

UNIVERSIDAD DE CUENCA



Fundada en 1867

Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil
Av. 12 de Abril y Agustín Cueva, Cuenca

ANÁLISIS DE LA DOSIFICACIÓN ÓPTIMA PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FUNCIÓN DE MATERIALES DISPONIBLES EN LA REGIÓN

Director:
Ing. Jaime Bojorque I., PhD

Proyecto de graduación previo
a la obtención del título de
Ingenieros Civiles

Autores:
Ximena Ávila Lazo
Felipe Redrován Flores

Cuenca - Ecuador
2015



RESUMEN

ANÁLISIS DE LA DOSIFICACIÓN ÓPTIMA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FUNCIÓN DE MATERIALES DISPONIBLES EN LA REGIÓN

El presente trabajo de titulación analiza la viabilidad del uso de métodos numéricos para el análisis de la dosificación óptima de mezclas asfálticas, por medio de la metodología de los mínimos cuadrados. Para ello, en primer lugar se introduce a la ingeniería de pavimentos con todos los conceptos necesarios. Posteriormente, se realiza un algoritmo que combina herramientas matemáticas con herramientas computacionales para generar la metodología del análisis. Finalmente, en laboratorio se comprueba esta metodología y se presentan los resultados obtenidos además de futuras líneas de investigación y comentarios que contribuye a un ahorro en el tiempo de diseño de mezclas asfálticas en la región. El ahorro en el uso de personal genera ganancias para cualquier empresa, ésta necesidad se revela en la Empresa Pública ASFALTAR EP, por lo que es de interés estudiar una metodología que haga posible ésto con la ayuda de herramientas computacionales.

Palabras clave: diseño de asfalto, mezcla asfáltica en caliente, método Marshall, agregados, asfalto, mínimos cuadrados.



ABSTRACT

ANALYSIS OF THE OPTIMAL DOSAGE OF ASPHALT MIXTURES FOR MATERIALS AVAILABLE IN THE REGION

This work of investigation analyzes the feasibility of using numerical methods for the analysis of the optimal dosage of asphalt mixtures by the least squares method. For this, first it is introduced pavement engineering concepts with all the necessary concepts. After this, a computational algorithm that combines mathematical tools with computational tools to generate, the analysis methodology is made. Finally, this methodology was tested in laboratory and the results obtained were presented in addition to future research and comments of this work that contribute to savings in the design time of asphalt mixtures in the region. The savings in the use of personal is profitable for any company, this need exists in the Public Enterprise ASFALTAR EP, so it is of interest to study a methodology that makes this possible with the help of computer tools.

Key words: design asphalt, hot mix asphalt, Marshall method, aggregates, asphalt, least squares.



ÍNDICE GENERAL

Resumen	1
Abstract	2
Contenido	3
Índice de figuras	6
Índice de tablas	8
1 Introducción	21
1.1 Antecedentes	22
1.2 Planteamiento del problema	23
1.3 Alcance	24
1.4 Justificación	25
1.5 Objetivos de investigación	25
1.5.1 Objetivo general	25
1.5.2 Objetivos específicos	26
1.6 Metodología	26
1.7 Limitaciones	27
1.8 Sumario	27
2 Áridos, Asfaltos y Mezclas Asfálticas	30
2.1 Áridos	30



2.1.1	Propiedades físicas	30
2.1.2	Requerimientos de los materiales granulares	33
2.2	Materiales Asfálticos	35
2.2.1	Antecedentes históricos	35
2.2.2	Refinamiento del crudo de petróleo	36
2.2.3	Clasificación de los asfaltos	36
2.2.4	Ensayos a los materiales bituminosos	40
2.3	Mezclas asfálticas	43
2.3.1	Propiedades consideradas en el diseño de mezclas	43
2.3.2	Diseño de mezcla asfáltica por el método de Marshall	45
3	Metodología y Materiales para Investigación	51
3.1	Enfoque de investigación y diseño	51
3.2	Contexto y recursos	52
3.2.1	Estudio geológico de las canteras	52
3.2.2	Cuadro de resumen de rocas	57
3.2.3	Materia prima	59
3.2.4	Selección y tamaño de la muestra	60
3.2.5	Elaboración de base de datos maestra	60
3.3	Normas para ensayos, instrumentación y procesamiento en laboratorio	61
3.4	Metodología de cálculo: Mínimos Cuadrados	70
3.5	Metodología computacional	72
3.6	Análisis práctico: Ensayos en laboratorio	76
4	Resultados y Discusión	78
4.1	Estudios de la geología regional y su relación con los agregados .	78
4.2	Análisis técnico de áridos en laboratorio	79
4.3	Metodología computacional	84
4.4	Validación de resultados computacionales en laboratorio	88
5	Conclusiones y Recomendaciones	97
5.1	Conclusiones	97
5.2	Recomendaciones	99
	Referencias	101
A	Codificación del programa realizado en MATLAB	i



A.1	Codificación del programa	i
A.1.1	Archivo MAC.m	i
A.1.2	Archivo Seleccion-aridos.m	ii
A.1.3	Archivo ajuste.m	iv
Anexos		i
B	Análisis de los áridos en laboratorio	xii
B.1	Material triturado 3/4"	xii
B.1.1	Cantera de Uzhupud	xii
B.1.2	Cantera de Vipesa	xiii
B.1.3	Cantera de B. Vintimilla	xiv
B.2	Material triturado 3/8"	xv
B.2.1	Cantera de B. Vintimilla	xv
B.2.2	Cantera de Santa Isabel	xvi
B.2.3	Cantera de Vipesa	xvii
B.3	Material triturado 3/16"	xviii
B.3.1	Cantera de Huascachaca	xviii
B.3.2	Cantera de San Vicente	xix
B.3.3	Cantera de Uzhupud	xx
B.4	Arena de río	xxi
B.4.1	Cantera de Huascachaca	xxi



ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Producción en m^3 áridos y hormigón [1]	24
2.1	Estructura de una Emulsión Asfáltica muy diluída [2]	37
3.1	Geología del Cantón Paute Esc. 1:300,000	53
3.2	Geología del Cantón La Troncal Esc. 1:300,000	55
3.3	Geología del Cantón Santa Isabel Esc. 1:600,000	56
3.4	Geología del Cantón El Pan Esc. 1:300,000	57
3.5	Agitador mecánico y serie de tamices para agregados gruesos y finos. .	61
3.6	Tamizado, lavado y secado del material.	62
3.7	Preparación de la solución, lavado del material y separación del mismo	62
3.8	Inmersión del material en la solución.	63
3.9	Máquina Los Ángeles, con las esferas y el material después del ensayo	63
3.10	Calibradores de espesores y longitudes, separación de partículas elongadas, aplanadas y elongadas-aplanadas.	64
3.11	Separación de partículas con una o más caras fracturadas.	64
3.12	Picnómetro con agua y la placa de vidrio y secado del material para lograr la condición SSS.	65
3.13	Material y asfalto antes de ser mezclados.	66
3.14	Estimación del porcentaje de área total visible del agregado (mayor o menor al 95 %).	66
3.15	Equipo y materiales utilizados ensayo: Equivalente de Arena.	67
3.16	Agitación manual del material con la solución.	67
3.17	Materiales y equipos utilizados.	68



3.18 Colocacion del material mediante el embudo.	68
3.19 Materiales y equipo utilizado para índice de plasticidad.	69
3.20 Ensayo de Índice de Plasticidad.	69
3.21 Material en condiciones SSS	70
3.22 Ingreso general de datos	73
3.23 Ingreso general de datos	74
3.24 Ingreso general de datos	74
4.1 Pantalla principal del programa MAC.m	85
4.2 Selección del tipo de mezcla asfáltica en caliente (MAC)	85
4.3 Selección de áridos	85
4.4 Pantalla principal de la metodología de cálculo	86
4.5 Gráfica de la combinatoria seleccionada por el diseñador en función de los áridos escogidos	87
4.6 Aviso de exportación correcta de los datos	87
4.7 Resultados Diseño 1: MAC-2 Briqueta al 6.0 %	89
4.8 Resultados Diseño 1: MAC-2 Briqueta al 6.2 %	89
4.9 Resultados Diseño 1: MAC-2 Briqueta al 6.5 %	90
4.10 Resumen resultados ensayo Marshall con método NAPA para una MAC-2 Diseño 1	90
4.11 Resultados Diseño 2: MAC-3 Briqueta al 5.5 %	91
4.12 Resultados Diseño 2: MAC-3 Briqueta al 6.3 %	91
4.13 Resultados Diseño 2: MAC-3 Briqueta al 7 %	92
4.14 Resumen resultados ensayo Marshall con método NAPA, Modelo MAC-3 Diseño 2	92
4.15 Resultados Diseño 3: MAC-2 Briqueta al 5.5 %	93
4.16 Resultados Diseño 3: MAC-2 Briqueta al 6.2 %	93
4.17 Resultados Diseño 3: MAC-2 Briqueta al 7 %	94
4.18 Resumen resultados ensayo Marshall con método NAPA, Modelo MAC-3 Diseño 3	94
4.19 Resultados Diseño 4: MAC-2 Briqueta al 5.5 %	95
4.20 Resultados Diseño 4: MAC-2 Briqueta al 6.2 %	95
4.21 Resultados Diseño 4: MAC-2 Briqueta al 7 %	95
4.22 Resumen de resultados del ensayo Marshall con método NAPA, Modelo MAC-2 Diseño 4	96
A.1 Codificación del archivo MAC.m	ii



A.2	Codificación del archivo Seleccion-aridos.m	iii
A.3	Codificación del archivo Seleccion-aridos.m	iii
A.4	Codificación del archivo Seleccion-aridos.m	iv
A.5	Codificación del archivo ajuste.m	v
A.6	Codificación del archivo ajuste.m	vi
A.7	Codificación del archivo ajuste.m	vii
A.8	Codificación del archivo ajuste.m	viii
A.9	Codificación del archivo ajuste.m	ix
A.10	Codificación del archivo ajuste.m	x
A.11	Codificación del archivo ajuste.m	xi
B.1	Resultados de los ensayos realizados con el material triturado de 3/4"	xiii
B.2	Resultados de los ensayos realizados con el material triturado de 3/4"	xiv
B.3	Resultados de los ensayos realizados con el material triturado de 3/4"	xv
B.4	Resultados de los ensayos realizados con el material triturado de 3/8"	xvi
B.5	Resultados de los ensayos realizados con el material triturado de 3/8"	xvii
B.6	Resultados de los ensayos realizados con el material triturado de 3/8"	xviii
B.7	Resultados de los ensayos realizados con el material triturado de 3/16"	xix
B.8	Resultados de los ensayos realizados con el material triturado de 3/16"	xx
B.9	Resultados de los ensayos realizados con el material triturado de 3/16"	xxi
B.10	Resultados de los ensayos realizados con la arena de río	xxii



ÍNDICE DE TABLAS

1	Lista de definiciones [3]	11
2	Lista de definiciones (continuación)	12
2.1	Requerimientos para agregados gruesos [4]	33
2.2	Requerimientos para Caras Fracturadas [5]	34
2.3	Requerimientos para Agregados Finos (NEVI-12, 2013)	34
2.4	Requerimientos del Equivalente de Arena (NEVI-12, 2013)	34
2.5	Angularidad del Agregado Fino (NEVI-12, 2013)	35
2.6	Porcentaje de vacíos mínimos en función del tipo de mezcla [5]	47
2.7	Criterios NAPA método Marshall	49
2.8	Vacíos en el Agregado Mineral (Requisitos de VMA)	50
3.1	Cuadro resumen de rocas	58
3.2	Husos Granulométricos	59
3.3	Cuadro Resumen Proveedores ASFALTAR EP. Donde x: material en stock -: material no en stock	77
4.1	Resultados laboratorio material 3/4 cantera Uzhupud	79
4.2	Resultados laboratorio material 3/4 cantera Vipesa	80
4.3	Resultados laboratorio material 3/4 cantera Bernardo Vintimilla	80
4.4	Resultados laboratorio material 3/8 cantera Santa Isabel	81
4.5	Resultados laboratorio material 3/8 cantera Vipesa	82
4.6	Resultados laboratorio material 3/8 cantera Uzhupud	82
4.7	Resultados laboratorio material 3/16 cantera San Vicente	83
4.8	Resultados laboratorio material 3/16 cantera Huascachaca	83



4.9	Resultados laboratorio material 3/16 cantera Uzhupud	83
4.10	Resultados laboratorio material Arena cantera Huascachaca	84
4.11	Resumen resultados ensayo Marshall con método NAPA para una MAC-2 Diseño 1	89
4.12	Resumen resultados ensayo Marshall con método NAPA, Modelo MAC-3 Diseño 2	91
4.13	Resumen resultados ensayo Marshall con método NAPA, Modelo MAC-3 Diseño 3	93
4.14	Resumen de resultados del ensayo Marshall con método NAPA, Modelo MAC-2 Diseño 4	95

**Tabla 1: Lista de definiciones [3]**

<i>Agregado grueso</i>	Agregado predominantemente retenido sobre un tamiz de 4,75 mm (No.4), o aquella porción retenida sobre un tamiz de 4,75 mm (No.4).
<i>Agregado de granulometría densa</i>	Agregados clasificados de manera que al ser compactados se obtenga un bajo contenido de vacíos y un peso máximo.
<i>Agregado fino</i>	Agregado que atraviesa un tamiz de 9,5 mm (3/8 in.) y atraviesa casi totalmente un tamiz de 4,75 mm (No.4) mientras que es predominantemente retenido sobre el tamiz de 75 μ m (No.200); o aquella porción que atraviesa el tamiz de 4,75 mm (No.4) y es predominantemente retenida sobre el tamiz de 75 μ m (No.200).
<i>Agregado de granulometría discontinua</i>	Agregado clasificado de manera tal que ciertos tamaños intermedios están sustancialmente ausentes.
<i>Agregado pesado</i>	Agregado de alta densidad, tal como barita, magnetita, hematita, limonita, ilmenita, hierro o acero, usado para la elaboración de hormigón pesado.
<i>Agregado liviano</i>	Agregado de baja densidad, tal como: (a) arcilla expandida o sintetizada, esquisto, pizarra o pizarra diatomácea, perlita, vermiculita o escoria, (b) piedra pómez natural, escoria, ceniza volcánica, tufa o diatomita, (c) ceniza fina o cenizas industriales sinterizadas, que se usa en la elaboración de hormigón liviano.
<i>Agregado de granulometría abierta</i>	Agregado en el cual los vacíos son relativamente grandes una vez que el agregado se compacta.
<i>Agregado de tamaño único</i>	Agregado en el cual una gran proporción de las partículas están comprendidas dentro de un rango de tamaños limitado.
<i>Agregado bien graduado</i>	Agregado cuya distribución de tamaños de partículas produce una densidad máxima, es decir, minimiza vacíos.
<i>Mezcla de agregados</i>	Proceso de combinar dos o más agregados para producir un conjunto de propiedades diferentes; por lo general, aunque no siempre, su objetivo es mejorar la distribución de tamaños.
<i>Gravedad específica neta (GSB)</i>	Proporción de la masa al aire de una unidad de volumen de un material permeable (incluyendo vacíos permeables e impermeables del material) a una temperatura indicada, con respecto a una masa al aire de igual densidad de volumen igual al de agua destilada a una temperatura indicada.

**Tabla 2: Lista de definiciones (continuación)**

<i>Gravedad específica aparente (GSA)</i>	Proporción de la masa en aire de una unidad de volumen de un material impermeable a una temperatura indicada, con respecto a una masa al aire de igual densidad de volumen igual al de agua destilada a una temperatura indicada.
<i>Gravedad específica efectiva (GSE)</i>	Proporción de la masa en aire de una unidad de volumen de un material permeable (excluyendo vacíos permeables de asfalto) a una temperatura indicada, con respecto a una masa al aire de igual densidad de volumen igual al de agua destilada a una temperatura indicada.
<i>Vacíos en el agregado mineral (VAM)</i>	Volumen de espacio vacío intergranular entre las partículas del agregado de una mezcla asfáltica compactada, que incluye los vacíos con aire y el contenido de asfalto efectivo, expresado como un porcentaje del volumen total de la muestra.
<i>Contenido de asfalto efectivo (PBE)</i>	Contenido de asfalto total de una mezcla asfáltica, menos la proporción de asfalto absorbido en las partículas del agregado.
<i>Vacíos con aire (VA)</i>	Volumen total de una pequeña bolsa de aire entre las partículas cubiertas del agregado en una mezcla de pavimento compactado, expresado como el porcentaje del volumen neto de la mezcla del pavimento compactado.
<i>Vacíos rellenos con asfalto (VFA)</i>	Porción del porcentaje del volumen de espacio vacío intergranular entre las partículas del agregado, que es ocupado por el asfalto efectivo.
<i>Asfalto/ Betún asfáltico</i>	También denominado betún, es un material viscoso, pegajoso y de color negro. Se utiliza mezclado con arena o gravilla para pavimentar caminos y como revestimiento impermeabilizante de muros y tejados.
<i>Litoestratigrafía</i>	Es la rama de la geología que trata del estudio e interpretación de las rocas sedimentarias, metamórficas y volcánicas estratificadas, y de la identificación, descripción de las mismas.



UNIVERSIDAD DE CUENCA



Universidad de Cuenca
Clausula de derechos de autor

Yo, Felipe Iván Redrován Flores, autor de la tesis "Análisis de la Dosificación Óptima para Mezclas Asfálticas en Función de Materiales Disponibles en la Región", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 26 de Octubre del 2015

Felipe Iván Redrován Flores

030239906-8



UNIVERSIDAD DE CUENCA



Universidad de Cuenca
Clausula de propiedad intelectual

Yo, Felipe Iván Redrován Flores, autor de la tesis "Análisis de la Dosificación Óptima para Mezclas Asfálticas en Función de Materiales Disponibles en la Región", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 26 de Octubre de 2015.

Felipe Iván Redrován Flores

030239906-8



UNIVERSIDAD DE CUENCA



Universidad de Cuenca
Clausula de derechos de autor

Yo, Ximena Micaela Ávila Lazo, autora de la tesis "Análisis de la Dosificación Óptima para Mezclas Asfálticas en Función de Materiales Disponibles en la Región", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autora.

Cuenca, 26 de Octubre del 2015

Ximena Micaela Ávila Lazo

010521725-1



UNIVERSIDAD DE CUENCA



Universidad de Cuenca
Clausula de propiedad intelectual

Yo, Ximena Micaela Ávila Lazo, autora de la tesis "Análisis de la Dosificación Óptima para Mezclas Asfálticas en Función de Materiales Disponibles en la Región", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 26 de Octubre de 2015.

Ximena Micaela Ávila Lazo

010521725-1



UNIVERSIDAD DE CUENCA

“Los científicos estudian el mundo tal como es; los ingenieros crean el mundo que nunca ha sido”

– Theodore Von Karman



UNIVERSIDAD DE CUENCA

DEDICATORIA

Con un inconmensurable amor, a mi tierna y dulce angelita, Cristel, a mis padres Iván y Sabina, a mi entrañable hermano, Martín, desde el fondo de mi corazón para ustedes, este trabajo investigativo.

Felipe Redrován Flores

Cuenca, Octubre del 2015



DEDICATORIA

Con todo el amor para mi familia, que día a día me han apoyado para alcanzar esta meta.

Para ud mamita en especial; por todo el amor, empeño, dedicación y paciencia que me ha brindado.

Para ti gordita Emi, te amo, esto va por ti.

Finalmente, para mi padre, angelito mío, desde el cielo sigo sintiendo tu amor.

Ximena Ávila L.

Cuenca, Octubre del 2015



AGRADECIMIENTOS

Dejamos sentada nuestra gratitud indeleble al Ing. Jaime Bojorque, PhD, director de este trabajo de titulación, quien con su vasta experiencia y conocimientos teóricos-prácticos, nos ha guiado acertadamente y en forma eficaz en el desarrollo y culminación de este proyecto.

A todos y cada uno de los catedráticos de la Facultad de Ingeniería, quienes nos guiaron, generosa y eficientemente hasta culminar la carrera.

A la Empresa ASFALTAR E.P., que encabezada por el Econ. Rubén Benítez, nos abrió las puertas para el desarrollo de este proyecto. Además, a todos los miembros de la planta asfáltica que siempre respondieron satisfactoriamente a nuestras inquietudes y, nos brindaron la información necesaria.

Finalmente, a nuestras familias, por toda la paciencia, apoyo y dedicación en todos estos años de estudio.

¡NUESTRAS GRACIAS INEFABLES!

Ximena Ávila Lazo
Felipe Redrován Flores

Cuenca, Octubre del 2015



CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El betún asfáltico (asfalto) es un componente natural de la mayor parte de los petróleos. La palabra Asfalto, deriva del acadio, lengua hablada en Asiría, en las orillas del Tigris superior, entre los años 1400 y 600 A.C. En esta zona se encuentra en efecto la palabra “Sphalto” que significa “lo que hace caer”. Luego la palabra fue adoptada por el griego, pasó al latín y, más adelante, al francés (asphalte), al español (asfalto) y al inglés (asphalt). Estudios arqueológicos, indican que es uno de los materiales constructivos más antiguos que el hombre ha utilizado [6].

Un hormigón asfáltico, también conocido como hormigón bituminoso o carpeta asfáltica, consiste en una mezcla homogénea de asfalto y materiales minerales (áridos y finos), que se extiende en capas de manera homogénea, a una determinada temperatura y se compactan, dando así lugar a una estructura vial por la cual circulará el tránsito con características obtenidas a partir de un estudio vial.

El uso como tal de una mezcla asfáltica sobre carreteras y caminos tuvo lugar a finales del siglo anterior; la construcción del primer pavimento tipo carpeta asfáltica se dio en Washington D.C en 1876, este diseño tuvo asfalto natural importado dentro de su composición. La primera mezcla asfáltica en caliente, usando aún asfalto natural, se dio en 1900 y fue utilizada en la Rue du Louvre y en la Avenue Victoria, ambas en París [2].

El empleo de asfaltos destilado de petróleo en el continente americano se dio a partir del año 1902, en Estados Unidos, que gracias a las características tanto de pureza como el beneficio de costos mejores que los asfaltos naturales, lo ha colocado como la principal fuente de abastecimiento hoy en día, para trabajos de tipo vial [6].



La aparición y desarrollo de la circulación automovilística en las carreteras de aquel entonces - de macadam a base de agua - provocaban grandes nubarrones de polvo, ello dio origen a los tratamientos superficiales a base de emulsiones en el año 1903, con objeto de enfrentar dicho inconveniente. En 1909 en Versalles, sobre el firme de una carretera con un tráfico diario de 5000 vehículos, se construyó una capa de aglomerado bituminoso de 5 cm de espesor. Así pues, en los albores del siglo XX, ya existían los principales componentes de la técnica de revestimientos bituminosos. Su desarrollo y perfeccionamiento, es tarea que incumbe a los profesionales del asfalto [2].

Actualmente, en nuestra provincia del Azuay la vialidad ha tomado un puesto muy importante, es por esto que en el 2010 se fundó la empresa ASFALTAR EP la cual produce y comercializa áridos y hormigón asfáltico, con servicios de tendido de mezcla asfáltica y doble tratamiento superficial bituminoso (Prefectura del Azuay, 2014). El objetivo principal de la empresa es liderar el mejoramiento vial, dirigiéndose a empresas públicas y privadas.

Al realizar un correcto diseño de una mezcla asfáltica en el laboratorio y luego proceder a ensayar lo obtenido, permite obtener los resultados de un comportamiento muy semejante al que presentaría la carpeta asfáltica en el campo. Todo diseño que se realice, debe cumplir con ciertos parámetros y normas que se encuentran estipulados de acuerdo a lo que exigen el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP), que es la entidad que se encarga de éste tipo de proyecto en Ecuador.

La presente investigación pretende, cumpliendo las normas vigentes, aportar al diseño óptimo de un concreto asfáltico en base a la experiencia de la Empresa ASFALTAR EP.

1.1 Antecedentes

El concreto asfáltico en la actualidad se utiliza en la gran mayoría de vías de acceso o comunicación del mundo. Éste es utilizado ya desde el siglo XIX, y a la fecha ha tomado un rol principal en cuanto a construcción de caminos se refiere [2]. Por este motivo, es necesario diseñar la mezcla que vaya a ser utilizada con mucho cuidado y precisión ya que cualquier error que se cometa, implica pérdidas económicas y además materiales.

En el ámbito local, el aumento de la población conlleva un aumento en el tráfico vehicular, lo que ocasiona mayores estándares de calidad en las estructuras sobre las que transitan, además de agilidad y rapidez si de métodos constructivos se trata, es por esto que se debe realizar una investigación encaminado a hallar un método que garantice las propiedades de las mezclas de los áridos, así la obtención de las



mezclas asfálticas óptimas según sea el caso.

