



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

Evaluación de alternativas de diseño de mezclas asfálticas en caliente, basadas en la metodología del polígono de vacíos

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil.

Autoras:

Daniela Mishell Idrovo León  
CI:0104556436  
daniidrovo@gmail.com

Paola Estefanía Guzmán Agudo  
CI:0106588080  
estefania.guzman.agudo@gmail.com

Director:

Ing. Jaime Asdrúbal Bojorque Iñiguez., PhD  
CI:0102857885

Co-Director:

Ing. Juan Cristóbal Neira Carrera., M.Sc  
CI:0103988150

Cuenca - Ecuador

24 de febrero de 2021



## Resumen

En el presente trabajo de titulación se analiza la factibilidad de implementar el método del polígono de vacíos para el diseño de mezclas asfálticas, considerando los materiales ubicados dentro de la zona austral. Se analiza este método debido a que produce un ahorro significativo de tiempo y materiales dentro del diseño de mezclas asfálticas.

Para analizar de mejor manera la metodología, se desarrolló una aplicación a través de sistema numérico Matlab. La aplicación permite determinar las características de la mezcla en función de las gravedades específicas de los agregados, y de forma adicional, esta herramienta ayuda a la obtención de la combinación de agregados para el diseño, utilizando hasta cuatro materiales diferentes.

Se parte del diseño de una mezcla asfáltica en caliente mediante las metodologías Marshall (convencional) y polígono de vacíos, con el fin de comparar sus resultados. La metodología del polígono de vacíos proporcionó de forma rápida la fórmula maestra, que al ser comprobada mediante 3 briquetas ensayadas a través de la metodología Marshall, se obtuvieron valores muy cercanos a los calculados. Se obtuvo una diferencia en el porcentaje óptimo de asfalto de 0.1 %.

Adicionalmente, se realizó la comparación con dos diseños existentes facilitados por la planta de asfalto del Municipio de Cuenca. Empleando el método de polígonos de vacíos, se encontró una diferencia del 0.2 % en el primer caso y en el segundo se determinaron porcentaje óptimo de asfalto similares.

En base a los ensayos de laboratorio realizados, diseños existentes, y herramienta desarrollado, se concluye que el método del polígono de vacíos es una herramienta de gran utilidad dentro del diseño, producción y control de calidad de mezclas bituminosas, pues se requiere un número mucho menor de muestras lo cual repercute en el tiempo y costo del diseño de mezclas asfálticas.

**Palabras clave:** Pavimento flexible. Mezclas asfálticas en caliente. Polígono de vacíos. Asfalto. Marshall. Vacíos de aire.



## Abstract

In this degree project, the feasibility of implementing the void polygon method for the design of asphalt mixtures is analyzed, considering the materials located in the southern region. This method produces a significant saving of time and materials in the design of asphalt mixtures.

To analyze on a better way the methodology, an application was developed using the Matlab numerical system. The application allows determining the characteristics of the mix based on the specific gravities of the aggregates, and additionally, this tool helps to obtain the combination of aggregates for the design, using up to four different materials.

The design of a hot mix asphalt is based on the Marshall (conventional) and polygon voids methodologies, in order to compare their results. The polygon of voids methodology quickly provided the master formula, which when checked by means of 3 briquettes tested through the Marshall methodology, values very close to those calculated were obtained. A difference in the optimum asphalt percentage of 0.1% was obtained.

Additionally, a comparison was made with two existing designs provided by the asphalt plant of the Municipality of Cuenca. Using the method of polygons of voids, a difference of 0.2% was found in the first case and in the second, similar optimum asphalt percentages were determined.

Based on the laboratory tests performed, existing designs, and the tool developed, it is concluded that the void polygon method is a very useful tool in the design, production and quality control of asphalt mixtures, since it requires a much smaller number of samples, which has an impact on the time and cost of designing asphalt mixtures.

**Palabras clave:** Flexible pavement. Hot mix asphalt. Void polygon. Asphalt. Marshall. Air voids.

# Índice general

Resumen . . . . .	2
Abstract . . . . .	3
Dedicatoria y agradecimientos . . . . .	15
<b>1 Introducción</b>	<b>16</b>
1.1 Antecedentes . . . . .	16
1.2 Estado del arte . . . . .	17
1.3 Planteamiento del problema . . . . .	18
1.4 Justificación . . . . .	18
1.5 Objetivos . . . . .	19
1.5.1 Objetivo General . . . . .	19
1.5.2 Objetivos Específicos . . . . .	19
1.6 Alcance . . . . .	19
<b>2 Marco Teórico</b>	<b>20</b>
2.1 Pavimento Flexible . . . . .	20
2.1.1 Definición de Pavimento Flexible . . . . .	20
2.1.2 Características . . . . .	20
2.1.3 Capas de un Pavimento Flexible . . . . .	21
2.1.4 Componentes: Agregados, Asfalto y Mezclas Asfálticas . . . . .	22
2.2 Parámetros volumétricos dentro de la mezcla asfáltica . . . . .	26
2.2.1 Gravedad específica neta del agregado ( $G_{sb}$ ) . . . . .	26
2.2.2 Gravedad específica aparente del agregado ( $G_{sa}$ ) . . . . .	27
2.2.3 Gravedad específica efectiva del agregado ( $G_{se}$ ) . . . . .	27
2.2.4 Gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica ( $G_{mm}$ ) . . . . .	27
2.2.5 Contenido de asfalto efectivo ( $P_{be}$ ) . . . . .	28
2.2.6 Vacíos de aire ( $V_a$ ) . . . . .	28
2.2.7 Vacíos en el agregado mineral ( $VMA$ ) . . . . .	28
2.2.8 Vacíos llenos de asfalto ( $VFA$ ) . . . . .	28
2.3 Método Marshall . . . . .	29
2.3.1 Granulometría . . . . .	30
2.3.2 Procedimiento del ensayo . . . . .	32
2.3.3 Porcentaje Óptimo de Asfalto . . . . .	33
2.4 Método del polígono de vacíos . . . . .	34
2.4.1 Definición . . . . .	34
2.4.2 Ecuaciones del método . . . . .	34
2.4.3 Interpretación de resultados del método . . . . .	35



<b>3</b>	<b>Materiales y Metodología</b>	<b>36</b>
3.1	Agregados . . . . .	36
3.1.1	Agregado fino y agregado grueso, porción que pasa del tamiz 3/8”	36
3.1.2	Agregado grueso, material que pasa del tamiz 3/4” . . . . .	37
3.2	Ensayos y Normas de los materiales granulares . . . . .	38
3.2.1	Ensayos en Agregado Grueso . . . . .	39
3.2.2	Ensayos en Agregado fino . . . . .	44
3.3	Obtención de la gravedad específica efectiva de los agregados ( $G_{se}$ ) . . . . .	48
3.3.1	Método volumétrico para la determinación de la gravedad específica teórica máxima (Ensayo RICE) . . . . .	48
3.3.2	Método teórico para la determinación de la gravedad específica teórica máxima . . . . .	50
3.4	Método de Diseño Marshall . . . . .	51
3.4.1	Elaboración de briquetas . . . . .	51
3.4.2	Determinación del peso específico bulk . . . . .	53
3.4.3	Estabilidad y Flujo . . . . .	54
3.4.4	Corrección de la estabilidad por volumen . . . . .	55
3.5	Método de diseño del polígono de vacíos . . . . .	56
3.6	Validación del método polígono de vacíos mediante ejemplos de literatura	59
<b>4</b>	<b>Resultados y desarrollo del software</b>	<b>61</b>
4.1	Granulometría de los agregados . . . . .	61
4.2	Gravedades específicas de los agregados . . . . .	65
4.3	Granulometría de diseño . . . . .	65
4.4	Ensayos de áridos en laboratorio . . . . .	67
4.4.1	Agregado grueso . . . . .	67
4.4.2	Agregado fino . . . . .	67
4.5	Ensayo RICE . . . . .	68
4.6	Determinación teórica de la gravedad específica efectiva del agregado . . . . .	69
4.7	Ensayo de Marshall . . . . .	70
4.8	Desarrollo de software con el método del polígono de vacíos . . . . .	72
4.9	Diseño por medio del método del polígono de vacíos . . . . .	82
4.10	Comparación de resultados entre las metodologías Marshall y polígono de vacíos . . . . .	83
4.11	Validación de la metodología del polígono de vacíos . . . . .	84
<b>5</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>85</b>
5.1	Conclusiones . . . . .	85
5.2	Recomendaciones . . . . .	87
5.2.1	Recomendaciones para el uso del método mediante el software desarrollado . . . . .	87
5.2.2	Recomendaciones para investigaciones futuras . . . . .	87
	<b>Bibliografía</b>	<b>87</b>
	<b>Anexos</b>	<b>93</b>



<b>A</b>	<b>Codificación del Software</b>	<b>93</b>
A.1	Código completo de la igualación entre vectores para encontrar las intersecciones de las isolíneas . . . . .	93
A.2	Código implementado para la determinación de la combinación de agregados	94
<b>B</b>	<b>Ensayos en laboratorio</b>	<b>103</b>
B.1	Análisis granulométrico de agregados . . . . .	104
B.1.1	Granulometría: 2 Polvo: Arena . . . . .	104
B.1.2	Granulometría: agregado grueso 3/4" . . . . .	105
B.1.3	Granulometría: agregado grueso 3/8" . . . . .	106
B.2	Ensayos en agregados gruesos . . . . .	107
B.2.1	Durabilidad al sulfato de sodio o magnesio . . . . .	107
B.2.2	Abrasión de la máquina de los Ángeles . . . . .	108
B.2.3	Partículas chatas y alargadas y caras fracturadas . . . . .	109
B.2.4	Porcentaje de absorción y gravedad específica . . . . .	110
B.3	Ensayos en agregados finos . . . . .	111
B.3.1	Porcentaje de absorción y gravedad específica en polvo y arena . . . . .	111
B.3.2	Índice de plasticidad, material pasante el tamíz N°200 y el tamíz N°40 . . . . .	112
B.3.3	Adhesividad en polvo y arena (Rieder Weber) . . . . .	113
<b>C</b>	<b>Datos de diseños ya existentes</b>	<b>114</b>
C.1	Diseño 1 . . . . .	115
C.2	Diseño 2 . . . . .	116

# Índice de figuras

2.1	Estructura de un pavimento Flexible . . . . .	21
2.2	Parámetros de diseño volumétrico . . . . .	26
2.3	Componentes de la mezcla de asfalto en caliente compactada . . . . .	28
3.1	Mapa geológico que abarca al sector El descanso . . . . .	37
3.2	Mapa geológico que abarca al cantón Guachapala . . . . .	38
3.3	Ensayo granulometría en agregados. . . . .	39
3.4	Ensayo de durabilidad al sulfato de magnesio. . . . .	40
3.5	Ensayo de la máquina de los ángeles. . . . .	40
3.6	Ensayo de partículas chatas y alargadas. . . . .	41
3.7	Ensayo de caras fracturadas. . . . .	42
3.8	Ensayo de absorción y gravedad específica. . . . .	43
3.9	Ensayo de adherencia en agregado grueso. . . . .	43
3.10	Procedimiento ensayo de adhesividad. . . . .	45
3.11	Condición saturada superficialmente seca del agregado fino. . . . .	46
3.12	Límite líquido en agregado fino. . . . .	47
3.13	Límite plástico en el agregado fino. . . . .	47
3.14	Muestra de la mezcla disgregada. . . . .	48
3.15	Muestra cubierta de agua. . . . .	49
3.16	Aplicación de vacío. . . . .	49
3.17	Recipiente enrasado con agua. . . . .	50
3.18	Preparación de áridos y asfalto para la elaboración de las briquetas. . . . .	51
3.19	Mezcla de Áridos y Asfalto para la elaboración de las Brietas. . . . .	52
3.20	Colocación de la mezcla en el molde. . . . .	52
3.21	Compactación de la mezcla en el molde. . . . .	53
3.22	Determinación del peso específico bulk en briquetas. . . . .	53
3.23	Determinación del peso específico bulk en briquetas. . . . .	54
3.24	Lectura de medidores de estabilidad y flujo. . . . .	55
3.25	Tendencia del factor de corrección por volumen. . . . .	56
3.26	Isolíneas de vacíos con aire . . . . .	57
3.27	Isolíneas de vacíos en el agregado mineral . . . . .	57
3.28	Isolíneas de vacíos llenos de asfalto . . . . .	58
3.29	Isolíneas emplazadas que forman el polígono de vacíos . . . . .	58
4.1	Curva granulométrica del agregado fino. . . . .	62
4.2	Curva granulométrica del agregado grueso, material pasante del tamiz 3/8". . . . .	63
4.3	Curva granulométrica del agregado grueso, material pasante del tamiz 3/4". . . . .	64
4.4	Curva granulométrica de la combinación final de agregados. . . . .	66
4.5	Curvas de diseño ensayo Marshall . . . . .	71



4.6	Captura de la ventana de inicio del software. . . . .	72
4.7	Captura de la ventana para el diseño de la granulometría. . . . .	73
4.8	Captura de la ventana para el ingreso de las granulometrías de los diferentes materiales. . . . .	74
4.9	Curva granulométrica de la combinación de agregados. . . . .	75
4.10	Ingreso de los datos de gravedades específicas dentro del software. . . . .	76
4.11	Gravedades específicas y porcentajes de vacíos dentro del software. . . . .	77
4.12	Captura de la ventana final del software. . . . .	81



# Índice de tablas

2.1	Requerimientos para Agregados Gruesos. NEVI-12 2012 . . . . .	23
2.2	Requerimientos para Caras Fracturadas. NEVI-12 2012 . . . . .	23
2.3	Requerimientos en Agregado Grueso. MTOP 2002 . . . . .	24
2.4	Requerimientos para Agregado Fino. NEVI-12 2012 . . . . .	24
2.5	Requerimientos Porcentaje del Equivalente de Arena. NEVI-12 2012 . . . . .	25
2.6	Angularidad del Agregado Fino. NEVI-12 2012 . . . . .	25
2.7	Requerimientos en Agregado Fino. MTOP 2002 . . . . .	25
2.8	Graduaciones propuestas para mezclas asfálticas en caliente. NEVI-12 2012	30
2.9	Gradaciones propuestas para hormigón asfáltico mezclado en planta. MTOP 2002. . . . .	31
2.10	Criterio de diseño de mezclas Marshall. ASTM D 1315 2013 . . . . .	31
2.11	Mínimo porcentaje de vacíos de agregado mineral. ASTM D 1315 2013	32
3.1	Factor de corrección de estabilidad por volumen . . . . .	55
3.2	Resultados del Diseño 1 mediante el método del polígono de vacíos . . . . .	60
3.3	Resultados del Diseño 2 mediante el método del polígono de vacíos . . . . .	60
4.1	Granulometría del agregado fino, compuesto por dos partes de polvo y una parte de arena . . . . .	62
4.2	Granulometría del Agregado Grueso, fracción que pasa por el tamiz 3/8”	63
4.3	Granulometría del agregado grueso, fracción que pasa por el tamiz 3/4” .	64
4.4	Gravedades específicas de cada porción de agregado . . . . .	65
4.5	Porcentajes de agregados y granulometría final de la combinación. . . . .	65
4.6	Granulometría final de la combinación de agregados comparada con la faja MAC-2, de la norma NEVI (2013) y con la faja de 1/2” de la norma MOP (2002) . . . . .	66
4.7	Resultados de los ensayos de laboratorio en el agregado grueso . . . . .	67
4.8	Resultados de los ensayos de laboratorio en el agregado fino . . . . .	68
4.9	Gravedad específica teórica máxima y gravedad específica obtenidas me- diante el Ensayo RICE . . . . .	68
4.10	Gravedad específica teórica máxima y gravedad específica obtenidas de manera teórica . . . . .	69
4.11	Ensayo de Marshall . . . . .	70
4.12	Resumen del ensayo Marshall . . . . .	72
4.13	Resultados obtenidos del Polígono de vacíos . . . . .	82
4.14	Resultados obtenidos en el Ensayo de Marshall . . . . .	82
4.15	Comparación de resultados . . . . .	83
4.16	Comparación de resultados en Diseño 1 . . . . .	84
4.17	Comparación de resultados en Diseño 2 . . . . .	84

# Códigos

4.1	Asignación de valores a las variables dentro del código. . . . .	77
4.2	Conversión de porcentaje a decimal de valores del porcentaje de asfalto y límites de vacíos. . . . .	78
4.3	Creacion de los vectores de cada isolinea de las especificaciones de vacíos.	78
4.4	Ejemplos de la igualación entre vectores para encontrar las intersecciones de las isolineas. . . . .	79
4.5	Obtención de los Gmb de puntos de intersecciones. . . . .	79
4.6	Verificación de intersecciones que forman los vértices del polígono. . . . .	80
4.7	Verificación de intersecciones que no salgan de los límites de la gráfica. . .	80
4.8	Determinación del Porcentaje Óptimo de Asfalto gravedad específica neta y especificaciones de vacíos. . . . .	81
A.1	Código completo de la igualación entre vectores para encontrar las intersecciones de las isolineas . . . . .	93
A.2	Código implementado para la determinación de la combinación de agregados	94



## Cláusula de licencia para autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Daniela Mishell Idrovo León en calidad de autora de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación *Evaluación de alternativas de diseño de mezclas asfálticas en caliente, basadas en la metodología del polígono de vacíos*, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Así mismo, autorizo a la universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 24 de febrero de 2021

Paola Estefanía Guzmán Agudo  
C. I.: 0106588080



## Cláusula de licencia para autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Daniela Mishell Idrovo León en calidad de autora de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación *Evaluación de alternativas de diseño de mezclas asfálticas en caliente, basadas en la metodología del polígono de vacíos*, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Así mismo, autorizo a la universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 24 de febrero de 2021

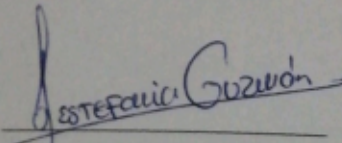
Daniela Mishell Idrovo León  
C. I.: 0104556436



## Cláusula de Propiedad Intelectual

Paola Estefanía Guzmán Agudo en calidad de autora del trabajo de titulación *Evaluación de alternativas de diseño de mezclas asfálticas en caliente, basadas en la metodología del polígono de vacíos*, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 24 de febrero de 2021

  
Paola Estefanía Guzmán Agudo  
C. I.: 0106588080



## Cláusula de Propiedad Intelectual

Daniela Mishell Idrovo León en calidad de autora del trabajo de titulación *Evaluación de alternativas de diseño de mezclas asfálticas en caliente, basadas en la metodología del polígono de vacíos*, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 24 de febrero de 2021

Daniela Mishell Idrovo León  
C. I.: 0104556436



## Dedicatoria y agradecimientos

El enorme esfuerzo que ha implicado la culminación de este trabajo, está dedicado a mi familia. A mi mamá y mi hermanos Isa y Andrés; pero en especial a mi papi, mi ángel, que aunque ya no está aquí, sé que se siente orgulloso y celebra mis triunfos como suyos. Infinitamente agradecida por lo que él hizo para que sus hijos pudiéramos llegar lejos, no lo defraudaremos.

Una dedicatoria especial al pilar de mi vida, Dario, que siempre encuentra la manera de motivarme a avanzar más y más, esto ha sido posible gracias a su amor y apoyo incondicional, sé que de la mano alcanzaremos muchos triunfos más.

A la mejor compañera de tesis, Dani, casi 7 años siendo un equipo y hemos llegado a la cumbre de esta etapa, gracias por siempre confiar en mi para trabajar juntas.

A mis amigos, compañeros y maestros de la universidad; las enseñanzas, consejos y aventuras, me dejan los mejores recuerdos y aprendizajes, muchísimas gracias por el tiempo y por la pasión de ser buenos docentes. De forma especial agradezco a mis directores de tesis Ing. Bojorque e Ing. Neira, el tiempo que emplearon para ayudarnos a finalizar este trabajo ha sido sumamente valioso para nosotras y nuestra incorporación como profesionales.

Con todo el amor del mundo  
Estefanía Guzmán

Este trabajo está dedicado con todo mi cariño para mi familia; de manera especial a mis padres; quienes han puesto toda su confianza para lograr un objetivo más en mi vida.

En primer lugar quiero agradecer a mis padres, quienes han sabido guiarme a lo largo de este camino, brindándome su apoyo incondicional y aconsejándome en cada decisión que he tomado. A mi hermana, que es mi cómplice y mejor amiga, ser su ejemplo a seguir siempre me ha motivado para no rendirme.

De igual forma, agradezco a mis amigos y colegas que han permanecido a mi lado a lo largo de los años y que sé que ocuparán un lugar importante a lo largo de mi vida.

Daniela Idrovo

# Capítulo 1

## Introducción

Este capítulo presenta una primera idea sobre metodología del polígono de vacíos. Se indica la importancia de implementar nuevas metodologías de diseño de mezclas asfálticas dentro de la región, dado que representan una optimización de recursos y tiempo. También se exhiben las investigaciones ya realizadas sobre el polígono de vacíos a lo largo del desarrollo de este método.

### 1.1 Antecedentes

Una de las partes más importantes de una carretera, calle o aeropuerto es su pavimento, sin esta estructura no se puede pensar en tránsito rápido, cómodo y seguro. La red vial del Ecuador está conformada por 10.285 km, de los cuales el 67 % se encuentran en buen estado (Subsecretaría de Infraestructura del Transporte, 2020).

Existen diferentes tipos de pavimentos empleados en la construcción de vías dentro del país, pero el más empleado es el pavimento flexible, con un 50.2 %, y en segundo lugar, se encuentra el pavimento rígido con un 16.6 % (MTO, 2002).

Dentro del diseño de un pavimento flexible una de las características fundamentales es el agregado mineral empleado, dado que este está estrechamente relacionado con el desempeño y durabilidad de las mezclas asfálticas (Sánchez et al., 2011). Dentro de cualquier geomaterial compactado, existen 3 propiedades referente al contenido de vacíos: los vacíos del agregado mineral, los vacíos llenos con asfaltos y los vacíos con aire. El contenido de vacíos dentro de la mezcla es de gran importancia en el desempeño futuro del pavimento; por ejemplo, al tener un alto volumen de vacíos la oxidación y el envejecimiento del ligante se pueden acelerar, así como también se puede presentar una alta permeabilidad en el pavimento; mientras que un bajo contenido de vacíos puede presentar deformaciones por ahuellamiento o rodaderas (Sánchez-Leal et al., 2002).

RAMCODES, acrónimo de Metodología Racional para el Análisis de Densificación y Resistencia de Geomateriales Compactados, permite analizar y diseñar geomateriales para carreteras, dentro de estos se encuentran suelos compactados y mezclas asfálticas. En el caso de mezclas asfálticas, RAMCODES presenta 4 herramienta de análisis: i) Carta de gradación, ii) Combinador de agregados, iii) Polígono de vacíos y iv) Mapa de Resistencia (Sánchez-Leal, nd). El presente estudio abarca únicamente la aplicación directa del Método del Polígono de vacíos, la cual presenta un área máxima, de un espacio con-





formado por el contenido de asfalto vs la gravedad específica neta de la mezcla, en el cual se cumplen simultáneamente todas las especificaciones de vacíos para el diseño de una mezcla asfáltica. Esta metodología fusiona las especificaciones de vacíos con los criterios de control en campo mediante sus expresiones, y mediante la representación gráfica de un área delimitada donde se garantiza el cumplimiento de todas las especificaciones de vacíos, se obtiene el porcentaje óptimo de asfalto (Pincay Bermello et al., 2018).

## 1.2 Estado del arte

La metodología de polígonos de vacíos, fue desarrollada desde el año de 1998 por Freddy J. Sánchez-Leal con el soporte técnico de la fundación venezolana FundaSOLES-TUDIOS (Sánchez et al., 2011); para posteriormente ser aplicada por diferentes autores a las realidades de diseño de cada uno.

Sánchez-Leal et al. (2002), en su publicación, *RAMCODES: “Metodología Racional para el análisis de densificación y resistencia de geomateriales compactados”*, demuestran la aplicación de forma exitosa en control del diseño, la colocación y revisión de geomateriales, para este caso, en estructuras de pavimento; dentro de este artículo se detalla el procedimiento a seguir en la metodología del polígono de vacíos para llegar a obtener el valor del contenido óptimo de asfalto, también especifican las fallas que puede sufrir la mezcla asfáltica cuando es diseñada por fuera de los límites de contenido de vacíos.

Sánchez et al. (2011) muestran en su documento *“Polyvoids: Analytical Tool for Superpave HMA Design”*, publicado en *Journal of Materials in Civil Engineering*, la aplicación del polígono de vacíos como una herramienta analítica original de RAMCODES para obtener el contenido óptimo del asfalto en una mezcla en caliente, basada únicamente en las especificaciones de vacíos (vacíos con aire, vacíos en agregado mineral y vacíos llenos de asfalto). Dentro del documento se presentan tres ejemplos existentes de diseño de mezcla en caliente con la metodología Superpave, de los cuales el resultado, comparado con la fórmula de trabajo, obtenidos mediante el centroide de polígono de vacíos, es aproximadamente el mismo que el obtenido por el procedimiento AASHTO con 16 muestras. Sin embargo, la diferencia de que en el del polígono de vacíos solo fueron necesarias seis. Es evidente el ahorro de tiempo y materiales con el uso de esta metodología.

Ochoa Diaz (2012) con la problemática que se origina en la acumulación del alquitrán de hulla, subproducto resultante de la industria siderúrgica, plantea una alternativa viable, con el uso del alquitrán de hulla como ligante para mezclas bituminosas, a través de su artículo: *“Diseño de mezclas bituminosas para pavimentos con alquitrán, usando las metodologías Marshall y RAMCODES”* (polígono de vacíos); posteriormente Ochoa and Grimaldo (2018) adicionalmente, verifican los resultados obtenidos en el año 2012 con un análisis estadístico por medio del software SPSS, determinando que estos no difieren significativamente de Marshall a RAMCODES. Además, concluyen con la factibilidad del uso de alquitrán como ligante, utilizando la metodología de RAMCODES.

En el artículo *“Validation of the Polygon-Of-Voids Tool for Asphalt Mixtures with RAP”*, basados en investigaciones anteriores, demuestran que se puede obtener el conte-

nido óptimo de asfalto en mezclas asfálticas en caliente con agregados vírgenes en función de las especificaciones de vacíos. Los autores indican los desafíos que presentan las nuevas tendencias de desarrollar mezclas de asfalto incorporando pavimento de asfalto recuperado (RAP), puesto que el agregado para la mezcla contiene residuos de asfalto en él, de manera que la medición de la gravedad específica neta del agregado se vuelve difícil. Marín and Thenoux (2014) en este artículo proponen que la metodología del polígono de vacíos es aplicable al diseño de asfalto de mezcla en caliente reciclado. Como conclusión, presentan que el valor de la gravedad específica real del agregado RAP, se asume como la gravedad específica neta del agregado y de esa manera obtienen los valores del contenido óptimo de ligante asfáltico, los mismo que fueron cercanos a los contenidos determinados por medio del método Marshall.

Sánchez-Leal (nd) publica el artículo intitulado “*Aplicación del método RAMCODES en el diseño de mezclas asfálticas de alto desempeño*”, en el cual desarrolla el análisis del polígono de vacíos, que es involucrado con la definición y especificaciones de la relación filler-bitumen, de manera que la primera metodología incrementa sus ventajas de forma significativa; en un segunda parte detalla cómo favorece el uso de la carta de gradación y mapas de resistencia, dentro de la evaluación de la influencia de la gradación del agregado en el desempeño de la mezcla asfáltica de alto rendimiento. Como recomendación, el autor impulsa el uso de las herramientas RAMCODES en el diseño de mezclas asfálticas con el Protocolo Mexicano dado los buenos resultados.

Pincay Bermello et al. (2018), publicaron el libro: “*Análisis comparativo entre la aplicación de Metodología RAMCODES y el método Marshall como alternativa para la obtención del contenido óptimo de asfalto para el diseño de mezclas asfálticas*”, en el que exponen los resultados del análisis comparativo realizado entre la aplicación de dos metodologías para la determinación del contenido óptimo de asfalto en el diseño de mezclas asfálticas. Aplicaron Marshall a la granulometría del agregado para el diseño, para posteriormente ser evaluada con el contenido óptimo obtenido mediante RAMCODES; concluyendo que, el segundo método se puede aplicar de manera exitosa, rápida y eficaz, en comparación con Marshall, puesto que, se corroboraron que los resultados obtenidos son similares entre sí.

### 1.3 Planteamiento del problema

Todas las investigaciones existentes, presentadas en la sección anterior, se han realizado fuera del país. Estos trabajos han sido desarrollados con normativas y materiales de diferentes orígenes y características a los que se encuentran dentro de nuestra región. Razón que limita el uso de esta metodología dentro de la zona.

### 1.4 Justificación

El objeto de la aplicación del método del Polígono de Vacíos es determinar el contenido óptimo de asfalto para el diseño de una mezcla en caliente. La principal razón para el uso de este método es optimizar el tiempo y los materiales empleados para el diseño.



Esta metodología es relativamente nueva, razón por la cual no ha tenido implementación dentro del Ecuador. Por tal motivo, este trabajo de titulación busca aplicar esta metodología al diseño de mezclas asfálticas con el empleo de agregados granulares de nuestra región, mediante el enfoque de la aplicación de normas nacionales. De la misma forma se busca facilitar el uso de este método mediante el desarrollo de un software que automatiza el método.

