de una cantidad física se expresa en términos de su razón de cambio con respecto a dos o más variables independientes. Para resolver numéricamente las ecuaciones diferenciales parciales se emplean dos métodos bastante diferentes: el método de las diferencias finitas que aproximan la solución usando puntos discretos y el método de elementos finitos que usa aproximaciones con piezas discretas.

Figura 2. 4 Representación gráfica de una EDP



Fuente: Métodos numéricos para ingenieros 5ta edición

2.4 EL MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO

2.4.1 Introducción a los elementos finitos

El método de los elementos finitos es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales.

La solución se la obtiene para un dominio para el cual está definida la ecuación diferencial, reduciendo este en un número elevado de subdominios intersecantes entre si llamado elemento. Estos subdominios forman un conjunto finito de elementos creando una partición del dominio también denominado discretización. Dentro de cada elemento se puede apreciar una serie de puntos representativos llamados nodos, lugar en el dominio

donde se pretende aproximar la solución. El conjunto de nodos y la relación de adyacencia que tiene con cada elemento en el dominio se denomina malla. De acuerdo con estas relaciones se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominados grados de libertad. El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales. La matriz de dicho sistema de ecuaciones se llama matriz de rigidez del sistema del cual el número de ecuaciones es proporcional al número de nodos.

2.4.2 Descripción del MEF

La fase 1 de división en elementos finitos o discretización se puede realizar utilizando un programa. La fase 2 de los desplazamientos del elemento y de la matriz de rigidez del elemento constituyen lo que se denomina formulación del elemento, a partir de la cual se llega a la fase 3 de matriz completa de rigidez. Finalmente, en la fase 4 de la respuesta se determinan los parámetros nodales que permiten calcular la respuesta de los elementos. En esta fase es preciso utilizar programas procesadores.

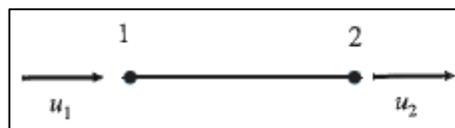
2.4.3 División en elementos finitos

Esta fase divide la continuidad del elemento en elementos finitos interconectados entre si mediante nodos que están situados generalmente en los bordes de los elementos pero que pueden estar también en su interior

2.4.3.1 Elementos unidimensionales

Los elementos cuyo comportamiento o deformación ante las cargas depende de una sola variable se discretizan en elementos finitos unidimensionales. Figura 2.5

Figura 2. 5 Elemento unidimensional

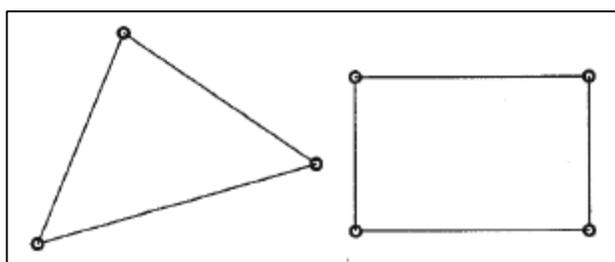


Fuente: El método de los elementos finitos Editorial Noela

2.4.3.2 Elementos bidimensionales

Cuando el comportamiento del elemento ante las cargas depende de dos coordenadas, el elemento se discretiza en elementos bidimensionales. Estos elementos están gobernados por sistemas de ecuaciones diferenciales parciales en vez de ecuaciones diferenciales ordinarias. Uno de los elementos bidimensionales más utilizados en la discretización de estructuras es el elemento triangular por su fácil adaptación a cualquier superficie. Figura 2.6

Figura 2. 6 Elementos bidimensionales

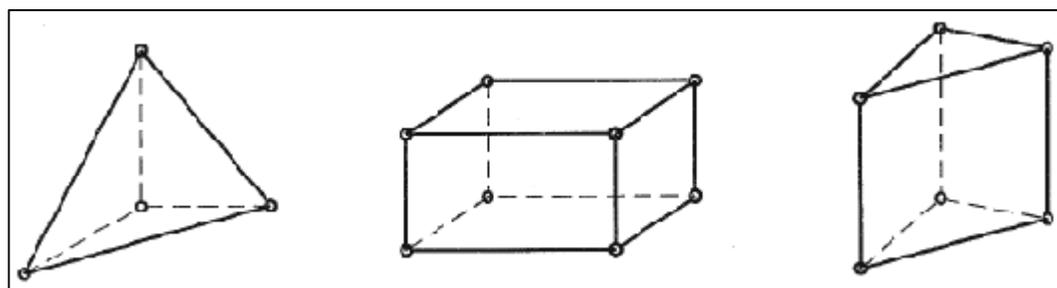


Fuente: El método de los elementos finitos Editorial Noela

2.4.3.3 Elementos tridimensionales

En muchos campos de la ingeniería se utilizan estructuras espaciales tanto en su forma como en las cargas aplicadas. Estas estructuras exigen una discretización tridimensional siendo los elementos tridimensionales de uso más frecuente los tetraédricos de cuatro nodos, los hexaédricos y los prismáticos. Figura 2.7

Figura 2. 7 Elementos tridimensionales



Fuente: El método de los elementos finitos Editorial Noela

2.4.4 Vector de desplazamientos del elemento

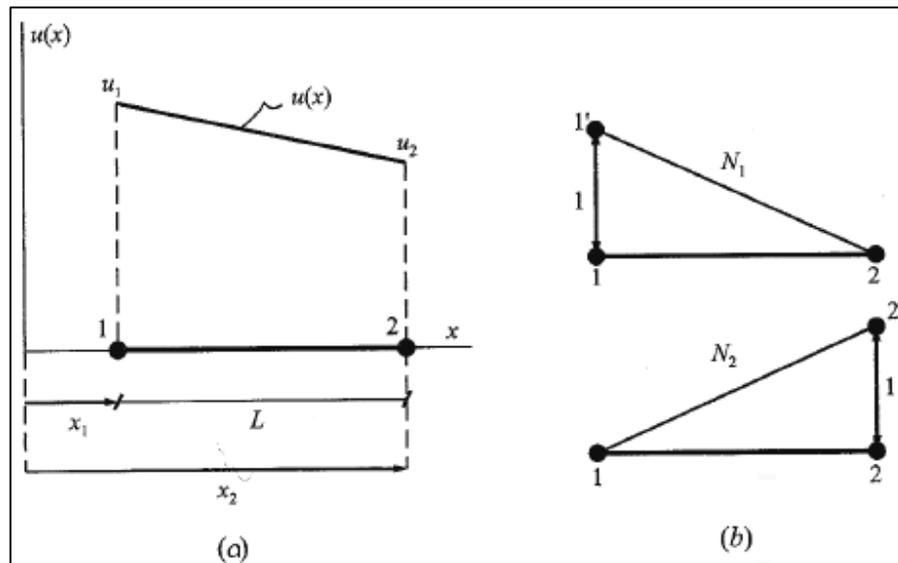
2.4.4.1 Funciones unidimensionales

El desplazamiento de un punto cualquiera del elemento puede expresarse aproximadamente utilizando la función de desplazamiento:

$$u(x) = a_0 + a_1 x \quad (1)$$

Al suponer que los desplazamientos $u(x)$ varían linealmente entre los desplazamientos nodales u_1 y u_2 Figura 2.8 las funciones de interpolación N_i permiten calcular el desplazamiento de un punto cualquiera del elemento en función de los desplazamientos nodales.

Figura 2. 8 Vector de desplazamientos función unidimensional



Fuente: El método de los elementos finitos Editorial Noela

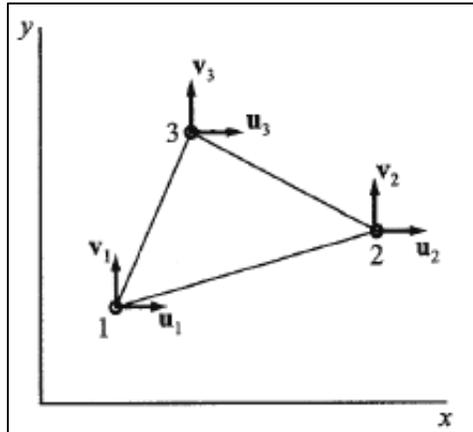
2.4.4.2 Funciones bidimensionales

Consideremos como elemento bidimensional un elemento triangular con un nodo en cada vértice y desplazamiento $u_1, v_1, u_2, v_2, u_3, v_3$ Figura 2.9. En este caso, el desplazamiento de un punto cualquiera del elemento finito puede ser expresado aproximadamente por las funciones de desplazamientos.

$$u(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y \quad (2)$$

$$v(x, y) = a_4 + a_5x + a_6y \quad (3)$$

Figura 2. 9 Vector desplazamiento función bidimensional



Fuente: El método de los elementos finitos Editorial Noela

Que son polinomios que tienen un número de parámetros a_i igual a 6 que es el grado de libertad del elemento. Particularizando las funciones anteriores en los nodos 1, 2 y 3, se determinan los parámetros a_i que sustituidos en las ecuaciones 2 y 3 permiten expresar el vector desplazamiento del elemento bidimensional en la forma

$$\{ue\} = [Ne]\{\delta e\} \quad (4)$$

Siendo el vector desplazamientos del elemento $\{ue\}$

$$\{ue\} = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (5)$$

El vector de parámetros nodales del elemento $\{\delta e\}$

$$\{\delta e\} = \{u_1 \ v_1 \ u_2 \ v_2 \ u_3 \ v_3\} \quad (6)$$

Y la matriz de forma o de interpolación del elemento $[Ne]$

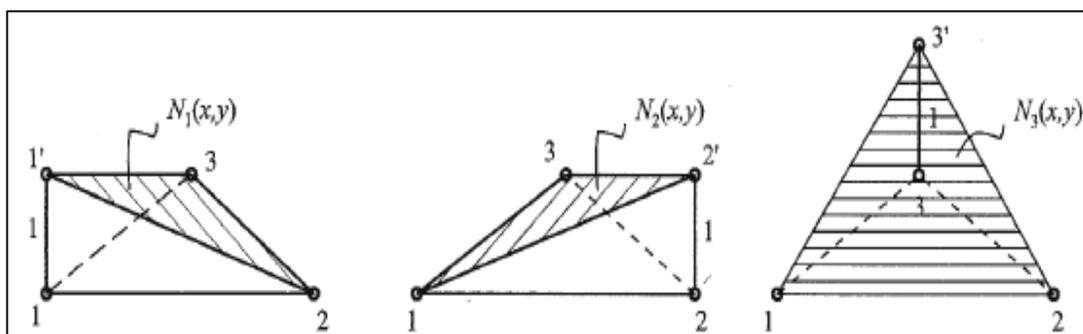
$$[Ne] = [N_1 \ N_2 \ N_3] \quad (7)$$

Los desplazamientos u tienen que depender solamente de u_1, u_2, u_3 . De la misma forma, los desplazamientos v dependerán solamente de v_1, v_2, v_3 y, además, ambas dependencias tienen que ser iguales. Por esta razón la matriz de forma del elemento $[Ne]$ debe ser:

$$[Ne] = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Siendo las funciones de interpolación N_i polinomios de primer grado en x, y y cuyos coeficientes dependen de las coordenadas nodales. Al igual que el caso del elemento unidimensional, la función de interpolación N_i determine los desplazamientos de los puntos del elemento cuando se le da un valor unidad al desplazamiento del nodo i manteniendo nulos los desplazamientos de los otros nodos. Figura 2.10

Figura 2. 10 Vector desplazamientos función bidimensional



Fuente: El método de los elementos finitos Editorial Noela

2.4.4.3 Funciones tridimensionales

En el caso de un elemento tridimensional con n_n nodos y cada nodo con 3 parámetros u_i, v_i, w_i , Figura 2.11 el vector de desplazamientos del elemento es:

$$\{ue\} = [Ne]\{\delta e\} \quad (9)$$

Donde la matriz de forma del elemento $[Ne]$ es

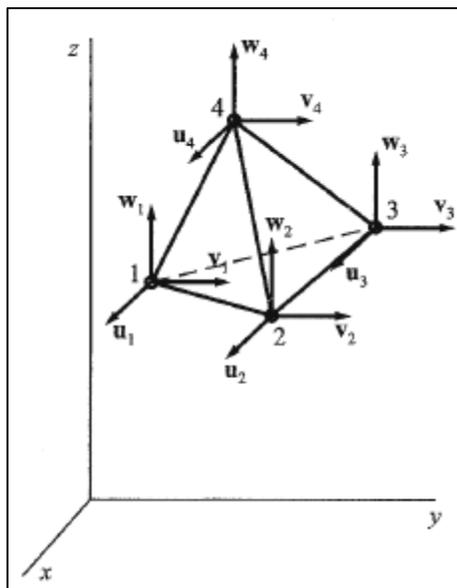
$$[Ne] = [N_1 \ N_2 \ \dots \ N_n] \quad (10)$$

que tiene n_n submatrices de forma Ni de 3×3 elementos:

$$[Ni] = \begin{bmatrix} Ni & 0 & 0 \\ 0 & Ni & 0 \\ 0 & 0 & Ni \end{bmatrix} \quad (11)$$

En este caso, las funciones de interpolación Ni son polinomios de primer grado en x, y, z , cuyos coeficientes dependen de las coordenadas nodales.

Figura 2. 11 Vector desplazamientos función tridimensional



Fuente: El método de los elementos finitos Editorial Noela

2.4.5 Enfoque general a las funciones unidimensionales

Aunque las particularidades varían, la implementación del método del elemento finito usualmente se sigue un procedimiento estándar como se describe:

Discretización.- Este paso consiste en dividir el dominio de la solución en elementos finitos en la Figura 2.5 muestra un ejemplo de elemento lineal. Los puntos de intersección de las líneas que forman los lados de los elementos se conocen como nodos y los mismos lados se denominan líneas o planos nodales.

Ecuación del elemento.- El siguiente paso consiste en desarrollar ecuaciones para aproximar la solución de cada elemento y consta de dos pasos. Primero, se debe elegir una función apropiada con coeficientes desconocidos que aproximara la solución. Segundo se evalúan los coeficientes de modo que la función aproxime la solución de manera óptima.

Elección de la función de aproximación.- Debido a que son fáciles de manipular matemáticamente, a menudo se utilizan polinomios para este propósito. En el caso unidimensional es un polinomio de primer grado o línea recta.

$$u(x) = a_0 + a_1 x \quad (12)$$

Donde:

$u(x)$ = variable dependiente

a_0 y a_1 son constantes y x es la variable independiente.

Esta función debe pasar a través de los valores de $u(x)$ en los puntos extremos del elemento en x_1 y x_2 se tiene entonces:

$$u(x_1) = a_0 + a_1 x_1 \quad (13)$$

$$u(x_2) = a_0 + a_1 x_2 \quad (14)$$

Donde:

$u_1 = u(x_1)$ y $u_2 = u(x_2)$

De estas ecuaciones utilizando la regla de Cramer, se obtiene:

$$a_0 = \frac{u_1 x_2 - u_2 x_1}{x_2 - x_1} \quad (15)$$

$$a_1 = \frac{u_2 - u_1}{x_2 - x_1} \quad (16)$$

Al sustituir estos valores en la ecuación 12, se obtiene:

$$u(x) = N_1 \cdot u_1 + N_2 \cdot u_2 \quad (17)$$

Es decir:

$$u(x) = [N1, N2] \begin{bmatrix} u1 \\ u2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Donde:

$$N1 = \frac{x2-x}{x2-x1} \quad \text{y} \quad N2 = \frac{x-x1}{x2-x1} \quad (19)$$

La ecuación 17 se conoce como función de aproximación, o de forma y N1 y N2 se denominan funciones de interpolación o funciones de forma. Esta ecuación ofrece un medio para predecir valores intermedios, para interpolar entre valores dados u1 y u2.

La Figura 2.8 muestra la función de forma junto con las funciones de interpolación correspondientes. Observe que la suma de las funciones de interpolación es igual a uno. Al trabajar con ecuaciones lineales es más fácil realizar las operaciones como diferenciación e integración.

Derivando la ecuación 15 se obtiene:

$$\frac{du}{dx} = \frac{dN1}{dx} \cdot u1 + \frac{dN2}{dx} u2 \quad (20)$$

De acuerdo con la ecuación 17, las derivadas de las N se calculan de la siguiente manera.

$$\frac{dN1}{dx} = -\frac{1}{x2-x1} \quad (21)$$

$$\frac{dN2}{dx} = \frac{1}{x2-x1} \quad (22)$$

Por tanto, la derivada de u es:

$$\frac{du}{dx} = \frac{1}{x2-x1} (-u1 + u2) \quad (23)$$

Es una diferencia dividida que representa la pendiente de la línea recta que une los nodos.

La integral se expresa:

$$\int_{x_1}^{x_2} u. dx = \int_{x_1}^{x_2} N_1. u_1 + N_2. u_2 dx \quad (24)$$

Cada uno de los términos del lado derecho es simplemente la integral de un triángulo rectángulo con base x_2-x_1 y altura u .

$$\int_{x_1}^{x_2} Nu. dx = \frac{1}{2}(x_2 - x_1)u \quad (25)$$

Así la integral completa es:

$$\int_{x_1}^{x_2} u. dx = \frac{u_1+u_2}{2}(x_2 - x_1) \quad (26)$$

Una vez que se ha elegido la función de interpolación se debe desarrollar la ecuación que rige el comportamiento del elemento. Esta ecuación representa un ajuste de la función a la solución de la ecuación diferencial de que se trate. Existen varios métodos para este propósito; entre los más comunes están el *método directo*, el *método de los residuos ponderados* y el método variacional. Los resultados de todos estos métodos son análogos al ajuste de curvas. Sin embargo, en lugar de ajustar funciones a datos estos métodos especifican relaciones entre las incógnitas de la ecuación 17 que satisfacen de manera óptima la ED.

Método de los Residuos Ponderados.- Se utilizan en los elementos que se conocen las ecuaciones diferenciales de gobierno, este método proporciona la misma formulación del elemento que los métodos variacionales, cada vez más utilizados.

Siendo por ejemplo un elemento cuyos desplazamientos $u(x)$ están definidos por la ecuación diferencial de gobierno representada por:

$$D(u, x) = 0 \quad (27)$$

Satisfaciendo el contorno del elemento con las condiciones.

$$C(u, x) = 0 \quad (28)$$

En la que $C(u, x)$ puede representar también una ecuación diferencial.

Se adopta como función de aproximación de desplazamientos:

$$u = \sum ai. fi(x) \quad (29)$$

En la que $fi(x)$ es un polinomio en el elemento discretizado en la que se adopta una función aproximada de desplazamientos.

$$u = \sum Ni. ui \quad (30)$$

Donde Ni son funciones de interpolación y ui son los desplazamientos nodales del elemento.

Al sustituir las funciones aproximadas en la ecuación diferencial de gobierno, se obtiene el residuo interno.

$$RD = D(u, x) \quad (31)$$

Y al sustituir dichas funciones aproximadas en las condiciones de contorno, se obtiene el residuo externo o residuo de contorno.

$$Rc = C(u, x) \quad (32)$$

En el caso de que la función aproximada de desplazamientos o satisfaga las condiciones de contorno se prescinde del residuo externo Rc .

Los métodos de los residuos ponderados minimizan los residuos RD y Rc igualando a cero los promedios de los residuos ponderados en toda la estructura y en su contorno.

La expresión analítica de este método es:

$$\int W_i \cdot R \cdot dT = 0 \quad (33)$$

Donde:

R= Residuo Rd o Rc

T= Volumen del elemento o la superficie de su contorno

Wi= Función

Las ecuaciones permiten calcular los coeficientes ai o los desplazamientos nodales ui , a partir de los cuales se determina la respuesta del elemento. Las funciones Wi , multiplicado por los residuos R dan como resultado los coeficientes ai , a los desplazamientos nodales ui .

Matemáticamente, las ecuaciones del elemento resultante a menudo consisten en un sistema de ecuaciones algebraicas lineales que pueden expresarse en forma matricial.

$$[k] \cdot [u] = \{F\} \quad (34)$$

Donde $[k]$ es una propiedad del elemento o matriz de rigidez, $[u]$ es un vector columna de las incógnitas en los nodos y $\{F\}$ es el vector columna determinado por el efecto de cualquier influencia externa aplicada a los nodos.

Ensamblaje.- Una vez obtenida la ecuación de los elementos individuales, éstas deben unirse o ensamblarse para caracterizar el comportamiento de todo el sistema. El proceso de ensamblaje está regido por el concepto de continuidad. Es decir, las soluciones de elementos contiguos se acoplan, de manera que los valores de las incógnitas (algunas veces derivadas) en sus nodos comunes sean equivalentes. Así la solución total será continua.

Cuando finalmente todas las versiones individuales de la ecuación 34 están ensambladas, el sistema completo se expresa en forma matricial como:

$$[k]. [u'] = \{F'\} \quad (35)$$

Donde $[k]$ es la matriz de propiedades de ensamblaje y $\{u'\}$ y $\{F'\}$ son los vectores columna de las incógnitas y de las fuerzas externas, marcadas con apóstrofes para denotar que son ensamblaje de los vectores $\{u\}$ y $\{F\}$ de los elementos individuales.

Condiciones de Frontera.- Antes de resolver la ecuación 35 debe modificarse para considerar las condiciones de frontera del sistema:

$$[\bar{k}]. [u'] = \{\bar{F}'\} \quad (36)$$

Solución.- Las soluciones de la ecuación se obtienen con las técnicas que se describieron anteriormente. En muchos de los casos los elementos pueden considerarse de manera que las ecuaciones resultantes sean bandeadas. Así es posible utilizar los esquemas de solución altamente eficientes para estos sistemas.

2.4.6 Enfoque General a las Funciones Bidimensionales

La extensión del método del elemento finito a dos dimensiones es similar conceptualmente a los problemas unidimensionales.

Discretización.- Se emplean elementos sencillos, como triángulos o cuadriláteros, en la malla de elementos finito para dos dimensiones.

Ecuación del Elemento.- Tal como en el caso unidimensional, el siguiente paso consiste en desarrollar una ecuación para aproximar la solución del elemento. Para un elemento triangular, la aproximación más sencilla es un polinomio lineal.

$$u(x, y) = a_0 + a_{11}.x + a_{12}.y \quad (37)$$

Donde $u(x,y)$ son las variables dependientes, a es el coeficiente, x y y son las variables independientes. Esta función debe pasar a través de los valores de $u(x, y)$ en los nodos del triángulo (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) .

$$u_1(x, y) = a_0 + a_{11}.x_1 + a_{12}.y_1 \quad (38)$$

$$u_2(x, y) = a_0 + a_{11}.x_2 + a_{12}.y_2 \quad (39)$$

$$u_3(x, y) = a_0 + a_{11}.x_3 + a_{12}.y_3 \quad (40)$$

De forma matricial:

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_{11} \\ a_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} \quad (41)$$

$$a_0 = \frac{1}{2Ae} [u_1(x_2y_3 - x_3y_2) + u_2(x_3y_1 - x_1y_3) + u_3(x_1y_2 - x_2y_1)] \quad (42)$$

$$a_{11} = \frac{1}{2Ae} [u_1(y_2 - y_3) + u_2(y_3 - y_1) + u_3(y_1 - y_2)] \quad (43)$$

$$a_{12} = \frac{1}{2Ae} [u_1(x_3 - x_2) + u_2(x_1 - x_3) + u_3(x_2 - x_1)] \quad (44)$$

Donde:

Ae = Área del elemento triangular

$$Ae = \frac{1}{2} [(x_2y_3 - x_3y_2) + (x_3y_1 - x_1y_3) + (x_1y_2 - x_2y_1)] \quad (45)$$

Las ecuaciones presentadas en 40 se sustituyen en la ecuación 37 dando como resultado:

$$u = N_1u_1 + N_2u_2 + N_3u_3 \quad (46)$$

La ecuación 42 permite predecir valores intermedios en el elemento, con base en los valores de sus nodos. En la figura 2.10 se muestra la función de forma junto con las funciones de interpolación correspondiente. Observe que la suma de las funciones de interpolación es siempre igual a 1.

Condiciones en la Frontera y Ensamblaje.- La incorporación de condiciones en la frontera y el ensamblaje de la matriz del sistema también se hacen un poco más complicada cuando la técnica del elemento finito se aplica a problemas en dos o tres dimensiones.

Solución.- La deducción de la matriz del elemento y la dificultad para encontrar la solución está más relacionada con la mecánica del proceso que con la complejidad conceptual.

2.5 PROGRAMACIÓN

2.5.1 Introducción

Los programas computacionales son únicamente conjuntos de instrucciones que dirigen a la computadora para realizar una cierta tarea.

Visto de esta perspectiva, reducimos toda esa complejidad a unos cuantos tópicos de programación que son:

Representación de información sencilla (declaración de constantes, variables y tiempos).

Representación de información más compleja (estructuras de datos, arreglos y registros).

Fórmulas matemáticas (asignación, reglas de prioridad y fundamentos intrínsecas).

Entrada/Salida.

Representación lógica (secuencia, selección y repetición).

Programación modular (funciones y subrutinas).

Se pretende usar el Matlab, escribiendo archivos M(M-files), porque es un programa que permite ampliar su capacidad con suficientes herramientas para desarrollar programas.

2.5.2 Programación estructurada

La idea clave detrás de la programación estructurada es que cualquier algoritmo numérico requiere tan solo de tres estructuras de control fundamentales: secuencia, selección y

repetición. Limitándonos a dichas estructuras el programa resultante será claro y fácil de seguir.

Los algoritmos se expresan a través de pseudocódigos que constituyen un puente de unión entre los diagramas de flujo y el código de la computadora. En esta técnica se utilizan expresiones semejantes a las del código, en lugar de los símbolos gráficos del diagrama de flujo. Resultando más fácil desarrollar un programa con el pseudocódigo que con el diagrama de flujo.

El pseudocódigo es también más fácil de modificar y de compartir con los demás. Se empleará el diagrama de flujo con fines didácticos, y el pseudocódigo será el principal medio que se usará para comunicar algoritmos relacionados con métodos numéricos.

2.5.2.1 Programación en Matlab

Matlab tiene diferentes funciones y operadores que permiten la adecuada realización de los métodos numéricos. Fue desarrollada originalmente como un laboratorio para matrices. Hoy, el elemento principal de Matlab sigue siendo la matriz. La manipulación matemática de matrices se ha realizado muy adecuadamente en un ambiente interactivo fácil de utilizar. A esta manipulación matricial, Matlab agrega varias funciones numéricas, cálculos simbólicos y herramientas para visualización. En consecuencia, la versión actual representa un ambiente computacional bastante amplio.

2.5.2.2 Métodos de optimización

La optimización matemática intenta dar una respuesta a un tipo de general de problemas donde se desea elegir el mejor valor entre un conjunto de elementos con el fin de minimizar o maximizar el valor de una función llamada función objetivo. La función objetivo que se desea minimizar o maximizar depende de las variables que se desean optimizar en el problema. Es decir, se trata de calcular o determinar el valor mínimo o el valor máximo de la función objetivo, modificando los valores de las variables de las causas hasta encontrar el valor buscado de esta. Es preciso considerar las restricciones que se tengan en el problema, ya que éstas generan igualdades entre las variables que permiten la obtención de los valores buscados para la función que se quiere minimizar o maximizar.

Su aplicación dentro de la ingeniería va de la mano con el análisis inverso. Este tipo de problema tiene como objetivo determinar las propiedades de los materiales, en base a los resultados obtenidos en ensayos de laboratorio o mediciones en campo.

2.6 MEZCLAS ASFÁLTICAS

El presente trabajo muestra el proceso requerido para el diseño de una mezcla asfáltica en caliente, utilizando la metodología Marshall, con la explicación detallada del procedimiento.

Se presenta un análisis de los diagramas de fases, donde se muestran los diferentes componentes de la mezcla y sus propiedades, tanto en peso como en volumen.

2.6.1 Dosificación por el método Marshall

El método Marshall de dosificación de mezclas asfálticas en caliente fue desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos en 1943, para el diseño y control de mezclas de pavimento bituminoso en el campo, debido en parte a que el método puede utilizar equipo portátil. Fue el producto final de una extensa investigación de pruebas de tránsito y de estudios de correlación que desarrollo criterios para el diseño de mezclas.

El método Marshall, solo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentos que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm o menor.

Este procedimiento de dosificación (AASHTO T245 o ASTM D1559) tiene por objeto determinar las proporciones de los materiales a partir del cumplimiento de una cierta granulometría específica de agregados y, fundamentalmente, de la obtención del contenido óptimo de asfalto. Para ello se apoya en el análisis de las propiedades de la mezcla asfáltica en caliente, y establece parámetros mecánicos y volumétricos que fundamentan sus principios: estabilidad y fluencia Marshall, densidades y contenidos óptimos de vacíos que deben cumplirse en la mezcla durante la fase de formulación y en los procesos constructivos de pavimentos.

2.6.2 Caracterización y criterios de aceptación de los materiales.

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

Para el diseño de mezclas asfálticas, se debe cumplir con la caracterización mediante ensayos establecidos por las normas AASHTO y ASTM, como se muestra en las siguientes tablas.

Tabla 2. 1 Ensayos de laboratorio normalizados para agregados

Ensayos de laboratorio para agregados	Norma	Propósito
Granulometría	AASHTO T27 ASTMC136	La determinación de la composición granulométrica de un material pétreo que pretende emplear en la elaboración de la carpeta asfáltica es de primordial importancia porque en función de ellas se conoce de antemano que clase de textura tendrá la carpeta
Desgaste	AASHTO T96 ASTMC131	El objeto es conocer la calidad del material pétreo desde el punto de vista de su desgaste, ya sea por el grado de alteración del agregado, o por la presencia de planos débiles y aristas de fácil desgaste. Esta característica esencial cuando el agregado va a estar sujeto a desgaste por abrasión como en el caso de los pavimentos. Es la medida de dureza de los agregados y nos da una idea de la forma en la que se comportan los agregados, bajo los efectos de la abrasión causada por el tráfico además de la idea del grado de intemperismo que poseen los agregados
Sanidad usando Sulfato de sodio	AASHTO T104 ASTMC88	Permite obtener la información de estabilidad de un agregado bajo la acción de agentes atmosféricos. Los agregados inestables (se disgregan ante la presencia de condiciones atmosféricas desfavorables) resultan evidentemente insatisfactorios como agregados para mezcla en rodadura en pavimentos, especialmente cuando estos tendrán una gran porción de su superficie expuesta a los agentes atmosféricos, el valor del error permisible no debe ser mayor de 0.5%
Equivalente de arena	AASHTO T176 ASTM 2419	Descubre el exceso de arcilla en los agregados, ya que es un medio rápido para separar las partículas más finas (arcillosas) de los granos más gruesos o de la arena.
Cubicidad de las partículas	ASTM D692	se utiliza para determinar valores como el índice de laja y la cubicidad de las partículas que componen el material pétreo. Las partículas de los agregados, deben ser limpias, duras, resistentes y durables por lo que debe evitarse partículas débiles quebradizas o laminadas ya que son perjudiciales.
Gravedad específica y absorción del agregado grueso y fino	AASHTO T84	La gravedad específica aparente se refiere a la densidad relativa del material sólido de las partículas constituyente, no se incluye aquí los espacios vacíos que contienen las partículas los cuales son accesibles al agua. El valor de absorción es usado para calcular el cambio en el peso de un agregado provocado por el agua absorbida en los poros accesibles de las partículas que constituyen el material comparado con la condición seca cuando se evalúa el comportamiento del agregado con el agua durante un periodo largo tal, que se logre alcanzar el valor potencial de absorción del mismo.
	AASHTO T85	
	ASTM C-127	
	ASTM C-128	
Peso unitario y vacíos	AASHTO T 19 ASTM 29M	En la practica el valor de peso unitario es muy utilizado para realizar conversiones de volúmenes a pesos de los agregados a utilizar en las mezclas de asfalto. La dosificación optima de mezclas de agregado para mezclas de superficie en pavimentos puede realizarse utilizando el método de pesos unitarios, el cual consiste en elaborar una gráfica (parecida al del proctor) en el cual se grafica las proporciones de los agregados en las abscisas y los pesos unitarios en las ordenadas

Fuente: Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transporte
ASSTHO

2.6.3 Graduación del agregado y tamaño máximo

La graduación del agregado influye sobre los vacíos en el agregado mineral (V.A.M), los vacíos de aire, estabilidad y densidad de las mezclas. Afectando la trabajabilidad, segregación y compactación de las mismas.

El filler que es el material natural de la fracción más fina de los agregados que pasan el tamiz N° 200, se usa para cumplir con condiciones de granulometría, pero, además, aportan a la consistencia del medio ligante, siendo que un exceso del mismo determinaría una rigidización indeseada de la mezcla.

Los tamaños máximos mayores, se utilizan en las capas de base. Cuando mayor es el tamaño máximo de las partículas del concreto asfáltico, menor es el porcentaje en peso de cemento asfáltico a utilizar.

2.6.4 Composición granulométrica

La metodología Marshall utiliza una gráfica semilogarítmica para definir la granulometría permitida, en la cual en la ordenada se encuentra el porcentaje de material que pasa cierta malla, en la abscisa las aberturas de las mallas en mm graficadas en forma logarítmica.

2.6.4.1 Tamaño máximo nominal

Se define como la abertura de la malla inmediatamente superior al que retiene cierto porcentaje de material. Esta magnitud es la que se toma para definir a la mezcla por el tamaño del agregado y así definir cuáles son las curvas granulométricas a exigir.

2.6.4.2 Curvas límite

La selección de una curva granulométrica para el diseño de una mezcla asfáltica cerrada o densa, está en función de dos parámetros; el tamaño máximo nominal del agregado y el de las líneas de control (superior e inferior), las líneas de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica. La Tabla 2.2 representa los tamaños máximos nominales más utilizados, así como sus líneas de control de acuerdo con la norma ASTM D3515.

Tabla 2. 2 Graduaciones propuestas para mezclas cerradas (ASTM D3515)

Abertura de malla	Mezclas cerradas								
	Tamaño máximo nominal del agregado								
	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N° 4	N° 8	N° 16
	50mm	37.5mm	25mm	19mm	12.5mm	9.5mm	4.75mm	2.36mm	1.18mm
Graduaciones para mezclas de agregado (grueso, fino, filler)									
2 1/2" (63mm)	100	....	....	....	....	....	....	....	....
2" (50mm)	90-100	100	....	....	....	....	....	....	....
1 1/2" (37.5mm)	....	90-100	100	....	....	....	....	....	....
1" (25mm)	60-80	....	90-100	100	....	....	....	....	....
3/4" (12.5mm)	....	56-80	....	90-100	100	....	....	....	....
1/2" (12.5mm)	35-65	....	56--80	....	90-100	100	....	....	....
3/8" in(9.5mm)	....	....	....	56-80	....	90-100	100	....	....
N° 4 (4.75mm)	17-47	23-63	29-59	36-56	44-74	56-86	80-100	....	100
N° 8 (2.36mm)	10-36	16-41	19-46	23-49	28-58	32-67	65-100	....	95-100
N° 16 (1.18mm)	....	....	....	....	....	....	40-80	....	85-100
N° 30 (600 Mm)	....	....	....	....	....	....	35-65	....	70-95
N° 50 (300 Mm)	3-15	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23	7-40	....	45-75
N° 100 (150 Mm)	....	....	....	....	....	....	3--20	....	20-40
N° 200 (75 Mm)	0-5	0--6	1--7	2--8	2-10	2-10	2-10	....	9-20
	Asfalto, Porcentaje con respecto al peso total de la mezcla								
	2-7	3-8	3-9	4-10	4-11	5-12	6-12	7-12	8-12

Fuente: Aspectos del diseño volumetrico de mezclas asfálticas Instituto Americano del Transporte

La norma IRAM 1505 para el diseño de mezclas asfálticas clasifica los tipos de asfalto en densa (D), semidensa (S), gruesa (G) con un tamaño máximo nominal de agregados de 20mm de acuerdo a la Tabla 2.3.

Tabla 2. 3 Granulometría para mezclas densas, semidensas y gruesas

Tamices	Usos granulométricos				
	% Que pasa en peso				
	CAC D-20	CAC S-20	CAC S-25(*)	CAC G-20(*)	CAC G-25(*)
1 1/2" (40 mm)			100		100
1" (25 mm)	100	100	80—95	100	78--95
3/4" (19 mm)	83--100	83--100	72—87	80--100	67--84
3/8" (9.5 mm)	60--75	58--74	52—68	51--67	43--60
N° 4 (4.75 mm)	45--60	42--57	36—52	33--48	28--44
N° 8 (2.36 mm)	33--47	29--44	26—40	22-37	20--34
N° 30 (0.6 mm)	17--29	14--24	13—24	9--20	8--19
N° 50 (0.3 mm)	12--21	9--18	9—18	5--14	5--14
N° 200 (0.075 mm)	5--8	4--8	4—8	2--4	2--4
(*) Estos usos granulométricos no deben utilizarse en mezclas para carpetas de rodamiento					

Fuente: Aspecto del diseño volumetrico de mezclas asfálticas Instituto Americano del Transporte

En las mezclas densas y semidensas, que son el objetivo del método Marshall, las curvas resultantes suelen mostrar una forma de “S” estirada y oblicua. El concepto es que los vacíos que dejan las partículas más gruesas sean colmatados en forma razonable por las más finas, a fin de obtener un tenor de Vacíos del Agregado Mineral VAM que permita introducir un porcentaje de ligante con el cual se optimicen las propiedades deseables de la mezcla y un porcentual de vacíos remanente que cumpla con los límites impuestos y se supone son los valores máximos y mínimos recomendables para la mezcla que se está formulando.

2.6.5 Características del cemento asfáltico

El ligante asfáltico a utilizar en una obra depende principalmente de condiciones climáticas, necesitándose ligantes más consistentes o viscosos en regiones cálidas y, contrariamente, ligantes más blandos (menos viscosos) en zonas frías. Como se especifica.

Tabla 2. 4 Ensayos normalizados para el asfalto

Ensayos de asfalto	Norma	Propósito
Viscosidad	AASHTO 201 ASTM D2170	En el diseño de mezclas asfálticas, las temperaturas de mezclado y compactación se definen en función a la viscosidad que posee el cemento asfáltico, ya que la trabajabilidad que el asfalto tenga dentro de esta misma a una temperatura determinada de trabajo. Este ensayo se usa para clasificar los cementos asfálticos a viscosidad 60° mide la consistencia de los cementos asfálticos.
Penetración	AASHTO T49 ASTM D5	Clasifica los asfaltos en grados según su dureza o consistencia medida en decimas de milímetro. Valores altos de penetración, indicaran consistencias suaves.
Punto de inflamación	AASHTO T48 ASTM D92	Tiene por propósito, identificar la temperatura a la cual el asfalto puede ser manejado y almacenado sin peligro que se inflame. El punto de inflamación se mide por el ensayo en copa abierta Cleveland.
Ductilidad	AASHTO T51 ASTM D113	Provee de una medida de las propiedades al estiramiento de los cementos asfálticos y el valor resultante puede ser usado como criterio de aceptación del material asfáltico ensayad. Se considera la ductilidad como la capacidad que tiene el asfalto de resistir esfuerzos de estiramiento bajo condiciones de velocidad y temperatura específica.
Punto de reblandecimiento	AASHTO T53 ASTM D36	La temperatura determinada como de reblandecimiento, representa aquella a la cual un cemento asfáltico alcanzara un determinado estado de fluidez, existiendo consecuentemente una pérdida de consistencia del mismo. El punto de reblandecimiento es una prueba de resistencia a la deformación del cemento asfáltico y además es también una prueba de viscosidad
Ensayo de flotación	AASHTO T53 ASTM D139	Esta prueba caracteriza el comportamiento al flujo o consistencia de ciertos materiales bituminosos, que por su bajo grado de dureza no pueden ser ensayados utilizando el método de penetración. Este ensayo es utilizado para medir la consistencia del residuo de destilación de los asfaltos rebajados de fraguado lento.
Solubilidad en tricloroetilena	AASHTO T44 ASTM D2042	Este ensayo indica la porción de constituyentes cementos activos en el asfalto ensayado es decir se utiliza para medir la pureza del asfalto.
Peso específico	AASHTO T228	El peso específico de un cemento asfáltico no se indica normalmente en las especificaciones de la obra pero existen dos razones por las cuales se debe conocer su valor: Las medidas de peso específico proveen un patrón para efectuar correcciones de temperatura-volumen. Es esencial en la determinación del porcentaje de vacíos de un pavimento compactado. Se determina normalmente por el método del picnómetro.
	AASHTO T85	
	AASHTO T84	
Endurecimiento y envejecimiento	AASHTO T51 ASTM D113	Se tiene por propósito exponer una o varias muestras a condiciones similares ocurridas durante las operaciones de plantas de mezclado en caliente.