Actualmente, la Empresa ASFALTAR EP no tiene una herramienta que permita determinar de forma rápida, organizada y efectiva, una combinación para la mezcla de concreto asfáltico en caliente, sin embargo, se puede empezar desde el punto en que existe una base de datos histórico de las mezclas que se han realizado desde que se fundó la empresa hasta la fecha, lo cual sirve de punto de inicio para el trabajo que se desea realizar. La calidad de la mezcla depende de muchos factores, tales como los humanos (dentro del laboratorio), los mecánicos (que dependerán de la calibración de los instrumentos) y los materiales (en el caso de no contar con los agregados para la mezcla). Todos estos inconvenientes, afectan en el tiempo de producción que una empresa invierte en el diseño de una mezcla asfáltica; a razón de esto, se pretende actualmente agilizar el proceso, mediante el uso de herramientas computacionales, que con un mínimo error, garantice una mezcla apropiada según la disponibilidad de los materiales que se encuentren en la planta.

Dentro de este campo de análisis, siempre tiene que estar presente el ensayo en laboratorio, el cual brinda información variada y específica acerca de las propiedades de un material. En el caso de que no se desee realizar un análisis muy sofisticado acerca de las propiedades de un agregado, se podría recurrir a un análisis geológico general, el cual revela características generales de la roca madre que se podrían relacionar con las propiedades del nuevo agregado obtenido en función del método de disgregación de la misma. Otra manera de simplificar este proceso, es con el uso de la probabilidad y estadística, que aunque pueda dar un correcto análisis, no brinda la confianza necesaria, esto dependiendo de la cantidad y confiabilidad de información con la que se trabaja.

Cabe destacar además que, en el contexto en el que el proyecto se desenvuelve, la creación de un programa computacional que, mediante métodos numéricos, obtenga resultados que generalmente se generan en laboratorio, se restringe debido a la limitación de recursos económicos, digitales y la costumbre al realizar este tipo de estudio en laboratorio.

1.2 Planteamiento del problema

Como toda empresa pública, ASFALTAR EP, en su rendición de cuentas más reciente reveló que, del año 2013 al 2014 la demanda en la producción y venta de hormigón asfáltico se duplicó (Figura 1.1); este hecho, es lo que obliga a la Empresa a buscar un método de optimización durante el tiempo de la postproducción de mezcla asfáltica; es decir, un ahorro de tiempo en laboratorio mientras se realiza el diseño de la mezcla que se producirá [1].

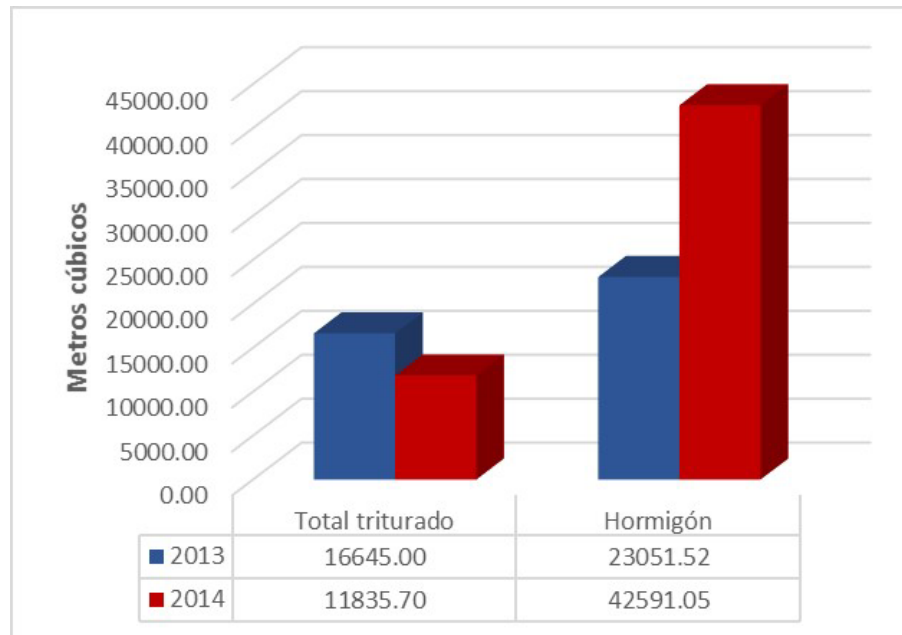


Figura 1.1: Producción en m^3 áridos y hormigón [1]

Para suplir la necesidad que se tiene en la Empresa, hace falta determinar una mezcla asfáltica óptima en función de los agregados que se disponen al momento en la planta. Es importante conocer, proveedores/canteras fijas con los que la Empresa mantiene relación; en este sentido la Empresa trabaja con alrededor de cuatro canteras, ubicadas en diferentes cantones de la provincia de Azuay y Cañar como son: El Pan, Paute, La Troncal y Santa Isabel.

Otro inconveniente que presenta esta demanda, es la necesidad de trabajar con variados proveedores ya que los materiales que éstos producen poseen gran variedad de propiedades físicas y químicas, al estar ubicados en zonas con geología distinta.

1.3 Alcance

En el presente trabajo pretende determinar cuál es la mezcla asfáltica óptima que se puede obtener al momento, en función de los materiales de la zona que se encuentren disponibles en la Empresa. Tanto las características de la mezcla, como los requerimientos de cada uno de los materiales que forman el concreto asfáltico se analizarán en base a la Norma Ecuatoriana de Vialidad NEVI-12 [5], respaldando el diseño con artículos como el reporte National Cooperative Highway Research Program (NCHRP Report 673) [4]. Los ensayos requeridos para cumplir con ciertos requerimientos se basan en normas como la INEN, AASHTO, y la ASTM, las cuales



brindarán pautas y procedimientos necesarios para el análisis de los materiales.

Por otra parte, las herramientas computacionales brindarán una interfaz de fácil acceso y además comprensible para quien la use, con imágenes y almacenamiento de datos que alimentarán al programa mayor, que se creará en la plataforma Matlab.

El diseño final estará basado en el método Marshall, con comprobaciones teóricas y prácticas, las mismas que estarán dadas en función de resultados de laboratorio y criterios de la National Asphalt Pavement Association (NAPA) y de la Asphalt Institute, Method (AIM).

1.4 Justificación

La necesidad de optimizar el trabajo en laboratorio, gracias al uso de un programa computacional y conceptos teóricos ha sido objeto de este estudio ya que ayudará a cumplir con la visión de la Empresa que es ser líder en vialidad en la provincia. En la actualidad con todos los avances tecnológicos existentes, es preciso que este tipo de conocimiento se amplíe a una nueva visión y no solo esté encaminado por trabajos de laboratorio como hasta la fecha.

El requerimiento de determinar una mezcla asfáltica en función de materiales disponibles en la región surge, por el coste humano y además al tiempo que se consume en la misma. Es de mucha utilidad para la Empresa economizar en estos gastos innecesarios que pueden ser invertidos en otras actividades. El método que se utilizará es el Marshall, ya que éste es el más usado en la actualidad, presenta mayor facilidad de conocimiento, y además se basa en ensayos que se pueden realizar gracias a la disponibilidad de las herramientas, tanto en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca como en el de la Empresa ASFALTAR EP.

En el contexto nacional, se ve necesario implementar este tipo de ayuda que disminuye tiempos en laboratorio para así mejorar las obras civiles de tipo vial, ya que los caminos y vías son importantes para el desarrollo general de un país siendo las rutas de comunicación la esencia del comercio local y nacional.

1.5 Objetivos de investigación

1.5.1 Objetivo general

Analizar la dosificación óptima para mezclas asfálticas en función de materiales disponibles en la región, para optimizar gastos que se realizan mientras se determina



esta mezcla óptima dentro de las instalaciones de la Empresa ASFALTAR EP.

1.5.2 Objetivos específicos

- Evaluar los distintos materiales, provenientes de diversas canteras que proveen a la Empresa ASFALTAR EP, y que componen una carpeta asfáltica mediante pruebas de laboratorio definidas en normas nacionales e internacionales como la INEN, AASHTO y la ASTM.
- Evaluar que la mezcla asfáltica diseñada cumpla con los requerimientos que se encuentran definidos en la norma vigente ecuatoriana NEVI–12 [5].
- Actualizar la base de datos existente en la Empresa ASFALTAR EP referente tanto a materiales como al diseño de la mezcla asfáltica necesaria según las condiciones a las que se encuentre la planta.
- Configurar un programa accesible a cualquier usuario para obtener la dosificación óptima de los diferentes componentes que forman la mezcla asfáltica

1.6 Metodología

La guía principal para la determinación de la mezcla asfáltica óptima necesaria dentro del país es la Norma Ecuatoriana Vial NEVI–12 del Ministerio de Transporte y Obras Públicas [5]. La ASTM, AASHTO, y la INEN que son normas que intervienen dentro del laboratorio, explicando de manera detallada cómo proceder para el análisis de cada uno de los materiales que conforman la mezcla. Además de la norma ASTM D 1559 [7] en donde se especifica el ensayo Marshall para diseños de mezclas asfálticas. A través de esta documentación se estudiarán propiedades físicas de los elementos que componen la mezcla y de ésta en sí. Cabe recalcar que el estudio también se hará basándose en recomendaciones brindadas por “A manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary” (NCHRP Report 673) [4], el cual indica, de manera global, todos los procedimientos, requerimientos, especificaciones además de conocimientos generales sobre las mezclas asfálticas. El estudio además se hará en función de otras fuentes bibliográficas como libros, artículos, ensayos, y otros documentos que ayudarán a clarificar la determinación de la mezcla óptima. La implementación de herramientas computacionales apoyará a agilizar todos los procesos que se hicieron anteriormente.

Una vez recolectada la información con que cuenta la Empresa ASFALTAR EP sobre mezclas, se puede hablar de una base de datos maestra a partir de la cual se extraerá toda la información que se necesite para realizar la combinatoria de agregados a partir de los requerimientos de la norma vigente NEVI [5]. El programa Excel será el que conserve la información de los materiales y ensayos realizados,



mientras que el procesamiento y la interfaz interactiva será programado dentro de la herramienta Matlab, la cual funcionará de manera interactiva al usuario.

La última parte del estudio será la comprobación de la metodología de análisis, la cual se basará en ensayos de laboratorio, los mismos que ratificarán la veracidad de los resultados arrojados por el programa computacional. Cabe recalcar que, los métodos numéricos que se utilizarán parten en base a datos recolectados por la Empresa desde el inicio de su producción en los laboratorios. Se empleará el método de mínimos cuadrados para determinar el mejor ajuste entre, la curva promedio de los husos granulométricos que fija la norma para una Mezcla Asfáltica en Caliente del tipo 2 o 3, y la combinatoria calculada de los agregados que se encuentren en stock.

1.7 Limitaciones

Este trabajo de investigación presenta ciertas limitaciones que impiden que el mismo pueda ser analizado más extensamente. En general, las limitaciones presentadas se dan en sentido de disponibilidad de materiales.

Ni el laboratorio de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca, ni el laboratorio de la Empresa ASFALTAR E.P. poseen los químicos necesarios para ensayos como por ejemplo: Durabilidad al Sulfato de Sodio y Magnesio [8], Sales Solubles Totales [9], Ensayo de Adhesividad de Riedel & Weber [10], entre otros. Éstos químicos tienen prohibida la venta libre por lo que no pueden ser adquiridos por particulares, con lo que no se puede verificar el cumplimiento de estos parámetros.

Por otra parte la escasez de los agregados para las mezclas, éste es el problema principal que tiene la planta ya que los proveedores no son constantes y por esto, la producción suele demorarse o cambiarse de materiales. En este contexto, la falta de materiales base para la mezcla causa retrasos durante la fase de análisis de los mismos y restricciones al momento de realizar la comprobación del método ya que no se dispone de los materiales para comprobarlo.

Finalmente, la falta de una base de datos más extensa, en lo que a diseños antiguos de la Empresa se refiere, produce que el programa tenga limitadas opciones en cuanto a los porcentajes de asfalto y minoriza la veracidad en cuanto a la selección de este contenido.

1.8 Sumario

El presente trabajo de titulación se encuentra organizado como sigue:



• **CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN**

En el capítulo 1 se realiza una introducción al proyecto, en cuanto a la importancia de la vialidad actualmente y sobre todo a lo que significa realizar un diseño de mezcla asfáltica. Posteriormente, se presentan los antecedentes que inciden en la realización de este proyecto, el planteamiento del problema, alcance y justificación del mismo. Luego, se plantean los objetivos tanto generales como específicos que se alcanzarán a medida que se vaya desarrollando el trabajo. Para poder saber de qué manera se obtiene la información y luego los resultados, se presenta la metodología. Finalmente se presenta un esquema de la organización de los capítulos que conformarán el trabajo, siendo las partes principales las siguientes:

- Antecedentes, planteamiento, alcance y justificación del problema
- Objetivos: general y específicos
- Metodología
- Sumario

• **CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE**

En el capítulo 2 se da a conocer diferentes conceptos que ayudarán a comprender el tema de investigación, por un lado se realiza el enfoque a los áridos, material de gran importancia en el trabajo ya el mayor porcentaje de una mezcla asfáltica la compone los agregados, en esta parte se expondrán diferentes características de los áridos que se utilizarán, así como también los requisitos que deberán cumplir los que impone la Norma Ecuatoriana Vial vigente.

La siguiente parte se enfoca en los asfaltos, comenzando con un antecedente del proceso de refinación, para luego tratar sobre los tipos de asfalto que existen y los ensayos que pueden realizarse en los mismos.

Para finalizar este capítulo se discutirá sobre las mezclas asfálticas, en donde se presentan sus propiedades consideradas en el diseño y el método Marshall.

Las tres subdivisiones de este capítulo son:

- Áridos
- Asfaltos
- Mezclas asfálticas

• **CAPITULO 3 METODOLOGÍA Y MATERIALES PARA INVESTIGACIÓN**

En el capítulo 3 se presenta en primer plano un enfoque de la investigación el cual explica hacia donde se espera llegar con todos los análisis, muestreo y programación; luego se presenta el contexto y los recursos sobre los materiales que se trabajarán, dentro del cual se trata acerca de las canteras, materia prima, selección y tamaño de la muestra y de la elaboración de la base de datos maestra.



En la siguiente parte se discute acerca de las normas para los ensayos, del procesamiento en el laboratorio y finalmente el análisis de los datos mediante la herramienta computacional MATLAB.

Los subcapítulos que forman parte de éste capítulo son:

- Enfoque de investigación y diseño
- Contexto y recursos
- Normas para ensayos, instrumentación
- Procesamiento en laboratorio
- Análisis de datos mediante herramienta computacional MATLAB

• **CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

El Capítulo 4, expone dos etapas del proyecto. En primer lugar los resultados se encuentran enfocados al análisis en laboratorio de cada uno de los agregados que los proveedores proporcionan a la Empresa, en este sentido se encuentra relacionado este estudio con un análisis geológico general según el sector en donde se encuentran ubicados las canteras. La siguiente parte de este capítulo se encuentra destinada a la discusión de los resultados obtenidos por medio del programa generado por la herramienta computacional MATLAB, y además a la comprobación del mismo, utilizando los datos arrojados por el mismo, mediante ensayo realizados en el laboratorio.

• **CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

En el Capítulo 5, se encuentran reflejadas las conclusiones obtenidas a partir de la metodología, análisis y comprobación de los resultados que arrojó la interfaz computacional creada. Además se presentan una serie de recomendaciones útiles para mejorar el presente trabajo en líneas futuras de investigación, dentro de este punto también se encuentran expuestos algunos puntos que pueden ser investigados a partir de este trabajo en un futuro y partiendo del mismo. Los dos subcapítulos que forman parte de este capítulo comprenden:

- Conclusiones y recomendaciones
- Líneas futuras de investigación



CAPÍTULO 2

ÁRIDOS, ASFALTOS Y MEZCLAS ASFÁLTICAS

2.1 Áridos

2.1.1 Propiedades físicas

Debido a que el 85 % del volumen de una mezcla asfáltica densa en caliente se compone de agregados, el pavimento de una mezcla asfáltica en caliente tiene un rendimiento que está muy influenciado por las características de los agregados [4].

Las propiedades más importantes que determinan qué agregados son los adecuados para su uso en las mezclas asfálticas son [11]:

- **Tamaño y graduación de las partículas**

Mediante un análisis granulométrico se determinan los diferentes tamaños de los agregados a utilizarse en una mezcla asfáltica. Los agregados se pueden dividir en tres tipos según su tamaño, en agregados gruesos, agregados finos y relleno (finos).

Los agregados gruesos generalmente son los retenidos en la malla N°8 (2,36 mm). Los finos son los que pasan por la malla N°8 y son retenidos en la malla N°200 (75 μ m). El relleno, conocido también como polvo mineral o polvo de roca, se define como la porción del agregado que pasa la malla N°200.



Existen cuatro tipos de graduación del agregado: graduada-densa, graduada-fina, graduada-gruesa y graduada-abierta, para mayor información sobre esto ver el reporte 673 de la National Cooperative Highway Research Program [4].

- **Resistencia al desgaste.**

Para que los áridos gruesos se conduzcan satisfactoriamente en un pavimento, es necesario que tengan la suficiente resistencia contra la acción de la compactación durante la construcción, la acción del tráfico o las cargas repetidas sobre el pavimento, sin llegar a romperse. Las partículas que son duras y resistentes a la abrasión no se descomponen durante el proceso de construcción, lo que ayuda a asegurar que una mezcla asfáltica en caliente pueda ser apropiadamente construida, colocada y compactada. Estos agregados también tienden a producir una mezcla que es resistente al desmoronamiento, ayudan también a mejorar la resistencia a la humedad de las mezclas asfálticas.

Cuando se tiene una baja acción del tránsito se pueden emplear agregados de baja resistencia a la abrasión; sin embargo, esto puede causar la pérdida de la resistencia al deslizamiento en la superficie del pavimento, especialmente cuando está mojado [11]. El ensayo que suele emplearse para estimar la dureza de los agregados es el Ensayo de Desgaste Los Angeles (AASHTO T 96) [12].

- **Resistencia al intemperismo.**

Los agregados deberán resistir a los diferentes procesos que ocurren en la naturaleza, como son los efectos del humedecimiento-secado y congelamiento-deshielo, es decir los ciclos hielo-deshielo, debilitando los agregados. Las piedras que se disgregan en gran cantidad bajo la acción de los agentes atmosféricos se llaman inestables. Los agregados que poseen buena durabilidad y solidez resistirán correctamente los ciclos de mojado-secado y hielo-deshielo durante la vida del pavimento.

- **Densidad relativa y absorción.**

La densidad relativa o gravedad específica puede definirse como la relación entre la masa de un material con la de un volumen igual de agua destilada a una temperatura específica. Las unidades más empleadas para la mayoría de los materiales de construcción se reportan en unidades de g/cm^3 ; para la densidad relativa de las mezclas asfálticas en caliente y otros tipos de hormigón suele presentarse en unidades de kg/m^3 . A menudo suele utilizarse el término gravedad específica como sinónimo de densidad, pero tienen significados diferentes, ya que la gravedad específica es una relación de dos números con las mismas unidades por lo que es adimensional, por esta razón deberá usarse el término con cuidado.

La cantidad de agua que es absorbida en los huecos permeables del agregado se conoce como absorción, es importante ya que cuando el agregado se mezcla



con asfalto, éste será absorbido en los huecos permeables de los agregados, de manera similar que el agua. Debido a que los agregados pueden contener huecos permeables al agua, se usan dos medidas de la densidad relativa de los agregados: la densidad relativa aparente y la densidad relativa neta. La diferencia entre la densidad relativa aparente y la total está en la cantidad o porcentaje de huecos permeables al agua de los agregados.

- **Forma, textura, limpieza y pureza del agregado.**

Los agregados angulares y rugosos son deseables dentro de una mezcla asfáltica, ya que ayudan a resistir las deformaciones y agrietamiento por fatiga, mientras más angulares y de textura áspera sean proporcionan una mejor unión entre las partículas de agregado fino y grueso, ayudando así a prevenir la deformación plástica dentro de las capas de la mezcla asfáltica y el agrietamiento por fatiga.

Agregados angulares con una buena textura de la superficie mejoran también las propiedades de fricción de las capas del pavimento, una consideración de seguridad importante en el diseño de una mezcla asfáltica para pavimentos. La presencia de partículas planas o alargadas dentro de una mezcla es indeseable, ya que estas partículas tienden a descomponerse durante la producción y la construcción, reduciendo así la durabilidad de las capas de la mezcla asfáltica, produciendo posteriormente fallas en los pavimentos como los baches.

La limpieza es un término que se utiliza para caracterizar los recubrimientos en algunas partículas de agregado, estos revestimientos comúnmente son materiales arcillosos muy finos, que afectan la adherencia entre el ligante asfáltico y los agregados, conduciendo a un mayor daño por humedad. La limpieza y pureza de los áridos puede determinarse a veces por simple observación visual, pero para tener una prueba positiva un cribado por vía húmeda sería lo correcto. Materiales perjudiciales entre otros son, la vegetación, pizarra, partículas blandas, carbón, masas de arcilla y revestimiento de arcilla de las partículas gruesas, estos materiales no son tan fuertes como los agregados minerales, su presencia es una de las causas de los baches en los pavimentos.

El Ensayo de Equivalente de Arena especificada en la norma AASTHO T 176 [13], se emplea para descubrir el exceso de arcilla en los áridos.

- **Afinidad por el asfalto o estabilidad química.**

Las superficies de los áridos varían considerablemente en su afinidad por los asfaltos, razón que se debe a la composición química de las partículas del agregado, ciertas partículas tienen una afinidad excesiva por el agua, lo que puede causar que el asfalto se remueva o se levante llevando a la desintegración al pavimento. Los agregados de naturaleza hidrofóbica son aquellos que tienen un alto grado de resistencia a la remoción de la capa de asfalto en presencia



del agua. Por lo contrario, los agregados que no tienen ésta tendencia en un grado marcado y nocivo se llaman agregados hidrofílicos (afines al agua) [14]. Los áridos que tienen gran afinidad por el asfalto se denominan: hidrófobos y esencialmente son de naturaleza caliza, en cambio los que son difíciles de envolver con asfalto y de los que este se separa con facilidad se llaman hidrofílicos y son comúnmente silíceos.

- **Rozamiento interno.**

La propiedad de los áridos que tiende a impedir el movimiento relativo de las piedras bajo la acción de la carga se denomina rozamiento interno; dicha resistencia se debe al entrecruzamiento de las piedras y a la fricción superficial entre las partículas adyacentes. El rozamiento interno no se comprueba por un ensayo directo, pero los valores que se obtienen en el ensayo de estabilidad para las mezclas asfálticas son en gran parte, un reflejo de la fricción interna de los áridos.

2.1.2 Requerimientos de los materiales granulares

Los siguientes son los requerimientos de la Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12 [5], vigente para los materiales granulares que se requieren para la elaboración de la capa de rodadura de hormigón asfáltico en caliente.

- **Requerimientos para agregados gruesos**

Los requerimientos para los agregados gruesos están estipulados por los parámetros de la Tabla 2.1: (Tabla 405.5.1 de la NEVI [5]). El requerimiento de fractura se resenta en la Tabla 2.2

Tabla 2.1: Requerimientos para agregados gruesos [4]

Ensayos	Requerimiento	
	Altitud (msnm)	
	< 3000	> 3000
Durabilidad (al Sulfato de Sodio)	12 % máx	10 % máx
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	18 % máx	15 % máx
Abrasión de Los Ángeles	40 % máx	35 % máx
Índice de Durabilidad	35 % máx	35 % máx
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	0,95 %	



Tabla 2.2: Requerimientos para Caras Fracturadas [5]

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

La notación “85/80” indica que el 85 % del agregado grueso tiene una cara fracturada y que el 80 % tiene dos caras fracturadas.

• **Requerimientos para agregados finos**

Los requerimientos para los agregados finos están estipulados por los parámetros de la Tabla 2.3 (Tabla 405.5.2 de la NEVI [5]), Tabla 2.4 y Tabla 2.5:

Tabla 2.3: Requerimientos para Agregados Finos (NEVI-12, 2013)

Ensayos	Requerimiento	
	Altitud (msnm)	
	<3000	>3000
Equivalentes de Arena	Ver Tabla 2.4	
Angularidad del Agregado Fino	Ver Tabla 2.5	
Adhesividad (Riedel Weber)	4 % mín	6 % mín
Índice de Plasticidad (malla #40)	NP	NP
Índice de Durabilidad	35 mín	35 mín
Índice de Plasticidad (malla #200)	Máx 4	NP
Sales Solubles Totales	0.5 % máx	0.5 % máx
Absorción	0.50 %	Según Diseño

Tabla 2.4: Requerimientos del Equivalente de Arena (NEVI-12, 2013)

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



Tabla 2.5: Angularidad del Agregado Fino (NEVI-12, 2013)

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

2.2 Materiales Asfálticos

2.2.1 Antecedentes históricos

El betún asfáltico (asfalto), es el material más versátil del mundo actual; antiguamente fue usado de varias formas en Mesopotamia, Siria y Egipto [6]. El origen del asfalto utilizado en la antigüedad era el material nativo, procedente de yacimientos o lagunas asfálticas, donde el crudo asfáltico subía a la superficie y las fracciones más ligeras se evaporaron naturalmente. Mediante métodos de destilación lentos y burdos se obtuvieron tanto combustibles para lámparas como productos bituminosos que nos servían para impermeabilizar y pavimentar. Se conoce que los yacimientos más extensos de asfalto nativo se encontraban hace 4 o 5 millares de años en Irak, los egipcios obtenían el asfalto nativo del Mar Muerto y de un yacimiento que se encontraba cerca del río Jordán [6].