## 1.5 Objetivos

### 1.5.1 Objetivo General

Determinar la factibilidad de la implementación del método del polígono de vacíos, a través del desarrollo de un software y aplicado a materiales utilizados en la zona austral.

### 1.5.2 Objetivos Específicos

- Identificar los beneficios y desventajas del uso del método de polígono de vacíos mediante su aplicación en el diseño de mezclas asfálticas en caliente.
- Desarrollar e implementar un modelo en el software Matlab que permita aplicar la metodología estudiada de forma automatizada a diferentes escenarios.
- Validar el método estudiado, mediante la comparación con datos existentes en literatura y datos obtenidos en laboratorio con el uso del método de Marshall.
- Emitir las conclusiones y recomendación del empleo del método de polígono de vacíos.

## 1.6 Alcance

Este proyecto incluye el análisis del método del polígono de vacíos mediante su aplicación en un diseño de mezcla asfáltica en caliente con tres tipos de agregados granulares de la zona y su aplicación en dos diseños ya existentes obtenidos de la planta de Asfalto de la Municipalidad de Cuenca. Para esto se implementa un software mediante la herramienta Matlab, el mismo que cuenta con un primer apartado que permite al diseñador determinar la curva granulométrica de diseño, según la normativa MTOP o NEVI-12.

También se realiza el diseño de la mezcla mediante la metodología Marshall con la construcción de 15 briquetas, para realizar la comparación con los resultados obtenidos mediante el polígono de vacíos. Además, para aprobar el diseño resultantes de esta nueva metodología, se elaboran de 3 especímenes que son ensayados según Marshall.

# Capítulo 2

## Marco Teórico

Este capítulo presenta los conceptos generales respecto a pavimentos flexibles; su definición y componentes, características que deben cumplir y las capas que conforman el mismo. También se definen los parámetros volumétricos dentro de la mezcla asfáltica. De igual manera se presentan las definiciones y procedimientos para el desarrollo tanto del método Marshall como el método del polígono de vacíos.

### 2.1 Pavimento Flexible

#### 2.1.1 Definición de Pavimento Flexible

Según Montejo Fonseca (2002) un pavimento está conformado por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados, esta estructura se apoya sobre la subrasante de una vía y debe resistir de forma adecuada las cargas que el tránsito le transite de forma repetitiva. Los pavimentos se clasifican en: pavimentos flexibles, pavimentos semi-rígidos o semi-flexibles, pavimentos rígidos y pavimentos articulados.

El presente trabajo se basa específicamente en pavimentos flexibles, los mismo que están conformados, generalmente, por una carpeta asfáltica, base y subbase que se asientan sobre la subrasante. La carpeta asfáltica que conforma la superficie de rodamiento absorbe los esfuerzos horizontales y parte de los esfuerzos verticales y distribuye los mismos hacia las capas inferiores por medio de las características de cohesión y fricción de los materiales que conforman las capas inferiores (Miranda Rebolledo, 2010).

#### 2.1.2 Características

Para que un pavimento cumpla adecuadamente sus funciones debe reunir los siguientes requisitos (Montejo Fonseca, 2002):

- Ser resistente a la flexión causada por las cargas impuestas por el tránsito.
- Ser resistente a los agentes del intemperismo.
- Ser durable y económico.

- Presentar condiciones adecuadas con respecto al drenaje y subdrenaje.
- Ser estable, es decir soportar las tensiones que generan las cargas de tránsito sin causar deformaciones mayores.
- Tener un color adecuado, que evite deslumbramiento y reflejos a los usuarios, y así ofrecer una adecuada seguridad de tránsito.
- Controlar el ruido de rodadura, que afecta a los usuarios que se encuentran tanto en el interior del vehículo, como fuera del mismo, por lo cual este debe ser moderado.
- Tener una textura superficial óptima para las velocidades de diseño de circulación de los vehículos, debido a que esta influye de gran manera en la seguridad vial, la superficie debe resistir los desgastes producidos por la fricción generada por las llantas de los vehículos.

Existen diferentes criterios que determinan las características del pavimento flexible, entre los factores de diseño más importantes se encuentran el tráfico y carga al que va a estar sometida la vía, el medio ambiente del lugar donde se realice la estructura, factores como la precipitación y la temperatura deben ser tomados en cuenta. Así también, influye de manera importante los materiales empleados en la construcción (Menéndez Acurio, 2009).

### 2.1.3 Capas de un Pavimento Flexible

En la Figura 2.1 se presenta la estructura típica de un pavimento flexible, los espesores de cada capa varían dependiendo del diseño con respecto al tráfico proyectado. La estructura está conformada por una carpeta asfáltica, una capa de material base, una capa de material subbase y la subrasante conformada por el terreno natural, cada una de éstas se definen a continuación:

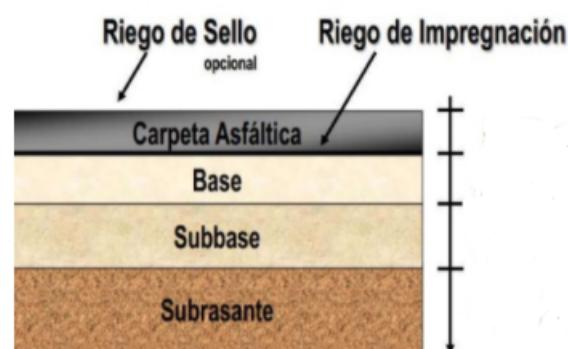


Figura 2.1: Estructura de un pavimento Flexible. Recuperado de: Proceso constructivo del Pavimento flexible. Civilneting (2019)

**Carpeta Asfáltica:** Es la capa colocada en la parte superior de la estructura, sobre la base y hace la función de ser la superficie de rodamiento de la vía, esta debe resistir la aplicación directa de las cargas, la fricción generada por las llantas, los esfuerzos de



drenaje y los impactos.

Otra característica importante es que impermeabiliza la superficie, buscando así evitar la saturación de las capas inferiores. La carpeta es elaborada con material pétreo seleccionado y con un aglomerante que es el asfalto (Auccahuaqui Yanque and Corahua Hilaquita, 2016).

**Base:** Es la capa ubicada debajo de la carpeta asfáltica. Su principal función es ser resistente, debido a que esta carpeta debe absorber la mayor parte de esfuerzos verticales (Miranda Rebolledo, 2010).

La base cumple una función muy importante, que es la del drenaje, esta debe ser capaz de eliminar de manera fácil y rápidamente el agua que llegue a infiltrarse de la carpeta asfáltica, así como a su vez no debe permitir la ascensión capilar del agua proveniente de las capas inferiores (Auccahuaqui Yanque and Corahua Hilaquita, 2016).

**Subbase:** Esta capa está ubicada debajo de la base, una de sus principales funciones es netamente económica, las capas más calificadas o de mejor calidad se colocan en la parte superior de la estructura, mientras que en los niveles inferiores es preferible colocar una capa de menor calidad, la cual por ende es más económica, y a pesar de significar un incremento en el espesor total de la estructura del pavimento resulta más barato (Montejo Fonseca, 2002).

**Subrasante:** Se define así al terreno de fundación de los pavimentos, esta puede estar constituida de terreno natural o estabilizado dependiendo de las características del suelo encontrado, debe soportar todo el paquete estructural que se asiente sobre ella y se extiende hasta una profundidad en la cual no influyan las cargas de tránsito.

El espesor del pavimento dependerá en gran parte de la calidad de la subrasante, por lo cual es necesario que esta cumpla con los requisitos de estabilidad, incompresibilidad y resistencia a la expansión y contracción por efectos de la humedad (Auccahuaqui Yanque and Corahua Hilaquita, 2016).

## 2.1.4 Componentes: Agregados, Asfalto y Mezclas Asfálticas

**Agregados para mezclas bituminosas:** Se conoce como agregado mineral al conjunto de partículas minerales secas, que poseen una determinada distribución de tamaño, con una forma, angulosidad, rugosidad y dureza aceptable. Para obtener la fracción o fracciones de características particulares aceptables, el agregado grueso es triturado y cribado, mientras que en el caso del material fino podrá ser producto de la trituración de piedra o arena natural, es necesario considerar que el agregado para mezclas que utilice emulsiones asfálticas necesita ciertas condiciones de humedad particulares en los agregados (NEVI-12, 2013).

Debido a que los agregados conforman entre el 90 % y el 95 %, en peso, y entre el 75 % y el 85 %, en volumen, de la mayoría de mezclas asfálticas, el comportamiento del pavimento se ve altamente influenciado por la selección apropiada de agregado.

- **Tamaño y gradación de las partículas:** Mediante el ensayo granulométrico se determinan los diferentes tamaños de los agregados a utilizarse. Los agregados se dividen principalmente en 3 tipos según su tamaño; agregados gruesos, agregados finos y relleno o filler (polvo).

Los agregados gruesos son generalmente retenidos en la malla N°4 (4.75 mm), mientras que el agregado fino es el que pasa el tamiz N°4 y son retenidos en la malla N°200 (0.075 mm). El relleno, conocido como polvo mineral, es la porción de agregado que pasa la malla N°200.

- **Requerimientos para Agregados Gruesos:** Los agregados gruesos deben cumplir ciertos parámetros según la Norma Ecuatoriana NEVI-12 para la elaboración de la capa de rodadura de hormigón asfáltico en caliente, presentados a continuación en la Tabla 2.1:

Tabla 2.1: Requerimientos para Agregado Grueso. NEVI-12 2012<sup>a</sup>

Ensayos	Requerimiento	
	Altitud (m.s.n.m)	
	<3000	>3000
Durabilidad (al Sulfato de Sodio)	12 % máx	10 % máx
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	18 % máx	15 % máx
Abrasión Los Ángeles	40 % máx	35 % máx
Índice de Durabilidad	35 % mín	35 % mín
Partículas Chatas y Alargadas	10 % máx	10 % máx
Caras Fracturadas	Ver TABLA 2.2	
Sales Solubles Totales	0.5 % máx	0.5 % máx
Absorción	1 % máx	Según Diseño
Adherencia	+95	

<sup>a</sup>Adaptado de: NEVI-12 (2013). *Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes*. Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador.

Tabla 2.2: Requerimientos para Caras Fracturadas. NEVI-12 2012<sup>a</sup>

Tráfico en ejes Equivalentes (millones)	Espesor de Capa	
	<100 mm	<100 mm
3	65/40	50/30
3-30	85/50	60/40
>30	100/80	90/70

<sup>a</sup>Recuperado de: NEVI-12 (2013). *Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes*. Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador.

La Tabla 2.2 presenta los requerimientos para Caras Fracturadas, la notación “85/80” indica que el 85 % del agregado grueso tiene una cara fracturada y que el

80 % tiene dos caras fracturadas.

Debido a que, actualmente dentro del Ecuador, se encuentra aún vigente la normativa (MTOPE, 2002), es necesario verificar que los agregados empleados cumplan con los requerimientos especificados dentro de esta normativa. En la Tabla 2.3 se presentan estos requerimientos:

Tabla 2.3: Requerimientos en Agregado Grueso. MTOPE 2002<sup>a</sup>

Ensayos	Requerimiento
Abrasión Los Ángeles	40 % Máx
Durabilidad al Sulfato de Sodio	12 % Máx
Adherencia	95 % Mín
Partículas Chatas y Alargadas	10 % Máx
1 Cara Fracturada	85 % Mín
2 Caras Fracturadas	80 % Mín

<sup>a</sup>Fuente: MTOPE (2002). *Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes*. Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador.

- **Requerimientos para Agregados Finos:** Los agregados finos están estipulados según los parámetros de la Norma Ecuatoriana NEVI-12 para la elaboración de la capa de rodadura de hormigón asfáltico en caliente, presentadas a continuación en la Tabla 2.4:

Tabla 2.4: Requerimientos para Agregado Fino. NEVI-12 2012<sup>a</sup>

Ensayos	Requerimiento	
	Altitud (m.s.n.m)	
	<3000	>3000
Equivalente de Arena	Ver Tabla 5	
Angularidad del Agregado Fino	Ver Tabla 6	
Adhesividad (Riedel Weber)	4 % mín	6 % mín
Índice de Plasticidad (malla N°40)	NP	NP
Índice de Durabilidad	35 mín	35 mín
Índice de Plasticidad (malla N°200)	Máx 4	NP
Sales Solubles Totales	0.5 % máx	0.5 % máx
Absorción	0.5 % máx	Según Diseño

<sup>a</sup>Recuperado de: NEVI-12 (2013). *Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes*. Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador.

Los requerimientos para los parámetros del Porcentaje del Equivalente de Arena mínimo y para la Angularidad del Agregado Fino se presentan en las Tablas 2.5 y 2.6 respectivamente:



Tabla 2.5: Porcentaje del Equivalente de Arena. NEVI-12 2012<sup>a</sup>

Tráfico en Ejes Equivalentes (millones) (mm)	Porcentaje de Equivalente de Arena (mínimo)
3	45
3 - 30	50
>30	55

<sup>a</sup>Recuperado de: NEVI-12 (2013). *Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes*. Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador.

Tabla 2.6: Angularidad del Agregado Fino. NEVI-12 2012<sup>a</sup>

Tráfico en Ejes Equivalentes (millones)	Espesor de Capa	
	<100 mm	>100 mm
3	30 mín	30 mín
3 - 30	40 mín	40 mín
>30	40 mín	40 mín

<sup>a</sup>Recuperado de: NEVI-12 (2013). *Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes*. Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador.

Es necesario verificar también que los agregados empleados cumplan con los requerimientos especificados dentro de esta normativa (MTO, 2002). En la Tabla 2.7 se presentan estos requerimientos para agregados finos:

Tabla 2.7: Requerimientos en Agregado Fino. MTO 2002<sup>a</sup>

Ensayos	Requerimiento
Índice de Plasticidad Malla N°40	4 % Máx
Adherencia	95 % Mín
Equivalente de Arena ( Tráfico Pesado)	40 % Mín
Angularidad	45 % mín

<sup>a</sup>Fuente: MTO(2002). *Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes*. Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador.

**Asfalto:** Este es un material ligante bituminoso de color oscuro, que está conformado por mezclas de hidrocarburos no volátiles de alto peso molecular, obtenidos del petróleo crudo. Para ciertas aplicaciones, este puede ser mezclado uniformemente con productos obtenidos de la destilación del petróleo como gasolina, nafta, kerosene o diésel los cuales reducen su viscosidad y permiten el uso del mismo a temperaturas más bajas (NEVI-12, 2013).

Este es clasificado de acuerdo al grado de viscosidad, según la norma ASTM - D3381. En casos especiales, autorizados por la entidad de control, se puede clasificar el asfalto de acuerdo al grado de desempeño conforme la normativa AASHTO M320 (NEVI-12, 2013).

## 2.2 Parámetros volumétricos dentro de la mezcla asfáltica

### 2.2.1 Gravedad específica neta del agregado ( $G_{sb}$ )

Es la relación entre la masa de un volumen unitario de agregado, incluyendo vacíos permeables e impermeables del material, medida en el aire y la masa del mismo volumen del agua, con densidad igual a la del agua destilada; las mismas que deben medirse a igual temperatura (Garnica Anguas et al., 2005). En la Figura 2.2 se presenta el esquema de los parámetros empleados en las mezclas asfálticas.

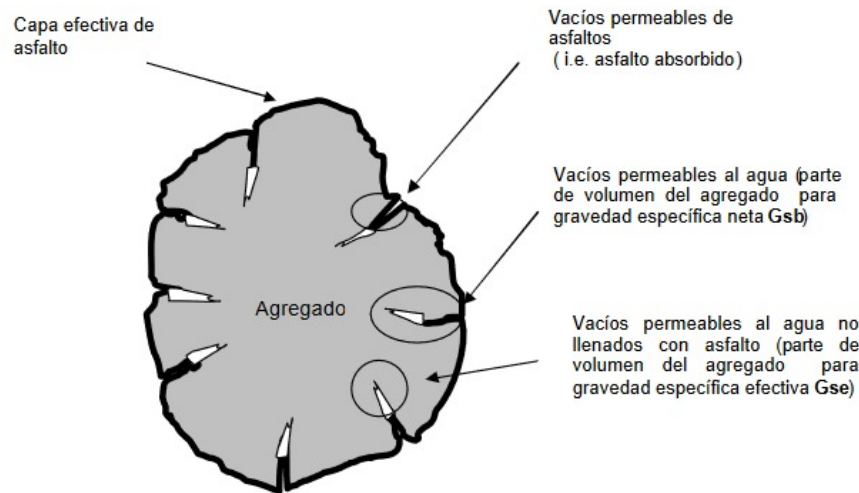


Figura 2.2: Parámetros de diseño volumétrico. Recuperado de: Análisis comparativo de los métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas (p. 8), por P. Garnica et al., 2005, Sanfandila.

Si a la mezcla final del agregado lo componen diferentes fracciones de agregado, como, grueso, fino y filler, cada una de ellas tiene su propia gravedad específica neta, de manera que la gravedad específica del agregado en su totalidad se calcula con la ecuación 2.1.

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_{sb1}} + \frac{P_2}{G_{sb2}} + \dots + \frac{P_n}{G_{sbn}}} \quad (2.1)$$

Donde:

- $G_{sb}$  = Gravedad específica neta de la combinación final de agregados.
- $P_1, P_2, P_n$  = Porcentajes de cada fracción individual de las masas de los agregados
- $G_{sb1}, G_{sb2}, G_{sbn}$  = Gravedad específica neta de las fracciones individuales de los agregados



### 2.2.2 Gravedad específica aparente del agregado ( $G_{sa}$ )

Es la relación, a una misma temperatura, entre la masa en el aire de un volumen unitario de material impermeable del agregado y la masa de igual volumen, con la misma densidad que el agua destilada (ver Figura 2.2) (Garnica Anguas et al., 2005).

De igual manera si la mezcla final del agregado está compuesta por diferentes fracciones de agregado, cada una de ellas tiene su propia gravedad específica aparente, de manera que la gravedad específica aparente del agregado final se calcula con la ecuación 2.2.

$$G_{sa} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_{sa1}} + \frac{P_2}{G_{sa2}} + \dots + \frac{P_n}{G_{san}}} \quad (2.2)$$

Donde:

- $G_{sa}$  = Gravedad específica aparente de los agregados.
- $P_1, P_2, P_n$  = Porcentajes de cada fracción de las masas de agregados.
- $G_{sa1}, G_{sa2}, G_{san}$  = Gravedad específica aparente de las fracciones de agregados

### 2.2.3 Gravedad específica efectiva del agregado ( $G_{se}$ )

Es el valor que corresponde a la relación de la masa, medida en el aire, de un volumen unitario de agregado, (incluyendo únicamente los poros permeables al agua y no al asfalto) con respecto al peso de un mismo volumen de agua, valores medidos a una misma temperatura (ver Figura 2.2) (Garnica Anguas et al., 2005). Se calcula por medio de la ecuación 2.3.

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \quad (2.3)$$

Donde :

- $G_{se}$  = Gravedad específica efectiva del agregado.
- $G_{mm}$  = Gravedad específica teórica máxima de la mezcla.
- $P_{mm}$  = Porcentaje del peso de la mezcla total suelta, igual a 100.
- $P_b$  = Contenido de asfalto con respecto a la masa.

### 2.2.4 Gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica ( $G_{mm}$ )

Es la relación entre los valores, medidos a una misma temperatura, correspondientes a la masa de mezcla asfáltica de un volumen determinado, sin vacíos de aire y la masa de igual volumen de agua (Garnica Anguas et al., 2005). Este valor debe ser determinado por medio de la norma ASTM D2041 o ASSTHO T209, para cada uno de los contenidos de asfalto.

### 2.2.5 Contenido de asfalto efectivo ( $P_{be}$ )

Corresponde al valor total de asfalto que contiene la mezcla, excluyendo la cantidad de asfalto que las partículas de agregado absorben en sus poros, de manera que es únicamente la capa de asfalto en la parte exterior del agregado (ver Figura 2.3) (Garnica Anguas et al., 2005).

### 2.2.6 Vacíos de aire ( $V_a$ )

Consiste en el volumen total de aire contenido entre las partículas de agregado ya cubiertas de asfalto dentro de la mezcla compactada, se expresa como el porcentaje del volumen neto de la mezcla (ver Figura 2.3) (Garnica Anguas et al., 2005).

### 2.2.7 Vacíos en el agregado mineral ( $VMA$ )

Consiste en el volumen del espacio vacío intergranular de las partículas de la mezcla de asfalto compactado, incluyendo vacíos con aire y contenido efectivo de asfalto, su valor es expresado como porcentaje del volumen total de la muestra (ver Figura 2.3) (Garnica Anguas et al., 2005).

### 2.2.8 Vacíos llenos de asfalto ( $VFA$ )

Corresponde al porcentaje del volumen total de vacíos, que es ocupado por el asfalto efectivo, entre las partículas de agregado (ver Figura 2.3) (Garnica Anguas et al., 2005).

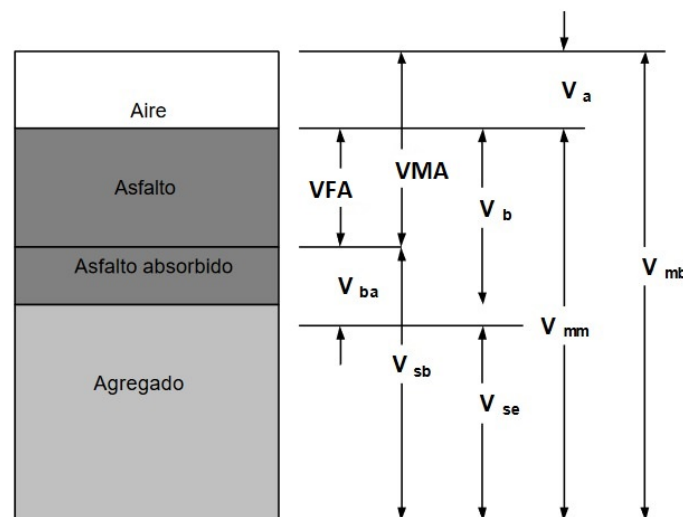


Figura 2.3: Componentes de la mezcla de asfalto en caliente compactada. Recuperado de: Análisis comparativo de los métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas (p. 9), por P. Garnica et al., 2005, Sanfandila.



Donde :

$VMA$  = Volumen de vacíos en agregado mineral.

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

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

$VFA$  = Volumen de vacíos llenados con asfalto.

$V_a$  = Volumen de vacíos con aire.

$V_b$  = Volumen de asfalto.

$V_{ba}$  = Volumen de asfalto absorbido.

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

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

## 2.3 Método Marshall

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

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

El método Marshall utiliza especímenes de prueba de 64 mm ( $2\frac{1}{2}$ " ) de altura y 102 mm (4" ) de diámetro. Se preparan usando un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar mezclas de asfalto-agregado (ASTM D1559).

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

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



### 2.3.1 Granulometría

La metodología Marshall utiliza una gráfica semilogarítmica para establecer la granulometría permitida, en el eje de las ordenadas se encuentra el porcentaje de material que pasa por cierta malla mientras que en el eje de las abscisas se encuentran las aberturas de las mallas en milímetros (mm). La selección de una curva granulométrica está en función de dos parámetros: el tamaño máximo nominal del agregado a emplear en el diseño y de las líneas de control (superior e inferior). Las líneas de control son puntos obligatorios dentro de la granulometría (Garnica Anguas et al., 2004).

En la Tabla 2.8 se presenta la graduaciones propuestas para mezclas asfálticas en caliente según la Normativa (NEVI-12, 2013).

Tabla 2.8: Graduaciones propuestas para mezclas asfálticas en caliente. NEVI-12 2012<sup>a</sup>

Tamiz	Porcentaje que pasa( %)		
	MAC-1	MAC-2	MAC-3
25 mm (1")	100	-	-
19 mm (3/4")	80	100	-
12.5 mm (1/2")	67-85	80-100	-
9.5 mm (3/8")	60-77	70-88	100
4.75 mm (N°4)	43-54	51-68	65-87
2 mm (N°10)	29-45	38-52	43-61
0.425 mm (N°40)	14-25	17-28	16-29
0.180 mm (N°80)	8-17	8-17	9-19
0.075 mm (N°200)	4-8	5-8	5-10

<sup>a</sup>Recuperado de: NEVI-12 (2013). *Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes*. Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador.

En la Tabla 2.9 se presentan las gradaciones propuestas para mezclas asfálticas en planta según la (MTOPE, 2002).

Tabla 2.9: Gradaciones propuestas para hormigón asfáltico mezclado en planta. MTOP 2002<sup>a</sup>

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada			
	3/4"	1/2"	3/8"	N°4
1" (25.4 mm)	100	–	–	–
3/4" (19 mm)	90-100	100	–	–
1/2" (12.7 mm)	–	90-100	100	–
3/8" (9.5 mm)	56-80	–	90-100	100
N°4 (4.75 mm)	35-65	44-74	55-85	80-100
N°8 (2.36 mm)	23-49	28-58	32-67	65-100
N°16 (1.18 mm)	–	–	–	40-80
N°30 (0.60 mm)	–	–	–	25-65
N°50 (0.3 mm)	5-19	5-21	7-23	7-40
N°100 (0.15 mm)	–	–	–	3-20
N°200 (0.075 mm)	2-8	2-10	2-10	2-10

<sup>a</sup>Fuente: MTOP(2002). *Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes*. Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador.

Los requisitos volumétricos y mecánicos de diseño Marshall se muestran en la Tabla 2.10, estos son función del nivel de tránsito esperado durante la vida útil del pavimento, sea este ligero, medio y pesado. La tabla 2.11 presenta el porcentaje mínimo de vacíos en agregado mineral en función de los vacíos de aire y del tamaño nominal de la partícula.

 Tabla 2.10: Criterio de diseño de mezclas Marshall. ASTM D 1315 2013<sup>a</sup>

Método Marshall	Tráfico ligero carpeta y base		Tráfico medio carpeta y base		Tráfico pesado carpeta y base	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Compactación, número de golpes en cada uno de los especímenes.	35		50		75	
Estabilidad (N)	3336	-	5338	-	8006	-
Estabilidad (lb)	750	-	1200	-	1800	-
Flujo (0.25 mm)(0.01 in)	8	18	8	16	8	14
Porcentaje de vacíos	3	5	3	5	3	5
Porcentaje de vacíos en los agregados minerales	Ver tabla N° 2.11					
Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto	75	80	65	78	65	75

<sup>a</sup>Adaptado de: ASTM D3515. (2013). *Standard Specification for Hot-Mixed, Hot-Laid Bituminous Paving Mixtures*. United States of America.

Tabla 2.11: Mínimo porcentaje de vacíos de agregado mineral. ASTM D 1315 2013<sup>a</sup>

Tamaño máximo nominal de la partícula		Porcentaje mínimo VMA		
		Porcentaje de diseño de vacíos de aire		
mm	in	3	4	5
1.18	N16	21.5	22.5	23.5
2.36	N8	19	20	21
4.75	N6	16	17	18
9.5	3/8	14	15	16
12.5	1/2	13	14	15
19	3/4	12	13	14
25	1	11	12	13
37.5	1 1/2	10	11	12

<sup>a</sup>Recuperado de: ASTM D3515. (2013). *Standard Specification for Hot-Mixed, Hot-Laid Bituminous Paving Mixtures. United States of America.*

### 2.3.2 Procedimiento del ensayo

Dentro de la metodología Marshall existen tres procedimientos a seguir:

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

#### Determinación de la gravedad específica total

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

#### Análisis de la densidad y el contenido de vacíos

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

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



(Pincay Bermello et al., 2018).

Utilizando el promedio de las gravedades específicas netas de la mezclas compactadas, la gravedad específica efectiva total del agregado, la gravedad específica del asfalto, y los diferentes porcentajes de asfalto usados, se determina el porcentaje de vacíos ( $V_a$ ); el porcentaje de vacíos llenados con asfalto ( $VFA$ ) y el porcentaje de vacíos del agregado mineral ( $VMA$ ) (Garnica Anguas et al., 2004).

## Determinación de la Estabilidad y Flujo Marshall

El ensayo de estabilidad se ejecuta con el fin de medir la resistencia a la deformación de la mezcla y se expresa en unidades de fuerza (lb o kg). El valor del flujo es la deformación que va a sufrir la muestra al medir su estabilidad, se expresa en unidades de 0.25 mm o en unidades de 0.01 in (Pincay Bermello et al., 2018). El proceso se realiza conforme a la norma ASTM D-1559.

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

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

Mientras se realiza la prueba de estabilidad, un deformímetro debe medir el flujo del espécimen, cuando la carga empiece a disminuir habrá que tomar la lectura y registrarla como el Flujo del espécimen (Garnica Anguas et al., 2004).

### 2.3.3 Porcentaje Óptimo de Asfalto

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

## 2.4 Método del polígono de vacíos

### 2.4.1 Definición

Según Sánchez et al. (2011) el método del polígono de vacíos es una herramienta analítica, usada para encontrar el contenido óptimo de ligante para el diseño de una mezcla asfáltica en caliente (HMA - Hot Mixture Asphalt), en base a las especificaciones de vacíos ( $V_a$ ,  $VMA$ , y  $VFA$ ). Los valores correspondientes a estas especificaciones se encuentran en las Tablas 2.10 y 2.11, las mismas que pertenecen a la norma ASTM D 3515 (2013). Esta metodología basa en aplicar al diseño de HMA, las relaciones volumétricas y gravimétricas, originarias de la mecánica de suelos. Los valores de vacíos están en función de la cantidad de asfalto presente en la mezcla ( $P_b$ ), expresado como porcentaje y la gravedad específica neta de la misma mezcla ( $G_{mb}$ ).