Fuente: Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transporte

ASSTHO

2.6.6 Especificaciones de la metodología

La selección del contenido óptimo de asfalto depende de muchos criterios. Un punto inicial para el diseño es escoger el porcentaje de asfalto para el promedio de los límites de vacíos de aire, el cual es 4% en la mayoría de los casos. Todas las propiedades medidas y calculadas bajo este contenido de asfalto deberán ser evaluadas comparándolas con los criterios para el diseño de mezclas en la Tabla 2.5. Si todos los criterios se cumplen, entonces se tendrá el diseño preliminar de la mezcla asfáltica, en caso de que un criterio no se cumpla, se necesitaría hacer ajustes, o rediseñar la mezcla.

Una práctica habitual es fabricar probetas con 4.0%, 4.5%, 5.0%, 5.5% y 6.0%, aunque el rango de pruebas estará finalmente determinado en base a la experiencia previa que se tenga con los agregados disponibles y el tipo de mezcla a formular.

Tabla 2. 5 Criterios de diseño de mezclas Marshall

Método Marshall	Tráfico ligero		Tráfico medio		Tráfico pesado	
	Carpeta y Base		Carpeta y Base		Carpeta y Base	
Criterio de mezcla	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Compactación, número de golpes en cada uno de los especímenes.	35		50		75	
Estabilidad, (N) (lb)	3336		5338		8006	
	750	.....	1200	.....	1800	.....
Flujo, (0.25mm)(0.01in)	8	18	8	16	8	14
Porcentaje de vacíos	3	5	3	5	3	5
Porcentaje de Vacíos en los agregados minerales	Ver tabla 2.6					
Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto	70	80	65	78	65	75

Fuente: Aspectos del diseño volumetrico de mezclas asfálticas Instituto Americano del Transporte.

Tabla 2. 6 Mínimo porcentaje de vacíos de agregado mineral

Máximo tamaño de partícula nominal		Porcentaje mínimo VAM		
		Porcentaje diseño vacíos de aire		
mm	pulg.	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	1"	11	12	13
37.5	1 1/2"	10	11	12

Fuente: Aspectos del diseño volumetrico de mezclas asfálticas Instituto Americano del Transporte.

2.6.7 Procedimiento del ensayo

a.- Preparación para efectuar los procedimientos Marshall

Como es conocido, diferentes agregados y asfaltos presentan diferentes características, que tienen un impacto directo sobre la naturaleza misma de la mezcla. El primer paso es determinar las cualidades que se necesita en una determinada mezcla asfáltica y posteriormente seleccionar el tipo de agregado con un tipo de compatible de asfalto.

b.- Selección de las muestras de material

La primera preparación para los ensayos consta de reunir muestras del asfalto y del agregado que van a ser usados en la mezcla. Es importante que las muestras tanto de asfaltos como de agregados tengan características idénticas a las que se usarán en planta.

c.- Preparación del agregado

El procedimiento preliminar se enfoca en identificar las características del agregado haciendo un análisis granulométrico y determinación del peso específico. Se debe tantear diferentes porcentajes de agregado, hasta encontrar la combinación que se adecue a la faja de trabajo.

Se prepara un número determinado de muestras de agregado, por contenido de asfalto, para elaborar un punto en la curva de dosificación Marshall.

d.- Preparación de las muestras de ensayo

Las briquetas son elaboradas con diferentes porcentajes de asfalto, siendo el margen de contenido de ligante en las briquetas determinado en base a la experiencia que se tiene con los agregados para determinar el contenido óptimo de asfalto.

El asfalto y el agregado se calientan y se mezclan completamente hasta que todas las partículas del agregado estén revestidas.

La mezcla se coloca en moldes precalentados para ser compactados. El número de golpes de martillo (35, 50, 75) dependerá del tipo de tránsito para el que se diseñe la mezcla.

2.6.8 Determinación de los parámetros físico mecánicos

2.6.8.1 Determinación de las densidades aparentes

La densidad aparente de cada probeta se determina con las probetas compactadas ya desmoldadas estacionadas a temperatura ambiente. Se trata de una medición de peso específico de un sólido. Tal determinación es esencial para un análisis preciso de todos los parámetros volumétricos de interés.

El peso específico total o densidad aparente de cada probeta se obtiene con el peso de la misma en estado seco y calculando su volumen sumergiéndola en agua, previamente acondicionándola para alcanzar un estado de “Saturado y a superficie seca” y pesándola en tal condición, aplicando el Principio de Arquímedes.

Este dato constituye el primer parámetro volumétrico a obtener, que es en sí mismo una característica de la mezcla que se diseña pero que, además, sirve como dato necesario para el cálculo de los porcentajes de Vacíos totales de la mezcla, de los Vacíos del Agregado Mineral VAM y de la Relación Betún Vacíos RBV.

2.6.8.2 Determinación de los vacíos de las series de mezclas

Para obtener los parámetros volumétricos de la mezcla compactada se debe primeramente determinar la densidad máxima de la mezcla.

Hay dos maneras de lograr esa Densidad máxima. La primera, mediante la llamada “Densidad máxima teórica”, suponiendo que en la probeta compactada no existieran vacíos Figura 2.12, se calcula por la fórmula siguiente:

Figura 2. 12 Representación esquemática del agregado



Fuente: Carreteras calles y aeropistas 5ta edición

$$D_{mt} = \frac{100}{\frac{P_1}{P_{eas1}} + \frac{P_2}{P_{eas2}} + \frac{P_3}{P_{eas3}} + \frac{P_4}{P_{ea4}} + \frac{P_5}{P_{ea5}}} \quad (47)$$

Donde:

$P_1, P_2 \dots P_5$ = Porcentajes en peso de los materiales que intervienen en la mezcla total. $P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 = 100$

$P_{eas1}, P_{eas2}, P_{eas3}$ = Peso específico del agregado seco (bulk) de cada uno de los agregados indicados.

P_{ea4} = Peso específico aparente del relleno mineral

P_{ea5} = Peso específico absoluto del asfalto (en general, se utiliza $1,000 \text{ gr/cm}^3$)

La otra manera de determinar la Densidad máxima es mediante el denominado “Ensayo rice”, que consiste en pesar una cierta cantidad de mezcla y determinar su volumen sumergiéndola en agua y aplicando vacío con una bomba para retirar todo el aire de sus huecos. Esta “Densidad máxima rice”, es de empleo habitual en los laboratorios de obra.

Con una u otra densidad máxima, se determinan los Vacíos totales de la mezcla compactada. Para los Vacíos del Agregado Mineral VAM y la Relación Betún-Vacíos RBV se necesita, además, conocer el porcentaje de ligante de la mezcla.

Las probetas contienen vacíos en su interior, que son los huecos de aire que se encuentran entre las partículas de agregado revestidas de asfalto. Al respecto, pueden diferenciarse tres parámetros.

2.6.8.3 Vacíos totales de la mezcla compactada

El porcentaje de vacíos de la mezcla compactada Figura 2.13, $V[\%]$, “Vacíos totales”, para diferenciarlos de los otros parámetros volumétricos que se detallarán posteriormente, se calcula a partir de la densidad aparente de cada probeta compactada y de la densidad máxima o peso específico teórico de la mezcla de pavimentación (sin vacíos). Se expresa en porcentaje del volumen total e indica la diferencia relativa entre la densidad máxima (D_m) y la densidad de la probeta (d).

$$V(\%) = 100\left(1 - \frac{d}{D_m}\right) \quad (48)$$

2.6.8.4 Vacíos de agregado mineral VAM

Los Vacíos en el agregado mineral, están definidos por el espacio intergranular de vacíos que se encuentra entre las partículas de agregado de la mezcla de pavimentación compactada.

Es, en rigor, una especie de “abstracción”, no un estado real. Representa a la mezcla compactada, pero considerando como vacíos no sólo a los huecos de aire sino también al espacio ocupado en ella por el contenido efectivo de asfalto.

Los VAM se expresan como un porcentaje del volumen total de la mezcla compactada.

Es determinado con base en el peso específico total del agregado; puede ser calculado como la suma de los vacíos totales y los vacíos que dejaría el asfalto si pudiese ser quitado de la probeta compactada sin que ésta modificara su apariencia externa.

$$V.A.M. (\%) = V + (d * CA) \quad (49)$$

Donde:

V = Vacíos de la mezcla compactada (%)

d = Densidad de la probeta

CA = Porcentaje en peso del cemento asfáltico total: considerando el peso específico del mismo a 1,000 gr/cm³

2.6.8.5 Vacíos ocupados por el betún

Los vacíos ocupados por el ligante son denominados en nuestra lengua, habitualmente, “Vacíos Ocupados por Betún VOB”.

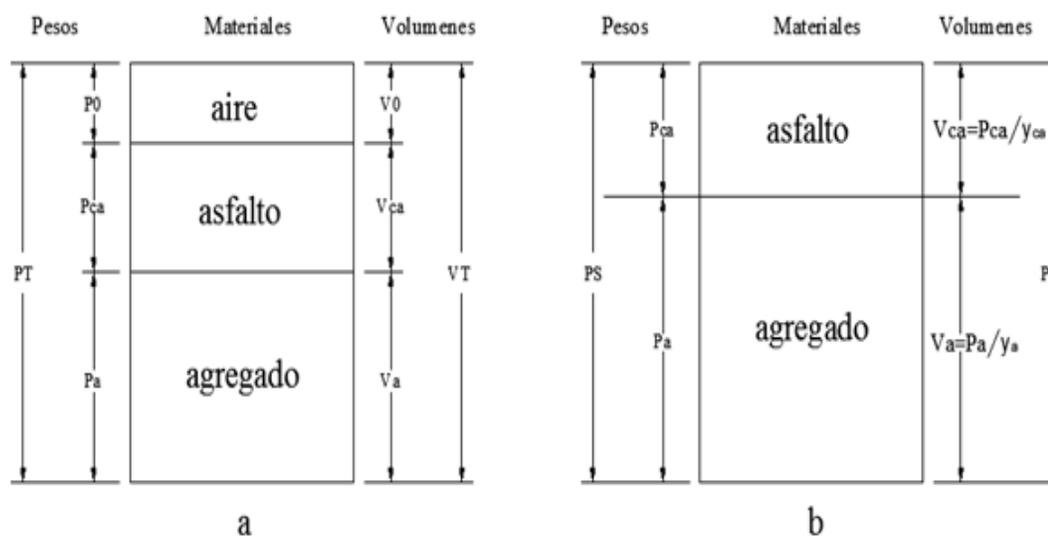
Significan, precisamente, el porcentaje de los vacíos del agregado mineral ocupado por asfalto en la mezcla compactada.

Es decir, los VAM abarcan asfalto y aire, y por lo tanto, los VOB se calculan como la proporción porcentual de los VAM que están efectivamente ocupados por el asfalto, y por eso a este valor se lo llama también como “Relación Betún Vacíos” que, más adecuadamente, debería llamarse “relación entre el volumen ocupado efectivamente por el asfalto y el volumen de los VAM.

$$RBV = \frac{100 * d * CA}{VAM} = \frac{(VAM - V)}{VAM} * 100 \quad (50)$$

Figura 2. 13 Representación esquemática de una mezcla asfáltica

a.- Con su porcentaje de vacíos b.- Sin vacíos de aire



Fuente: Carreteras calles y aeropistas 5ta edición

2.6.8.6 Ensayos de estabilidad y fluencia Marshall

El ensayo mecánico Marshall simula la resistencia de la mezcla compactada a soportar cargas y su comportamiento plástico ante las solicitaciones mediante la maquina Marshall Figura 2.14.

Los parámetros que se obtienen son dos: la “estabilidad” [kg o libras] y la “fluencia” [mm o centésimas de pulgada]; un valor complementario es la razón “estabilidad fluencia” [kg/cm o libras/centésimas de pulgada].

Figura 2. 14 Maquina Marshall



Dispositivo para el ensayo de estabilidad y fluencia Marshall

Fuente: Elaboración propia.

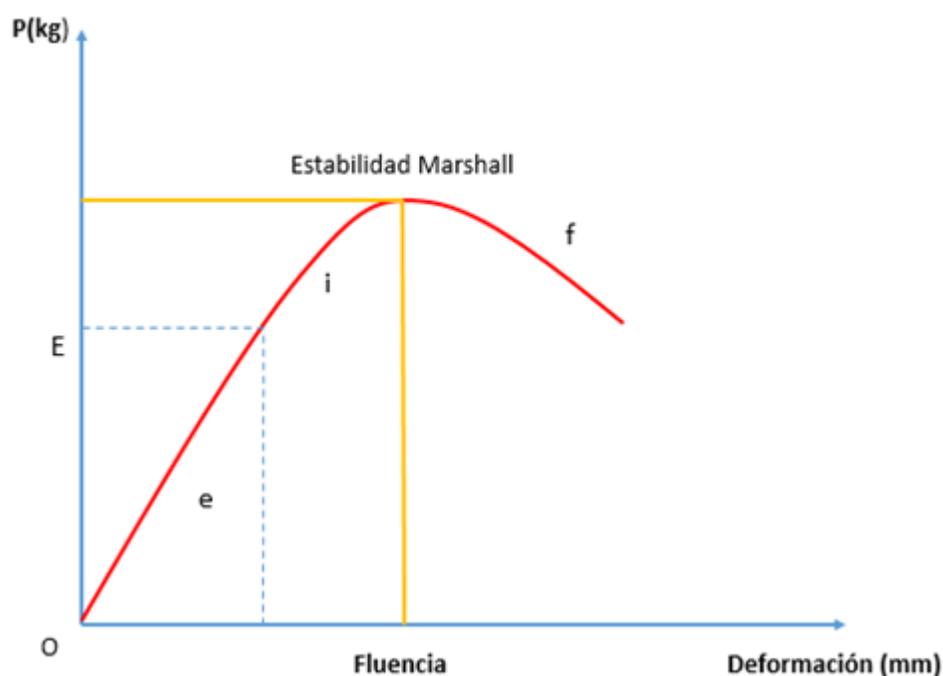
Se define a la Estabilidad como la carga máxima que soporta la probeta, en tanto que la fluencia es la lectura de deformación diametral vertical que se registra en el mismo instante en que se alcanza la carga máxima.

Máxima carga para romper la probeta = Máxima Estabilidad (lbs.)

Deformación para la máxima estabilidad = Flujo (0.01")

La curva de carga – deformación en el ensayo Marshall se observa en el Gráfico 2.1. En la misma se ve que, antes de alcanzarse la carga máxima, aparecen deformaciones plásticas (irrecuperables) con expansión lateral y la falla se produce al vencerse la resistencia cohesiva y friccional que ofrece la probeta.

Gráfico 2. 1 Ensayo de estabilidad y fluencia.



Fuente: Diseño de una mezcla asfáltica en caliente metodo Marshall

Se nota un periodo de comportamiento cuasi-elástico e, existiendo proporcionalidad entre las cargas y las deformaciones hasta el punto indicado como E. Puede considerarse que en el segmento O-E las deformaciones son recuperables por elasticidad instantánea y/o retardada. Luego a partir del punto E y hasta alcanzar la carga máxima indicada en el gráfico como Estabilidad Marshall, la curva toma la forma de una parábola presentando un período elasto-plástico i; las deformaciones son mayores en este período en relación al periodo elástico para iguales incrementos de carga con una pérdida de la reacción

elástica, dado por la diferencia entre la curva real y la prolongación del segmento O-E. El momento en que se llega al máximo es aquél en que se destruye la estructura granular; la mezcla aquí ya se ha dislocado, o sea se ha producido la falla de la misma llegando al máximo valor de corte que puede resistir. Por último la curva presenta un período en que la mezcla fluye plásticamente f , con una deformación de mayor magnitud en la parte descendente de la curva antes de la falla total. La Fluencia Marshall es la deformación en correspondencia con la Estabilidad Marshall.

Debido a que la estabilidad Marshall indica la resistencia de una mezcla a la deformación, existe una tendencia a pensar que es deseable un valor de estabilidad muy alto; esto se debe a que para muchos materiales de ingeniería, la resistencia del material es, frecuentemente, una medida de su calidad, pero sin embargo éste no es necesariamente el caso de las mezclas asfálticas en caliente. Las estabilidades extremadamente altas, corrientemente, se obtienen a costa de durabilidad (envejecimiento prematuro) y/o de flexibilidad. Las mezclas que tienen valores bajos de fluencia y valores muy altos de estabilidad Marshall son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio; mientras que aquéllas que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas y tienen tendencia a deformarse excesivamente bajo las cargas del tránsito. Por todo lo antedicho cobra relevancia la relación estabilidad/fluencia.

2.6.9 Análisis de los resultados del ensayo Marshall

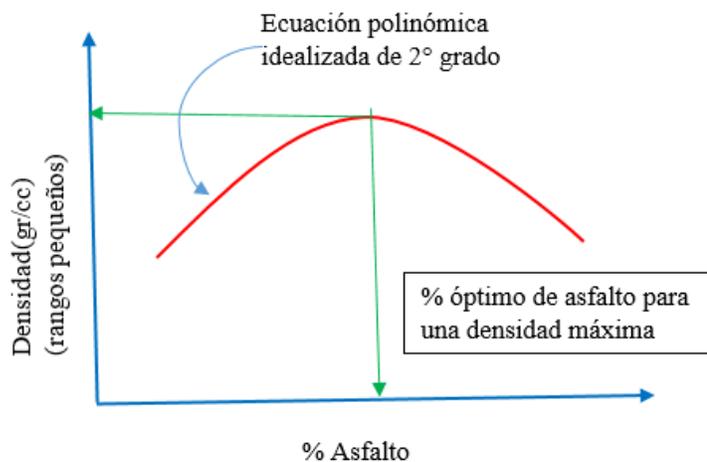
Los técnicos de laboratorio trazan los resultados del ensayo Marshall en gráficas, para poder entender las características particulares de cada brigueta usada en la serie.

Mediante el estudio de las gráficas, ellos pueden determinar la brigueta que mejor cumple los criterios establecidos para la mezcla, por tanto las proporciones de la brigueta se convierten en las proporciones usadas en la mezcla final.

Del análisis de las curvas que Marshall determino, para encontrar el contenido óptimo de asfalto se tiene:

Densidad vs Asfalto %.- Aumenta con el contenido de asfalto hasta un máximo y luego decrece. Gráfico 2.3

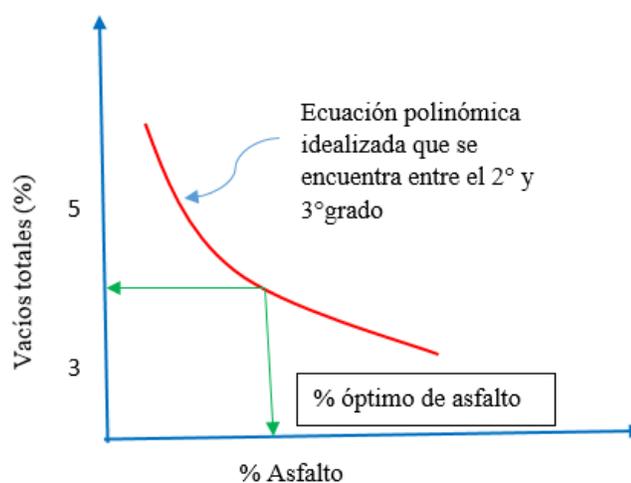
Gráfico 2. 3 Determinación del contenido óptimo de asfalto densidad



Fuente: Elaboración propia

Vacíos totales vs Asfalto %.- El porcentaje de vacíos decrece con el aumento del porcentaje de cemento asfáltico y en las especificaciones establecen que este valor debe estar entre el 5% y 3%. Gráfico 2.4

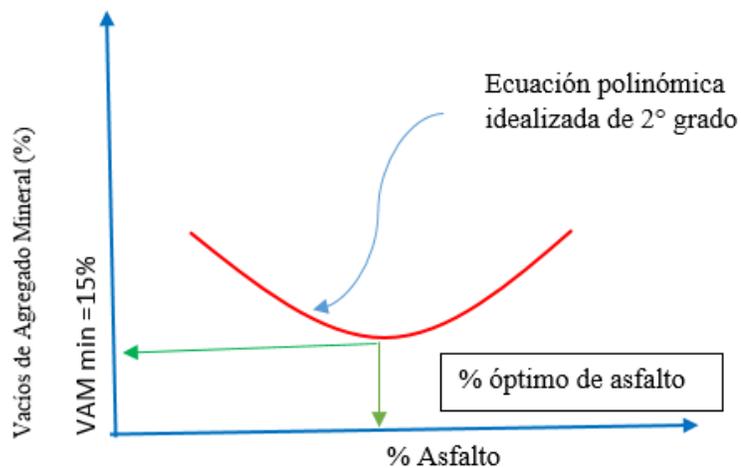
Gráfico 2. 4 Determinación del contenido óptimo de asfalto vacíos totales



Fuente: Elaboración propia

VAM vs Asfalto %.- Decrece hasta un mínimo y luego aumenta para mayores porcentajes de asfalto, las especificaciones establecen un mínimo de 15%. Grafico 2.5

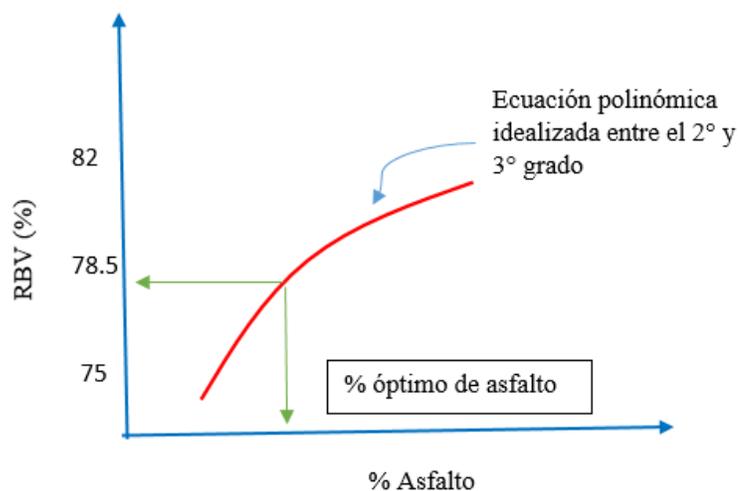
Gráfico 2. 5 Determinación del contenido óptimo de asfalto VAM



Fuente: Elaboración propia

RBV vs % Asfalto.- La relación betum vacios crece con el aumento del porcentaje de asfalto, las especificaciones establecen que este valor debe estar entre el 82% a 75% Gráfico 2.6

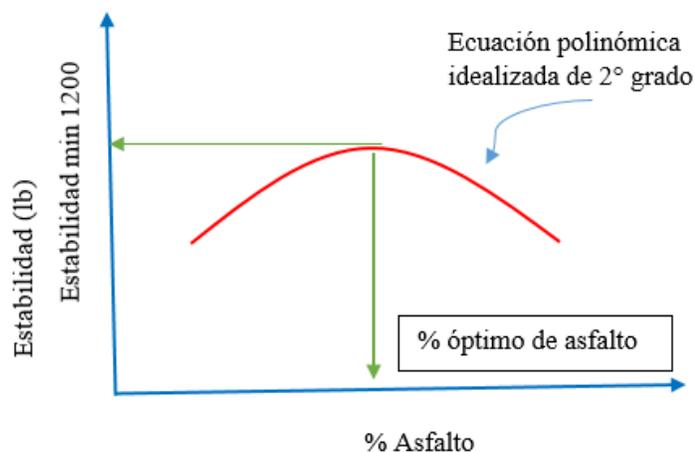
Gráfico 2. 6 Determinación del contenido óptimo de asfalto RBV



Fuente: Elaboración propia

Estabilidad vs Asfalto %.- La estabilidad aumenta con el aumento de cemento asfáltico, hasta un cierto máximo y luego decrece. Las especificaciones establecen que este valor debe ser mínimamente de 1500 lb considerando que una excesiva estabilidad puede ocasionar un envejecimiento prematuro. Gráfico 2.7

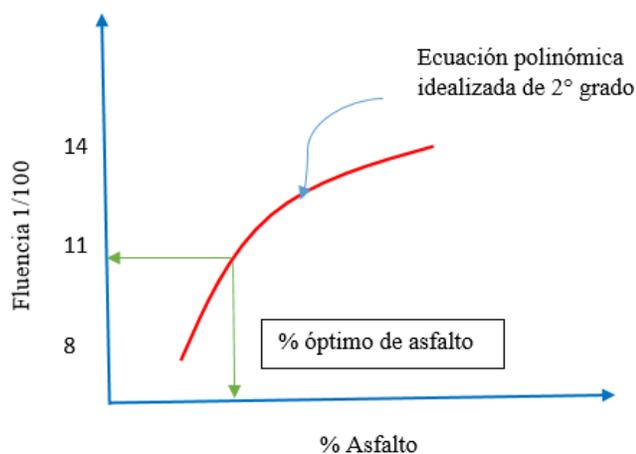
Gráfico 2. 7 Determinación del contenido óptimo de asfalto estabilidad



Fuente: Elaboración propia

Fluencia vs Asfalto %.- La fluencia aumenta con mayores porcentajes de cemento asfáltico observando que una vez alcanzado el óptimo, crece más marcadamente. Según las especificaciones este valor debe estar entre 14mm y 8 mm. Gráfico 2.8

Gráfico 2. 8 Determinación del contenido óptimo de asfalto fluencia



Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO III

ZONAS DE MUESTREO, ANÁLISIS DE LOS
DATOS PROPORCIONADOS, DISEÑO
CONVENCIONAL

CAPÍTULO III

ZONAS DE MUESTREO, ANÁLISIS DE LOS DATOS PROPORCIONADOS, DISEÑO CONVENCIONAL.

3.1 UBICACIÓN DE PLANTAS CHANCADORAS

El muestreo es una de las funciones más importantes en el control, de agregados minerales. Por lo que su obtención debe regirse a normas y procedimientos, buscando que dichas muestras sean lo más representativas.

Los diseños de mezclas asfálticas proporcionados por el SEDECA, fueron realizados con material proveniente de las chancadoras Charajas, Vafercon y Gaucho.

Ubicación satelital – planta asfáltica y chancadora de Charaja

- **Agregados chancados procedentes del Río Camacho ubicado en el lugar de acopio de San José de Charajas (utilizado en el proyecto de asfaltado del tramo Tolomosa – Pampa Redonda del SEDECA Tarija), ubicado en las coordenadas UTM en la latitud sur $21^{\circ} 46' 54.83''$ y la longitud oeste $64^{\circ} 46' 14.12''$.**

Imagen 3. 1 Ubicación satelital planta chancadora Charaja SEDECA



Fuente: Elaboración propia

Ubicación satelital – plantas chancadoras - Gaucho-Vafercon

- Agregados chancados procedentes del Río Tolomosa ubicado en el lugar de acopio de Tolomosa Grande (utilizado en el proyecto de asfaltado del tramo Tolomosa – Pampa Redonda del SEDECA Tarija), ubicada en las coordenadas UTM en latitud sur $21^{\circ} 37' 43.83''$ y longitud oeste $64^{\circ} 46' 17.16''$.

Imagen 3. 2 Ubicación satelital planta chancadora Vafercon-Gaucho



Fuente: Elaboración propia

Ubicación satelital – planta asfáltica y de acopio de materiales – La Pintada

- Agregados chancados procedentes del río Camacho obtenidos del lugar de acopio ubicado en la localidad de la Pintada (utilizado en proyectos de la Honorable Alcaldía Municipal de la Provincia Cercado Tarija), ubicada en las coordenadas UTM en latitud sur $21^{\circ} 36' 15.01''$ y longitud oeste $64^{\circ} 38' 28.20''$.

Imagen 3. 3 Ubicación satelital planta de mezcla asfáltica La Pintada



Fuente: Elaboración propia

3.2 ANÁLISIS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS PROPORCIONADAS

Se analizará la aptitud de los materiales que formaron parte de la mezcla

3.2.1 Planta Vafercon y filler Charaja

3.2.1.1 Características granulométricas

a.- Composición granulométrica

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

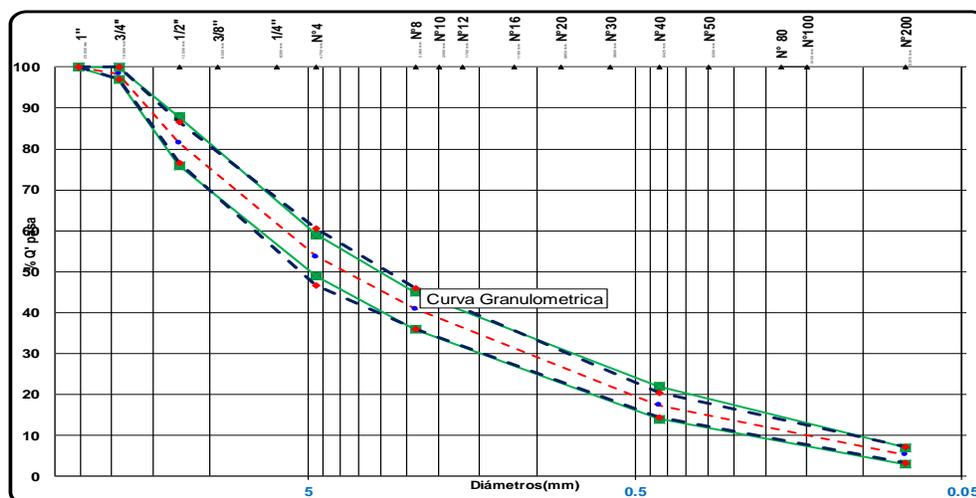
El tamaño máximo de la muestra para el tramo fue de 3/4" y los límites superiores e inferiores son próximos a los dispuestos en la Norma ASTM D3515.

Tabla 3. 1 Planilla de granulometría proyectada

Agregado		Grava trit. 3/4"		Grava trit. 3/8"		Arena trit.		Arena filler		% Que pasa	Faja		Tolerancias (+/-)	Faja	
% Usado		30%		18%		22%		30%			Curva de trabajo			Especif. grad. media	
Tamices		% Total	% Enc.	% Total	% Enc.	% Total	% Enc.	% Total	% Enc.		INF.	SUP.		INF.	SUP.
pulg	mm.														
1"	25.40	100.0	30.0	100.0	18.0	100.0	22.0	100.0	30.0	100.0	100	100	0%	100	100
3/4"	19.10	94.7	28.4	100.0	18.0	100.0	22.0	100.0	30.0	98.4	97	100	0%	97	100
1/2"	12.50	38.5	11.6	100.0	18.0	100.0	22.0	100.0	30.0	81.6	77	87	5%	76	88
3/8"	9.50	14.4	4.3	96.8	17.4	100.0	22.0	100.0	30.0	73.7					
N°4	4.75	1.4	0.4	23.6	4.2	99.2	21.8	90.7	27.2	53.7	47	61	7%	49	59
N°8	2.360	0.9	0.3	7.8	1.4	78.2	17.2	73.5	22.0	40.9	36	46	5%	36	45
N°16	1.180	0.9	0.3	4.5	0.8	55.9	12.3	56.8	17.0	30.4					
N°40	0.425	0.8	0.2	2.8	0.5	25.1	5.5	37.1	11.1	17.4	14	20	3%	14	22
N°80	0.180	0.9	0.3	2.2	0.4	11.6	2.6	26.7	8.0	11.2					
N°200	0.075	0.4	0.1	1.2	0.2	4.1	0.9	13.6	4.1	5.3	3	7	2%	3	7

Fuente: SEDECA Tarija

Imagen 3. 4 Curva granulométrica



Fuente: SEDECA Tarija

b.- Peso específico y absorción del agregado fino

Peso específico seco

Para determinar el peso específico seco se debe alcanzar la condición de muestra saturada con superficie seca con respecto a la muestra seca. El resultado obtenido es de 2.605 gr/cc.

Peso específico saturado con superficie seca

Con el mismo criterio, el peso específico saturado determina la capacidad de absorción con respecto a la humedad de la muestra saturada. El resultado obtenido es de 2.657.

Peso específico aparente

Es el peso que considera que todo el volumen de los vacíos y espacios libres son ocupados, el resultado obtenido es de 2.745.

Porcentaje de absorción

El agua que penetra y es retenida en los vacíos cuando el agregado a sido sumergido en agua por más de 15 hr, se conoce como absorción y esta en referencia al peso de la muestra seca, con un resultado de 1.958%

En los diseños Marshall mayormente se considera el peso específico aparente por las condiciones de absorción que tendrá el agregado, se observa que el ensayo realizado se tomó como promedio el peso específico saturado y aparente producto de la experiencia del laboratorista con el material.

Tabla 3. 2 Determinación del peso específico y absorción del agregado fino

Descripción	Unidad	Arena	Arena	Promedio	
		Chancada - Natural	Chancada - Natural		
Peso Frasco Seco Vacío (u)	grs.	154.8	156.8		
Peso Frasco+Muestra(f)	grs.	466.5	468.6		
Peso Muestra Saturada de Superficie Seca(x=f-u)	grs.	500	500		
Peso Muestra Seca (a)	grs.	490.4	490.5		
Peso Agua (t)	grs.	501.7	498.1		
Peso Muestra + Agua (b)	grs.	813.4	809.9	HORMIGON	ASFALTO
Peso Espec. del Agreg. Seco ($a/((x+t)-b)$)	grs./cm ³	2.604	2.606	2.605	
P. E. A. Saturado Sup. Seco($x/((x+t)-b)$)	grs./cm ³	2.655	2.657	2.656	2.700
Peso Específico Aparente ($a/(a+t)-b$)	grs./cm ³	2.744	2.745	2.745	
% de Absorción $((x-a)/a)*100$	%	1.958	1.937	1.958	1.958

Fuente: SEDECA Tarija

c.- Peso específico y absorción del agregado grueso

El peso específico seco

Se determina después de lavar el material removiendo el polvo y otras sustancias que se adhieren en la superficie de las partículas y secando en el horno a una temperatura de 115

°C. Se considera que los vacíos están llenos de aire, el peso seco del agregado fino es de 2.605.

Peso específico del agregado saturado con superficie seca

El peso específico saturado con superficie seca es el que resulta de sumergir el agregado en agua por un tiempo de 15 hrs el valor obtenido de 2.657 demuestra que los vacíos en el agregado fueron saturados con agua.

Peso específico aparente

Es el peso que considera los poros saturados con el peso del agregado sumergido en el cual el valor determinado en los ensayos de 2.745 es mayor a los anteriores.

En los diseños Marshall mayormente se considera el peso específico aparente por las condiciones de absorción que tendrá el agregado, se observa que el ensayo realizado se tomó como promedio el peso específico saturado y aparente producto de la experiencia del laboratorista con el material.

Porcentaje de absorción

El agua que penetra en los poros de las partículas, cuando se sumerge el agregado en agua durante 15 hrs con respecto al peso seco se denomina absorción, el porcentaje de absorción para la muestra es de 1.267%

Tabla 3. 3 Determinación del peso específico y absorción del agregado grueso

Descripción	Unidad	Grava 3/4"	Grava 3/8"	Promedio	
Peso Muestra Saturada de Superf. Seca (e)	grs.	2491	1799		
Peso Material Seco (f)	grs.	2465	1774		
Peso Muestra + Cesto suspendido en Agua	grs.	1548	1115		
Peso del Cesto suspendido en Agua	grs.	0	0		
Peso Muestra suspendida Agua (g)	grs.	1548	1115	HORMIGON	ASFALTO
Peso Específico del Agregado Seco (f / (e-g))	grs./cm3	2.614	2.594	2.602	
P.E.A. Saturado de Superficie Seca (e/(e-g))	grs./cm3	2.642	2.630	2.636	2.663
Peso Específico Aparente (f/ (f-g))	grs./cm3	2.688	2.692	2.690	
% de Absorción ((e-f)/f)*100	%	1.055	1.409	1.267	1.267

Fuente: SEDECA Tarija

d.- Desgaste de los Ángeles grava

Los áridos gruesos son los que proveen la mayor parte de la estructura granular y resistente de la mezcla por esta razón los desgastes no deben ser mayor al 35% según la norma ASTM. El valor obtenido fue del 20.88% por tanto el agregado es aceptable.

Tabla 3. 4 Resultados desgaste de los Ángeles grava

Pasado	Retenido	Cantidad tomada
3/4"	1/2"	2500
3/4"	3/8"	2500
Retenido tamiz de corte N° 12 (1,7 mm)		3,956
<i>Diferencia</i>		1,044

Fuente: SEDECA Tarija

e.- Desgaste de los Ángeles gravilla

Proporcionan parte de la estructura granular y resistencia de la mezcla, el cual no debe superar el desgaste del 35% según la norma AASHTO, en este caso se determinó un desgaste del 23.96 % por tanto el agregado es aceptable.

Tabla 3. 5 Resultados desgaste de los Ángeles gravilla

Pasado	Retenido	Cantidad tomada
3/8"	1/4"	2500
1/4"	4	2500
Retenido tamiz de corte N° 12 (1,7 mm)		3,802
<i>Diferencia</i>		1,198

Fuente: SEDECA Tarija

f.- Durabilidad método de los sulfatos agregado grueso

Este ensayo sirve para determinar la resistencia y solides del material, el cual puede sufrir pérdidas por desintegración altas que en condiciones reales ocasionarían fallas en la estructura del pavimento, el resultado obtenido de la perdida en peso del material es 1.5%. que no excede al máximo de 12 por tanto es aceptable.