Comercialmente existen dos categorías que clasifican al asfalto [11]:

- **Asfalto Natural**

Estos tipos, se encontraban almacenados bajo estrato geológicos, de los cuales surgieron materiales asfálticos blandos y duros, friable, material negro en vetas de formaciones rocosas, o impregnadas en calizas, formaciones de areniscas y similares. El material asfáltico relativo blando es, casi siempre semejante al petróleo pesado.

- **Asfalto de Petróleo**

Los ensayos de extracción y cribado de trozos de pavimento proveniente de las ruinas revelan que antiguamente las mezclas usadas para pavimentar, se asemejan mucho a las actuales mezclas de arena y asfalto. Estos son coloides dispersos en hidrocarburos en el crudo de petróleo y se obtienen mediante su refinación. En 1900 al descubrirse el proceso de refinación y la popularidad de los automóviles, grandes cantidades de petróleo fueron procesados para obtener asfalto. Gradualmente, el proceso de refinamiento de asfaltos es de mejor calidad.



2.2.2 Refinamiento del crudo de petróleo

Los materiales asfálticos de construcción son una parte del procesamiento del crudo de petróleo extraído, la cantidad de asfalto que puede contener un crudo de petróleo depende de la densidad API (American Petroleum Institute), por ejemplo mientras más baja sea la densidad del crudo, mayor será el contenido de asfalto [15].

Una vez transportado el crudo de petróleo a la refinería, se emplean dos procedimientos diferentes para obtener asfalto [11]:

- **Destilación al vapor y vacío**

Este método separa al crudo en diversos productos, el refino del crudo es una operación continua, que se realiza bombeando el crudo mediante un horno, luego al elevarse la temperatura se introduce en una torre de destilación en donde se tiene la primera separación, que reúne en bandejas superiores las fracciones más ligeras y se lleva a un condensador. En los niveles inferiores de dicha torre se sitúan cortes más pesados del crudo, hasta que finalmente en el fondo queda el residuo más pesado que contiene el asfalto.

El tipo de asfalto se lo determina por el ensayo de penetración. El resultado del ensayo de penetración depende de la temperatura a la que se encuentra el crudo en el horno, a mayor temperatura, menor será la penetración y viceversa; por lo que se puede mezclar porcentajes de asfalto al vacío de alta y baja penetración, para así obtener un material que tenga una penetración intermedia.

- **Método de extracción por solventes**

Está íntimamente asociado a la fabricación de lubricantes de alta viscosidad, que requieren un cuidadoso control de la temperatura de crudo, usualmente en este proceso el resultado es un asfalto de penetración baja, para transformar este tipo de asfalto a uno más blando, se deberá combinar con material residual blando.

- **Proceso de cracking**

Estos procesos de obtención por destilación y extracción, consisten básicamente en la separación física de los hidrocarburos componentes constituidos como mezcla en el crudo, por diferencia en sus puntos de ebullición y de condensación. Es otro método de refino con el que se logra obtener un mayor porcentaje de gasolina, consiste en que por medio de calor y presiones internas, producir cambios químicos en el material, obteniendo material bituminoso poco usado para la pavimentación.

2.2.3 Clasificación de los asfaltos

Los asfaltos empleados comúnmente para la construcción de pavimentos se dividen en: emulsiones asfálticas, asfaltos diluidos o cutbacks, asfaltos sopladados y cementos



asfálticos [11].

A continuación se describen cada uno de estos tipos comunes de asfaltos:

- **Emulsiones Asfálticas**

Son mezclas de agua, asfalto y un agente emulsificante. En la Figura 2.1 se puede observar la estructura de una emulsión asfáltica muy diluida. Las emulsiones se preparan para reducir la viscosidad del asfalto, lo que permite aplicar el mismo en zonas de bajas temperaturas, los dos tipos usados de emulsiones asfálticas se especifican en ASTM D 977 [16] y ASTM D 2397 [17]: Aniónicas y Catiónicas.

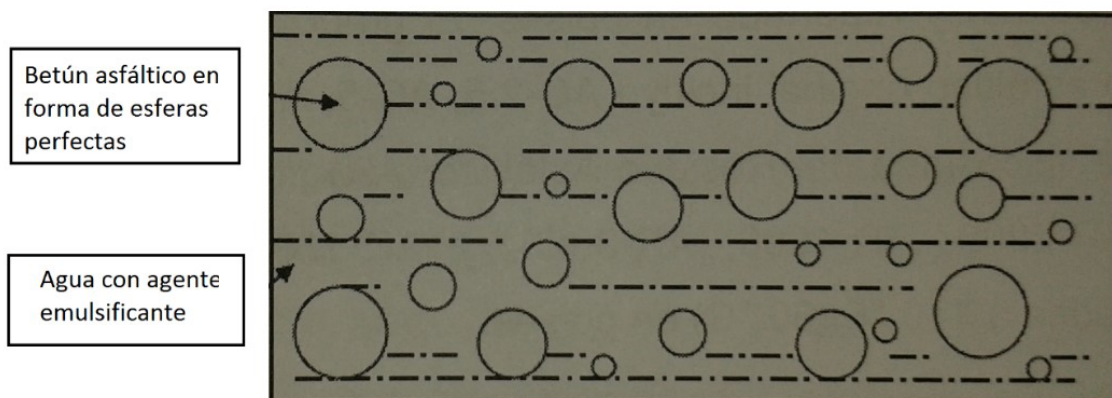


Figura 2.1: Estructura de una Emulsión Asfáltica muy diluída [2]

En la superficie de los agregados minerales se puede tener carga positiva o negativa, si poseen cargas negativas, serán compatibles con las cargas positivas catiónicas de la emulsión asfáltica, como es el caso de los agregados silicios, areniscas, cuarzo y gravas silíceas; caso contrario al tener cargas positivas en su superficie, tendrán compatibilidad con las cargas negativas aniónicas de la emulsión asfáltica, esto sucede debido a que las cargas opuestas se atraen entre sí.

Las emulsiones asfálticas aniónicas se especifican en ASTM D 977 [16] y pueden ser [17]:

- **Rotura Rápida (Rapid Setting, RS)**

Se denominan también en algunos casos materiales de tipo penetración, debido a que originalmente se crearon para romper rápidamente al penetrar la piedra del Macadam.

- **Rotura Media (Médium Setting, MS)**



Generalmente estas emulsiones se rompen debido a la presencia de polvo mineral fino o por fricción durante la mezcla con los áridos, su campo de aplicaciones es muy restringido y se usan principalmente en bacheos.

– Rotura Lenta (Slow Setting, SS)

La relación de rotura se controla por el tipo y cantidad del agente emulsificante. Los grados aniónicos son: RS-1, HFRS-2, RS-2, MS-1, HFMS-2, MS-2, SS-1 y SS-1h, en donde “h” significa que en la emulsión se ha empleado cemento asfáltico duro y, “HF” se refiere a un alto residuo flotante, el cual indica el proceso químico del residuo emulsificante. La rotura de éstas es relativamente lenta, ya que dependen de la evaporación del agua que contiene, para que las partículas de asfalto se unan.

Las emulsiones asfálticas catiónicas se especifican en ASTM D 2397 [17], y pueden ser: Rotura Rápida (rapid setting, CRS), Rotura Media (médium setting, CMS) y Rotura Lenta (slow setting, CSS). Los grados catiónicos son CRS-1, CRS-2, CMS-1, CMS-2, CMS-2h, CSS-1 y CSS-1h.

En la norma ASTM D 3628 [18], se dan los diferentes usos para las emulsiones asfálticas:

- **Emulsión de Rotura Rápida:** Tratamiento superficial y macadams de penetración.
- **Emulsión de Rotura Media:** Mezclas asfálticas en frío de gradación abierta.
- **Emulsión de Rotura Lenta:** Riego de liga, mezclas asfálticas en frío de gradación densa.

• **Asfaltos diluidos o cutbacks**

Son materiales asfálticos de consistencia blanda o fluida, por ello no se incluyen en el ensayo de penetración. Los materiales asfálticos se designan por sus iniciales en inglés, curado rápido RC (Rapid Curing), curado medio MC (Medium Curing) y curado lento SC (Slow Curing). Los asfaltos menos viscosos se designan por el número 0, como RC-0, los números 0, 1, 2, 3, 4 y 5 designan asfaltos progresivamente menos fluidos o de mayor viscosidad al crecer los números [19].

– **Curado rápido (RC)**



Denominados así por fabricarse al mezclarse asfalto con disolvente (de bajo punto de ebullición) como nafta y gasolina, la cantidad de disolvente empleado dependerá del tipo de cutback de curado rápido que se desee obtener, ya que por ejemplo para un RC-5 aproximadamente se deberá mezclar 15 % de disolvente y un 85 % de asfalto y para un RC-0 será de 45 % de disolvente y un 55 % de asfalto, en donde el RC-0 tendrá una viscosidad menor. Se usa principalmente como capa ligante y tratamiento superficial.

– **Curado medio (MC)**

Se forma mezclando asfalto con disolvente (de punto de ebullición intermedio) como el keroseno, la relación entre el grado y la viscosidad para estos cutbacks son las mismas que para los de curado rápido.

– **Curado lento (SC)**

Las especificaciones para los cutbacks de curado lento, medio y rápido se dan en ASTM D 2026 [20], ASTM D 2027 [19] y ASTM D 2028 [21], respectivamente.

Existen dos procedimientos para fabricarlos, primero al mezclar asfalto con gasoil de alto punto de ebullición, y segundo controlando el caudal y temperatura del crudo durante la primera destilación.

• **Asfaltos soplados u oxidados**

Se obtienen al inyectar aire mediante el residuo durante la última parte del proceso de refinación. Los asfaltos oxidados son los más rígidos que se fabrican, tienen la propiedad de mantener una alta consistencia ante las diferentes temperaturas dadas por los agentes atmosféricos [22]. No se emplean normalmente para mezclas de pavimentación, sino más bien para techados, cajas de baterías, revestimientos de interiores de automóviles, para pinturas impermeabilizantes, relleno para juntos en pavimentos de hormigón y para sellado inferior de pavimentos rígidos viejos, donde se han producido cavidades. Si se adiciona un catalizador durante la oxidación se obtiene un asfalto oxidado catalítico tiene propiedades como elasticidad que hace asemejarse a la goma, y se emplea como revestimiento para canales.

• **Cementos asfálticos**

Mediante las diferentes técnicas de destilación del crudo del petróleo, se obtiene el cemento asfáltico. En los fondos de la torre de vacíos, luego de procesos de destilación por unidades primarias y de vacío, se obtiene el cemento asfáltico de petróleo, con una consistencia semisólida a temperatura ambiente, teniendo características como de color negro, pegajoso y altamente viscoso, resistente



a la acción de ácidos, álcalis y sales. El cemento asfáltico se usa en grandes cantidades para producir mezclas asfálticas en caliente (HMA—Hot Mix Asphalt) que es usado para la construcción de pavimentos flexibles. Las especificaciones para cemento asfáltico se encuentran en la norma ASTM Requirements for Penetration Graded Asphalt Cements.

Una clasificación de los cementos asfálticos en diferentes grados se basa en su penetración, viscosidad o comportamiento, así el grado de penetración se especifica en la ASTM D 946 [23], con cinco penetraciones estándares, 40-50, 60-70, 85-100, 120-150, 200-300. Un alto valor de penetración representa un cemento asfáltico blando.

2.2.4 Ensayos a los materiales bituminosos

Se describe a continuación los diferentes ensayos que se realizan en los materiales bituminosos [11]:

- **Penetración.**

Este ensayo ayuda a determinar la consistencia relativa o dureza de un material bituminoso, lo que se mide en el ensayo es la distancia que una aguja normalizada penetra verticalmente en una muestra de asfalto en condiciones especificadas de temperatura, carga y tiempo. Si no se dice lo contrario, la medida de la penetración debe realizarse a una temperatura de 25°C, con la aguja de dimensiones especificadas cargada con 100 gramos y el tiempo de penetración de 5 segundos. Las unidades de expresión de la profundidad a la que la aguja se hunde son en décimas de milímetro. El material será más blando mientras mayor sea la penetración.

Para comprobar el comportamiento del asfalto lo que se suele realizar es varios ensayos de penetración a diferentes temperaturas, cargas de aguja y tiempo de penetración. Los aparatos y procedimientos que se requieren para realizar este ensayo se describen en las normas AASHTO T 49 [22] y ASTM D 5 [24].

- **Viscosidad.**

El ensayo de viscosidad para un material bituminoso, tiene como objetivo determinar el estado de fluidez de los asfaltos a temperaturas que se emplean durante su aplicación. Se mide a través del ensayo de Viscosidad Furol y del ensayo de Viscosidad Cinemática. Lo que el ensayo de viscosidad Furol realiza es medir la viscosidad de asfaltos líquidos; es el número de segundos que se requieren para que 60 cm^3 del material fluyan a través de un orificio de tamaño



especificado y a una temperatura especificada (60° C). El equipo y procedimiento descrito en la norma AASHTO E 102 [25] ayuda con la realización de este ensayo.

La viscosidad cinemática se mide normalmente empleando viscosímetros de tubo capilar de cristal, este ensayo se describe de mejor manera en la norma ASTM D 445 [26].

- **Punto de inflamación.**

El ensayo de punto de inflamación, consiste en la temperatura a la que el material puede calentarse sin peligro de inflamación en presencia de llama libre, dicho punto de inflamación es de utilidad ya que desde este punto se deberán tomar precauciones para evitar peligros de incendio durante su calentamiento y manipulación. La norma ASTM D 92 [27] describe el proceso y los aparatos para realizar el ensayo.

- **Ductilidad.**

El ensayo mide la distancia en centímetros que un trozo de asfalto puede estirarse sin llegar a romperse. La sección transversal mínima de la pieza de asfalto es de 1 cm^2 . El ensayo normal de ductilidad se lo realiza a una temperatura de 25° C con una velocidad de separación de piezas de 5 cm/min . En las normas AASHTO T 51 [28] y ASTM D 113 [29] se encuentra más detallado el ensayo.

- **Solubilidad.**

Este ensayo determina la porción de betún asfáltico que es soluble en sulfuro de carbono. Su determinación es sencilla, es un proceso de disolución del betún en un disolvente, separando la materia soluble. Las normas AASHTO T 44 [30] y ASTM D 4 [31] describen los procedimientos a seguir.

- **Peso específico.**

El peso específico es la relación de un volumen determinado del material con el peso de un volumen igual de agua, a la misma temperatura. Para determinarlo mediante el picnómetro su procedimiento se describe en las normas AASHTO T 43 [14] y ASTM D 70 [32].

- **Punto de reblandecimiento.**

Los asfaltos reblandecen a diferentes temperaturas, el punto de reblandecimiento se determina por el método de ensayo del punto de reblandecimiento anillo y bola. Los asfaltos con puntos de reblandecimiento altos son menos susceptibles



a cambios de consistencia debido a la temperatura [33].

- **Destilación.**

Este ensayo determina las proporciones relativas de betún asfáltico y disolventes que se encuentran en el asfalto. Es de importancia debido a que indica la velocidad a la cual el material curará después de su aplicación. Las normas AASHTO T 78 [34] y ASTM D 402 [35] describen los procedimientos.

- **Ensayo del flotador.**

Es un ensayo de viscosidad modificado, se emplea porque el residuo de un material bituminoso es demasiado blando para el ensayo de penetración o demasiado volumen para el ensayo de viscosidad Furol. Las normas AASHTO T 50 [36] y ASTM D 139 [37] describen el procedimiento.

- **Sedimentación.**

Este ensayo ayuda a determinar si es posible almacenar con seguridad una emulsión sin que el asfalto se asiente en el fondo. El procedimiento y material necesarios se describen en las normas AASHTO T 59 [38] y ASTM D 244 [39].

- **Demulsibilidad.**

Este ensayo permite determinar la resistencia relativa a la rotura por contacto con la superficie de los áridos. Se emplea en el ensayo solución de cloruro cálcico en agua, luego se tamiza la mezcla para determinar la cantidad de asfalto separada de la emulsión. Las emulsiones de tipo RS emplean una baja solución de cloruro cálcico, mientras que las de tipo MS requieren una solución más fuerte. Las normas AASHTO T 59 [40] y ASTM D 244 [41] describen los procedimientos para realizar este ensayo.

- **Ensayo de Tamizado.**

Se realiza este ensayo para determinar si una emulsión es o no satisfactoria para su aplicación a través de distribuidores a presión y también si el asfalto ha sido o no emulsificado correctamente. Las normas que describen los procedimientos a seguir son AASHTO T 59 [40] y ASTM D 244 [41].

- **Mezcla con cemento.**

Este ensayo se incluye en las especificaciones de las emulsiones de tipo lento, para que puedan mezclarse con áridos de cualquier naturaleza. Las normas que describen este procedimiento son AASHTO T 29 y ASTM D 244 [42].



- **Ensayo sobre el residuo.**

Comúnmente se realizan sobre el residuo de destilación los ensayos de penetración, solubilidad y ductilidad correspondientes a los betunes asfálticos, sus procedimientos se encuentran en las normas: AASHTO T 49 [22]/ASTM D 5 [24], AASHTO T 44 [30]/ASTM D 4 [31] y AASHTO T 51 [28]/ASTM D 113 [29].

2.3 Mezclas asfálticas

Una mezcla asfáltica también es conocida como aglomerado, básicamente se encuentra conformada por la combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato. Las mezclas se fabrican en plantas fijas o móviles, y se transportan a la obra en donde se extienden y compactan [43].

Las mezclas asfálticas aproximadamente están compuestas por un 90% de árido grueso, un 5% de polvo mineral y el otro 5% es el cemento asfáltico. Las proporciones relativas de los agregados, determinan las propiedades físicas de la mezcla, además eventualmente, el rendimiento de la misma según el uso que para el que sea diseñada [44].

2.3.1 Propiedades consideradas en el diseño de mezclas

El diseño de una mezcla asfáltica consiste en la selección del tipo y granulometría del agregado que se empleará, y la selección del tipo y contenido de asfalto, para de esta manera obtener las propiedades que se requieren en la mezcla y que las mismas satisfagan los requisitos del proyecto. Las propiedades relevantes en una mezcla asfáltica en caliente son [45]:

- **Estabilidad o resistencia a las deformaciones plásticas**

Esta propiedad depende principalmente de la fricción interna y la cohesión. La fricción interna depende de la textura superficial, forma de la partícula, y granulometría del agregado; así como de la densidad de la mezcla, y la cantidad y tipo de asfalto; mientras que la cohesión depende del contenido de asfalto. La cohesión se incrementa con el incremento del contenido de asfalto, hasta un punto óptimo, después del cual el aumento en el contenido de asfalto forma una película demasiado gruesa en las partículas de asfalto, lo que produce una pérdida de fricción entre las partículas de agregado.

Se refiere también, a la capacidad de la mezcla para resistir la deformación y el desplazamiento, debido a las cargas del tráfico. Se dice que un pavimento



es estable cuando no pierde su forma, y es inestable cuando presenta deformaciones permanentes, corrugaciones y otros signos de desplazamiento de la mezcla.

- **Resistencia a la fatiga**

Es la capacidad de la mezcla asfáltica para resistir cargas repetidas causadas por el paso de los vehículos. El agrietamiento por fatiga está relacionado con el contenido y la rigidez del asfalto. Por su parte, los contenidos de asfalto muy altos harán que la mezcla tienda más a deformarse elásticamente (o a deformarse menos) que a fracturarse bajo carga repetida. Aunque también debe señalarse que la resistencia a la fatiga depende en gran medida de la relación entre el espesor estructural de la capa y la carga.

- **Durabilidad**

Es la propiedad de la mezcla asfáltica que describe su capacidad para resistir los efectos perjudiciales del aire, agua, temperatura y tránsito que pueden provocar envejecimiento del asfalto, desintegración del agregado y desprendimiento de la película de asfalto del agregado. Una buena mezcla asfáltica no debe sufrir envejecimiento excesivo durante la vida en servicio. Esta propiedad se relaciona con el espesor de la película de asfalto, y con los vacíos de aire.

- **Trabajabilidad**

Es la propiedad relacionada con la facilidad con que la mezcla asfáltica es colocada y compactada in situ. Una buena mezcla debe ser capaz de permitir su colocación y compactación, sin que se requiera un esfuerzo demasiado grande. Esta propiedad, generalmente depende de uno, o una combinación, de los siguientes factores: características del agregado, la granulometría, el contenido y la viscosidad del asfalto.

- **Flexibilidad**

Es la capacidad de la mezcla asfáltica para amoldarse, sin sufrir agrietamiento o fisuración, a los asentamientos y movimientos graduales de la base y la subrasante. En ocasiones esta propiedad presenta conflictos con los requerimientos de estabilidad.

- **Resistencia al deslizamiento**

Es la capacidad de la mezcla asfáltica para no perder adherencia entre el neumático y la superficie de rodamiento, en particular cuando está húmeda. Una resistencia al deslizamiento baja se relaciona generalmente con las características del agregado y el contenido de asfalto.



- **Resistencia al fracturamiento por baja temperatura**

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

- **Resistencia al daño por humedad o impermeabilidad**

Es la resistencia al paso de agua y aire hacia el interior, o a través de la mezcla asfáltica. La resistencia al daño por humedad se relaciona con las propiedades químicas del agregado mineral y el contenido de vacíos de aire en la mezcla compactada, y por tanto con los procesos de oxidación del asfalto, su adherencia y el drenaje del pavimento [43].

2.3.2 Diseño de mezcla asfáltica por el método de Marshall

Se ha comprobado que el 75% de las carreteras en Estados Unidos emplean el método Marshall, y el 25% el método Hveem. El método Marshall para mezclas asfálticas fue desarrollado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi, Estados Unidos, en 1939 [6]. El objetivo primordial fue dirigido a determinar energía y densidad de mezclas en obra y laboratorio para asegurar un buen comportamiento del diseño según las especificaciones. Es la US Army Corps of Engineers que depuró y adicionó ciertos aspectos a la propuesta de Marshall, el ensayo fue normalizado como ASTM D 1559 [7] (AASHTO T 225 [46]). Este método asigna importancia a las propiedades volumétricas de la mezcla ya que está dirigido al diseño de una adecuada mezcla asfáltica por medio del análisis de su estabilidad, fluencia, densidad y vacíos.

Este análisis garantiza que las importantes proporciones volumétricas de los componentes de la mezcla estén dentro de rangos adecuados para asegurar una mezcla durable. Una de sus grandes desventajas es el método de compactación de laboratorio por impacto, el que no simula la densificación de la mezcla bajo el tránsito en el campo.

En resumen, se deben realizar los siguientes procedimientos [45]:

- **Preparación de muestras para efectuar ensayos**

- **Preparación del asfalto**

- Las muestras del asfalto deberán tener características idénticas a las del asfalto que va a ser usado en la mezcla final, y deberán cumplir con los requisitos de calidad establecidos en la Tabla 810.2.1 (MOP 001 F 2002-Norma Ecuatoriana Vial antigua).



– **Preparación del agregado**

La preparación del agregado consiste en secar los agregados, determinar su peso específico y efectuar un análisis granulométrico por vía húmeda (AASHTO T 27 [47]). Para ello, se deberán emplear una de las granulometrías indicadas en la tabla 405-5.6 de la NEVI [5].

– **Preparación de las probetas de ensayo**

Las probetas de ensayo son preparadas haciendo que cada una contenga un aligera cantidad diferente de asfalto (ASTM D 1559 [7]).

• **Procedimientos del ensayo Marshall**

– **Determinación de la gravedad específica total**

La prueba de gravedad específica puede desarrollarse tan pronto como la probeta se haya enfriado a la temperatura ambiente. Para determinar qué norma se debe utilizar, se realizarán pruebas de absorción mayor al 2 %, se utiliza la norma ASTM D 1188 [48], caso contrario, se recurre a la norma ASTM D 2726 [49].

– **Ensayo de estabilidad y fluencia**

Después de que la gravedad específica se ha determinado, se desarrolla la prueba de estabilidad y flujo. En el ensayo de estabilidad se mide la resistencia a la deformación de la mezcla a 60°C, mientras que la fluencia medida en centésimas de pulgada, representa la deformación de la briqueta (ASTM D 1559 [7]).

– **Análisis de densidad y vacíos**

Utilizando la gravedad específica y la gravedad específica efectiva del total del agregado; el promedio de las gravedades específicas de las mezclas compactadas; la gravedad específica del asfalto y la gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica (ASTM D 2041 [50]), se calcula el porcentaje de asfalto absorbido en peso del agregado seco, porcentaje de vacíos (V_a); porcentaje de vacíos llenados con asfalto (VFA) y el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA).