El polígono formado está delimitado por las intersecciones entre las isolíneas trazadas en la gráfica ( $P_b$  vs  $G_{mb}$ ) usando los valores de vacíos especificados (Delgado Alamilla et al., 2006). Cualquier punto, dentro del polígono establecido, que represente a una combinación entre el contenido de asfalto y la gravedad específica neta de la mezcla, estará cumpliendo al mismo tiempo con todas las especificaciones de vacíos (Sánchez et al., 2011).

### 2.4.2 Ecuaciones del método

Las expresiones para la gráfica de isolíneas se presentan a continuación:

**Isolíneas de vacíos de aire ( $V_a$ ):** La expresión utilizada está definida por la ecuación 2.4.

$$G_{mb} = \frac{1 - V_a}{\frac{P_b}{G_b} + \frac{1-P_b}{G_{se}}} \quad (2.4)$$

**Isolíneas de vacíos en el agregado mineral ( $VMA$ ):** Estas isolíneas son graficadas por medio de la ecuación 2.5.

$$G_{mb} = \frac{1 - VMA}{1 - P_b} G_{sb} \quad (2.5)$$

**Isolíneas de vacíos llenos de asfalto ( $VFA$ ):**

$$G_{mb} = \frac{VFA}{\frac{P_b}{G_b} + \frac{1-P_b}{G_{se}} - (1 - VFA)\frac{1-P_b}{G_{sb}}} \quad (2.6)$$



Donde :

$G_{mb}$  = Gravedad específica neta de la mezcla.

$P_b$  = Porcentaje de cemento asfáltico con respecto a la masa total de la mezcla.

$V_a$  = Porcentaje de vacíos de aire.

$VMA$  = Vacíos del agregado mineral.

$VFA$  = Vacíos de aire llenos de asfalto

$G_{se}$  = Gravedad específica efectiva del agregado.

$G_{sb}$  = Gravedad específica neta del agregado.

$G_b$  = Gravedad específica del betún.

### 2.4.3 Interpretación de resultados del método

El resultado que se obtiene del método mediante su gráfica es un punto, el cual tiene coordenadas en ambos ejes, que nos proporcionan un valor para el contenido de asfalto en porcentaje y un valor de gravedad específica neta de la mezcla. Estos datos permiten obtener los porcentajes de vacíos ( $V_a$ ,  $VMA$ , y  $VFA$ ) de la mezcla diseñada por medio de esta metodología, a través de las siguientes ecuaciones:

$$V_a = 1 - G_{mb} \left( \frac{P_{b,opt}}{G_b} + \frac{1 - P_{b,opt}}{G_{se}} \right) \quad (2.7)$$

$$VMA = 1 - \frac{G_{mb}(1 - P_{b,opt})}{G_{sb}} \quad (2.8)$$

$$VFA = \frac{VMA - V_a}{VMA} \quad (2.9)$$

Donde :

$G_{mb}$  = Gravedad específica neta de la mezcla.

$P_b$  = Porcentaje de cemento asfáltico con respecto a la masa total de la mezcla.

$V_a$  = Porcentaje de vacíos de aire.

$VMA$  = Vacíos del agregado mineral.

$VFA$  = Vacíos de aire llenos de asfalto

$G_{se}$  = Gravedad específica efectiva del agregado.

$G_{sb}$  = Gravedad específica neta del agregado.

$G_b$  = Gravedad específica del betún.

# Capítulo 3

## Materiales y Metodología

Este capítulo presenta como primer punto, el lugar de origen de los agregados que fueron empleados para la fabricación de las mezclas asfálticas; se da conocer brevemente las formaciones geológicas donde se encuentran cada una de las minas de donde se extrajeron los materiales. Posteriormente se indican los ensayos necesarios para la caracterización de los agregados, y las normas que describen cada ensayo. Y por último, se presentan los dos métodos analizados en el diseño de mezclas asfálticas.

### 3.1 Agregados

#### 3.1.1 Agregado fino y agregado grueso, porción que pasa del tamiz 3/8"

El agregado fino, dentro de su composición contiene dos partes de polvo y una parte de arena. El polvo es el material que pasa el tamiz N° 200, por otra parte la arena corresponde al agregado pasante del tamiz N°4. Estos materiales provienen de la mina Vipesa Cia Ltda, empresa que se ubica en la autopista Cuenca-Azogues Km 17 1/2, sector El Descanso, en el Cantón Azogues, Provincia del Cañar.

Esta mina está asentada sobre las formaciones del grupo Turi y el grupo Azogues como se muestra en el mapa geológico de la Figura 3.1. Según Velez Dávila (2012) la formación Turi tiene un espesor de 200 metros, que consta de arcillas, arenas, tobas y brechas bien estratificadas, además el autor encuentra que esta formación pertenece a la edad del Mioceno-Tardío. Por otro lado en la misma investigación se muestra que la formación Azogues cuenta con un espesor de aproximadamente 600 metros, la misma que está afectada por deformaciones post-sedimentación, lo que genera una formación plegada. Esta formación plegada presenta una secuencia sedimentaria de rocas clásticas, areniscas tobáceas de grano medio a grueso, también están presentes lutitas y limolitas en capas. Las mismas que pertenecen a la misma edad que la formación anteriormente mencionada.

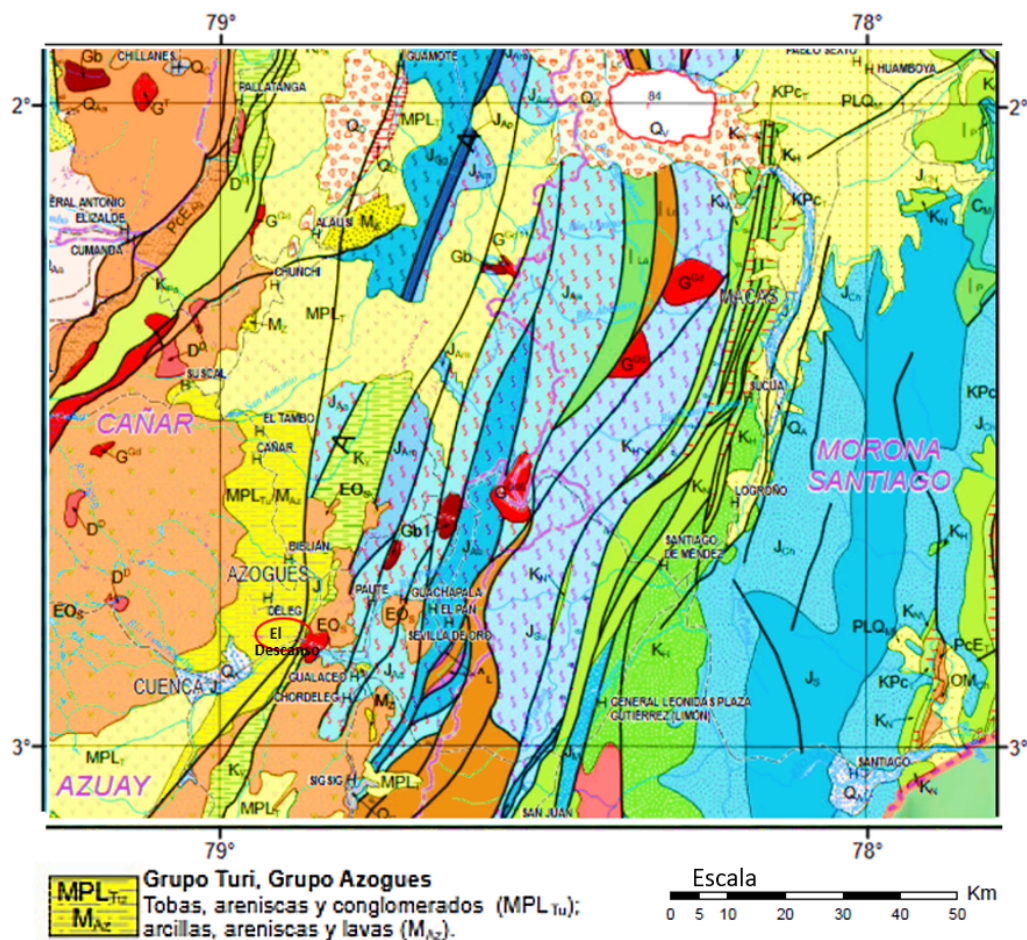


Figura 3.1: Mapa geológico que abarca al sector El descanso. Recuperado de: Mapa Geológico de la República del Ecuador, por A. Egúez et al., 2017, Ecuador.

### 3.1.2 Agregado grueso, material que pasa del tamiz 3/4”

El agregado utilizado dentro de la combinación de agregados que corresponde al material que pasa el tamiz 3/4”, es proveniente de la mina de propiedad de Áridos del Austro Arideaus Cia. Ltda. Esta empresa está ubicada en la vía Guachapala km. s/n, en del cantón Guachapala, aproximadamente a 50 km al noreste de Cuenca, dentro de la provincia del Azuay.

La mina se ubica sobre una de las cuatro unidades que conforman el terreno tectonoestratigráfico Alao, que comprende rocas metavolcánicas y metasedimentarias. La unidad El Pan, que se muestra en la Figura 3.2, según Verdezoto (2006) se desarrolla como un cinturón de alrededor 70 km de longitud y 7 km de ancho, está constituida por facies volcanosedimentarias como esquistos verdes, esquistos graníticos y filitas cuarzo-sericita. El mismo autor señala que la edad aproximada de esta unidad es Jurásico medio a Cretácico temprano con base en la identificación de esporas.

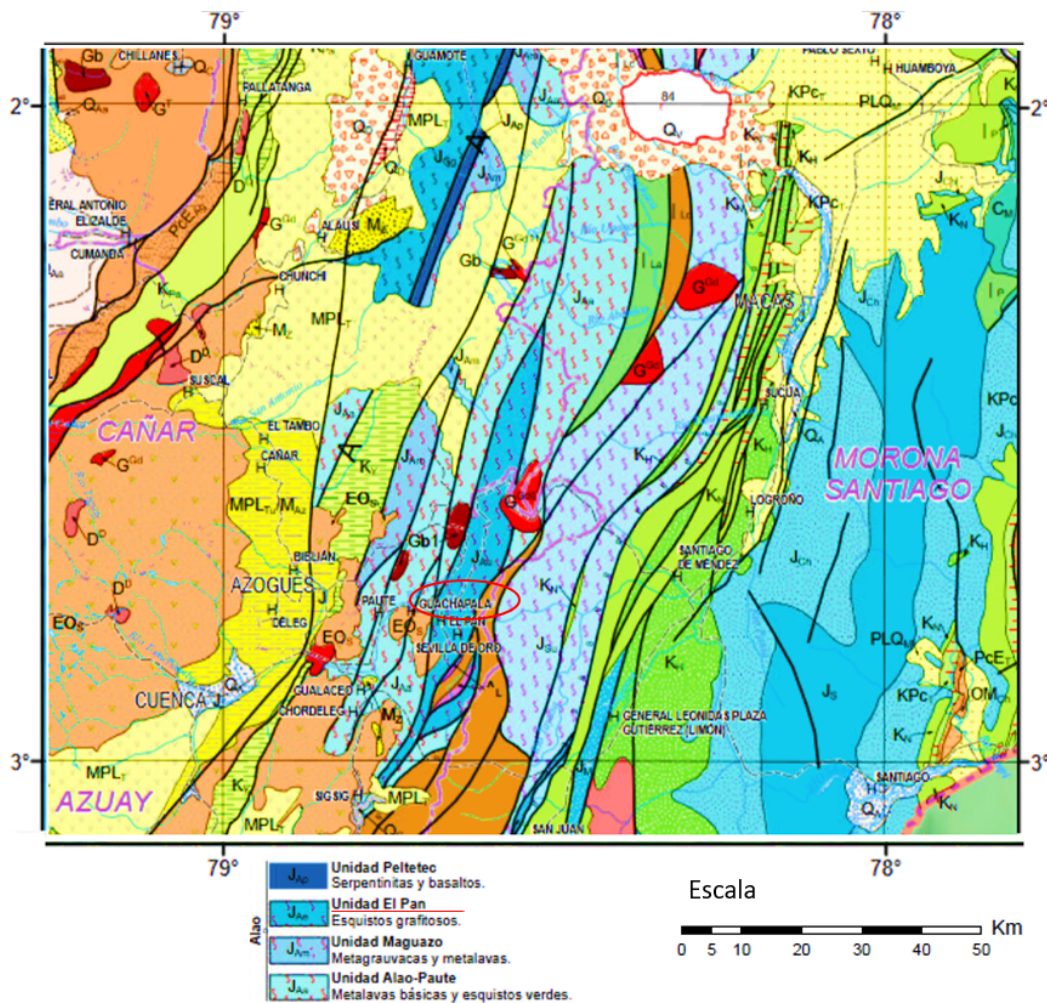


Figura 3.2: Mapa geológico que abarca al cantón Guachapala. Recuperado de: Mapa Geológico de la República del Ecuador, por A. Egúez et al., 2017, Ecuador.

## 3.2 Ensayos y Normas de los materiales granulales

A continuación, se describen los ensayos necesarios para la caracterización de agregados, así como también las normas que describen estos ensayos:

- **Granulometría en los áridos, grueso y fino**

**Norma:** INEN 696 (2011).

Este ensayo determina la distribución granulométrica del agregado, por tamizado. Para realizar el ensayo es necesario que la muestra se encuentre en condición seca, el tamaño de la muestra a ensayarse dependerá del tamaño nominal máximo del agregado, para el caso del agregado grueso, y para el agregado fino la muestra debe ser mayor a 300 g. Se seleccionan los tamices necesarios y adecuados que cubran los tamaños de partículas del material a ensayarse, con el propósito de obtener la información requerida en las especificaciones, y se ordenan los tamices de forma decreciente según el tamaño de su abertura. Se agitan los tamices manualmente o

por medios mecánicos, por un periodo de tiempo tal, que después de la finalización, no más del 1 % en masa del material retenido en cualquier tamiz individual pase el tamiz durante un minuto de tamizado manual continuo. Se pesa el material retenido en cada tamiz. Por cuarteo, se pesa el material del fondo alrededor de 800 a 1000 g y se toma la lectura del peso, luego se lava el material sobre el tamiz N°200, hasta que la arena quede limpia, finalmente, se seca y pesa el material. En la Figura 3.3 se observan los tamices para el desarrollo de granulometría en agregado grueso y las fracciones separadas después del proceso de tamizado .

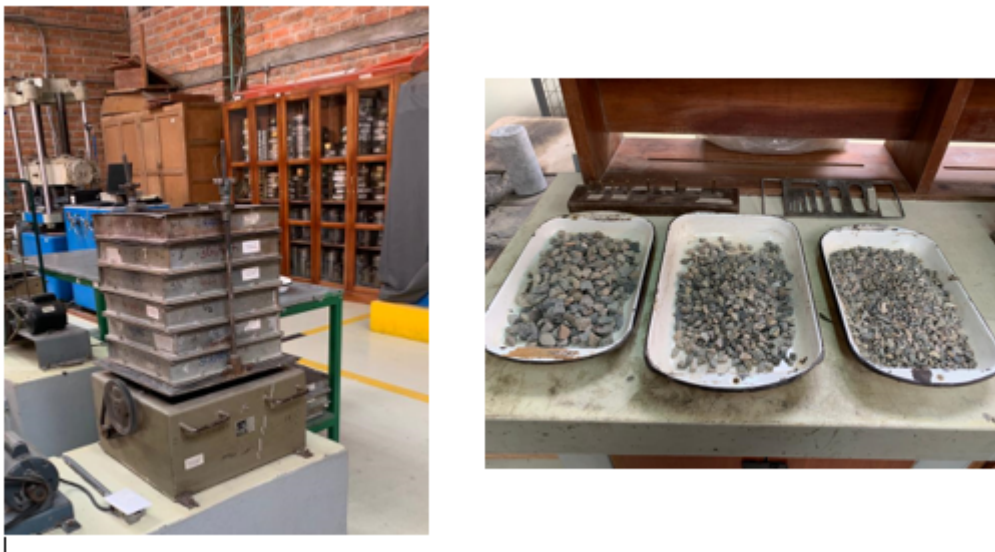


Figura 3.3: Ensayo granulometría en agregados.

### 3.2.1 Ensayos en Agregado Grueso

- **Durabilidad al sulfato de sodio o magnesio**

**Normas:** INEN 863 (2011)/ ASTM C 88 (2013) / AASHTO T 104 (2003).

Este ensayo busca estimar, por medio de soluciones saturadas con sulfato de sodio y con sulfato de magnesio, el desempeño de los áridos cuando están sujetos a la acción de la intemperie. La fuerza expansiva interna derivada de la rehidratación de la sal, simula la expansión del agua al congelarse en el interior de los poros del árido. El ensayo consiste en preparar una solución de sulfato de sodio y magnesio y dejar que repose por 48 horas a una temperatura de  $21 \pm 1^\circ\text{C}$ . El árido grueso debe ser lavado, secado y separado en fracciones como se indica en la Figura 3.4, en las cantidades que indica la norma. Se coloca en recipientes cada muestra y se sumerge la misma en la solución preparada durante un periodo no menor a 16 horas ni mayor de 18 horas, a una temperatura de  $21^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ , luego la muestra debe ser secada y pesada. Este ciclo debe repetirse por 5 veces, y después las fracciones deben ser lavadas y secadas para determinar su peso final y así obtener el porcentaje de desgaste del agregado.



Figura 3.4: Ensayo de durabilidad al sulfato de magnesio.

- **Abrasión de la máquina de los ángeles**

**Normas:** INEN 860 (2011)/ ASTM C 131 (2001) / AASHTO T 96 (2002).

La muestra de agregado para este ensayo consta de 5000 g, distribuidos como se especifica en la Tabla 2 de la norma INEN 680, con base al tipo de gradación que mejor represente al material; la muestra debe ser lavada y secada al horno, hasta obtener una masa constante. Mediante el uso de un tambor giratorio, en cuyo interior, se encuentra un número específico de esferas de acero, según la tabla 1 de la misma norma, cuya masa está entre 391 y 445 g, que producen desgaste al agregado mineral y después de 500 revoluciones a 30-33 r/min el material extraído de la máquina, como se observa en la Figura 3.5, debe ser lavado sobre el tamiz N° 12, posteriormente, secarlo al horno y registrar la masa final de los agregados. De esta manera se determina el porcentaje de pérdida de masa en el material, producido por el desgaste.



Figura 3.5: Ensayo de la máquina de los ángeles.

- **Índice de durabilidad**

**Normas:** ASTM D 3744 (1997)/ AASHTO T 210 (2015).

Este ensayo es propuesto para materiales destinados a la construcción de vías, determina la resistencia que tienen los agregados, a generar finos cuando son agitados en la presencia de agua. El peso de la muestra depende de los límites inferior y



superior de los agregados. La muestra del agregado, después de ser secada al horno, es lavada en un vaso mecánico, con agua destilada, por 2 min, posterior al primer lavado se descarta la porción del material que pasa el tamiz N°4, la muestra es lavada y secada previamente, para ser agitada en el vaso mecánico de lavado, por un lapso de tiempo de 10 min. Posteriormente el agua resultante del segundo lavado junto con la porción de la muestra que pasa el tamiz N°200, se depositan en una solución de cloruro de calcio dentro de un cilindro plástico y después de un reposo de 20 min, se procede a leer la altura de la columna del material sedimentado, este dato, permite calcular el índice de durabilidad del agregado grueso. Este ensayo no se pudo llevar a cabo durante este trabajo de titulación por falta de equipo, en este caso, el vaso mecánico de lavado.

- **Partículas chatas y alargadas**

**Normas:** ASTM D 4791 (2010)/ INVE 230 (2007).

Esta norma describe el procedimiento a seguir para determinar los índices de aplanamiento y de alargamiento de los agregados empleados. Para el desarrollo del ensayo, se debe realizar dos operaciones sucesivas de tamizado; primero se divide la muestra en fracciones, y luego usando el calibrador de alargamiento, que se observa en la Figura 3.6, se separan las partículas largas de cada fracción. Con estas partículas largas, se verifica si también son planas, usando los tamices de barras paralelas. Por último, se determina que porcentaje del total de la muestra son partículas planas y alargadas.



Figura 3.6: Ensayo de partículas chatas y alargadas.

- **Caras fracturadas**

**Normas:** ASTM D 5821 (2013)/ INVE 227 (2007).

Esta norma describe el procedimiento a seguir para determinar el porcentaje en masa, de partículas con una o más caras fracturadas presentes en una muestra de agregado grueso. El tamaño de la muestra a ensayar dependerá del tamaño máximo nominal de la misma y el agregado debe estar seco. Para verificar que una partícula cumpla con el criterio de fractura, se debe observar como se indica en la Figura 3.6,

que al menos un cuarto de la mayor sección transversal de la partícula tenga una superficie áspera, angular o quebrada.



Figura 3.7: Ensayo de caras fracturadas.

- **Sales solubles totales en agregados**

**Normas** INVE 158 (2007).

Con el tamaño del agregado definido, se establece el peso de la muestra a ensayarse y el volumen de agua mínimo para el aforo; esta muestra debe ser secada al horno, hasta alcanzar masa constante, posteriormente, es sometida a lavados continuos en un vaso de precipitado, cubierta de agua desmineralizada a una temperatura de ebullición, se debe agitar cuatro veces durante 1 minuto y se separa el líquido sobrenadante a otro recipiente, este líquido es separado en dos partes para ensayar con dos reactivos diferentes, nitrato de plata, para determinar la presencia de cloruros y cloruro de bario, para conocer si hay presencia de sulfatos. El proceso de agitación y decantación se repite hasta que ya no exista presencia de sales. Al final se debe tomar un volumen de los líquidos sobrenadante, para ser cristalizado en el horno hasta masa constante. Este ensayo no se logró desarrollar por falta de reactivos.

- **Porcentaje de absorción y gravedad específica**

**Normas:** INEN 857 (2010)/ ASTM C 127 (1993) / AASHTO T 85 (2014).

Esta norma describe el procedimiento para determinar la densidad media de una cantidad de partículas de agregado grueso (no incluye el volumen de vacíos entre partículas), la densidad relativa o gravedad específica, y la absorción del agregado grueso. Para esto es necesario que el material se encuentre en condiciones SSS (Saturado Superficialmente Seco) para lo cual, se deja el material sumergido en agua por 24 horas y luego se seca la piedra hasta que esta pierda su brillo metálico, y se registra el peso de la muestra en condición SSS, posteriormente se llena el picnómetro hasta enrasarlo con agua, como se indica en la Figura 3.8, y se determina este peso, es necesario tener ya calibrado el picnómetro previamente. Una vez determinado este peso, se coloca el material a secar para determinar su peso seco.



Figura 3.8: Ensayo de absorción y gravedad específica.

- **Adherencia**

**Normas INVE 740 (2007).**

Esta norma describe el procedimiento para determinar el porcentaje de adherencia entre un ligante bituminoso y una muestra representativa del agregado grueso. Para esto se toman 50 partículas representativas del agregado grueso y se secan al horno a  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ . En una bandeja limpia y seca se vierte ligante bituminoso hasta obtener una película de un espesor de 1.5 mm a 2 mm, y se deja enfriar a una temperatura entre  $50^{\circ}\text{C}$  y  $60^{\circ}\text{C}$ , se colocan, una por una las 50 partículas distribuidas en la superficie bituminosa como se observa en la Figura 3.9 y se coloca la bandeja en el horno a  $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas, luego se agrega agua destilada hasta cubrir todas las partículas y se deja la bandeja a temperatura ambiente por 4 días. Por último, se retiran las partículas una por una, manualmente o con la ayuda de un playo y se evalúa el porcentaje de superficie de cada partícula que aún tiene asfalto adherido.



Figura 3.9: Ensayo de adherencia en agregado grueso.

### 3.2.2 Ensayos en Agregado fino

- **Equivalente de arena**

**Normas:** ASTM D 2419 (2002) / AASHTO T 176 (2007).

Mediante esta norma se evalúa la porción de polvo fino o material arcillo dentro del agregado fino; a la muestra de aproximadamente 1500 g de material pasante el tamiz N°4 en un cilindro, se sumerge en una solución floculante con la ayuda de un sifón, después de un reposo de 10 min agitarlo y de esa manera el material arcilloso se desprenderá de la superficie de los agregados, se adiciona una cantidad extra de solución floculante, a manera de irrigación, para lavar el material de las paredes, después de 20 min en reposo, se toma lectura de la altura de arcilla en suspensión y para determinar la altura de la arena se introduce en el cilindro el equipo de disco, varilla y sobrepeso, con estos datos se determina la relación entre la altura de arena y la altura de arena en suspensión. Por falta de floculante y equipos para el desarrollo de este ensayo no pudo ser llevado a cabo.

- **Angularidad en el agregado fino**

**Normas:** ASTM C 1252 (2003)/ AASHTO T 304 (2007) / INVE 740 (2007).

Esta norma describe el procedimiento para determinar el contenido de vacíos de una muestra de agregado fino suelto, no compactado. El contenido de vacíos medido ofrece una medida de la angularidad del agregado, la esfericidad y la textura de superficie comparado con otros agregados finos probados bajo las mismas condiciones. El ensayo consiste en mezclar en material a ensayar con la espátula hasta mostrarse de forma homogénea, colocar el frasco y la sección de embudo y centrar la medida cilíndrica, luego colocar la muestra en el embudo y nivelar el material con la espátula. Se deja que la muestra caiga libremente y se registra la masa del medidor, se recogen todas las partículas de agregado fino para una segunda prueba. No fue posible realizar este ensayo debido a la falta del equipo en el laboratorio.

- **Adhesividad (Riedel Weber)**

**Normas:** INVE 774 (2007)/ NLT 355 (1993).

Una muestra de 200 g de agregado fino que este retenido entre los tamices N°30 y N°70, es lavado y secado al horno, hasta masa constante; la mezcla es preparada con un 29% de ligante asfáltico, se divide la mezcla en 11 porciones de 0.05 g en tubos de ensayo numerados del 0 al 10, en los cuales se irá agregando solución de carbonato sódico con concentraciones crecientes, cada tubo de ensayo es calentado hasta una breve ebullición, una vez en este punto deben ser agitados y observar si el ligante asfáltico se desprendió por completo del agregado, de forma parcial o no se desprendió. El número del tubo de ensayo de menor concentración con la que el ligante se desprende e forma parcial corresponde al índice de adhesividad. En la Figura 3.10 se presenta el proceso para el ensayo de adhesividad en agregados finos.



Figura 3.10: Procedimiento ensayo de adhesividad.

- **Indice de durabilidad**

**Normas:** ASTM D 3744 (1997) / AASHTO T 210 (2015).

Este ensayo es desarrollado bajo las mismas normas que se desarrolla el ensayo para agregado grueso y de igual manera cumple el mismo propósito. Una muestra de peso de 500 g del agregado fino, es lavada en un vaso mecánico, con agua destilada, por 2 min, posteriormente mediante proceso de lavado se descarta la porción del material que pasa el tamiz N°200, y el resto de la muestra es secada hasta masa constante, ahora la muestra de agregado fino, es ensayada según la norma de “Equivalente de Arena”, dentro de este proceso se cambia el tiempo de duración de la agitación, que en lugar de 45 segundos, será de 10 min, de esa manera el ensayo permite calcular el índice de durabilidad del agregado fino.

- **Porcentaje de absorción y gravedad específica**

**Normas:** INEN 856 (2010)/ ASTM C 128 (2007) / AASHTO T 84 (1984).

Mediante estas normas se obtiene la densidad promedio de una cantidad de árido fino (no incluye el volumen de vacíos entre partículas), la densidad relativa y la absorción del agregado. Para el desarrollo de este ensayo la muestra debe encontrarse en condición SSS (Saturado Superficialmente Seco) para llegar a ello, el material debe ser sumergido en agua por 24 horas y luego secado con la ayuda de un secador mecánico o la estufa de manera que se pierda la humedad superficial, para saber que el material se encuentra en esta condición se comprueba con un molde de cono truncado, pisonando la muestra dentro, cuando solo se desmorona una parte del agregado, entonces se encuentra en condición SSS. Se coloca el material en el picnómetro y se lo llena con agua hasta enzararlo, se registra este peso, es necesario tener ya calibrado el picnómetro previamente; finalmente, se seca el material hasta peso constante para determinar su peso seco. En la Figura 3.12 se muestra la condición saturada superficialmente seca del agregado fino.



Figura 3.11: Condición saturada superficialmente seca del agregado fino.

- **Índice de Plasticidad (Malla N°40 y Malla N°200)**

El índice de plasticidad de un material se lo obtiene por medio de la resta del límite líquido menos el límite plástico. A continuación se describe el proceso para la determinación de estos dos valores.