Tabla 3. 6 Resultados método de sulfato de sodio agregado grueso

Granulometría				Peso Materiales		Perdida por	% Pasa al	% Perdida	% Perdida
Tamiz	Tamiz	Tamiz	Material	Antes	Después	Diferencia	Tamiz	Respecto	Respecto
Nº	Pasa	Ret.		Ensayo(Grs.)	Ensayo(Grs.)	(Grs.)	más fino	Tamiz	Muestra Total
2"	2"	1"	100.0	0.0	0.0				
1"	1"	3/4"	98.4	1000.0	992.6	7.4	16.8	0.74	0.12
3/4"	3/4"	1/2"	81.6	1000.0	994.5	5.5	7.9	0.55	0.04
1/2"	1/2"	3/8"	73.7	500.0	493.6	6.4	20.0	1.28	0.26
3/8"	3/8"	Nº 4	53.7	500.0	490.0	10.0	53.7	2.00	1.07
Nº 4	Nº 4	Nº 10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
Nº 10	Nº 10								
Total % pérdida de peso									1.50
Máximo									12.00

Fuente: SEDECA Tarija

g. - Durabilidad método de los sulfatos agregado fino

Este ensayo tiene el mismo objetivo que el realizado para el material grueso determinar la pérdida en peso que sufre el agregado fino, observando que si las pérdidas son altas el material no sería apto para utilizarlo en la mezcla, se determinó un valor de 3.84%. que es menor al máximo de 12 por lo tanto es aceptable.

Tabla 3. 7 Resultado método de sulfato de sodio agregado fino

Granulometría				Peso Materiales		Perdida por	% Pasa al	% Perdida	% Perdida
Tamiz	Tamiz	Tamiz	Material	Antes	Después	Diferencia	Tamiz	Respecto	Respecto
Nº	Pasa	Ret.		Ensayo(Grs.)	Ensayo(Grs.)	(Grs.)	más fino	Tamiz	Muestra total
3/8"	3/8"	Nº 4	53.7	100.0	92.2	7.8	12.8	7.80	1.00
Nº 4	Nº 4	Nº 8	40.9	100.0	93.5	6.5	10.5	6.50	0.68
Nº 8	Nº 8	Nº 16	30.4	100.0	90.2	9.8	13.0	9.80	1.27
Nº 16	Nº 16	Nº 40	17.4	100.0	91.0	9.0	6.2	9.00	0.56
Nº 40	Nº 40	Nº 80	11.2	100.0	88.2	11.8	11.2	11.80	1.32
Nº 80	Nº 80								
Total % pérdida de peso									3.84
máximo									12.00

Fuente: SEDECA Tarija

h.- Ensayo de laminaridad

Con este ensayo se busca determinar si el agregado es muy plano o de formas alargadas que perjudiquen la resistencia de la mezcla asfáltica, el porcentaje máximo de particular laminar debe ser del 15%, los valores obtenidos del material chancado de la planta Vafercon son: 3/4" = 2.6% y 3/8" = 5.14% que son menores al aceptado por lo que cumplen la condición.

Tabla 3. 8 Ensayo de laminaridad material 3/4"

Material	Peso retenido (gr)	Peso retenido partículas laminares (gr)	% Retenido partículas laminares
3/4"	1000	26.0	2.60
Peso total de la muestra	1000		
(% Total de partículas laminares (Máximo 15%))			2.60

Fuente: SEDECA Tarija

Tabla 3. 9 Ensayo de laminaridad material 3/8"

MATERIAL	Peso retenido (gr)	Peso retenido partículas laminares (gr)	% Retenido partículas laminares
3/8"	700	36.0	5.14
Peso total de la muestra	700		
(% Total de partículas laminares (Máximo 15%))			5.14

Fuente: SEDECA Tarija

i.- Ensayo de caras fracturas

Este ensayo determina que el agregado grueso tenga un porcentaje de partículas fragmentadas mecánicamente, mayor al 75 %, con el propósito de darle una mayor estabilidad a la mezcla, los valores obtenidos del material chancado de la planta Vafercon son: 92.2 % y 86 % que son mayores al 75% de partículas fragmentadas aceptadas.

Tabla 3. 10 Resultados del ensayo de caras fracturadas

Ensayo	Lecturas			Promedio	Especificación	
	1	2	3			
Ensayo N°	1	2	3			
Peso total (grs.) (a)	1000					
Peso retenido tamiz N° 8 (grs.) (b)	922					
Caras no fracturadas (grs.) (a-b)	78					
% Caras Fracturadas = (b/a)*100	92.20			92.2	>	75

Fuente: SEDECA Tarija

j.- Ensayo equivalente de arena

Este método establece un procedimiento para determinar las proporciones relativas de finos plásticos o arcillosos que afectan de manera negativa que afectan a la durabilidad y resistencia de la mezcla que debe ser mayor al 45%, el valor obtenido es de 57.6%.

Tabla 3. 11 Resultados del ensayo de equivalente de arena

Ensayo	Lecturas			Promedio	Especificación	
	1	2	3			
Ensayo N°	1	2	3			
Lectura nivel superior	6	5.8				
Lectura nivel inferior	3.4	3.4				
% de arena	56.67	58.62		57.6	>	45

Fuente: SEDECA Tarija

k.- Límites de Atterberg límite líquido

Es el contenido de humedad bajo el cual el suelo pasa de un estado plástico a un estado líquido, el valor determinado es de 15.4.

l.- Límites de Atterberg límite plástico

Es el menor contenido de humedad, bajo el cual el suelo permanece plástico, en este caso no se realizó el límite plástico.

3.2.1.2 Características del cemento asfáltico

Peso específico

Se debe conocer el peso específico del para hacer las correcciones de volumen correspondientes cuando el material se mide a temperaturas elevadas, el valor obtenido es de 1.017 no debiendo superar el máximo de 1.05.

Punto de inflamación

Se determina el punto de inflamación con la copa abierta de Cleveland, para determinar la temperatura de calentamiento de las mezclas asfálticas hasta que estén fluidas, apareciendo un destello que se presenta en cualquier punto de la superficie del material, el valor de la temperatura obtenido es de 253 y este valor debe ser mayor de 232.

Penetración

Se calcula a partir de los valores de penetración a 25°C y punto de ablandamiento, sirve para sacar la curva térmica de asfalto dando una idea de cómo se comporta la viscosidad y fluidez con los cambios de temperatura, el valor promedio obtenido es de 89.3 encontrándose en el rango aceptable 85-100.

Viscosidad saybolt

Es una manera de determinar la viscosidad cinemática del asfalto en un intervalo de temperatura que va desde los 60° a 200°C, se utiliza para medir la manejabilidad del material utilizando diagramas de temperatura vs viscosidad, los cuales sirven para determinar las temperaturas de mezclado, el valor obtenido es de 146.5 debiendo ser el mínimo especificado de 85.

Punto de ablandamiento

Es utilizado para clasificar productos bituminosos y también es un índice de tendencia del material a fluir cuando está sometido a temperaturas elevadas, el material no cambian del estado sólido al líquido a una temperatura definida, sino que gradualmente se tornan más blandos y menos viscosos cuando la temperatura se eleva, el valor obtenido es de 47 °C debiendo estar en un intervalo de 43 y 53 °C.

Tabla 3. 12 Ensayos al cemento asfáltico

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio	Especificaciones	
					Mínimo	Máximo
Peso Picnómetro	grs.	63.02	63.0			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	grs.	132.3	132.3			
Peso Picnómetro + Muestra	grs.	110.2	105.7			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	grs.	133.25	133.1			
Peso Específico	grs./cm ³	1.018	1.016	1.017	1	1.05
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	>254	>253	>254	>232	
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51	cm.			No se realizo	75	
Penetración a 25°C, 100s. 5seg. (0.1mm) AASHTO T-49	Lectura N°1	89	90			
	Lectura N°2	90	88			
	Lectura N°3	90	89			
	Promedio	mm.	89.7	89.0	89.3	85	100
Viscosidad Saybolt 135 °C AASHTO T-72	seg.	148.0	145.0	146.5	85	
Ensayo de la mancha				No se realizo	NEGATIVO	
Solubilidad de Tricloroetileno (g/100g+6%) AASHTO T-44	%			No se realizo	99	
Penetración al residuo de perdida por calentamiento % del original	%			No se realizo	50	
Solvente gasolina standart				No se realizo	NEGATIVO	
Solvente gasolina-xilol, % xilol				No se realizo	NEGATIVO	
Solvente heptano-xilol, % xilol				No se realizo	NEGATIVO	
Perdida por calentamiento	%			No se realizo		1
Ensayo de película delgada en horno, 32 mm, 163°C, 5 hrs.				No se realizo		
* Pérdida en masa	%			No se realizo		
* Penetración del residuo, penetración original	%			No se realizo	47	
Porcentaje de agua	%			No se realizo		0.2
Índice de susceptibilidad térmica				No se realizo	-1	1
Punto de ablandamiento	°C	47.0	46.0	47	43	53

Fuente: SEDECA Tarija

Nota: El informe de las planillas pertenecientes al proyecto Tolomosa – Pampa Redonda se encuentran en el Anexo I

3.2.2 Planta Vafercon, Gaucho y filler Charaja

3.2.2.1 Características granulométricas

a.- Composición granulométrica

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

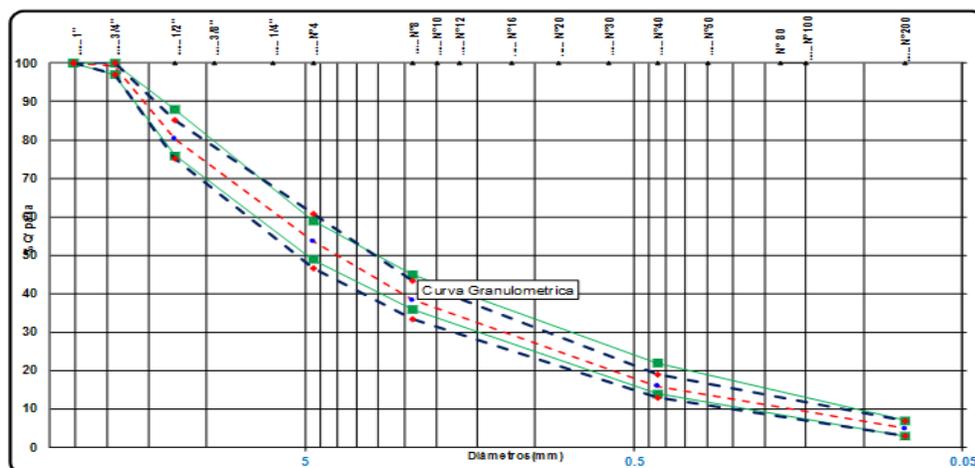
El tamaño máximo de la muestra para el tramo fue de 3/4" y los límites superiores e inferiores son próximos a los dispuestos en la Norma ASTM D3515.

Tabla 3. 13 Planilla de granulometría proyectada

Agregado		Grava - Gaucho		Gravilla - Gaucho		Gravilla - Charaja		Arena - Vafercon		Arena - Charaja		% Que pasa	Faja		Tolerancias (+/-)	Faja			
% Usado		24%		14%		14%		24%		24%			Curva de trabajo	INF.		SUP.		Especif. grad. media	
Tamices		% Total	% Enc.	% Total	% Enc.	% Total	% Enc.	% Total	% Enc.	% Total	% Enc.							INF.	SUP.	INF.	SUP.
pulg.	mm.																		
1"	25.40	100.0	24.0	100.0	14.0	100.0	14.0	100.0	24.0	100.0	24.0	100.0	100	100	0%	100	100		
3/4"	19.10	97.3	23.4	100.0	14.0	100.0	14.0	100.0	24.0	100.0	24.0	99.4	97	100	0%	97	100		
1/2"	12.50	17.9	4.3	100.0	14.0	100.0	14.0	100.0	24.0	100.0	24.0	80.3	75	85	5%	76	88		
3/8"	9.50	4.4	1.1	100.0	14.0	98.6	13.8	100.0	24.0	100.0	24.0	76.8							
N° 4	4.75	0.5	0.1	33.0	4.6	14.7	2.1	99.8	24.0	95.8	23.0	53.8	47	61	7%	49	59		
N° 8	2.360	0.4	0.1	3.0	0.4	2.8	0.4	84.5	20.3	71.5	17.2	38.4	33	43	5%	36	45		
N° 16	1.180	0.3	0.1	1.0	0.1	2.1	0.3	59.5	14.3	54.4	13.1	27.9							
N° 40	0.425	0.3	0.1	0.5	0.1	1.7	0.2	29.7	7.1	35.4	8.5	16.0	13	19	3%	14	22		
N° 80	0.180	0.2	0.1	0.4	0.1	1.4	0.2	14.0	3.4	25.3	6.1	9.7							
N° 200	0.075	0.1	0.0	0.2	0.0	1.0	0.1	4.5	1.1	15.4	3.7	5.0	3	7	2%	3	7		

Fuente: SEDECA Tarija

Imagen 3. 5 Curva granulométrica



Fuente: SEDECA Tarija

b.- Peso específico y absorción del agregado fino

Peso específico seco agregado

Para determinar el peso específico seco se debe alcanzar la condición de muestra saturada con superficie seca con respecto a la muestra seca. El resultado obtenido es de 2.623 gr/cc.

Peso específico saturado con superficie seca

Con el mismo criterio, el peso específico saturado determina la capacidad de absorción con respecto a la humedad de la muestra saturada. El resultado obtenido es de 2.648.

Peso específico aparente

Es el peso que considera que todo el volumen de los vacíos y espacios libres son ocupados, el resultado obtenido es de 2.691.

Porcentaje de absorción

El agua que penetra y es retenida en los vacíos cuando el agregado a sido sumergido en agua por más de 15 hr, se conoce como absorción y está en referencia al peso de la muestra seca, con un resultado de a 0.969%

En los diseños Marshall mayormente se considera el peso específico aparente por las condiciones de absorción que tendrá el agregado, se observa que el ensayo realizado se

tomó como promedio el peso específico saturado y aparente producto de la experiencia del laboratorista con el material.

Tabla 3. 14 Determinación del peso específico y absorción del agregado fino

Descripción	Unidad	Arena Chancada - Natural	Arena Chancada - Natural	Promedio	
Peso Frasco Seco Vacío (u)	grs.	235.5	231.6		
Peso Frasco+Muestra(f)	grs.	422.4	542.5		
Peso Muestra Saturada de Superficie Seca(x=f-u)	grs.	300	500		
Peso Muestra Seca (a)	grs.	297.0	495.4		
Peso Agua (t)	grs.	572.4	573.3		
Peso Muestra + Agua (b)	grs.	759.3	884.2	HORMIGON	ASFALTO
Peso Espec. del Agreg. Seco ($a/((x+t)-b)$)	grs./cm ³	2.626	2.620	2.623	
P. E. A. Saturado Sup. Seco($x/((x+t)-b)$)	grs./cm ³	2.653	2.644	2.648	2.670
Peso Específico Aparente ($a/(a+t)-b$)	grs./cm ³	2.698	2.685	2.691	
% de Absorción $((x-a)/a)*100$	%	1.010	0.929	0.969	0.969

Fuente: SEDECA Tarija

c.- Peso específico y absorción del agregado grueso

El peso específico seco

Se determina después de lavar el material removiendo el polvo y otras sustancias que se adhieren en la superficie de las partículas y secando en el horno a una temperatura de 115 °C. Se considera que los vacíos están llenos de aire, el peso seco del agregado grueso es de 2.578.

Peso específico del agregado saturado con superficie seca

El peso específico saturado con superficie seca es el que resulta de sumergir el agregado en agua por un tiempo de 15 hrs el valor obtenido de 2.610 demuestra que los vacíos en el agregado fueron saturados con agua.

Peso específico aparente

Es el peso que considera los poros saturados con el peso del agregado sumergido en el cual el valor determinado en los ensayos de 2.665 es mayor a los anteriores.

En los diseños Marshall mayormente se considera el peso específico aparente por las condiciones de absorción que tendrá el agregado, se observa que el ensayo realizado se tomó como promedio el peso específico saturado y aparente producto de la experiencia del laboratorista con el material.

Porcentaje de absorción

El agua que penetra en los poros de las partículas, cuando se sumerge el agregado en agua durante 15 hrs con respecto al peso seco se denomina absorción, el porcentaje de absorción para la muestra es de 1.277 %

Tabla 3. 15 Determinación del peso específico y absorción del agregado grueso

Descripción	Unidad	Grava 3/4 - 3/8"	Grava 3/4 - 3/8"	Promedio	
Peso Muestra Saturada de Superf. Seca (e)	grs.	2958	2359		
Peso Material Seco (f)	grs.	2921	2329		
Peso Muestra + Cesto suspendido en Agua	grs.	1824	1456		
Peso del Cesto suspendido en Agua	grs.	0	0		
Peso Muestra suspendida Agua (g)	grs.	1824	1456	HORMIGON	ASFALTO
Peso Específico del Agregado Seco (f / (e-g))	grs./cm3	2.576	2.579	2.578	
P.E.A. Saturado de Superficie Seca (e/(e-g))	grs./cm3	2.608	2.612	2.610	2.638
Peso Específico Aparente (f/ (f-g))	grs./cm3	2.663	2.668	2.665	
% de Absorción ((e-f)/f)*100	%	1.267	1.288	1.277	1.277

Fuente: SEDECA Tarija

d.- Desgaste de los Ángeles grava

Los áridos gruesos son los que proveen la mayor parte de la estructura granular y resistente de la mezcla por esta razón el desgaste no debe ser mayor al 35% según la norma ASTM. El valor obtenido fue del 21.98% por tanto el agregado es aceptable.

Tabla 3. 16 Resultados desgaste de los Ángeles grava

Pasado	Retenido	Cantidad tomada
3/4"	1/2"	2500
1/2"	3/8"	2500
retenido tamiz de corte N° 12 (1,7 mm)		3,901
Diferencia		1,099

Fuente: SEDECA Tarija

f.- Desgaste de los Ángeles gravilla

Proporcionan parte de la estructura granular y resistencia de la mezcla, el cual no debe superar el desgaste del 35% según la norma AASHTO, en este caso se determinó un desgaste del 24.24 % por tanto el agregado es aceptable.

Tabla 3. 17 Resultados desgaste de los Ángeles gravilla

Pasado	Retenido	Cantidad tomada
3/8"	1/4"	2500
1/4"	4	2500
Retenido tamiz de corte N° 12 (1,7 mm)		3,788
Diferencia		1,212

Fuente: SEDECA Tarija

g.- Durabilidad método de los sulfatos agregado grueso

Este ensayo sirve para determinar la resistencia y solides del material, el cual puede sufrir pérdidas por desintegración altas que en condiciones reales ocasionarían fallas en la estructura del pavimento, el resultado obtenido de la pérdida en peso del material es 0.49%, el máximo valor al que se puede llegar es del 12%.

Tabla 3. 18 Resultados método de sulfatos de sodio agregado grueso

Granulometría				Peso Materiales		Perdida por	% Pasa al	% Perdida	% Perdida
Tamiz	Tamiz	Tamiz	Material	Antes	Después	Diferencia	Tamiz	Respecto	Respecto
N°	Pasa	Ret.		Ensayo(Grs.)	Ensayo(Grs.)	(Grs.)	mas fino	Tamiz	Muestra Total
2"	2"	1"	100.0	0.0	0.0				
1"	1"	3/4"	99.4	503.5	500.0	3.5	19.1	0.70	0.13
3/4"	3/4"	1/2"	80.3	400.5	400.0	0.5	3.5	0.12	0.00
1/2"	1/2"	3/8"	76.8	300.0	298.4	1.6	23.0	0.53	0.12
3/8"	3/8"	N° 4	53.8	300.0	298.7	1.3	53.8	0.43	0.23
N° 4	N° 4	N° 10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
N° 10	N° 10								
Total % pérdida de peso									0.49
Máximo									12.00

Fuente: SEDECA Tarija

h.- Durabilidad método de los sulfatos agregado fino

Este ensayo tiene el mismo objetivo que el realizado para el material grueso determinar la pérdida en peso que sufre el agregado fino, observando que si las pérdidas son altas el material no sería apto para utilizarlo en la mezcla, se determinó un valor de 0.68%, el máximo valor al que puede llegar es del 12%.

Tabla 3. 19 Resultados método de sulfato de sodio agregado fino

Granulometría				Peso Materiales		Perdida por	% Pasa al	% Perdida	% Perdida
Tamiz	Tamiz	Tamiz	Material	Antes	Después	Diferencia	Tamiz	Respecto	Respecto
Nº	Pasa	Ret.		Ensayo(Grs.)	Ensayo(Grs.)	(Grs.)	mas fino	Tamiz	Muestra Total
3/8"	3/8"	Nº 4	53.8	300.0	298.7	1.3	15.4	0.43	0.07
Nº 4	Nº 4	Nº 8	38.4	100.0	99.2	0.8	10.5	0.80	0.08
Nº 8	Nº 8	Nº 16	27.9	100.0	99.1	0.9	11.9	0.90	0.11
Nº 16	Nº 16	Nº 40	16.0	100.0	99.4	0.6	6.3	0.60	0.04
Nº 40	Nº 40	Nº 80	9.7	100.0	95.4	4.6	9.7	4.60	0.45
Nº 80	Nº 80								
Total % pérdida de peso									0.68
Máximo									12.00

Fuente: SEDECA Tarija

i.- Ensayo de laminaridad

Con este ensayo se busca determinar si el agregado es muy plano o de formas alargadas que perjudiquen la resistencia de la mezcla asfáltica, el porcentaje máximo de particular laminar debe ser del 15%, los valores obtenidos del material chancado de la planta Vafercon son: 3/4= 7.13% y 3/8= 7.68% que son menores al aceptado por lo que cumplen la condición.

Tabla 3. 20 Ensayo de laminaridad material 3/4"

Material	Peso retenido (gr)	Peso retenido partículas laminares (gr)	% Retenido partículas laminares
3/4"	1000	71.3	7.13
Peso Total de la Muestra	1000		
(%) Total de Partículas Laminare (Máximo 15%)			7.13

Fuente: SEDECA Tarija

Tabla 3. 21 Ensayo de laminaridad material 3/8"

Material	Peso retenido (gr)	Peso retenido partículas laminares (gr)	% Retenido partículas laminares
3/8"	1000	76.8	7.68
Peso Total de la Muestra	1000		
(% Total de Partículas Laminares (Máximo 15%))			7.68

Fuente: SEDECA Tarija

j.- Ensayo de caras fracturas

Este ensayo determina que el agregado grueso tenga un porcentaje de partículas fragmentadas mecánicamente, mayor al 75 %, con el propósito de darle una mayor estabilidad a la mezcla, los valores obtenidos del material chancado de la planta Vafercon son: 95.9 % y 90.7 % que son mayores al 75% de partículas fragmentadas aceptadas.

Tabla 3. 22 Resultados del ensayo de caras fracturada

Ensayo	Lecturas			Promedio	Especificación	
	1	2	3			
Ensayo n°						
Peso total (grs.) (a)	1000					
Peso retenido tamiz n° 8 (grs.) (b)	956					
Caras no fracturadas (grs.) (a-b)	44					
% Caras Fracturadas = (b/a)*100	95.60			95.6	>	75

Fuente: SEDECA Tarija

k.- Ensayo equivalente de arena

este método establece un procedimiento para determinar las proporciones relativas de finos plásticos o arcillosos que afectan de manera negativa que afectan a la durabilidad y resistencia de la mezcla que debe ser mayor al 45%, el valor obtenido es de 53.5%.

Tabla 3. 23 Resultados del ensayo de equivalente de arena

Ensayo	Lecturas			Promedio	Especificación	
	1	2	3			
Ensayo N°						
Lectura nivel superior	7.2	5.5	7.1			
Lectura nivel inferior	3.4	3.6	3.4			
% de arena	47.22	65.45	47.89	53.5	>	45

Fuente: SEDECA Tarija

3.2.2.2 Características del cemento asfáltico

Peso específico

Se debe conocer el peso específico del para hacer las correcciones de volumen correspondientes cuando el material se mide a temperaturas elevadas, el valor obtenido es de 1.008 no debiendo superar el máximo de 1.05.

Punto de inflamación

Se determina el punto de inflamación con la copa abierta de Cleveland, para determinar la temperatura de calentamiento de las mezclas asfálticas hasta que estén fluidas, apareciendo un destello que se presenta en cualquier punto de la superficie del material, el valor de la temperatura obtenido es de 263 y este valor debe ser mayor de 232.

Penetración

Se calcula a partir de los valores de penetración a 25°C y punto de ablandamiento, sirve para sacar la curva térmica de asfalto dando una idea de cómo se comporta la viscosidad y fluidez con los cambios de temperatura, el valor promedio obtenido es de 92.2 encontrándose en el rango aceptable 85-100.

Viscosidad saybolt

Es una manera de determinar la viscosidad cinemática del asfalto en un intervalo de temperatura que va desde los 60° a 200°C, se utiliza para medir la manejabilidad del material utilizando diagramas de temperatura vs viscosidad, los cuales sirven para determinar las temperaturas de mezclado, el valor obtenido es de 156 debiendo ser el mínimo especificado de 85.

Punto de ablandamiento

Es utilizado para clasificar productos bituminosos y también es un índice de tendencia del material a fluir cuando está sometido a temperaturas elevadas, los materiales no cambian del estado sólido al líquido a una temperatura definida, sino que gradualmente se tornan más blandos y menos viscosos cuando la temperatura se eleva, el valor obtenido es de 43 °C debiendo estar en un intervalo de 43 y 53 °C.

Tabla 3. 24 Ensayos al cemento asfáltico

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio	Especificaciones	
					Mínimo	Máximo
Peso Picnómetro	grs.	61.99	62.0			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	grs.	142.78	142.8			
Peso Picnómetro + Muestra	grs.	106.92	110.9			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	grs.	143.33	143.3			
Peso Específico	grs./cm ³	1.009	1.007	1.008	1	1.05
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	>265	>264	>263	>232	
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51	cm.			No se realizo	75	
Penetración a 25°C, 100s. 5seg. (0.1mm) AASHTO T-49	Lectura N°1	93	91			
	Lectura N°2	95	91			
	Lectura N°3	91	92			
	Promedio	mm.	93.0	91.3	92.2	85	100
Viscosidad Saybolt 135 °C AASHTO T-72	seg.	157.0	155.0	156.0	85	
Ensayo de la mancha				No se realizo	NEGATIVO	
Solubilidad de Tricloroetileno (g/100g+6%) AASHTO T-44	%			No se realizo	99	
Penetración al residuo de perdida por calentamiento % del original	%			No se realizo	50	
Solvente gasolina standart				No se realizo	NEGATIVO	
Solvente gasolina-xilol, % xilol				No se realizo	NEGATIVO	
Solvente heptano-xilol, % xilol				No se realizo	NEGATIVO	
Perdida por calentamiento	%			No se realizo		1
Ensayo de película delgada en horno, 32 mm, 163°C, 5 hrs.				No se realizo		
* Pérdida en masa	%			No se realizo		
* Penetración del residuo, penetración original	%			No se realizo	47	
Porcentaje de agua	%			No se realizo		0.2
Índice de susceptibilidad térmica				No se realizo	-1	1
Punto de ablandamiento	°C	43.5	42.5	43	43	53

Fuente: SEDECA Tarija

Nota: El informe de las planillas pertenecientes al proyecto Tolomosa – Pampa Redonda se encuentran en el Anexo I.

3.3 DISEÑO DE MEZCLAS CONVENCIONAL

3.3.1 Criterios de diseño

El método Marshall se aplica a mezclas asfálticas en caliente que usan un cemento asfáltico clasificado con su viscosidad o penetración y que contienen agregados con tamaño máximo de 25mm asignando su importancia a las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla.

Este método de dosificación tiene como primer paso la caracterización de los materiales para definir su capacidad o no para formar parte de la mezcla a formular

El análisis de las propiedades debe asegurar que las proporciones de la mezcla estén dentro de los rangos adecuados para asegurar una mezcla duradera. Determinando el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados, estableciendo densidades, contenidos de vacíos, estabilidades y fluencias de acuerdo a las características del tráfico.

3.3.2 Ensayos de Caracterización de los Agregados

Para realizar la caracterización de los agregados utilizado en la elaboración de la mezcla asfáltica, se utilizó el laboratorio de asfaltos de la UAJMS donde se realizaron los ensayos de granulometría, peso específico, peso unitario, desgaste de los ángeles y equivalente de arena.

3.3.2.1 Granulometría

Inicialmente se efectúa un muestreo para el agregado grueso mediante el cuarteo que consiste colocar a la muestra en el separador para obtener una muestra representativa que abarque el mayor tamaño de partículas

La muestra escogida de agregado grueso se coloca en una bandeja para determinar la masa de la bandeja y la muestra.

Tomando la muestra, se coloca sobre los tamices de 1", 3/4", 1/2", 3/8", N° 4, N° 10, N° 40, N° 80, N° 200, inmediatamente con movimientos circulares facilitamos que el agregado pueda retenerse o pasar en cada uno de los tamices. Los resultados del ensayo se dan en porcentajes del peso total del agregado que pasa cada tamiz de dimensiones

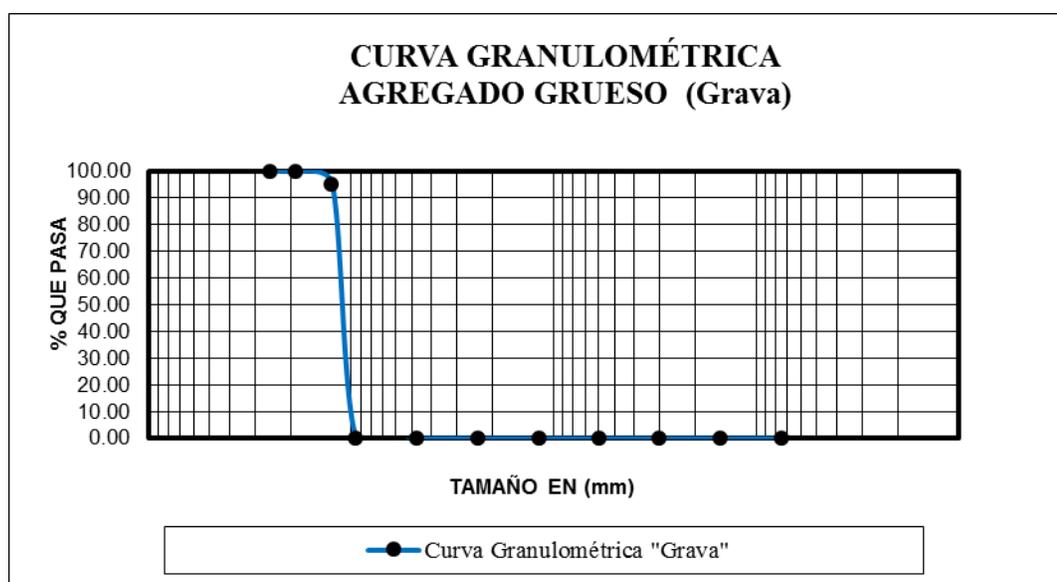
conocidas, para lo cual se pasan las respectivas cantidades retenidas y sumadas en forma acumulativa a las anteriores de tamaño mayor, estos pesos acumulados se dividen para el peso total de la muestra ensayada y se multiplica por 100. La diferencia a 100 de cada uno de estos porcentajes acumulados nos da el porcentaje que deja pasar el tamiz correspondiente, los resultados de este ensayo se pueden ver en la Tabla 3.25

Tabla 3. 25 Granulometría material grueso

Peso Total (gr.)					3000
Tamices pulg	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% Que pasa del total
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.0	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.5	138.18	138.18	4.61	95.39
3/8"	9.50	2861.81	2999.99	100.00	0.00
Nº4	4.75	0.00	2999.99	100.00	0.00
Nº8	2.36	0.00	2999.99	100.00	0.00
Nº16	1.18	0.00	2999.99	100.00	0.00
Nº30	0.60	0.00	2999.99	100.00	0.00
Nº50	0.30	0.00	2999.99	100.00	0.00
Nº100	0.15	0.00	2999.99	100.00	0.00
Nº200	0.075	0.00	2999.99	100.00	0.00
Base	-	0.00	2999.99	100.00	0.00

Fuente: Elaboración propia

Figura 3. 1 Curva granulométrica grava



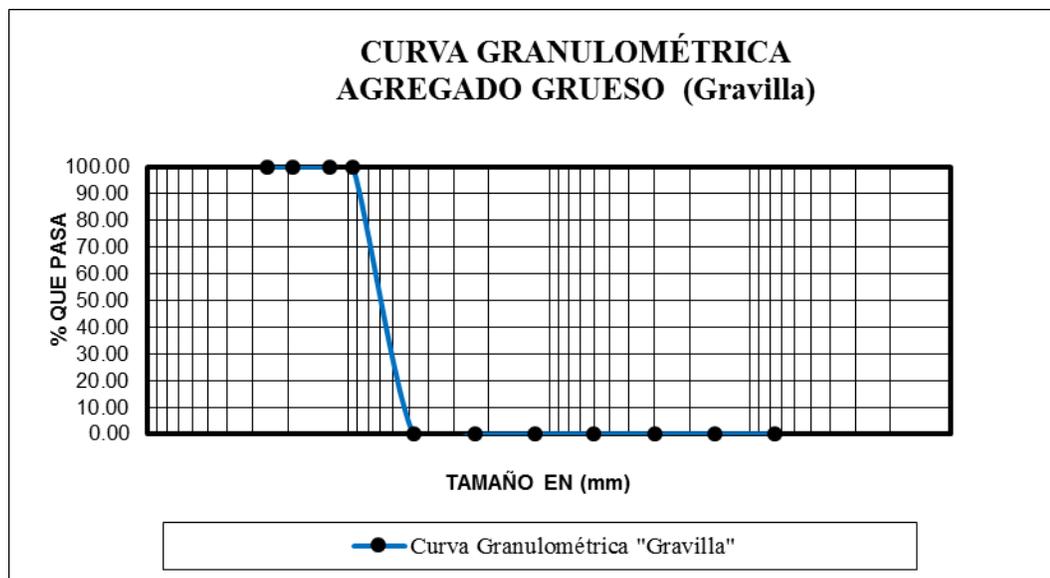
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 26 Granulometría gravilla

Peso Total (gr.)					3000
Tamices pulg	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% Que pasa del total
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.0	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.5	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.50	3.60	3.60	0.12	99.88
Nº4	4.75	2995.40	2999.00	99.97	0.03
Nº8	2.36	0.00	2999.00	99.97	0.03
Nº16	1.18	0.00	2999.00	99.97	0.03
Nº30	0.60	0.00	2999.00	99.97	0.03
Nº50	0.30	0.00	2999.00	99.97	0.03
Nº100	0.15	0.00	2999.00	99.97	0.03
Nº200	0.075	0.00	2999.00	99.97	0.03
Base	-	0.00	2999.00	99.97	0.03

Fuente: Elaboración propia

Figura 3. 2 Curva granulométrica gravilla



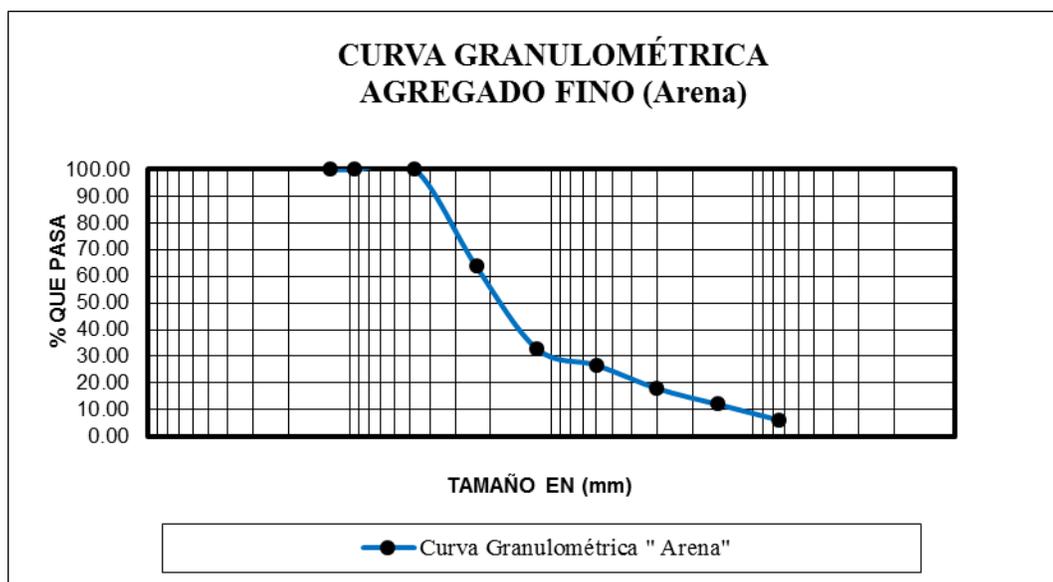
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 27 Granulométrica material fino (Arena)

Peso Total (gr.)					3000
Tamices pulg	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% Que pasa del total
1/2"	12.5	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.50	0.00	0.00	0.00	100.00
Nº4	4.75	0.00	0.00	0.00	100.00
Nº8	2.36	1088.60	1088.60	36.29	63.71
Nº16	1.18	924.20	2012.80	67.09	32.91
Nº30	0.60	182.20	2195.00	73.17	26.83
Nº50	0.30	262.00	2457.00	81.90	18.10
Nº100	0.15	177.80	2634.80	87.83	12.17
Nº200	0.075	176.60	2811.40	93.71	6.29
BASE	-	188.20	2999.60	99.99	0.01

Fuente: Elaboración propia

Figura 3. 3 Curva Granulométrica material fino



Fuente: Elaboración propia

3.3.2.2 Peso específico

Se comienza por mezclar completamente el agregado, cuarteándolo, hasta obtener aproximadamente la cantidad mínima necesaria para el ensayo, en este caso el tamaño máximo nominal de 1/2", la muestra se lava con agua hasta eliminar completamente el polvo u otras sustancias extrañas adheridas a la superficie de las partículas; se seca a

continuación en un horno a 100°C y se enfría al aire a la temperatura ambiente durante 1 a 3 horas. Una vez fría se pesa, repitiendo el secado hasta lograr el peso constante, se sumerge en agua, también a temperatura ambiente, durante 24 horas. Después del periodo de inmersión, se saca la muestra del agua y se secan las partículas rodándolas sobre un paño absorbente de gran tamaño, hasta que se elimine el agua superficial visible, secando individualmente los fragmentos mayores. Se tomarán las precauciones necesarias para evitar cualquier evaporación de la superficie de los agregados. A continuación, se determina el peso de la muestra en el estado de saturada con superficie seca.

Continuando, se coloca la muestra en el interior de la canastilla metálica y se determina su peso sumergido en agua a temperatura ambiente. La canastilla y la muestra deben quedar completamente sumergidas y el hilo de inmersión debe ser lo más delgado posible para que su inmersión no afecte a la medición. Se seca la muestra en el horno a 100°C, se enfría con el aire a la temperatura ambiente durante 1 a 3 horas y se determina su peso seco hasta que su peso sea constante.

Tabla 3. 28 Peso específico del agregado grueso

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	2.49	2.53	2.59	1.65
2	2.47	2.51	2.58	1.70
3	2.49	2.52	2.58	1.47
Promedio	2.48	2.52	2.58	1.61

Fuente: Elaboración propia

3.3.2.3 Desgaste de los Ángeles

El ensayo de desgaste de los ángeles determina el desgaste de los agregados para determinar su aplicabilidad en las mezclas asfálticas, cuando son sometidos a los efectos del tráfico de los vehículos. El procedimiento que se sigue es el siguiente:

Para el material 1”

Se determinó en base a la granulometría, que el material correspondía al tipo “A”. en base a estos resultados se siguió con el siguiente procedimiento:

Se pesó 1666 kg de material retenido en el tamiz de 3/4" y pasante el de 1".

Se pesó 1666 kg de material retenido en el tamiz de 1/2" y pasante el de 3/4".