En la Tabla 2.6 (Tabla 405-5,10 de la NEVI) se presentan los vacíos mínimos en porcentajes de agregado para el tipo de mezcla asfáltica que se realice [5], y en la Tabla 2.7 los criterios del método Marshall.

• **Procedimiento de cálculo para diseñar las mezclas**

– Gravedad específica neta del agregado:

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_N}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_N}{G_N}} \quad (2.1)$$

**Tabla 2.6: Porcentaje de vacíos mínimos en función del tipo de mezcla [5]**

Tamiz	Vacíos mínimos en agregado %
	Marshall
2,36 mm (N° 8)	21
4,75 mm (N° 4)	18
9,5 mm (3/8")	16
12,5 mm (1/2")	15
19 mm (3/4")	14
25 mm (1")	13
7,5 mm (1 1/2")	12
50 mm (2")	11,5

donde:

G_{sb} : Gravedad específica neta para el agregado total.

P_1, P_2, \dots, P_N : Porcentajes individuales por masa de agregado

G_1, G_2, \dots, G_N : Gravedad específica neta individual del agregado

– Gravedad específica efectiva del agregado:

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \quad (2.2)$$

donde:

G_{se} : Gravedad específica efectiva del agregado total.

G_{mm} : Gravedad específica máxima (Ensayo RICE).

P_{mm} : Porcentaje de masa del total de la mezcla suelta (100%).

P_b : Contenido de asfalto con el cual se desarrolló el ensayo RICE.

G_b : Gravedad específica del asfalto.

– Gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica:

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

donde:

G_{mm} : Gravedad específica máxima de la mezcla del pavimento (sin vacíos de aire).

$P_s = P_{mm} - P_b$: Porcentaje de sólidos

– Absorción de asfalto:

$$P_{ba} = 100 * \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} * G_{se}} * G_b \quad (2.4)$$

donde:

P_{ba} : Asfalto absorbido



- Contenido de asfalto efectivo:

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba}}{100} * P_s \quad (2.5)$$

donde:

P_{be} : Contenido de asfalto efectivo, en porcentaje de la masa total de la mezcla.

- Porcentaje de vacíos en el agregado mineral:

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} * P_s}{G_{sb}} \quad (2.6)$$

donde:

VMA : Vacíos en el agregado mineral (porcentaje del volumen neto).

G_{mb} : Gravedad específica bulk (neta) de la mezcla asfáltica compactada (ASTM D 1888 [46])

- Porcentaje de vacíos de aire:

$$V_a = 100 * \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \quad (2.7)$$

donde:

V_a : Vacíos de aire en la mezcla compactada en porcentaje del volumen total.

- **Determinación del contenido óptimo de asfalto**

El método empleado por la Empresa para determinar el porcentaje óptimo de asfalto es el método NAPA, para lo cual primero se determina el contenido de asfalto para el cual el contenido de vacíos de aire es 4 % (Figura 2.6).

Con el porcentaje de asfalto determinado, se evalúan todas las propiedades calculadas y medidas, y las comparamos con los criterios de diseño de la Tabla 2.7 (tabla 812-4.1 de la NEVI [5]):

- **Análisis de resultados** Para realizar el correcto análisis de los resultados obtenidos se deben dibujar gráficas que establezcan las siguientes relaciones:
 - Densidad vs % de cemento asfáltico
 - Estabilidad vs % de cemento asfáltico
 - Flujo vs % de cemento asfáltico
 - % de vacíos con aire en la mezcla total vs % de cemento asfáltico



Tabla 2.7: Criterios NAPA método Marshall

Criterios para mezclas del método Marshall	Tránsito liviano carpeta y base		Tránsito mediano carpeta y base		Tránsito pesado carpeta y base	
	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx
Compactación, número de golpes en cada cara de la probeta		35		50		75
Estabilidad N (lb)	3336 (750)		5338 (1200)		8006 (1800)	
Flujo, 0.25mm (0.01<in)	8	18	8	16	8	14
Porcentaje de vacíos	3	5	3	5	3	5
Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA)	Ver tabla 3.812-07 (NEVI 12)					
Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA)	70	80	65	78	65	75

– % de vacíos en los agregados minerales vs % de cemento asfáltico

Cabe notar que los resultados que se grafican son básicamente: % Agregado, % de cemento asfáltico, densidad, estabilidad, flujo, VFA y VAM. Finalmente, se procede a realizar un promedio de los porcentajes de asfalto obtenidos de las diferentes gráficas, obteniéndose así el porcentaje óptimo para la mezcla asfáltica.

• Verificación de resultados

Con las cantidades de las diversas fracciones definidas para los agregados, con el contenido óptimo de asfalto, y seleccionando la temperatura que deberá tener el hormigón en la mezcladora y al colocarla en el sitio, se determina la fórmula maestra de obra.

El porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral puede ser revisado usando la Tabla 2.8 en donde debe ser comparado con el VMA de la gradación del agregado. (Tabla 3.812-07 de la NEVI [5])

• Pautas de comportamiento

El comportamiento normal de una mezcla asfáltica es el siguiente [51]:

**Tabla 2.8: Vacíos en el Agregado Mineral (Requisitos de VMA)**

Tamaño máximo nominal de las partículas*	VMA mínimo, en porcentaje Vacíos de diseño, en porcentaje		
	3	4	5
No 16 (1.18 mm)	21.5	22.5	23.5
No 8 (2.36 mm)	19	20	21
No 4 (4.75mm)	16	17	18
3/8 in (9.5 mm)	14	15	16
1/2 in (12.5 mm)	13	14	15
3/4 in (19 mm)	12	13	14
1 in (25 mm)	11	12	13
1.5 in (37.5 mm)	10	11	12
2.0 in (50 mm)	9.5	10.5	11.5
2.5 in (63 mm)	9	10	11

*El tamaño máximo nominal de la partícula es un tamaño más grande que el primer tamiz que retiene más del 10 % del material.

- La densidad aumenta con el contenido de asfalto hasta un máximo después del cual comienza a decrecer.
- La curva de estabilidad es similar a la de la densidad, salvo que la máxima estabilidad ocurre normalmente (no siempre) a un contenido de asfalto ligeramente inferior al de máxima densidad.
- Los valores de flujo aumentan con los incrementos en el contenido de asfalto.
- El porcentaje de vacíos en los agregados minerales disminuye al incrementarse el contenido de asfalto, hasta alcanzar un mínimo a partir del cual comienza a aumentar.



CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA Y MATERIALES PARA INVESTIGACIÓN

3.1 Enfoque de investigación y diseño

El análisis de la dosificación óptima de mezclas asfálticas en función de materiales disponibles en la región se realizará desde un enfoque cuantitativo, desde éste punto de vista se utilizará información netamente medible para llevarla a cabo [52].

Para seguir este enfoque se siguió la siguiente metodología [53]:

- El problema a tratarse es la necesidad de una aplicación que ayude a ahorrar tiempo en preproducción de mezclas asfálticas en la Empresa ASFALTAR EP.
- En revisión de la literatura se analizaron estudios que se realizan en cuanto a diseños de mezclas asfálticas en caliente se refiere, además de delimitar el contexto en el que la Empresa se encuentra actualmente (Capítulo 1).
- Se construyó un marco teórico en el cual se explican tanto los aspectos más fundamentales de ese tipo de investigación, como la metodología empleada en este trabajo (Capítulos 2 y 3).
- De la teoría se derivan las hipótesis que se pretenden analizar para probar si son o no ciertas; en el presente caso, es mediante el uso de técnicas numéricas y mediante prácticas en laboratorio lo que permitirá encontrar el porcentaje óptimo de asfalto en base a la combinatoria granulométrica que se forma para diversos agregados (Capítulos 2 y 3).



- En este punto, se realizarán las pruebas que están basadas en dos fases; la primera, se encuentra enfocada a la elaboración del programa computacional que combina a las herramientas MATLAB y EXCEL, el mismo que arroja el porcentaje de asfalto, en función al análisis estadístico de recurrencia de diseños. La segunda fase, está establecida en la parte experimental, el diseño de briquetas ayudará a corroborar la confiabilidad o restricción del programa (Capítulos 3 y 4).
- La parte última es la generación de resultados y conclusiones en base a toda la experimentación y diseño realizados anteriormente (Capítulo 5).

3.2 Contexto y recursos

A continuación se presenta de manera general el contexto sobre el cual se va a trabajar, enfocado hacia la geología, ya que muchas de las propiedades de los agregados pueden ser predecibles gracias a las características de la zona de donde son explotados (éstos son los que influyen directamente en la mezcla asfáltica) tal es el caso del porcentaje de absorción, densidad absoluta o el porcentaje de abrasión.

Si bien el cemento asfáltico y el aditivo que se usarán en la mezcla son de gran importancia en la misma, no cabe duda que el protagonismo de esta investigación la tienen los agregados con los que se trabaja. Éstos brindan la información necesaria que se utilizará para realizar un análisis de dosificación de asfalto.

3.2.1 Estudio geológico de las canteras

A continuación se realiza un estudio geológico de las diferentes zonas en donde se encuentran las canteras, el estudio se hace de manera general para poder determinar diferentes propiedades físicas, que pueden tener los agregados explotados en éstas; tales como: absorción, abrasión, o densidad[54].

La información de los mapas está en un archivo de Información Geográfica de la Secretaría Nacional de Información, la misma que se empleó para determinar las formaciones existentes en los diferentes sectores [55]. En base a los siguientes mapas se analiza la geología por sectores, partiendo de una descripción general y regional.

- **Geología general cantón Paute**

A continuación en la Figura 3.1, se presenta la descripción geológica general del cantón Paute

- **Geología Regional:**

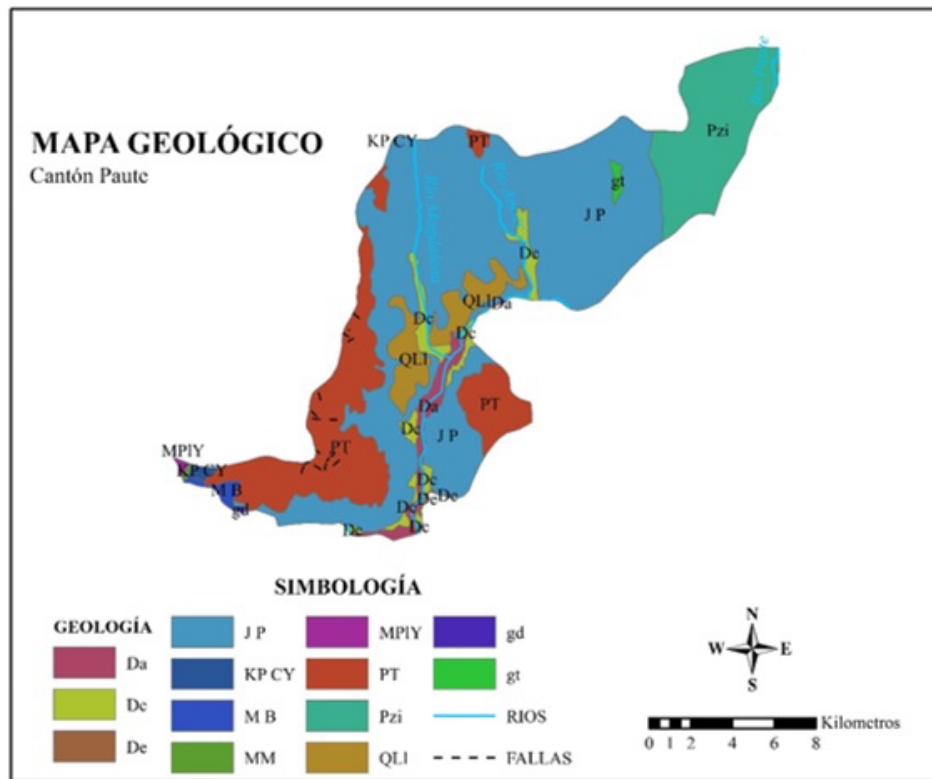


Figura 3.1: Geología del Cantón Paute Esc. 1:300,000

- * **Da: Depósito aluvial (Cuaternario):** se encuentra en la mayoría de los valles amplios, en general consisten en rocas gruesas, conglomerados, arenas.
- * **Dc: Depósito coluvial (Cuaternario):** se puede observar varios depósitos coluviales, muchos de los valles tienen sus laderas cubiertas de una capa de material coluvial. Mucho de este material probablemente se originó como talud durante el Pleistoceno tardío, pero su formación continúa hasta ahora.
- * **De: Derrumbe (Cuaternario):** zona de alto riesgo de caída de varias formas geológicas, como clastos, conglomerados.
- * **J P: Serie Paute (Jurásico):** Constituyen las rocas más antiguas descubiertas dentro de la zona. Está compuesta por una serie de esquistos verdes, filitas negras y meta-volcánicas de san francisco.
- * **KP CY: Formación Yunguilla (Cretáceo-Paleoceno):** predominan las argilitas negras pasando a arcillas café obscuras o negras. La silificación es común, encontrándose depósitos de caliza y concreciones carbonatadas en toda su formación. En varios lugares son observadas areniscas tobáceas y capas guijarrosas fosilíferas, así como lavas andesíticas, también podemos encontrar tobas.
- * **M B: Formación Biblián (Mioceno):** El depósito se basa en guijarros medianamente grueso, a menudo con cantos de la formación yungui-



Ila. En esta litología predominantemente tenemos lavas andesitas y piroplásticos.

- * **MM: Formación Mangán (Terciario):** vetas de carbón, areniscas tobáceas, café, gruesa y lutitas limosas verdes y rojas.
 - * **MP1Y: Formación Azogues (Mio-Plioceno):** la secuencia esta predominada por areniscas tobáceas, gruesas, de color café, pero los depósitos de limonitas y arcilla. Tiene un conglomerado de base bien consolidado que puede encontrarse donde la formación a sobrepasado las subyacentes, presenta también bentonitas.
 - * **PT: Formación Tarqui (Cuaternario):** está constituida por conglomerados que forman escarpes, sobre las cuales vienen una sucesión de capas guijarrosas, limosas y arenosas. La parte alta de la formación contiene argilitas y areniscas con cierto contenido de bloques angulares. El conglomerado es básicamente de origen volcánico con fenocristales de hornblenda y feldespatos en una matriz afanítica de color gris. Además presenta en ciertos lugares aglomerados, lavas y dacitas.
 - * **Pzi: Rocas metamórficas indiferenciadas (Paleozoico-Mesozoico):** se encuentran esquistos verdes, grafitosos, cuarcitas, gneis, meta andesitas, filitas con cuarzo.
 - * **QL1: Volcánicos de Llacao (Cuaternario):** consisten predominantemente de aglomerados en una matriz de vidrio blanco desvitrificado, pero también se encuentran tobas blancas y estratificadas que son notoriamente inestables.
 - * **gd: Granodiorita:** es una roca ígnea plutónica parecida al granito, principalmente constituida por cuarzo y feldespatos, los minerales secundarios son la biotita, el anfíbol y el piroxeno.
 - * **gt: Tilita (Cuaternario):** forman terrenos húmedos y ondulados.
- **Geología Estructural:** Se puede observar tres fallas, no muy grandes, que atraviesan la Formación Tarqui (PT), y tienen una dirección Suroeste-Noreste.

• Geología general cantón La Troncal

A continuación en la Figura 3.2, se presenta la descripción geológica general del cantón La Troncal.

– Geología Regional:

- * **Ci:** se encuentran cornubianitas indiferenciadas, rocas afectadas por metamorfismo de contacto.
- * **Daa: Depósito aluvial antiguo (Cuaternario):** presenta generalmente lo que encontramos en un depósito aluvial.
- * **Dar: Depósito aluvial de río (Cuaternario):** formado por los propios sedimentos del río que se depositan a los lados del cauce en los

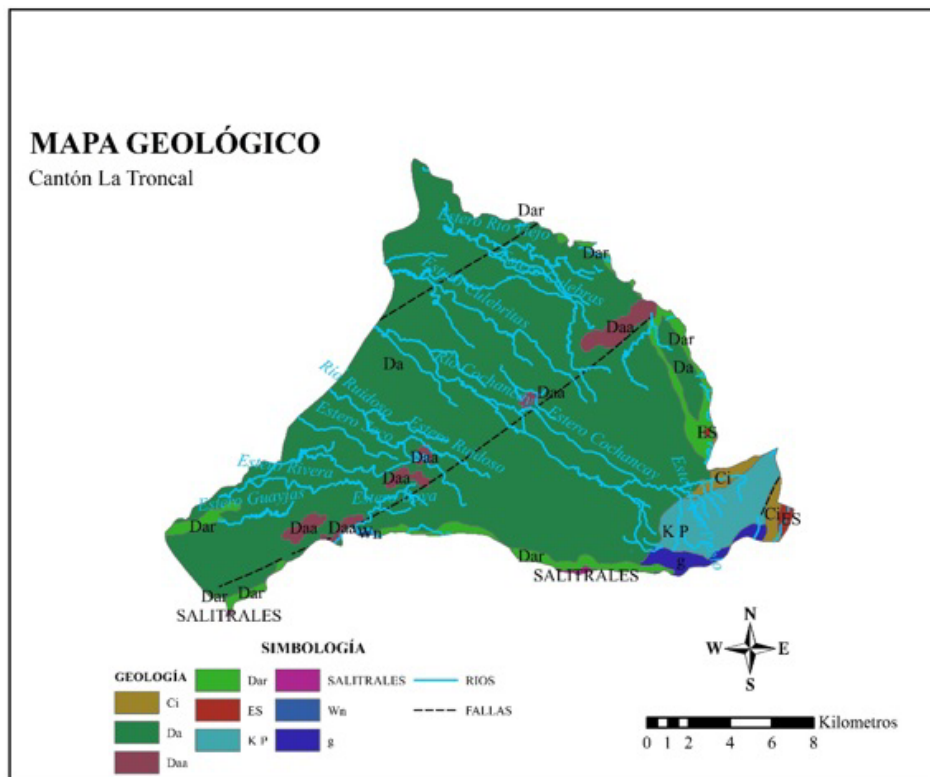


Figura 3.2: Geología del Cantón La Troncal Esc. 1:300,000

lugares en los que la pendiente del mismo se hace menor, comúnmente una capa delgada de arena y grava descansa sobre el fondo de estos depósitos.

- * **ES: Formación siliente(Eoceno):** podemos encontrar en esta formación material como lavas, andesitas, volcano-sedimento, tobas. Presenta también lutitas rojas, verdes, conglomerados.
- * **K P: Formación Piñon (Cretáceo):** constituye la base de todas las cuencas terciarias. Presenta rocas ígneas básicas tales como: diabasa, basalto equigranular de grano fino, aglomerado basáltico, toba, capas delgadas de argilita. Se puede encontrar también andesitas y dacitas.
- * **Salitrales (Cuaternario):** depósito aluvial de estero.
- * **Wn:** laguna el Canal.
- * **g:** rocas graníticas indiferenciadas.

– **Geología Estructural:** Dos fallas son observadas, las mismas que son paralelas y atraviesan varios depósitos aluviales, también atraviesan varios ríos, su dirección es de Suroeste-Noreste.

• Geología general cantón Santa Isabel

A continuación en la Figura ??, se presenta la descripción geológica general del cantón Santa Isabel.

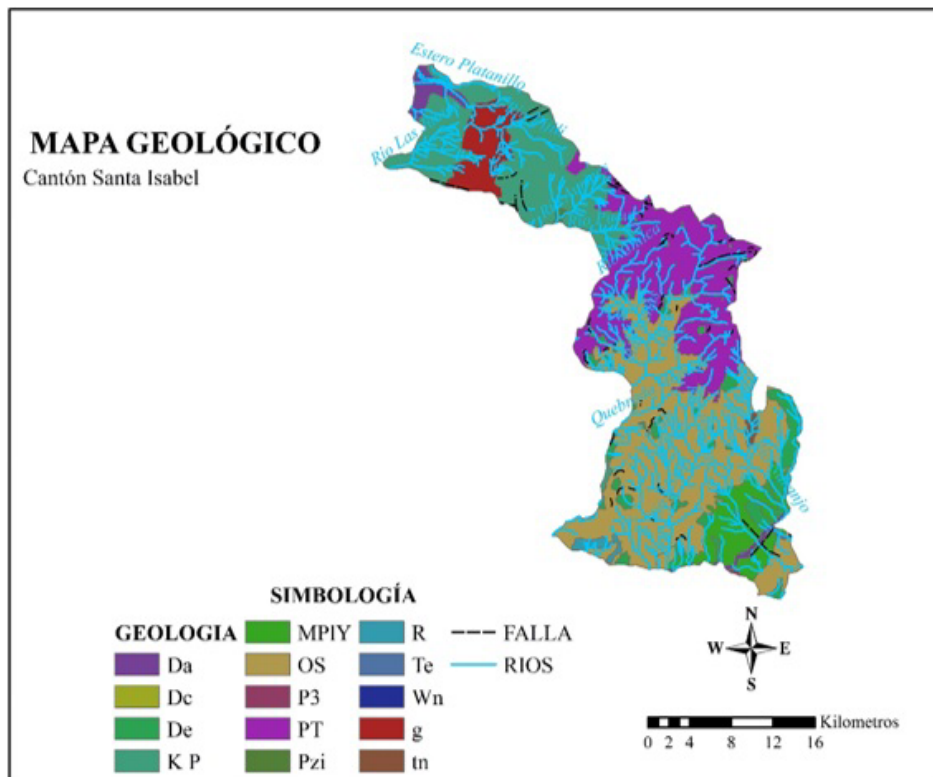


Figura 3.3: Geología del Cantón Santa Isabel Esc. 1:600,000

– **Geología Regional:**

- * **OS: Volcánicos de Saraguro 1000 M (Oligoceno):** se puede encontrar tobas, porfido cuarcifero, tobas riolíticas, capas de ignimbrita y coladas de andesita.
- * **P3: Formación Uchucay 50 M (Cuaternario):** lo que predomina es el conglomerado y limolita.
- * **R:** riolita, se forman a partir de erupciones volcánicas como granito, ceniza y son el resultado del enfriamiento de un magma viscoso.
- * **Te: Terrazas Aluviales (Cuaternario):** se componen de depósitos gruesos derivados de corrientes.
- * **tn:** tonalita, son rocas plutónicas con cierta semejanza con la granodiorita en tanto que se caracteriza por la abundancia de cuarzo y plagioclasa como minerales félsicos, y biotita y anfíbol como minerales máficos. Sin embargo, en este caso el porcentaje de feldespato potásico es mucho menor que el de la plagioclasa.

- **Geología Estructural:** En el cantón Santa Isabel si bien se encuentran varias fallas, no son de gran tamaño, y en su mayoría son fallas que atraviesan depósitos aluviales.

• **Geología general cantón El Pan**



A continuación en la Figura 3.4, se presenta la descripción geológica general del cantón El Pan.

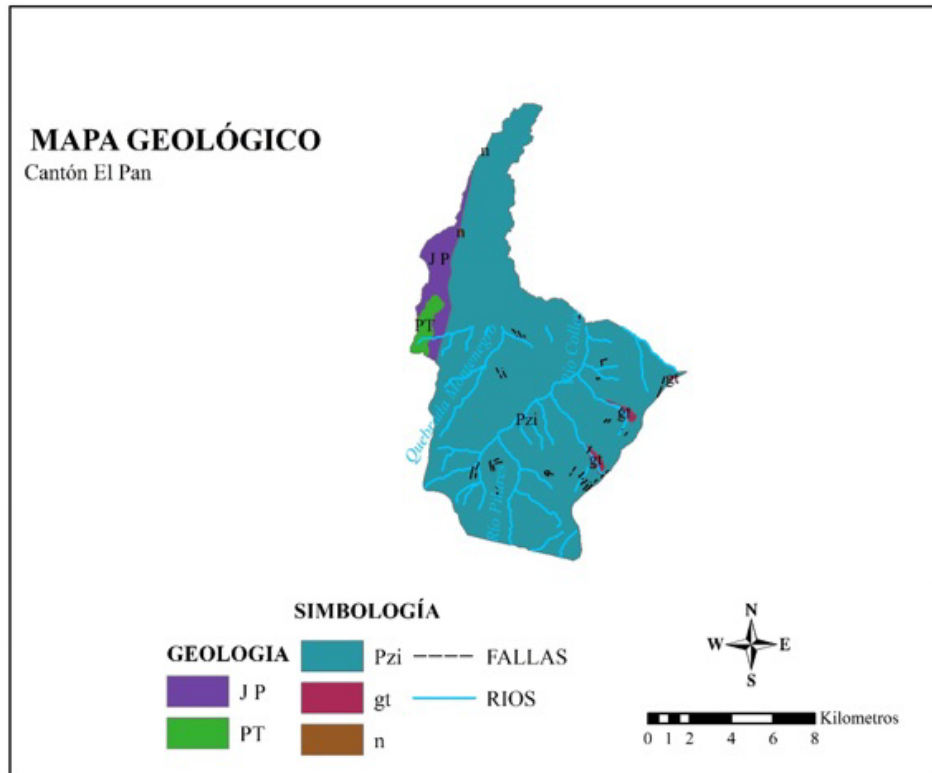


Figura 3.4: Geología del Cantón El Pan Esc. 1:300,000

– **Geología Regional:**

* **n: Andesita (Cuaternario):** es una roca ígnea volcánica de composición intermedia. Su composición mineral comprende generalmente plagioclasas y otros minerales ferromagnésicos como piroxeno, biotita y hornblenda.