### **Límite líquido**

**Norma:** INEN 691 (2005).

Mediante el uso de la herramienta de la cuchara de casagrande, se logra realizar este ensayo con el cual se determina el contenido de agua del suelo, cuando este se encuentra en el límite entre su comportamiento líquido y su comportamiento plástico. La muestra utilizada debe ser una pasta moldeable completamente homogénea del material que pasa el tamiz N° 40. En la superficie de la copa, con la ayuda de una espátula, se extiende una porción de la muestra, cuidando que la sección sea máximo de 10 mm. Con el uso del acanalador, trazar un canal en la mitad de la pasta hasta que se observe el fondo de la copa. Se gira el manubrio de la copa a un velocidad de 2 revoluciones por minuto y se registra el número necesario de golpes para que las dos partes de la muestra de suelo se unan en la mitad de a copa en una distancia continua de aproximadamente 10 mm. Se repite el proceso al menos 4 veces, aumentando la cantidad de agua en la muestra, de manera que, esta se torne más fluida. Este procedimiento debe realizarse de forma que el número de golpes estén distribuidos entre 45 y 5 golpes. Cada contenido de agua debe ser registrado junto con el número de golpes. Los datos se registran en una gráfica semilogarítmica, trazando una línea recta que más se aproxime a los cuatro puntos. El valor del límite líquido corresponde al contenido de agua correspondiente a la intersección con los 25 golpes.



Figura 3.12: Límite líquido en agregado fino.

### Límite plástico

**Normas:** INEN 692 (2005) / ASTM D 4318 (2000).

Este método describe el ensayo para la determinación de los límites de consistencia o también conocidos Límites de Atterberg, pero la Normativa Ecuatoriana NEVI-12 indica que solo se debe evaluar el índice de plasticidad en material que pase la malla N°40 y otra muestra que pase la malla N°200. Se necesitan 200 g de material que serán mezclados completamente con agua sobre una placa de vidrio usando la espátula, enrollar la muestra con la palma de la mano sobre la superficie de vidrio hasta lograr formar un hilo de 3 mm de diámetro, como se indica en la Figura 3.13, una vez que este se consiga, pesar algunos de los pedazos en estado húmedo, en diferentes taras y secar para obtener el porcentaje de humedad.



Figura 3.13: Límite plástico en el agregado fino.

### 3.3 Obtención de la gravedad específica efectiva de los agregados ( $G_{se}$ )

Uno de los parámetros principales dentro de la metodología de vacíos es la gravedad específica efectiva del agregado, esta se obtiene a partir del cálculo de la gravedad específica teórica máxima de la mezcla ( $G_{mm}$ ), como se evidencia en la ecuación 2.3. Existen dos maneras de determinar la gravedad específica teórica máxima de la mezcla. Una manera práctica mediante la realización del ensayo RICE, y una forma teórica. Las dos son explicadas a continuación.

El volumen de asfalto absorbido por los agregados es casi invariablemente menor que el volumen de agua absorbida, por lo cual, el valor de la gravedad específica efectiva de un agregado debe estar entre su gravedad específica neta y su gravedad específica aparente (Garnica Anguas et al., 2004). Es necesario mencionar que la gravedad específica efectiva del agregado es constante, puesto que la absorción de asfalto no varía en mayor medida con los cambios del contenido de asfalto.

#### 3.3.1 Método volumétrico para la determinación de la gravedad específica teórica máxima (Ensayo RICE)

**Norma:** ASTM D 2041 (2000).

El peso de la muestra para este ensayo depende del tamaño nominal del agregado empleado en la mezcla, tomando en cuenta que la muestra no sea mayor que la capacidad del recipiente a ser usada en el ensayo. La mezcla debe encontrarse a temperatura ambiente y ser disgregada antes de ser ensayada (Figura 3.14), tomando en cuenta no romper las partículas de agregado, en el caso de que no sea posible separar las partículas de manera manual, la mezcla puede ser ligeramente calentada.



Figura 3.14: Muestra de la mezcla disgregada.



Se coloca la muestra dentro del recipiente y posteriormente se cubre la muestra con suficiente agua, a una temperatura de 25 °C, como se muestra en la Figura 3.15.



Figura 3.15: Muestra cubierta de agua.

Para remover el aire atrapado en la mezcla dentro del recipiente se aplica vacío hasta que el valor de la presión residual sea máximo de 30 mm Hg; este procedimiento se realiza mediante la vibración y una bomba de vacío (Figura 3.16), durante un periodo de tiempo de 30 min.



Figura 3.16: Aplicación de vacío.

Una vez que se ha terminado el tiempo de vibración de la mezcla se llena el recipiente con agua a una temperatura de 25 °C, debe ser colocada de manera que

se evite el ingreso de aire, y una vez lleno el recipiente se enrasa el mismo con la ayuda de un vidrio, para asegurar que no existan burbujas de aire, como se muestra en la Figura 3.17. Es necesario registrar este peso.



Figura 3.17: Recipiente enrasado con agua.

La gravedad específica teórica máxima ( $G_{mm}$ ) se obtiene mediante la ecuación 3.1:

$$G_{mm} = \frac{B}{(B + A - C)} \quad (3.1)$$

Donde:

$A$  = Peso del recipiente enrasado con agua a 25 °C.

$B$  = Peso de la mezcla empleado en el ensayo.

$C$  = Peso del recipiente, la mezcla y agua enrasado a 25 °C; después del ensayo.

### 3.3.2 Método teórico para la determinación de la gravedad específica teórica máxima

**Normas:** NLT 168 (1990).

Dentro de la normativa, se explica que la densidad máxima teórica de las mezclas compactadas, se calcula dicha densidad mediante la ecuación 3.2:

$$G_{mm} = \frac{100}{\frac{P_1}{G_{sa1}} + \frac{P_2}{G_{sa2}} + \dots + \frac{P_b}{G_b}} \quad (3.2)$$

Donde :

$G_{mm}$  = Gravedad Específica máxima de la mezcla.

$G_{sa1}$  = Gravedad Específica Aparente del Agregado 1.

$G_{sa2}$  = Gravedad Específica Aparente del Agregado 2.

$P_b$  = Porcentaje de asfalto presente en la mezcla.

$G_b$  = Gravedad Específica del asfalto.

## 3.4 Método de Diseño Marshall

### 3.4.1 Elaboración de briquetas

**Norma:** (ASTM D 1559, 1976).

Esta norma establece el procedimiento que se debe llevar a cabo para la elaboración de briquetas de mezclas asfálticas en caliente. Primero, es necesario tener en consideración las diferentes dosificaciones de los áridos, tomando en cuenta el porcentaje de cemento asfáltico a utilizarse en la mezcla. En la Figura 3.18 se muestra la elaboración de la mezcla asfáltica.



Figura 3.18: Preparación de áridos y asfalto para la elaboración de las briquetas.

Es necesario que los agregados ensayados se encuentren libres de humedad, por lo cual, se deja previamente en el horno a una temperatura de 190 °C, también se debe calentar el betún asfáltico a una temperatura de 120 a 137 °C. Una vez alcanzadas estas temperaturas se mezcla los áridos y el asfalto a una temperatura óptima cercana a 135 °C, hasta que el ligante asfáltico cubra toda la superficie del material pétreo como se muestra en la Figura 3.19 y evitando que la temperatura de la mezcla sea inferior a los 120 °C.



Figura 3.19: Mezcla de Áridos y Asfalto para la elaboración de las Brietas.

Se deben limpiar y calentar los moldes de compactación a una temperatura entre 95 y 150 °C, y cuando estén listos se coloca el molde sobre una mesa y se sitúa en el fondo un papel filtro. Se coloca la mezcla en el interior del molde, y se colocan aproximadamente 1200 g de mezcla caliente y se acomoda la mezcla introduciendo una varilla caliente 25 veces formando una espiral de adentro hacia afuera como se evidencia en la Figura 3.20.



Figura 3.20: Colocación de la mezcla en el molde.

Una vez colocada la mezcla dentro del molde de compactación, se alisa la superficie, luego con el martillo de compactación sostenido de forma vertical se aplican 75 golpes como se observa en la Figura 3.21 para un tráfico pesado. El número de golpes dependerá el tráfico de diseño según lo establece la normativa (ASTM D 3515, 2013). Al compactarse un lado de la briqueta se retira el collar de extensión y

se invierte el molde, se vuelve a colocar el collar de extensión y luego se aplican la misma cantidad de golpes al otro lado de la briqueta y por último se dejan enfriar las briquetas y se extraen las briquetas del molde.



Figura 3.21: Compactación de la mezcla en el molde.

### 3.4.2 Determinación del peso específico bulk

**Norma:** ASTM D 2726 (2000).

Una vez que las briquetas recién compactadas se hayan enfriado a temperatura ambiente, se pesan las briquetas al aire y luego se sumergen en agua a una temperatura de 25 °C durante un intervalo de 30 minutos, y después de transcurrido este tiempo se secan superficialmente las briquetas y se pesan las mismas en condición saturadas superficialmente secas; por último se toma el peso sumergido de cada una de las briqueta (Figura 3.22).



Figura 3.22: Determinación del peso específico bulk en briquetas.

### 3.4.3 Estabilidad y Flujo

**Norma:** (ASTM D 1559, 1976).

Una vez elaboradas las briquetas de mezclas asfálticas y ya determinado el peso específico bulk, se puede obtener los valores de estabilidad y flujo.

Se deben sumergir las briquetas en baño María a una temperatura de 60°C, durante un intervalo de 30 min. Para que todas las briquetas cumplan con el tiempo exacto, se ingresa una a una cada briqueta y con un intervalo de 5 minutos de tiempo entre cada una. Una vez transcurrido los 30 min de la primera briqueta, se seca superficialmente la briqueta y se ubica la misma en la mordaza de la prensa Marshall.

Estos ensayos fueron realizados en el laboratorio de la Prefectura del Azuay con los equipos presentados en la Figura 3.23, dado que los equipos del laboratorio de la Universidad no estaban en funcionamiento.



Figura 3.23: Determinación del peso específico bulk en briquetas.

La máquina de Marshall presenta en forma digital el valor de la estabilidad máxima a la que llega cada briqueta, este resultado se expresa en libras, y el medidor del flujo, se encuentra en centésimas de pulgadas (1/100 in). Se presentan ejemplos de los resultados obtenidos en la Figura 3.24.

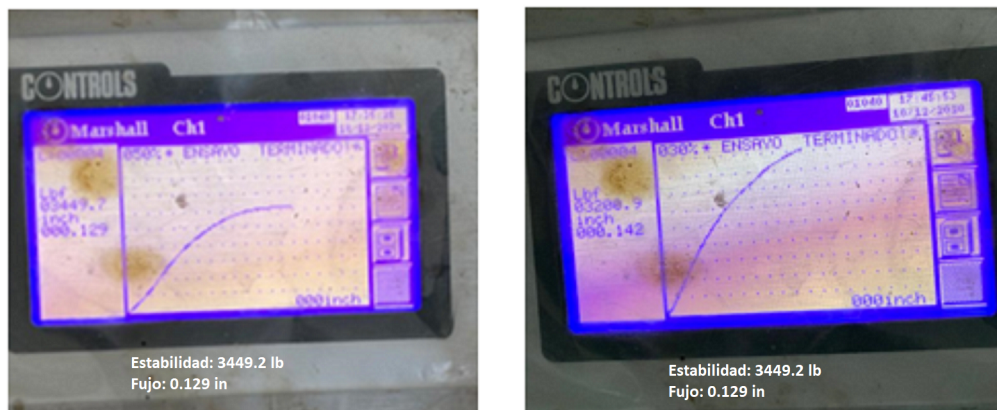


Figura 3.24: Lectura de medidores de estabilidad y flujo.

### 3.4.4 Corrección de la estabilidad por volumen

Los datos obtenidos de estabilidad para cada una de las briquetas, son afectados por un factor de corrección que depende únicamente del rango de volumen, en el que se encuentra cada una de las briquetas, este factor se obtiene de la Tabla 3.1.

 Tabla 3.1: Factor de corrección de estabilidad por volumen<sup>a</sup>

Volumen de la muestra(cm3)		Factor de Corrección	Volumen de la muestra(cm3)		Factor de Corrección
200	213	5.56	421	431	1.39
214	225	5.00	432	443	1.32
226	237	4.55	444	456	1.25
238	250	4.17	457	470	1.19
251	264	3.85	471	482	1.14
265	276	3.57	483	495	1.09
277	289	3.33	496	508	1.04
290	301	3.03	509	522	1.00
302	316	2.78	523	535	0.96
317	328	2.50	536	546	0.93
329	340	2.27	547	559	0.89
341	353	2.08	560	573	0.86
354	367	1.92	574	585	0.83
368	379	1.79	586	598	0.81
380	392	1.67	599	610	0.78
393	405	1.56	611	625	0.76
406	420	1.47			

<sup>a</sup>Recuperado de: ASTM D1559. (1982). Test Method for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus. United States of America.

En base a los valores que se muestran en la Tabla 3.1 se ha determinado una línea de tendencia, y se pudo obtener una ecuación para determinar el factor de

corrección en función del volumen de la briqueta, esta ecuación se presenta en la Figura 3.25.

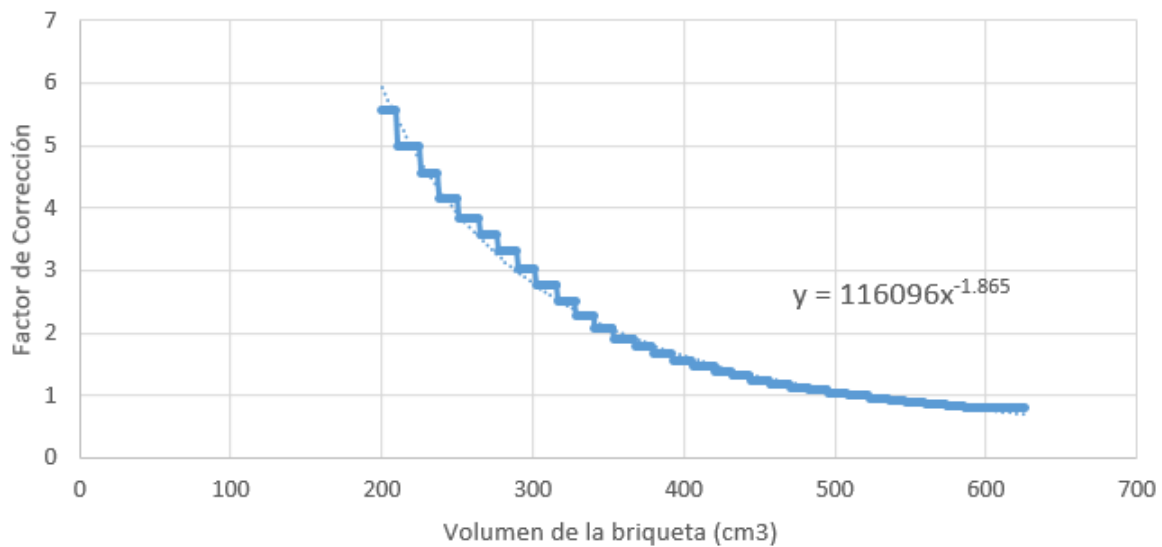


Figura 3.25: Tendencia del factor de corrección por volumen.

### 3.5 Método de diseño del polígono de vacíos

Según Pincay Bermello et al. (2018) el procedimiento para la obtención de la cantidad óptima de asfalto en una mezcla asfáltica en caliente por medio del método del polígono de vacíos es:

**Paso 1:** Se deben definir las especificaciones de vacíos que se usarán para el diseño de la mezcla, en el caso de  $V_a$ , se definen los límites; máximo y mínimo, con base en la Tabla 2.10, así como también los límites de  $VFA$ , en función del tipo de tráfico previsto para el uso de la vía. Para el valor de  $VMA$  se determina el porcentaje mínimo en función en función del tamaño máximo nominal de la partícula y el porcentaje de diseño de los vacíos de aire, como se presenta en la Tabla 2.11. En el caso del valor máximo para  $VMA$ , no se especifica, pero no se deben tomar valores muy altos, se recomienda tomar un valor máximo igual al valor mínimo más dos, aunque como se verá más adelante, depende de las características de la mezcla asfáltica, pero se busca que la capa asfáltica sea capaz de resistir a deformaciones permanentes.

**Paso 2:** Definir un rango de  $P_b$  para la obtención de valores de  $G_{mb}$  en el plano, al igual se debe contar ya con los valores correspondientes a  $G_{sb}$ ,  $G_{se}$  y  $G_b$ , los mismos que corresponde a los materiales a usarse en el diseño.

**Paso 3:** Con el rango característico de contenido de asfalto establecido en el paso anterior y los valores correspondientes a cero, mínimo y máximo de  $V_a$ , usando la ecuación 2.4, se grafican en el plano  $P_b$  vs  $G_{mb}$ , las isolíneas resultantes serán como se ve en la Figura 3.26.



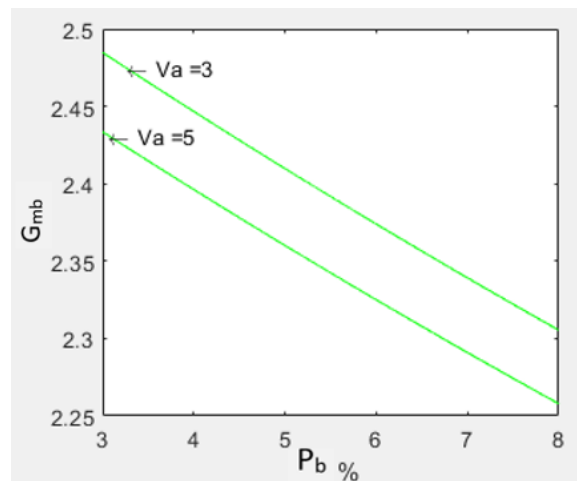


Figura 3.26: Isoclinas de vacíos con aire.

**Paso 4:** Mediante la aplicación de la ecuación 2.5, se grafican dentro del plano las isoclinas correspondientes a los valores de VMA definidos en el paso 1, con el mismo rango de  $P_b$  (Figura 3.27).

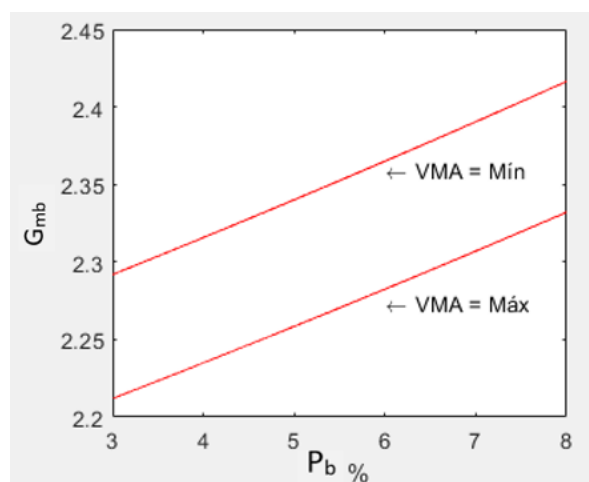


Figura 3.27: Isoclinas de vacíos en el agregado mineral

**Paso 5:** Trazar las isoclinas correspondientes a los valores definidos de  $VFA$  en el paso 1, dentro del rango establecido de  $P_b$ , mediante el uso de la ecuación 2.6 (Figura 3.28).

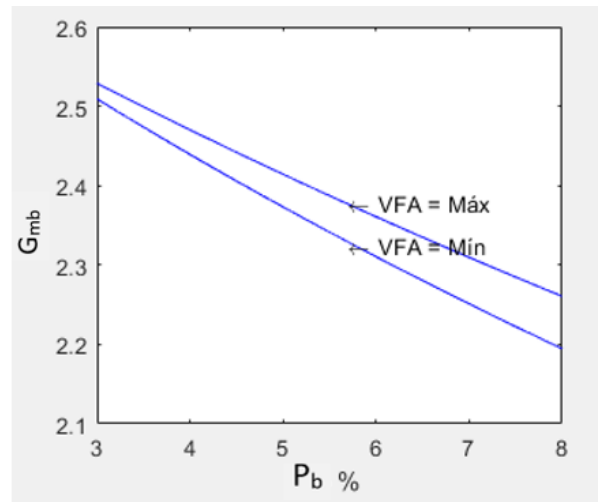


Figura 3.28: Isóneas de vacíos llenos de asfalto.

**Paso 6:** Anteponer las 3 gráficas que se obtienen en principio con cada especificación de vacíos, donde se apreciará un área limitada, en la cual se cumplirán de manera simultánea todas las especificaciones; esta área corresponde al polígono de vacíos resultante como se muestra en la Figura 2.6.

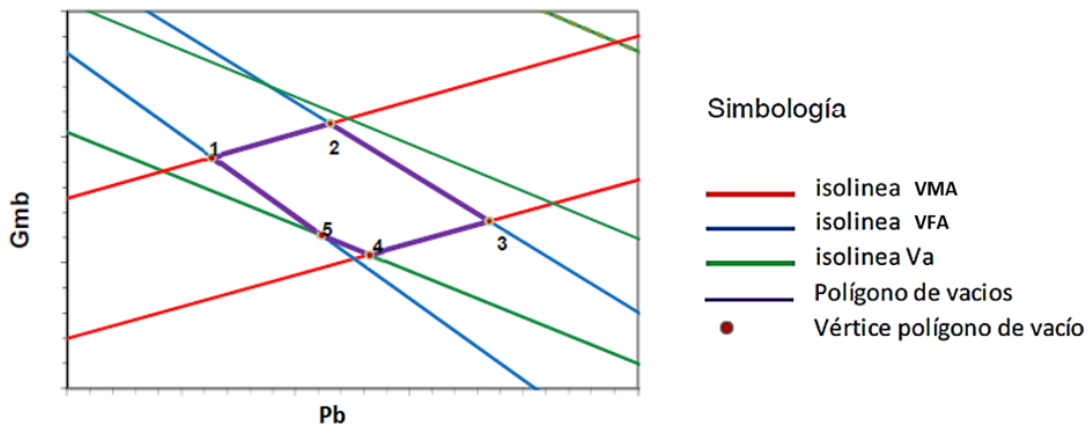


Figura 3.29: Isóneas emplazadas que forman el polígono de vacíos. Recuperado de: Análisis comparativo entre la aplicación de Metodología RAMCODES y el método Marshall como alternativa para la obtención del contenido óptimo de asfalto para el diseño de mezclas asfálticas (p. 28), por J. Pincay et al., 2018, Loja.

**Paso 7:** El valor exacto del contenido óptimo de asfalto dentro de la mezcla en caliente le corresponde a la coordenada en el eje X del centroide del polígono (ecuación 3.3), formado por la intersección de las isóneas trazadas en el plano, el cual tiene su ubicación en un  $P_b$  exacto y su correspondiente valor de  $G_{mb}$  (ecuación 3.4), para lo cual es necesario determinar las coordenadas de los puntos de intersección, según las ecuaciones 3.3 y 3.4.

$$P_{b,opt} = \sum_{i=1}^n \frac{(P_b)_i}{n} \quad (3.3)$$



$$G_{mb} = \sum_{i=1}^n \frac{(G_{mb})_i}{n} \quad (3.4)$$

Donde :

- $P_{b,opt}$  = Porcentaje óptimo de asfalto.
- $(P_b)_i$  = Porcentaje de asfalto de cada una de las intersecciones.
- $(G_{mb})_i$  = Gravedad específica neta de la mezcla de cada vértice.
- $n$  = Número de vértices.
- $G_{mb}$  = Gravedad específica de la mezcla asfáltica,  
con el porcentaje óptimo de asfalto

**Paso 8:** Una vez determinados el  $P_b$  óptimo y el  $G_{mb}$ , para estos resultados se debe determinar los valores de  $V_a$  (ecuación 2.7),  $VMA$  (ecuación 2.8) y  $VFA$  (ecuación 2.9). Ecuaciones definidas en el capítulo anterior.

## 3.6 Validación del método polígono de vacíos mediante ejemplos de literatura

Para poder determinar la validez del método en el diseño de mezclas asfálticas dentro de la ciudad de Cuenca, se va a comparar el método Marshall y el método del polígono de vacíos, con 2 diseños ya establecidos mediante la metodología Marshall. Estos diseños se obtuvieron de la planta de Asfalto de la Municipalidad de Cuenca.

La Tabla 3.2 (Diseño 1) y la Tabla 3.3 (Diseño 2) presentan los datos iniciales necesarios para realizar el método del polígono de vacíos de cada uno de los diseños, dentro de estos se encuentran: las gravedades específicas, tanto neta como aparente de los agregados y las especificaciones de vacíos con las modificaciones indicadas dentro de la sección “*Implementacion del método del polígono de vacíos*”. Las tablas también presentan los resultados obtenidos mediante el polígono de vacíos.



Tabla 3.2: Resultados del Diseño 1 mediante el método del polígono de vacíos.

<b>Datos Iniciales Diseño 1</b>	
Gravedad específica Neta del Agregado ( $G_{sb}$ )	2.547
Gravedad específica Efectiva del Agregado ( $G_{se}$ )	2.64
Gravedad del Asfalto ( $G_a$ )	1.0209
% de Vacíos de Aire ( $V_a$ )	3.5 - 4.5
% de Vacíos del Agregado Mineral (VMA)	14 - 18
% de Vacíos Rellenos de Asfalto (VFA)	65 - 75
<b>Resultados Marshall</b>	
% Óptimo de Asfalto ( $P_b$ )	6.5
Gravedad Específica neta de la mezcla ( $G_{mb}$ )	2.296
% de Vacíos de Aire ( $V_a$ )	4.1
% de Vacíos del Agregado Mineral (VMA)	74.2
% de Vacíos Rellenos de Asfalto (VFA)	15.7

Tabla 3.3: Resultados del Diseño 2 mediante el método del polígono de vacíos.

<b>Datos Iniciales Diseño 2</b>	
Gravedad específica Neta del Agregado ( $G_{sb}$ )	2.58
Gravedad específica Efectiva del Agregado ( $G_{se}$ )	2.665
Gravedad del Asfalto ( $G_a$ )	1.0209
% de Vacíos de Aire ( $V_a$ )	3.5 - 4.5
% de Vacíos del Agregado Mineral (VMA)	14 - 18
% de Vacíos Rellenos de Asfalto (VFA)	65 - 75
<b>Resultados Marshall</b>	
% Óptimo de Asfalto ( $P_b$ )	6.3
Gravedad Específica neta de la mezcla ( $G_{mb}$ )	2.321
% de Vacíos de Aire ( $V_a$ )	4.1
% de Vacíos del Agregado Mineral (VMA)	74.2
% de Vacíos Rellenos de Asfalto (VFA)	15.7

En el capítulo siguiente, se presentarán las comparaciones entre los resultados obtenidos mediante el método del polígono de vacíos y mediante el Método Marshall.

# Capítulo 4

## Resultados y desarrollo del software

En este capítulo se presentan los resultados de los datos obtenidos mediante ensayos de laboratorio con respecto a la caracterización de agregados; con los que obtuvo la granulometría de diseño. Muestra toda la codificación necesaria para el desarrollo del software de la metodología del polígono de vacíos y también se realiza una discusión con respecto a los resultados obtenidos con las dos metodologías de mezclas asfálticas analizadas y las variables que han influido significativamente dentro del método del polígono de vacíos.

### 4.1 Granulometría de los agregados

A continuación en las Tablas 4.1, 4.2 y 4.3, se muestra los resultados obtenidos de los ensayos granulométricos aplicados a las tres proporciones de agregados; polvo triturado más arena natural, agregado grueso 3/8" y agregado grueso 3/4" respectivamente; y también se puede observar las gráficas granulométricas obtenidas de cada una de las fracciones.

Tabla 4.1: Granulometría del agregado fino, compuesto por dos partes de polvo y una parte de arena.

Material		2Polvo+1Arena		
Peso Inicial		500 g		
Tamiz	Abertura (mm)	Peso Retiene (g)	% Retiene	% Pasa
1"	25	0	0 %	100 %
3/4"	19	0	0 %	100 %
1/2"	12.5	0	0 %	100 %
3/8"	9.5	0	0 %	100 %
#4	4.75	14.11	2.8 %	97.2 %
#10	2	116.38	23.3 %	73.9 %
#40	0.425	206.64	41.3 %	32.6 %
#80	0.18	81.33	16.3 %	18 %
#200	0.075	26.52	5.3 %	11 %
Fondo		55.02	11 %	0 %

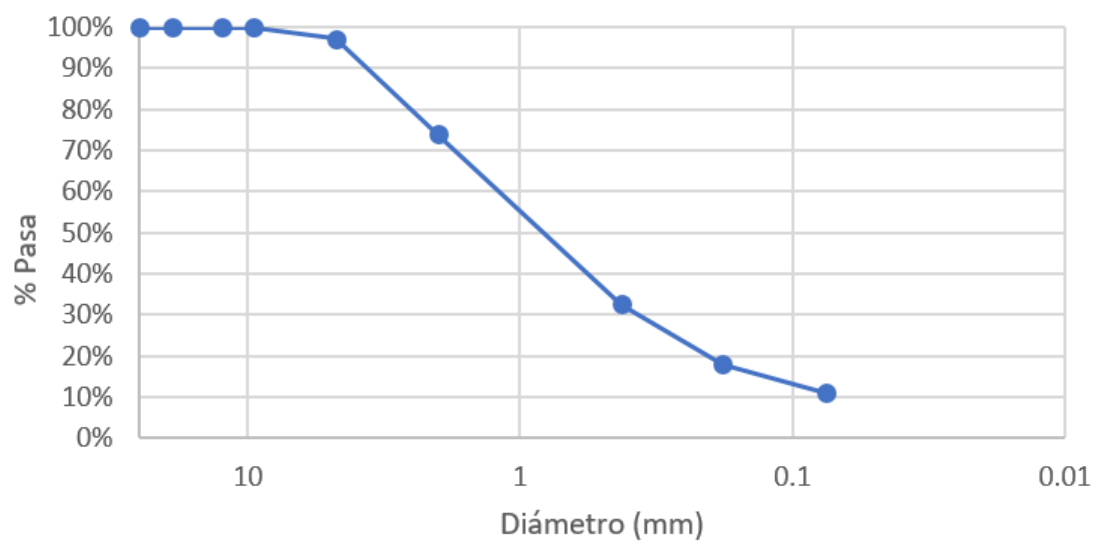


Figura 4.1: Curva granulométrica del agregado fino.