Se pesó 1600 kg de material retenido en el tamiz de 3/8" y pasante el de 1/2"

Tabla 3. 29 Desgaste de los Ángeles material de 1"

Datos de laboratorio		
Gradación A		
Pasa tamiz	Retenido tamiz	Peso retenido
1 1/2"	1"	-
1"	3/4"	1666.5
3/4"	1/2"	1666.3
1/2"	3/8"	1666.8

Fuente: Elaboración propia

Se introduce el material combinado dentro del tambor con 11 bolas, y someter el material a 500 revoluciones.

Obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 3. 30 Resultados de la prueba

Gradación	Peso inicial	Peso final	% De desgaste	Especificación ASTM
A	4999.6	3593.4	28.13	35% MAX

Fuente: Elaboración propia

El resultado es satisfactorio y el agregado es apto para la elaboración de la mezcla.

Para el material de 3/8"

Se determinó en base a la granulometría, que el material correspondía al tipo "C", en base a estos resultados se siguió con el procedimiento del ensayo:

Se pesó 4995 kg de material retenido en el tamiz N°4 y pasante el 1/4".

Tabla 3. 31 Desgaste de los Ángeles material de 3/4"

Datos de laboratorio		
Gradación C		
Pasa tamiz	Retenido tamiz	Peso retenido
3/8"	1/4"	-
1/4"	Nº4	4995.3

Fuente: Elaboración propia

Se introduce el material combinado dentro del tambor con 11 bolas, y someter el material a 500 revoluciones.

Tabla 3. 32 Resultados de la prueba

I	Peso inicial	Peso final	% De desgaste	Especificación ASTM
C	4995.3	3791.5	24.10	35% MAX

Fuente: Elaboración propia

El resultado es satisfactorio y el agregado es apto para la elaboración de la mezcla.

3.3.2.4 Equivalente de arena

Con el ensayo de equivalente de arena se pretende determinar las proporciones de arena y arcilla presentes en el agregado fino en la elaboración de mezclas asfálticas, para la realización del ensayo, con el siguiente procedimiento:

Se tamiza el material, separando las partículas que quedan retenidas en el tamiz N° 4 y trabajando solamente con el material pasante.

En una probeta se vierten 4 pulgadas de solución (cloruro de calcio combinado con agua destilada)

Se vierte una tara con una cantidad determinada de arena (aproximadamente 350 gr) tamizada en el N°4

Se deja reposar 5 minutos, y posteriormente se agita durante 30 sg, con la finalidad de que las partículas de arcilla sean suspendidas completamente en la solución.

Se agrega solución hasta completar las 15 pulgadas, haciendo que toda la arena pegada en las paredes y el corcho de goma, caigan hasta el fondo, dejando reposar durante 20 min.

Después de observar una evidente separación entre el material fino y la arena, se leen los resultados en la escala graduada de la probeta en pulgadas y se repite el procedimiento 3 veces.

Tabla 3. 33 Equivalente de arena

N° de muestra	H1	H2	Equivalente de arena (%)
	(cm)	(cm)	
1	9.9	10.60	93.40
2	11.3	12.15	93.00
3	10.8	11.70	92.31
Promedio			92.90

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 34 Resultados de la prueba

Equivalente de Arena (%)	Norma
92.90	> 50%

Fuente: Elaboración propia

El resultado es satisfactorio y el agregado es apto para la elaboración de la mezcla.

3.3.3 Ensayo de caracterización del cemento asfáltico

3.3.3.1 Viscosidad

Para el ensayo de viscosidad se realizó el siguiente procedimiento:

Se debe obtener un valor estable de temperatura a 135°C.

Se calienta el cemento asfáltico, sobre el calefactor eléctrico a una temperatura entre 80 y 100°C, de manera que una vez colocado el asfalto en el viscosímetro se caliente rápidamente y no demore mucho tiempo en alcanzar la temperatura de ensayo (135°C)

Se agita la muestra y posteriormente se filtra con un tamiz N° 100, para cuidar el viscosímetro de cualquier obstrucción posible a causa de impurezas en el asfalto

Se inserta el tapón de corcho en el agujero inferior del viscosímetro, con la finalidad de mantener el asfalto dentro hasta que alcance la temperatura adecuada.

Se vierte el cemento asfáltico dentro del viscosímetro, hasta que el nivel queda por encima del borde de reboce.

Se agita la muestra dentro del viscosímetro con el termómetro de viscosidad, con movimientos circulares y cuidando de no votar el asfalto fuera del vaso. Cuando la temperatura de la mezcla permanece constante a la temperatura de ensayo (± 0.05 °C) durante un minuto de agitación continua se retira el termómetro.

Se verifica que el matraz se encuentra en la posición adecuada; se retira el corcho de la parte inferior del viscosímetro y en ese momento se hace funcionar el cronometro

Obteniendo los siguientes resultados

Tabla 3. 35 Resultados viscosidad

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Viscosidad Cinemática 135 °C	mm ² /s	325	297	318	313	250	-

Fuente: Elaboración propia

3.3.3.2 Punto de inflamación

Para realizar el ensayo se sigue el siguiente procedimiento:

Se lava la copa del ensayo con gasolina para remover cualquier aceite o residuo de asfalto de un ensayo anterior

Se coloca el termómetro en posición vertical, cuidando de que el extremo inferior este a 6.4 mm del fondo de la copa y localizado en un punto medio entre el centro y la pared misma

Se llena la copa con el cemento asfáltico, cuidando que la temperatura no exceda los 100°C para que el asfalto pueda verterse. Hasta el punto en el que la parte superior del menisco quede en la línea de llenado.

Se coloca la copa en posición, cuidando el espacio entre el extremo inferior del termómetro y el fondo de la copa.

Se enciende la llama del mechero, aplicando calor inicialmente de manera que la el incremento de temperatura de la muestra sea de 14° a 17°C por minuto, cuando la

temperatura se aproxime a los 160 °C se disminuye el calor de manera que el incremento se redujo a un rango constante entre 5° a 6°C por minuto, hasta alcanzar el punto de inflamación.

Cuando la temperatura se aproxime a los 210 °C se aplica la llama de ensayo, una vez por cada aumento de 2°C, en un tiempo de barrido a través de la copa de aproximadamente 1 segundo.

Cuando la temperatura se aproxima a los 230°C, se debe tener la precaución de no aproximarse bruscamente, o respirar cerca de la copa.

Se registra el punto de inflamación, la lectura del termómetro cuando aparece la llama sobre la superficie de la copa, producto de los gases emitidos del asfalto.

Obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 3. 36 Resultados del punto de inflamación

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	>280	>290	>295	>288	>232	-

Fuente: Elaboración propia

3.3.3.3 Penetración

Este ensayo se realiza de acuerdo al siguiente procedimiento:

Se calienta el asfalto de manera homogénea para verterlo en los moldes, cuidando que la temperatura de calentamiento previo no exceda los 100°C al punto de ablandamiento.

Se llenan los moldes de manera que la profundidad de llenado sea de por lo menos 10 mm mayor al rango de penetración esperado.

Se dejan enfriar los moldes a temperatura ambiente para alcanzar entre 20 y 30°C durante un periodo de 2 horas.

Se coloca los moldes en un baño de agua a una temperatura de 25°C, manteniendo esta temperatura entre 1 y 2 horas.

En el equipo de penetración se verifica que el vástago de la aguja este limpio y seco, deslizándose de manera libre sin rozamiento sobre la guía. La aguja de penetración debe limpiarse con gasolina y fijarla firmemente al soporte.

Una vez instalado el equipo, se aproxima la aguja del penetrometro hasta que la aguja toque la superficie de la muestra, se verifica que el penetrometro se encuentre en cero soltando la aguja y midiendo el tiempo.

Por último, se lee la distancia en decimas de milímetro, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 3. 37 Resultados ensayo de penetración

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C, 100s. 5seg.(0.1mm) AASHTO T-49	Lectura N°1	92	94	98			
	Lectura N°2	97	93	95			
	Lectura N°3	91	99	92			
	Promedio	mm.	93	95	95	95	85	100

Fuente: Elaboración propia

3.3.3.4 Ductilidad

El ensayo de ductilidad se realizó de acuerdo al siguiente procedimiento

Se calienta el cemento asfáltico hasta que sea manejable.

Se preparan las probetas cubiertas de vaselina para evitar que el cemento se prenda en las paredes

Se llena los moldes con mucho cuidado sin hacer rebalsar, evitando la inclusión de burbujas.

Se deja enfriar las probetas a temperatura ambiente durante 30 min, posteriormente se los introduce a un baño de agua a una temperatura de 25°C durante 90 min.

Concluyendo se quita los moldes y se realiza el ensayo estirando el asfalto con unas pinzas hasta que se produzca la rotura.

Obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 3. 38 Resultados de la ductilidad

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51	cm.	115	105	107	109	>100	-

Fuente: Elaboración propia

3.3.3.5 Peso específico

Se limpia el picnómetro y su tapón con el líquido de limpieza, enjuagando con agua destilada y secándolo, realizando esta operación de limpieza antes de cada calibración.

Después del secado, se deja que el picnómetro alcance la temperatura ambiente y se pesa el picnómetro vacío. Se llena el picnómetro con agua destilada, colocando suavemente el tapón, sin apretarlo. Se sumerge completamente el picnómetro en el vaso y se aprieta el tapón, no debiendo quedar burbujas de aire ocluidas en el picnómetro en esta operación. El vaso con el picnómetro se vuelve a colocar en el baño de agua a 25 °C. Se deja el picnómetro en el interior del vaso por un lapso de 30 min, se saca del agua e inmediatamente se seca la superficie del tapón pasando suavemente y una sola vez un paño seco por la misma, continuando se seca rápidamente el resto del picnómetro y se lo pesa con una aproximación de 0.1 mg. Peso del picnómetro lleno de agua.

Preparación de la muestra.- Calentar con cuidado la muestra, agitándola para evitar sobrecalentamientos locales hasta que llegue a ser suficientemente fluida para que pueda ser vertida.

Se debe verter una cantidad de muestra suficiente dentro del picnómetro limpio y seco previamente calentado, llenándolo hasta 3/4” de su capacidad, tomando en cuenta que se debe evitar el contacto con las paredes del picnómetro por encima del nivel final.

Se deja enfriar el picnómetro con su contenido hasta la temperatura ambiente durante un periodo no menor de 40 minutos y pesándolo con el tapón con aproximación a 0.1mg. Peso del picnómetro con la muestra

Posteriormente se llena el picnómetro que contiene el asfalto con agua destilada, colocando firmemente el tapón en el picnómetro. No deben permitirse burbujas de aire en

el picnómetro. Colocando firmemente el picnómetro en el vaso y apretando firmemente el tapón.

Retornar luego el vaso al baño de agua a 25 °C.

Obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 3. 39 Peso específico

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Peso Picnómetro	grs.	38.0	36.9	38.0			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	grs.	62.7	62.0	62.7			
Peso Picnómetro + Muestra	grs.	55.8	56.5	56.2			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	grs.	62.8	62.3	62.9			
Peso Específico	grs./cm ³	1.003	1.013	1.008	1.008	1	1.05

Fuente: Elaboración propia

3.3.4 Procedimiento para el diseño Marshall en laboratorio

Para realizar la mezcla asfáltica se utiliza la siguiente dosificación:

Tabla 3. 40 Resumen del material para la mezcla asfáltica

	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla					
	4.0%	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	6.5%
Porcentaje de Agregado (%)	96.0%	95.5%	95.0%	94.5%	94.0%	93.5%
Peso del Cemento Asfáltico (gr)	48.00	54.00	60.00	66.00	72.00	78.00
Peso de Grava (gr)	288.00	286.50	285.00	283.50	282.00	280.50
Peso de Gravilla (gr)	288.00	286.50	285.00	283.50	282.00	280.50
Peso de Arena (gr)	576.00	573.00	570.00	567.00	564.00	561.00
Peso total de la briqueta (gr)	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia

Realizadas las braguetas se hace el procedimiento para determinar: peso específico total, análisis de la densidad, contenido de los vacíos de la bragueta, medición de la estabilidad y fluencia.

A continuación, se detalla el diseño de mezclas asfálticas con el proceso completo del ensayo Marshall.

Paso 1: Para realizar la mezcla asfáltica primeramente se debe pesar el agregado de acuerdo a nuestra dosificación por cada porcentaje de cemento asfáltico. El agregado debe introducirse en el horno para que al momento de dosificar tenga la misma temperatura.

Imagen 3. 6 Muestra calentada al horno



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3. 7 Preparación de la muestra de asfalto



Fuente: Elaboración propia

Paso 2: Una vez listo el material se alistar los equipos e instrumentos que se emplearan, en este caso se necesita los anillos que estén limpios y calientes, juntamente con el martillo compactador para la compactación de las briguetas.

Imagen 3. 8 Anillos calentados y limpios para la muestra



Fuente: Elaboración propia

Paso 3: Teniendo el material y equipo listo se procede a la dosificación de la mezcla.

- En la hornilla eléctrica se coloca el recipiente añadiendo y pesando el agregado con el cemento asfáltico, se mezcla con la ayuda de una cuchara hasta que la mezcla sea homogénea, controlando la temperatura no sea mayor a 150°C

Imagen 3. 9 Mezclado de los materiales y control de temperatura



Fuente: Elaboración propia

Paso 4: Obtenida la mezcla se la introduce en el anillo, compactando con la varilla para que el material se acomode, los anillos deben ser cubiertos con un papel filtro para que la mezcla no se adhiera al martillo ni la base. Se darán 75 golpes por cara.

Imagen 3. 10 Vaciado de la mezcla en la probeta



Fuente: Elaboración propia

Paso 5: Después que se compacto las briguetas se espera a que enfríen por 2hrs para después sacarlas de los moldes con la ayuda de una prensa hidráulica.

Imagen 3. 11 Desmoldado de las probetas



Fuente: Elaboración propia

Paso 6: Se toma el peso de las briguetas, después se las sumerge por 5 min y se toma el peso con superficie seca, posteriormente se sumerge una por una y se toma el peso sumergido.

Imagen 3. 12 Peso de la muestra seca



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3. 13 Peso de la muestra sumergida



Fuente: Elaboración propia

Paso 7: Pasado un lapso de 24 hrs se procede a poner las briguetas en un baño maría con una temperatura aproximada de 60°C durante 15 min para posteriormente llevarlas al equipo Marshall.

Imagen 3. 14 Rotura de probetas en la máquina Marshall



Fuente: Elaboración propia

El siguiente resumen muestra los resultados obtenidos en laboratorio.

	UNIVERSIDAD AUTONOMA JUAN MISAEI SARACHO FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFIA Y VIAS DE COMUNICACIÓN CARRERA DE INGENIERIA CIVIL (TARIJA-BOLIVIA) LABORATORIO DE ASFALTOS	
	PROYECTO: “Análisis de la simulación del ensayo Marshall con la metodología del elemento finito”	
	TEMPERATURA DE MEZCLADO 160 ° C	FECHA: OCTUBRE DE 2016
	PROCEDENCIA DEL AGREGADO: ALCALDÍA MUNICIPAL TARIJA		LABORATORISTA: Univ. Marco Antonio Valda Estrada

PESOS ESPECÍFICOS		% de agregado
Mat. Retenido Tamiz N° 4	2.60	50
Mat. Pasa Tamiz N° 4	2.67	50
Peso Especifico Total	2.63	100

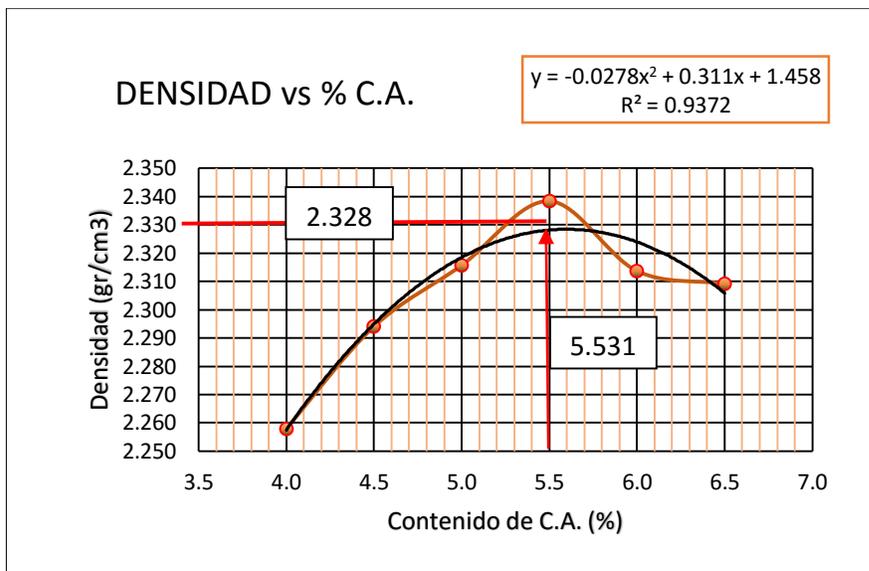
NUMERO DE GOLPES 75	
CEMENTO ASFALTICO BETUNEL 85-100	
PESO ESPECIFICO DEL LIGANTE AASHTO T-228	1.0080

Agregado	P.E.	%
Grava	2.58	25
Gravilla	2.61	25
Arena	2.67	50
Filler	0	0

N° de probeta	altura de probeta	% de Asfalto		Peso Briqueta			Volumen probeta	Densidad Briqueta			% de Vacíos			Estabilidad Marshall				Fluencia			
		base Mezcla	base Agregados	seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua		densidad real	Densidad promedio	densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla	V.A.M.(vacíos agregado)	R.B.V. (relación betun)	lectura del dial	carga	factor de corrección de altura	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial real	fluencia real	Fluencia promedio
		%	%	grs.	grs.	grs.		cc	grs/cm3	grs/cm3	grs/cm3	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	-	-	0,01 pulg
1	6.72	4.00	4.17	1186.4	1198.2	673.5	524.7	2.26	2.26	2.47	8.68	17.64	50.78	593	1578.6	0.918	1448.37	1419	220	0.087	8.53
2	6.70			1192.5	1197.5	669.8	527.7	2.26						545	1449.4	0.923	1337.03		200	0.079	
3	6.64			1193.5	1198.0	668.2	529.8	2.25						591	1573.2	0.936	1472.07		230	0.091	
4	6.70	4.50	4.71	1193.5	1195.6	676	519.6	2.30	2.29	2.45	6.52	16.76	61.09	725	1934.1	0.923	1784.17	1812	225	0.0886	8.73
5	6.58			1192.5	1194.6	675.6	519.0	2.30						744	1985.2	0.947	1879.81		210	0.0827	
6	6.59			1194.0	1198.2	676.2	522.0	2.29						703	1874.8	0.945	1771.7		230	0.0906	
7	6.64	5.00	5.26	1194.2	1198.2	683.5	514.7	2.32	2.32	2.44	4.93	16.42	69.97	828	2211.4	0.936	2069.22	2137	240	0.0866	9.06
8	6.58			1188.0	1192.2	678.2	514.0	2.31						895	2391.8	0.947	2264.83		240	0.0945	
9	6.52			1190.2	1194.5	680.5	514.0	2.32						812	2168.3	0.958	2077.48		230	0.0906	
10	6.48	5.50	5.82	1188.6	1192.6	688.4	504.2	2.36	2.34	2.42	3.28	16.04	79.56	954	2550.7	0.968	2467.81	2387	245	0.0965	9.97
11	6.58			1184.6	1188.2	681.6	506.6	2.34						912	2437.6	0.947	2308.18		255	0.1004	
12	6.55			1190.0	1192.2	679.2	513.0	2.32						937	2504.9	0.953	2385.95		260	0.1024	
13	6.50	6.00	6.38	1189.5	1192.2	679	513.2	2.32	2.31	2.40	3.59	17.36	79.31	865	2311.1	0.963	2224.39	2230	290	0.1142	10.04
14	6.45			1185.2	1192.6	678.6	514.0	2.31						898	2399.9	0.975	2339.92		245	0.0965	
15	6.47			1187.1	1190.2	678	512.2	2.32						821	2192.6	0.970	2126.79		230	0.0906	
16	6.47	6.50	6.95	1176.2	1180.4	670.2	510.2	2.31	2.31	2.38	3.08	17.97	82.88	753	2009.5	0.970	1949.17	1780	295	0.1161	11.94
17	6.42			1180.2	1182.6	672.2	510.4	2.31						678	1807.5	0.983	1775.87		305	0.1201	
18	6.38			1183.6	1184.9	672.5	512.4	2.31						611	1627.1	0.993	1614.88		310	0.1220	
ESPECIFICACIONES				mínimo							3	15	75				1200			8	
				máximo							5	-	82				-			16	

3.3.4.1 Resultados de la mezcla asfáltica convencional

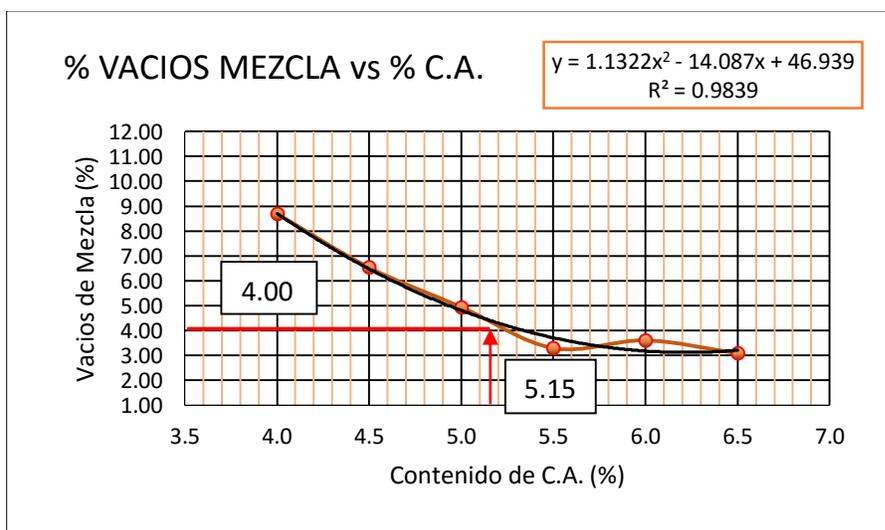
Gráfica 3. 1 Contenido óptimo de asfalto densidad



Fuente: Elaboración propia

La densidad es directamente proporcional al % de asfalto, es decir que a mayor % de asfalto mayor será la densidad.

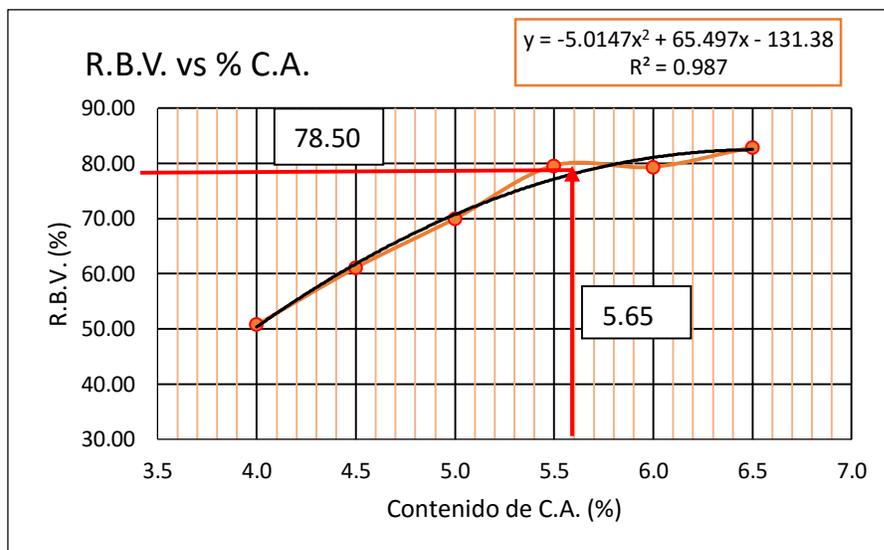
Gráfica 3. 2 Contenido óptimo de asfalto vacíos totales



Fuente: Elaboración propia

Se observa que el % de vacíos es inversamente proporcional al % de asfalto, es decir que a mayor % de asfalto, existiría menos vacíos en la carpeta asfáltica.

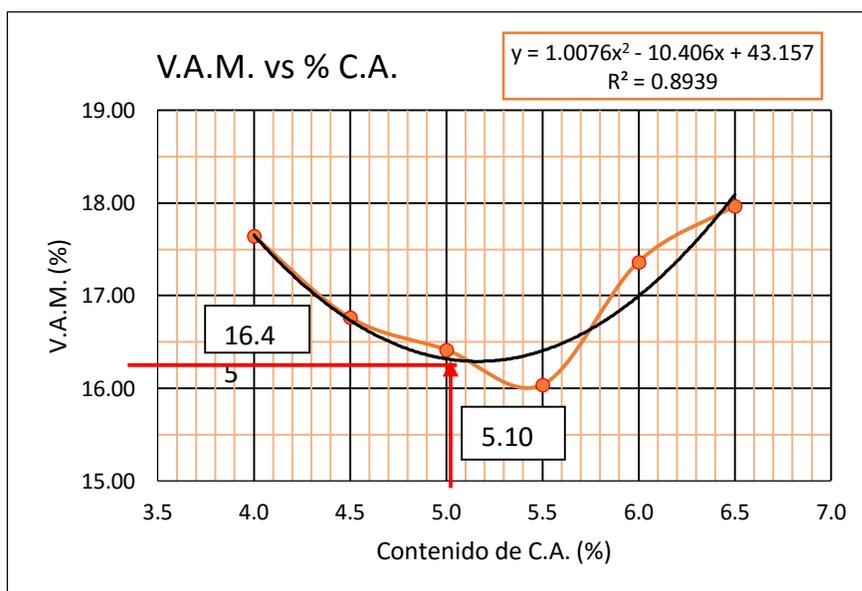
Gráfica 3. 3 Contenido óptimo de asfalto RBV



Fuente: Elaboración propia

El % de RBV es directamente proporcional al % de asfalto.

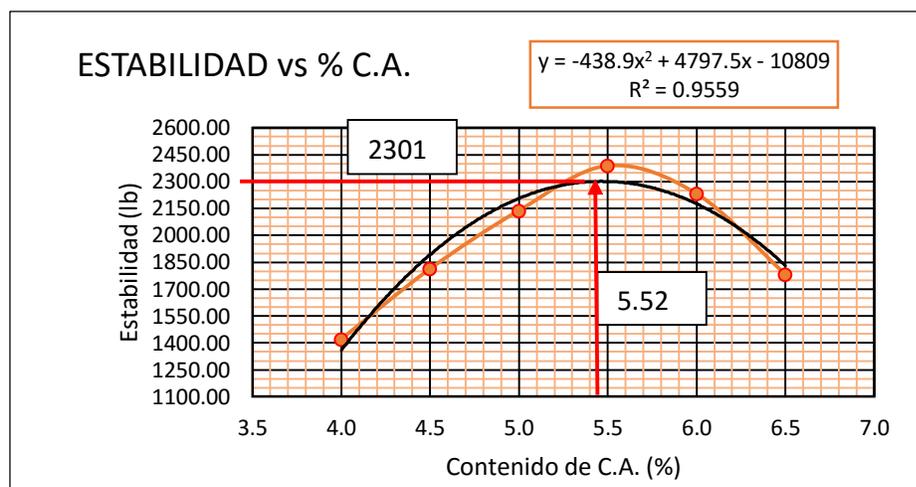
Gráfica 3. 4 Contenido óptimo de asfalto VAM



Fuente: Elaboración propia

Los vacíos de agregado mineral generalmente disminuyen hasta un valor mínimo, y luego aumenta con los incrementos de % de asfalto. En este caso el % óptimo de asfalto se encuentra en un mínimo de la curva.

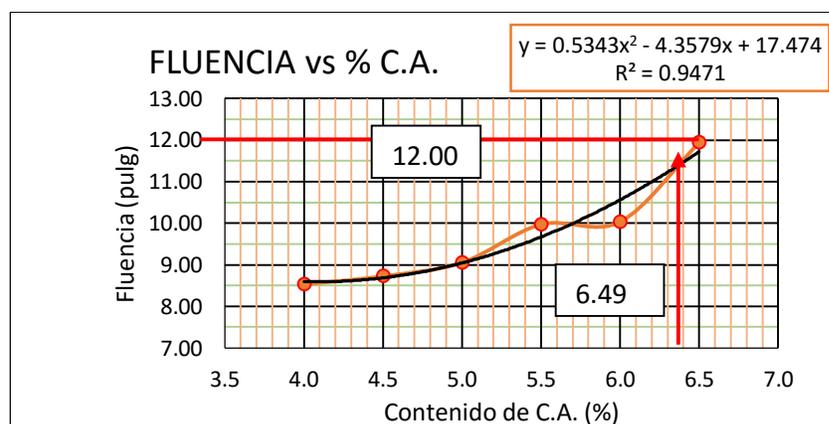
Gráfica 3. 5 Contenido óptimo de asfalto estabilidad



Fuente: Elaboración propia

La estabilidad crece a medida que el porcentaje de cemento aumenta, es decir que a mayor % de asfalto, mayor será la estabilidad hasta llegar a un valor optimo y después empieza a decrecer.

Gráfica 3. 6 Contenido óptimo de asfalto fluencia



Fuente: Elaboración propia

Se observa que la fluencia es proporcional al porcentaje de asfalto.

3.3.4.2 Resumen de resultados del ensayo en laboratorio

Tabla 3. 41 Datos obtenidos de cada factor

Cemento asfáltico (%)	Densidad (gr/cc)	Vacíos totales (%)	Relación betún vacíos(%)	Vacíos de agregado mineral (%)	Estabilidad(lb)	Flujo(pulg)
4	2.258	8.684	50.783	17.644	1419.156	8.530
4.5	2.294	6.522	61.094	16.763	1811.893	8.727
5	2.316	4.930	69.970	16.416	2137.177	9.055
5.5	2.338	3.278	79.559	16.038	2387.312	9.974
6	2.314	3.592	79.314	17.364	2230.364	10.039
6.5	2.310	3.076	82.881	17.966	1779.972	11.942

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 42 Resumen de resultados

Valores				
Características	% De asfalto	Obtenidos de gráficos	Especificaciones técnicas	
Densidad(gr/cc)	5.53	2.328	-----	-----
Vacíos(%)	5.15	4.0	3	5
R.B.V.(%)	5.65	78.5	75	82
V.A.M(%)	5.10	16.5	15	
Estabilidad (lb)	5.52	2301.0	> 1200 Lb. (75 Golpes)	
Fluencia 1/100"	6.49	12.0	8	16
Promedio (%)	5.57	Determinación del contenido óptimo de asfalto promedio de las gráficas laboratorio		

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS, SELECCIÓN DE LAS CONDICIONES DE BORDE, APLICACIÓN Y ANÁLISIS

CAPITULO IV

ANÁLISIS DE LA METODOLOGÍA DEL ELEMENTO FINITO, SELECCIÓN DE LAS CONDICIONES DE BORDE, APLICACIÓN Y ANÁLISIS.

4.1 ANÁLISIS DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

En el capítulo II se habló sobre los modelos matemáticos, los métodos numéricos y su uso en la ingeniería para aproximar las soluciones de sistemas, paralelamente se dio una introducción al método del elemento finito en sus tres dimensiones y el aumento de la complejidad de la resolución de las ecuaciones en cada una de ellas utilizando en síntesis el mismo procedimiento en un sistema unidimensional que en un sistema tridimensional.

El procedimiento para la aplicación práctica consiste en los siguientes pasos:

- a.- División en elementos finitos
- b.- Vector de desplazamientos del elemento
- c.- Matriz de rigidez del elemento
- d.- Matriz completa de rigidez de la estructura
- e.- Solución a partir de la unión de los elementos.

Para armar la matriz completa de rigidez se debe determinar las condiciones de borde y la función de efectos externos, en el análisis unidimensional, estos parámetros serán determinados a partir de los diseños Marshall del tramo Tolomosa-Pampa Redonda con el fin de poder simular las curvas por la metodología del elemento finito de cada factor.

Previamente se realiza un análisis correlativo de los datos correspondientes a los diseños Marshall del tramo Tolomosa-Pampa Redonda, posteriormente se simularán los factores con elementos finitos y se realizara una comparación entre los factores simulados y la correlación de los datos, para obtener un modelo representativo del material y poder hacer la comparación con un diseño convencional en laboratorio.

Para conocer y analizar posteriormente la simulacion de los factores marshall a partir las curvas aplicando la metodologia del elemento finito se realizara:

- Un modelo de elementos finitos unidimensional.
- Un analisis de la correlacion de los diseños en el tramo tomosa pampa redonda obteniendo las condiciones de borde iniciales y finales mas representativas (maximos o minimos) dependiendo de cada factor, que seran usados en la metodologia del elemento finito.
- Se continuara con la parte practica de la aplicación de la metodologia del elemento finito y se simularan las curvas correspondeintes a cada factor con los valores representativos de la mezcla convencional marshall del tramo estudiado.
- Se hara un analisis correlativo correspondiente a la curva de cada factor de los diseños del tramo estudiado y los factores simulados con la metodologia del elemento finito.
- Se hace un analisis de los resultados correspondientes al modelo obtenido y los datos de laboratorio.

4.2 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS UNIDIMENSIONAL

Se realizará el análisis de cada uno de los factores para la obtención de una ecuación unidimensional que pueda simular las curvas de Marshall a partir de elementos finitos

Al ser la solución analítica de cada uno de los factores una curva polinómica entre el 2° y 3° grado y cuyo dominio solución está en un rango pequeño, se asumirán curvas polinómicas de 2° grado para simular cada factor.

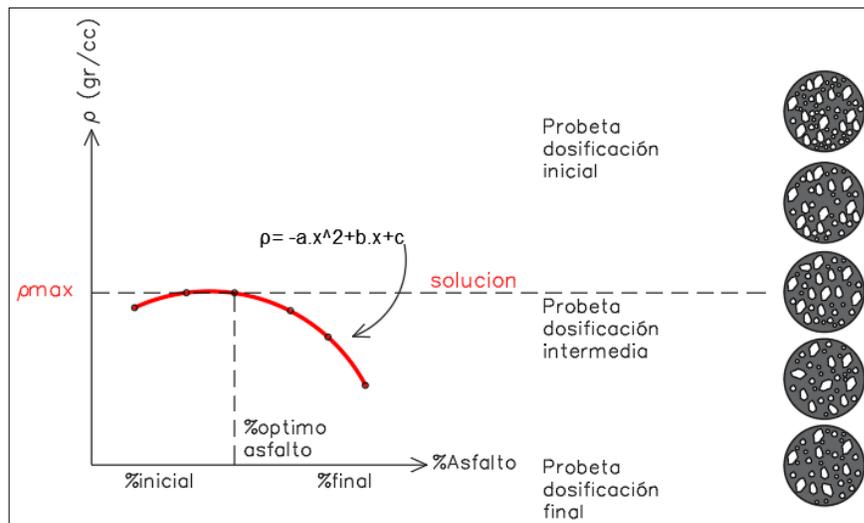
El análisis por elementos finitos está dividido en 5 partes, se desarrollan las ecuaciones de dominio del sistema y el vector desplazamiento correspondientes a las dos primeras partes y en las siguientes se desarrolla y obtiene la solución aproximada.

Paso 1: División en elementos finitos.

4.2.1 Análisis de la curva densidad

Para dividir un elemento en elementos diferenciales o finitos se debe obtener la ecuación diferencial de gobierno del elemento, en este caso para el análisis unidimensional por elementos finitos el elemento estará referido a la probeta de mezcla asfáltica y la ecuación de gobierno será la que se obtiene de manera analítica a la solución de las dosificaciones con el cemento asfaltico en el análisis de la densidad.

Gráfica 4. 1 Curva analítica del comportamiento de la probeta Marshall densidad



Fuente: Elaboración propia

$$\rho = -a \cdot x^2 + b \cdot x + c \quad \text{Ec. 51}$$

Donde:

a,b,c= Coeficientes

 ρ = Densidad en la ordenada (gr/cc)

x= Porcentaje en peso de la mezcla (%)

Se obtiene la segunda derivada de la ecuación analítica:

$$\frac{d\rho}{dx} = -a \cdot x + b$$

$$\frac{d^2\rho}{dx^2} = -a$$

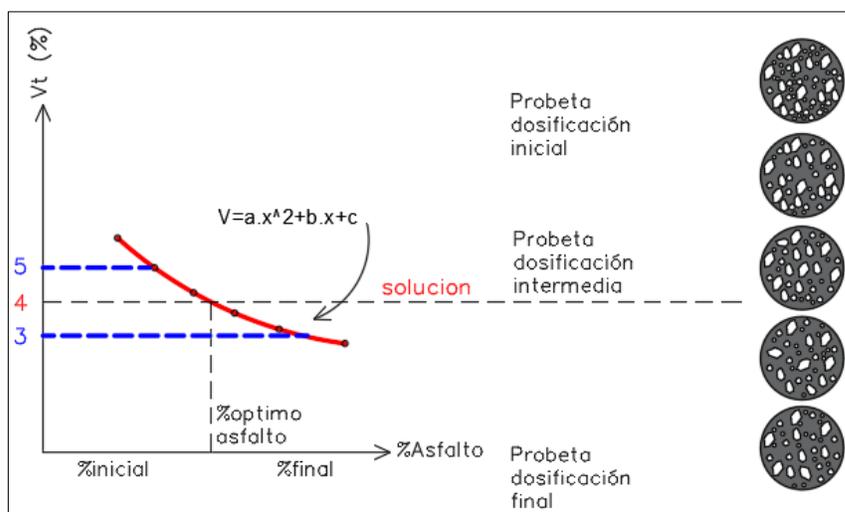
Se aproxima la función $f(x) = -a$ obteniendo la siguiente ecuación que será el dominio del elemento para el factor densidad:

$$\frac{d\rho^2}{dx^2} = -f(x) \quad \text{Ec. 52}$$

4.2.2 Análisis de la curva vacíos totales

De manera similar para el análisis unidimensional por elementos finitos el elemento estará referido a la probeta de mezcla asfáltica y la ecuación de gobierno será la que se obtiene de manera analítica a la solución de las dosificaciones con el cemento asfáltico en el análisis de los Vacíos totales, también se debe observar que en este caso el sentido de la curva es inverso al anterior esto como resultado de los ensayos que realizo Marshall para el diseño de mezclas donde determino que los vacios disminuían al aumentar la cantidad de ligante.