– **Geología Estructural:** En el canón El Pan, se encuentran varias fallas, pero no son grandes, se encuentran atravesando rocas metamórficas.

3.2.2 Cuadro de resumen de rocas

En la Tabla 3.1, se exponen las diferentes rocas que se encuentran en los lugares de estudio, de acuerdo a la geología regional.

Del estudio geológico se obtiene una caracterización de los agregados de las canteras en estudio. Cada una de las capas estratigráficas de un firme están constituidas por diferentes materiales, con una elevada proporción de los elementos de naturaleza pétreo que se denominan áridos. Sus porcentajes son en general superiores al 90 % en peso y al 80 % en volumen. Los agregados aportan fundamentalmente la



Tabla 3.1: Cuadro resumen de rocas

Roca	Descripción	Lugar donde existe
Andesitas	Roca ígnea volcánica de composición intermedia. Comprende plagioclasas y otros minerales.	Paute, La Troncal, El Pan
Esquistos	Constituyen un grupo de rocas caracterizados por poseer minerales laminares que favorecen su fragmentación en capas delgadas.	Paute
Filitas	Es una roca que representa una gradación en el grado de metamorfismo entre la pizarra y el esquistos.	Paute
Argilitas	Es arcillosa, tiene cuarzo y mica, se utiliza para algunas esculturas.	Paute, La Troncal
Lutitas	Es una roca sedimentaria detrítica de textura pelítica, es decir, integrada por detritos clásticos constituidos por partículas de los tamaños de la arcilla y del limo.	Paute, La Troncal, Sta. Isabel
Dacitas	Es una roca ígnea volcánica con alto contenido de hierro.	Paute, La Troncal
Cuarcita	Es una roca metamórfica dura con alto contenido de cuarzo.	Paute, Santa Isabel
Gneis	Son rocas metamórficas compuestas por los mismos minerales que el granito	Paute
Limolita	Es una roca sedimentaria que tiene un tamaño de grano en el rango de limo más fino que la arenisca y más grueso que las arcillas.	Santa Isabel
Granito	También conocido como piedra berroqueña, constituida esencialmente por cuarzo, feldespato y mica.	Santa Isabel
Riolitas	Es una roca ígnea extrusiva, de color gris a rojizo con una textura de granos finos o a veces también vidrio.	Santa Isabel
Tonalita	Es una roca ígnea plutónica compuesta de cuarzo, plagioclasa y biotita.	Santa Isabel
Granodiorita	Es una roca ígnea plutónica parecida al granito, principalmente constituida por cuarzo y feldespatos.	Paute
Tilita	Forman terrenos húmedos y ondulados	Paute, El Pan



componente de resistencia, por eso es habitual hacer referencia a su esqueleto mineral[56].

Para obtener la relación agregado-geología que sería necesaria para el análisis más profundo de los agregados que se usan en las mezclas asfálticas en caliente [56], se debería:

- Ubicar las canteras a estudiar
- Visitar cada una de las canteras para determinar puntos en GPS
- Tomar muestras de las rocas de afloramientos y productos ofrecidos por las canteras
- Relevar información geológica de interés
- En laboratorio, realizar la caracterización de las rocas y sus componentes (geológica y mecánicamente)
- A partir de estos resultados obtener la relación entre las propiedades geológicas de la roca y las propiedades geotécnicas en laboratorio obtenidas

3.2.3 Materia prima

El tipo de mezcla asfáltica que se va a desarrollar, según la granulometría, es de tipo continuo la cual presenta una cantidad muy distribuida de diferentes tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico; la Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12 [5] en su Capítulo 3 presenta las siguientes gradaciones:[Tabla 405.5.6]

Tabla 3.2: Husos Granulométricos

Tamiz	% Que Pasa		
	MAC-1	MAC-2	MAC-3
25mm (1")	100	-	-
19mm (3/4")	80	100	-
12.5 mm (1/2")	67-85	80-100	-
9.5 mm (3/8")	60-77	70-88	100
4.75mm (#4)	43-54	51-68	65-87
2mm (#10)	29-45	38-52	43-61
425mm (#40)	14-25	17-28	16-29
180mm(#80)	8-17	8-17	9-19
75mm(#200)	4-8	5-8	5-10

De la Tabla 3.2 Husos Granulométricos, se puede ver la variedad de agregados que se utilizan en una mezcla asfáltica, sin considerar el uso del cemento asfáltico y además



de un aditivo que se utiliza en la planta. El presente estudio trabaja solo sobre los husos de las mezclas asfálticas en caliente MAC-2 Y MAC-3, debido a que la Empresa trabaja con dichas mezclas; los tamaños de los agregados que componen la mezcla asfáltica en caliente MAC-2 son: 3/4", 3/8", 3/16" y arena; mientras que para la mezcla MAC-3 son: 3/8", 3/16" y arena.

Se define entonces, el máximo tamaño de agregado con el que se trabajará, éste es el pasante 3/4", continuando con el pasante 3/8" y finalmente como finos utilizar el pasante del tamiz 40 (3/16") y la arena que en este caso la Empresa utiliza siempre arena proveniente de ríos.

En cuanto al ligante, es un cemento asfáltico AC-20 que según la NEVI debe cumplir con los requerimientos. En este estudio estos requerimientos no fueron analizados sino asumidos desde el control de calidad que entrega la empresa PETROECUADOR a la Empresa regularmente. Éste ligante se debe trabajar en un rango de temperaturas de entre 130 – 165°C. Se emplea Zycotherm, que es el aditivo para mejorar la adherencia, es utilizado en la planta de ASFALTAR EP. Éste es un organosilano reactivo a temperatura ambiente, soluble en agua y betún e hidrolíticamente estable, que permite bajar la temperatura de fabricación y compactación del asfalto al tiempo que mantiene las propiedades (resistencia, sensibilidad al agua, deformación) y añade la resistencia a la sal.

3.2.4 Selección y tamaño de la muestra

En la Tabla 3.3, se presenta en resumen: el tamaño de agregados disponibles en la región, que son con los que trabaja la Empresa. Los mismos se encuentran detallados según la cantera de la que procede, vale mencionar los resultados que el análisis de laboratorio de cada uno se encuentra expuesto más adelante.

3.2.5 Elaboración de base de datos maestra

El análisis del contenido óptimo de asfalto se basa en dos bases de datos que se manejan a partir de la información de la Empresa. La primera es la que se obtuvo a partir de la recolección de datos en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca, en el cual se revisó que cada uno de los agregados cumpla con los requerimientos especificados en el segundo capítulo de este trabajo, esta base de datos permitirá ahorrar tiempo en el laboratorio debido a que ya no se necesitará analizar que los áridos cumplan con cada uno de los requerimientos de la norma NEVI [5].



Por otra parte la segunda base de datos maestra la constituyen los diseños de mezclas realizados en tiempos pasados por la Empresa. Esta base consta solamente de ocho (8) diferentes tipos de mezclas, que se encuentran diseñadas con la norma anterior del Ministerio de Transporte y Obras Públicas. Si bien esta cantidad de diseños no representa una muestra significativa, es suficiente para el desarrollo de este proyecto. La misma puede ir ampliándose cuando se tengan más datos.

3.3 Normas para ensayos, instrumentación y procesamiento en laboratorio

A continuación se describen los diferentes ensayos con sus respectivas normas que se pueden realizar en el laboratorio para obtener datos de los materiales que se emplearán en el diseño asfáltico:

- Norma INEN 696 “Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso” [57]: este ensayo ayuda a determinar la distribución granulométrica de las partículas de áridos, fino y grueso, por tamizado. El equipo empleado son balanzas, tamices para agregado grueso y fino, agitador mecánico de tamices, horno. Se procede así, tomado el material se procede al secado, luego se pesa el material ($6 - 7kg$) y registra dicho peso, se colocan los tamices en orden decreciente y se pesa el material retenido en cada tamiz, por cuarteo se pesa el material en el fondo alrededor de $800 - 1000gr$ y se toma la lectura del peso, luego de haber pesado se lava el material pasando por el tamiz N°200, hasta que la arena quede limpia, finalmente se seca y pesa el material. En la Figura 3.5 se puede observar los tamices para áridos gruesos y finos con sus respectivos agitadores mecánicos. La Figura 3.6 muestra el proceso de tamizado, lavado y secado del material para poder seguir con el procedimiento del ensayo.



Figura 3.5: Agitador mecánico y serie de tamices para agregados gruesos y finos.



Figura 3.6: Tamizado, lavado y secado del material.

- Normas ASTM C 88 [58]/ AASHTO T 104 [8]/ INEN 863 [59] “Durabilidad al Sulfato de Sodio y Magnesio”: este ensayo permite determinar el grado de solidez de los agregados cuando están sujetos a la acción de desgaste, el equipo empleado para agregados gruesos son la serie de tamices 3/8”, 1/2”, 3/4”, 1”, 1 1/2”, 2” y 2 1/2”; para agregados finos el N°50, N°30, N°16, N° 8 y N° 4; recipientes, horno (temperatura de 110 ± 5 °C), balanzas de 500 gramos de capacidad para el fino y de 5000 gramos para el grueso, preparar la mezcla de sulfato de sodio o magnesio y que repose 48 horas a una temperatura de 21 ± 1 °C; para el agregado fino se debe lavar por el tamiz N° 50 y luego secarse (mínimo 100 gr), para el agregado grueso 3/4” y 3/8” el peso después de lavarse y secarse deberá ser de 670 ± 10 gr y 330 ± 5 gr respectivamente. Se coloca en recipientes cada muestra de los tamices y se coloca la solución y dejamos 16-18 horas a una temperatura de 21 ± 1 °C, realizar 5 ciclos de pesar las muestras, lavándolas y secándolas para obtener la durabilidad de los agregados. En la Figura 3.7 se muestra el proceso de preparación de la muestra, así como el lavado y secado del material utilizado. En la Figura 3.8 se presenta la inmersión del material en la solución.



Figura 3.7: Preparación de la solución, lavado del material y separación del mismo

- Normas ASTM C 131 [8] / AASHTO T 96 [12] / INEN 860 [60] “Abrasión de Los Angeles”: este ensayo se enfoca a determinar la degradación en porcentaje del agregado grueso, el equipo que se requiere es la Máquina de Los Angeles con esferas de acero, tamices, balanzas, recipientes; se debe lavar el material y el tipo de gradación dirá por qué tamices se tiene que preparar la muestra y el número de esferas a emplearse. Se coloca la muestra en la máquina y se hace girar 500 revoluciones, luego separar el material por un tamiz de mayor abertura que el de 1.70 mm y tamizar la porción fina por el de abertura de 1.70 mm, lavar



Figura 3.8: Inmersión del material en la solución.

el material más grueso que 1.70 mm y secarlo, luego se pesa para finalmente poder obtener el porcentaje de degradación. En la Figura 3.9 se presenta la Máquina de Los Angeles mediante la cual se determina el grado de degradación del material que se analice.



Figura 3.9: Máquina Los Ángeles, con las esferas y el material después del ensayo

- Normas ASTM D 3744 [61]/ AASHTO T 210 [62] “Índice de Durabilidad”: lo que interesa con este ensayo es obtener el índice de durabilidad que es un valor que refleja la resistencia relativa de un agregado para producir efectos dañinos. El equipo requerido es un vaso mecánico de lavado, recipiente recolector, agitador, tamices, balanzas, cloruro de calcio, se prepara una muestra preliminar secada al aire de 2550 ± 25 gr, se coloca la muestra en un cilindro plástico, se vierte la solución y se coloca la muestra de ensayo lavada (por el No 4) en el vaso mecánico, se inicia la agitación por 600 ± 15 segundos, se descarta el material retenido en el N° 4 y lo que retiene el N° 200 se recoge junto con el agua de lavado en el recipiente colector, colocar agua destilada hasta dar un volumen de 1000 5 ml, mediante un embudo y agitando se transfiere la muestra, se deja reposar por 1200 ± 15 segundos, al final leer y registrar la altura de la columna de sedimentación, esto para el agregado grueso, para el fino deberá realizarse un ensayo Equivalente de Arena.



- Norma ASTM D 4791 [63] “Partículas Chatas y Alargadas”: el objetivo de este ensayo es determinar el índice de aplanamiento y elongamiento del agregado grueso, el equipo necesario consta de balanzas, calibrador de longitudes, calibrador de espesores (ver Figura 3.10), la muestra se prepara pasando por el tamiz respectivo y se toman 200 partículas, se pesa el total y luego se va probando cada piedra por los calibradores para determinar cuáles son elongadas, aplanadas o elongadas-aplanadas, se pesa cada grupo de piedras y luego se obtiene el porcentaje de partículas aplanadas elongadas (chatas y alargadas).



Figura 3.10: Calibradores de espesores y longitudes, separación de partículas elongadas, aplanadas y elongadas-aplanadas.

- Normas ASTM D 5821 [64]/ AASHTO T 961 [65] “Caras Fracturadas”: determinar el porcentaje en peso del material que presente una o más caras fracturadas de los materiales pétreos. Se necesita una balanza, tamices, espátula; la muestra de ensayo deberá ser separado lo necesario para inspeccionar las partículas, separamos las partículas que tienen una o más caras fracturadas (considerar fracturada cuando un 25 % del área de la superficie se encuentra fracturada), colocar las partículas fracturadas en un recipiente y luego pesar. En la Figura 3.11 se muestra el proceso de separación de partículas con una o más caras fracturadas.



Figura 3.11: Separación de partículas con una o más caras fracturadas.



- Norma ASTM D 516 [9] “Sales Solubles Totales”: el objetivo es determinar las sales solubles totales del agregado pétreo (grueso y fino). Los aparatos que se utilizan son fotómetro (nefelómetro o turbidímetro), espectrofotómetro para uso a 420 *nm* con el camino de luz de 4 a 5 cm; fotómetro de filtro con un filtro violeta que tiene un máximo cerca de 420 *nm* y una trayectoria de luz de 4 a 5 cm. Cronómetro, si el agitador magnético no está equipado con un temporizador, cuchara dosificadora, capacidad de 0,2 a 0,3 ml; preparar soluciones diluyendo con agua 0,0, 5,0, 10,0, 15,0, 20,0, 30,0, 40,0 y ml de solución de sulfato de estándar para volúmenes de 100 ml en frascos. Estas soluciones tienen concentraciones de iones de sulfato de 0,0, 5,0, 10,0, 15,0, 20,0, 30,0, 40,0 y *mg/L(ppm)*, respectivamente; se filtra la muestra si es turbia a través de un 0,45-micras y ajustar la temperatura entre 15 y 30°C. Pipetear en un vaso de 250 ml a 100 ml o menos de la muestra transparente que contiene entre 0,5 y 4 mg de ion sulfato, encender el aparato de agitación. Mientras la solución se agita, añadir una cucharada de BaCl₂ (0.3 g) y comenzar la sincronización inmediatamente. Se agita exactamente 1,0 min a velocidad constante. Inmediatamente después del período de agitación, verter la solución en la célula y medir la turbidez a intervalos de 30 sg durante 4 min. Registre la lectura máxima obtenida en el último período. Este ensayo no se realizó por la falta de los aparatos en el laboratorio de la Facultad.
- Normas ASTM C 127 [66] / AASHTO T 85 [67] “Porcentaje de Absorción y Peso Específico Neto (agregado grueso)”: para este ensayo el material debe estar en condiciones SSS (saturado superficialmente seco) para lo cual, se deja el material 24 horas y luego se seca hasta que la piedra pierda su brillo metálico, entonces se tiene en la condición SSS, lo que se necesita es el picnómetro, balanza, bandeja, horno (cocineta), chuchareta; se procede a pesar el material en condiciones SSS, se llena el picnómetro con agua y se coloca la placa de vidrio eliminando las burbujas de agua, se pesa (ver Figura 3.12); repetir lo anterior pero una vez colocado el material dentro del picnómetro y se pesa, finalmente secar el material y luego pesar.



Figura 3.12: Picnómetro con agua y la placa de vidrio y secado del material para lograr la condición SSS.



- Normas ASTM D 1664 [68]/ AASHTO T 182 [69] “Adherencia”: este ensayo es aplicable a asfaltos líquidos y semisólidos, se requiere recipientes, balanza, espátula, vaso de cristal, horno, tamices; los agregados para el ensayo deberán pasar el tamiz de 9.5 mm y sea retenido en el tamiz de 6.3 mm. Se procede a lavarse para eliminar los finos y se seca el material de 135-149 °C agregar el material bituminoso a la temperatura indicada antes y mezclar con el material. En la Figura 3.13 se presenta el agregado y material bituminoso antes de la mezcla; verter en un vaso de cristal una vez mezclado y cubrir con agua a temperatura ambiente dejando el agregado en inmersión de 16-18 horas, luego iluminar con una linterna desde arriba a través del agua (sin que produzca reflejos), finalmente estimar el porcentaje del área total visible del agregado que se mantiene recubierta con mayor o menor del 95 % (ver en la Figura 3.14).



Figura 3.13: Material y asfalto antes de ser mezclados.



Figura 3.14: Estimación del porcentaje de área total visible del agregado (mayor o menor al 95 %).

- Normas ASTM D 2419 [70]/ AASHTO T 176 [13] “Equivalente de Arena”: el objetivo es determinar la proporción relativa del contenido de polvo fino nocivo o material arcilloso. Es necesario una probeta de plástico graduada con tapón de caucho que se ajuste a la probeta, tubo ventilador de cobre, tubo flexible de plástico o caucho con una pinza, botellón, dispositivo para lecturas de nivel de la arena, horno, espátula y tamices, cloruro de calcio (ver Figura 3.15); la muestra de material debe pasarse por el tamiz N°4 y coger el material que pasa dicho



tamiz, se seca en el horno, luego humedecerla y obtener la cantidad necesaria para continuar con el ensayo. Verter la solución en la probeta, se toma el material en los frascos y se enrasa, colocar en cada tubo de ensayo (3) mediante el embudo, dejar 10 minutos en reposo, agitar manualmente (90 ciclos), como se muestra en la Figura 3.16, lavar el material adecuadamente dentro de la probeta y dejar 20 minutos en reposo. Finalmente, se toma la lectura de la arena y de la arcilla.



Figura 3.15: Equipo y materiales utilizados ensayo: Equivalente de Arena.

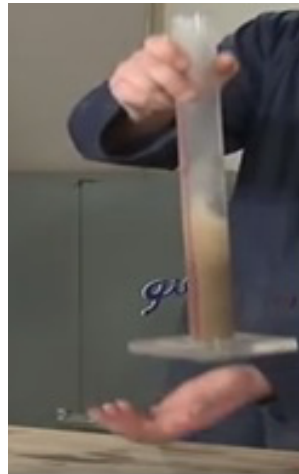


Figura 3.16: Agitación manual del material con la solución.

- Normas ASTM C 1252 [71]/ AASHTO T 304 [72] “Angularidad de agregado fino”: se deberá recoger una cantidad total de 190 gr, con la siguiente distribución entre N°8 y N°16, 44 gramos; N°16 y N°30, 57 gramos; N°30 y N°50, 72 gramos y N°50 y N°100, 17 gramos. Mezclar cada muestra de ensayo con la espátula hasta que esté homogénea. Coloque el frasco y la sección de embudo y centrar la medida cilíndrica, use un dedo para bloquear la apertura del embudo. Coloque la muestra en el embudo (ver Figura 3.18) y nivelar el material en el embudo con la espátula. Retire el dedo y dejar que la muestra caiga libremente. Conserve todas las partículas de agregado fino para una segunda prueba. Registre la masa de



la medida vacía y para cada paso, se registra la masa de la medida y agregado fino. En la Figura 3.17 se observan los materiales y equipos utilizados para el ensayo.



Figura 3.17: Materiales y equipos utilizados.



Figura 3.18: Colocación del material mediante el embudo.

- Adhesividad (Riedel Weber) [10]: los aparatos que se requieren para el ensayo son entre otros, una balanza con precisión de 0.1 g, un horno capaz de mantener temperatura constante entre 105-110°C, una probeta de 200 ml, espátula y recipientes para mezclar los materiales con la solución de carbonato de sodio. Se procede a verter aproximadamente 50 ml de agua destilada en una probeta graduada de 200 ml y llevar a ebullición. Tomar cerca de 10 gramos del betún preparado y ponerlo en el agua que hierva. Deje que hierva durante 1 min, verter el agua y agite la muestra en un pedazo de papel de filtro. Deje la muestra sobre el papel de filtro hasta que esté seco. Examinar la muestra y si la película de betún se ha despojado del agregado, un valor de separación de cero se da al agregado. La separación se considera que es la condición en el que la película se rompe y aún si hay betún adherido a la piedra que es en forma de gotitas. En un caso que no exista separación, el proceso se repite comenzando con la solución más débil, si es necesario, llegar hasta la más fuerte. El valor de la separación



del betún del agregado es el número Riedel y Weber de concentración más baja a la que ocurre la separación. Este ensayo no se realizó por falta de la solución de carbonato de sodio.

- Norma ASTM D 4318 [73] “Índice de Plasticidad (malla N°40 y malla N°200)”: se utiliza, un plato para el mezclado, espátula, superficie para la rodadura, recipientes (frascos), horno, balanza (ver Figura 3.19); tomar una muestra de aproximadamente 20 kg que pase el tamiz de abertura de 0.425 mm, humedecer y formar una esfera con las manos, tomar de la esfera una muestra de 1.5-2 gr y enrollar con la palma de la mano sobre la superficie de vidrio hasta lograr formar un hilo de 3 mm diámetro, una vez hecho tomar los pedazos del hilo formado y colocarlos en el horno para que se sequen y poderlos pesar (ver Figura 3.20). Repetir este proceso tres veces, para poder tener un promedio al final.



Figura 3.19: Materiales y equipo utilizado para índice de plasticidad.



Figura 3.20: Ensayo de Índice de Plasticidad.

- Normas ASTM C 128 [74] / AASHTO T 84 [75] “Porcentaje de Absorción y Peso Específico Neto (agregado fino)”. El material debe estar en condiciones SSS, para lo cual debemos ir probando con el cono de Abrahams, una vez el material en SSS (como en la Figura 3.21), se toma una muestra del material y se la divide, la mitad en el horno y con la otra mitad se realiza el mismo ensayo que para el agregado grueso.



Figura 3.21: Material en condiciones SSS

- Norma ASTM D 1559 [7] “Método Marshall”: el objetivo de este ensayo es determinar el contenido óptimo de asfalto para una mezcla específica de agregados; así como también proporcionar información sobre las características físicas y mecánicas de mezcla asfáltica en caliente, de tal manera que sea posible establecer si cumple en lo referente al establecimiento de densidades y contenidos óptimos de vacío durante la construcción de la capa del pavimento. El método consiste en ensayar una serie de probetas, cada una preparada con la misma granulometría y con diferentes contenidos de asfalto. El tamaño de las probetas es de 2.5 pulgadas de espesor y 4 pulgadas de diámetro. Dichas probetas se preparan siguiendo un procedimiento específico para calentar el asfalto y los agregados, mezclar y compactar. Las probetas preparadas con el método se rompen en la prensa Marshall, determinando su estabilidad (resistencia) y deformación (flujo). Se determinarán previamente los pesos específicos de los materiales empleados y de las probetas compactadas, antes del ensayo de rotura.

3.4 Metodología de cálculo: Mínimos Cuadrados

Los mínimos cuadrados son una técnica de análisis numérico, la cual tiene como objetivo la optimización matemática, en la que, dados un conjunto de pares ordenados: variables independiente y dependiente, y una familia de funciones, se intenta encontrar la función dentro de dicha familia, que mejor se aproxime a los datos, a través del criterio de mínimo error cuadrático.

En su forma más simple, el método de los mínimos cuadrados, intenta minimizar la suma de cuadrados de las diferencias entre las ordenadas con los puntos generados por la función elegida y los correspondientes valores que se tienen de dato [76].



La aproximación mínimo cuadrática consiste en minimizar el error cuadrático mencionado más arriba, y tiene solución general cuando se trata de un problema de aproximación lineal (lineal en sus coeficientes c_j) cualesquiera que sean las funciones base: $f_j(x)$. Por lineal se entiende que la aproximación buscada se expresa como una combinación lineal de dichas funciones base.

La técnica de mínimos cuadrados se usa comúnmente en el ajuste de curvas, en nuestro caso el ajuste se realiza entre curvas, la deducción analítica de la aproximación discreta mínimo cuadrática lineal se describe a continuación.