Tabla 4.2: Granulometría del agregado grueso, fracción que pasa por el tamiz 3/8".

Material		Ag. Grueso (3/8")		
Peso Inicial		3000 g		
Tamiz	Abertura (mm)	Peso Retiene (g)	% Retiene	% Pasa
1"	25	0	0.0 %	100.0 %
3/4"	19	0	0.0 %	100.0 %
1/2"	12.5	1041	34.7 %	65.3 %
3/8"	9.5	1105	36.8 %	28.5 %
#4	4.75	798.47	26.6 %	1.9 %
#10	2	19.12	0.6 %	1.2 %
#40	0.425	1.56	0.1 %	1.2 %
#80	0.18	5.03	0.2 %	1.0 %
#200	0.075	6.90	0.2 %	0.8 %
Fondo		22.92	0.8 %	0.0 %

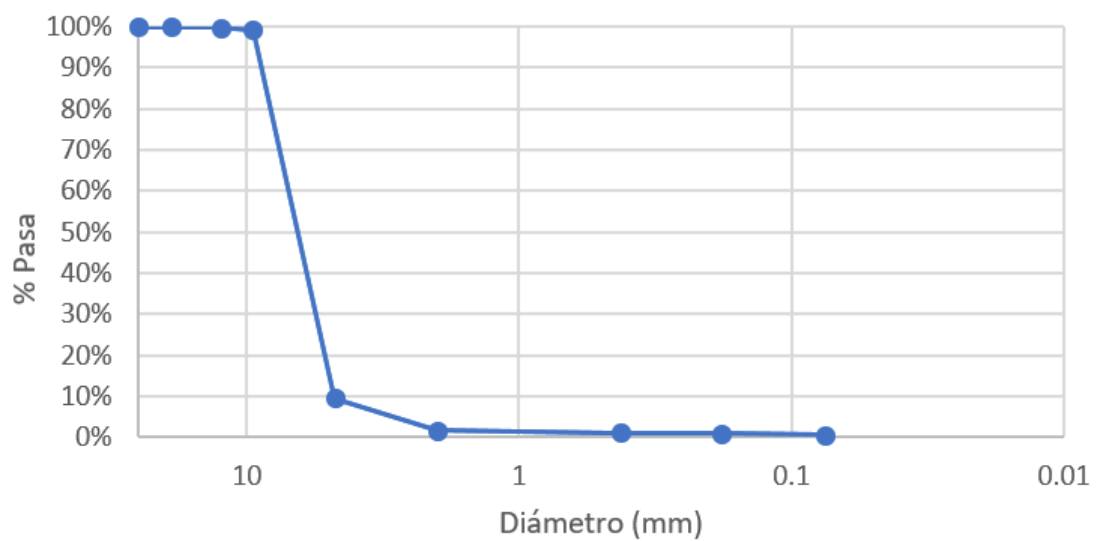


Figura 4.2: Curva granulométrica del agregado grueso, material pasante del tamiz 3/8".



Tabla 4.3: Granulometría del agregado grueso, fracción que pasa por el tamiz 3/4".

Material		Ag. Grueso (3/4")		
Peso Inicial		3000g		
Tamiz	Abertura (mm)	Peso Retiene (g)	% Retiene	% Pasa
1"	25	0	0.0 %	100.0 %
3/4"	19	0	0.0 %	100.0 %
1/2"	12.5	10	0.3 %	99.7 %
3/8"	9.5	14	0.5 %	99.2 %
#4	4.75	2690.84	89.7 %	9.5 %
#10	2	236.38	7.9 %	1.6 %
#40	0.425	18.47	0.6 %	1.0 %
#80	0.18	5.71	0.2 %	0.8 %
#200	0.075	8.46	0.3 %	0.5 %
Fondo		16.14	0.5 %	0.0 %

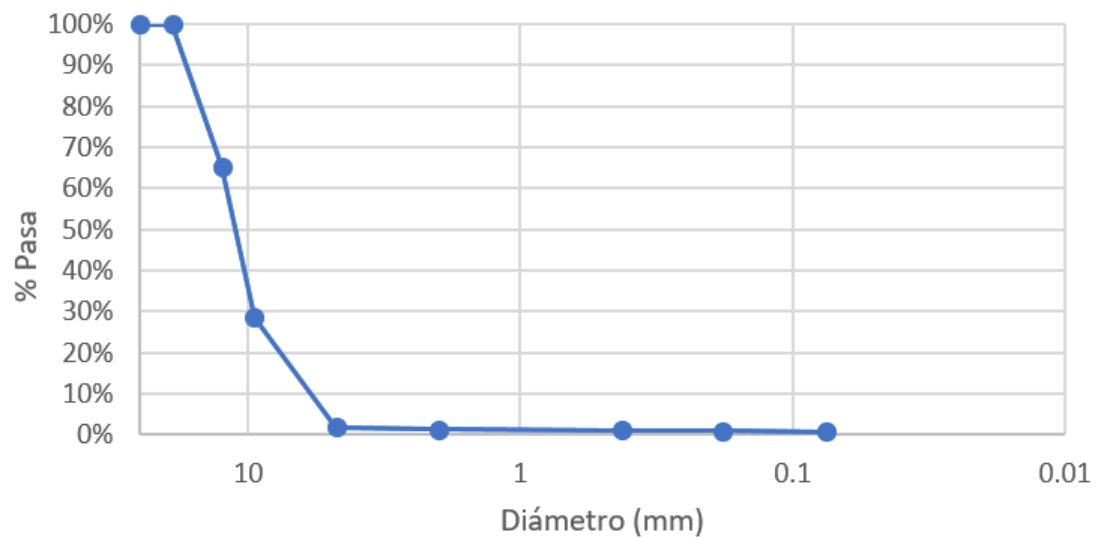


Figura 4.3: Curva granulométrica del agregado grueso, material pasante del tamiz 3/4".





## 4.2 Gravedades específicas de los agregados

Para cada una de los materiales empleados en el diseño, es decir, polvo y arena, el agregado grueso 3/8" y el agregado grueso 3/4"; se obtuvieron sus valores de gravedades específicas, tanto neta, como en estado saturado superficialmente seco y también la gravedad específica aparente. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Gravedades específicas de cada porción de agregado.

		<b>Finos</b>	<b>3/8"</b>	<b>3/4"</b>
<b>Gravedad específica neta</b>	$G_{sb}$	2.556	2.561	2.703
<b>Gravedad específica SSS</b>	–	2.588	2.627	2.750
<b>Gravedad específica aparente</b>	$(G_{sa})$	2.641	2.743	2.836

## 4.3 Granulometría de diseño

A partir de las granulometrías obtenidas de cada material, se determina la proporción necesaria de cada material para cumplir con la normativa de diseño. Esto a manera del ensayo de prueba y error, se eligen diferentes porcentajes para cada material tomando en cuenta que la suma de estos porcentajes debe ser igual a 100 % , y se ajustan esos porcentajes de manera que la granulometría final se encuentre dentro de las especificaciones que dicte la normativa empleada. La granulometría final encontrada, se presenta en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Porcentajes de agregados y granulometría final de la combinación.

Tamiz	Abertura (mm)	Finos (%)	3/8" (%)	3/4" (%)	Porcentajes de diseño (%)			Granulometría final
					Finos	3/8"	3/4"	
					68.00 %	14.00 %	18.00 %	
1"	25	100	100	100	68	14	18	100
3/4"	19	100	100	100	68	14	18	100
1/2"	12.5	100	99.67	65.30	68.00	13.95	11.75	93.71
3/8"	9.5	100	99.20	28.47	68.00	13.89	5.12	87.01
#4	4.75	97.18	9.51	1.85	66.08	1.33	0.33	67.74
#10	2	73.90	1.63	1.21	50.25	0.23	0.22	50.70
#40	0.425	32.57	1.01	1.16	22.15	0.14	0.21	22.50
#80	0.18	18.00	0.82	0.99	12.24	0.11	0.18	12.53
#200	0.075	11.00	0.54	0.76	7.48	0.08	0.14	7.70

La granulometría final de la combinación de agregados tiene que estar dentro de los límites que las normativas establecen, a continuación en la Tabla 4.6, se muestran las comparaciones con las especificaciones de las fajas escogidas, de la



MTOP (2002) y su equivalente de la NEVI-12 (2013), donde se puede observar que la granulometría de trabajo para el diseño de la mezcla asfáltica en caliente, cumple con todos los límites, (Figura 4.4).

Tabla 4.6: Granulometría final de la combinación de agregados comparada con la faja MAC-2, de la norma NEVI (2013) y con la faja de 1/2" de la norma MTOP (2002).

Tamiz	Abertura (mm)	% Pasa	NEVI 12: MAC-2		Obs.	MTOP 2002: 1/2"		Obs.
			min	max		min	max	
1"	25	100	100	100	ok	-	-	-
3/4"	19	100	100	100	ok	100	100	ok
1/2"	12.5	93.71	80	100	ok	90	100	ok
3/8"	9.5	87.01	70	88	ok	-	-	-
#4	4.75	67.74	51	68	ok	44	74	ok
#8	2.36	53.12	-	-	-	28	58	ok
#10	2	50.70	38	52	ok	-	-	-
#40	0.425	22.50	17	28	ok	-	-	-
#50	0.3	18.72	-	-	-	5	21	ok
#80	0.18	12.53	8	17	ok	-	-	-
#200	0.075	7.70	5	8	ok	2	10	ok

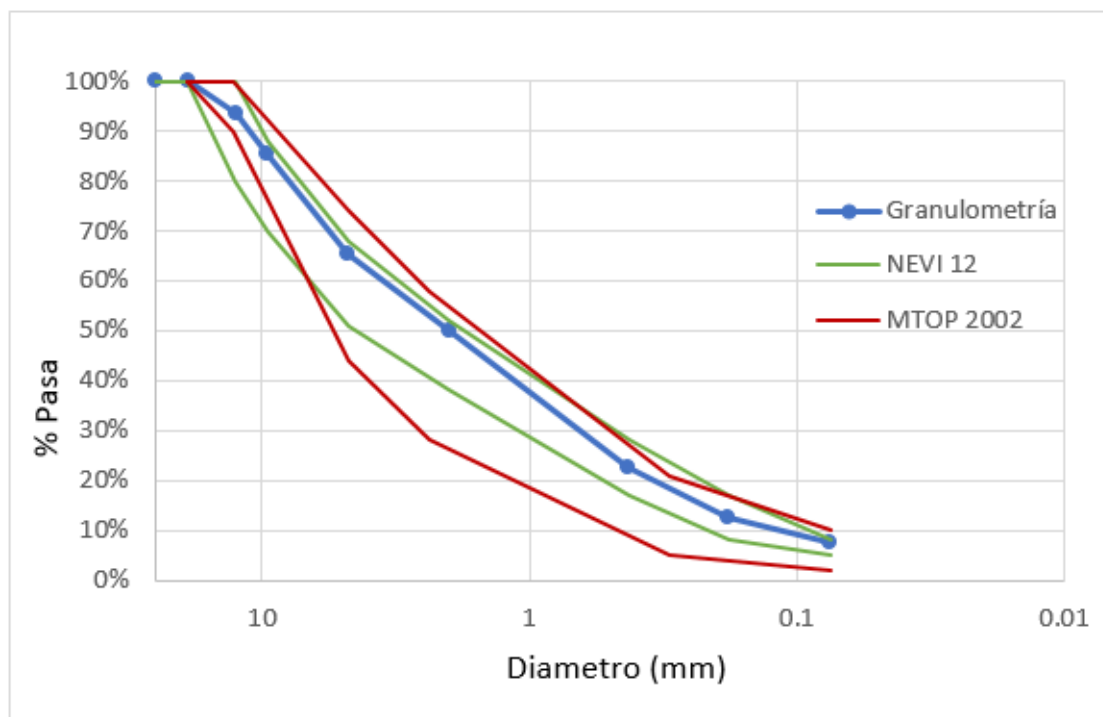


Figura 4.4: Curva granulométrica de la combinación final de agregados.

## 4.4 Ensayos de áridos en laboratorio

### 4.4.1 Agregado grueso

En la Tabla 4.7 se presentan los resultados obtenidos de los ensayos que se pudieron desarrollar en el laboratorio de Geotécnica de la Universidad de Cuenca, llevados a cabo en la muestra de agregado grueso, cada uno bajo las normas especificadas en la misma tabla. Estos resultados son comparados con los requerimientos impuestos tanto por la norma NEVI-12 (2013) como por la norma (MTOPI, 2002).

Tabla 4.7: Resultados de los ensayos de laboratorio en el agregado grueso.

Agregado Grueso						
Ensayo	Result.	Norma: NEVI-12 (2013)		Norma: MTOPI (2002)		Norma de ensayo
		Req.	Obs.	Req.	Obs.	
Durabilidad al sulfato de magnesio o sodio	3 %	18 % max.	Sí Cumple	12 % max.	Sí Cumple	INEN 863 ASTM C 131 AASHTO T 104
Abrasión de los Ángeles	17.66 %	40 % max.	Sí Cumple	40 % max.	Sí Cumple	INEN 860 ASTM C88 AASHTO T 96
Partículas Chatas y alargadas	7.05	10 % max.	Sí Cumple	10 % max.	Sí Cumple	ASTM D 4791 INVE 230
Caras fracturadas	100/86	100/80	Sí Cumple	85/80	Sí Cumple	ASTM D 5821 INVE 227
Porcentaje de absorción	2.12	1 %	No Cumple	–	–	INEN 857 ASTM D 127 AASHTO T 85
Adherencia	95.2 %	95 % min.	Sí Cumple	95 % min.	Sí Cumple	INVE 740

### 4.4.2 Agregado fino

A continuación, en la Tabla 4.8 están especificados los valores arrojados por los ensayos desarrollados en el agregado fino, dentro del mismo laboratorio de la Universidad de Cuenca, cada uno llevado a cabo bajo las normas mencionadas en la misma tabla, estos valores son comparados con los requerimientos impuestos por la norma NEVI-12 (2013) y la (MTOPI, 2002).



Tabla 4.8: Resultados de los ensayos de laboratorio en el agregado fino.

Agregado Fino						
Ensayo	Result.	Norma: NEVI-12 (2013)		Norma: MTOPI (2002)		Norma de ensayo
		Req.	Obs.	Req.	Obs.	
Adhesividad (Rieder Weber)	10 %	%4 min.	Sí Cumple	–	–	INVE 774 NLT 355
Indice de Plasticidad (Tamiz N°40)	NP	NP	Sí Cumple	4 % max.	Sí Cumple	ASTM D 4318
Indice de Plasticidad (Tamiz N°200)	3.43 %	4 % max.	Sí Cumple	–	–	ASTM D 4318
Absorción	1.4 %	0.50 %	No Cumple	–	–	INEN 857 ASTM D 127 ASSHTO T 85

## 4.5 Ensayo RICE

Mediante el ensayo RICE se determinaron los valores para la gravedad específica teórica máxima, para cada una de las mezclas asfálticas ensayadas con diferentes contenidos de asfalto. Con los resultados de este ensayo en laboratorio y mediante el uso de la ecuación 2.3, se determina la gravedad específica efectiva del agregado como se muestra en la Tabla 4.9.

La variación máxima entre los valores encontrados es de 0.036 y como se mencionó anteriormente en la sección “*Obtención de a gravedad específica efectiva de los agregados*”, esta característica del material es constante, por ende se procede a promediar estos valores, para posteriormente ser comparado con el resultado obtenido de manera teórica.

Tabla 4.9: Gravedad específica teórica máxima y gravedad específica obtenidas mediante el Ensayo RICE.

		Porcentaje de asfalto (%)				
		5.5	6	6.5	7	7.5
<b>Gravedad específica teórica máxima</b>	Gmm	2.477	2.439	2.414	2.400	2.390
<b>Gravedad específica efectiva</b>	Gse	2.702	2.676	2.666	2.672	2.682
<b>Promedio Gse</b>		2.680				

## 4.6 Determinación teórica de la gravedad específica efectiva del agregado

Para cada uno de los porcentajes de asfalto, se obtiene el porcentaje de cada agregado, con respecto a la mezcla como el 100 %, y a partir de la ecuación 3.2, como se menciona en el Capítulo 3, se obtiene el valor de la gravedad específica teórica máxima, para cada mezcla, y una vez obtenido este dato se calcula el valor de la gravedad específica efectiva del agregado para cada contenido de asfalto. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10: Gravedad específica teórica máxima y gravedad específica obtenidas de manera teórica.

% Asfalto	Agregado	% Agregado	Gmm	Gse
5.5	Polvo+Arena	64.26	2.466	2.688
	Ag. 3/4	17.01		
	Ag. 3/8	13.23		
6	Polvo+Arena	63.92	2.448	2.688
	Ag. 3/4	16.92		
	Ag. 3/8	13.16		
6.5	Polvo+Arena	63.58	2.430	2.688
	Ag. 3/4	16.83		
	Ag. 3/8	13.09		
7	Polvo+Arena	63.24	2.412	2.688
	Ag. 3/4	16.74		
	Ag. 3/8	13.02		
7.5	Polvo+Arena	62.9	2.395	2.688
	Ag. 3/4	16.65		
	Ag. 3/8	12.95		

Se puede observar que la gravedad específica efectiva del agregado es mayor cuando se obtiene de manera teórica en un 0.008 a la gravedad específica efectiva de los agregados obtenida mediante el Ensayo Rice.

Esto debido a que al usar la gravedad específica aparente del agregado al momento de determinar la gravedad específica efectiva de manera teórica se considera la absorción de agua que tiene el material, no la absorción de asfalto. Pero, este valor no difiere de manera significativa con la absorción del asfalto por lo cual sirve para obtener una buena aproximación inicial del contenido óptimo de asfalto mediante el método del polígono de vacíos sin la necesidad de elaborar una mezcla asfáltica.



## 4.7 Ensayo de Marshall

En la Tabla 4.11, se observan los resultados obtenidos en laboratorio dentro del diseño Marshall. Se obtuvieron 5 puntos; dos puntos por debajo del porcentaje óptimo y dos puntos superiores al porcentaje óptimo.

Tabla 4.11: Ensayo de Marshall.

#	Peso			Vol. (cm <sup>3</sup> )	Gravedad Específica			$(V_a)$ (%)	VMA (%)	VFA (%)	Estabilidad (lb)			Flujo (0.01")
	Aire	SSS	Smrg.		Gmb	Gmm	Gse				Lect.	F.C.	Correg.	
<b>BRIQUETAS CON 5.5 % EN PESO DE ASFALTO AC-20</b>														
1	1202.43	1206.91	670.89	536.02	2.243	2.477	2.702	9.447	17.9	47.2	2919.7	0.93	2715.3	12
2	1200.58	1205.2	667.29	537.91	2.232			9.904	18.3	45.9	3197.7	0.93	2973.9	11
3	1200.41	1207.35	673.23	534.12	2.247			9.278	17.7	47.7	2480.6	0.96	2381.4	10
<b>Promedio</b>					<b>2.241</b>			<b>9.5</b>	<b>18.0</b>	<b>46.9</b>			<b>2690.2</b>	<b>11</b>
<b>BRIQUETAS CON 6.0 % EN PESO DE ASFALTO AC-20</b>														
1	1202.32	1206.5	681.5	525	2.290	2.439	2.676	6.105	16.6	63.3	3092.9	0.96	2969.2	11
2	1203.9	1205.64	682.38	523.26	2.301			5.669	16.2	65.1	2746.8	0.96	2636.9	11
3	1203.29	1204.31	680.03	524.28	2.295			5.900	16.4	64.1	3397.8	0.96	3261.9	10
<b>Promedio</b>					<b>2.295</b>			<b>5.9</b>	<b>16.4</b>	<b>64.2</b>			<b>2956.0</b>	<b>11</b>
<b>BRIQUETAS CON 6.5 % EN PESO DE ASFALTO AC-20</b>														
1	1201.44	1201.94	683.55	518.39	2.318	2.414	2.666	3.973	16.1	75.3	3479	1	3479.0	13
2	1200.93	1201.77	684.33	517.44	2.321			3.837	16.0	75.9	3225.6	1	3225.6	12
3	1200.93	1201.84	682.31	519.53	2.312			4.224	16.3	74.1	3449.7	1	3449.7	13
<b>Promedio</b>					<b>2.317</b>			<b>4.0</b>	<b>16.1</b>	<b>75.1</b>			<b>3384.8</b>	<b>13</b>
<b>BRIQUETAS CON 7.0 % EN PESO DE ASFALTO AC-20</b>														
1	1199.85	1200.23	679.59	520.64	2.305	2.400	2.672	3.976	17.0	76.6	3422.5	1	3422.5	16
2	1202.13	1203.19	681.92	521.27	2.306			3.910	16.9	76.9	3200.9	1	3200.9	14
3	1219.02	1219.76	691.41	528.35	2.307			3.866	16.9	77.1	3042.7	0.96	2921.0	15
<b>Promedio</b>					<b>2.306</b>			<b>3.9</b>	<b>16.9</b>	<b>76.9</b>			<b>3181.5</b>	<b>15</b>
<b>BRIQUETAS CON 7.5 % EN PESO DE ASFALTO AC-20</b>														
1	1200.59	1201	679.25	521.75	2.301	2.390	2.682	3.738	17.6	78.7	2872.5	1	2872.5	15
2	1199.97	1200.54	677.08	523.46	2.292			4.102	17.9	77.0	3323.1	0.96	3190.2	16
3	1200.31	1200.44	678.58	521.86	2.300			3.781	17.6	78.5	3183.1	1	3183.1	16
<b>Promedio</b>					<b>2.298</b>			<b>3.9</b>	<b>17.7</b>	<b>78.1</b>			<b>3081.9</b>	<b>16</b>

Con los resultados obtenidos mediante el ensayo Marshall, se obtuvieron 6 gráficas que se muestran a continuación en la Figura 4.5. En base a estas gráficas y mediante el método NAPA el diseño define el porcentaje óptimo de asfalto en 6.5 %, con un porcentaje de vacíos de aire del 4 %.

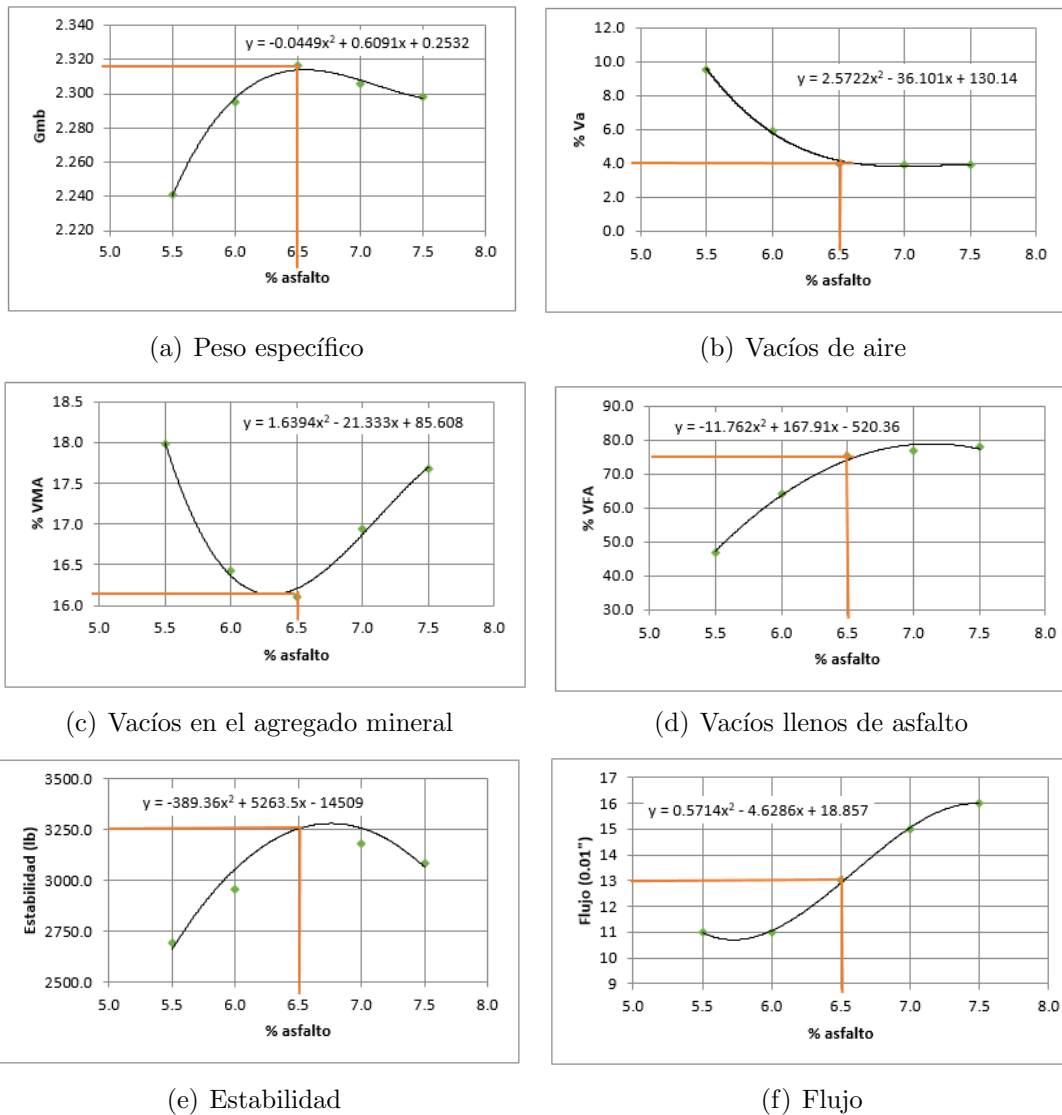


Figura 4.5: Curvas de diseño ensayo Marshall

A continuación, en la Tabla 4.12 se muestra un resumen de las características de la mezcla, resultados obtenidos mediante Marshall, para cada uno de los porcentajes ensayados.

En la tabla se puede evidenciar que el porcentaje óptimo de asfalto es de 6.5%, debido a que cumple con todas las especificaciones de vacíos, y también con la estabilidad y flujo que rige la norma para tráfico pesado según la Tabla 2.10.

Tabla 4.12: Resumen del ensayo Marshall.

% Asfalto	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5
Peso específico de la mezcla	2.241	2.295	<b>2.317</b>	2.306	2.298
% $V_a$	9.5	5.9	<b>4.0</b>	3.9	3.9
% VMA	18.0	16.4	<b>16.1</b>	16.9	17.7
% VFA	46.9	64.2	<b>75.1</b>	76.9	78.1
Estabilidad (lb)	2690.2	2956.0	<b>3384.8</b>	3181.5	3081.9
Flujo (0.01")	11	11	<b>13</b>	15	16

## 4.8 Desarrollo de software con el método del polígono de vacíos

Para poder determinar el diseño de la mezcla asfáltica en caliente a través de la metodología del método del polígono de vacíos se programó un software mediante la herramienta App Designer de MATLAB.

La Figura 4.6 muestra la pantalla de inicio del programa, la misma que contiene, el nombre de la Universidad, la facultad, el nombre de las autoras del código y consta con un botón ubicado en la parte inferior derecha, que permite al usuario continuar a la siguiente ventana del programa.



Figura 4.6: Captura de la ventana de inicio del software.



Para determinar los porcentajes óptimos de cada material usados en la combinación del agregado granular que se utilizó en el diseño de la mezcla asfáltica, se emplea la siguiente ventana, llamada Granulometría, que se muestra en la Figura 4.7.

Tamiz	Abertura (mm)	% Pasa Max	% Pasa Min	Material 1 % Pasa	Material 2 % Pasa	Material 3 % Pasa	Material 4 % Pasa	Granulometría Final	Observación
		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	
		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	

2. Ingresar la granulometría de cada material

3. Ingresar los porcentajes de los materiales

Pocentaje total (%) 0

Diametro nominal (mm) 0

4. Granulometría de la combinación de agregados, comparación con la normativa y gráfica.

Curva Granulométrica

Calculador

Continuar

Figura 4.7: Captura de la ventana para el diseño de la granulometría.

El primer paso dentro del software implementado es escoger la faja granulométrica con la que el usuario desea trabajar, esta puede ser elegida según la normativa NEVI-12 (2013) o (MTOPI, 2002), y una vez seleccionada la faja de trabajo se visualiza en la ventana los tamices, aberturas y límites máximos y mínimos, que la faja permite, de igual manera se puede visualizar el tamaño máximo nominal del agregado, con el que se trabaja.

El programa permite al usuario ingresar la granulometría de hasta 4 tipos de materiales, obtenidas mediante la Norma INEN 696 (2011) y de cada uno de estos materiales es necesario determinar los porcentajes en los que serán empleados de manera que la granulometría final se encuentre dentro de los límites de la faja granulométrica elegida.