Gráfica 4. 2 Curva analítica del comportamiento de la probeta Marshall V_t



Fuente: Elaboración propia

$$V = a.x^2 + b.x + c \quad \text{Ec.53}$$

Donde:

a, b, c = Coeficientes

V = Vacíos totales en la ordenada (%)

x = Porcentaje en peso de la mezcla (%)

Se obtiene la segunda derivada de la ecuación analítica:

$$\frac{dV}{dx} = a.x + b$$

$$\frac{d^2V}{dx^2} = a$$

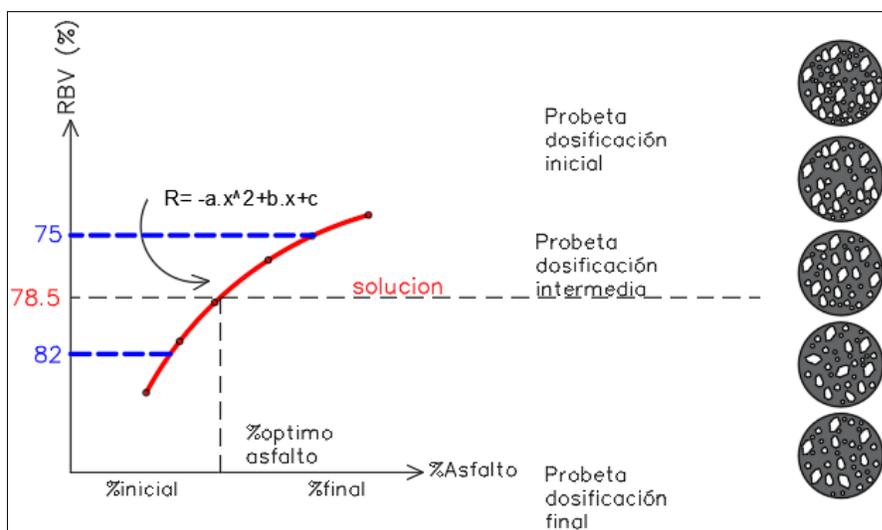
Se aproxima la función $f(x) = a$ obteniendo la siguiente ecuación que será el dominio del elemento para el factor vacíos totales:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = f(x) \quad \text{Ec. 54}$$

4.2.3 Análisis de la curva relación betún vacíos

De manera similar para el análisis unidimensional por elementos finitos el elemento estará referido a la probeta de mezcla asfáltica y la ecuación de gobierno será la que se obtiene de manera analítica a la solución de las dosificaciones con el cemento asfáltico en el análisis de la relación betún vacíos. También se deberá tomar en cuenta el sentido de la curva de los ensayos realizados por Marshall donde observo que la relación betún vacíos aumenta con el contenido de ligante.

Gráfica 4. 3 Curva analítica del comportamiento de la probeta Marshall RBV



Fuente: Elaboración propia

$$R = -a.x^2 + b.x + c \quad \text{Ec. 55}$$

Donde:

a,b,c= Coeficientes

R= Relación betún vacíos en las ordenadas (%)

x = Porcentaje en peso de la mezcla (%)

Se obtiene la segunda derivada de la ecuación analítica:

$$\frac{dR}{dx} = -a \cdot x + b$$

$$\frac{d^2R}{dx^2} = -a$$

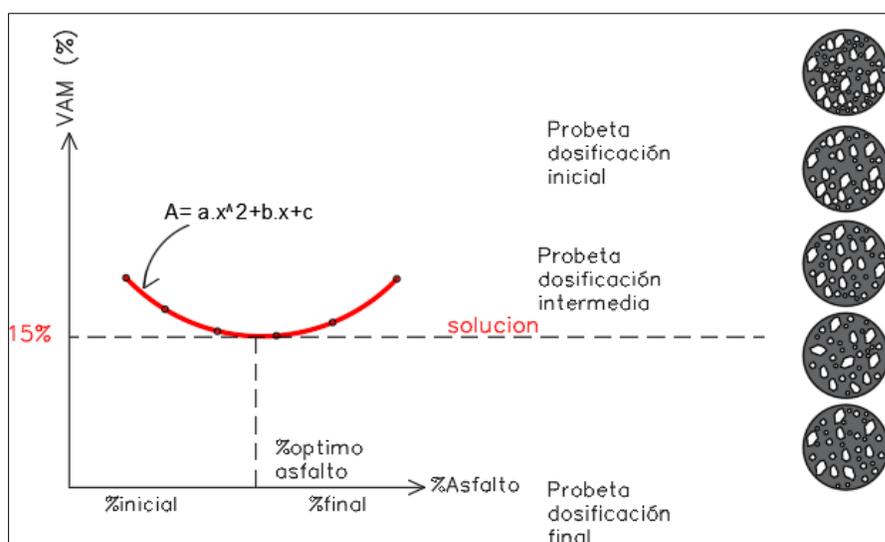
Se aproxima la función $f(x) = a$ obteniendo la siguiente ecuación que será el dominio del elemento para el factor relación betún vacíos:

$$\frac{d^2R}{dx^2} = -f(x) \quad \text{Ec. 56}$$

4.2.4 Análisis de la curva vacíos de agregado mineral

De manera similar para el análisis unidimensional por elementos finitos el elemento estará referido a la probeta de mezcla asfáltica y la ecuación de gobierno será la que se obtiene de manera analítica a la solución de las dosificaciones con el cemento asfáltico en el análisis vacíos de agregado mineral. Se observa que el sentido de la curva es inversa a la densidad y llegando a un min de vacíos la relación con el contenido de ligante comienza a aumentar.

Gráfica 4. 4 Curva analítica del comportamiento de la probeta Marshall VAM



Fuente: Elaboración propia

$$A = a \cdot x^2 + b \cdot x + c \quad \text{Ec. 57}$$

Donde:

a,b,c= Coeficientes

A= Vacíos de agregado mineral en las ordenadas (%)

x= Porcentaje en peso de la mezcla (%)

Se obtiene la segunda derivada de la ecuación analítica:

$$\frac{dA}{dx} = a \cdot x + b$$

$$\frac{d^2A}{dx^2} = a$$

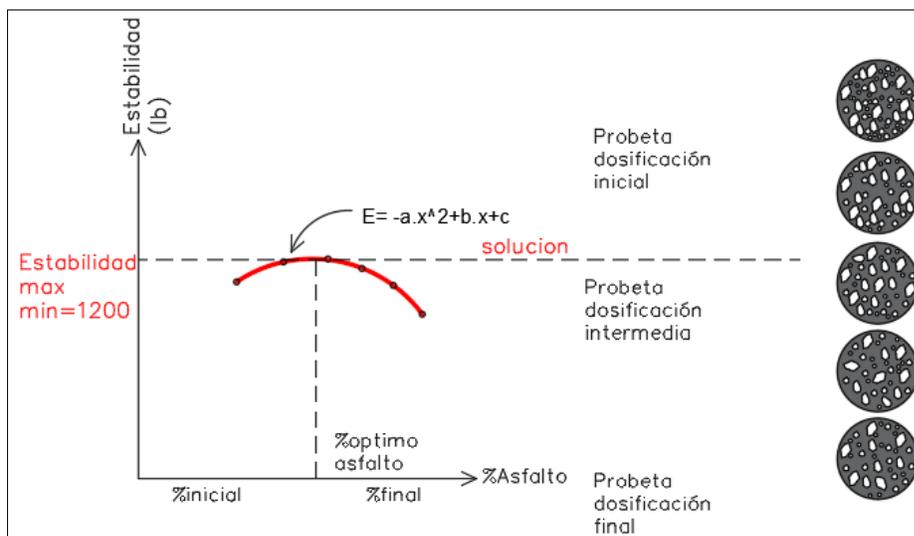
Se aproxima la función $f(x) = a$ obteniendo la siguiente ecuación que será el dominio del elemento para el factor vacíos de agregado mineral:

$$\frac{d^2A}{dx^2} = f(x) \quad \text{Ec. 58}$$

4.2.5 Análisis de la curva estabilidad

De manera similar para el análisis unidimensional por elementos finitos el elemento estará referido a la probeta de mezcla asfáltica y la ecuación de gobierno será la que se obtiene de manera analítica a la solución de las dosificaciones con el cemento asfáltico en el análisis de la estabilidad.

Gráfica 4. 5 Curva analítica del comportamiento de la probeta Marshall E.



Fuente: Elaboración propia

$$E = -a.x^2 + b.x + c \quad \text{Ec. 59}$$

Donde:

a,b,c= Coeficientes

E= Estabilidad en la ordenada (lb)

x= Porcentaje de asfalto en peso de la mezcla (%)

Se obtiene la segunda derivada de la ecuación analítica:

$$\frac{dE}{dx} = -a.x + b$$

$$\frac{d^2E}{dx^2} = -a$$

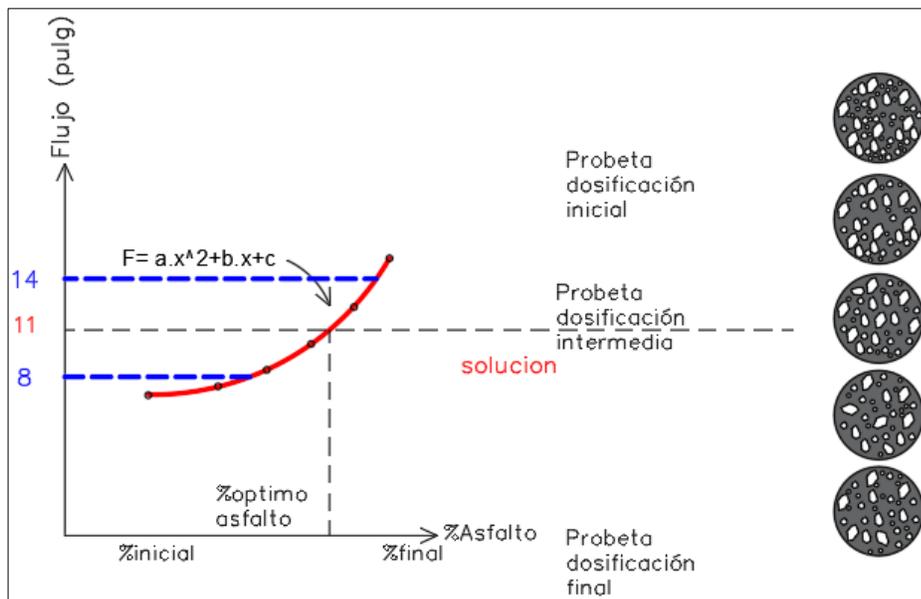
Se aproxima la función $f(x) = a$ obteniendo la siguiente ecuación que será el dominio del elemento para el factor estabilidad:

$$\frac{d^2E}{dx^2} = -f(x) \quad \text{Ec. 60}$$

4.2.6 Análisis de la curva flujo

De manera similar para el análisis unidimensional por elementos finitos el elemento estará referido a la probeta de mezcla asfáltica y la ecuación de gobierno será la que se obtiene de manera analítica a la solución de las dosificaciones con el cemento asfáltico en el análisis del flujo.

Gráfica 4. 6 Curva analítica del comportamiento de la probeta Marshall flujo



Fuente: Elaboración propia

$$F = a.x^2 + b.x + c \quad \text{Ec. 61}$$

Donde:

a,b,c= Coeficientes

F= Flujo en las ordenadas (pulg)

x= Porcentaje de asfalto en peso de la mezcla (%)

Se obtiene la segunda derivada de la ecuación analítica:

$$\frac{dF}{dx} = a.x + b$$

$$\frac{d^2F}{dx^2} = a$$

Se aproxima la función $f(x) = a$ obteniendo la siguiente ecuación que será el dominio del elemento para el factor Flujo:

$$\frac{d^2F}{dx^2} = f(x) \quad \text{Ec. 62}$$

Paso 2: Vector desplazamiento

Ecuación de los elementos.- El siguiente paso consiste en desarrollar ecuaciones para aproximar la solución de cada elemento:

Se elige una función apropiada con coeficientes desconocidos que aproximara la solución, debido a que son fáciles de manipular matemáticamente, a menudo se utilizan polinomios, en el caso unidimensional la alternativa más sencilla es un polinomio de primer grado o línea recta.

$$\mathbf{u}(x) = a_0 + a_1x \quad \text{Ec. 63}$$

Donde:

$u(x)$ = Variable dependiente.

a_0 y a_1 = Constantes

x = Variable independiente

Esta función pasa a través de los valores de $u(x)$ en los puntos extremos del elemento en x_1 y x_2 :

$$\mathbf{u}_1 = a_0 + a_1x_1 \quad \text{Ec. 64}$$

$$\mathbf{u}_2 = a_0 + a_1x_2 \quad \text{Ec. 65}$$

De la regla de Cramer se obtiene:

$$a_0 = \frac{u_1x_2 - u_2x_1}{x_2 - x_1} \quad \text{Ec. 66} \quad a_1 = \frac{u_2 - u_1}{x_2 - x_1} \quad \text{Ec.67}$$

Sustituyendo los valores en la Ec. 63:

$$\mathbf{u}(x) = N_1 \cdot \mathbf{u}_1 + N_2 \cdot \mathbf{u}_2 \quad \text{Ec. 68}$$

Donde:

$$N_1 = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1}$$

$$N_2 = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}$$

N_1 y N_2 = Funciones de interpolación lineales

Para generar la ecuación de los elementos se utiliza el método de los residuos ponderados:

Se parte de la segunda derivada de la ecuación analítica correspondiente a cada factor, en este caso se iniciará con la ecuación diferencial correspondiente al factor Densidad:

$$\frac{d\rho^2}{dx^2} = -f(x)$$

Se iguala la ecuación a 0 para aproximar la solución a un residuo.

$$\frac{d\rho^2}{dx^2} + f(x) = 0 \quad \text{Ec.69}$$

Como la ecuación 69 no es la solución exacta, el lado derecho de la ecuación resultante no será cero, sino que será igual a un residuo.

$$\frac{d\rho^2}{dx^2} + f(x) = R$$

El método de los residuos ponderados consiste en encontrar un mínimo para el residuo, de acuerdo a la formula general:

$$\int_D RW_i dD = 0 \quad i=1,2$$

Donde:

D = Dominio de la solución

W_i = Funciones de ponderación linealmente independientes

Se tienen múltiples opciones para las funciones de ponderación, el procedimiento más común para el método del elemento finito consiste en emplear las funciones de interpolación N_i como las funciones de ponderación

$$\int_D RN_i dD = 0 \quad i=1,2$$

La ecuación unidimensional se sustituye en esta ecuación y se obtiene:

$$\int_{x_1}^{x_2} \left[\frac{d^2 \rho}{dx^2} + f(x) \right] N_i dx = 0$$

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{d^2 \rho}{dx^2} N_i(x) dx = - \int_{x_1}^{x_2} f(x) N_i(x) dx \quad \text{Ec.70}$$

Se utiliza la integración por partes en el lado izquierdo para bajar de orden la ecuación 70, en el 1er termino.

$$\int_a^b u dv = uv \Big|_a^b - \int_a^b v du \quad \text{integración por partes}$$

Se deben elegir u y adecuadamente para que la nueva integral del lado derecho sea más fácil de evaluar que la integral inicial por tanto se escoge $N_i(x)$ como u y $(d^2\rho/dx^2)dx$ como dv.

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{d^2 \rho}{dx^2} N_i(x) dx = N_i(x) \frac{d\rho}{dx} \Big|_{x_1}^{x_2} - \int_{x_1}^{x_2} \frac{d\rho}{dx} \frac{dN_i}{dx} dx \quad \dots\dots\dots i=1,2$$

Ahora se evalúan cada uno de los términos que se creó para $i=1$ en el primer término del lado derecho:

$$N_1(x) \frac{d\rho}{dx} \Big|_{x_1}^{x_2} = N_1(x_2) \frac{d\rho(x_2)}{dx} - N_1(x_1) \frac{d\rho(x_1)}{dx}$$

De las ecuaciones del elemento se tiene que para $i= 1$; $N_1(x_2)= 0$ y $N_1(x_1)=1$ por lo tanto :

$$N_1(x) \frac{d\rho}{dx} \Big|_{x_1}^{x_2} = - \frac{d\rho(x_1)}{dx}$$

De manera similar para $i=2$

$$N_2(x) \frac{d\rho}{dx} \Big|_{x_1}^{x_2} = \frac{d\rho(x_2)}{dx}$$

El primer término del lado derecho representa la condición de frontera del elemento en ambos extremos

Sustituyendo en la ecuación 70 los términos correspondientes por nuestros resultados. Haciendo las sustituciones correspondientes.

Para $i=1$

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{d\rho}{dx} \frac{dN_1}{dx} dx = -\frac{d\rho(x_1)}{dx} + \int_{x_1}^{x_2} f(x)N_1(x)dx \quad \text{Ec. 71}$$

Para $i=2$

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{d\rho}{dx} \frac{dN_2}{dx} dx = \frac{d\rho(x_2)}{dx} + \int_{x_1}^{x_2} f(x)N_2(x)dx \quad \text{Ec.72}$$

En este punto se puede comenzar a darles significado físico a cada uno de los términos que se obtuvieron. En el lado derecho de la ecuación, el primer término representa las condiciones de frontera del elemento; y el segundo es el efecto de la función del sistema. El lado izquierdo representa los mecanismos internos que rigen la distribución del porcentaje de asfalto del elemento. En términos del método de elementos finitos, el lado izquierdo será la matriz de propiedades del elemento.

Se analiza los términos del lado izquierdo.

Para $i=1$

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{d\rho}{dx} \frac{dN_1}{dx} dx$$

Remplazando las ecuaciones 21 y 22 haciendo las sustituciones correspondientes, obtenemos:

$$\int_{x_2}^{x_1} \frac{\rho_1 - \rho_2}{(x_2 - x_1)^2} dx = \frac{1}{x_2 - x_1} (\rho_1 - \rho_2)$$

Y de manera similar para $i=2$:

$$\int_{x_2}^{x_1} \frac{\rho_1 - \rho_2}{(x_2 - x_1)^2} dx = \frac{1}{x_2 - x_1} (-\rho_1 + \rho_2)$$

Expresados estos resultados de forma matricial se obtiene:

$$\frac{1}{x_2 - x_1}(\rho_1 - \rho_2) = \frac{1}{x_2 - x_1} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \end{Bmatrix}$$

$$\frac{1}{x_2 - x_1}(-\rho_1 + \rho_2)$$

Sustituyendo el resultado en las ecuaciones 71 y 72 se tiene la ecuación final de los elementos que es la ecuación algebraica expresada en forma matricial:

$$\frac{1}{x_2 - x_1} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \end{Bmatrix} = \left\{ \begin{array}{c} -\frac{d\rho(x_1)}{dx} \\ \frac{d\rho(x_2)}{dx} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \int_{x_1}^{x_2} f(x)N_1(x)dx \\ \int_{x_1}^{x_2} f(x)N_1(x)dx \end{array} \right\}$$

Matriz de rigidez del elemento

Condición de frontera

Efectos externos

Siendo las funciones de interpolación lineales planteadas anteriormente:

$$N_1 = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1}$$

$$N_2 = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}$$

La ecuación formulada será la que se aplique para la simulación de cada factor Marshall y en este caso para el factor densidad es:

$$\frac{1}{x_2 - x_1} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \end{Bmatrix} = \left\{ \begin{array}{c} -\frac{d\rho(x_1)}{dx} \\ \frac{d\rho(x_2)}{dx} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \int_{x_1}^{x_2} f(x) \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} dx \\ \int_{x_1}^{x_2} f(x) \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} dx \end{array} \right\}$$

4.3 CONDICIONES DE BORDE Y CORRELACIÓN DE LOS DISEÑOS

4.3.1 Datos de los Diseños Marsall

Diseño 1 tramo Tolomosa - Pampa Redonda(chancadora Charaja-Vafercon)

		LABORATORIO DE SUELOS, ASFALTOS Y HORMIGONES " DISEÑO DE MEZCLA AFALTICA EN CALIENTE // METODO MARSHALL "																								
		Proyecto: Asfaltado Tolomosa - Pampa Redonda					Fecha: 15 de Diciembre de 2016					DISEÑO - MRSH - 01														
Pesos Especificos (AASHTO T-100, T-85)		% de Agregados		C. Asfáltico AASHTO M-20					DOSIFICACION		GRAVA - GARZON	GRAVILLA - GARZON	ARENA CHANCADA - GARZO	FILLER - Charaja												
Mat. Retenido Tamiz N° 4		2.663	gr/cm ³	46.3	Tipo de asfalto AASHTO M20					85-100		3/4"	3/8"	N°4	N°4											
Mat. Pasa Tamiz N° 4		2.700	gr/cm ³	53.7	P. Especifico Total AASHTO T-228					1.017		% DE AGREGADOS :		30%	18%	22%	30%									
P. Esp. Agregado Total (Gag)		2.683	gr/cm ³	100								ORIGEN AGREGADOS :														
N° GOLPES:		75																								
		CHANCADORA VAFERCON																								
		FILLER CHANCADORA SAN JOSE DE CHARAJA																								
IDENTIFICACION	ALTURA BRIQUETA (CM)	% DE ASFALTO		PESO BRIQUETA EN EL AIRE	PESO BRIQUETA SUMERGIDA EN AGUA	VOLUMEN BRIQUETA	DENSIDAD BRIQUETA			% Vacios			ESTABILIDAD (Lb)					LECT. DIAL	FLUJO 1/100	MEDIA						
		BASE AGREGADO	BASE MEZCLA				(gr)	(gr)	(gr)	(cm3)	REAL (Dr.)	PROMEDIO (Drm.)	MAXIMA TEORICA	MEZCLA	AGREGADOS	LENENOS DE ASFALTO	LECT. DIAL				REAL	MEDIA	FACTOR DE CORRECCION (ALTURA)	MEDIA f.c.	CORREGIDA	
		a	b				c	r	d	e	f	g	h	i	j	k	l				m	n	o	p		
1	6.49	5.04	4.80	1193.7	1197.6	680.5	517.1	2.308					146	1650.8		0.965			265	10.4						
2	6.42	5.04	4.80	1194.7	1197.0	676.5	520.5	2.295					134	1538.3		0.983			250	9.8						
3	6.40	5.04	4.80	1190.2	1192.5	673.0	519.5	2.291	2.298	2.487	7.60	18.44	58.81	135	1546.7	1578.6	0.988	0.978	1543.9	230	9.1	9.78				
4	6.52	5.60	5.30	1189.3	1194.8	683.5	511.3	2.326						176	1968.0		0.958			280	11.0					
5	6.48	5.60	5.30	1197.0	1199.0	683.5	515.5	2.322						164	1846.1		0.968			300	11.8					
6	6.46	5.60	5.30	1189.0	1192.4	676.5	513.9	2.314	2.321	2.468	5.99	18.08	66.87	183	2038.5	1950.9	0.973	0.966	1884.5	270	10.6	11.15				
7	6.51	6.16	5.80	1188.0	1193.0	689.6	503.4	2.360						198	2188.6		0.960			305	12.0					
8	6.49	6.16	5.80	1189.0	1193.6	685.9	507.7	2.342						174	1947.7		0.965			325	12.8					
9	6.44	6.16	5.80	1190.4	1192.7	686.0	506.7	2.349	2.350	2.450	4.07	17.47	76.73	202	2228.4	2121.6	0.978	0.968	2053.7	305	12.0	12.27				
10	6.46	6.72	6.30	1193.0	1195.5	689.5	506.0	2.358						168	1886.9		0.973			345	13.6					
11	6.37	6.72	6.30	1187.0	1190.4	685.6	504.8	2.351						178	1988.2		0.995			350	13.8					
12	6.33	6.72	6.30	1185.0	1187.0	686.6	500.4	2.368	2.359	2.432	2.99	17.60	83.01	165	1856.3	1910.5	1.005	0.991	1893.3	360	14.2	13.85				
13	6.34	7.30	6.80	1184.8	1187.4	685.6	501.8	2.361						150	1702.6		1.003			375	14.8					
14	6.31	7.30	6.80	1180.1	1183.1	681.3	501.8	2.352						162	1825.7		1.011			390	15.4					
15	6.33	7.30	6.80	1183.5	1184.9	681.8	503.1	2.352	2.355	2.414	2.44	18.18	86.60	152	1723.1	1750.5	1.005	1.006	1761.0	380	15.0	15.03				
OBSERVACIONES		ESPECIFICACIONES															3 - 5		5 - 15		75 - 82		≥ 1200 Lb.		H - 16	

Diseño 2 tramo Tolomosa - Pampa Redonda (chancadora Charaja-Vafercon-Gaucho)

SEDECA - TARAJA		LABORATORIO DE SUELOS, ASFALTOS Y HORMIGONES																												
" DISEÑO DE MEZCLA AFALTICA EN CALIENTE // METODO MARSHALL "																														
Proyecto: Asfaltado Tolomosa - Pampa Redonda						Fecha: 6 de Septiembre de 2016						DISEÑO - MRSH - 02																		
Pesos Especificos (AASHTO T-100, T-85)		% de Agregados		C. Asfáltico AASHTO M-20		DOSIFICACION						GRAVA - Vafercon		ARAVILLA - Vargas y Charaja		ARENA CHANCADA - Vafercon		ARENA - Vargas - Charaja												
Mat. Retenido Tamiz N° 4	2.638	gr/cm ³	46.2	Tipo de asfalto AASHTO M20	85-100	% DE AGREGADOS :						3/4"	3/8"	N°4	N°4															
Mat. Pasa Tamiz N° 4	2.670	gr/cm ³	53.8	P. Especifico Total AASHTO T-228	1.008	ORIGEN AGREGADOS :						24%	28%	24%	24%															
P. Esp. Agregado Total (Gag.)	2.655	gr/cm ³	100	Chancadora Gaucho-Vafercon Filler Chancadora San Jose de Charaja																										
N° GOLPES: 75			135 °C Compactación																											
IDENTIFICACION	ALTURA BRIQUETA (CM)	% DE ASFALTO			PESO BRIQUETA EN EL AIRE (gr)	PESO BRIQUETA EN EL AIRE S.S.S. (gr)	PESO BRIQUETA SUMERGIDA EN AGUA (gr)	VOLUMEN BRIQUETA (cm3)	DENSIDAD BRIQUETA			% Vacios		ESTABILIDAD (Lb)					LECT. DIAL	FLUJO 1/100	MEDIA									
		BASE AGREGADO	BASE MEZCLA	a					b	c	r	d	e	f	g	h	i	j				k	LECT. DIAL	REAL	MEDIA	FACTOR DE CORRECCION (ALTURA) mm	MEDIA f.c.	CORREGIDA	o	p
1	6.88	4.71	4.50	1178.6	1189.0	663.9	525.1	2.245						829	1827.6		0.881			242	9.5									
2	6.72	4.71	4.50	1192.0	1199.6	670.0	529.6	2.251						851	1876.1		0.918			226	8.9									
3	6.75	4.71	4.50	1182.0	1184.6	662.0	522.6	2.262	2.252	2.473	8.93	18.99	52.96	860	930.0	1544.6	0.910	0.903	1394.8	240	9.4	9.29								
4	6.71	5.26	5.00	1194.4	1199.9	675.8	524.1	2.279						1045	2303.8		0.920			240	9.4									
5	6.74	5.26	5.00	1190.0	1195.4	677.1	518.3	2.296						1007	2220.0		0.913			260	10.2									
6	6.70	5.26	5.00	1192.8	1198.8	673.3	525.5	2.270	2.282	2.455	7.05	18.36	61.62	1023	2255.3	2259.7	0.923	0.918	2074.4	280	11.0	10.24								
7	6.56	5.82	5.50	1187.8	1189.9	677.2	512.7	2.317						1195	2634.5		0.951			306	12.0									
8	6.57	5.82	5.50	1190.0	1192.4	679.8	512.6	2.321						1142	2517.7		0.949			310	12.2									
9	6.63	5.82	5.50	1192.7	1194.0	678.2	515.8	2.312	2.317	2.436	4.90	17.54	72.08	1172	2583.8	2578.6	0.938	0.946	2439.4	300	11.8	12.02								
10	6.44	6.38	6.00	1190.7	1193.0	679.5	513.5	2.319						1189	2621.3		0.978			340	13.4									
11	6.62	6.38	6.00	1192.3	1195.6	682.5	513.1	2.324						1130	2491.2		0.939			328	12.9									
12	6.55	6.38	6.00	1190.0	1191.0	677.0	514.0	2.315	2.319	2.418	4.09	17.89	77.16	1223	2696.2	2602.9	0.953	0.956	2488.4	340	13.4	13.23								
13	6.54	6.95	6.50	1195.8	1196.6	678.5	518.1	2.308						1132	2495.6		0.954			365	14.4									
14	6.47	6.95	6.50	1184.9	1185.7	673.2	512.5	2.312						1029	2268.5		0.970			372	14.6									
15	6.45	6.95	6.50	1187.0	1188.2	676.8	511.4	2.321	2.314	2.400	3.60	18.52	80.55	1000	2204.6	2322.9	0.975	0.966	2243.9	372	14.6	14.55								
16	6.54	7.53	7.00	1190.5	1191.5	675.4	516.1	2.307						955	2105.4		0.954			402	15.8									
17	6.56	7.53	7.00	1185.3	1186.8	672.9	513.9	2.306						929	2048.1		0.951			415	16.3									
18	6.60	7.53	7.00	1188.2	1189.6	675.8	513.8	2.313	2.309	2.383	3.11	19.14	83.77	875	1929.0	2027.5	0.943	0.949	1924.1	415	16.3	16.17								
OBSERVACIONES		ESPECIFICACIONES		3 - R >= 15 75 - R2										>= 1200 Lb.					R - 16											

4.3.2 Resumen de los valores obtenidos

Tabla 4. 1 Resultados de la mezcla asfáltica

Diseño 1							
N°	% C.A.	Densidad	Estabilidad	(Vt)	(VAM)	(RBV)	Flujo
1	4.80	2.298	1543.871	7.596	18.444	58.813	9.777
2	5.30	2.321	1884.537	5.991	18.084	66.873	11.155
3	5.80	2.350	2053.677	4.065	17.470	76.730	12.270
4	6.30	2.359	1893.272	2.991	17.605	83.011	13.845
5	6.80	2.355	1760.969	2.436	18.183	86.602	15.026

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. 2 Resultados de la mezcla asfáltica

Diseño 2							
N°	% C.A.	Densidad	Estabilidad	(Vt)	(VAM)	(RBV)	Flujo
1	4.50	2.252	1394.752	8.932	18.987	52.958	9.291
2	5.00	2.282	2074.418	7.048	18.365	61.625	10.236
3	5.50	2.317	2439.400	4.898	17.539	72.076	12.021
4	6.00	2.319	2488.370	4.087	17.892	77.158	13.228
5	6.50	2.314	2243.934	3.603	18.523	80.548	14.554
6	7.00	2.309	1924.095	3.106	19.138	83.771	16.168

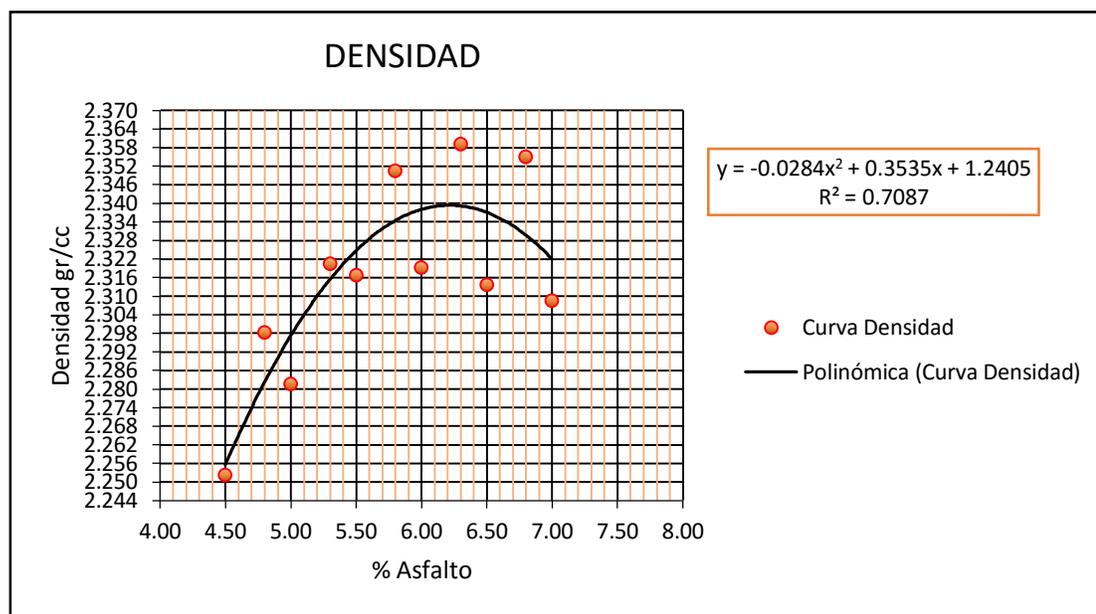
Fuente: Elaboración propia

4.3.3 Correlación datos densidad

Se hace un analisis de los datos iniciales y finales de las volores de la densidad que puedan ser utilizados en la aplicación de los elementos finitos y que seran las condiciones de borde, obteniendose:

Frontera inicial	2.252
Frontera final	2.309

Gráfica 4. 7 Curva de correlación para el factor densidad



Fuente: Elaboración propia

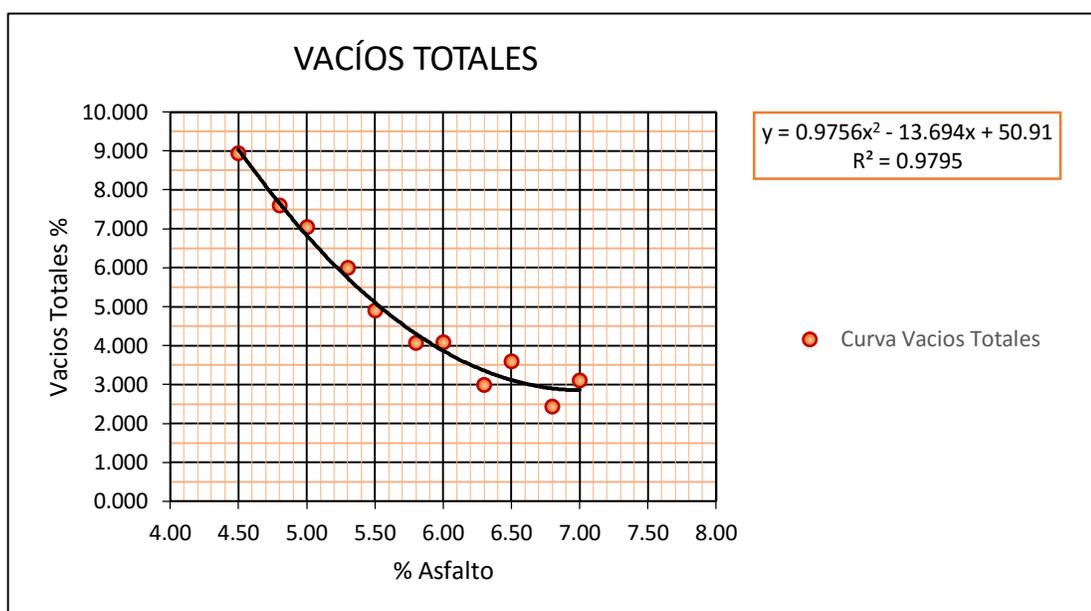
Las densidades correspondientes a las mezclas asfálticas con materiales provenientes de distintos bancos tienen una $r^2=70.87\%$ indicando una buena incidencia para la curva promedio y la correlación del 0.84 que es mayor al 0.75 muestra una aceptable relación de los puntos para generar la nueva curva promedio de correlación.

4.3.4 Correlación datos vacíos totales

Analizando los datos para determinar los valores de iniciales y finales de la mezcla mas representativos que seran las condiciones de borde para el metodo del elemento finito se obtiene:

Frontera inicial	8.932
Frontera final	2.436

Gráfica 4. 8 Curva de correlación para el factor vacíos totales



Fuente: Elaboración propia

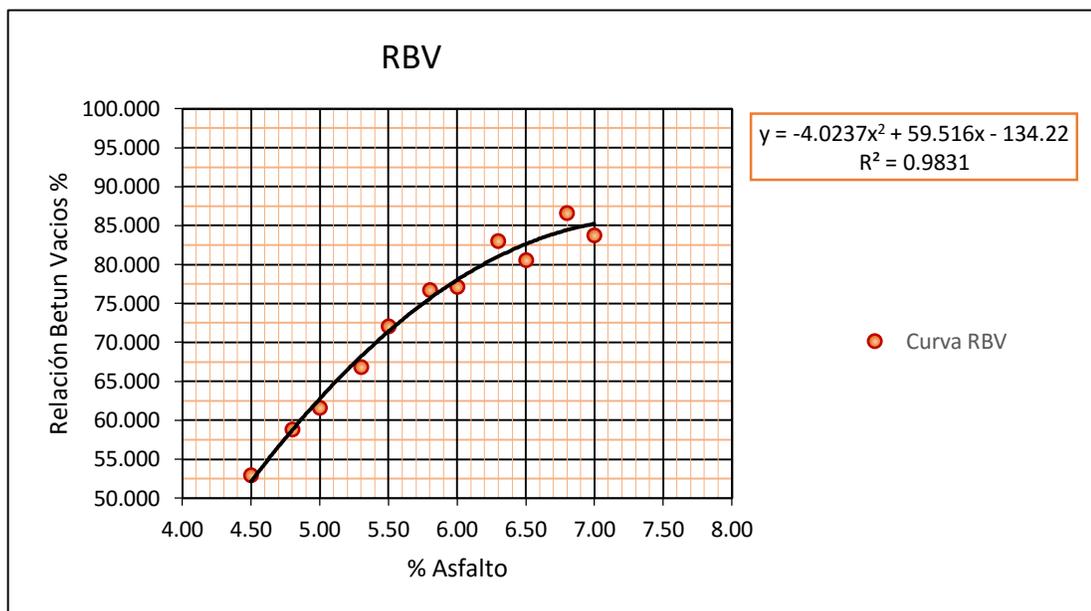
Los vacíos totales correspondientes a las mezclas asfálticas con materiales provenientes de distintos bancos tienen una $r^2=97.95\%$ indicando una buena incidencia para la curva promedio y la correlación del 0.989 que es mayor al 0.75 mostrando una aceptable relación de los puntos para generar la nueva curva promedio de correlación.

4.3.5 Correlación datos relación betun vacios

Analizando los datos para determinar los valores de iniciales y finales de la mezcla mas representativos que seran las condiciones de borde para el metodo del elemento finito se obtiene:

Frontera inicial	52.958
Frontera final	83.771

Gráfica 4. 9 Curva de correlación para el factor RBV



Fuente: Elaboración propia

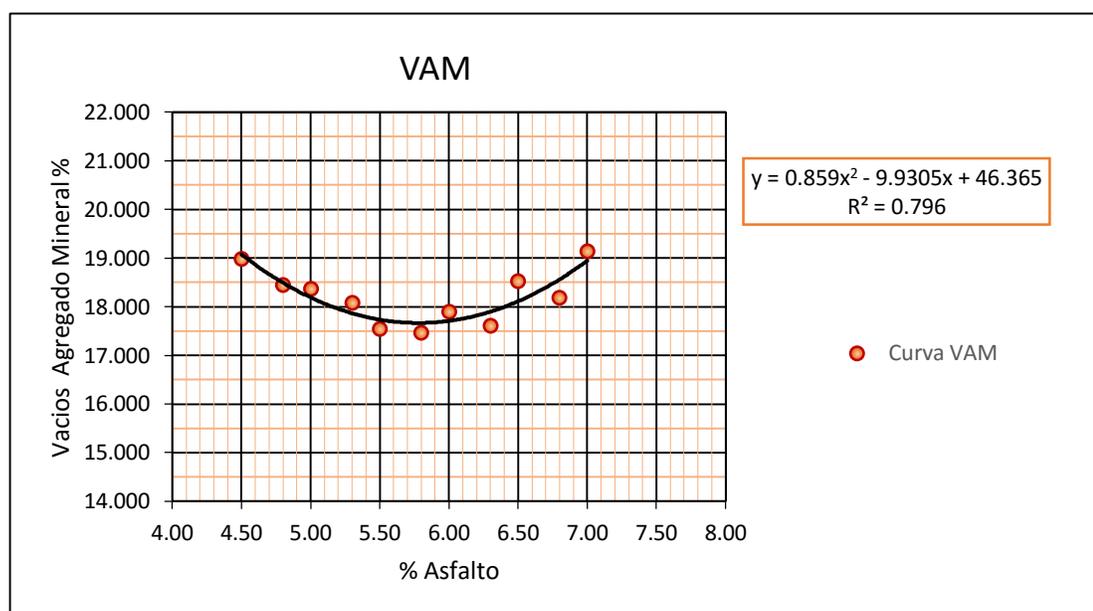
La relación betún vacíos correspondientes a las mezclas asfálticas con materiales provenientes de distintos bancos tienen una $r^2=98.31\%$ indicando una buena incidencia para la curva promedio y la correlación del 0.991 que es mayor al 0.75 mostrando una aceptable relación de los puntos para generar la nueva curva promedio de correlación.