Sea $[(x_k, x_k)]_{k=1}^n$ un conjunto de n pares con abscisas distintas, y sea $[f_j(x)]_{j=1}^m$ un conjunto de m funciones linealmente independientes (en un espacio vectorial de funciones), que se llamarán funciones base. Se desea encontrar una función $f(x)$ de dicho espacio, o sea, combinación lineal de las funciones base, tomando por ello la forma:

$$f(x) = c_1 f_1(x) + c_2 f_2(x) + \dots + c_m f_m(x) = \sum_{j=1}^m c_j f_j(x) \quad (3.1)$$

Ello equivale por tanto a hallar los m coeficientes: $[c_j(x)]_{j=1}^m$. En concreto, se desea que tal función $f(x)$ sea la mejor aproximación a los n pares $(x_k, x_k)^n$ empleando, como criterio de “mejor”, el criterio del mínimo error cuadrático medio de la función $f(x)$ con respecto a los puntos $[(x_k, x_k)]_1^n$.

El error cuadrático medio será para tal caso:

$$E_{cm} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (e_k)^2}{n}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_k - f(x_k))^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_k - \sum_{j=1}^m c_j f_j(x_k))} \quad (3.2)$$

Minimizar el error cuadrático medio es equivalente a minimizar el error cuadrático, definido como el radicando del error cuadrático medio, esto es:

$$E_c = \sum_{k=1}^n (y_k - \sum_{j=1}^m c_j f_j(x_k))^2 \quad (3.3)$$

Así, los c_j que minimizan E_{cm} también minimizan E_c , y podrán ser calculados derivando e igualando a cero este último:

$$\frac{\partial E_c}{\partial c_i} = \sum_{k=1}^n 2(y_k - \sum_{j=1}^m c_j f_j(x_k))(-f_i(x_k)) = 0 \quad (3.4)$$

siendo $i = 1, 2, \dots, m$.

Se obtiene un sistema de m ecuaciones con m incógnitas, que recibe el nombre de “Ecuaciones Normales de Gauss”. Operando con ellas:

$$\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m c_j f_j(x_k) f_i(x_k) = \sum_{k=1}^n y_k f_i(x_k) \quad (3.5)$$



para $i = 1, 2, \dots, m$.

$$\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n f_i(x_k) f_j(x_k) c_j = \sum_{k=1}^n y_k f_i(x_k) \quad (3.6)$$

para $i = 1, 2, \dots, m$.

Si se desarrolla la suma, se visualiza la ecuación “i-ésima” del sistema de m ecuaciones normales:

$$\left(\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n f_1(x_k) f_j(x_k) c_1 + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n f_2(x_k) f_j(x_k) c_2 + \dots + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n f_m(x_k) f_j(x_k) c_m \right) = \sum_{k=1}^n y_k f_i(x_k) \quad (3.7)$$

para $i = 1, 2, \dots, m$.

Lo cual, en forma matricial, se expresa como:

$$\begin{bmatrix} (f_1, f_1)_d & (f_1, f_2)_d & \dots & (f_1, f_m)_d \\ (f_2, f_1)_d & (f_2, f_2)_d & \dots & (f_2, f_m)_d \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (f_m, f_1)_d & (f_m, f_2)_d & \dots & (f_m, f_m)_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \dots \\ c_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (f_1, y)_d \\ (f_2, y)_d \\ \dots \\ (f_m, y)_d \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Siendo (a, b) el producto escalar discreto, definido para dos funciones dadas $h(x)$ y $g(x)$ como:

$$(h(x), g(x))_d = \sum_{k=1}^n h(x_k) g(x_k) \quad (3.9)$$

y para una función $h(x)$ y vector cualquiera u , como:

$$(h(x), u)_d = \sum_{k=1}^n h(x_k) u(x_k) \quad (3.10)$$

La resolución de dicho sistema permite obtener, para cualquier base de funciones derivables localmente, la función $f(x)$ que sea mejor aproximación mínimo cuadrática al conjunto de puntos antes mencionado. La solución es óptima (esto es, proporciona la mejor aproximación siguiendo el criterio de mínimo error cuadrático), puesto que se obtiene al optimizar el problema.

3.5 Metodología computacional

La metodología computacional se construye en base a las herramientas MATLAB y EXCEL, para dar como resultado el interfaz para el usuario. La misma parte de los



fundamentos matemáticos explicados anteriormente.

A continuación se describe la estructura que va a tener el programa mediante el uso de tres (3) diagramas de flujo muy generales:

- En el primer diagrama de flujo, como se observa en la Figura 3.22, la configuración del programa solicita, mediante el archivo *MAC.m*, la selección del tipo de mezcla asfáltica en caliente (MAC-2 ó MAC-3) dependiendo del tipo de diseño que se requiera realizar. Las especificaciones de cada uno de los husos granulométricos de la mezcla se encuentran estipulados por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), y se pueden encontrar redactados en la norma NEVI-12 [5].

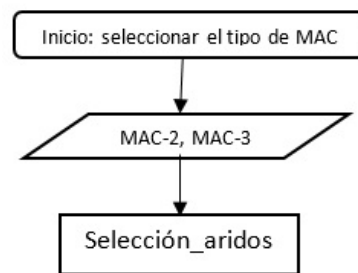


Figura 3.22: Ingreso general de datos

Luego de seleccionar el tipo de Mezcla Asfáltica en Caliente, llama a la función **Selección-aridos** la cual elige los áridos con los que se realizará la mezcla.

- El segundo diagrama de flujo, mostrado en Figura 3.23, mediante la función: *Selección-aridos* y con el ingreso del tipo de mezcla realizada anteriormente, procede a seleccionar los diferentes agregados con los que se diseñará la mezcla, siendo para un diseño de MAC-2 cuatro (4) agregados: 3/4", 3/8", 3/16" y arena; mientras que para un diseño MAC-3 tres (3) agregados: 3/8", 3/16" y arena. Es importante mencionar que las granulometrías empleadas son las que proveen las diferentes canteras (6 en este caso).

Al finalizar esta elección de los agregados, se llama a la función *ajuste*. En el cual empieza el análisis numérico de los datos hasta ahora recolectados.

- Tercer diagrama de flujo, en la parte final de la interfaz, Figura 3.24, la codificación: *ajuste*, permite, mediante métodos numéricos, como son los mínimos cuadrados, calcular los porcentajes de los agregados según el tipo de MAC seleccionado y la Norma.

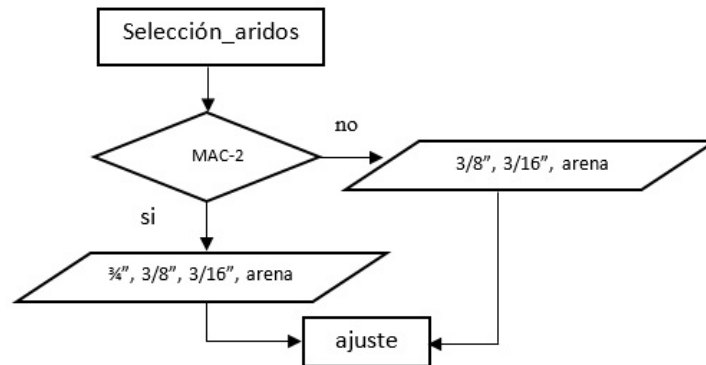


Figura 3.23: Ingreso general de datos

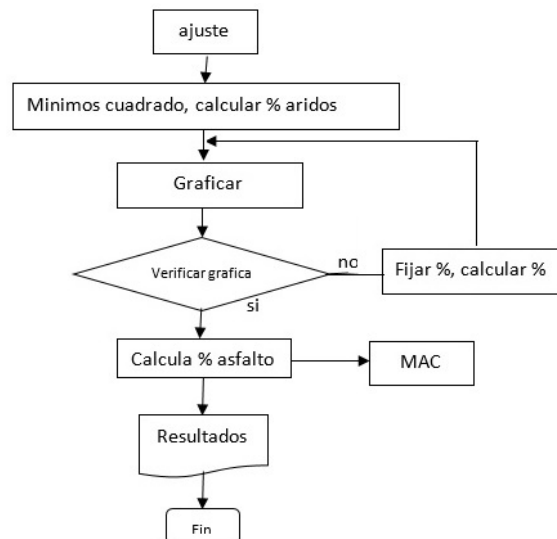


Figura 3.24: Ingreso general de datos

Básicamente, *ajuste*, realiza la combinación en porcentaje de cada árido de la mezcla. Su funcionamiento se basa en el mínimo error; es decir el método no está en función de ningún tipo de tolerancia para su desenvolvimiento. Al encontrar los porcentajes de los áridos con mínimos cuadrados se tiene una mezcla con un ajuste óptimo, sin embargo dicho ajuste en ocasiones puede resultar que no quede dentro de los husos granulométricos especificados por la NEVI [5]; este caso se presenta ya que la metodología trabaja al rededor de un valor central, mas no considera los valores extremos de los husos. Para el control de éste caso el programa brinda la opción de ingresar porcentajes manualmente y fijarlos, para poder volver a calcular los restantes nuevamente mediante mínimos cuadrados.

Las gráficas que se presentan de la combinatoria, cambian aleatoriamente de color, esto se considera para que el usuario observe de mejor manera qué porcentajes son los que mejor se ajustan a la media de los husos



granulométricos y así elija, según su criterio, cuál es el mejor.

El método de los mínimos cuadrados [77], explicado anteriormente, se basa en encontrar las variables desconocidas pero con un error mínimo, si se tiene un sistema de ecuaciones:

$$A \cdot x = B \quad (3.11)$$

donde:

A: matriz formada por áridos que el usuario elije, según la disposición en la planta.

x: matriz de porcentajes de ajuste óptimo.

B: matriz formada por la media de los valores de los husos granulométricos superior e inferior.

Aplicando propiedades de las matrices traspuesta e inversa [78], se llega a la expresión:

$$x = (A^T * A)^{(-1)} * A * B = \frac{A^T * A}{A^T} * B \quad (3.12)$$

Para continuar con el método de mínimos cuadrados, se deben normalizar los coeficientes, en el caso de que se fije un valor de un porcentaje para un árido, se obtendrá una nueva matriz B, dando así un sistema de ecuaciones con menos incógnitas (porcentajes).

Para poder obtener la gráfica de la granulometría combinada, se deberá multiplicar la matriz *A*, que es la formada por los áridos, por la matriz resultante *x*, que son los porcentajes de cada agregado. Para garantizar que el error es el mínimo, aplicamos la expresión base de los mínimos cuadrados:

$$\text{error}_{\text{mínimo}} = \sum (y - \text{granulometria combinada})^2 \quad (3.13)$$

donde:

y: granulometrías que se tienen de la base de datos de la Empresa de los diseños de las mezclas.

Una vez se tenga la gráfica de mejor ajuste, se procede a calcular el porcentaje óptimo de asfalto recomendado, basándose en la base de datos de la Empresa, que consta de ocho (8) diseños.

Como parte final se tienen dos opciones, la primera y muy importante, imprimir los resultados del diseño realizado, estos resultados son exportados al archivo *Resultados.xlsx*, en donde se tendrán las características de los agregados que se utilizaron en el diseño así como sus requerimientos para poder observar si



cumplen o no con los mismos. La segunda y opción final del programa es realizar un nuevo diseño, el cual nos permite volver a elegir el tipo de mezcla asfáltica en caliente.

3.6 Análisis práctico: Ensayos en laboratorio

Se aplica el método de comprobación de hipótesis, el cual prueba las afirmaciones de la teoría, en este caso la prueba se realizará en los laboratorios, en base al análisis Marshall con las especificaciones indicadas por la metodología NAPA. La comprobación se hace basada en el método propuesto por Carlos Popper [77], que propone la derivación de conocimientos concretos a partir de reglas generales. En base a hechos empíricos la metodología de la presente investigación será demostradas (verificadas).

En el capítulo que se presenta a continuación se muestran los resultados obtenidos en base a la metodología utilizada durante el proyecto, de esta presentación obtendremos resultados, conclusiones y recomendaciones de este trabajo. Todo el análisis que sigue se muestra en base a un ejemplo realizado.



Tabla 3.3: Cuadro Resumen Proveedores ASFALTAR EP. Donde x: material en stock -: material no en stock

Nombre proveedor	Emplazamiento	Ubicación fuente	Tamaño árido			
			Arena	3/4	3/8	3/16
Vipesa	El Descanso	Paute	-	x	-	-
Varios	Santa Isabel	Huascachaca	x	-	-	x
	San Vicente	San Vicente	-	-	-	x
ASFALTAR EP	Uzhupud	Paute	-	x	x	x
Sr Bernardo	Capulispamba	Paute	-	x	-	-
Vintimilla	Paute	La Virginia	-	-	x	-
Estudio específico		Vipesa + B. Vintimilla	-	-	-	-



CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Estudios de la geología regional y su relación con los agregados

La geología presentada en el Capítulo 3 del proyecto, proporciona una base en cuanto a una caracterización que se puede realizar a los materiales, para así correlacionar la roca madre con los agregados productos de esta. Si bien la trituración de los materiales, les confiere a los mismos ciertas características como forma, adhesividad, granulometría, entre otras; las características propias de la roca madre de la que se extraen estos materiales brinda desde su origen propiedades como: resistencia, peso específico, absorción, que son importantes para las especificaciones dadas por la norma [79].

Para llegar a un análisis más profundo, se debería realizar la metodología de análisis propuesto anteriormente el cual consta básicamente del siguiente procedimiento[56]:

- Ubicar las canteras a estudiar
- Visitar cada una de las canteras para determinar puntos en GPS
- Tomar muestras de las rocas de afloramientos y productos ofrecidos por las canteras
- Relevar información geológica de interés
- En laboratorio, realizar la caracterización de las rocas y sus componentes (geológica y mecánicamente)



- A partir de estos resultados obtener la relación entre las propiedades geológicas de la roca y las propiedades geotécnicas en laboratorio obtenidas

4.2 Análisis técnico de áridos en laboratorio

Cada uno de los áridos que se dispusieron dentro de la muestra de análisis se comprobaron en laboratorio, mediante las especificaciones según el tipo de agregado: fino o grueso. Estos análisis se cumplieron a cabalidad con los equipos que se encuentran en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca.

Ninguno de los análisis realizados incluyen pruebas con químicos, los mismos son solamente ensayos con equipo netamente físico. A continuación se presentan, en resumen, los análisis realizados en cada uno de los materiales, los requerimientos aquí analizados se citaron en el capítulo del marco teórico:

- Materiales 3/4”
 - Cantera Uzhupud: En la Tabla 4.1 se presentan los resultados del análisis de este material en función de los requerimientos expuestos por la norma vigente.

Tabla 4.1: Resultados laboratorio material 3/4 cantera Uzhupud

Ensayos	Requerimientos	Análisis	Observación	Norma
Abrasión Los Angeles	35 % máx	13 %	Si cumple	ASTM C131 AASHTO T96 INEN 860
Partículas Chatas y Alargadas	10 % máx	9 %	Si cumple	ASTM D4791
Caras Fracturadas	100 % una cara y 80 % dos caras fracturadas	100-80	Si cumple	ASTM D5821
Porcentaje de Absorción	3,5 % máx	1 %	Si cumple	ASTM C127 AASHTO T85
Adherencia	+ 95	> 95 %	Si cumple	ASTM D1664 AASHTO 182
Peso Específico Neto	2,5 gr/cm ³ MIN	2.8	Si cumple	ASTM C127 AASHTO T85

- Cantera Vipesa: En la Tabla 4.2 se presentan los resultados del análisis de este material en función de los requerimientos expuestos por la norma vigente.

**Tabla 4.2: Resultados laboratorio material 3/4 cantera Vipesa**

Ensayos	Requerimientos	Análisis	Observación	Norma
Abrasión Los Angeles	35 % máx	18 %	Si cumple	ASTM C131 AASHTO T96 INEN 860
Partículas Chatas y Alargadas	10 % máx	2 %	Si cumple	ASTM D4791
Caras Fracturadas	100 % una cara y 80 % dos caras fracturadas	100-80	Si cumple	ASTM D5821
Porcentaje de Absorción	3,5 % máx	2 %	Si cumple	ASTM C127 AASHTO T85
Adherencia	+ 95	> 95 %	Si cumple	ASTM D1664 AASHTO 182
Peso Específico Neto	2,5 gr/cm ³ MIN	2.5	Si cumple	ASTM C127 AASHTO T85

– Cantera Bernardo Vintimilla: En la Tabla 4.3 se presentan los resultados del análisis de este material en función de los requerimientos expuestos por la norma vigente.

Tabla 4.3: Resultados laboratorio material 3/4 cantera Bernardo Vintimilla

Ensayos	Requerimientos	Análisis	Observación	Norma
Abrasión Los Angeles	35 % máx	14 %	Si cumple	ASTM C131 AASHTO T96 INEN 860
Partículas Chatas y Alargadas	10 % máx	4 %	Si cumple	ASTM D4791
Caras Fracturadas	100 % una cara y 80 % dos caras fracturadas	100-80	Si cumple	ASTM D5821
Porcentaje de Absorción	3,5 % máx	1 %	Si cumple	ASTM C127 AASHTO T85
Adherencia	+ 95	> 95 %	Si cumple	ASTM D1664 AASHTO 182
Peso Específico Neto	2,5 gr/cm ³ MIN	2.7	Si cumple	ASTM C127 AASHTO T85

- Materials 3/8”



- Cantera Santa Isabel: En la Tabla 4.4 se presentan los resultados del análisis de este material en función de los requerimientos expuestos por la norma vigente.

Tabla 4.4: Resultados laboratorio material 3/8 cantera Santa Isabel

Ensayos	Requerimientos	Análisis	Observación	Norma
Abrasión Los Angeles	35 % máx	31 %	Si cumple	ASTM C131 AASHTO T96 INEN 860
Partículas Chatas y Alargadas	10 % máx	8 %	Si cumple	ASTM D4791
Caras Fracturadas	100 % una cara y 80 % dos caras fracturadas	100-80	Si cumple	ASTM D5821
Porcentaje de Absorción	3,5 % máx	2 %	Si cumple	ASTM C127 AASHTO T85
Adherencia	+ 95	> 95 %	Si cumple	ASTM D1664 AASHTO 182
Peso Específico Neto	2,5 gr/cm ³ MIN	2.6	Si cumple	ASTM C127 AASHTO T85

- Cantera Vipesa: En la Tabla 4.5 se presentan los resultados del análisis de este material en función de los requerimientos expuestos por la norma vigente.
- Cantera Uzhupud: En la Tabla 4.6 se presentan los resultados del análisis de este material en función de los requerimientos expuestos por la norma vigente.
- Materiales 3/16”
 - Cantera San Vicente: En la Tabla 4.7 se presentan los resultados del análisis de este material en función de los requerimientos expuestos por la norma vigente.
 - Cantera Huascachaca: En la Tabla 4.8 se presentan los resultados del análisis de este material en función de los requerimientos expuestos por la norma vigente.
 - Cantera Uzhupud: En la Tabla 4.9 se presentan los resultados del análisis de este material en función de los requerimientos expuestos por la norma vigente.

- Arena

**Tabla 4.5: Resultados laboratorio material 3/8 cantera Vipesa**

Ensayos	Requerimientos	Análisis	Observación	Norma
Abrasión Los Angeles	35 % máx	23 %	Si cumple	ASTM C131 AASHTO T96 INEN 860
Partículas Chatas y Alargadas	10 % máx	9 %	Si cumple	ASTM D4791
Caras Fracturadas	100 % una cara y 80 % dos caras fracturadas	100-80	Si cumple	ASTM D5821
Porcentaje de Absorción	3,5 % máx	2 %	Si cumple	ASTM C127 AASHTO T85
Adherencia	+ 95	> 95 %	Si cumple	ASTM D1664 AASHTO 182
Peso Específico Neto	2,5 gr/cm ³ MIN	2.6	Si cumple	ASTM C127 AASHTO T85

Tabla 4.6: Resultados laboratorio material 3/8 cantera Uzhupud

Ensayos	Requerimientos	Análisis	Observación	Norma
Abrasión Los Angeles	35 % máx	23 %	Si cumple	ASTM C131 AASHTO T96 INEN 860
Partículas Chatas y Alargadas	10 % máx	9 %	Si cumple	ASTM D4791
Caras Fracturadas	100 % una cara y 80 % dos caras fracturadas	100-80	Si cumple	ASTM D5821
Porcentaje de Absorción	3,5 % máx	1 %	Si cumple	ASTM C127 AASHTO T85
Adherencia	+ 95	> 95 %	Si cumple	ASTM D1664 AASHTO 182
Peso Específico Neto	2,5 gr/cm ³ MIN	2.8	Si cumple	ASTM C127 AASHTO T85

**Tabla 4.7: Resultados laboratorio material 3/16 cantera San Vicente**

Ensayos	Requerimientos	Análisis	Observación	Norma
Índice de Plasticidad (Malla N°40)	NP	NP	Si cumple	ASTM D4318
Índice de Plasticidad (Malla N°200)	4 % máx	0.5 %	Si cumple	ASTM D4318
Porcentaje de Absorción	4 % máx	2.5 %	Si cumple	ASTM C128 AASHTO T84
Peso Específico Neto	2,5 gr/cm3 MIN	2.7	Si cumple	ASTM C128 AASHTO T84

Tabla 4.8: Resultados laboratorio material 3/16 cantera Huascachaca

Ensayos	Requerimientos	Análisis	Observación	Norma
Índice de Plasticidad (Malla N°40)	NP	NP	Si cumple	ASTM D4318
Índice de Plasticidad (Malla N°200)	4 % máx	0.6 %	Si cumple	ASTM D4318
Porcentaje de Absorción	4 % máx	2.9 %	Si cumple	ASTM C128 AASHTO T84
Peso Específico Neto	2,5 gr/cm3 MIN	2.6	Si cumple	ASTM C128 AASHTO T84

Tabla 4.9: Resultados laboratorio material 3/16 cantera Uzhupud

Ensayos	Requerimientos	Análisis	Observación	Norma
Índice de Plasticidad (Malla N°40)	NP	NP	Si cumple	ASTM D4318
Índice de Plasticidad (Malla N°200)	4 % máx	4 %	Si cumple	ASTM D4318
Porcentaje de Absorción	4 % máx	2.5 %	Si cumple	ASTM C128 AASHTO T84
Peso Específico Neto	2,5 gr/cm3 MIN	2.6	Si cumple	ASTM C128 AASHTO T84



- Cantera Huascachaca: En la Tabla 4.10 se presentan los resultados del análisis de este material en función de los requerimientos expuestos por la norma vigente.

Tabla 4.10: Resultados laboratorio material Arena cantera Huascachaca

Ensayos	Requerimientos	Análisis	Observación	Norma
Índice de Plasticidad (Malla N°40)	NP	NP	Si cumple	ASTM D4318
Índice de Plasticidad (Malla N°200)	4 % máx	4 %	Si cumple	ASTM D4318
Porcentaje de Absorción	4 % máx	2.0 %	Si cumple	ASTM C128 AASHTO T84
Peso Específico Neto	2,5 gr/cm ³ MIN	2.4	Si cumple	ASTM C128 AASHTO T84

Como se observa en las Tablas anteriores, todos los materiales, independientemente de la cantera de procedencia, cumplen con las especificaciones indicadas en la normativa [5]. Si bien algunos materiales se encuentran al límite de estas especificaciones, ninguno sale del rango máximo o mínimo permisible en la norma. Lo que los hace aptos para el uso en el diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente. Se pensaría a futuro, en realizar un estudio más profundo analizando cada uno de los resultados, sin embargo este proyecto no tiene ese enfoque.

4.3 Metodología computacional

El resultado final de la combinación entre la metodología numérica y las herramientas computacionales MATLAB y EXCEL, dieron como resultado el programa denominado "MAC.m". Del cual a continuación se presentan capturas de pantalla de su funcionamiento, la codificación del mismo corre dentro de la herramienta MATLAB:

En la Figura 4.1 se presenta la pantalla principal del programa, la misma que contiene el título del proyecto de titulación, los logos de las entidades que hicieron posible su creación además de variables como el nombre del proyecto, ingeniero encargado y la fecha.

La siguiente parte del programa consta de la selección del tipo de mezcla asfáltica en caliente que se desee realizar; cada una de estas se refieren a las mezclas presentes en la Norma Ecuatoriana Vial NEVI [5]; si bien la norma presenta tres tipos de mezcla,



Figura 4.1: Pantalla principal del programa MAC.m

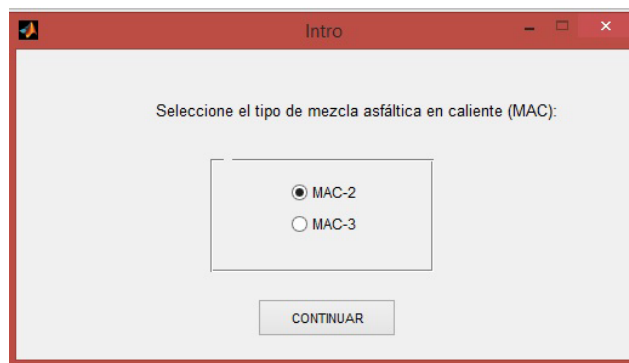


Figura 4.2: Selección del tipo de mezcla asfáltica en caliente (MAC)

el programa trabaja solamente con dos ya que la Empresa ASFALTAR EP trabaja solo con estas normas. La tercera (MAC-1) no es muy utilizada en nuestro medio. MAC-2 tiene por tamaño máximo de agregado al 3/4", mientras que MAC-3 tiene como tamaño máximo al 3/8". Vale la pena mencionar que en la normativa anterior se agregaba una mezcla que incluía material 5/8", sin embargo ésta es una de las modificaciones realizadas en el 2012 por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas.