Es importantes verificar que la suma de los porcentajes de los agregados sea igual al 100 %, caso contrario, el software no le permitirá al usuario continuar con el siguiente paso (Figura 4.8).

1. Seleccionar la faja de trabajo.

Norma: **NEVI-12**  MAC-1  MAC-2  MAC-3  
**MTOP 2002**  3/4"  1/2"  3/8"  #4

Tamiz	Abertura (mm)	% Pasa		Material 1	Material 2	Material 3	Material 4
		Max	Min	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa
3/4	19	100	100	100	100	100	0
1/2	12.7	100	90	100	100	65.3	0
#4	4.75	74	44	97.18	9.51	1.85	0
#8	2.36	58	28	77	3.5	1.5	0
#50	0.3	21	5	27	1	1.2	0
#200	0.075	10	2	11	0.54	0.76	0
--	--	0	0	0	0	0	0
--	--	0	0	0	0	0	0
--	--	0	0	0	0	0	0

2. Ingresar la granulometría de cada material

3. Ingresar los porcentajes de los materiales

	68	14	18	0
--	----	----	----	---

Pocentaje total (%)

Figura 4.8: Captura de la ventana para el ingreso de las granulometrías de los diferentes materiales.

Una vez establecida la combinación de los agregados por medio del botón “Calcular” el software determina la granulometría de diseño y compara con los límites de la faja elegida, dando como resultado una columna de observaciones, en donde se puede visualizar la palabra “OK” en el caso de que se esté cumpliendo con las especificaciones o caso contrario la palabra “ERROR”.

El lado derecho de la ventana presenta la gráfica resultante de aquella combinación, así como también los límites superiores e inferiores de la faja elegida, de esta manera el usuario podrá corregir la curva de diseño hasta que esta se encuentre centrada dentro aquellos límites. El usuario podrá también identificar cualquier desfase según la gráfica en caso de que lo hubiese, y de ser así, se permite modificar los porcentajes ingresados de los agregados y recalculer la combinación y la gráfica (Figura 4.9).

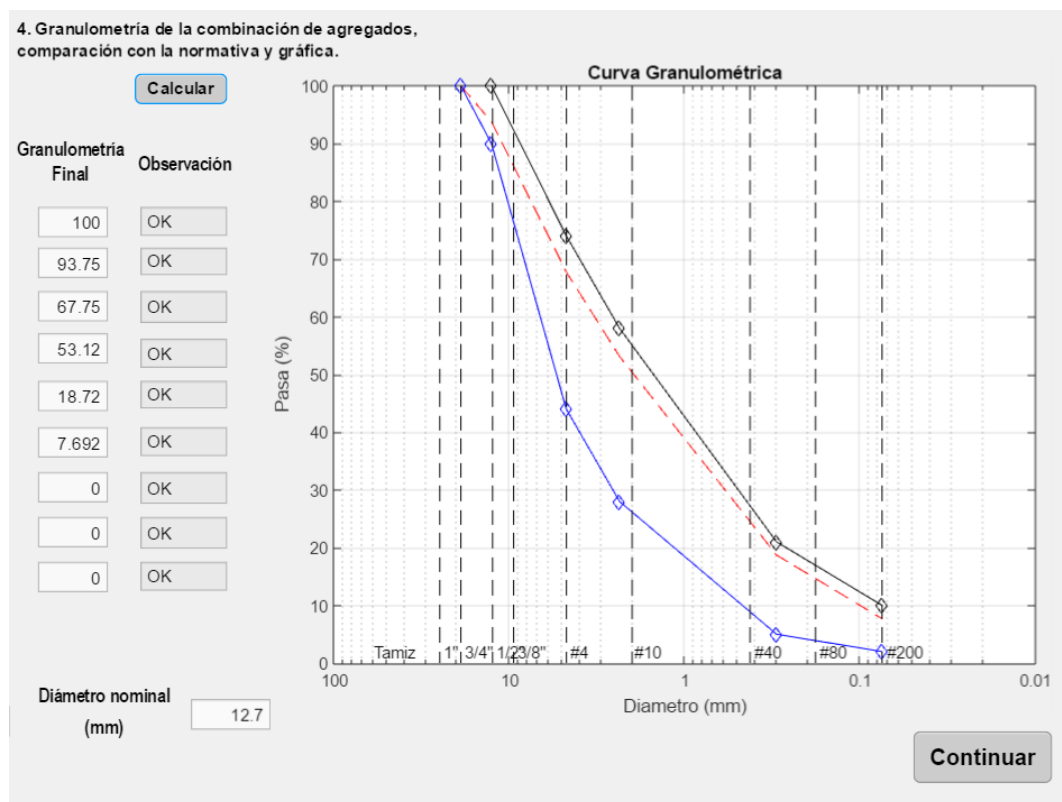


Figura 4.9: Curva granulométrica de la combinación de agregados.

Una vez establecidos los porcentajes que se utilizarán en la granulometría para el diseño de la mezcla asfáltica, el botón “Continuar” ubicado en la parte inferior derecha, permite acceder a la siguiente ventana.

En la nueva ventana llamada Gravedades específicas de los materiales, el usuario no podrá modificar las proporciones de los materiales ingresadas anteriormente. Se debe ingresar la gravedad específica aparente ( $G_{sa}$ ) y la gravedad específica neta ( $G_{sb}$ ) de cada uno de los materiales, estos valores fueron encontrados en la sección “Ensayos y Normas de los materiales granulares”. De la misma manera, el usuario debe ingresar la gravedad específica del asfalto empleado, que se obtiene en laboratorio o mediante las guías de remisión que salen de las refinerías.

En la Figura 4.10 se muestra la estructura de la ventana, donde se solicita al usuario que ingrese los datos explicados anteriormente.

The screenshot shows a software window titled 'Gravedades específicas'. The main heading is 'Datos iniciales del agregado y del asfalto'. Below this, there is a section '6. Ingresar los datos de gravedades específicas de los materiales'. The data is organized into a table with columns for Material 1, Material 2, Material 3, and Material 4, and rows for Proportión (%), Gravedad específica aparente (Gsa), and Gravedad específica neta (Gsb). Below the table is a section for 'Asfalto' with a row for Gravedad específica (Gb). A 'Continuar' button is located at the bottom right.

	Material 1	Material 2	Material 3	Material 4
Proportión (%)	68	14	18	0
Gravedad específica aparente (Gsa)	2.641	2.743	2.836	1
Gravedad específica neta (Gsb)	2.551	2.561	2.703	1

Asfalto

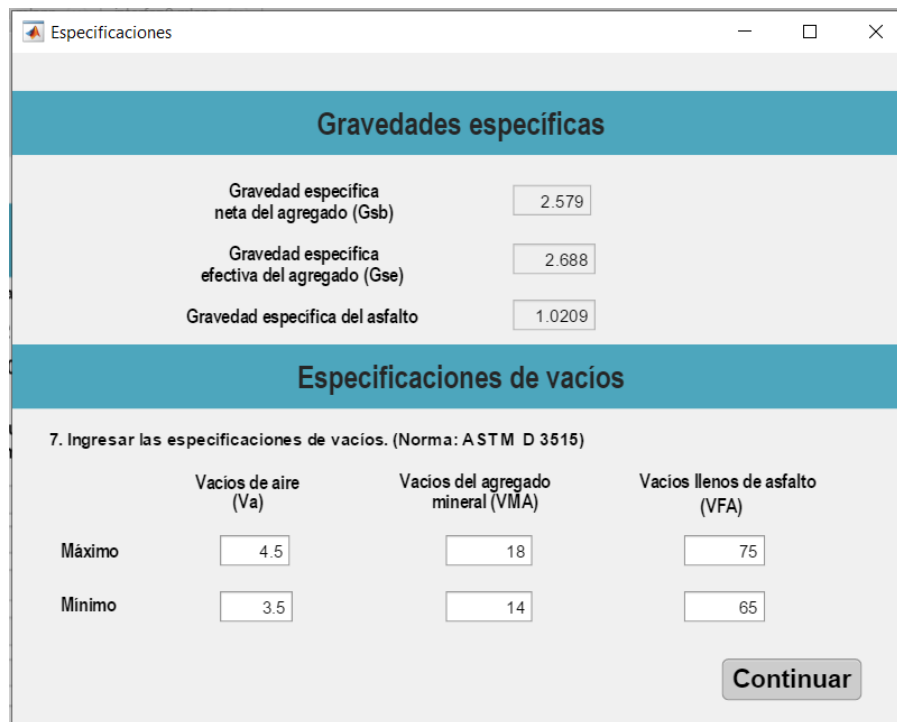
Gravedad específica (Gb)	1.0209
--------------------------	--------

Figura 4.10: Ingreso de los datos de gravedades específicas dentro del software.

Dentro de la ventana Especificaciones, en la parte superior el programa presenta la gravedad específica neta de la combinación de agregados, y la gravedad específica efectiva de la combinación de agregados determinados dentro del software.

En la parte inferior de la ventana, se solicitan los valores de los porcentajes de vacíos, los cuales el usuario puede modificar a libertad, el software le proporciona valores por defecto. En el caso de los vacíos de aire, dado que el porcentaje óptimo de asfalto siempre será un valor que tenga un porcentaje de vacíos que tienda al de 4%, como lo establece la metodología Marshall, para el tipo de agregados que tenemos en la zona se establece un valor de 4.5% como límite superior y 3.5% como límite inferior.

De la misma manera, para los límites de los vacíos de agregado mineral, se establece un porcentaje mínimo según el tamaño máximo nominal como establece la Tabla 2.11 y tomando en cuenta los resultados de Marshall, se estableció un límite superior de 18%. Los vacíos llenos de asfalto deben ser ingresados de acuerdo al tipo de tráfico con base en la Tabla 2.10 como se puede ver en la Figura 4.11.



	Vacíos de aire (Va)	Vacíos del agregado mineral (VMA)	Vacíos llenos de asfalto (VFA)
Máximo	4.5	18	75
Mínimo	3.5	14	65

Figura 4.11: Gravedades específicas y porcentajes de vacíos dentro del software.

Una vez que se han ingresado todos los datos necesarios para el método, comienza el funcionamiento interno del software. Primero, se establece un rango de valores para el porcentaje de asfalto ( $P_b$ ), con un paso de 0.001. Luego, los datos ingresados por el usuario correspondientes a las especificaciones de vacíos y las gravedades específicas adoptan una variable, es necesario convertir estos valores ingresados en porcentajes a decimal. Toda esta codificación se presenta a continuación en el Código 4.1 y 4.2, respectivamente:

```
Pb=3:0.001:9;           %Porcentaje de asfalto, definir rango para el
    desarrollo de método.
Va_min = app.o.Value;   %Porcentaje mínimo de volumen de aire.
Va_max = app.n.Value;   %Porcentaje máximo de volumen de aire.
VMA_min = app.q.Value;  %Porcentaje mínimo de vacíos en el agregado
    mineral.
VMA_max = app.p.Value;  %Porcentaje máximo de vacíos en el agregado
    mineral.
VFA_min = app.s.Value;  %Porcentaje mínimo de vacíos llenos de
    asfalto.
VFA_max = app.r.Value;  %Porcentaje máximo de vacíos llenos de
    asfalto.
Gse_def=app.Gse.Value;  %Valor calculado de la gravedad          espec
    ífica efectiva de la combinación de agregados
Gsb_def=app.Gsb.Value;  %Valor calculado de la gravedad          espec
    ífica neta de la combinación de agregados
Gb_def=app.Gb.Value;    %Gravedad específica del asfalto      (
    Acarreado de la ventana anterior)
```

Código 4.1: Asignación de valores a las variables dentro del código.



```
%Conversión de porcentajes de entrada a decimales.  
auxPb=Pb/100;  
auxVa_max=Va_max/100;  
auxVa_min=Va_min/100;  
auxVMA_max=VMA_max/100;  
auxVMA_min=VMA_min/100;  
auxVFA_max=VFA_max/100;  
auxVFA_min=VFA_min/100;
```

Código 4.2: Conversión de porcentaje a decimal de valores del porcentaje de asfalto y límites de vacíos.

Para poder determinar las isóneas de las especificaciones de vacíos, primero se debe transponer el vector del porcentaje de asfalto, y con este vector se crean los vectores de cada isónea de las especificaciones como se muestra en el Código 4.3. Luego, cada vector será presentado en el gráfico de resultados.

```
uxPb1=auxPb'; %Transposición del vector para operaciones  
aritméticas.  
Gmb1=(1-auxVa_max)./((auxPb1/Gb_def)+((1-auxPb1)/Gse_def));  
%Isolénea de Vacíos de aire (máximo).  
Gmb2=(1-auxVa_min)./((auxPb1/Gb_def)+((1-auxPb1)/Gse_def));  
%Isolénea de Vacíos de aire (mínimo).  
Gmb3=((1-auxVMA_max)./(1-auxPb1))*Gsb_def;  
%Isolénea de Vacíos en el agregado mineral(máximo).  
Gmb4=((1-auxVMA_min)./(1-auxPb1))*Gsb_def;  
%Isolénea de Vacíos en el agregado mineral(mínimo).  
Gmb5=(auxVFA_max)./((auxPb1/Gb_def)+((1-auxPb1)/Gse_def)-(1-  
auxVFA_max)*((1-auxPb1)/Gsb_def));  
%Isolénea de Vacíos llenos de asfalto(máximo).  
Gmb6=(auxVFA_min)./((auxPb1/Gb_def)+((1-auxPb1)/Gse_def)-(1-  
auxVFA_min)*((1-auxPb1)/Gsb_def));  
%Isolénea de Vacíos llenos de asfalto(mínimo).
```

Código 4.3: Creacion de los vectores de cada isónea de las especificaciones de vacíos.

Mediante la función SOLVE, se encuentran los valores del porcentaje de asfalto en donde se intersectan las isóneas, estos valores se guardan en la primera columna de una matriz de 12x2. En el Código 4.4 se muestran dos de todos los datos obtenidos de  $P_b$ , el resto del código está ubicado en los Anexos.



```

%Igualación entre rectas para encontrar el valor de Pb, donde
  se intersectan las isolíneas
%Los valores de intersecciones, se guardan en una matriz de      10
  X2
syms auxPb1
ceros(1,1)=solve((1-auxVa_max)/((auxPb1/Gb_def)+((1-auxPb1)/Gse_def))
  -((1-auxVMA_min)/(1-auxPb1))*Gsb_def==0, auxPb1);
%Pb1: Intersección entre Va_max y VMA_min
ceros(2,1)=solve((1-auxVa_min)/((auxPb1/Gb_def)+((1-auxPb1)/Gse_def))
  -((1-auxVMA_min)/(1-auxPb1))*Gsb_def==0, auxPb1);
%Pb2: Intersección entre Va_min y VMA_min
.....

```

Código 4.4: Ejemplos de la igualación entre vectores para encontrar las intersecciones de las isolíneas.

Para cada uno de los porcentajes de asfalto ya determinados, se calcula el valor de  $G_{mb}$  correspondiente; estos valores se guardan en la segunda columna de la misma matriz de 12x2. Una vez llenada la matriz, sus datos son convertidos de texto a valor, y estos a porcentaje (Código 4.5).

```

ceros(1,2)=(1-auxVMA_min)/(1-ceros(1,1))*Gsb_def; %Gmb1
ceros(2,2)=(1-auxVMA_min)/(1-ceros(2,1))*Gsb_def; %Gmb2
.....

ceros=double(ceros); %conversión de caracteres de texto a decimales.
ceros(:,1)=ceros(:,1)*100; %Conversión del Pb, de decimal a porcentaje.

```

Código 4.5: Obtención de los  $G_{mb}$  de puntos de intersecciones.

Ahora, se debe determinar cuáles de las intersecciones cumplen con todas las especificaciones de vacíos, ya que estas serán los vértices del polígono. Es necesario establecer un rango de error, para que de esa manera cualquiera de las intersecciones no sea rechazada por una diferencia de 0.001 o menos. Mediante el uso de la función *FOR*, para cada una de las intersecciones se encuentra el valor de  $V_a$ ,  $VMA$  y  $VFA$ , con la función *IF* estos valores serán comparados con las especificaciones de vacíos. Las intersecciones que cumplan con las condiciones se guardan en una nueva matriz llamada aux\_ceros. A la vez, los valores del porcentaje de asfalto y de la gravedad específica neta de la mezcla, de las intersecciones válidas, se suman de forma acumulativa para poder determinar el centroide del polígono (Código 4.6).



```
cont=0;
ERROR=-0.0001; %Se establece un error para asegurar que el valor de vacíos
    esté dentro de los límites.
aux2=0;
aux3=0;
for i=1:10
    %Para cada uno de los puntos de intersección se encuentra el valor de
    :
    Va=1-ceros(i,2)*((ceros(i,1)/100)/Gb_def+(1-(ceros(i,1)/100))/
        Gse_def); %Vacíos de aire.
    VMA=1-ceros(i,2)*(1-(ceros(i,1)/100))/Gsb_def; %Vacíos en el agregado mineral.
    VFA=(VMA-Va)/VMA; %Vacíos llenos de asfalto.
    %Condiciones que debe cumplir cada punto para pertenecer al polígono.
    if Va-ERROR>=Va_min/100 && Va+ERROR<=Va_max/100 && VMA-ERROR>=
        VMA_min/100 && VMA+ERROR<=VMA_max/100 && VFA-ERROR>=VFA_min/100
        && VFA+ERROR<=VFA_max/100
        cont=cont+1;
        aux_ceros(cont,1)=ceros(i,1); %Valores de Pb de los
            puntos que cumplen las condiciones, se guardan en la primera
            columna de una nueva matriz.
        aux_ceros(cont,2)=ceros(i,2); %Valores de Gmb de los
            puntos que que cumplen las 6 condiciones, se guardan en la
            segunda columna de una nueva matriz.
        aux2=aux2+aux_ceros(cont,1); %sumatoria del valor de Pb, de los
            puntos que cumplen con las condiciones.
        aux3=aux3+aux_ceros(cont,2); %sumatoria del valor de Gmb, de
            los puntos que cumplen con las condiciones.
    end
end
```

Código 4.6: Verificación de intersecciones que forman los vértices del polígono.

Si uno de los vértices está muy alejado al rango establecido con anterioridad para el software, no se lo tomará en cuenta para la presentación de la gráfica, puesto, que no será parte del polígono usado para el diseño, la implementación de esto se muestra en el Código 4.7.

```
cont=0;
for i=1:12
    if ceros(i,1)<9 && ceros(i,1)>3
        cont=cont+1;
        cerosfinal(cont,1)=ceros(i,1);
        cerosfinal(cont,2)=ceros(i,2);
    end
end
```

Código 4.7: Verificación de intersecciones que no salgan de los límites de la gráfica.

Por último, se obtiene el valor óptimo del contenido de asfalto y la gravedad específica neta de la mezcla que le corresponde mediante el centroide del polígono que se forma con los vértices que cumplieron todas las especificaciones de vacíos , y



como datos extra se muestran los valores de ( $V_a$ ), VMA y VFA, obtenidos con las ecuaciones 2.7, 2.8 y 2.9 como se presenta en el Código 4.8.

```
%Centroide del polígono, corresponde al valor óptimo de asfalto.  
  
Pb_opt=b/a;  
Gmb_opt=c/a;  
Va_opt=100-Gmb_opt*(Pb_opt/Gb_def+(100-Pb_opt)/Gse_def);  
VMA_opt=100-Gmb_opt*(100-Pb_opt)/Gsb_def;  
VFA_opt=100*(VMA_opt-Va_opt)/VMA_opt;
```

Código 4.8: Determinación del Porcentaje Óptimo de Asfalto gravedad específica neta y especificaciones de vacíos.

El programa muestra al usuario todos estos resultados, en una ventana final llamada Resultados, en la que se puede observar de manera gráfica los vértices que conforman el polígono, las intersecciones que quedaron fuera del polígono, y el centroide de la figura que corresponde al valor optimo de asfalto. Todo esto se observa en la Figura 4.12.

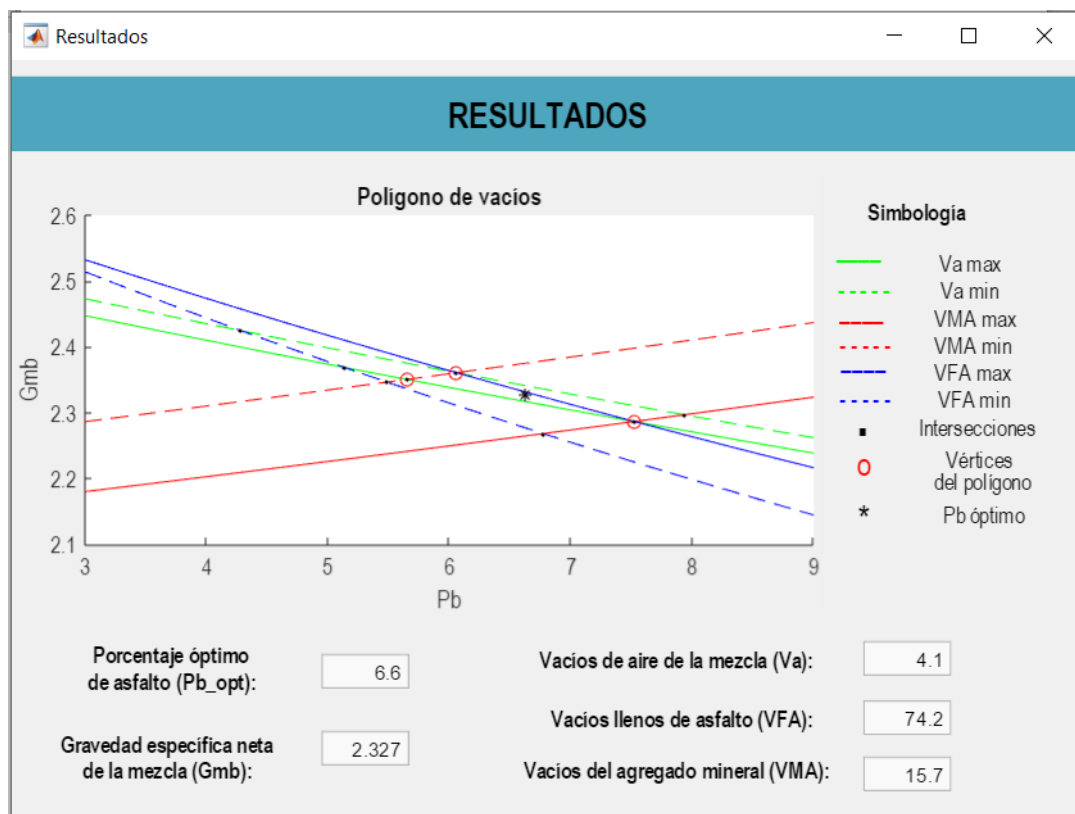


Figura 4.12: Captura de la ventana final del software.

## 4.9 Diseño por medio del método del polígono de vacíos

Después de seguir el procedimiento que el método estudiado establece y por medio del software implementado, se obtiene los resultados mostrados en la Tabla 4.13, en donde se encuentra el valor óptimo de asfalto y las respectivas características de la mezcla.

Tabla 4.13: Resultados obtenidos del polígono de vacíos.

Resultados	
Porcentaje Óptimo de Asfalto ( $P_b$ )	6.6
Gravedad Específica neta de la mezcla ( $G_{mb}$ )	2.329
Vacíos de Aire ( $V_a$ )	4.1
Vacíos del Agregado Mineral (VMA)	15.7
Vacíos Rellenos de Asfalto (VFA)	74.2
Relación Filler/Betún	0.83

Para la verificación del diseño se realizaron 3 briquetas dentro del laboratorio con el porcentaje óptimo de asfalto determinado, con las cuales se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 4.14.

Tabla 4.14: Resultados obtenidos en el Ensayo de Marshall, para el 6.6% de asfalto.

#	Peso			Vol. (cm <sup>3</sup> )	Gravedad Específica			$(V_a)$ (%)	VMA (%)	VFA (%)	Estabilidad (lb)			Flujo (0.01")
	Aire	SSS	Smrg.		Gmb	Gmm	Gse				Lect.	F.C.	Correg.	
<b>BRIQUETAS CON 6.6% EN PESO DE ASFALTO AC-20</b>														
1	1238.46	1238.85	704.22	534.63	2.316	2.417	2.675	4.16	16.02	74.07	3352.7	0.96	3218.6	13
2	1259.29	1259.78	716.99	542.79	2.320			4.01	15.89	74.78	3392.9	0.93	3155.4	16
3	1224.65	1225.07	697.81	527.26	2.323			3.9	15.79	75.32	3460.2	0.96	3321.8	14
<b>Promedio</b>					<b>2.320</b>			<b>4.02</b>	<b>15.91</b>	<b>74.72</b>			<b>3231.93</b>	<b>14</b>

## 4.10 Comparación de resultados entre las metodologías Marshall y polígono de vacíos

Tabla 4.15: Comparación de resultados.

Característica de la Mezcla	Marshall	Polígono de vacíos	Comprobación Polígono de vacíos
Porcentaje Óptimo de Asfalto ( $P_b$ )	6.5	6.6	6.6
Gravedad Específica neta de la mezcla ( $G_{mb}$ )	2.317	2.329	2.315
Vacíos de Aire ( $V_a$ )	4	4.1	4.22
Vacíos del Agregado Mineral (VMA)	75.1	74.2	73.78
Vacíos Rellenos de Asfalto (VFA)	16.1	15.7	16.07
Estabilidad (Lb)	3348.8	-	3231.93
Flujo (0.01")	13	-	14

En la Tabla 4.15 se registran los resultados del diseño desarrollado a lo largo de la investigación por medio de la metodología Marshall, el polígono de vacíos y la comprobación física de la dosificación obtenida mediante este último método.

Se puede evidenciar que se cumplen los requerimientos de vacíos en cada uno de los diseños, y los valores obtenidos son bastante cercanos entre sí. El porcentaje óptimo de asfalto obtenido mediante la metodología Marshall es igual a 6.5 % mientras que el porcentaje óptimo obtenido mediante el método del polígono de vacíos es de 6.6 %, lo que implica una diferencia de solo el 0.1 % entre ambas metodologías.

Según la normativa MTOP (2002) el hormigón asfáltico producido en planta debe cumplir con la fórmula maestra, permitiendo una tolerancia de hasta  $\pm 0.3\%$  en peso en el contenido de asfalto.

Con respecto a la gravedad específica neta de la mezcla, la variación entre los valores obtenidos es menor al 1 %, y esto se debe a que el valor de la gravedad específica efectiva del agregado utilizado en el método Marshall es obtenido mediante el Ensayo RICE, por lo tanto, es el real. Y por otra parte, el valor de  $G_{se}$  aplicado en el método del polígono de vacíos es el obtenido de manera teórica, y este valor es mayor al real debido a que la absorción de agua en el agregado es superior a la absorción de asfalto como se explicó en la sección “Obtención de la gravedad específica efectiva de los agregados ( $G_{se}$ )”.

## 4.11 Validación de la metodología del polígono de vacíos

A continuación, se evidenciarán las diferencias entre los resultados obtenidos en los dos diseños analizados de la Planta de Asfalto de la Municipalidad de Cuenca. Las Tablas 4.16 (Diseño 1) y 4.17 (Diseño 2) presentan los resultados obtenidos en cada característica de la mezcla en las dos metodologías.

Tabla 4.16: Comparación de resultados en Diseño 1.

Características de la Mezcla	Marshall	Polígono de Vacíos
Porcentaje Óptimo de Asfalto ( $P_b$ )	6.5	6.5
Gravedad Específica Neta de la mezcla ( $G_{mb}$ )	2.292	2.296
% de Vacíos de Aire ( $V_a$ )	4.1	4.1
% Vacíos del Agregado Mineral (VMA)	15.9	15.7
% Vacíos Rellenos de Asfalto (VFA)	74.1	74.2

Tabla 4.17: Comparación de resultados en Diseño 2.

Características de la Mezcla	Marshall	Polígono de Vacíos
Porcentaje Óptimo de Asfalto ( $P_b$ )	6.5	6.3
Gravedad Específica Neta de la mezcla ( $G_{mb}$ )	2.309	2.321
% de Vacíos de Aire ( $V_a$ )	4.18	4.1
% Vacíos del Agregado Mineral (VMA)	16.3	15.7
% Vacíos Rellenos de Asfalto (VFA)	74.4	74.2

Como se puede observar en el primer diseño, porcentaje óptimo de asfalto obtenido por Marshall es el mismo al obtenido por el método del polígono de vacíos, y las especificaciones de vacíos no presentan mucha diferencia entre los valores obtenidos entre un método y otro.

En el caso del segundo diseño, el porcentaje óptimo de asfalto obtenido mediante Marshall es igual a 6.5 y este es mayor en un 0.2 % al porcentaje obtenido mediante la metodología del polígono de vacíos. Esto se puede traducir en un ahorro de asfalto para la planta, pero es necesario realizar la comprobación del método mediante Marshall para verificar que todos los resultados obtenidos en laboratorio sean similares a los obtenidos de forma analítica.

# Capítulo 5

## Conclusiones y Recomendaciones

En base a toda la teoría analizada, los ensayos realizados y el software programado, se establecen una serie de conclusiones con respecto al funcionamiento de la metodología del polígono de vacíos y su adaptación al entorno local. Así también, se presentan recomendaciones con respecto a la metodología analizada para futuras investigaciones.