4.3.6 Correlación datos vacíos de agregado mineral

Analizando los datos para determinar los valores de iniciales y finales de la mezcla mas representativos que seran las condiciones de borde para el metodo del elemento finito se obtiene:

Frontera inicial	18.444
Frontera final	19.138

Gráfica 4. 10 Curva de correlación para el factor VAM



Fuente: Elaboración propia

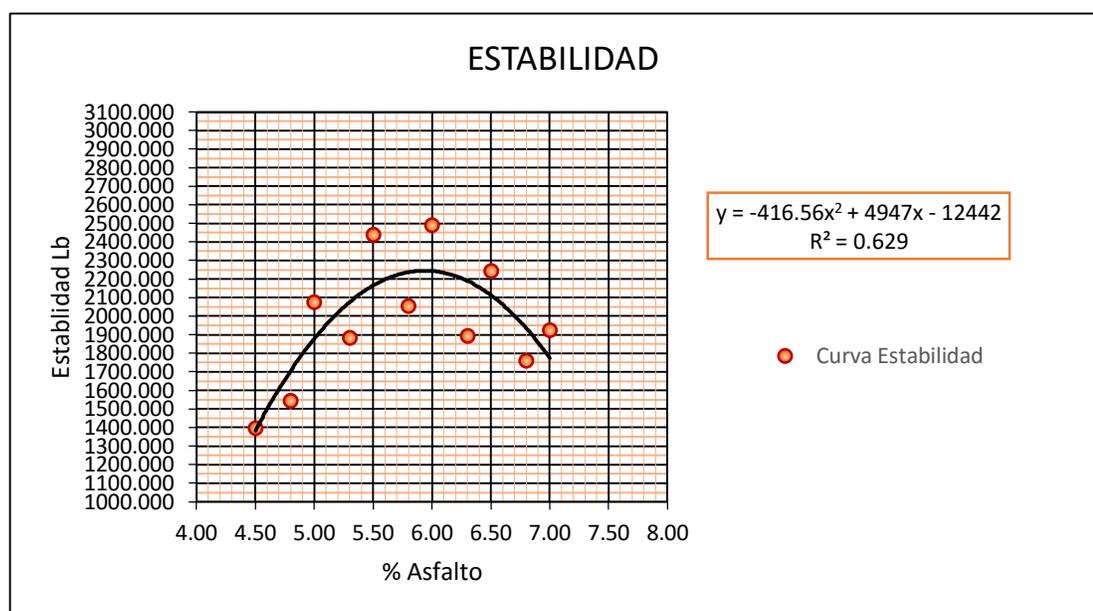
Los vacíos de agregado mineral correspondientes a las mezclas asfálticas con materiales provenientes de distintos bancos tienen una $r^2=79.68\%$ indicando una buena incidencia para la curva promedio y la correlación del 0.892 que es mayor al 0.75 mostrando una aceptable relación de los puntos para generar la nueva curva promedio de correlación.

4.3.7 Correlación datos estabilidad

Analizando los datos para determinar los valores de iniciales y finales de la mezcla mas representativos que seran las condiciones de borde para el metodo del elemento finito se obtiene:

Frontera inicial	1394.752
Frontera final	1760.969

Gráfica 4. 11 Curva de correlación para el factor estabilidad



Fuente: Elaboración propia

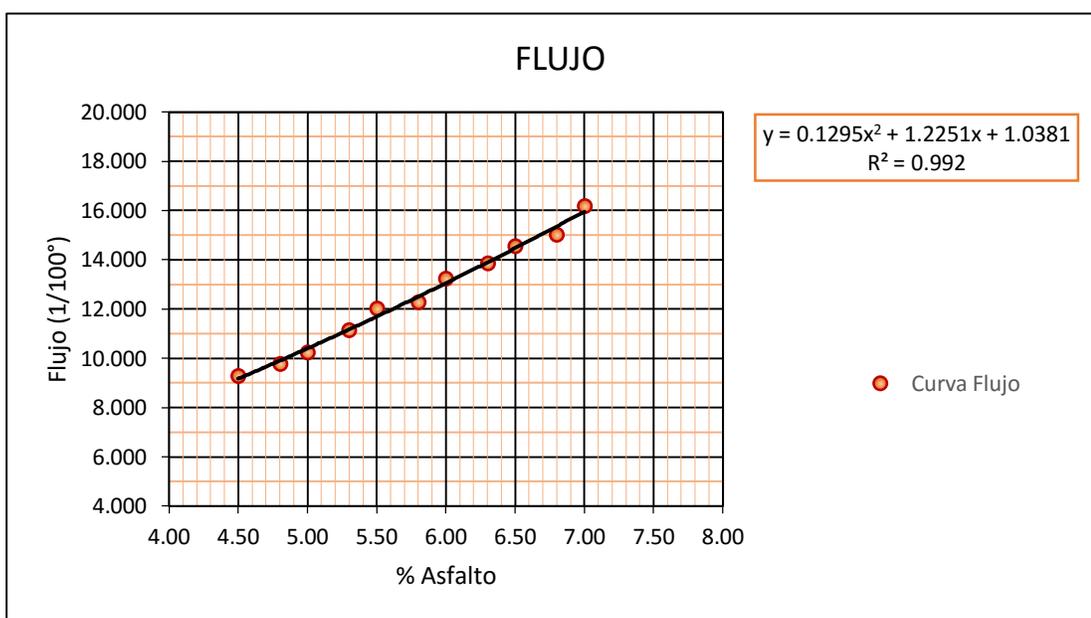
Las estabilidades correspondientes a las mezclas asfálticas con materiales provenientes de distintos bancos tienen una $r^2=62.90\%$ indicando una buena incidencia para la curva promedio y la correlación del 0.793 que es mayor al 0.75 muestra una aceptable relación de los puntos para generar la curva promedio de correlación.

4.3.8 Correlación datos flujo

Analizando los datos para determinar los valores de iniciales y finales de la mezcla mas representativos que seran las condiciones de borde para el metodo del elemento finito se obtiene:

Frontera inicial	9.291
Frontera final	16.168

Gráfica 4. 12 Curva de correlación para el factor flujo



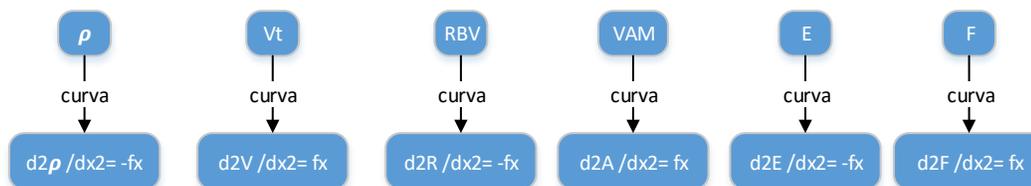
Fuente: Elaboración propia

Las fluencias correspondientes a las mezclas asfálticas con materiales provenientes de distintos bancos tienen una $r^2=99.20\%$ indicando una buena incidencia para la curva promedio y la correlación del 0.995 que es mayor al 0.75 muestra una aceptable relación de los puntos para generar la curva promedio de correlación.

4.4 APLICACIÓN DEL MÉTODO CON LAS CONDICIONES DE BORDE

Paso 1:

- División en elementos finitos (ecuación diferencial de gobierno de cada factor)



Paso 2:

- Vector de desplazamientos (ecuación del elemento)

$$\frac{1}{x_2 - x_1} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\frac{d\rho(x_1)}{dx} \\ \frac{d\rho(x_2)}{dx} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \int_{x_1}^{x_2} f(x)N_1(x)dx \\ \int_{x_1}^{x_2} f(x)N_1(x)dx \end{Bmatrix} \quad (73)$$

Matriz de rigidez del elemento

Condición de frontera

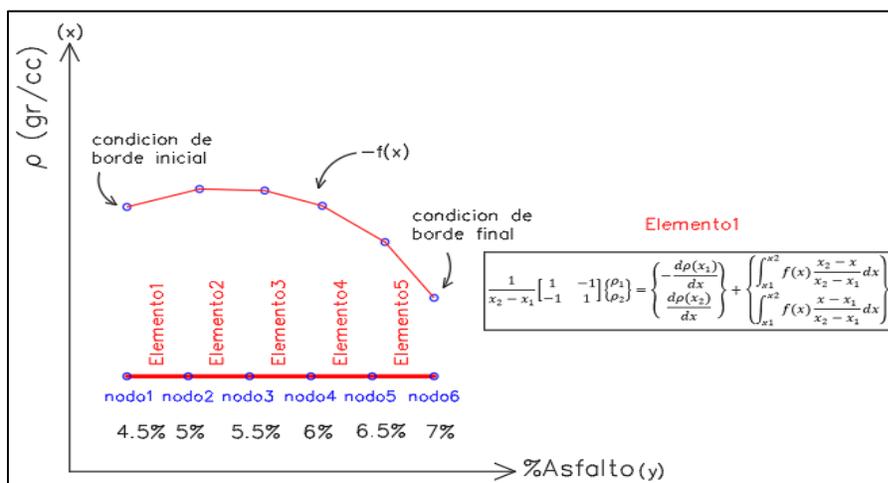
Efectos externos

Una vez obtenida la ecuación del elemento unidimensional, esta se utiliza para aplicar los elementos finitos a los factores marshall.

La función de efectos externos $f(x)$ se asuma de acuerdo al tipo de curva que se simulara para cada factor, teniendo como precedente el sentido y los valores característicos de los diseños previos del tramo estudiado (Tolomosa Pampa Redonda).

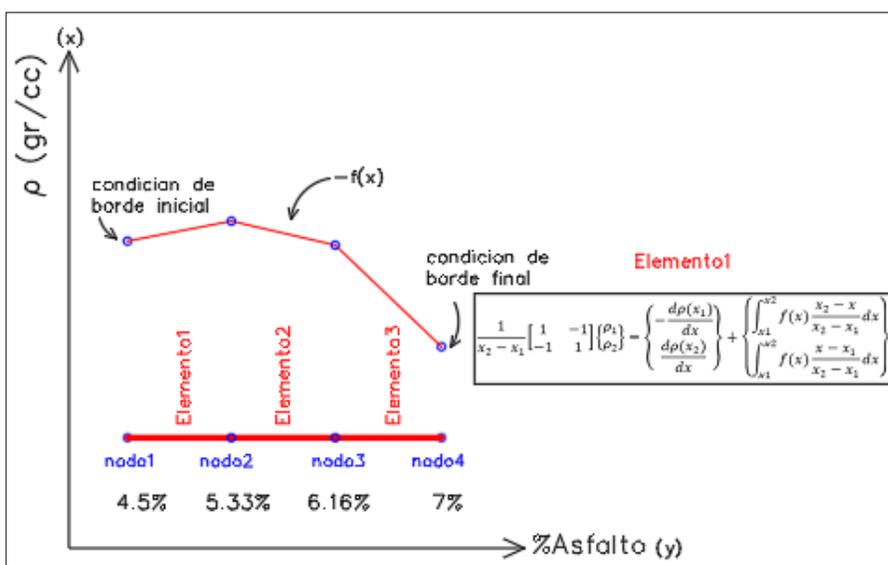
Continuando con la metodología se procede con la unión de cada elemento para obtener la matriz de rigidez completa, con las condiciones de borde que se determinaron en el análisis anterior como se muestra en la siguiente gráfica.

Gráfica 4. 13 Curva de elementos finitos 6 nodos 5 elementos



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4. 14 Curva de elementos finitos 4 nodos 3 elementos



Fuente: Elaboración propia

La cantidad de nudos dependerá del número de elementos que se plante unir, como las dosificaciones de mezclas asfálticas por la metodología Marshall se realizan incrementos parciales de porcentaje de asfalto entre 5 o 6 para determinar su comportamiento, la cantidad de elementos utilizados será de 5 que corresponderá a 6 nudos.

La unión completa de los elementos a partir de la solución de la ecuación matricial dará como resultado la curva simulada de cada factor teniéndose:

Paso 3: La matriz completa de rigidez (ensamblaje de los elementos)

Paso 4: Condición de borde (datos obtenidos del Tramo Tolomosa-Pampa Redonda)

Paso 5: Solución grafica (solución completa de la ecuación)

4.4.1 Simulación factor densidad

Ensamblaje de los elementos

La función $f(x)$ de efectos externos es la función densidad de tipo parabólico y positiva asumida con el valor de 0.1 para valores que deben estar dentro del dominio solución y cumplir la función tipo al que se asemejara la solución aproximada entre las condiciones de borde.

$$\frac{1}{5-4.5} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\frac{d\rho(x_1)}{dx} \\ \frac{d\rho(x_2)}{dx} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \int_{4.5}^5 0.1 \cdot \frac{5-x}{5-4.5} dx \\ \int_{4.5}^5 0.1 \cdot \frac{x-5}{5-4.5} dx \end{Bmatrix}$$

Matriz de rigidez del elemento

Condición de frontera

Efectos externos

Se despeja la ecuación unidimensional en función a los valores adoptados para el factor densidad, con el fin de facilitar los cálculos se utilizó el programa Matlab por que utiliza matrices para la solución del sistema de ecuaciones y permite la programación de elementos a partir de ecuaciones diferenciales.

Figura 4. 1 Despejando el primer término (matriz de rigidez)

```

MATLAB R2015a
HOME PL APPS EDI PUB VIEW
New Open Save Compare Go To Comment Find Breakpoints Run Run and Advance Run and Time
FILE NAVIGATE EDIT BREAKPOINTS RUN
Current Folder: C:\Users\USUARIO\Desktop\FINAL PROYECTO\CORRECCIONES\SIMULADO MARSHALL MATLAB\1simulacion_porcentaje_densidad
Name: 2parte_solucion_de_las_ec_matriz_solucion_porcentaje_densidad.m
1 - clear
2 - clc
3 - %% matriz de rigidez del elemento
4 - v=input('incertar el valor de v: ')
5 - A=1/v*[1,-1;-1,1]
6 - %% integral de los efectos externos
7 - syms x;
Command Window:
incertar el valor de v: 5-4.5
v =
    0.5000
A =
     2    -2
    -2     2
fx >>

```

Fuente: Programa Matlab

Figura 4. 2 Despejando la función de efectos externos

```

MATLAB R2015a
HOME PL APPS EDI PUB VIEW
New Open Save Compare Go To Comment Find Breakpoints Run Run and Advance Run and Time
FILE NAVIGATE EDIT BREAKPOINTS RUN
Current Folder: C:\Users\USUARIO\Desktop\PROYECTO DE GRADO 2018 FINAL\CORRECCIONES\SIMULADO...
Name: 2parte_solucion_de_las_ec_matriz_solucion_porcentaje_densidad.m
6 - %% integral de los efectos externos
7 - syms x;
8 - f=input('introducir la funcion de efectos externos= ');
9 - F=inline(char(f));
10 - a=input('integrar desde: ');
11 - b=input('integrar hasta: ');
12 - F=int(F,a,b)
Command Window:
introducir la funcion de efectos externos= 0.1*((5-x)/(5-4.5))
f =
1 - x/5
integrar desde: 4.5
integrar hasta: 5
F =
1/40
fx >>
script | Ln 9 Col 19

```

Fuente: Programa Matlab

Se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$2\rho_1 - 2\rho_2 = -\frac{d\rho(x_1)}{dx} + 0.025$$

$$-2\rho_1 + 2\rho_2 = \frac{d\rho(x_2)}{dx} + 0.025$$

Como se mencionó en la parte inicial se determinará la matriz completa de rigidez para 5 elementos y 6 nodos correspondientes a las condiciones de borde de cada elemento.

El sistema matricial constituido es de 6x6 en que las condiciones iniciales y finales son representadas por ρ_1 y ρ_6 .

$$\begin{bmatrix} 2 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\frac{d\rho(x_1)}{dx} + 0.025 \\ \frac{d\rho(x_2)}{dx} + 0.025 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 2 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & 4 & -2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \rho_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\frac{d\rho(x_1)}{dx} + 0.025 \\ 0.025 + 0.025 \\ \frac{d\rho(x_3)}{dx} + 0.025 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 2 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & 4 & -2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 4 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \rho_3 \\ \rho_4 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\frac{d\rho(x_1)}{dx} + 0.025 \\ 0.05 \\ 0.025 + 0.025 \\ \frac{d\rho(x_4)}{dx} + 0.025 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 2 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & 4 & -2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 4 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & 4 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \rho_3 \\ \rho_4 \\ \rho_5 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{d\rho(x_1)}{dx} + 0.025 \\ 0.05 \\ 0.05 \\ 0.05 \\ \frac{d\rho(x_5)}{dx} + 0.025 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 2 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & 4 & -2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 4 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & 4 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2 & 4 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \rho_3 \\ \rho_4 \\ \rho_5 \\ \rho_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{d\rho(x_1)}{dx} + 0.025 \\ 0.05 \\ 0.05 \\ 0.05 \\ 0.05 \\ \frac{d\rho(x_6)}{dx} + 0.05 \end{pmatrix}$$

Condiciones de frontera

Los valores de las condiciones iniciales y finales de frontera están dados por el análisis previo de los diseños Marshall en el caso de las densidades de modo que se realice un modelo próximo a la realidad:

$$D(4.5; \rho_1) = D1$$

$$D(5; \rho_2) = D2$$

$$\text{Condición de frontera inicial } D(4.5; \rho_1) = 2.252$$

$$\text{Condición de frontera final } D(7; \rho_6) = 2.309$$

Sustituyendo los valores en la matriz de 6x6 se obtienen los siguientes valores con los que se resolverá el sistema:

$$\frac{d\rho(x_1)}{dx} - 2\rho_2 + 0 + 0 + 0 + 0 = -4.491$$

$$0 + 4\rho_2 - 2\rho_3 + 0 + 0 + 0 = 4.554$$

$$0 - 2\rho_2 + 4\rho_3 - 2\rho_4 + 0 + 0 = 0.05$$

$$0 + 0 - 2\rho_3 + 4\rho_4 - 2\rho_5 + 0 = 0.05$$

$$0 + 0 + 0 - 2\rho_4 + 4\rho_5 + 0 = 4.668$$

$$0 + 0 + 0 + 0 - 2\rho_5 + \frac{d\rho(x_6)}{dx} = -4.593$$

Solución

Figura 4. 3 Introduciendo y resolviendo el sistema de ecuaciones en Matlab

The screenshot shows the MATLAB R2015a environment. The script editor contains the following code:

```

14 %% insertando la matriz
15 B=[1 -2 0 0 0 0 -4.479;0 4 -2 0 0 0 4.554;0 -2 4 -2 0 0 0 0.05;0 0 -2 0 0 0 4.000 -2.000;0 0 0 -2 0 0 4.000 -2.000;0 0 0 0 -2 0 0 4.668;0 0 0 0 0 -2 0 0 -4.593];
16 %% solucion de la matriz
17 R=rref(B)

```

The Command Window displays the matrix B and its reduced row echelon form R:

```

B =
  1.0000  -2.0000   0         0         0         0         0         -4.4790
  0         4.0000  -2.0000   0         0         0         0         4.5540
  0        -2.0000   4.0000  -2.0000   0         0         0         0.0500
  0         0        -2.0000   4.0000  -2.0000   0         0         0.0500
  0         0         0        -2.0000   4.0000   0         0         4.6680
  0         0         0         0        -2.0000  -1.0000   0         -4.5930

R =
  1.0000   0         0         0         0         0         0         0.1478
  0         1.0000   0         0         0         0         0         2.3134
  0         0         1.0000   0         0         0         0         2.3498
  0         0         0         1.0000   0         0         0         2.3612
  0         0         0         0         1.0000   0         0         2.3476
  0         0         0         0         0         1.0000   0         -0.1022

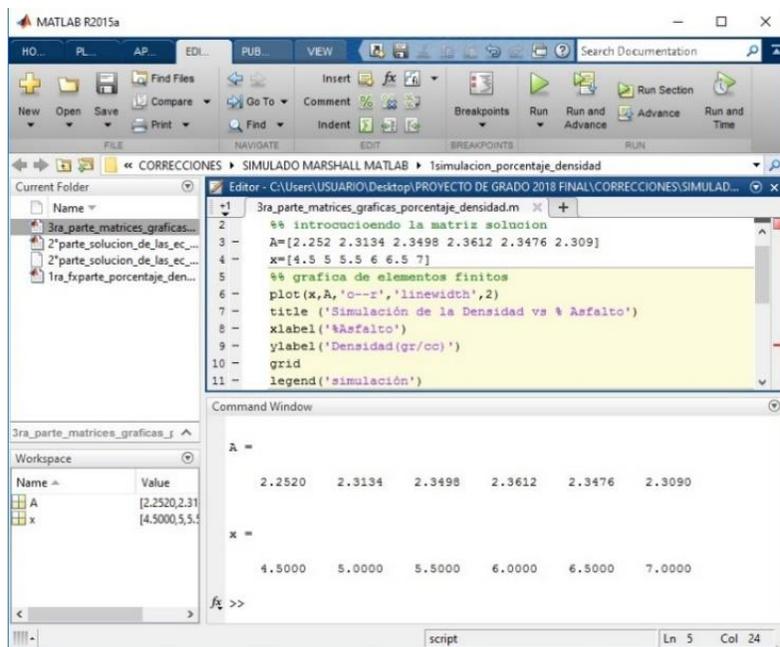
```

The Workspace window shows the variables B and R as 6x7 double matrices.

Fuente: Programa Matlab

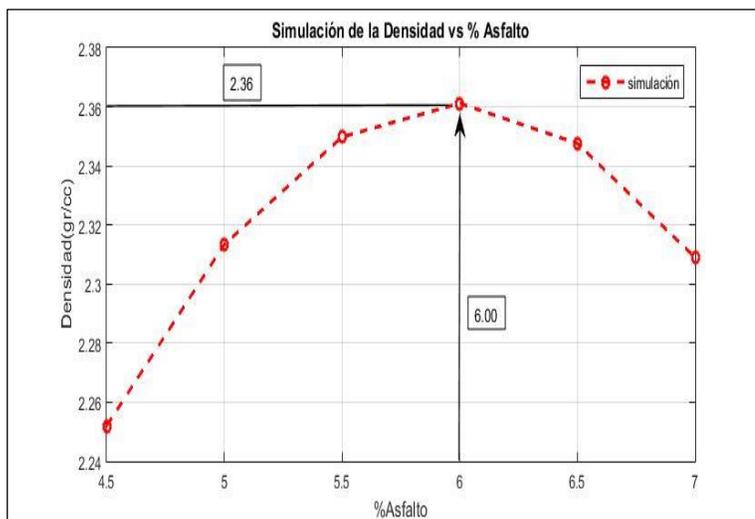
Sustituyendo los valores obtenidos y graficando la función del modelo.

Figura 4. 4 Introduciendo los valores determinados para ser graficados



Fuente: Programa Matlab

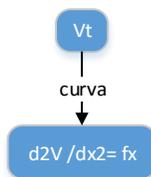
Figura 4. 5 Curva densidad simulada



Fuente: Programa Matlab

4.4.2 Simulación factor vacíos totales

Division en elementos finitos(ecuacion diferencial de gobierno de cada factor)



Vector de desplazamientos (ecuación del elemento)

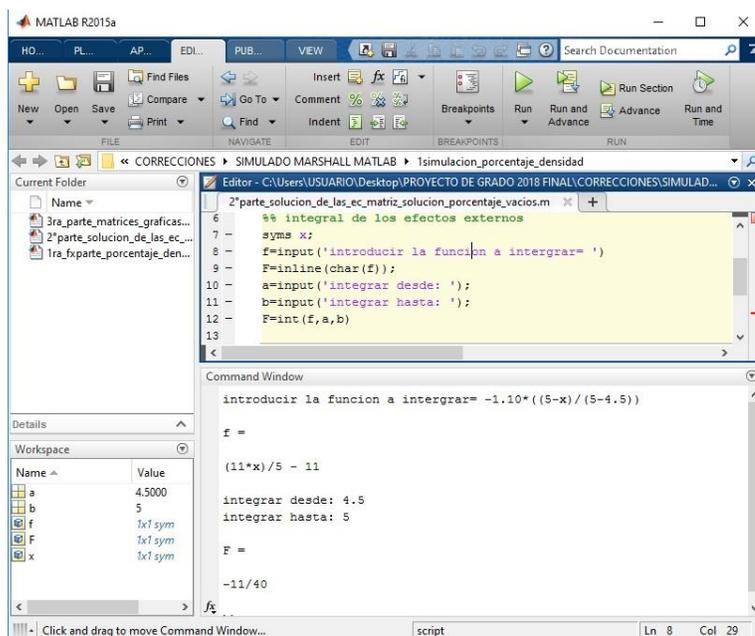
$$\frac{1}{x_2 - x_1} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\frac{dv(x_1)}{dx} \\ \frac{dv(x_2)}{dx} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \int_{x_1}^{x_2} f(x)N_1(x)dx \\ \int_{x_1}^{x_2} f(x)N_1(x)dx \end{Bmatrix}$$

La matriz completa de rigidez (ensamblaje de los elementos)

La función $f(x)$ de efectos externos es la función de vacíos totales de tipo parabólico y negativa asumida con el valor de -1.10 para valores que deben estar dentro del domino solución y cumplir la función tipo al que se asemejara la solución aproximada entre las condiciones de borde.

$$\frac{1}{5 - 4.5} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\frac{dv(x_1)}{dx} \\ \frac{dv(x_2)}{dx} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \int_{4.5}^5 -1.10 \cdot \frac{5-x}{5-4.5} dx \\ \int_{4.5}^5 -1.10 \cdot \frac{x-4.5}{5-4.5} dx \end{Bmatrix}$$

Figura 4. 6 Despejando la función de efectos externos



Fuente: Programa Matlab

Se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$2v_1 - 2v_2 = -\frac{dv(x_1)}{dx} - 0.275$$

$$-2v_1 \quad 2v_2 = \frac{dv(x_2)}{dx} - 0.275$$

La matriz completa de rigidez correspondiente a 6 nodos constituye un sistema matricial de 6x6 en el que las condiciones iniciales y finales son representadas por $v1$ y $v6$.

$$\begin{bmatrix} 2 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & 4 & -2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 4 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & 4 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2 & 4 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \\ v_6 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\frac{dv(x_1)}{dx} - 0.275 \\ -0.550 \\ -0.550 \\ -0.550 \\ -0.550 \\ \frac{dv(x_6)}{dx} - 0.275 \end{Bmatrix}$$

Condiciones de frontera

Los valores de las condiciones iniciales y finales de frontera están dadas por el análisis previo de los diseños Marshall en el caso de los vacíos totales de modo de realizar un modelo próximo a la realidad:

$$V(4.5; \mathbf{v1}) = \mathbf{V1}$$

$$V(5; \mathbf{v2}) = \mathbf{V2}$$

Condición de frontera inicial $V(4.5; \mathbf{v1}) = 8.932$

Condición de frontera final $V(7; \mathbf{v6}) = 2.436$

Sustituyendo los valores en la matriz de 6x6 se obtienen los siguientes valores con los que se resolverá el sistema:

$$\frac{dv(x_1)}{dx} - 2v_2 + 0 + 0 + 0 + 0 = -18.139$$

$$0 + 4v_2 - 2v_3 + 0 + 0 + 0 = 17.314$$

$$0 - 2v_2 + 4v_3 - 2v_4 + 0 + 0 = -0.55$$

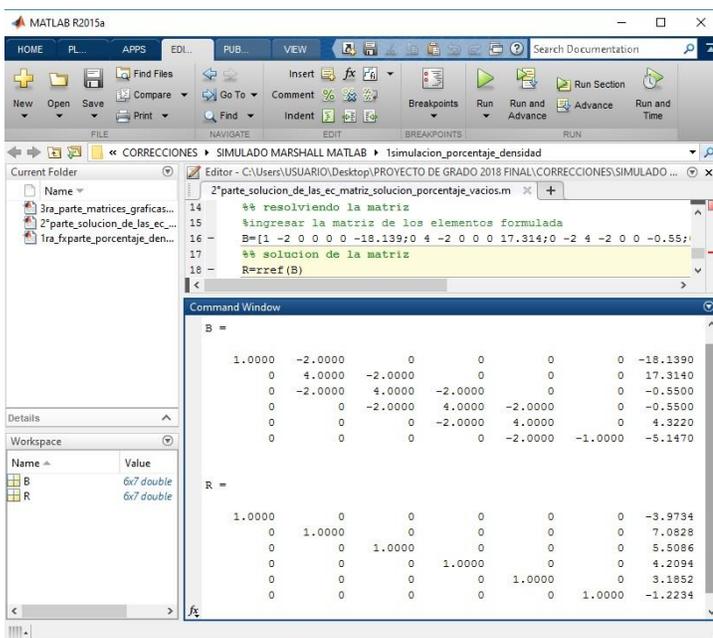
$$0 + 0 - 2v_3 + 4v_4 - 2v_5 + 0 = -0.55$$

$$0 + 0 + 0 - 2v_4 + 4v_5 + 0 = 4.322$$

$$0 + 0 + 0 + 0 - 2v_5 + \frac{dv(x_6)}{dx} = -5.147$$

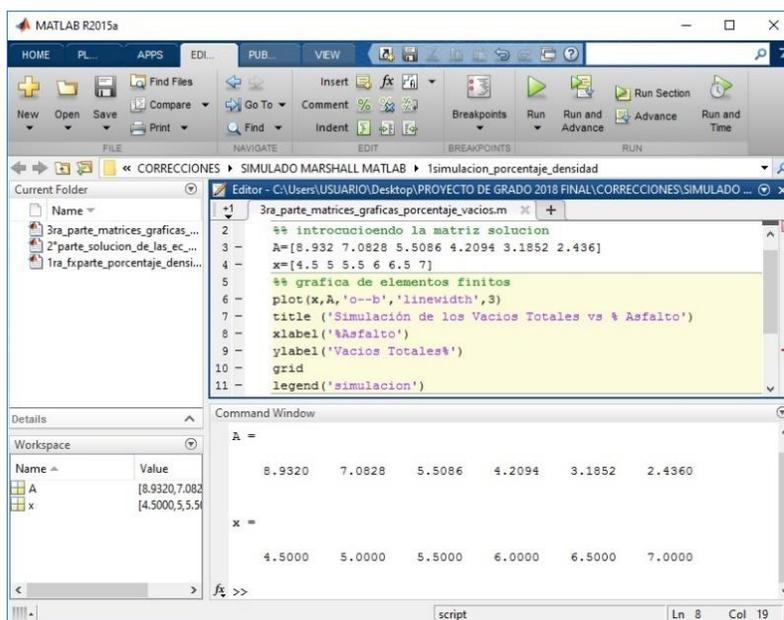
Solución

Figura 4. 7 Introduciendo y resolviendo el sistema de ecuaciones en Matlab



Fuente: Programa Matlab

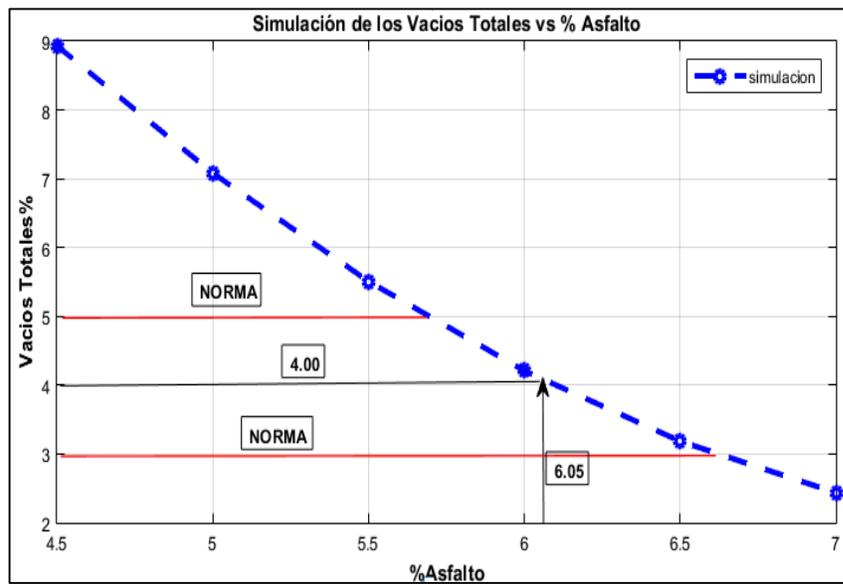
Figura 4. 8 Introduciendo los valores determinados para ser graficados



Fuente: Programa Matlab

Sustituyendo los valores obtenidos y graficando la función del modelo.

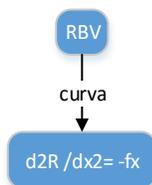
Figura 4. 9 Curva simulada vacíos totales



Fuente: Programa Matlab

4.4.3 Simulación factor betún vacíos (RBV)

Division en elementos finitos(ecuacion diferencial de gobierno de cada factor)



Vector de desplazamientos (ecuacion del elemento)

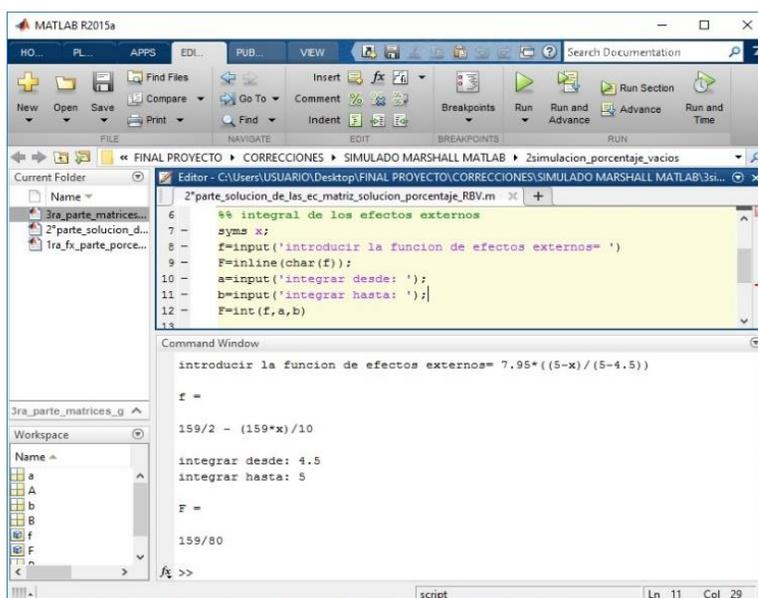
$$\frac{1}{x_2 - x_1} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\frac{dr(x_1)}{dx} \\ \frac{dr(x_2)}{dx} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \int_{x_1}^{x_2} f(x) N_1(x) dx \\ \int_{x_1}^{x_2} f(x) N_1(x) dx \end{Bmatrix}$$

La matriz completa de rigidez (ensamblaje de los elementos)

La función $f(x)$ de efectos externos es la función de betún vacíos de tipo parabólico y positiva asumida con el valor de 7.95 para valores que deben estar dentro del domino solución y cumplir la función tipo al que se asemejara la solución aproximada entre las condiciones de borde.

$$\frac{1}{5 - 4.5} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\frac{dr(x_1)}{dx} \\ \frac{dr(x_2)}{dx} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \int_{4.5}^5 7.95 \cdot \frac{5-x}{5-4.5} dx \\ \int_{4.5}^5 7.95 \cdot \frac{x-4.5}{5-4.5} dx \end{Bmatrix}$$

Figura 4. 10 Despejando la función de efectos externos



Fuente: Programa Matlab

Se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$2r_1 - 2r_2 = -\frac{dr(x_1)}{dx} + 1.987$$

$$-2r_1 \quad 2r_2 = \frac{dr(x_1)}{dx} + 1.987$$

La matriz completa de rigidez correspondiente a 6 nodos constituye un sistema matricial de 6x6 en el que las condiciones iniciales y finales son representadas por $r1$ y $r6$.

$$\begin{bmatrix} 2 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & 4 & -2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 4 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & 4 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2 & 4 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \\ r_5 \\ r_6 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\frac{dr(x_1)}{dx} + 1.987 \\ 3.974 \\ 3.974 \\ 3.974 \\ 3.974 \\ \frac{dr(x_6)}{dx} + 1.987 \end{Bmatrix}$$

Condiciones de frontera

Los valores de las condiciones iniciales y finales de frontera están dadas por el análisis previo de los diseños Marshall en el caso de la relación betún vacíos de modo que se realice un modelo próximo a la realidad:

$$R(4.5; \mathbf{r1}) = \mathbf{R1}$$

$$R(5; \mathbf{r2}) = \mathbf{R2}$$

Condición de frontera inicial $V(4.5; \mathbf{r1}) = 52.958$

Condición de frontera final $V(7; \mathbf{r2}) = 83.771$

Sustituyendo los valores en la matriz de 6x6 se obtienen los siguientes valores con los que se resolverá el sistema

$$\frac{dr(x_1)}{dx} - 2r_2 + 0 + 0 + 0 + 0 = -103.929$$

$$0 + 4r_2 - 2r_3 + 0 + 0 + 0 = 109.890$$

$$0 - 2r_2 + 4r_3 - 2r_4 + 0 + 0 = 3.974$$

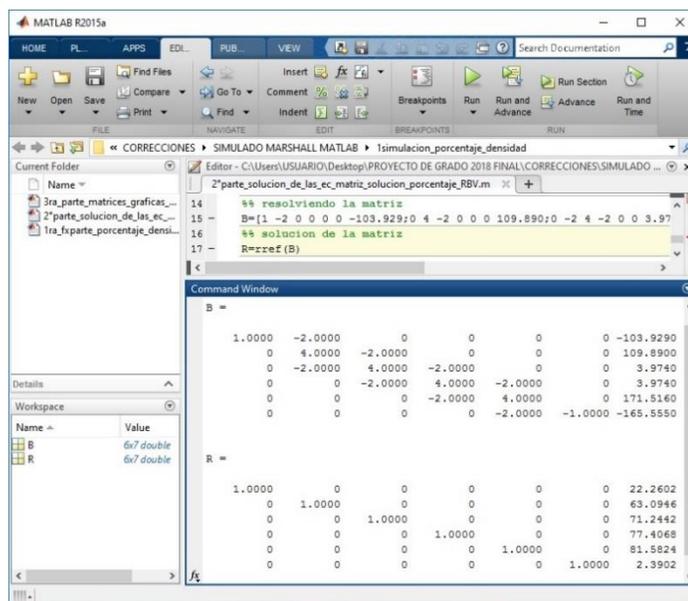
$$0 + 0 - 2r_3 + 4r_4 - 2r_5 + 0 = 3.974$$

$$0 + 0 + 0 - 2r_4 + 4r_5 + 0 = 171.516$$

$$0 + 0 + 0 + 0 - 2r_5 + \frac{dr(x_6)}{dx} = -165.555$$

Solución.