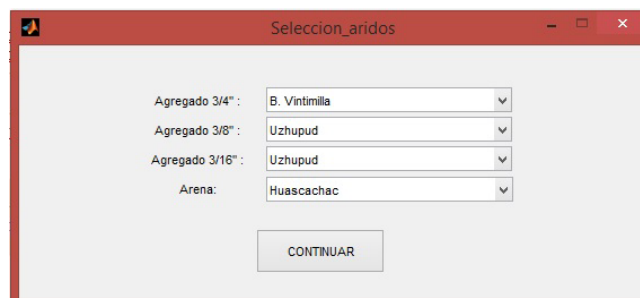


Figura 4.3: Selección de áridos



El siguiente paso del programa es la selección de los áridos, que se encuentra expuesta en la Figura 4.3, en el mismo se presentan pestañas desplegables según los áridos que se encuentren cargados en el documento de EXCEL: canteras.xlsx. Sin necesidad de cambiar la configuración interna del programa, las canteras se irán agregando o eliminando según sea la necesidad. En este paso simplemente se elijen los áridos requeridos en función de la disponibilidad en planta del mismo.

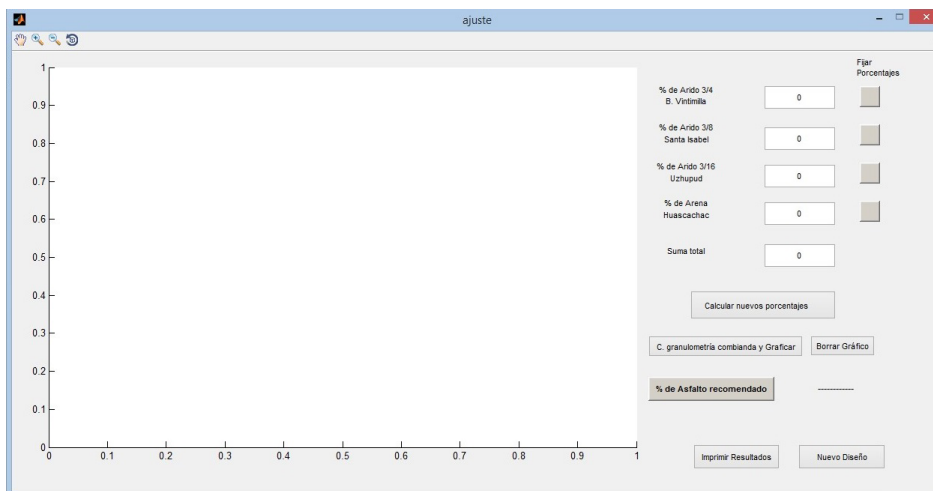


Figura 4.4: Pantalla principal de la metodología de cálculo

En la Figura 4.4 se observa la pantalla principal de la metodología de cálculo, obtenida a partir de las bases teóricas de métodos numéricos. Los botones que se encuentran en la parte derecha, sirven para fijar porcentajes que se consideren correctos, el botón calcular nuevos porcentajes y realiza el estudio de mínimos cuadrados según la información brindada anteriormente por el usuario.

En la parte izquierda se presentará la gráfica de los resultados, como se observa en la Figura 4.5, se graficarán tanto los husos como la combinatoria que el diseñador considere correcta para el diseño actual. El programa permite ingresar sin ningún problema valores que el diseñador, con su experiencia, considere necesarios, tomando los obtenidos por mínimos cuadrados como inicio.

El el botón de “C. granulometría combinada y Graficar”, es el que sirve para graficar la combinatoria y además determinar la granulometria combinada que tiene en sí el diseño. Al lado derecho de este botón se encuentra la opción borrar gráfico, el mismo que elimina los gráficos hechos cuando el diseñador decide por probar algunos tipos de combinatorias. En la parte inferior, el botón de “ % de Asfalto recomendado”, realiza internamente también análisis con mínimos cuadrados, sin embargo, éstos no estan ya en función de los agregados sino en función de la base de datos de diseños. En este punto, el programa realiza un análisis de mínimos cuadrados en el cual minimiza el error que existe entre la actual curva de áridos combinada, con una que se encuentra

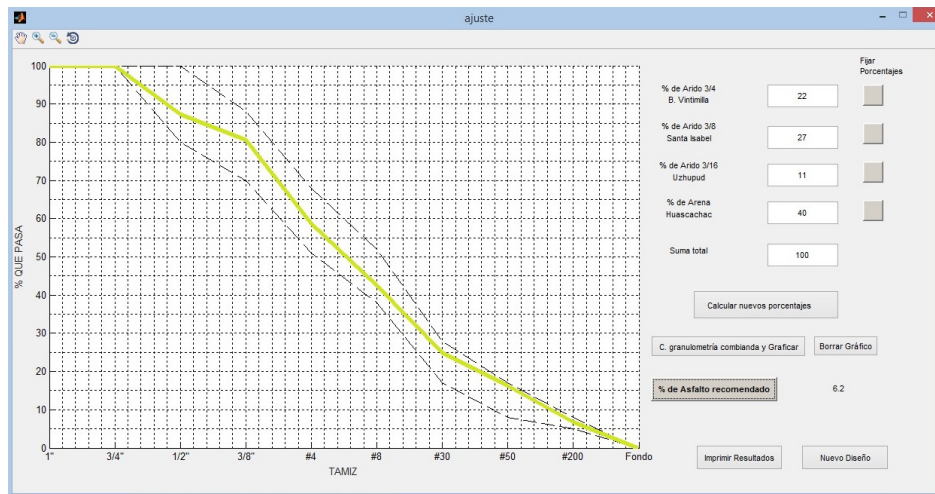


Figura 4.5: Gráfica de la combinatoria seleccionada por el diseñador en función de los áridos escogidos

presente en la base de datos, proveniente de los diseños que anteriormente realizó la Empresa.

Por último, se tienen en la parte inferior los botones “Imprimir Resultados” o “Nuevo Diseño”. El primero imprime todo el diseño realizado en una hoja electrónica de EXCEL denominada Resultados.xlsx, en la misma se encuentra la información de cada una de las especificaciones que se exigen para los agregados, además de las gráficas de la metodología Marshall realizadas en diseños anteriores. Vale la pena mencionar que siempre antes de hacer correr al programa es necesario que el usuario ingrese en esta hoja de Excel, y borre cualquier diseño que se encuentre en ese momento en las hojas del libro electrónico. Para no eliminar estas hojas se puede guardar la misma con el nombre del proyecto y dejar el archivo original en blanco para volverlo a escribir sin ningún inconveniente.

Una vez realizado todo el procedimiento se puede observar que al estar correctamente exportados los resultados aparece el siguiente mensaje (Figura 4.6): “Los resultados se han exportado exitosamente al archivo Resultados.xlsx”.

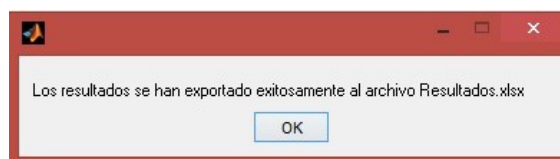


Figura 4.6: Aviso de exportación correcta de los datos



4.4 Validación de resultados computacionales en laboratorio

La validación de los resultados que arroja la interfaz computacional del presente estudio, se realizó en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca, con ayuda de los laboratoristas del mismo. En total se realizaron 4 diseños comprobatorios de mezclas asfálticas, éste hecho se da por la poca disposición de materiales en stock.

Los agregados con los que se trabajaron para la corroboración de los resultados arrojados por el programa fueron:

- 3/4" de Uzhupud, Vipesa y B. Vintimilla
- 3/8" de Vipesa
- 3/16" de Uzhupud
- Arena de Huascachaca

A continuación se presentan respectivamente, las tablas de resumen de resultados y además los gráficos obtenidos del ensayo Marshall de comprobación para cada una de las mezclas asfálticas realizadas con los porcentajes de los agregados dados por el programa; para verificar que el porcentaje de asfalto óptimo recomendado por el programa es el adecuado, se realizaron briquetas con tres porcentajes, un porcentaje menor al recomendado, el porcentaje recomendado y un porcentaje mayor al recomendado.

Diseño 1: MAC-2

- 3/4" de Uzhupud
- 3/8" de Vipesa
- 3/16" de Uzhupud
- Arena de Huascachaca

En la Figura 4.7, Figura 4.8 y Figura 4.9 que se presentan a continuación, se observan los resultados en laboratorio obtenidos con el % óptimo de asfalto además con un punto por debajo y sobre éste, en la Figura 4.10 se demuestran los resultados de los análisis Marshall para determinación de contenido óptimo de asfalto y finalmente en la



AGREGADOS			DOSIF EN % Agreg	P.E. NETO	P.E. EFEC	% ABSC ASF. AC	Brique t#	PESOS			DENSIDAD		PORCEN. EN VOLUMEN			VAM.	% Asfal. Efec.	VFA % de VAM	ESTABILIDAD			FLUJO
TAMIZ	%	P.E. NETO						Aire seco	Aire SSS	Agua	P.E. NETO briq.	RICE Medid o	Agregado	Vacios de Aire	Asf. Efec				Divis.	Dia	F.C.	
3/4	18,00	2,775	16,92				1	1152,4	1156,3	690,0	2,471							380	1,04	869,4	3,25	
3/8	27,0	2,6	25,4				2	1163,8	1168,0	679,0	2,380							305	1,04	697,8	4,75	
3/16	25,0	2,6	23,5				3	1142,7	1144,8	666,5	2,389							320	1,04	732,2	6,75	
Arena	30,0	2,5	28,2																			
Asfalto	6,0	1,026	6,00																			
TOTAL	106		100,00	2,597	2,752	2,238	Promd.				2,443	2,500	87,373	3,461	9,166	12,627	3,896	72,589			766,5	4,92

Figura 4.7: Resultados Diseño 1: MAC-2 Briqueta al 6.0 %

AGREGADOS			DOSIF EN % Agreg	P.E. NETO	P.E. EFEC TIVO	% ABSC ASF. AC	Brique t#	PESOS			DENSIDAD		PORCEN. EN VOLUMEN			VAM. Vac. Agreg	% Asfal. Efecti vo	VFA % de VAM	ESTABILIDAD			FLUJO
TAMIZ	TOTA	P.E. NETO						Aire seco	Aire SSS	Agua	P.E. NETO briq.	RICE Medid o	Agregado	Vacios de Aire	Asf. Efec				Divis.	Dia	F.C.	
3/4	18,00	2,775	16,88				1	1190,8	1195,5	693,0	2,370							408	0,93	838,4	4,75	
3/8	27,00	2,649	25,33				2	1257,0	1258,5	758,0	2,511							482	0,94	1000,0	4,75	
3/16	25,00	2,587	23,45				3	1222,4	1227,8	716,5	2,391							378	0,93	776,7	4,25	
Arena	30,00	2,465	28,14																			
Asfalto	6,2	1,026	6,20																			
TOTAL	106		100,00	2,597	2,749	2,196	Promd.				2,424	2,490	87,568	2,650	9,782	12,432	4,140	78,680			871,7	4,58

Figura 4.8: Resultados Diseño 1: MAC-2 Briqueta al 6.2 %

Tabla 4.11 el resumen de ésos resultados.

En este diseño, se realizaron briquetas con el 6%, 6.2% (óptimo recomendado por el programa) y el 6.5% de asfalto; como se observa en la Figura 4.10, aunque los porcentajes externos son semejantes se ve la marcada diferencia del óptimo recomendado por el programa.

Tabla 4.11: Resumen resultados ensayo Marshall con método NAPA para una MAC-2 Diseño 1

Gráfica	% Asfalto	Observaciones
1	6.20	Norma >1800, punto máximo
2	6.20	Peso específico neto (Bulk) máximo
3	6.20	Norma 8-14, punto medio 11
4	6.20	Norma 65-75, punto medio 70
5	6.20	Norma 3-5, punto mínimo 6..6
6	6.20	Norma mayor a 14, punto mínimo
Promedio:	6.20	
Asumido:	6.20	

Diseño 2: MAC-3

- 3/8" de Vipesa
- 3/16" de Uzhpud



AGREGADOS	TAMIZ	TOTAL	P.E. NETO	DOSIFIC. EN % Arena	P.E. NETO	P.E. EFECTIVO	% ABSORCIÓN ASF. AC.	Briquet #	PESOS			DENSIDAD P.E. NETO briq.	RICE Medida	PORCEN. EN VOLUMEN			VAM. Vac. Agreg.	% Asfal. Efectivo	VFA % de VAM	ESTABILIDAD			FLUJO
									Aire seco	Aire SSS	Agua			Agregado	Vacios de Aire	Asf. Efc.				Divis.	Dial	F.C.	
3/4	18,00	2,775	16,83					1	1233,6	1234,3	732,1	2,456							405	0,96	858,0	6,75	
3/8	27,00	2,649	25,25					2	1152,1	1153,5	646,5	2,272							395	1,07	930,7	6,8	
3/16	25,00	2,587	23,38					3	1267,2	1267,4	757,9	2,487							375	0,99	815,1	5,8	
Arena	30,00	2,465	28,05																				
Asfalto	6,5	1,026	6,50																				
TOTAL	107		100,00	2,597	2,758	2,308	Promd.					2,405	2,485	86,615	3,207	10,179	13,385	4,342	76,042			867,9	6,45

Figura 4.9: Resultados Diseño 1: MAC-2 Briqueta al 6.5 %

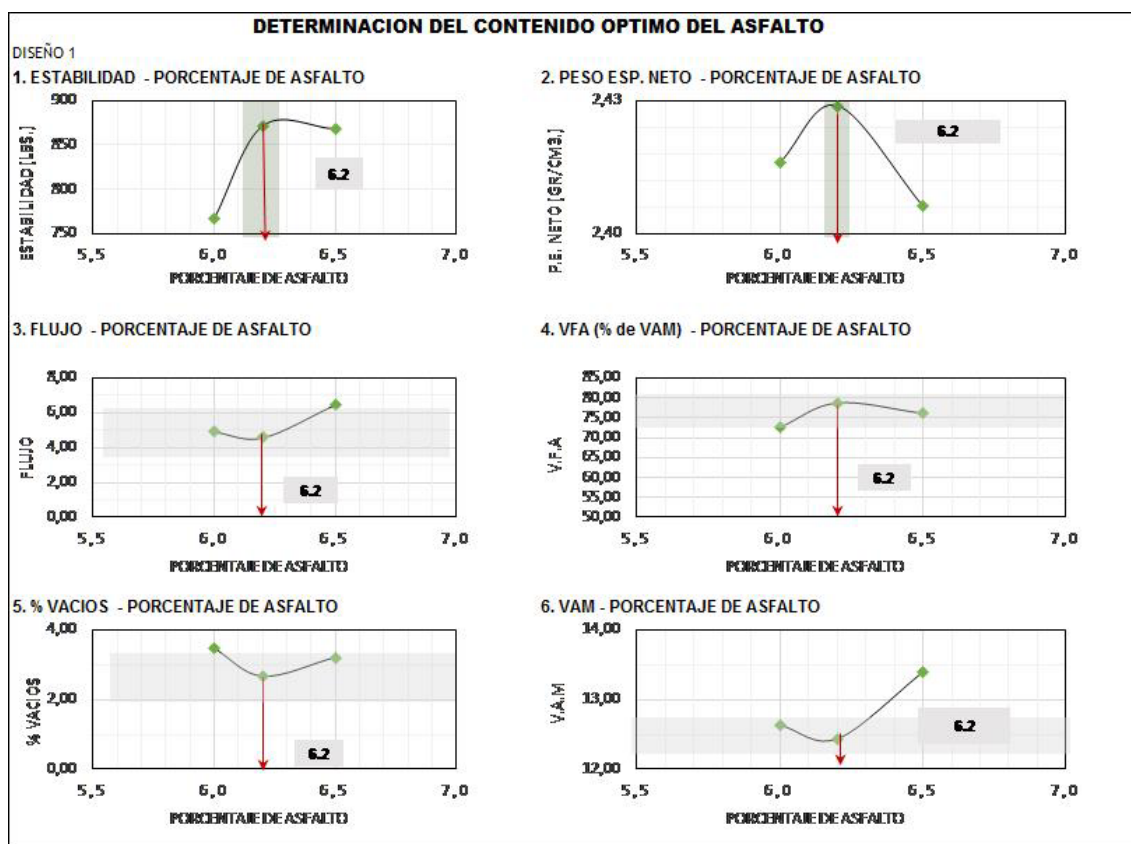


Figura 4.10: Resumen resultados ensayo Marshall con método NAPA para una MAC-2 Diseño 1

- Arena de Huascachaca

El segundo diseño dio como resultado los expuestos en la Figura 4.11, Figura 4.12 y Figura 4.13 que se presentan a continuación, se observan los resultados en laboratorio obtenidos con el % óptimo de asfalto además con un punto por debajo y sobre éste, en la Figura 4.14 se demuestran los resultados de los análisis Marshall para determinación de contenido óptimo de asfalto y finalmente en la Tabla 4.12 el resumen de esos resultados.



AGREGADOS			DOSIF EN % Agreg	P.E. NETO	P.E. EFECTIVO	% ABSC ASF. AC	Brique t #	PESOS			DENSIDAD		PORCEN. EN VOLUMEN			VAM.	% Asfal. Efec.	VFA	ESTABILIDAD			FLUJO
TAMIZ	%	P.E. NETO						Aire seco	Aire SSS	Agua	P.E. NETO briq.	RICE Medid	gregad	Vacios de Aire	Asf. Efect				Divis.	Dial	F.C.	
3/4	0,00	2,775	0,00				1	1120,2	1122,5	654,0	2,391							355	1,1	861,4	4	
3/8	31,0	2,6	29,3				2	1100,6	1103,4	636,0	2,355							325	1,20	856,6	3,25	
3/16	40,0	2,6	37,8				3	1104,2	1106,5	634,0	2,342							320	1,13	798,3	3,75	
Arena	29,0	2,5	27,4																			
Asfalto	5,5	1,026	5,50																			
TOTAL	106		100,00	2,569	2,728	2,333	Promd.				2,363	2,500	86,914	5,498	7,588	13,086	3,295	57,987			838,8	3,67

Figura 4.11: Resultados Diseño 2: MAC-3 Briqueta al 5.5 %

AGREGADOS			DOSIF IC. EN % Agreg	P.E. NETO	P.E. EFECTIVO	% ABSC ASF. AC	Brique t #	PESOS			DENSIDAD		PORCEN. EN VOLUMEN			VAM. Vac. Agreg	% Asfal. Efectivo	VFA % de VAM	ESTABILIDAD			FLUJO
TAMIZ	TOTA	P.E. NETO						Aire seco	Aire SSS	Agua	P.E. NETO briq.	RICE Medid	gregad	Vacios de Aire	Asf. Efect				Divis.	Dial	F.C.	
3/4	0,00	2,775	0,00				1	1102,9	1103,5	647,5	2,419							365	1,22	976,4	4,75	
3/8	31,00	2,649	29,05				2	1155,0	1157,2	685,0	2,446							342	1,07	805,8	3,75	
3/16	40,00	2,587	37,48				3	1108,0	1109,4	637,0	2,345							324	1,12	796,9	3,5	
Arena	29,00	2,465	27,17																			
Asfalto	6,3	1,026	6,30																			
TOTAL	106		100,00	2,569	2,754	2,690	Promd.				2,403	2,490	87,667	3,479	8,854	12,333	3,780	71,790			859,7	4,00

Figura 4.12: Resultados Diseño 2: MAC-3 Briqueta al 6.3 %

En la Figura 4.14, el porcentaje de asfalto óptimo recomendado (6.3%), resulta ser el porcentaje óptimo para la mezcla asfáltica, comprobando que el programa es confiable.

Tabla 4.12: Resumen resultados ensayo Marshall con método NAPA, Modelo MAC-3 Diseño 2

Gráfica	% Asfalto	Observaciones
1	6.30	Norma >1800, punto máximo
2	6.30	Peso específico neto (Bulk) máximo
3	6.30	Norma 8-14, punto medio 11
4	6.30	Norma 65-75, punto medio 70
5	6.30	Norma 3-5, punto mínimo 6..6
6	6.30	Norma mayor a 14, punto mínimo
Promedio:	6.30	
Asumido:	6.30	

Diseño 3: MAC-2

- 3/4" de Vipes
- 3/8" de Vipesa
- 3/16" de Uzhupud
- Arena de Huascachaca



AGREGADOS		DOSIF. IC. EN %	P.E. NETO	P.E. EFECTIVO	% ABSOR. ASF. AC	Brique t #	PESOS			DENSIDAD P.E. NETO briq.	TRICE Medid	PORCEN. EN VOLUMEN		VAM. Vac. Agreg.	% Asfal. Efectivo	VFA % de VAM	ESTABILIDAD			FLUJO
TAMIZ	TOTA						Aire seco	Aire SSS	Agua			gregad	Vacios de Aire				Asf. Efect.	Divis.	Dial.	
3/4	0,00	2,775	0,00			1	1128,2	1130,4	655,5	2,376						291	1,03	657,5	4	
3/8	31,00	2,649	28,83			2	1111,0	1112,0	645,0	2,379						371	1,07	874,2	4,25	
3/16	40,00	2,587	37,20			3	1146,1	1147,3	677,5	2,440						348	1,07	820,0	3,75	
Arena	29,00	2,465	26,97																	
Asfalto	7,0	1,026	7,00																	
TOTAL	107	100,00	2,569	2,784	3,091	Promd.				2,398	2,486	86,820	3,537	9,643	13,180	4,126	73,165		783,9	4,00

Figura 4.13: Resultados Diseño 2: MAC-3 Briqueta al 7 %

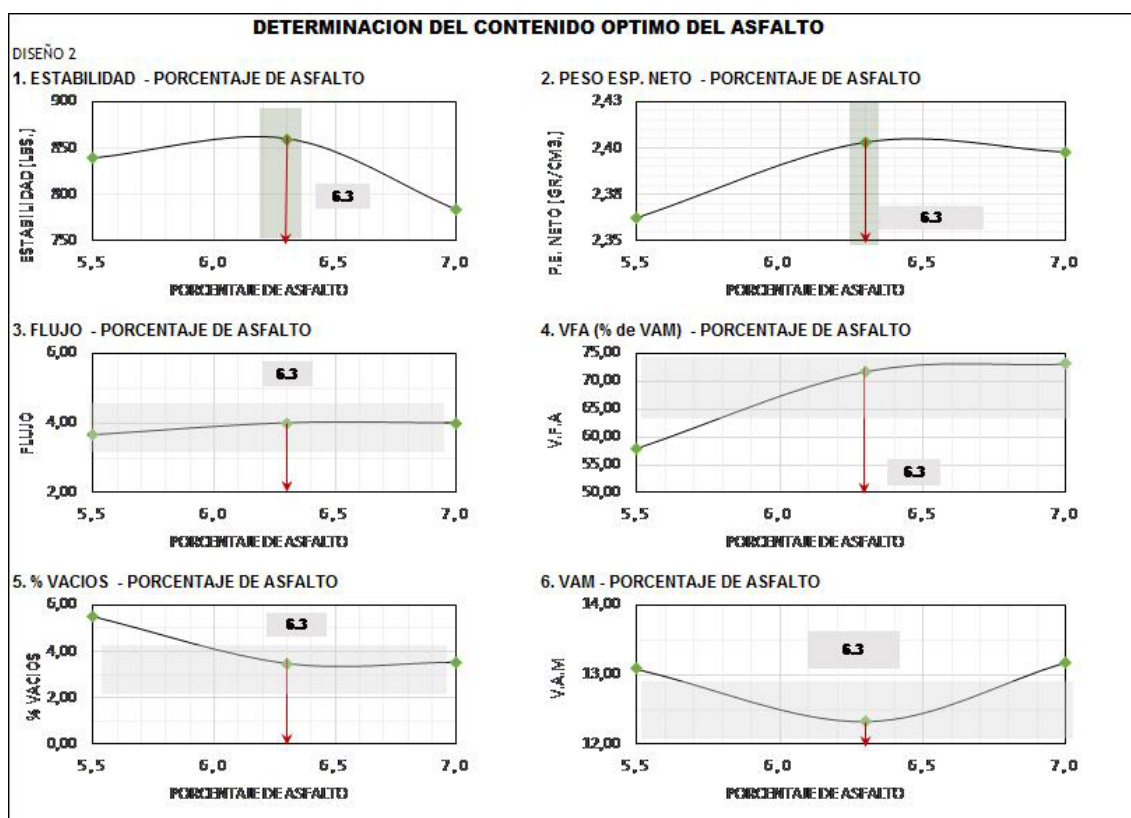


Figura 4.14: Resumen resultados ensayo Marshall con método NAPA, Modelo MAC-3 Diseño 2

En la Figura 4.15, Figura 4.16 y Figura 4.17 que se presentan a continuación, se observan los resultados en laboratorio obtenidos con el % óptimo de asfalto además con un punto por debajo y sobre éste, en la Figura 4.18 se demuestran los resultados de los análisis Marshall para determinación de contenido óptimo de asfalto y finalmente en la Tabla 4.13 el resumen de éstos resultados.