### 5.1 Conclusiones

Con el estudio realizado, se determinó que es factible la implementación de la metodología del polígono de vacíos, para materiales utilizados en el diseño de mezclas asfálticas dentro de la ciudad de Cuenca, debido a que los resultados obtenidos mediante el software que se implementó, no presentan diferencias significativas con los resultados obtenidos mediante la metodología de diseño tradicional, es decir, el Método Marshall.

El método del polígono de vacíos permite una rápida obtención de un porcentaje de ligante bituminoso óptimo, dado que es un método analítico basado únicamente en tres ecuaciones matemáticas, provenientes de la metodológica Marshall, y garantiza el cumplimiento de los parámetros volumétricos. Esto es favorable debido a que reduce el número de puntos de porcentaje de asfalto que normalmente se necesitan en el método de Marshall. Realizado el diseño, las briquetas deben ser ensayadas por medio de Marshall, de forma que, se corroboren los resultados. Con esto se obtiene un ahorro significativo de tiempo y recursos para la obtención del diseño de mezcla en caliente, así como para el control de calidad.

Para determinar el porcentaje óptimo de asfalto mediante la metodología del polígono de vacíos se implementó un software, a través de la herramienta App Designer en Matlab. El software permite al usuario obtener el contenido de asfalto de forma automatizada en función de las gravedades específicas netas y aparentes de los materiales y mediante las especificaciones de vacíos bajo las cuales se va a basar el diseño.



El software desarrollado permite optimizar el diseño ya que consta de dos partes, la primera corresponde a una ventana destinada para el diseño de la combinación de agregados. Dentro de esta primera parte se acepta el ingreso de hasta 4 materiales diferentes. El usuario puede determinar los porcentajes de cada agregado que le ofrezcan una granulometría final, que cumpla con las especificaciones de la norma escogida. La segunda parte del software presenta como resultado final el contenido óptimo de asfalto, la gravedad específica neta de la mezcla y los porcentajes de vacíos que le corresponden al centroide del polígono.

Para validar los resultados obtenidos se comparó el diseño de la mezcla asfáltica con el diseño desarrollado según la metodología Marshall. Para esto, se fabricaron 15 briquetas, que proporcionan 5 puntos para determinar el porcentaje óptimo de asfalto. Se obtuvo una diferencia entre los contenidos de asfalto resultantes de los dos métodos del 0.1 %.

Adicionalmente, se evaluaron dos diseños ya establecidos en la Planta de Asfalto de la Municipalidad de Cuenca, y se evidenció una diferencia del 0.2 % en el contenido de asfalto en un caso y en el otro no se encontró variación en el resultado del diseño. Lo cual valida la metodología empleada de polígonos de vacíos y el software desarrollado.

Vale la pena indicar que, para lograr la aproximación entre el resultado del método del polígono de vacíos con el determinado por el método de Marshall, para materiales de la zona, fue necesario calibrar los valores de los datos de entrada de las especificaciones. Para esto, se corrió el programa, cambiando los límites de vacíos que influyen en el método, de manera que se busque una cercanía del valor de vacíos de aire al 4 %. Debido a que un valor cercano al 3 % expone a la carpeta asfáltica a sufrir inestabilidad debido al flujo plástico, y por otro lado, cuando el porcentaje de vacíos de aire es cercano al límite superior se tiende a relacionar con mezclas de alta permeabilidad.

Se concluye, que los límites de vacíos de aire corresponden a un rango entre 3.5 y 4.5 %, de esta manera, el usuario limita al programa a encontrar un porcentaje óptimo de asfalto, con un contenido de vacíos de aire cercano al recomendado del 4 %. Además, considerando los resultados de diseño mediante Marshall con respecto a los vacíos del agregado mineral, se estableció un límite superior de 4 puntos mayor al mínimo.

Es necesario mencionar que, independiente la metodología a aplicarse, para la elaboración de la mezcla se debe primero verificar que los agregados cumplan con las especificaciones técnicas según los requerimientos establecidos dentro de la Norma MTOP (2002) o NEVI-12 (2013), según sea el caso del diseño.

## 5.2 Recomendaciones

### 5.2.1 Recomendaciones para el uso del método mediante el software desarrollado

Dado que, los resultados del método del polígono de vacíos se ven directamente afectados por el valor que corresponde a la gravedad específica efectiva y neta de los agregados, se recomienda realizar y analizar correctamente los ensayos en laboratorio, mediante el uso correcto de las normativas vigentes.

Se recomienda la calibración de los valores para los límites de vacíos según la procedencia de los agregados, de manera que se pueda establecer un límite superior para el porcentaje de vacíos del agregado mineral, valor que no se encuentra establecido en la normativa, únicamente se cuenta con un valor mínimo. Esta recomendación se la hace debido a que el método es bastante sensible a los valores de las especificaciones de vacíos ingresados.

Es importante mencionar la necesidad de fabricar las briquetas según los datos obtenidos del software para ser ensayadas mediante la metodología Marshall, con el fin verificar los resultados y realizar posibles correcciones.

### 5.2.2 Recomendaciones para investigaciones futuras

Se recomienda desarrollar futuras investigaciones dirigidas a analizar el porcentaje de vacíos en el agregado mineral, con mezclas asfálticas en caliente que empleen diferentes combinaciones de agregados de todo el país. Con el objetivo de determinar un rango de valores, que contenga los porcentajes de vacíos en el agregado mineral. Esto ayudaría a realizar una calibración generalizada por zona o ciudad de todo el Ecuador.

Para desarrollar la validación de los material a ser utilizado en el diseño de una mezcla asfáltica, se recomienda realizar todos los ensayos estipulados en la normativa, de forma que el diseñador garantice usar un agregado granular adecuado para el diseño.

Se podría considerar desarrollar un software independiente, el cual no tenga que ser usado mediante el paquete Matlab.

# Bibliografía

- AASHTO T 104 (2003). *Standard Method of Test for Soundness of Aggregate by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate*. American Association of State Sighway and Transportation Officials.
- AASHTO T 176 (2007). *Standard Method of Test for Plastic Fines in Graded Aggregates and Soils by Use of the Sand Equivalent Test*. American Association of State Sighway and Transportation Officials.
- AASHTO T 210 (2015). *Standard Method of Test for Aggregate Durability Index*. American Association of State Sighway and Transportation Officials.
- AASHTO T 304 (2007). *Standard Method of Test for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate*. American Association of State Sighway and Transportation Officials.
- AASHTO T 84 (1984). *Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregates*. American Association of State Sighway and Transportation Officials.
- AASHTO T 85 (2014). *Standard Method of Test for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate*. American Association of State Sighway and Transportation Officials.
- AASHTO T 96 (2002). *Standard Method of Test for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*. American Association of State Sighway and Transportation Officials.
- ASTM C 1252 (2003). *Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading)*. American Society of Testing Materials.
- ASTM C 127 (1993). *Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate*. American Society of Testing Materials.
- ASTM C 128 (2007). *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. American Society of Testing Materials.
- ASTM C 131 (2001). *Método de Ensayo Normalizado para la resistencia a la degradación de los áridos gruesos de tamaño pequeño por el método de abrasión e impacto en la Máquina Ángeles*. American Society of Testing Materials.
- ASTM C 88 (2013). *Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate*. American Society of Testing Materials.
- ASTM D 1559 (1976). *Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus*. American Society of Testing Materials.





- ASTM D 2041 (2000). *Gravedad específica teórica máxima y densidad de mezclas bituminosas (ensayo RICE)*. American Society of Testing Materials.
- ASTM D 2419 (2002). *Método de Ensayo Estándar para Valor Equivalente de Arena de Suelos y Agregado Fino*. American Society of Testing Materials.
- ASTM D 3515 (2013). *Standard Specification for Hot-Mixed, Hot-Laid Bituminous Paving Mixtures*. American Society of Testing Materials.
- ASTM D 3744 (1997). *Standard Test Method for Aggregate Durability Index*. American Society of Testing Materials.
- ASTM D 4318 (2000). *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. American Society of Testing Materials.
- ASTM D 4791 (2010). *Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate*. American Society of Testing Materials.
- ASTM D 5821 (2013). *Standard Test Method for Determining the Porcentaje of Fractured Particles in Coarse Aggregate*. American Society of Testing Materials.
- Auccahuaqui Yanque, I. and Corahua Hilaquita, R. (2016). Evaluación del sistema de pavimentos flexibles en la prolongación de la av. la cultura tramo (4to paradero de san sebastián- grifo mobil de san jerónimo).
- Delgado Alamilla, H., Garnica Anguas, P., Villatoro Mendez, G., and Rodriguez Oropeza, G. (2006). *Influencia de la granulometría en las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica*. Secretaría de Comunicaciones y Transporte.
- Garnica Anguas, P., Delgado Alamilla, H., Romero, S., and Alarcón Orta, H. (2004). *Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas*. Secretaría de Comunicaciones y Transporte.
- Garnica Anguas, P., Delgado Alamilla, H., and Sandoval Sandoval, C. (2005). *Caracterización geomecánica de mezclas asfálticas*. Secretaría de Comunicaciones y Transporte.
- INEN 691 (2005). *Mecánica de suelos. Determinación del límite líquido. Método de Casa-grande*. Norma Técnica Ecuatoriana del Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- INEN 692 (2005). *Mecánica de suelos. Determinación del límite plástico*. Norma Técnica Ecuatoriana del Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- INEN 696 (2011). *Aridos. Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso*. Norma Técnica Ecuatoriana del Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- INEN 856 (2010). *Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (Gravedad Específica) y absorción del Árido Fino*. Norma Técnica Ecuatoriana del Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- INEN 857 (2010). *Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa ( gravedad específica) y absorción del árido grueso*. Norma Técnica Ecuatoriana del Instituto Ecuatoriano de Normalización.



- INEN 860 (2011). *Áridos. Determinación del valor de la degradación del árido grueso de partículas menores a 37.5mm mediante el uso de la Máquina de los Ángeles*. Norma Técnica Ecuatoriana del Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- INEN 863 (2011). *Áridos. Determinación de la solidez de los áridos mediante el uso de sulfato de sodio o de sulfato de magnesio*. Norma Técnica Ecuatoriana del Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- INVE 158 (2007). *Determinación del contenido de sales solubles de los suelos*. Instituto Nacional de Vías.
- INVE 227 (2007). *Porcentaje de Caras Fracturadas en los Agregados*. Instituto Nacional de Vías.
- INVE 230 (2007). *Índice de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras*. Instituto Nacional de Vías.
- INVE 740 (2007). *Adherencia en bandeja*. Instituto Nacional de Vías.
- INVE 774 (2007). *Adhesividad de los ligantes bituminosos a los agregados finos.(Método Riedel-Weber)*. Instituto Nacional de Vías.
- Marín, C. and Thenoux, G. (2014). Validation of the polygon-of-voids tool for asphalt mixtures with rap. *Revista de la construcción*, pages 56–63.
- Menéndez Acurio, J. R. (2009). *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras*. Instituto de la Construcción y Gerencia.
- Miranda Rebolledo, R. (2010). Deterioro en pavimentos flexibles y rígidos.
- Montejo Fonseca, A. (2002). *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras*. Universidad Católica de Colombia.
- MTOP (2002). 82 años construyendo obras viales en el Ecuador . *Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador*.
- Méndez González, G. R., Morán Gutiérrez, J. E., and Pineda Ramos, L. C. (2014). Diseño de mezcla asfáltica tibia, mediante la metodología marshall, utilizando asfalto espumado.
- NEVI-12 (2013). *Volumen N°3 Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes*. Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador.
- NLT 168 (1990). *Densidad y Huecos en mezclas bituminosas compactadas*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.
- NLT 355 (1993). *Adhesividad de los ligantes bituminosos a los áridos finos.(Método Riedel-Weber)*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.
- Ochoa, R. and Grimaldo, G. (2018). Validación del polígono de vacíos en el diseño de mezclas bituminosas con alquitrán de hulla como ligante. *Revista Ingeniería de Construcción RIC*, pages 137–146.



- Ochoa Diaz, R. (2012). Diseño de mezclas bituminosas para pavimentos con alquitrán, usando las metodologías marshall y ramcodes. *RESPUESTAS, Revista de Universidad Francisco de Paula Santander*, pages 63–70.
- Pincay Bermello, J. J., Zuñiga Suarez, A. R., and Córdova Rizo, F. J. (2018). *Análisis comparativo entre la aplicación de Metodología RAMCODES y el método Marshall como alternativa para la obtención del contenido óptimo de asfalto para el diseño de mezclas asfálticas*. Grupo Compás.
- Subsecretaría de Infraestructura del Transporte (2020). Mapa del estado de la red vial estatal. *Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador*.
- Sánchez, F., Garnica, P., Larreal, M., and Lopez, D. (2011). Polyvoids: Analytical tool for superpave hma design. *Engineering, Journal of Materials in Civil*, pages 1129–1137.
- Sánchez-Leal, F. J. (n.d). *Aplicación del método RAMCODES en el diseño de mezclas asfálticas de alto desempeño*. RAMCODES de Venezuela, C.A.
- Sánchez-Leal, F. J., Garnica Anguas, P., Gómez López, J. A., and Pérez García, N. (2002). *Ramcodes : Metodología racional para el análisis de densificación y Resistencia de Geomateriales Compactados*. Secretaría de Comunicaciones y Transporte.
- Velez Dávila, P. E. (2012). Comprobación de las correlaciones de la presión de expansión con las propiedades índices en suelos del sector challuabamba, cuenca, recomendaciones para la construcción de cimentaciones.
- Verdezoto, P. A. (2006). Levamntamiento geológico del sector comprendido entre las latitudes 2°37's y 2°50's, provincias de cañar y azuay, con especial enfoque sobre las secuencias miocénicas.

# Anexos

# Apéndice A

## Codificación del Software

### A.1 Código completo de la igualación entre vectores para encontrar las intersecciones de las isolíneas

```
%Igualación entre rectas para encontrar el valor de Pb, donde de
intersectan las isolíneas
%Los valores de intersecciones, se guardan en una matriz de 10*2
syms auxPb1
ceros(1,1)=solve((1-auxVa_max)/((auxPb1/Gb_def)+(1-auxPb1)/Gse_def))
-((1-auxVMA_min)/(1-auxPb1))*Gsb_def==0,auxPb1);
%Pb1: Intersección entre Va_max y VMA_min
ceros(2,1)=solve((1-auxVa_min)/((auxPb1/Gb_def)+(1-auxPb1)/Gse_def))
-((1-auxVMA_min)/(1-auxPb1))*Gsb_def==0,auxPb1);
%Pb2: Intersección entre Va_min y VMA_min
ceros(3,1)=solve((1-auxVa_min)/((auxPb1/Gb_def)+(1-auxPb1)/Gse_def))
-((1-auxVMA_max)/(1-auxPb1))*Gsb_def==0,auxPb1);
%Pb3: Intersección entre Va_min y VMA_max
ceros(4,1)=solve((1-auxVa_max)/((auxPb1/Gb_def)+(1-auxPb1)/Gse_def))
-((1-auxVMA_max)/(1-auxPb1))*Gsb_def==0,auxPb1);
%Pb4: Intersección entre Va_max y VMA_max
ceros(5,1)=solve(((1-auxVMA_min)/(1-auxPb1))*Gsb_def-(auxVFA_min)/((
auxPb1/Gb_def)+(1-auxPb1)/Gse_def)-(1-auxVFA_min)*((1-auxPb1)/
Gsb_def))==0,auxPb1); %Pb5: Intersección entre VFA_min y VMA_min
ceros(6,1)=solve(((1-auxVMA_min)/(1-auxPb1))*Gsb_def-(auxVFA_max)/((
auxPb1/Gb_def)+(1-auxPb1)/Gse_def)-(1-auxVFA_max)*((1-auxPb1)/
Gsb_def))==0,auxPb1); %Pb6: Intersección entre VFA_max y VMA_min
ceros(7,1)=solve(((1-auxVMA_max)/(1-auxPb1))*Gsb_def-(auxVFA_max)/((
auxPb1/Gb_def)+(1-auxPb1)/Gse_def)-(1-auxVFA_max)*((1-auxPb1)/
Gsb_def))==0,auxPb1); %Pb7: Intersección entre VFA_max y VMA_max
ceros(8,1)=solve(((1-auxVMA_max)/(1-auxPb1))*Gsb_def-(auxVFA_min)/((
auxPb1/Gb_def)+(1-auxPb1)/Gse_def)-(1-auxVFA_min)*((1-auxPb1)/
Gsb_def))==0,auxPb1); %Pb8: Intersección entre VFA_min y VMA_max
ceros(9,1)=solve((1-auxVa_min)/((auxPb1/Gb_def)+(1-auxPb1)/Gse_def))-
(auxVFA_max)/((auxPb1/Gb_def)+(1-auxPb1)/Gse_def)-(1-auxVFA_max)
*((1-auxPb1)/Gsb_def))==0,auxPb1); %Pb9: Intersección entre
VFA_max y Va_min
ceros(10,1)=solve((1-auxVa_max)/((auxPb1/Gb_def)+(1-auxPb1)/Gse_def))
-(auxVFA_min)/((auxPb1/Gb_def)+(1-auxPb1)/Gse_def)-(1-auxVFA_min)
```



```
*((1-auxPb1)/Gsb_def))==0,auxPb1); %Pb10: Intersección entre VFA_min
y Va_max
ceros(11,1)=solve((1-auxVa_max)/((auxPb1/Gb_def)+((1-auxPb1)/Gse_def))
-(auxVFA_max)/((auxPb1/Gb_def)+((1-auxPb1)/Gse_def)-(1-auxVFA_max)
*((1-auxPb1)/Gsb_def))==0,auxPb1); %Pb11: Intersección entre VFA_max
y Va_max
ceros(12,1)=solve((1-auxVa_min)/((auxPb1/Gb_def)+((1-auxPb1)/Gse_def))
-(auxVFA_min)/((auxPb1/Gb_def)+((1-auxPb1)/Gse_def)-(1-auxVFA_min)
*((1-auxPb1)/Gsb_def))==0,auxPb1); %Pb12: Intersección entre VFA_min
y Va_min
```

Código A.1: Código completo de la igualación entre vectores para encontrar las intersecciones de las isolineas

## A.2 Código implementado para la determinación de la combinación de agregados

```
% Selección de la opción de la faja granulométrica
selectedButton = app.ButtonGroup.SelectedObject;
mac1=app.A.Value;
mac2=app.B.Value;
mac3=app.C.Value;
nevi1=app.D.Value;
nevi2=app.E.Value;
nevi3=app.F.Value;
nevi4=app.G.Value;

%asignacion de tamices, y límites máximos y mínimos de
acuerdo a la faja escogida, valores guardados en dos
matrices de 9*2.
if mac1==1
    mactamiz(1,2)="25";           mactamiz(1,1)="1";
    mactamiz(2,2)="19";           mactamiz(2,1)="3/4";
    mactamiz(3,2)="12.5";         mactamiz(3,1)="1/2";
    mactamiz(4,2)="9.5";          mactamiz(4,1)="3/8";
    mactamiz(5,2)="4.75";         mactamiz(5,1)="4";
    mactamiz(6,2)="2";            mactamiz(6,1)="10";
    mactamiz(7,2)="0.425";        mactamiz(7,1)="40";
    mactamiz(8,2)="0.180";        mactamiz(8,1)="80";
    mactamiz(9,2)="0.075";        mactamiz(9,1)="200";

    mac(1,1)=100;                 mac(1,2)=100;
    mac(2,1)=90;                  mac(2,2)=80;
    mac(3,1)=85;                  mac(3,2)=67;
    mac(4,1)=77;                  mac(4,2)=60;
    mac(5,1)=54;                  mac(5,2)=43;
    mac(6,1)=45;                  mac(6,2)=29;
    mac(7,1)=25;                  mac(7,2)=14;
    mac(8,1)=17;                  mac(8,2)=8;
    mac(9,1)=8;                   mac(9,2)=4;

    diametro=19;
elseif mac2==1
```



```
mactamiz(1,2)="25";          mactamiz(1,1)="1";
mactamiz(2,2)="19";          mactamiz(2,1)="3/4";
mactamiz(3,2)="12.5";        mactamiz(3,1)="1/2";
mactamiz(4,2)="9.5";         mactamiz(4,1)="3/8";
mactamiz(5,2)="4.75";        mactamiz(5,1)="#4";
mactamiz(6,2)="2";           mactamiz(6,1)="#10";
mactamiz(7,2)="0.425";       mactamiz(7,1)="#40";
mactamiz(8,2)="0.180";       mactamiz(8,1)="#80";
mactamiz(9,2)="0.075";       mactamiz(9,1)="#200";

mac(1,1)=100;                mac(1,2)=100;
mac(2,1)=100;                mac(2,2)=100;
mac(3,1)=100;                mac(3,2)=80;
mac(4,1)=88;                 mac(4,2)=70;
mac(5,1)=68;                 mac(5,2)=51;
mac(6,1)=52;                 mac(6,2)=38;
mac(7,1)=28;                 mac(7,2)=17;
mac(8,1)=17;                 mac(8,2)=8;
mac(9,1)=8;                  mac(9,2)=5;
diametro=12.5;

elseif mac3==1
  mactamiz(1,2)="25";          mactamiz(1,1)="1";
  mactamiz(2,2)="19";          mactamiz(2,1)="3/4";
  mactamiz(3,2)="12.5";        mactamiz(3,1)="1/2";
  mactamiz(4,2)="9.5";         mactamiz(4,1)="3/8";
  mactamiz(5,2)="4.75";        mactamiz(5,1)="#4";
  mactamiz(6,2)="2";           mactamiz(6,1)="#10";
  mactamiz(7,2)="0.425";       mactamiz(7,1)="#40";
  mactamiz(8,2)="0.180";       mactamiz(8,1)="#80";
  mactamiz(9,2)="0.075";       mactamiz(9,1)="#200";

  mac(1,1)=100;                mac(1,2)=100;
  mac(2,1)=100;                mac(2,2)=100;
  mac(3,1)=100;                mac(3,2)=100;
  mac(4,1)=100;                mac(4,2)=100;
  mac(5,1)=87;                 mac(5,2)=65;
  mac(6,1)=61;                 mac(6,2)=43;
  mac(7,1)=29;                 mac(7,2)=16;
  mac(8,1)=19;                 mac(8,2)=9;
  mac(9,1)=10;                 mac(9,2)=5;
  diametro=4.75;

elseif nevi1==1
  mactamiz(1,2)="25.4";        mactamiz(1,1)="1";
  mactamiz(2,2)="19";          mactamiz(2,1)="3/4";
  mactamiz(3,2)="9.5";         mactamiz(3,1)="3/8";
  mactamiz(4,2)="4.75";        mactamiz(4,1)="#4";
  mactamiz(5,2)="2.36";        mactamiz(5,1)="#8";
  mactamiz(6,2)="0.3";         mactamiz(6,1)="#50";
  mactamiz(7,2)="0.075";       mactamiz(7,1)="#200";
  mactamiz(8,2)="--";          mactamiz(8,1)="--";
  mactamiz(9,2)="--";          mactamiz(9,1)="--";

  mac(1,1)=100;                mac(1,2)=100;
  mac(2,1)=100;                mac(2,2)=90;
  mac(3,1)=80;                 mac(3,2)=56;
  mac(4,1)=65;                 mac(4,2)=35;
```



```
mac(5,1)=49;          mac(5,2)=23;
mac(6,1)=19;          mac(6,2)=5;
mac(7,1)=8;           mac(7,2)=2;
mac(8,1)=0;           mac(8,2)=0;
mac(9,1)=0;           mac(9,2)=0;
diametro=19;

elseif nevi2==1
mactamiz(1,2)="19";    mactamiz(1,1)="3/4";
mactamiz(2,2)="12.7"; mactamiz(2,1)="1/2";
mactamiz(3,2)="4.75"; mactamiz(3,1)="4";
mactamiz(4,2)="2.36"; mactamiz(4,1)="8";
mactamiz(5,2)="0.3";  mactamiz(5,1)="50";
mactamiz(6,2)="0.075"; mactamiz(6,1)="200";
mactamiz(7,2)="--";   mactamiz(7,1)="--";
mactamiz(8,2)="--";   mactamiz(8,1)="--";
mactamiz(9,2)="--";   mactamiz(9,1)="--";

mac(1,1)=100;         mac(1,2)=100;
mac(2,1)=100;         mac(2,2)=90;
mac(3,1)=74;          mac(3,2)=44;
mac(4,1)=58;          mac(4,2)=28;
mac(5,1)=21;          mac(5,2)=5;
mac(6,1)=10;          mac(6,2)=2;
mac(7,1)=0;           mac(7,2)=0;
mac(8,1)=0;           mac(8,2)=0;
mac(9,1)=0;           mac(9,2)=0;
diametro=12.7;

elseif nevi3==1
mactamiz(1,2)="12.7"; mactamiz(1,1)="1/2";
mactamiz(2,2)="9.5";  mactamiz(2,1)="3/8";
mactamiz(3,2)="4.75"; mactamiz(3,1)="4";
mactamiz(4,2)="2.36"; mactamiz(4,1)="8";
mactamiz(5,2)="0.3";  mactamiz(5,1)="50";
mactamiz(6,2)="0.075"; mactamiz(6,1)="200";
mactamiz(7,2)="--";   mactamiz(7,1)="--";
mactamiz(8,2)="--";   mactamiz(8,1)="--";
mactamiz(9,2)="--";   mactamiz(9,1)="--";

mac(1,1)=100;         mac(1,2)=100;
mac(2,1)=100;         mac(2,2)=90;
mac(3,1)=85;          mac(3,2)=55;
mac(4,1)=67;          mac(4,2)=32;
mac(5,1)=23;          mac(5,2)=7;
mac(6,1)=10;          mac(6,2)=2;
mac(7,1)=0;           mac(7,2)=0;
mac(8,1)=0;           mac(8,2)=0;
mac(9,1)=0;           mac(9,2)=0;

diametro=9.5;
elseif nevi4==1
mactamiz(1,2)="9.5";  mactamiz(1,1)="3/8";
mactamiz(2,2)="4.75"; mactamiz(2,1)="4";
mactamiz(3,2)="2.36"; mactamiz(3,1)="8";
mactamiz(4,2)="1.18"; mactamiz(4,1)="16";
mactamiz(5,2)="0.6";  mactamiz(5,1)="30";
mactamiz(6,2)="0.3";  mactamiz(6,1)="50";
```





```
mactamiz(7,2)="0.15";           mactamiz(7,1)="#100";
mactamiz(8,2)="0.075";         mactamiz(8,1)="#200";
mactamiz(9,2)="--";           mactamiz(9,1)="--";

mac(1,1)=100;                   mac(1,2)=100;
mac(2,1)=100;                   mac(2,2)=80;
mac(3,1)=100;                   mac(3,2)=65;
mac(4,1)=80;                    mac(4,2)=40;
mac(5,1)=65;                    mac(5,2)=25;
mac(6,1)=40;                    mac(6,2)=7;
mac(7,1)=20;                    mac(7,2)=3;
mac(8,1)=10;                    mac(8,2)=2;
mac(9,1)=0;                     mac(9,2)=0;

diametro=4.75;
end
% Impresión de resultados en la ventana para la visualización
% del usuario
app.diam.Value=diametro;

app.obs1_2.Value=mactamiz(1,1);
app.obs2_2.Value=mactamiz(2,1);
app.obs3_2.Value=mactamiz(3,1);
app.obs4_2.Value=mactamiz(4,1);
app.obs5_2.Value=mactamiz(5,1);
app.obs6_2.Value=mactamiz(6,1);
app.obs7_2.Value=mactamiz(7,1);
app.obs8_2.Value=mactamiz(8,1);
app.obs9_2.Value=mactamiz(9,1);

app.obs1_3.Value=mactamiz(1,2);
app.obs2_3.Value=mactamiz(2,2);
app.obs3_3.Value=mactamiz(3,2);
app.obs4_3.Value=mactamiz(4,2);
app.obs5_3.Value=mactamiz(5,2);
app.obs6_3.Value=mactamiz(6,2);
app.obs7_3.Value=mactamiz(7,2);
app.obs8_3.Value=mactamiz(8,2);
app.obs9_3.Value=mactamiz(9,2);

app.a_2.Value=mac(1,1);
app.b_2.Value=mac(2,1);
app.c_2.Value=mac(3,1);
app.d_2.Value=mac(4,1);
app.e_2.Value=mac(5,1);
app.f_2.Value=mac(6,1);
app.g_2.Value=mac(7,1);
app.h_2.Value=mac(8,1);
app.i_2.Value=mac(9,1);

app.a_3.Value=mac(1,2);
app.b_3.Value=mac(2,2);
app.c_3.Value=mac(3,2);
app.d_3.Value=mac(4,2);
app.e_3.Value=mac(5,2);
app.f_3.Value=mac(6,2);
app.g_3.Value=mac(7,2);
```



```
app.h_3.Value=mac(8,2);
app.i_3.Value=mac(9,2);
```

```
%Se guarda en 4 vectores los porcentajes que pasan cada tamiz
ingresados por el usuario.
```

```
mat1(1)=app.m1a.Value;      mat2(1)=app.m2a.Value;
mat1(2)=app.m1b.Value;      mat2(2)=app.m2b.Value;
mat1(3)=app.m1c.Value;      mat2(3)=app.m2c.Value;
mat1(4)=app.m1d.Value;      mat2(4)=app.m2d.Value;
mat1(5)=app.m1e.Value;      mat2(5)=app.m2e.Value;
mat1(6)=app.m1f.Value;      mat2(6)=app.m2f.Value;
mat1(7)=app.m1g.Value;      mat2(7)=app.m2g.Value;
mat1(8)=app.m1h.Value;      mat2(8)=app.m2h.Value;
mat1(9)=app.m1i.Value;      mat2(9)=app.m2i.Value;
```

```
mat3(1)=app.m3a.Value;      mat4(1)=app.m4a.Value;
mat3(2)=app.m3b.Value;      mat4(2)=app.m4b.Value;
mat3(3)=app.m3c.Value;      mat4(3)=app.m4c.Value;
mat3(4)=app.m3d.Value;      mat4(4)=app.m4d.Value;
mat3(5)=app.m3e.Value;      mat4(5)=app.m4e.Value;
mat3(6)=app.m3f.Value;      mat4(6)=app.m4f.Value;
mat3(7)=app.m3g.Value;      mat4(7)=app.m4g.Value;
mat3(8)=app.m3h.Value;      mat4(8)=app.m4h.Value;
mat3(9)=app.m3i.Value;      mat4(9)=app.m4i.Value;
```

```
%Asigancion a variables de los porcentajes de cada agregado
```

```
pm1=app.m1.Value;
pm2=app.m2.Value;
pm3=app.m3.Value;
pm4=app.m4.Value;
```

```
%calculo de la granulometría final.
```

```
gfinal=mat1*(pm1/100)+mat2*(pm2/100)+mat3*(pm3/100)+mat4*(
    pm4/100);
```

```
%Suma de los porcentajes, para comprobar que la suma sea100
app.porcentaje.Value=pm1+pm2+pm3+pm4;
```

```
%Matriz con los valores máximos y mínimos para la
comprobacion de la granulometría final.
```

```
macc(1,1)=app.a_2.Value;
macc(2,1)=app.b_2.Value;
macc(3,1)=app.c_2.Value;
macc(4,1)=app.d_2.Value;
macc(5,1)=app.e_2.Value;
macc(6,1)=app.f_2.Value;
macc(7,1)=app.g_2.Value;
macc(8,1)=app.h_2.Value;
macc(9,1)=app.i_2.Value;
```

```
macc(1,2)= app.a_3.Value;
macc(2,2)=app.b_3.Value;
```



```
macc(3,2)=app.c_3.Value;
macc(4,2)=app.d_3.Value;
macc(5,2)=app.e_3.Value;
macc(6,2)=app.f_3.Value;
macc(7,2)=app.g_3.Value;
macc(8,2)=app.h_3.Value;
macc(9,2)=app.i_3.Value;

%condicion para comprobar la suma de los porcentajes
if app.porcentaje.Value==100
    z="OK";
    app.obs0.Value=z;
    app.a.Value=gfinal(1);
    app.b.Value=gfinal(2);
    app.c.Value=gfinal(3);
    app.d.Value=gfinal(4);
    app.e.Value=gfinal(5);
    app.f.Value=gfinal(6);
    app.g.Value=gfinal(7);
    app.h.Value=gfinal(8);
    app.i.Value=gfinal(9);

%Comprobación de la granulometría final con los límites
de la faja escogida.
for j=1:9
    if gfinal(j)>=macc(j,2) && gfinal(j)<=macc(j,1)
        y(j)="OK";
    else
        y(j)="ERROR";
    end
end

%Visualización de los resultados de la comprobación
app.obs1.Value=y(1);
app.obs2.Value=y(2);
app.obs3.Value=y(3);
app.obs4.Value=y(4);
app.obs5.Value=y(5);
app.obs6.Value=y(6);
app.obs7.Value=y(7);
app.obs8.Value=y(8);
app.obs9.Value=y(9);

%DATOS PARA LA GRÁFICA GRANULOMÉTRICA
%Vector de tamices para la gráfica
%Tamices para a gráfica que dependen de la faja
tamgraf=app.obs1_3.Value;

if tamgraf=="25"
    tamiz(1)=25;
    tamiz(2)=19;
    tamiz(3)=12.5;
    tamiz(4)=9.5;
    tamiz(5)=4.75;
    tamiz(6)=2;
    tamiz(7)=0.425;
    tamiz(8)=0.180;
    tamiz(9)=0.075;
```



```
elseif tamgraf=="25.4"
    tamiz(1)=25.4;
    tamiz(2)=19;
    tamiz(3)=9.5;
    tamiz(4)=4.75;
    tamiz(5)=2.36;
    tamiz(6)=0.3;
    tamiz(7)=0.075;
    tamiz(8)=0;
    tamiz(9)=0;

elseif tamgraf=="19"
    tamiz(1)=19;
    tamiz(2)=12.7;
    tamiz(3)=4.75;
    tamiz(4)=2.36;
    tamiz(5)=0.3;
    tamiz(6)=0.075;
    tamiz(7)=0;
    tamiz(8)=0;
    tamiz(9)=0;

elseif tamgraf=="12.7"

    tamiz(1)=12.7;
    tamiz(2)=9.5;
    tamiz(3)=4.75;
    tamiz(4)=2.36;
    tamiz(5)=0.3;
    tamiz(6)=0.075;
    tamiz(7)=0;
    tamiz(8)=0;
    tamiz(9)=0;

    elseif tamgraf=="9.5"

        tamiz(1)=9.5;
        tamiz(2)=4.75;
        tamiz(3)=2.36;
        tamiz(4)=1.18;
        tamiz(5)=0.6;
        tamiz(6)=0.3;
        tamiz(7)=0.15;
        tamiz(8)=0.075;
        tamiz(9)=0;

end

%vector con la granulometría final.
auxg(1)=app.a.Value;
auxg(2)=app.b.Value;
auxg(3)=app.c.Value;
auxg(4)=app.d.Value;
auxg(5)=app.e.Value;
auxg(6)=app.f.Value;
auxg(7)=app.g.Value;
auxg(8)=app.h.Value;
auxg(9)=app.i.Value;
```



```
%Vector que contiene al límite máximo de la franja de trabajo
mac(1,1)=app.a_2.Value;
mac(2,1)=app.b_2.Value;
mac(3,1)=app.c_2.Value;
mac(4,1)=app.d_2.Value;
mac(5,1)=app.e_2.Value;
mac(6,1)=app.f_2.Value;
mac(7,1)=app.g_2.Value;
mac(8,1)=app.h_2.Value;
mac(9,1)=app.i_2.Value;
%Vector que contiene al límite mínimo de la franja de trabajo
mac(1,2)=app.a_3.Value;
mac(2,2)=app.b_3.Value;
mac(3,2)=app.c_3.Value;
mac(4,2)=app.d_3.Value;
mac(5,2)=app.e_3.Value;
mac(6,2)=app.f_3.Value;
mac(7,2)=app.g_3.Value;
mac(8,2)=app.h_3.Value;
mac(9,2)=app.i_3.Value;

%Lineas para la división de tamices en el gráfico.
tamices(1,1)=25;
tamices(2,1)=25;
tamices(1,2)=19;
tamices(2,2)=19;
tamices(1,3)=12.5;
tamices(2,3)=12.5;
tamices(1,4)=9.5;
tamices(2,4)=9.5;
tamices(1,5)=4.75;
tamices(2,5)=4.75;
tamices(1,6)=2;
tamices(2,6)=2;
tamices(1,7)=0.425;
tamices(2,7)=0.425;
tamices(1,8)=0.180;
tamices(2,8)=0.18;
tamices(1,9)=0.075;
tamices(2,9)=0.075;
tamices(1,10)=100;
tamices(2,10)=0;

%Dirección de la gráfica.
app.granulometria.XAxis.Direction='reverse';

%gráfica granulométrica
semilogx(app.granulometria,tamiz, auxg,'--r', tamiz, mac
(:,1),'-kd', tamiz, mac(:,2),'-bd', tamices(:,1),
tamices(:,10),'k--', tamices(:,2), tamices(:,10), 'k--',
tamices(:,3), tamices(:,10), 'k--', tamices(:,4),
tamices(:,10), 'k--', tamices(:,5), tamices(:,10), 'k--'
,tamices(:,6), tamices(:,10), 'k--',tamices(:,7),
tamices(:,10), 'k--',tamices(:,8), tamices(:,10), 'k--',
tamices(:,9), tamices(:,10), 'k--');
xticks(app.granulometria, [0.0001 0.001 0.01 0.1 1 10
100]);
```



```
xticklabels(app.granulometria,{ '0.0001', '0.001', '0.01',  
    '0.1', '1', '10', '100'});  
text(app.granulometria,24,2,'1"');  
text(app.granulometria,18,2,'3/4"');  
text(app.granulometria,12,2,'1/2"');  
text(app.granulometria,9,2,'3/8"');  
text(app.granulometria,4.5,2,'#4');  
text(app.granulometria,1.95,2,'#10');  
text(app.granulometria,0.4,2,'#40');  
text(app.granulometria,0.17,2,'#80');  
text(app.granulometria,0.07,2,'#200');  
text(app.granulometria,40,2,'Tamiz');  
  
%en caso de que la suma de porcentajes no sea 100, sale una  
    ventana de emergencia.  
else  
    z="ERROR";  
    msgbox({'Revisar los porcentajes de los materiales'}, '  
        Advertencia', 'Advertencia');  
end
```