Figura 4. 11 Introduciendo y resolviendo el sistema de ecuaciones en Matlab



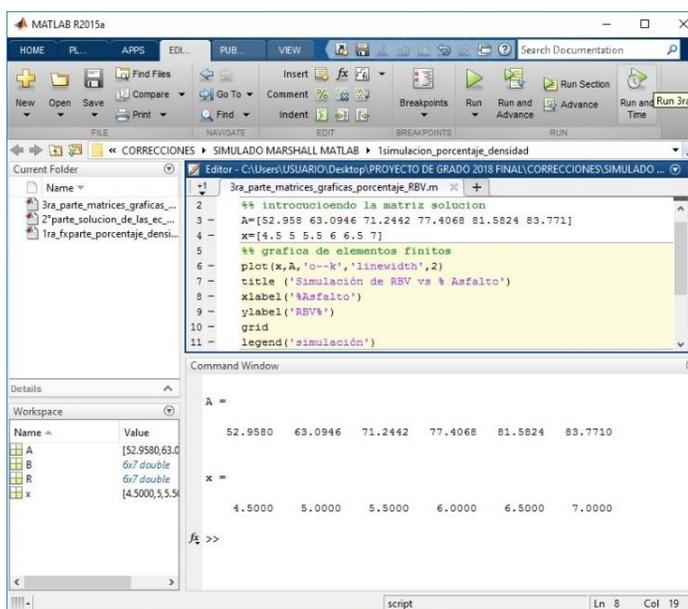
```

MATLAB R2015a
HOME PL... APPS EDI... PUB... VIEW
Find Files Insert
New Open Save Compare Go To Comment % Indent Breakpoints Run Run and Run Section Run and Run Time
File Edit Breakpoints Run
CORRECCIONES SIMULADO MARSHALL MATLAB 1simulacion_porcentaje_densidad
C:\Users\USUARIO\Desktop\PROYECTO DE GRADO 2018 FINAL\CORRECCIONES\SIMULADO ...
3ra_parte_matrices_graficas...
2parte_solucion_de_las_ec...
1ra_fxparte_porcentaje_densi...
2parte_solucion_de_las_ec_matriz_solucion_porcentaje_RBV.m
%% resolviendo la matriz
B=[1 -2 0 0 0 0 -103.929;0 4 -2 0 0 0 109.890;0 -2 4 -2 0 0 3.97
%% solucion de la matriz
R=rref(B)
Command Window
B =
1.0000 -2.0000 0 0 0 0 -103.9290
0 4.0000 -2.0000 0 0 0 109.8900
0 -2.0000 4.0000 -2.0000 0 0 3.9740
0 0 -2.0000 4.0000 -2.0000 -2.0000 0 3.9740
0 0 0 -2.0000 4.0000 0 -171.5160
0 0 0 0 -2.0000 4.0000 -1.0000 -165.5550
R =
1.0000 0 0 0 0 0 22.2602
0 1.0000 0 0 0 0 63.0946
0 0 1.0000 0 0 0 71.2442
0 0 0 1.0000 0 0 77.4068
0 0 0 0 1.0000 0 81.5824
0 0 0 0 0 1.0000 2.3902
Workspace
Name Value
B 6x7 double
R 6x7 double

```

Fuente: Programa Matlab

Figura 4. 12 Introduciendo los valores determinados para ser graficados



```

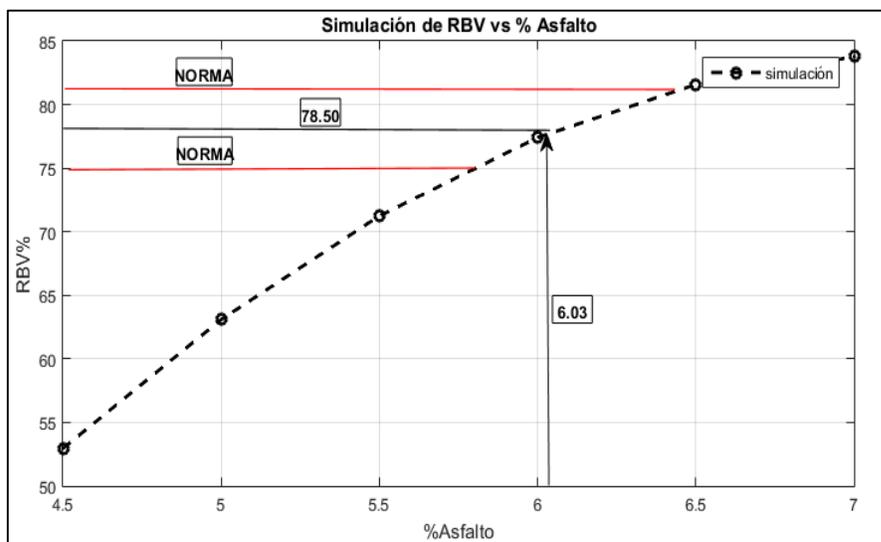
MATLAB R2015a
HOME PL... APPS EDI... PUB... VIEW
Find Files Insert
New Open Save Compare Go To Comment % Indent Breakpoints Run Run and Run Section Run and Run Time
File Edit Breakpoints Run
CORRECCIONES SIMULADO MARSHALL MATLAB 1simulacion_porcentaje_densidad
C:\Users\USUARIO\Desktop\PROYECTO DE GRADO 2018 FINAL\CORRECCIONES\SIMULADO ...
3ra_parte_matrices_graficas...
2parte_solucion_de_las_ec...
1ra_fxparte_porcentaje_densi...
3ra_parte_matrices_graficas_porcentaje_RBV.m
%% introduciendo la matriz solucion
A=[52.958 63.0946 71.2442 77.4068 81.5824 83.771]
x=[4.5 5 5.5 6 6.5 7]
%% grafica de elementos finitos
plot(x,A,'o--k','linewidth',2)
title('Simulación de RBV vs % Asfalto')
xlabel('%Asfalto')
ylabel('RBV%')
grid
legend('simulación')
Command Window
A =
52.9580 63.0946 71.2442 77.4068 81.5824 83.7710
x =
4.5000 5.0000 5.5000 6.0000 6.5000 7.0000
fx >>
script Ln 8 Col 19

```

Fuente: Programa Matlab

Sustituyendo los valores obtenidos y graficando la función del modelo.

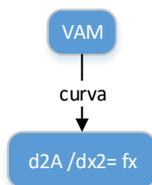
Figura 4. 13 Curva simulada RBV



Fuente: Programa Matlab

4.4.4 Simulación factor vacíos de agregado mineral (VAM)

Division en elementos finitos(ecuacion diferencial de gobierno de cada factor)



Vector de desplazamientos (ecuacion del elemento)

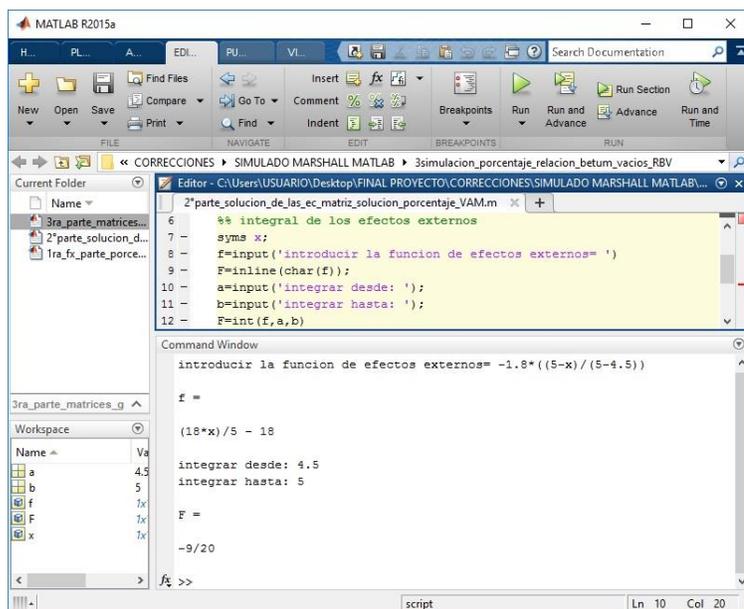
$$\frac{1}{x_2 - x_1} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\frac{da(x_1)}{dx} \\ \frac{da(x_2)}{dx} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \int_{x_1}^{x_2} f(x)N_1(x)dx \\ \int_{x_1}^{x_2} f(x)N_1(x)dx \end{Bmatrix}$$

La matriz completa de rigidez (ensamblaje de los elementos)

La función $f(x)$ de efectos externos es la función de vacíos de agregado mineral de tipo parabólico y negativa asumida con el valor de -1.80 para valores que deben estar dentro del domino solución y cumplir la función tipo al que se asemejara la solución aproximada entre las condiciones de borde.

$$\frac{1}{5 - 4.5} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\frac{da(x_1)}{dx} \\ \frac{da(x_2)}{dx} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \int_{4.5}^5 -1.80 \cdot \frac{5-x}{5-4.5} dx \\ \int_{4.5}^5 -1.80 \cdot \frac{x-4.5}{5-4.5} dx \end{Bmatrix}$$

Figura 4. 14 Despejando la función de efectos externos



Fuente: Programa Matlab

Se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$2a_1 - 2a_2 = -\frac{da(x_1)}{dx} - 0.45$$

$$-2a_1 \quad 2a_2 = \frac{da(x_1)}{dx} - 0.45$$

La matriz completa de rigidez correspondiente a 6 nodos constituye un sistema matricial de 6x6 en el que las condiciones iniciales y finales son representadas por $a1$ y $a6$.

$$\begin{bmatrix} 2 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & 4 & -2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 4 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & 4 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2 & 4 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\frac{da(x_1)}{dx} - 0.45 \\ -0.9 \\ -0.9 \\ -0.9 \\ -0.9 \\ \frac{da(x_6)}{dx} - 0.45 \end{Bmatrix}$$

Condiciones de frontera

Los valores de las condiciones iniciales y finales de frontera están dadas por el análisis previo de los diseños Marshall en el caso de los vacíos de agregado mineral de modo que se realice un modelo próximo a la realidad:

$$A(4.5; \mathbf{a1}) = \mathbf{A1}$$

$$A(5; \mathbf{a2}) = \mathbf{A2}$$

$$\text{Condición de frontera inicial } A(4.5; \mathbf{a1}) = 18.444$$

$$\text{Condición de frontera final } A(7; \mathbf{a2}) = 19.138$$

Sustituyendo los valores en la matriz de 6x6 se obtienen los siguientes valores con los que se resolverá el sistema

$$\frac{da(x_1)}{dx} - 2a_2 + 0 + 0 + 0 + 0 = -37.338$$

$$0 + 4a_2 - 2a_3 + 0 + 0 + 0 = 35.988$$

$$0 - 2a_2 + 4a_3 - 2a_4 + 0 + 0 = -0.9$$

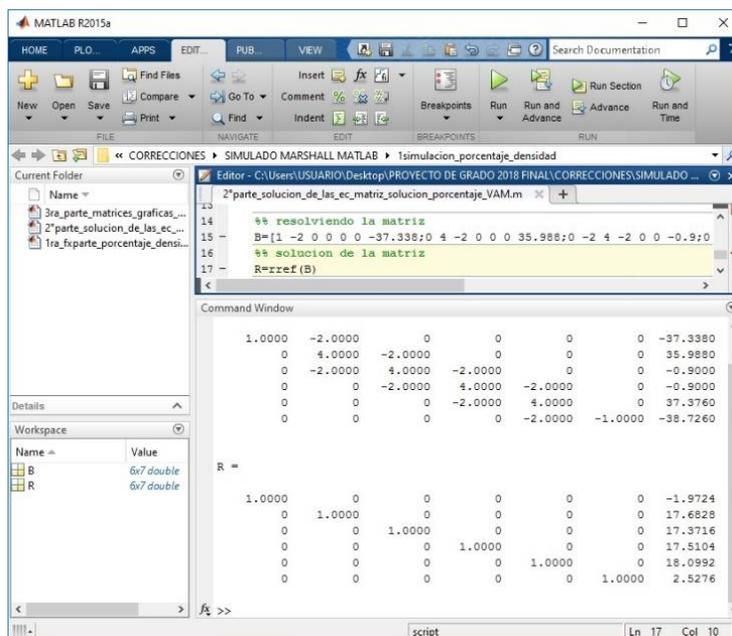
$$0 + 0 - 2a_3 + 4a_4 - 2a_5 + 0 = -0.9$$

$$0 + 0 + 0 - 2a_4 + 4a_5 + 0 = 37.338$$

$$0 + 0 + 0 + 0 - 2a_5 + \frac{da(x_6)}{dx} = -38.726$$

Solución

Figura 4. 15 Introduciendo y resolviendo el sistema de ecuaciones en Matlab



```

14 %% resolviendo la matriz
15 B=[1 -2 0 0 0 0 -37.338;0 4 -2 0 0 0 35.988;0 -2 4 -2 0 0 -0.9;0
16 %% solucion de la matriz
17 R=rref(B)

```

Command Window

```

1.0000 -2.0000 0 0 0 0 -37.3380
0 4.0000 -2.0000 0 0 0 35.9880
0 -2.0000 4.0000 -2.0000 0 0 -0.9000
0 0 -2.0000 4.0000 -2.0000 0 -0.9000
0 0 0 -2.0000 4.0000 0 37.3760
0 0 0 0 -2.0000 -1.0000 -38.7260

```

R =

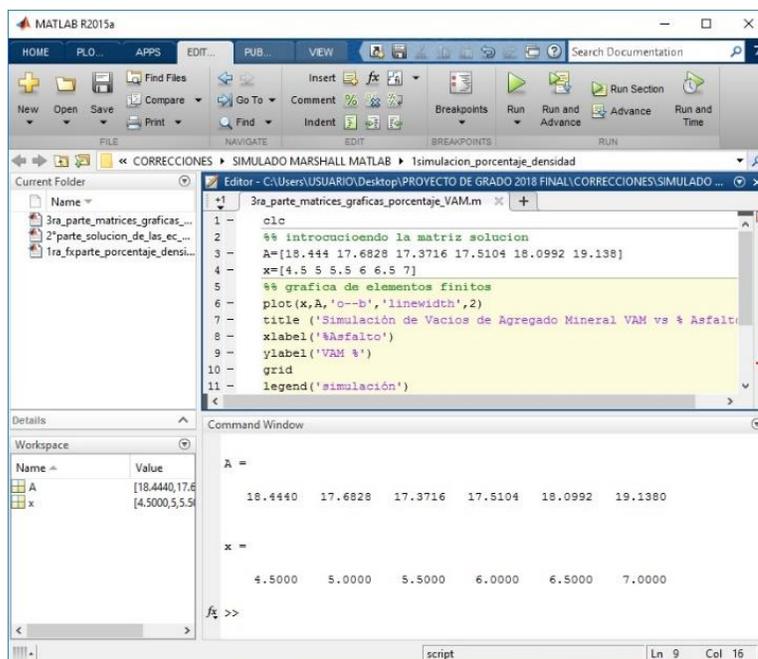
```

1.0000 0 0 0 0 0 -1.9724
0 1.0000 0 0 0 0 17.6828
0 0 1.0000 0 0 0 17.3716
0 0 0 1.0000 0 0 17.5104
0 0 0 0 1.0000 0 18.0992
0 0 0 0 0 1.0000 2.5276

```

Fuente: Programa Matlab

Figura 4. 16 Introduciendo los valores determinados para ser graficados



```

1 - clc
2 %% introduciendo la matriz solucion
3 A=[18.444 17.6828 17.3716 17.5104 18.0992 19.138]
4 x=[4.5 5 5.5 6 6.5 7]
5 %% grafica de elementos finitos
6 plot(x,A,'o--b','linewidth',2)
7 title('Simulación de Vacíos de Agregado Mineral VAM vs % Asfalto')
8 xlabel('%Asfalto')
9 ylabel('VAM %')
10 grid
11 legend('simulación')

```

Command Window

```

A =
18.4440 17.6828 17.3716 17.5104 18.0992 19.1380

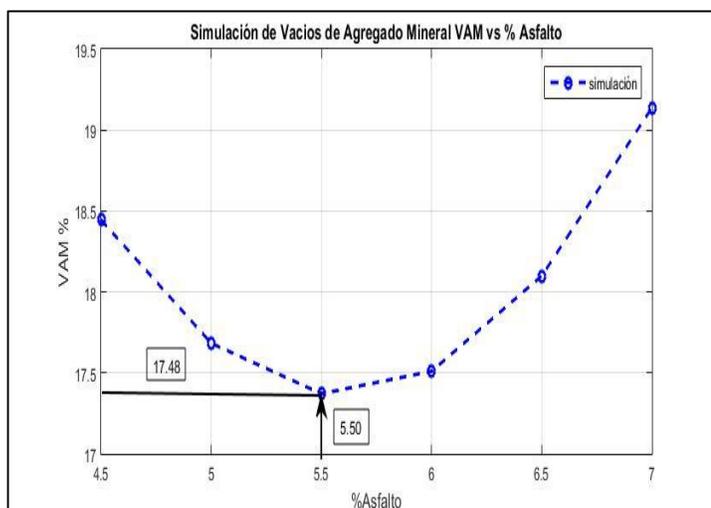
x =
4.5000 5.0000 5.5000 6.0000 6.5000 7.0000

```

Fuente: Programa Matlab

Sustituyendo los valores obtenidos y graficando la función del modelo.

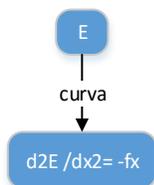
Figura 4. 17 Curva simulada vacíos de agregado mineral



Fuente: Programa Matlab

4.4.5 Simulación factor estabilidad

Division en elementos finitos(ecuacion diferencial de gobierno de cada factor)



Vector de desplazamientos (ecuacion del elemento)

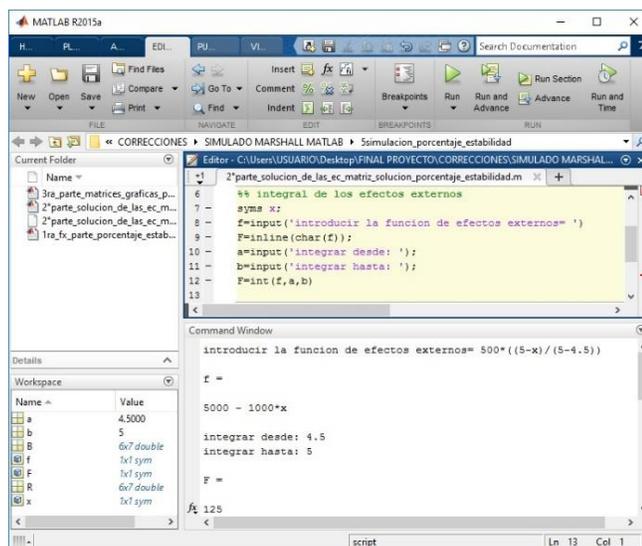
$$\frac{1}{x_2 - x_1} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\frac{de(x_1)}{dx} \\ \frac{de(x_2)}{dx} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \int_{x_1}^{x_2} f(x)N_1(x)dx \\ \int_{x_1}^{x_2} f(x)N_2(x)dx \end{Bmatrix}$$

La matriz completa de rigidez (ensamblaje de los elementos)

La función $f(x)$ de efectos externos es la función estabilidad de tipo parabólico y positivo asumido con el valor de 500 para valores que deben estar dentro del dominio solución y cumplir la función tipo al que se asemejara la solución aproximada entre las condiciones de borde.

$$\frac{1}{5 - 4.5} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\frac{de(x_1)}{dx} \\ \frac{de(x_2)}{dx} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \int_{4.5}^5 500 \cdot \frac{5-x}{5-4.5} dx \\ \int_{4.5}^5 500 \cdot \frac{x-4.5}{5-4.5} dx \end{Bmatrix}$$

Figura 4. 18 Despejando la función de efectos externos



Fuente: Programa Matlab

Se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$2e_1 - 2e_2 = -\frac{de(x_1)}{dx} + 125$$

$$-2e_1 \quad 2e_2 = \frac{de(x_1)}{dx} + 125$$

La matriz completa de rigidez correspondiente a 6 nodos constituye un sistema matricial de 6x6 en el que las condiciones iniciales y finales son representadas por e_1 y e_6 .

$$\begin{bmatrix} 2 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & 4 & -2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 4 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & 4 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2 & 4 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \\ e_5 \\ e_6 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\frac{de(x_1)}{dx} + 125 \\ 250 \\ 250 \\ 250 \\ 250 \\ \frac{de(x_6)}{dx} + 125 \end{Bmatrix}$$

Condiciones de frontera

Los valores de las condiciones iniciales y finales de frontera están dadas por el análisis previo de los diseños Marshall en el caso de la estabilidad de modo que se realice un modelo próximo a la realidad:

$$E(4.5; \mathbf{a1}) = \mathbf{E1}$$

$$E(5; \mathbf{a2}) = \mathbf{E2}$$

$$\text{Condición de frontera inicial } E(4.5; \mathbf{a1}) = 1394.752$$

$$\text{Condición de frontera final } E(7; \mathbf{a2}) = 1760.969$$

Sustituyendo los valores en la matriz de 6x6 se obtienen los siguientes valores con los que se resolverá el sistema

$$\frac{de(x_1)}{dx} - 2e_2 + 0 + 0 + 0 + 0 = -2664.504$$

$$0 + 4e_2 - 2e_3 + 0 + 0 + 0 = 3039.504$$

$$0 - 2e_2 + 4e_3 - 2e_4 + 0 + 0 = 250$$

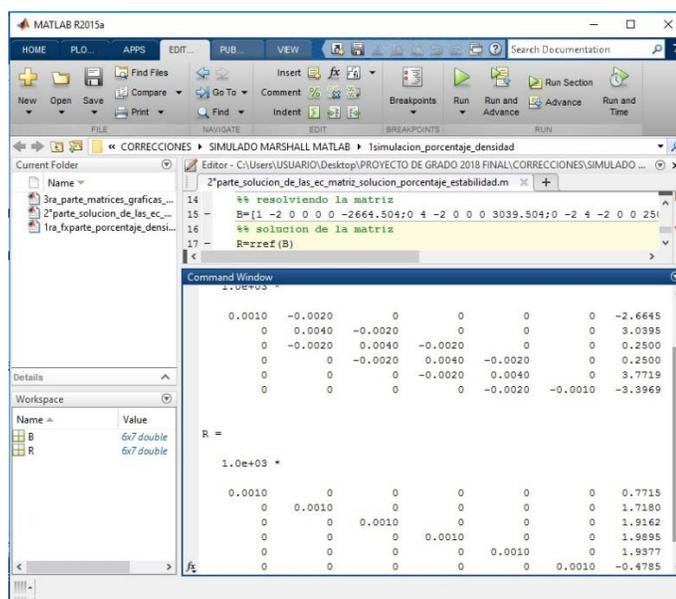
$$0 + 0 - 2e_3 + 4e_4 - 2e_5 + 0 = 250$$

$$0 + 0 + 0 - 2e_4 + 4e_5 + 0 = 3992.018$$

$$0 + 0 + 0 + 0 - 2e_5 + \frac{de(x_6)}{dx} = -3617.018$$

Solución.

Figura 4. 19 Introduciendo y resolviendo el sistema de ecuaciones en Matlab



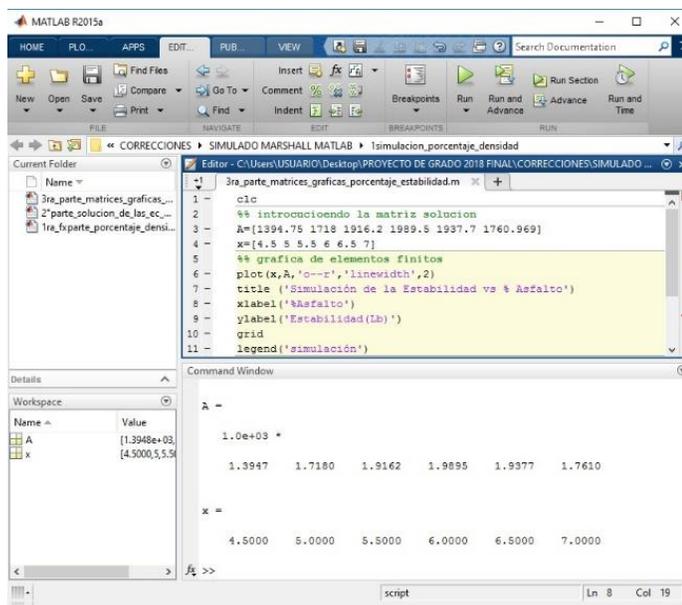
```

MATLAB R2015a
CORRECCIONES > SIMULADO MARSHALL MATLAB > 1simulacion_porcentaje_estabilidad.m
Editor - C:\Users\USUARIO\Desktop\PROYECTO DE GRADO 2018 FINAL\CORRECCIONES\SIMULADO ...
2\parte_solucion_de_las_ec_matriz_solucion_porcentaje_estabilidad.m
14 %% resolviendo la matriz
15 B=[1 -2 0 0 0 -2664.50;0 4 -2 0 0 0 3039.50;0 -2 4 -2 0 0 25(
16 %% solucion de la matriz
17 R=inv(B)
Command Window
1.00e+03
0.0010 -0.0020 0 0 0 0 -2.6645
0 0.0040 -0.0020 0 0 0 3.0395
0 -0.0020 0.0040 -0.0020 0 0 0.2500
0 0 -0.0020 0.0040 -0.0020 0 0.2500
0 0 0 -0.0020 0.0040 0 3.7719
0 0 0 0 -0.0020 -0.0010 -3.3969
R =
1.0e+03 *
0.0010 0 0 0 0 0 0.7715
0 0.0010 0 0 0 0 1.7180
0 0 0.0010 0 0 0 1.9162
0 0 0 0.0010 0 0 1.9895
0 0 0 0 0.0010 0 1.9377
0 0 0 0 0 0.0010 -0.4785
Workspace
Name Value
B 6x7 double
R 6x7 double

```

Fuente: Programa Matlab

Figura 4. 20 Introduciendo los valores determinados para ser graficados



```

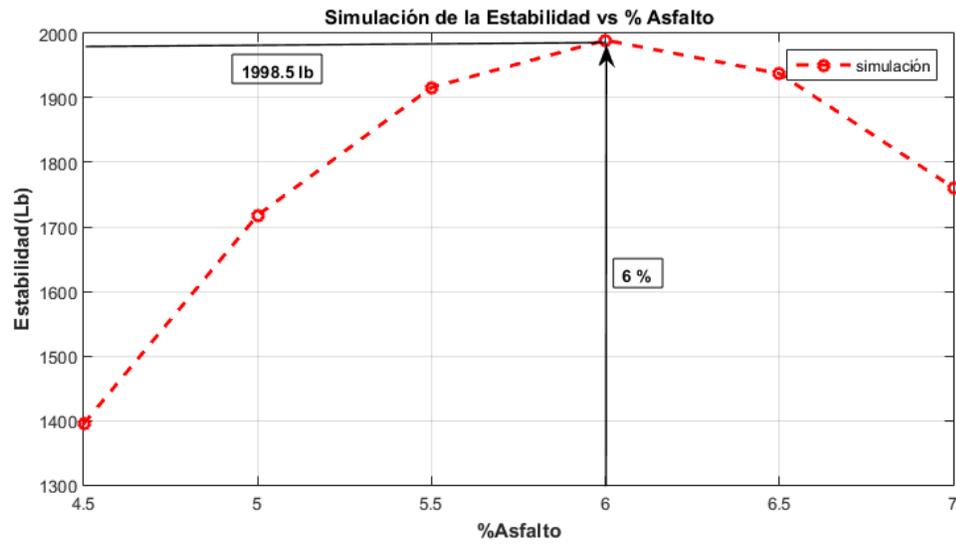
MATLAB R2015a
CORRECCIONES > SIMULADO MARSHALL MATLAB > 1simulacion_porcentaje_estabilidad.m
Editor - C:\Users\USUARIO\Desktop\PROYECTO DE GRADO 2018 FINAL\CORRECCIONES\SIMULADO ...
3\parte_matrices_graficas_porcentaje_estabilidad.m
1 - clic
2 %% introduciendo la matriz solucion
3 A=[1394.75 1718 1916.2 1989.5 1937.7 1760.969]
4 x=[4.5 5 5.5 6 6.5 7]
5 %% grafico de elementos finitos
6 plot(x,A,'o-r','linewidth',2)
7 title('Simulación de la Estabilidad vs % Asfalto')
8 xlabel('%Asfalto')
9 ylabel('Estabilidad(Lb)')
10 grid
11 legend('simulación')
Command Window
A =
1.0e+03 *
1.3947 1.7180 1.9162 1.9895 1.9377 1.7610
x =
4.5000 5.0000 5.5000 6.0000 6.5000 7.0000
Workspace
Name Value
A [1.3948e+03,
x [4.5000,5.5000
script Ln 8 Col 19

```

Fuente: Programa Matlab

Sustituyendo los valores obtenidos y graficando la función del modelo.

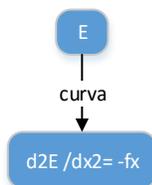
Figura 4. 21 Curva simulada estabilidad



Fuente: Programa Matlab

4.4.6 Simulación factor flujo

Division en elementos finitos(ecuacion diferencial de gobierno de cada factor)



Vector de desplazamientos (ecuacion del elemento)

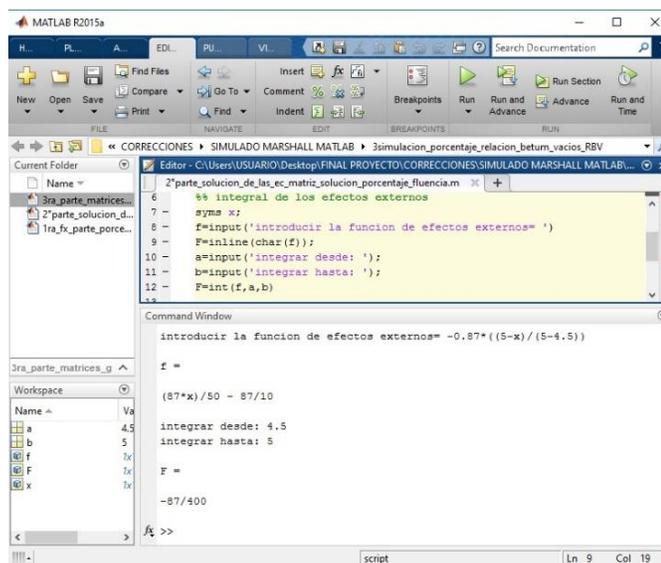
$$\frac{1}{x_2 - x_1} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\frac{df(x_1)}{dx} \\ \frac{df(x_2)}{dx} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \int_{x_1}^{x_2} f(x) N_1(x) dx \\ \int_{x_1}^{x_2} f(x) N_2(x) dx \end{Bmatrix}$$

La matriz completa de rigidez (ensamblaje de los elementos)

La función $f(x)$ de efectos externos es la función flujo tipo parabólico y negativo asumido con el valor de -0.87 para valores que deben estar dentro del dominio solución y cumplir la función tipo al que se asemejara la solución aproximada entre las condiciones de borde.

$$\frac{1}{5 - 4.5} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\frac{df(x_1)}{dx} \\ \frac{df(x_2)}{dx} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \int_{4.5}^5 -0.87 \cdot \frac{5-x}{5-4.5} dx \\ \int_{4.5}^5 -0.87 \cdot \frac{x-4.5}{5-4.5} dx \end{Bmatrix}$$

Figura 4. 22 Despejando la función de efectos externos



Fuente: Programa Matlab

Se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$2f_1 - 2f_2 = -\frac{df(x_1)}{dx} - 0.217$$

$$-2f_1 \quad 2f_2 = \frac{df(x_2)}{dx} - 0.217$$

La matriz completa de rigidez correspondiente a 6 nodos constituye un sistema matricial de 6x6 en el que las condiciones iniciales y finales son representadas por $f1$ y $f6$.

$$\begin{bmatrix} 2 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & 4 & -2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 4 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & 4 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2 & 4 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\frac{df(x_1)}{dx} - 0.217 \\ -0.434 \\ -0.434 \\ -0.434 \\ -0.434 \\ \frac{df(x_6)}{dx} - 0.217 \end{Bmatrix}$$

Condiciones de frontera

Los valores de las condiciones iniciales y finales de frontera están dadas por el análisis previo de los diseños Marshall en el caso del flujo de modo que se realice un modelo próximo a la realidad:

$$F(4.5; \mathbf{f1}) = \mathbf{F1}$$

$$F(5; \mathbf{f2}) = \mathbf{F2}$$

$$\text{Condición de frontera inicial } F(4.5; \mathbf{f1}) = 9.291$$

$$\text{Condición de frontera final } F(7; \mathbf{f7}) = 16.168$$

Sustituyendo los valores en la matriz de 6x6 se obtienen los siguientes valores con los que se resolverá el sistema

$$\frac{df(x_1)}{dx} - 2f_2 + 0 + 0 + 0 + 0 = -18.799$$

$$0 + 4f_2 - 2f_3 + 0 + 0 + 0 = 18.147$$

$$0 - 2f_2 + 4f_3 - 2f_4 + 0 + 0 = -0.435$$

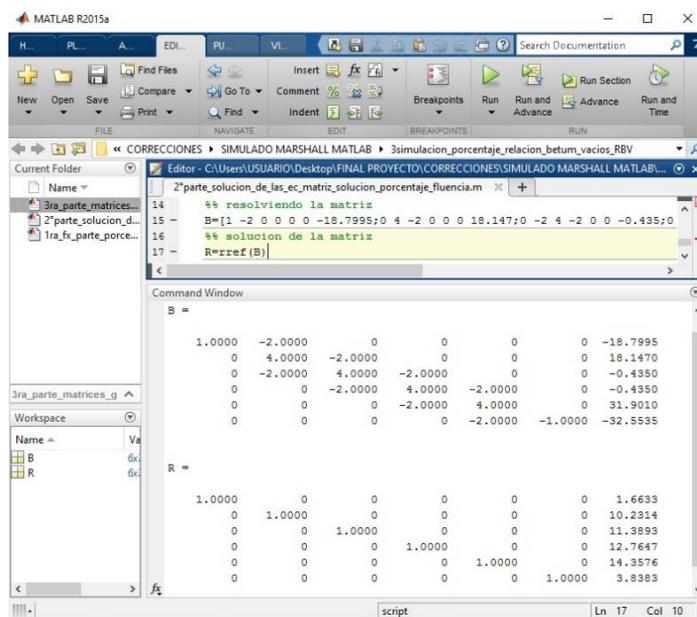
$$0 + 0 - 2f_3 + 4f_4 - 2f_5 + 0 = -0.435$$

$$0 + 0 + 0 - 2f_4 + 4f_5 + 0 = 31.901$$

$$0 + 0 + 0 + 0 - 2e_5 + \frac{de(x_6)}{dx} = -32.553$$

Solución

Figura 4. 23 Introduciendo y resolviendo el sistema de ecuaciones en Matlab



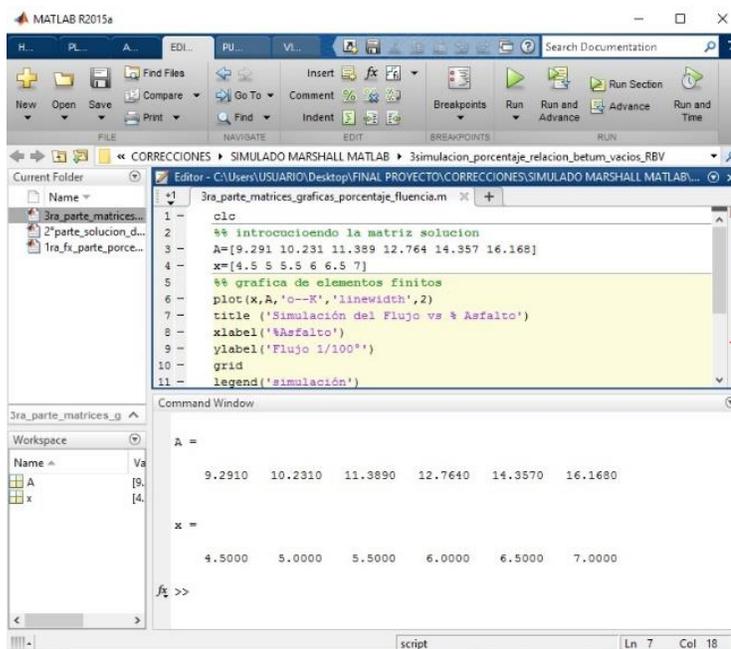
```

MATLAB R2015a
CORRECCIONES > SIMULADO MARSHALL MATLAB > 3simulacion_porcentaje_relacion_betum_vacios_RBV
Editor - C:\Users\USUARIO\Desktop\FINAL PROYECTO\CORRECCIONES\SIMULADO MARSHALL MATLAB...
2\parte_solucion_de_las_ec_matriz_solucion_porcentaje_fluencia.m
14 %% resolviendo la matriz
15 B=[1 -2 0 0 0 0 -18.7995;0 4 -2 0 0 0 18.147;0 -2 4 -2 0 0 -0.435;0
16 %% solucion de la matriz
17 R=rref(B)
Command Window
B =
    1.0000   -2.0000     0     0     0     0   -18.7995
     0     4.0000   -2.0000     0     0     0    18.1470
    -2.0000     4.0000   -2.0000   -2.0000     0     0   -0.4350
     0     0   -2.0000     4.0000   -2.0000     0   -0.4350
     0     0     0   -2.0000     4.0000     0    31.9010
     0     0     0     0   -2.0000   -1.0000   -32.5535
R =
    1.0000     0     0     0     0     0     1.6633
     0     1.0000     0     0     0     0    10.2314
     0     0     1.0000     0     0     0    11.3893
     0     0     0     1.0000     0     0    12.7647
     0     0     0     0     1.0000     0    14.3576
     0     0     0     0     0     1.0000     3.8383
Workspace
Name Va
B 6x
R 6x
script Ln 17 Col 10

```

Fuente: Programa Matlab

Figura 4. 24 Introduciendo los valores determinados para ser graficados



```

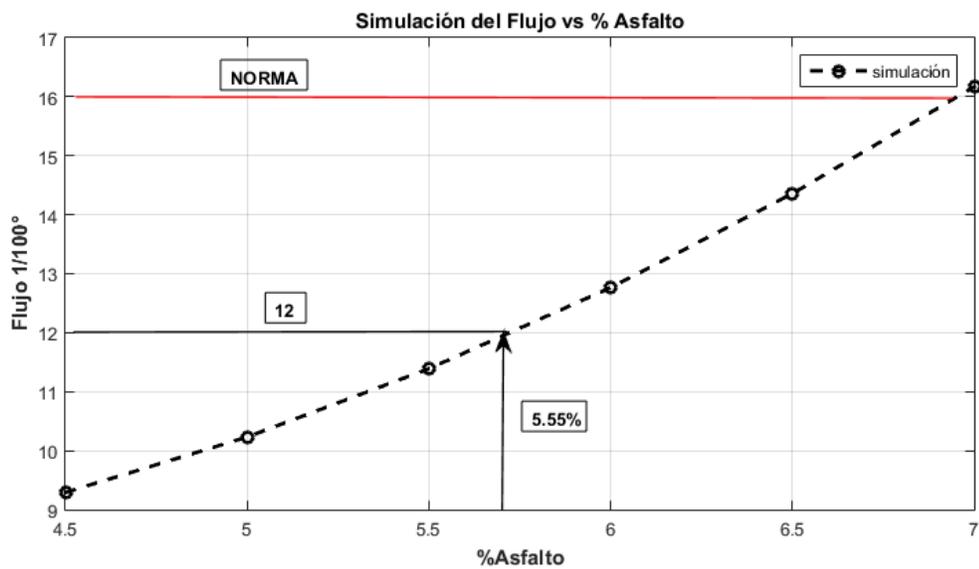
MATLAB R2015a
CORRECCIONES > SIMULADO MARSHALL MATLAB > 3simulacion_porcentaje_relacion_betum_vacios_RBV
Editor - C:\Users\USUARIO\Desktop\FINAL PROYECTO\CORRECCIONES\SIMULADO MARSHALL MATLAB...
3ra_parte_matrices_graficas_porcentaje_fluencia.m
1 - c1c
2 %% introccioendo la matriz solucion
3 A=[9.291 10.231 11.389 12.764 14.357 16.168]
4 x=[4.5 5 5.5 6 6.5 7]
5 %% grafica de elementos finitos
6 plot(x,A,'o--k','linewidth',2)
7 title ('Simulación del Flujo vs % Asfalto')
8 xlabel('%Asfalto')
9 ylabel('Flujo 1/100')
10 grid
11 legend('simulación')
Command Window
A =
    9.2910    10.2310    11.3890    12.7640    14.3570    16.1680
x =
    4.5000    5.0000    5.5000    6.0000    6.5000    7.0000
script Ln 7 Col 18

```

Fuente: Programa Matlab

Sustituyendo los valores obtenidos y graficando la función del modelo.

Figura 4. 25 Curva simulada flujo



Fuente: Programa Matlab

4.4.7 Resumen de resultados simulados

Tabla 4. 3 Datos simulados para cada factor

Cemento asfáltico (%)	Densidad (gr/cc)	Vacíos totales (%)	Relación betún vacíos(%)	Vacíos de agregado mineral (%)	Estabilidad(lb)	Flujo(pulg)
4.5	2.252	8.932	52.958	18.444	1394.752	9.291
5	2.313	7.083	63.095	17.683	1718.000	10.231
5.5	2.350	5.509	71.244	17.372	1916.200	11.389
6	2.361	4.209	77.407	17.510	1989.500	12.764
6.5	2.348	3.185	81.582	18.099	1937.700	14.357
7	2.309	2.436	83.771	19.138	1760.969	16.168

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. 4 Resultados para cada contenido óptimo de asfalto

Valores				
Características	% De asfalto	Obtenidos de gráficos	Especificaciones técnicas	
Densidad(gr/cc)	6.00	2.360	-----	-----
Vacíos(%)	6.05	4.0	3	5
R.B.V.(%)	6.03	78.5	75	82
V.A.M(%)	5.50	17.5	15	
Estabilidad (lb)	6.00	1998.5	> 1200 Lb. (75 Golpes)	
Fluencia 1/100"	5.55	12.0	8	14
Promedio (%)	5.85	Determinación del contenido óptimo de asfalto promedio de las gráficas FEM		

Fuente: Elaboración propia

4.5 ANÁLISIS CORRELACIONAL PARA LOS FACTORES SIMULADOS

Se obtienen las ecuaciones correspondientes a la correlación de cada factor estudiado respecto al contenido de asfalto para hacer un análisis y determinar si las funciones de efectos externos asumida entre las condiciones de borde para la metodología del elemento finito son aceptables o varían demasiado con respecto al real.

4.5.1 Análisis curva densidad

La ecuación obtenida de la correlación de los diseños convencionales en el tramo Tolomosa - Pampa Redonda es:

$$y = -0.0284x^2 + 0.3535x + 1.2405$$

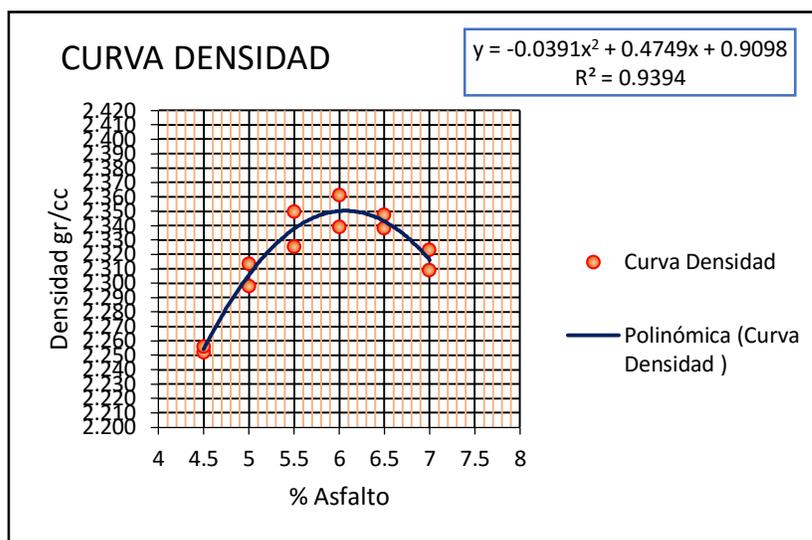
Tabla 4. 5 Tabla comparativa

Asfalto(%)	Valores interpolados de la metodología del elemento finito	Valores curva correlación
		$y=-0.0284x^2+0.3535x+1.2405$
	Densidad(gr/cc)	
4.5	2.252	2.256
5	2.313	2.298
5.5	2.350	2.326
6	2.361	2.339
6.5	2.348	2.338
7	2.310	2.323

Fuente: Elaboración propia

Del factor densidad simulado y la correlación de los diseños se verifica que la función asumida de 0.1 para representar la curva entre las condiciones de borde obtenida tiene una buena correlación.

Gráfica 4. 15 Correlación de los datos con la MEF y los diseños Marshall



Fuente: Elaboración propia

4.5.2 Análisis curva vacíos totales

La ecuación obtenida de la correlación de los diseños convencionales para el tramo Tolomosa - Pampa Redonda es:

$$y = 0.9756x^2 - 13.694x + 50.91$$

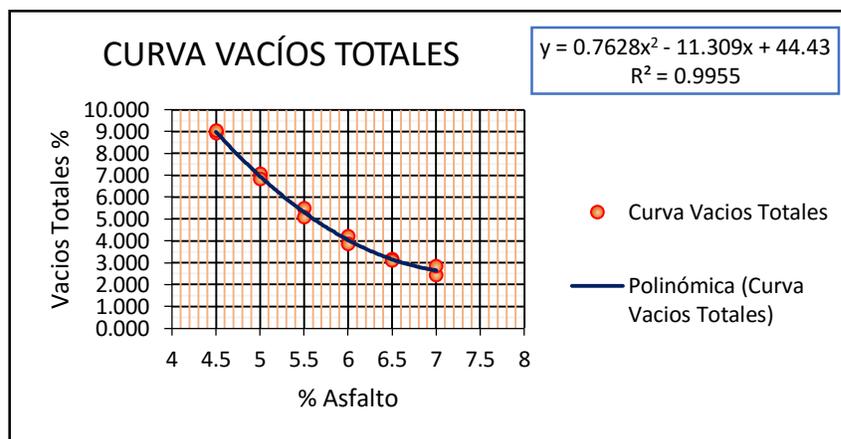
Tabla 4. 6 Tabla comparativa

	Valores interpolados de la metodología del elemento finito	Valores curva correlación
		$y=0.9756x^2-13.694x+50.91$
Asfalto(%)	Vacíos totales(%)	
4.5	8.932	9.043
5	7.083	6.830
5.5	5.509	5.105
6	4.209	3.868
6.5	3.185	3.118
7	2.436	2.856

Fuente: Elaboración propia

Del factor vacíos totales simulado y la correlación de los diseños se verifica que la función asumida de -1.1 para representar la curva entre las condiciones de borde obtenida tiene una buena correlación.

Gráfica 4. 16 Correlación de los datos con la MEF y los diseños Marshall



Fuente: Elaboración propia

4.5.3 Análisis curva RBV

La ecuación obtenida de la correlación de los diseños convencionales para el tramo Tolomosa - Pampa Redonda es:

$$y = -4.0237x^2 + 59.516x - 134.22$$

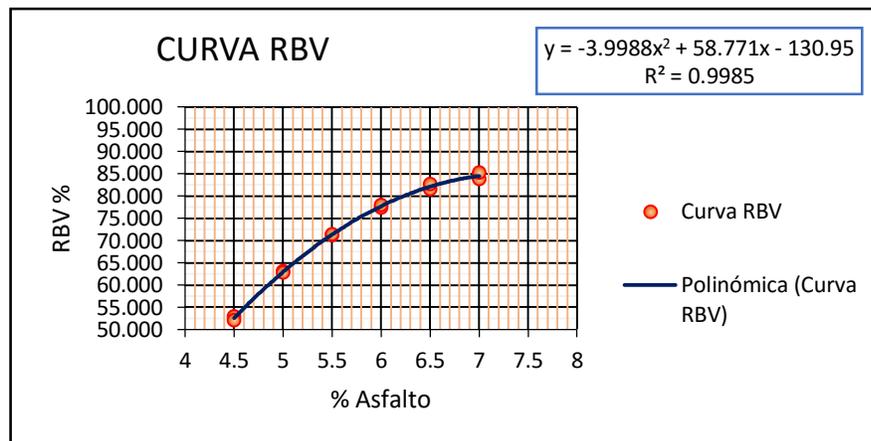
Tabla 4. 7 Tabla Comparativa

%Asfalto	Valores interpolados de la metodología del elemento finito	Valores curva correlación
	y=-4.0237x^2+59.516x-134.22	
	RBV(%)	
4.5	52.958	52.122
5	63.095	62.768
5.5	71.244	71.401
6	77.407	78.023
6.5	81.582	82.633
7	83.771	85.231

Fuente: Elaboración propia

Del factor de la relación betún vacíos simulado y la correlación de los diseños se verifica que la función asumida de 7.95 para representar la curva entre las condiciones de borde obtenida tiene una buena correlación.

Gráfica 4. 17 Correlación de los datos con la MEF y los diseños Marshall



Fuente: Elaboración propia

4.5.4 Análisis curva VAM

La ecuación obtenida de la correlación de los diseños convencionales para el tramo Tolomosa - Pampa Redonda es:

$$y = 0.859x^2 - 9.9305x + 46.365$$

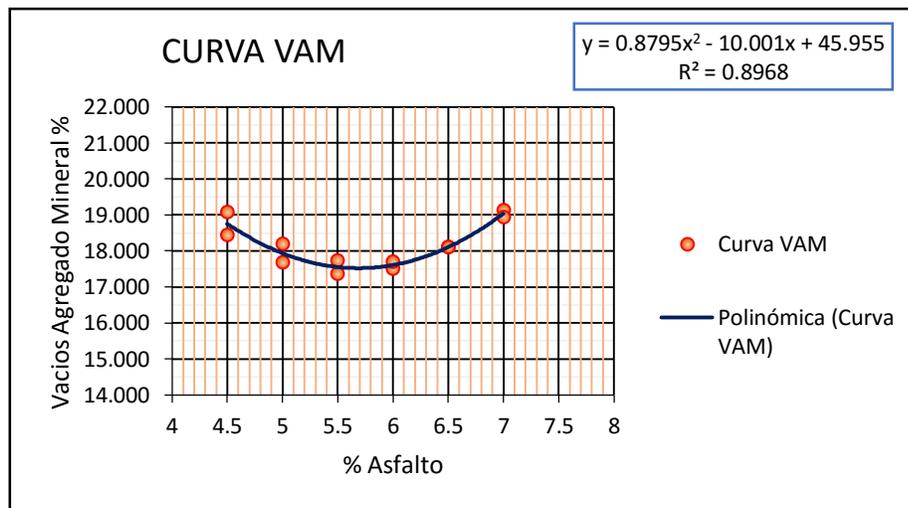
Tabla 4. 8 Tabla comparativa

%Asfalto	Valores interpolados de la metodología del elemento finito	Valores curva correlación
		$y=0.859x^2-9.9305x+46.365$
		VAM(%)
4.5	18.444	19.073
5	17.683	18.188
5.5	17.372	17.732
6	17.510	17.706
6.5	18.099	18.110
7	19.138	18.943

Fuente: Elaboración propia

Del factor de vacíos de agregado mineral simulado y la correlación de los diseños se verifica que la función asumida de -1.8 para representar la curva entre las condiciones de borde obtenida tiene una correlación aceptable.

Gráfica 4. 18 Correlación de los datos con la MEF y lo diseños Marshall



Fuente: Elaboración propia

4.5.5 Análisis curva estabilidad

La ecuación obtenida de la correlación de los diseños convencionales para el tramo Tolomosa - Pampa Redonda es:

$$y = -416.56x^2 + 4947x - 12442$$

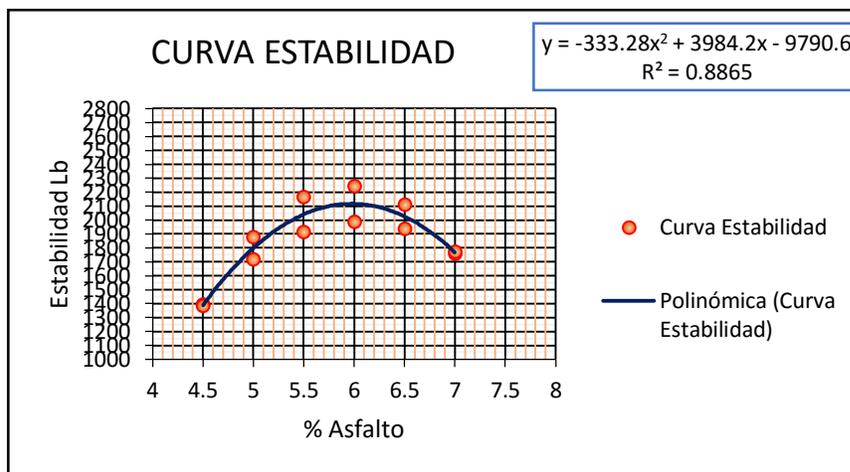
Tabla 4. 9 Tabla comparativa

%Asfalto	Valores interpolados de la metodología del elemento finito	Valores curva correlación
		$y = -416.56x^2 + 4947x - 12442$
		Estabilidad(lb)
4.5	1394.752	1384.160
5	1718.000	1879.000
5.5	1916.200	2165.560
6	1989.500	2243.840
6.5	1937.700	2113.840
7	1760.969	1775.560

Fuente: Elaboración propia

Del factor estabilidad simulado y la correlación de los diseños se verifica que la función asumida de 500 para representar la curva entre las condiciones de borde obtenida tiene un grado de correlación aceptable.

Gráfica 4. 19 Correlación de los datos con la MEF y los diseños Marshall



Fuente: Elaboración propia

4.5.6 Análisis curva flujo

La ecuación obtenida de la correlación de los diseños convencionales para el tramo Tolomosa - Pampa Redonda es:

$$y = 0.1295x^2 + 1.2251x + 1.0381$$

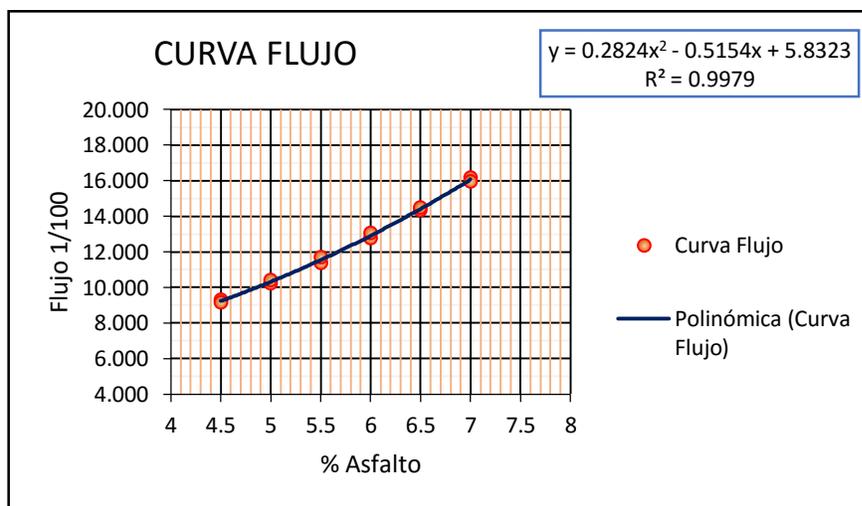
Tabla 4. 10 Tabla comparativa

Asfalto(%)	Valores interpolados de la metodología del elemento finito	Valores curva correlación
	$y=0.1295x^2+1.225x+1.0381$	
	Flujo(1/100°)	
4.5	9.291	9.173
5	10.231	10.401
5.5	11.389	11.694
6	12.764	13.051
6.5	14.357	14.473
7	16.168	15.959

Fuente: Elaboración propia

Del factor flujo simulado y la correlación de los diseños se verifica que la función asumida de -0.87 para representar la curva entre las condiciones de borde obtenida tiene una buena correlación.

Gráfica 4. 20 Correlación de los datos con la MEF y los diseños Marshall



Fuente: Elaboración propia

4.6 ANÁLISIS DE LAS GRÁFICAS

La siguiente tabla presenta un resumen de los resultados obtenidos del ensayo en laboratorio y los de la metodología del elemento finito para hacer un análisis de la consistencia y la correlación de los valores haciendo la prueba de bondad de ajuste por chi cuadrado.

Tabla 4. 11Resumen de resultados

Cemento asfáltico (%)	Densidad FEM(gr/cc)	Densidad laboratorio (gr/cc)	Vacíos totales FEM (%)	Vacíos totales laboratorio (%)	RBV FEM (%)	RBV laboratorio (%)	VAM FEM (%)	VAM laboratorio (%)	Estabilidad FEM (lb)	Estabilidad laboratorio (lb)	Flujo FEM (1/100°)	Flujo laboratorio (1/100°)
4	2.166	2.258	11.055	8.684	40.840	50.783	19.657	17.644	946.560	1419.156	8.569	8.530
4.5	2.252	2.294	8.932	6.522	52.958	61.094	18.444	16.763	1394.752	1811.893	9.291	8.727
5	2.313	2.316	7.083	4.930	63.095	69.970	17.683	16.416	1718.000	2137.177	10.231	9.055
5.5	2.350	2.338	5.509	3.278	71.244	79.559	17.372	16.038	1916.200	2387.312	11.389	9.974
6	2.361	2.314	4.209	3.592	77.407	79.314	17.510	17.364	1989.500	2230.364	12.764	10.039
6.5	2.348	2.309	3.185	3.076	81.582	82.881	18.099	17.966	1937.700	1779.972	14.357	11.942
7	2.272	2.276	2.436	3.808	83.771	81.379	19.138	19.687	1760.969	1267.400	16.168	13.149
Media	2.300	2.301	6.058	4.841	67.271	72.140	18.272	17.411	1666.240	1861.896	11.824	10.202
Desviación	0.070	0.027	3.146	2.073	15.898	12.180	0.863	1.214	375.048	417.585	2.766	1.736

Fuente: Elaboración propia

4.7 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El intervalo de confianza determinado para el modelo desarrollado en cada una de las propiedades se detalla en el anexo IV y el intervalo de confianza para el contenido óptimo de asfalto del modelo se analizará con respecto a tres criterios que se utiliza en los laboratorios de asfaltos.

El primer criterio consistirá en comparar el porcentaje óptimo obtenido de cada una de las propiedades de la mezcla

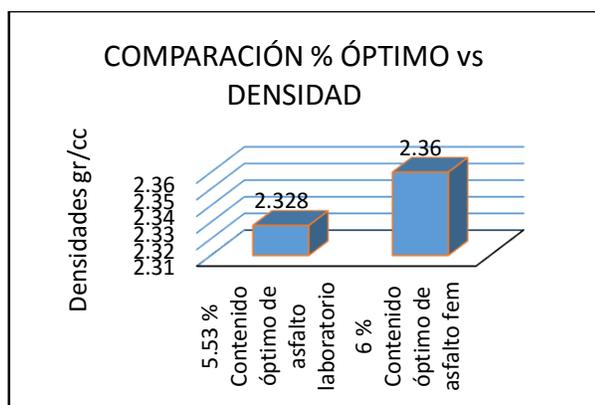
El segundo criterio consistirá en comparar el contenido óptimo de asfalto promediando los valores obtenidos de todas las propiedades.

El tercer criterio consistirá en comparar el contenido óptimo de asfalto promediando las propiedades de la densidad, vacíos totales, estabilidad y flujo que se realiza mayormente en la práctica de los laboratorios de asfaltos por considerar que son las propiedades más representativas con las que se obtendrán las mejores propiedades.

4.7.1 Análisis de los resultados para la FEM y Marshall mezcla convencional

4.7.1.1 Análisis de los resultados de la Densidad

Figura 4. 26 Comparación resultados de las densidades



Fuente: Elaboración propia

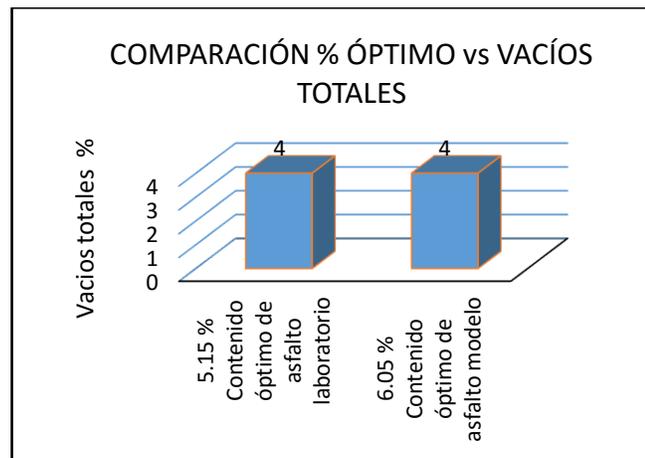
- El intervalo de confianza de la densidad esta entre 2.351gr/cc -2.249gr/cc para el modelo propuesto. La densidad optima obtenida en el laboratorio 2.328 gg/cc está dentro del intervalo de confianza del modelo siendo aceptable y considerando que la diferencia de valores se debe principalmente a las características del agregado.

- El porcentaje óptimo de asfalto determinado con el modelo es del 6 % y el de laboratorio 5.53 % que tiene una diferencia del 0.47% siendo baja como referente aceptable para la dosificación de la mezcla.

4.7.1.2 Análisis de los resultados de los vacíos totales

De acuerdo a los resultados de los vacíos totales para un diseño convencional observados en la gráfica:

Figura 4. 27 Comparación resultados vacíos totales



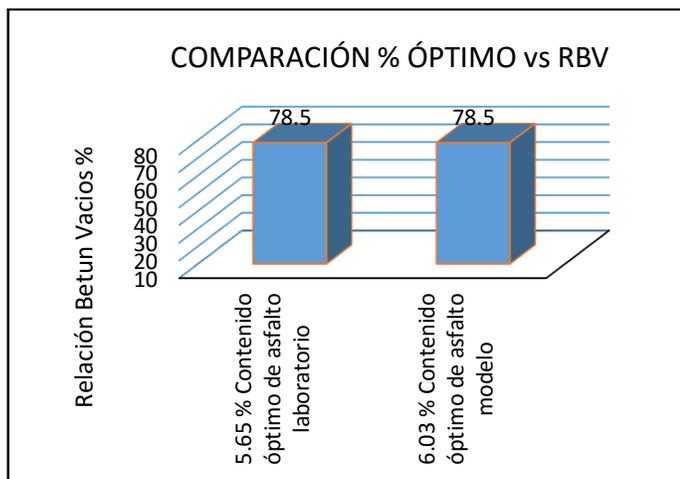
Fuente: Elaboración propia

- Por norma se tiene que el porcentaje de vacíos totales debe ser del 4%, el intervalo de confianza del modelo está entre 8.389% - 3.728% por tanto es aceptable.
- El porcentaje óptimo de asfalto determinado con el modelo es del 6.05% y el de laboratorio 5.15% con una diferencia del 0.9% siendo el valor referencial para determinar el contenido óptimo para los vacíos totales siendo que se buscan que estos valores varíen en lo menos posible.

4.7.1.3 Análisis de los resultados de la relación betún vacíos

De acuerdo a los resultados de la relación betún vacíos para un diseño convencional observados en la gráfica:

Figura 4. 28 Comparación resultados RBV



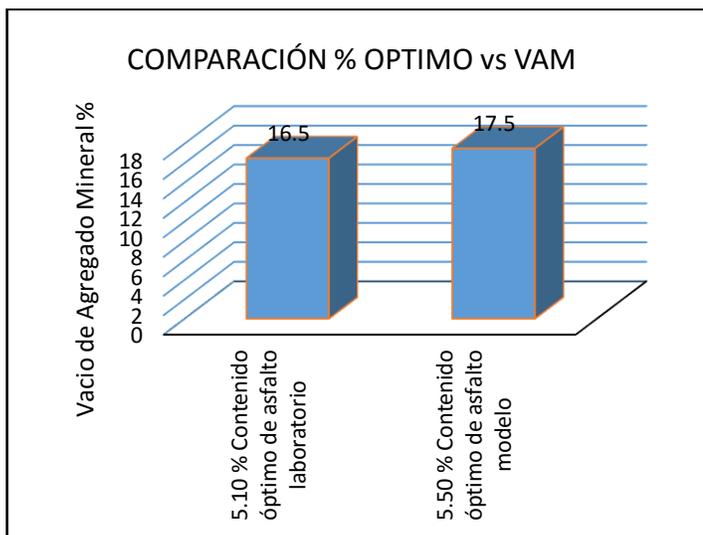
Fuente: Elaboración propia

- Por norma se tiene que la RBV debe ser del 78.5%, el intervalo de confianza del modelo está entre 79.049% - 55.490% siendo aceptable.
- El porcentaje óptimo de asfalto determinado con el modelo es del 6.03% y el de laboratorio 5.65% con una diferencia del 0.38% siendo muy baja y que es un referente aceptable para la dosificación de la mezcla.

4.7.1.4 Análisis de los resultados de los vacíos de agregado mineral

De acuerdo a los resultados de los vacíos de agregado mineral para un diseño convencional observados en la gráfica:

Figura 4. 29 Comparación resultados VAM



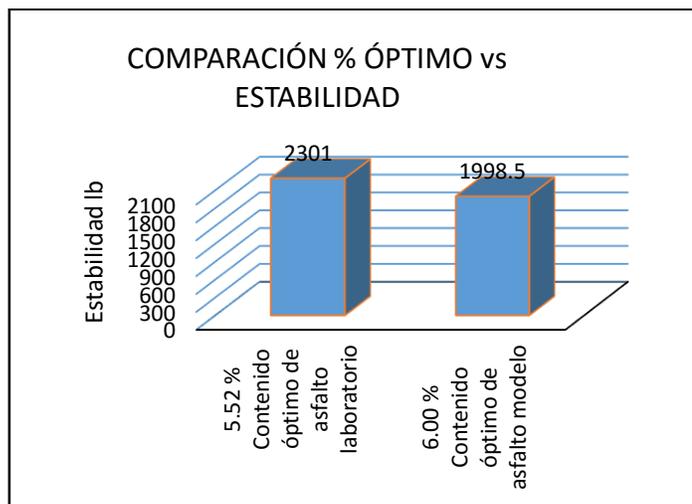
Fuente: Elaboración propia

- Por norma se debe tener un porcentaje de VAM mayor o igual al 15% para evitar fallas por hundimiento del pavimento, el intervalo de confianza del modelo está entre 18.910% - 17.633% y el valor determinado en laboratorio es del 16.5% que se encuentra por debajo del límite inferior.
Debido a que estos valores no tienen mucha variación y se establecen condiciones según la experiencia del laboratorista, el valor determinado con el modelo debería cumplir condiciones físicas similares en la práctica para obtener valores más representativos en los vacíos de agregado mineral.
- El porcentaje óptimo del modelo es de 5.50% y el de laboratorio 5.10% con una diferencia del 0.4% siendo muy baja y que es un referente aceptable para la dosificación de la mezcla.

4.7.1.5 Análisis de los resultados de la estabilidad

De acuerdo a los resultados de la estabilidad máxima para un diseño convencional observados en la gráfica:

Figura 4. 30 Comparación Resultados Estabilidad



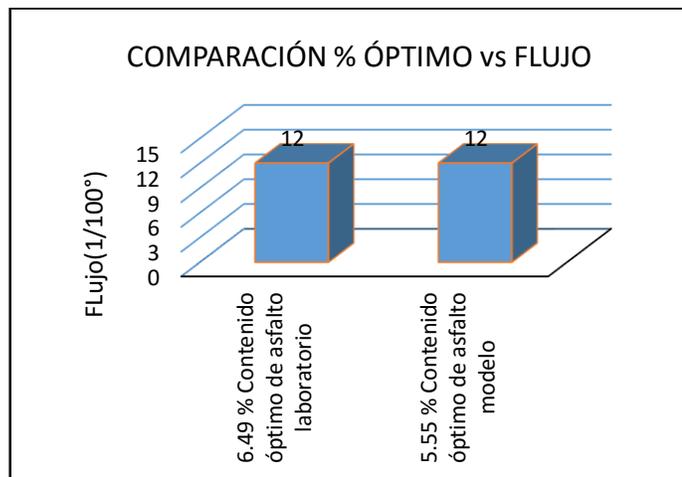
Fuente: Elaboración propia

- La estabilidad es uno de los factores más variables en las mezclas asfálticas con el cual no se obtienen valores precisos, siendo el tamaño máximo del agregado fundamental para obtener resistencias más elevadas y la estabilidad mínima que se debe obtener es de 1200lb. El intervalo de confianza del modelo está entre 1944.079lb – 1388.401 lb y el valor determinado en laboratorio es de 2301lb que se encuentra por encima del límite superior.
- El porcentaje óptimo determinado con el modelo es de 6% y el de laboratorio 5.52% con una diferencia del 0.48% siendo baja y que es un referente aceptable para la dosificación de la mezcla.

4.7.1.6 Análisis de los resultados del flujo

De acuerdo a los resultados del flujo para un diseño convencional observados en la gráfica:

Figura 4. 31 Comparación resultados flujo



Fuente: Elaboración propia

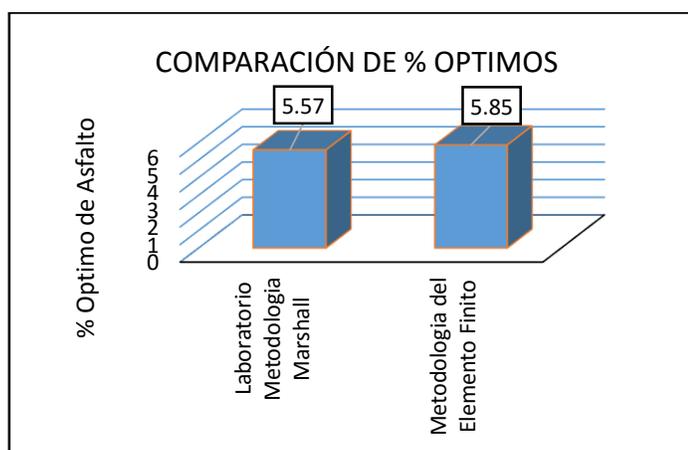
- Por norma se tiene que el flujo debe ser de 12 (1/100 pulg.), el intervalo de confianza del modelo está entre 13.873 – 9.775 (1/100 pulg.), por tanto, es aceptable.
- El porcentaje óptimo determinado con el modelo es de 5.55% y el de laboratorio 6.49% con una diferencia del 0.94% que servirá como parámetro de referencia ya que se busca que se tenga la menor variación.

4.7.2 Análisis de los resultados del porcentaje óptimo de asfalto

4.7.2.1 Porcentaje óptimo de las propiedades

El porcentaje óptimo determinado del promedio total del modelo es de 5.85% y el de laboratorio de 5.57% con una diferencia del 0.28% por lo que al promediar los óptimos de todas las propiedades se determina un valor próximo al valor real de la dosificación buscada para la mezcla asfáltica. El intervalo de confianza del modelo para el porcentaje óptimo esta entre 6.06% - 5.65% y el valor obtenido en laboratorio es de 5.57% encontrándose por debajo del nivel de confianza esperado para el modelo, debido a que en el conjunto de propiedades existen algunas más próximas a la realidad del material que otras.

Figura 4. 32 Comparación de los porcentajes óptimos todas las propiedades

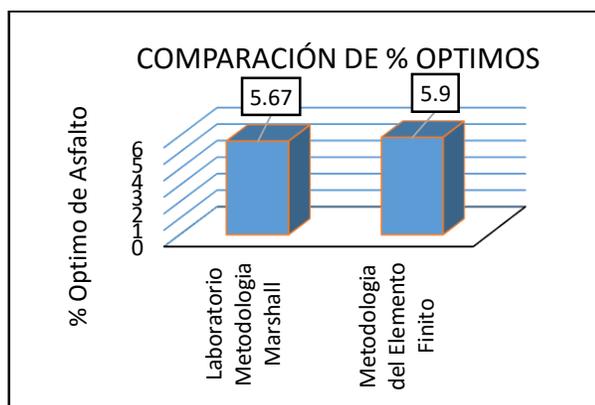


Fuente: Elaboración propia

4.7.2.2 Porcentaje óptimo de las propiedades importantes en las mezclas asfálticas.

Se considera el porcentaje óptimo correspondiente a las propiedades de la densidad, vacíos totales, estabilidad y Flujo como las principales para que la mezcla asfáltica tenga las mejores características en cuanto a resistencia y durabilidad. El intervalo de confianza para el modelo está entre 6.13% y 5.67% de contenido de asfalto. El promedio del contenido de asfalto para estas propiedades del modelo es de 5.9% y de laboratorio 5.67, encontrándose dentro del intervalo de confianza del modelo siendo aceptable para la dosificación de la mezcla.

Figura 4. 33 Porcentajes óptimos de las propiedades de la mezcla asfáltica



Fuente: Elaboración propia

Nota: Los cálculos correspondientes al intervalo de confianza se encuentra en el anexo III

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.1 CONCLUSIONES

Las curvas simuladas a partir de las condiciones de frontera y la función de efectos externos definidas por los diseños del tramo estudiado lograron determinar de manera muy próxima las curvas de correlación de los diseños estudiados. Por tanto las condiciones de borde de una mezcla asfáltica son determinantes para asumir la función de efectos externos y obtener resultados próximos a nuestra realidad.

Observando las gráficas simuladas con las correlaciones en el análisis previo que se realizó para obtener una curva modelo para cada factor se puede concluir que:

- La curva Densidad simulada con el valor de función externa de 0.1 entre las condiciones de frontera asumidas para el material, reprodujo un valor de densidad mayor.
- La curva simulada de los Vacíos Totales con el valor de la función de efectos externos de -1.10 no presento variaciones entre las condiciones de borde por tanto es representativa del material.
- La simulación de la curva Relación Betún Vacíos con el valor de la función de efectos externos de 7.95 no presento variaciones entre las condiciones de borde por tanto es representativa del material.
- La simulación de la curva de Vacíos de Agregado Mineral con la función de efectos externos de -1.8 determino valores menores a la correlación sin variar el contenido óptimo de asfalto.
- La simulación de la curva de Estabilidad con el valor de la función de efectos externos de 500 determinó una reducción en la estabilidad con respecto a la correlación sin existir una variación en el contenido óptimo de asfalto y estando

por encima del valor mínimo de estabilidad de 12000 lb establecido en la norma.

- La curva Flujo simulada para la correlación de los tres diseños con el valor de la función de efectos externos de -0.87, no presento variaciones en las características del material y las condiciones de borde.

Una vez determinados los valores con los cuales se simularon las curvas, partir de las condiciones de contorno y efectos externos. Se hizo una descripción en el análisis de resultados de las curvas obtenidas de la simulación y las curvas obtenidas en el laboratorio que se describe a continuación:

- Factor densidad (modelo-laboratorio), el valor obtenido de la densidad máxima en laboratorio se encuentra dentro del intervalo de confianza del modelo resultando aceptable la metodología para su aplicación en otros modelos con otras condiciones para este factor.
- factor vacío totales (modelo-laboratorio), el valor de vacíos totales es el mismo para los dos casos y se encuentran en el rango de confiabilidad determinado por el modelo por tanto se acepta la metodología con otras condiciones para este factor.
- factor RBV (modelo y laboratorio), el valor de RBV es el mismo para los dos casos y se encuentran dentro del rango de confiabilidad del modelo teniendo en cuenta que es el que presenta menor variación aceptando la metodología para su aplicación con otras condiciones para este factor.
- factor VAM (modelo y laboratorio), el valor obtenido con el modelo es mayor al determinado en laboratorio sin embargo se encuentra dentro del intervalo de confianza por tanto la metodología solo puede ser utilizada como un precedente o referencia para este factor.
- factor estabilidad (modelo y laboratorio), se obtuvo un valor de estabilidad muy diferente del modelo con el real, encontrándose fuera del rango de la

confiabilidad del modelo por tanto no se puede utilizar la metodología para determinar este factor tomando el valor como referencial.

- factor flujo (modelo y laboratorio), el valor del flujo es el mismo para el modelo y el laboratorio, encontrándose el valor obtenido dentro del rango de confiabilidad del modelo.

Se puede concluir que la metodología del elemento finito en la simulación de los factores del ensayo Marshall dieron valores aceptables que pueden ayudar a diseñar mezclas asfálticas, dependiendo del grado de conocimiento que se tenga del tipo de material a utilizar, para asumir el valor de función de efectos externos. Siendo las condiciones de frontera un dato fundamental para obtener buenos resultados y que puede ser aplicable cuando se desee diseñar mezclas asfálticas con otro tipo de parámetros y condiciones.

5.1.2 RECOMENDACIONES

- Las condiciones de borde deben ser planteadas para cada tipo de material y para cada mezcla que se desee obtener.
- Se debe tener un conocimiento más amplio en el estudio de los elementos finitos para desarrollar modelos que puedan simular cada factor de las mezclas asfálticas, sin la necesidad de complicarse con las variables que puedan afectarlo, sino las que más incidencia tengan en el resultado esperado, pudiendo desarrollar modelos simples y de fácil aplicabilidad.
- La parte activa de esta metodología es el conocimiento en programación o programas en los cuales se puedan ingresar las ecuaciones obtenidas del estudio para los elementos finitos y que permita interactuar con las variables que deseamos predecir de cada factor en el ensayo Marshall.
- El estudio de las mezclas asfálticas a partir de programas, viene siendo de interés creciente en la actualidad, existiendo varios autores que detallan la determinación de ecuaciones, proceso y calculo a partir de softwares, pero el mayor problema en estos casos es el estudio mecánico a partir del módulo de elasticidad estático, que no se determina con la metodología Marshall, pero que si utilizan los programas, existiendo varios procesos que ayudan a facilitar su determinación que son poco estudiados en nuestro medio en la actualidad. Por lo que hace difícil su aplicabilidad.
- Cada factor del ensayo Marshall puede ser estudiado a partir de la metodología del elemento finito, pero por la variedad y amplitud en cada tema, deben ser estudiados de manera independiente para obtener el mayor provecho y generar el mayor aporte.