Código A.2: Código implementado para la determinación de la combinación de agregados

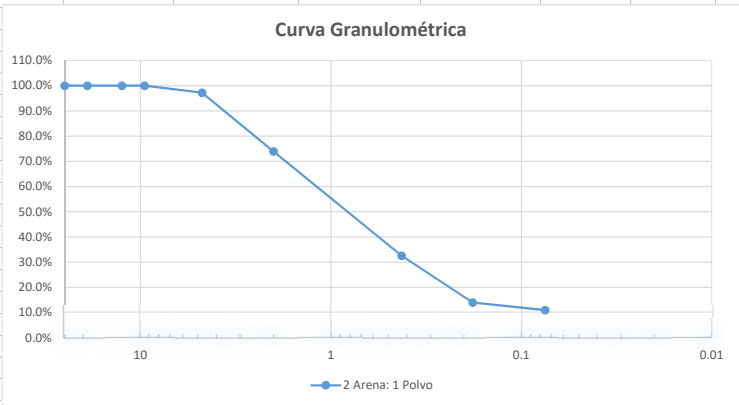


# Apéndice B

## Ensayos en laboratorio

### B.1 Análisis granulométrico de agregados

#### B.1.1 Granulometría: 2 Polvo: Arena

Análisis Granulométrico						
Realizado por:	Daniela Idrovo ,Estefania Guzmán					
Fecha de Inicio:	13 de Noviembre del 2020					
Fecha de Finalizacion:	16 de Noviembre del 2020					
Material:	2 Arena: 1 Polvo					
Procedencia del Material :	Planta de Asfalto de la Municipalidad					
Abertura (mm)	Tamiz	PESO RETENIDO PARCIAL	PESO RETENIDO ACUMULADO	% RETENIDO	%PASA POLVO +ARENA	
25 mm	1"	0	0	0.0%	100.0%	
19mm	3/4"	0	0	0.0%	100.0%	
12.5mm	1/2"	0	0	0.0%	100.0%	
9.5mm	3/8"	0	0	0.0%	100.0%	
4.75mm	#4	14.11	14.11	2.8%	97.2%	
2mm	#10	116.38	130.49	23.3%	73.9%	
425µm	#40	206.64	337.13	41.3%	32.6%	
180µm	#80	81.33	418.46	16.3%	14.0%	
75µm	#200	26.52	444.98	5.3%	11.0%	
Fondo		55.02	500	11.0%	0.0%	
Pasa Tamiz N° 4		g				
Peso antes del ensayo=	500	g	Peso antes del lavado =	200	g	
Peso despues del ensayo =	500	g	Peso despues del lavado =	145.3	g	
Curva Granulométrica						
						





### B.1.2 Granulometría: agregado grueso 3/4"

Análisis Granulométrico						
Realizado por:	Daniela Idrovo ,Estefania Guzmán					
Fecha de Inicio:	13 de Noviembre del 2020					
Fecha de Finalizacion:	16 de Noviembre del 2020					
Material:	Agregado Grueso 3/4"					
Procedencia del Material :	Planta de Asfalto de la Municipalidad					
Abertura (mm)	Tamiz	PESO RETENIDO PARCIAL	PESO RETENIDO ACUMULADO	% RETENIDO	%PASA 3/4"	
25 mm	1"	0	0	0.0%	100.0%	
19mm	3/4"	0	0	0.0%	100.0%	
12.5mm	1/2"	1041	1041	34.7%	65.3%	
9.5mm	3/8"	1105	2146	36.8%	28.5%	
4.75mm	#4	798.47	2944.47	26.6%	1.9%	
2mm	#10	19.12	2963.59	0.6%	1.2%	
425µm	#40	1.56	2965.15	0.1%	1.2%	
180µm	#80	5.03	2970.18	0.2%	1.0%	
75µm	#200	6.9	2977.08	0.2%	0.8%	
Fondo		22.92	3000	0.8%	0.0%	
Pasa Tamiz N° 4		g				
Peso antes del ensayo=	3000	g	Peso antes del lavado =		g	
Peso despues del ensayo =		g	Peso despues del lavado =		g	

#### Curva Granulométrica

Tamaño de Tamiz (mm)	% Pasa
25	100.0%
19	100.0%
12.5	65.3%
9.5	28.5%
4.75	1.9%
2	1.2%
425µm	1.2%
180µm	1.0%
75µm	0.8%
Fondo	0.0%



### B.1.3 Granulometría: agregado grueso 3/8"

Análisis Granulométrico						
Realizado por:	Daniela Idrovo ,Estefania Guzmán					
Fecha de Inicio:	13 de Noviembre del 2020					
Fecha de Finalizacion:	16 de Noviembre del 2020					
Material:	Agregado Grueso 3/8"					
Procedencia del Material :	Planta de Asfalto de la Municipalidad					
Abertura (mm)	Tamiz	PESO RETENIDO PARCIAL	PESO RETENIDO ACUMULADO	% RETENIDO	%PASA 3/8"	
25 mm	1"	0	0	0.0%	100.0%	
19mm	3/4"	0	0	0.0%	100.0%	
12.5mm	1/2"	10	10	0.3%	99.7%	
9.5mm	3/8"	14	24	0.5%	99.2%	
4.75mm	#4	2690.84	2714.84	89.7%	9.5%	
2mm	#10	236.38	2951.22	7.9%	1.6%	
425µm	#40	18.47	2969.69	0.6%	1.0%	
180µm	#80	5.71	2975.4	0.2%	0.8%	
75µm	#200	8.46	2983.86	0.3%	0.5%	
Fondo		16.14	3000	0.5%	0.0%	
Pasa Tamiz N° 4		g				
Peso antes del ensayo=	3000	g	Peso antes del lavado =			g
Peso despues del ensayo =		g	Peso despues del lavado =			g

#### Curva Granulométrica

The graph shows the cumulative percentage of material passing through various sieve sizes. The x-axis represents sieve size in millimeters on a logarithmic scale (10, 1, 0.1, 0.01). The y-axis represents the cumulative percentage from 0.0% to 110.0%. The curve starts at 100% for sieve sizes above 12.5 mm and drops sharply to approximately 10% at the 4.75 mm sieve, then continues to decrease to near 0% for smaller sieve sizes.

Sieve Size (mm)	Cumulative % Retained	Cumulative % Passing
25	0.0%	100.0%
19	0.0%	100.0%
12.5	0.3%	99.7%
9.5	0.5%	99.2%
4.75	89.7%	9.5%
2	89.9%	1.6%
425	90.5%	1.0%
180	90.7%	0.8%
75	91.0%	0.5%
Fondo	91.5%	0.0%



## B.2 Ensayos en agregados gruesos

### B.2.1 Durabilidad al sulfato de sodio o magnesio

<b>Durabilidad al Sulfato de Magnesio</b>						
Realizado por:		Daniela Idrovo ,Estefania Guzmán				
Fecha de Inicio:		20 de Noviembre del 2020				
Fecha de Finalizacion:		18 de Diciembre 2020				
Material:		Agregado Grueso de Granulometría de Diseño				
Procedencia del Material :		Planta de Asfalto de la Municipalidad				
Tamaño de las aberturas del tamiz	Gradación de la muestra original		Masa de las fracciones de ensayo, antes del ensayo	Porcentaje que pasa el tamiz designado, luego del ensayo	Porcentaje ponderado de pérdida	
		(%)	(g)	(%)	(%)	
<b>Ensayo de desempeño de árido grueso</b>						
63 mm a 50 mm	0	0	0	0	0	
50 mm a 37.5 mm	0	0				
37.5 mm a 25 mm	0	0	0	0	0	
25 mm a 19.0 mm	0	0				
19.0 mm a 12.5 mm	330	25.38	1000	1.8	0.234	
12.5 mm a 9.5 mm	670	51.54				
9.5 mm a 4.75 mm	300	23.08	300	12.00	2.31	
Totales	1300	100.0	-	-	<b>2.5</b>	



## B.2.2 Abrasión de la máquina de los Ángeles

<b>Degradación del Árido mediante el Uso de la Máquina de los Angeles</b>					
Realizado por:	Daniela Idrovo ,Estefania Guzmán				
Fecha de Inicio:	7 de Noviembre del 2020				
Fecha de Finalizacion:	9 de Diciembre 2020				
Material:	Agregado Grueso de Granulometría de Diseño				
Procedencia del Material :	Planta de Asfalto de la Municipalidad				
<b>Determinacion de gradación de la muestra según la tabla 2 de la Norma INEN 860-2011</b>					
<b>TABLA 2. Gradación de las muestras de ensayo</b>					
Tamaño de las aberturas de tamiz (mm) (aberturas cuadradas)		Masa por tamaños indicada (g)			
Pasante de	Retenido en	Gradación			
		A	B	C	D
37,5	25,0	1 250 ± 25	---	---	---
25,0	19,0	1 250 ± 25	---	---	---
19,0	12,5	1 250 ± 10	2 500 ± 10	---	---
12,5	9,5	1 250 ± 10	2 500 ± 10	---	---
9,5	6,3	---	---	2 500 ± 10	---
6,3	4,75	---	---	2 500 ± 10	---
4,75	2,36	---	---	---	5 000 ± 10
Total		5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10
Gradación elegida = B					
$D = \frac{B - C}{B} \times 100$					
<b>Determinacion de desgaste en porcentaje</b>					
<b>D = Valor de la degradación, en porcentaje</b>		<b>17.66 %</b>			
B = Masa Inicial de la muestra del ensayo		5000 g			
C = Masa de la muestra retenida en el tamiz de 1.7mm despues del ensayo		4117 g			



### B.2.3 Partículas chatas y alargadas y caras fracturadas

<b>Ensayo de Caras Fracturadas y Ensayo de partículas Planas y Alargadas</b>			
Realizado por:	Daniela Idrovo ,Estefania Guzmán		
Fecha de Inicio:	7 de Noviembre del 2020		
Fecha de Finalizacion:	9 de Diciembre 2020		
Material:	Agregado Grueso de Granulometría de Diseño		
Procedencia del Material :	Planta de Asfalto de la Municipalidad		
<b>Ensayo de Caras Fracturadas</b>			
	Peso Inicial de la muestra (g)	500	Porcentaje (%)
	Peso muestra 1 Cara Fracturada	500	100
	Peso muestra 2 Cara Fracturada	431	86.2
<b>Indice de Caras Fracturadas</b>		100/86	
<b>Ensayo de Partículas Planas y Alargadas</b>			
Peso inicial (g)	2000	Peso de Planas y alargadas (g)	Indice de planas y
Tamiz	Peso Retenido		
3/4"	0	0	-
1/2"	728	22	3.01
3/8"	757	49	6.46
#4	515	70	13.64
Fondo	0		
Total	2000	141	7.05
<b>Indice de Partículas Planas y Alargadas</b>		7.05 %	



## B.2.4 Porcentaje de absorción y gravedad específica

<b>Gravedades Específicas y Absorción en Agregado Grueso</b>		
Realizado por:	Daniela Idrovo ,Estefania Guzmán	
Fecha de Inicio:	10 de Noviembre del 2020	
Fecha de Finalización:	12 de Diciembre 2020	
Material:	Agregado Grueso de Granulometría de Diseño	
Procedencia del Material :	Planta de Asfalto de la Municipalidad	
<b>Gravedad Específica y Absorción de Agregado 3/4"</b>		
Descripción	Simbología	valor (gr)
Peso de la superficie saturada seca	A	3000
Peso del picnometro mas agua y mas material	B	9257
Peso del Picnometro mas agua	C	7348
Peso seco	D	2949
<b>Resultados</b>		
Gravedad específica SH	Gsb	2.703
Gravedad específica SSS		2.750
Gravedad específica aparente	Gsa	2.836
Absorción	%	1.70
<b>Gravedad Específica y Absorción de Agregado 3/8"</b>		
Descripción	Simbología	valor (gr)
Peso de la superficie saturada seca	A	2052
Peso del picnometro mas agua y mas material	B	6580
Peso del Picnometro mas agua	C	5309
Peso seco	D	2000
<b>Resultados</b>		
Gravedad específica SH	Gsb	2.561
Gravedad específica SSS		2.627
Gravedad específica aparente	Gsa	2.743
Absorción	%	2.53

$$G_{sb} = \frac{D}{A - (B - C)}$$

$$G_{SSS} = \frac{A}{A - (B - C)}$$

$$G_{sa} = \frac{D}{D - (B - C)}$$

$$G_{sb} = \frac{D}{A - (B - C)}$$

$$G_{SSS} = \frac{A}{A - (B - C)}$$

$$G_{sa} = \frac{D}{D - (B - C)}$$



## B.3 Ensayos en agregados finos

### B.3.1 Porcentaje de absorción y gravedad específica en polvo y arena

<b>Gravedades Específicas y Absorción Polvo:Arena</b>		
Realizado por:	Daniela Idrovo ,Estefania Guzmán	
Fecha de Inicio:	10 de Noviembre del 2020	
Fecha de Finalización:	12 de Diciembre 2020	
Material:	Agregado Grueso de Granulometría de Diseño	
Procedencia del Material :	Planta de Asfalto de la Municipalidad	
<b>Gravedad Específica y Absorción de Polvo y Arena</b>		
Descripción	Simbología	valor (gr)
Peso de la superficie saturada seca	A	500
Peso del picnometro mas agua y mas material	B	1712.7
Peso del Picnometro mas agua	C	1405.9
Peso seco	D	493.8
Resultados		
Gravedad específica SH	Gsb	2.556
Gravedad específica SSS	Gsss	2.588
Gravedad específica aparente	Gsa	2.641
Absorción	%	1.24

$$G_{sb} = \frac{D}{A - (B - C)}$$
$$G_{sss} = \frac{A}{A - (B - C)}$$
$$G_{sa} = \frac{D}{D - (B - C)}$$



### B.3.2 Índice de plasticidad, material pasante el tamíz N°200 y el tamíz N°40

<b>Índice de Plasticidad (Malla N°40 y Malla N°200)</b>										
Realizado por:		Daniela Idrovo ,Estefania Guzmán								
Fecha de Inicio:		10 de Noviembre del 2020								
Fecha de Finalizacion:		13 de Noviembre 2020								
Material:		Agregado Grueso de Granulometría de Diseño								
Procedencia del Material :		Planta de Asfalto de la Municipalidad								
<b>Límite Plastico</b>										
<b>Material que pasa el Tamiz #200</b>										
# Tara	Peso tara	Tara + mat. Humedo	Tara+ mat. Seco	Humedad (%)						
74	40.18	41.43	41.26	15.74						
48	47.86	50.29	49.95	16.27						
45	51.77	54.24	53.9	15.96						
<b>ÍNDICE DE PLASTICIDAD</b>				<b>15.99</b>						
<b>Límite Líquido</b>										
# de golpes	# Tara	Peso tara	Tara + mat. Humedo	Tara+ mat. Seco	Humedad (%)	Humedad (%) Promedio				
8	74	40.18	42.41	41.87	31.95	32.29				
	48	47.86	50.5	49.86	32.00					
	45	51.77	53.91	53.38	32.92					
14	12	45.3	47.4	46.95	27.27	28.11				
	36	51.23	52.98	52.58	29.63					
	79	42.3	44.53	44.05	27.43					
23	23	49.7	52.34	51.86	22.22	22.26				
	4	47.86	50	49.61	22.29					
	14	41.13	43.93	43.42	22.27					
31	96	48.81	50.56	50.35	13.64	13.61				
	54	52.72	54.95	54.67	14.36					
	9	46.25	48.89	48.59	12.82					
44	3	52.18	54.32	54.23	4.39	4.74				
	21	43.25	45.85	45.74	4.42					
	67	50.65	52.4	52.31	5.42					
<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: flex-start;"> <div style="flex: 1;"> <p style="text-align: center;"><b>Límite Líquido</b></p> <p style="text-align: center;"><math>y = -0.7815x + 38.958</math></p> </div> <div style="flex: 0.5;"> <table border="1"> <tr> <td><b>Humedad en 25 golpes</b></td> <td>19.42</td> </tr> <tr> <td><b>Índice de plasticidad</b></td> <td>3.43</td> </tr> </table> </div> </div>							<b>Humedad en 25 golpes</b>	19.42	<b>Índice de plasticidad</b>	3.43
<b>Humedad en 25 golpes</b>	19.42									
<b>Índice de plasticidad</b>	3.43									
<b>Material que pasa el Tamiz #40</b>		NO PRESENTA PLASTICIDAD								





### B.3.3 Adhesividad en polvo y arena (Rieder Weber)

<b>Adhesividad (Rieder Weber)</b>		
Realizado por:	Daniela Idrovo ,Estefania Guzmán	
Fecha de Inicio:	22 de Noviembre de 2020	
Fecha de Finalizacion:	22 de Noviembre de 2020	
Material:	Agregado fino de Granulometría de Diseño	
Procedencia del Material	Planta de Asfalto de la Municipalidad	
Muestra	Indice de adhesividad	Descripción
0	0	Sin desprendimiento
1	1	Desprendimiento parcial
2	2	Desprendimiento parcial
3	3	Desprendimiento parcial
4	4	Desprendimiento parcial
5	5	Desprendimiento parcial
6	6	Desprendimiento parcial
7	7	Desprendimiento parcial
8	8	Desprendimiento parcial
9	9	Desprendimiento parcial
<b>Conclusión</b>	El índice de adhesividad es 1, lo que corresponde a un 10%	





# Apéndice C

## Datos de diseños ya existentes

### C.1 Diseño 1

PLANTA DEL MUNICIPIO										CARPETA ASFALTICA									
Muestra	Aridos	% Aridos	Destil. Real	Peso Especifico Bulk (cb)	Gravidad Especifica Electiva (G <sub>e</sub> )	Absorción del Asfalto P <sub>sa</sub>	MASA MUESTRA			Volumen ccc	DENSIDAD		% EN VOLUMEN			V.A.M. %	V.F.A. %		
							Alte Seco	Alte SSS	Sumergido		g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	AGREG.	VACIOS	CA				
1	3/4"	18	16.83				1212.3	1214.2	686.1	528.1	2.296								
2	3/8"	14	13.09				1174.8	1177.0	666.2	510.8	2.300								
3	2 Fines T.+ 1 Arena N.	68	63.58				1244.3	1246.7	701.3	545.4	2.281								
%CA total		6.50	6.50	100	2.547	2.640	1.39				2.292	2.390	84.1	4.10	11.8	15.9	74.1		
Tem. Compactada a 140°C										ESPECIFICACION		3-5	Min 14	65-75					

NOTA: Estas briquetas se realizaron en el Laboratorio de Suelos, con el 6,50% de AC-20 con la mezcla de 2 de polvo triturado más 1 de arena natural estos son aridos de Vipesa y los aridos de 3/8" y 3/4" de la Mina del Sr. Treles; el 06 de agosto de 2020.



## C.2 Diseño 2

PLANTA DEL MUNICIPIO										CARPETA ASFALTICA											
Mostra	Ancho	% Aridos	Dens. Real	Peso Especifico Bulk (Gob)	Gravidad Especifica Efectiva (Gob)	Absorcion del Asfalto Pba	MASA MUESTRA			Volumen ccc	DENSIDAD		% EN VOLUMEN			Ancho Efectivo Pba	Factor de correccion por volumen	ESTABILIDAD		FLUJO	
							Aire Seco	Aire SSS	Sumergido		Gmb	Gmm	ACREC.	VACIOS	CA			V.A.M. %	V.F.A %		DUAL
1	3/4"	18	16,83				1303,9	1306,2	744,5	561,7	2,321					0,86	4078	3507	11		
2	3/8"	14	13,09				1193,8	1195,6	679,4	516,2	2,313					1	3598	3598	10		
3	2 Pasa T. - 1 Arena N.	68	63,58				1196,1	1198,1	676,4	521,7	2,293					1	3115	3115	11		
Tem. Compactada a 140°C		%CA total	106,50	100	2,580	2,665	1,25				2,309	2,410	83,7	4,18	12,1	16,3	74,4	5,3			
		ESPECIFICACION										3-5	Min 14	65-75							
NOTA:		Estas briquetas se realizaron en el Laboratorio de Suelos, con el 6,50% de AC-20 con la mezcla de 2 de polvo triturado más 1 de arena natural de la mina de Vipesa más aridos de 3/8" del Sr. Trellis y arido de 3/4" de la Mina del Austro, el 06 de agosto de 2020.																			

Scanned by TapScanner