Como se observa en las gráficas de la Figura 4.18 de la determinación de contenido óptimo de asfalto del diseño 3, el porcentaje óptimo de asfalto para la mezcla es del 6.2 %, comprobando nuevamente la validación del método que emplea el programa.



AGREGADOS		DOSIF	P.E.	P.E.	% ABSC	Briquet	PESOS			DENSIDAD		PORCEN. EN VOLUMEN			VAM.	% Asfal. Efec	VFA	ESTABILIDAD				
TAMIZ	%	P.E. NETO	EN %	NETO	ASF. AC		Aire seco	Aire SSS	Agua	P.E. NETO briq.	RICE Medido	Agregado	Vacios de Aire	Asf. Efc				Divis. Dial	F.C.	Libras	FLUJO	
3/4	28,00	2,485	26,46				1	1156,4	1157,7	656,5	2,307											285
3/8	14,0	2,649	13,2			2	1139,6	1142,0	641,5	2,277								305	1,01	679,7	3	
3/16	28,0	2,587	26,5			3	1208,5	1212,3	706,0	2,387								322	0,94	668,0	3,75	
Arena	30,0	2,465	28,4																			
Asfalto	5,5	1,026	5,50																			
TOTAL	105,5		100,00	2,529	2,728	2,966	Promd.			2,324	2,500	86,840	7,052	6,108	13,160	2,697	46,415			658,2	3,83	

Figura 4.15: Resultados Diseño 3: MAC-2 Briqueta al 5.5 %

AGREGADOS		DOSIF	P.E.	P.E.	% ABSC	Briquet	PESOS			DENSIDAD		PORCEN. EN VOLUMEN			VAM.	% Asfal. Efectivo	VFA % de VAM	ESTABILIDAD				
TAMIZ	% TOTAL	P.E. NETO	EN %	NETO	ASF. AC		Aire seco	Aire SSS	Agua	P.E. NETO briq.	RICE Medido	Agregado	Vacios de Aire	Asf. Efc				Divis. Dial	F.C.	Libras	FLUJO	
3/4	28,00	2,485	26,26				1	1158,5	1162,5	680,0	2,401											315
3/8	14,00	2,649	13,13			2	1125,7	1130,2	652,0	2,354								320	1,07	754,0	4	
3/16	28,00	2,587	26,26			3	1156,5	1164,2	682,5	2,401								295	0,98	632,8	3,5	
Arena	30,00	2,465	28,14																			
Asfalto	6,2	1,026	6,20																			
TOTAL	106,2		100,00	2,529	2,749	3,256	Promd.			2,385	2,490	88,482	4,204	7,314	11,518	3,146	63,499			696,3	4,17	

Figura 4.16: Resultados Diseño 3: MAC-2 Briqueta al 6.2 %

Diseño 4: MAC-2

- 3/4" de B. Vintimilla
- 3/8" de Vipesa
- 3/16" de Uzhpud
- Arena de Huascachaca

En la Figura 4.19, Figura 4.20 y Figura 4.21 que se presentan a continuación, se observan los resultados en laboratorio obtenidos con el % óptimo de asfalto además con un punto por debajo y sobre éste, en la Figura 4.22 se demuestran los resultados

Tabla 4.13: Resumen resultados ensayo Marshall con método NAPA, Modelo MAC-3 Diseño 3

Gráfica	% Asfalto	Observaciones
1	6.20	Norma >1800, punto máximo
2	6.20	Peso específico neto (Bulk) máximo
3	6.20	Norma 8-14, punto medio 11
4	6.20	Norma 65-75, punto medio 70
5	6.20	Norma 3-5, punto mínimo 6..6
6	6.20	Norma mayor a 14, punto mínimo
Promedio:	6.20	
Asumido:	6.20	



AGREGADOS		DOSIF EN %	P.E. NETO	P.E. EFECTIVO	% ABSORCIÓN ASF. AC	Briquet #	PESOS			DENSIDAD		PORCEN. EN VOLUMEN			VAM. Vac. Agreg.	% Asfal. Efectivo	VFA % de VAM	ESTABILIDAD			
TAMIZ	% TOTAL						P.E. NETO	Aire seco	Aire SSS	Agua	P.E. NETO briq.	RICE Medido	Agregado	Vacios de Aire				Asf. Efc.	Divis.	Dial	F.C.
3/4	28,00	2,485	26,04			1	1144,2	1149,6	636,7	2,231							260	1,03	587,4	4,5	
3/8	14,00	2,649	13,02			2	1187,8	1188,3	683,0	2,351							370	1,01	824,6	5,25	
3/16	28,00	2,587	26,04			3	1238,6	1240,3	724,0	2,399							275	0,92	558,4	6,5	
Arena	30,00	2,465	27,90																		
Asfalto	7,0	1,026	7,00																		
TOTAL	107		100,00	2,529	2,784	3,724	Promd.			2,327	2,486	85,577	6,402	8,021	14,423	3,537	55,612		656,8	5,42	

Figura 4.17: Resultados Diseño 3: MAC-2 Briqueta al 7 %

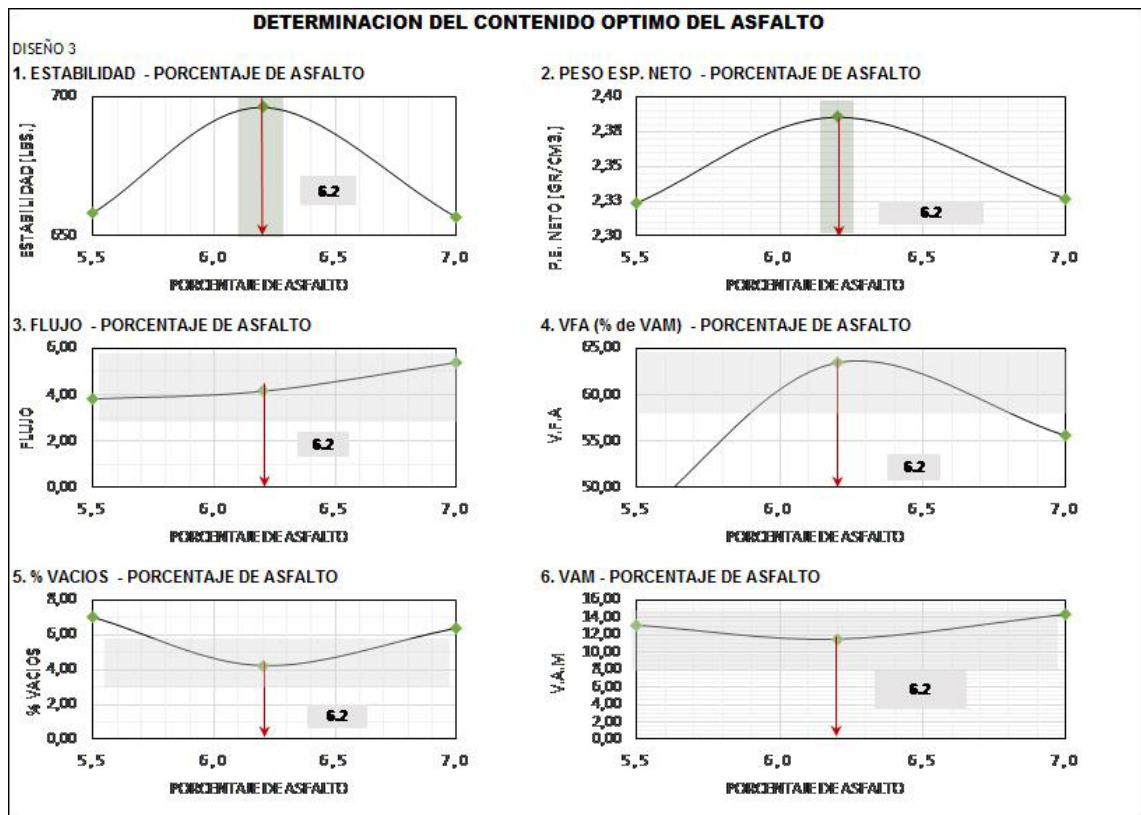


Figura 4.18: Resumen resultados ensayo Marshall con método NAPA, Modelo MAC-3 Diseño 3

de los análisis Marshall para determinación de contenido óptimo de asfalto y finalmente en la Tabla 4.14 el resumen de esos resultados.



AGREGADOS		DOSIF EN %	P.E. NETO	P.E. EFEC	% ABS ASF. AC	Brique t #	PESOS			DENSIDAD		PORCEN. EN VOLUMEN			VAM. Vac. Efectivo	% Asfal. Efec	VFA % de VAM	ESTABILIDAD			FLUJO
TAMIZ	%						P.E. NETO	Aire seco	Aire SSS	Agua	P.E. NETO briq.	RICE Medido	Agregado	Vacios de Aire				Asf. Efec	Divis. Dial	F.C.	
3/4	22,00	2,717	20,79			1	1165,4	1168,6	667,0	2,323							295	1,103	715,8	4,75	
3/8	21,0	2,649	19,8			2	1143,0	1146,3	636,0	2,240							280	1,09	669,6	3,75	
3/16	25,0	2,587	23,6			3	1156,4	1161,6	651,5	2,267							306	1,01	682,0	4,5	
Arena	32,0	2,465	30,2																		
Asfalto	5,5	1,026	5,50																		
TOTAL	106		100,00	2,586	2,728	2,067	Promd.			2,277	2,500	83,200	8,930	7,870	16,800	3,547	46,845			689,1	4,33

Figura 4.19: Resultados Diseño 4: MAC-2 Briqueta al 5.5 %

AGREGADOS		DOSIF EN %	P.E. NETO	P.E. EFECTI VO	% ABS ASF. AC	Brique t #	PESOS			DENSIDAD		PORCEN. EN VOLUMEN			VAM. Vac. Efectivo	% Asfal. Efectivo	VFA % de VAM	ESTABILIDAD			FLUJO
TAMIZ	TOTA						P.E. NETO	Aire seco	Aire SSS	Agua	P.E. NETO briq.	RICE Medido	Agregado	Vacios de Aire				Asf. Efec	Divis. Dial	F.C.	
3/4	22,00	2,717	20,64			1	1168,5	1170,3	701,0	2,490							328	1,01	731,0	4	
3/8	21,00	2,649	19,70			2	1161,5	1163,6	694,0	2,473							355	0,96	752,1	3,75	
3/16	25,00	2,587	23,45			3	1172,3	1192,8	705,0	2,403							239	1,12	587,8	4	
Arena	32,00	2,465	30,02																		
Asfalto	6,2	1,026	6,20																		
TOTAL	106		100,00	2,586	2,749	2,357	Promd.			2,455	2,490	89,067	1,386	9,547	10,933	3,989	87,326			690,3	3,92

Figura 4.20: Resultados Diseño 4: MAC-2 Briqueta al 6.2 %

Tabla 4.14: Resumen de resultados del ensayo Marshall con método NAPA, Modelo MAC-2 Diseño 4

Gráfica	% Asfalto	Observaciones
1	6.20	Norma >1800, punto máximo
2	6.20	Peso específico neto (Bulk) máximo
3	6.20	Norma 8-14, punto medio 11
4	6.20	Norma 65-75, punto medio 70
5	6.20	Norma 3-5, punto mínimo 6..6
6	6.20	Norma mayor a 14, punto mínimo
Promedio:	6.20	
Asumido:	6.20	

AGREGADOS		DOSIF EN %	P.E. NETO	P.E. EFECTI VO	% ABS ASF. AC	Brique t #	PESOS			DENSIDAD		PORCEN. EN VOLUMEN			VAM. Vac. Efectivo	% Asfal. Efectivo	VFA % de VAM	ESTABILIDAD			FLUJO
TAMIZ	TOTA						P.E. NETO	Aire seco	Aire SSS	Agua	P.E. NETO briq.	RICE Medido	Agregado	Vacios de Aire				Asf. Efec	Divis. Dial	F.C.	
3/4	22,00	2,717	20,46			1	1164,3	1166,7	660,0	2,298							305	0,99	662,9	4,5	
3/8	21,00	2,649	19,53			2	1149,1	1151,8	655,0	2,313							295	0,99	641,2	5	
3/16	25,00	2,587	23,25			3	1186,3	1173,3	681,0	2,410							325	1,01	724,3	5,5	
Arena	32,00	2,465	29,76																		
Asfalto	7,0	1,026	7,00																		
TOTAL	107		100,00	2,586	2,784	2,825	Promd.			2,340	2,486	84,160	5,866	9,974	15,840	4,373	62,967			676,2	5,00

Figura 4.21: Resultados Diseño 4: MAC-2 Briqueta al 7 %

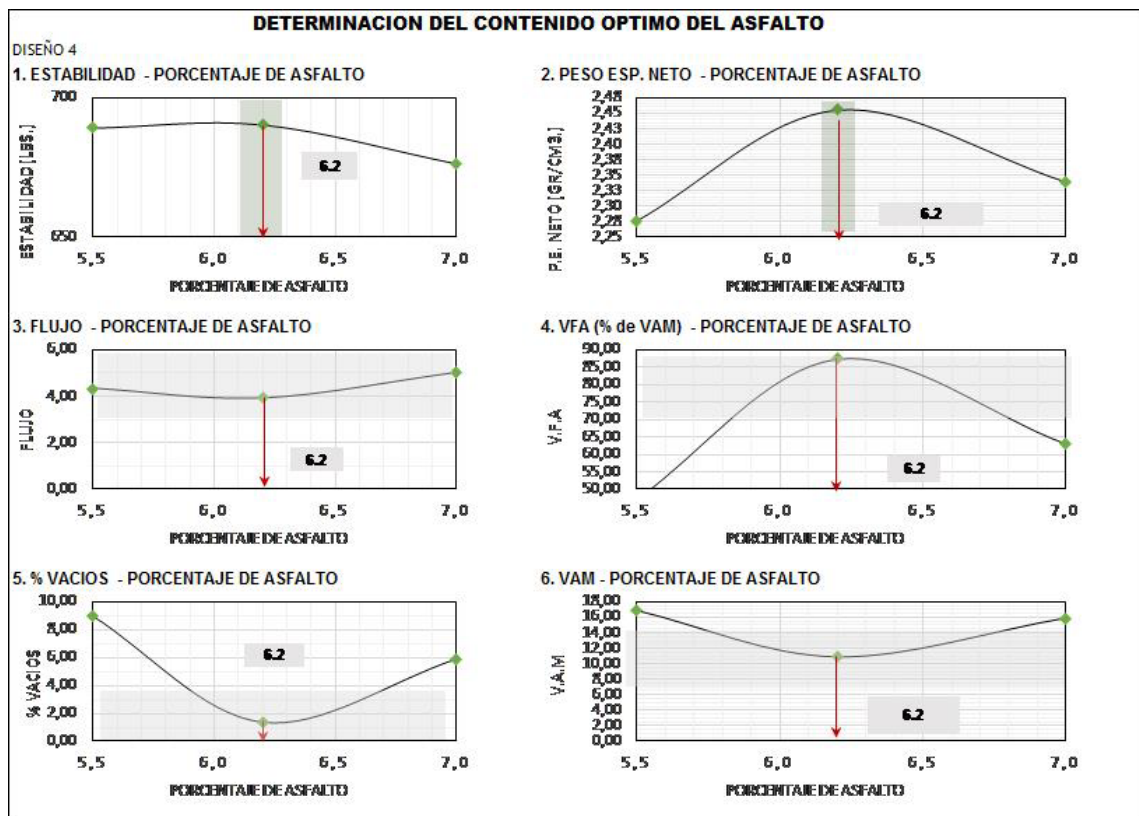


Figura 4.22: Resumen de resultados del ensayo Marshall con método NAPA, Modelo MAC-2 Diseño 4



CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En base a las bases teóricas que se consideraron además de las experimentaciones realizadas, se establecen una serie de conclusiones del trabajo además de recomendaciones acerca de la metodología utilizada para el análisis y líneas futuras de investigación.

5.1 Conclusiones

La metodología del análisis comparativo de datos, con la ayuda de métodos numéricos como son los mínimos cuadrados, es válida y funcional para determinar el contenido óptimo de asfalto en función de propiedades de materiales que se tienen disponibles al momento de la realización del diseño en la planta, este método evita la realización de un estudio con el método de Marshall para el diseño de una mezcla asfáltica. Éste se basa en el análisis con errores mínimos lo que genera la confiabilidad necesaria para aceptar el valor del porcentaje óptimo de asfalto para la mezcla que se desee realizar, cumpliendo con las especificaciones indicadas por el método NAPA.

Cada uno de los agregados nuevos, que llegan a la planta, debe ser analizado, se realiza en primer lugar para la validación de la normativa y cada una de las especificaciones que debería cumplir. En segundo lugar éste análisis sirve para la alimentación de la base de datos que contiene la información de los agregados. La combinatoria de agregados se hace dentro de la interfaz computacional, que



automáticamente presentará mayor variedad de elección de agregados.

En lo que se refiere a la mezcla asfáltica en sí, el diseño para la selección del porcentaje óptimo de asfalto se encuentra reflejado gracias al método NAPA de diseños asfálticos. El cumplimiento de los parámetros establecidos dentro de este método, ayuda a garantizar la funcionalidad en campo de la mezcla asfáltica. Se corroboró además que todos los diseños que la Empresa Asfaltar EP. se encuentra correctamente diseñados en función de este método. Ciertos modelos se descartaron ya que se encontraron algunas anomalías en los diseños. De esta manera es como la base de datos de la Empresa, en cuanto a la historia de sus diseños quedó actualizada y lista para seguir siendo alimentada.

En función a lo expuesto anteriormente, ya que se eliminaron algunos diseños, la base de datos de la Empresa no es demasiado extensa, la misma consta solamente de nueve (9) diferentes diseños, sin embargo cada uno tiene una combinatoria de agregados diferente y además un porcentaje óptimo de asfalto que varía de una a otra. Aunque se observa este inconveniente, se puede decir que este proyecto es un punto de partida válido para empezar a diseñar mezclas asfálticas a partir de un análisis numérico y estadísticos, sin dejar al lado la ingeniería de pavimentos que es la base para la obtención de cada uno de los diseños que se encuentran almacenados en la base de datos.

La metodología que se presenta en este estudio es válida, y además presenta los fundamentos teóricos y prácticos suficientes para ser válida. La combinatoria de conceptos matemáticos y de ingeniería de pavimentos en sí es completamente aceptable; sin embargo, como todo método siempre necesita encontrarse en uso para comprobar su efectividad a través del tiempo. Vale la pena destacar que el personal que maneje el programa tiene que estar capacitado a cabalidad para reaccionar de manera adecuada ante cualquier advertencia del programa; además de conocer cómo se realiza la alimentación, edición o eliminación de cualquier tipo de información sobre las bases de datos.

Ya que el programa EXCEL, es generalmente conocido, no vale la pena hacer una capacitación en este sentido, aunque si se puede decir que para la codificación en si de la interfaz, en la herramienta MATLAB, hace falta tener un conocimiento más profundo, ya que esto no es muy utilizado en el medio. Es útil tener por lo menos el conocimiento general de la configuración del mismo para poder determinar posibles desajustes en la codificación del programa.

Al final de todo este diseño, no se puede decir que solamente el que dan los métodos numéricos es el válido, ya que el programa tiene la opción de dejar la combinatoria de los agregados de manera libre según sea el concepto del diseñador. En cuanto a diseños de concretos asfálticos no se puede decir que solo uno es el diseño correcto,



ya que en la práctica mucho depende de la experiencia local con los materiales y además del criterio que el diseñador maneje, NAPA, AIM.

5.2 Recomendaciones

En el capítulo 4, se puede constatar la necesidad de realizar visitas en campo a las diferentes canteras que son producto de estudio. Estas visitas ayudan a realizar una caracterización geológica más precisa que la que se realizó en el presente proyecto. Vale la pena conocer la ubicación exacta de cada una de estas canteras, para la ubicación de los planos geológicos de los mismos. En este sentido, la visita también colaboraría para realizar un pequeño control de calidad de los materiales, ya que en cada una se puede observar el manejo que dan al producto final, la maquinaria utilizada para la trituración del material, y quizá si se investiga un poco más profundamente el tema, se puede llegar a conocer exactamente las condiciones del resultado de trituración gracias al análisis de la maquinaria; sin embargo, este punto tiende más al estudio de maquinaria y equipo de construcción y fiscalización de obras y estudios.

Si se desea continuar con el análisis de los requerimientos de los agregados, tanto fino como grueso, de cada una de las canteras que proveen el material a la Empresa ASFALTAR EP., se debe considerar realizar un estudio más profundo; es decir, tener en cuenta la inclusión de todos los análisis químicos que sean necesarios. En este caso la dificultad de conseguir los materiales fue un impedimento para la realización de estos ensayos químicos. Cabe recomendar que los químicos sean conseguidos por la misma Empresa o por la Facultad, ya que ninguno es de venta libre a personas naturales y además es necesario que en los laboratorios de cada una de estas entidades se tenga en stock. En el caso de la Facultad para el aprendizaje de los estudiantes, y en el caso de la Empresa para que ésta realice a futuro el control de calidad correspondiente.

El control de calidad es un punto muy importante que en este proyecto no se profundizó, si el programa crea un diseño de mezcla que se coloque en campo, podría actualizarse el software para que en futuro se ingrese otro parámetro dentro de la base de datos que sería la experimentación en obra, con este control se hace válido relacionar el comportamiento en campo con el análisis que la interfaz produce luego de realizado el análisis computacional.

Es necesario seguir alimentando a cada una de las bases de datos de la Empresa con información actual, es decir con nuevos materiales (nuevos proveedores) y nuevos diseños de mezclas asfálticas en caliente que realice la Empresa Asfaltar EP. En la base de datos de "CANTERAS", es necesario realizar por lo menos una vez cada uno de los ensayos que exige la norma para poder ingresar esta nueva cantera como válida



dentro de la base de datos. En segunda instancia, es necesario recuperar información anterior de los diseños realizados por la Empresa para concretar de mejor manera la base de datos denominada “DISENOS”, ya que de ésta se alimenta el programa para realizar la metodología de mínimos cuadrados. En este sentido mucha de la confiabilidad del porcentaje de asfalto depende de la cantidad de datos con los que el programa pueda tener selección. Vale la pena mencionar que la realización del ensayo Marshall para el porcentaje recomendado está de más ya que el método se encuentra comprobado también en el presente trabajo de investigación. La variedad de diseños y además toda la información de los agregados que el usuario ingrese dentro de la base de datos, ayudan a que este método continúe siendo válido a lo largo del tiempo.

Por último, se considera que realizar un mayor número de mezclas asfálticas para corroborar los datos que arroja el programa también podría ser necesario en un análisis a futuro. Este estudio ayudaría a comprobar que en función del tiempo, el método continúa siendo válido; además, se deberían realizar porcentajes cercanos al óptimo, cuando la base de diseños se encuentre más completa. Con la elaboración del programa computacional, lo que la Empresa Asfaltar EP. logra es un ahorro de tiempo en la fase de preproducción al momento de realizar las mezclas asfálticas en la planta. En futuro se puede además añadir un método matemático, que determine un porcentaje de asfalto intermedio y no asuma a uno fijo de un diseño. Es decir que interpole entre algunos porcentajes que podrían ser opcionales para de esta manera tener aún mejor la cantidad de asfalto que se necesita en el diseño.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] ASFALTAR EP. Rendición de cuentas asfaltar ep, 2014.
- [2] Jr. Maxwell Gordon Lay; James E. Vance. *Ways of the World: A History of the World's Roads and of the Vehicles That Used Them*. RUTGERS UNIVERSITY PRESS New Brunswick, New Jersey, 1992.
- [3] 116 ACI. Terminología del cemento y el hormigón. page 124, 1982.
- [4] NCHRP. Nchrp report 673: A manual for design of hot mix asphalt with commentary. Technical report, NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 2011.
- [5] Norma ecuatoriana vial (nevi). *Ministerio de Transporte y Obras Públicas*, 3, 2013.
- [6] Historia del asfalto <http://www.e-asphalt.com/>, 2005.
- [7] American society for testing materials (astm). *ASTM D 1559: Ensayo Marshall*, page 5.
- [8] American association of state highway and transportation officials (aashto). *AASHTO T 104: Durabilidad al Sulfato de Sodio y Magnesio*.
- [9] American society for testing materials (astm). *ASTM D 516: Sales Solubles Totales*.
- [10] The determination of adhesion of bituminous binder to stone aggregate by means of the chemical immersion test (riedel & wieber). *Road Research Laboratory, England: Bituminous Materials in Road Construction*.
- [11] Hugh. A. Rogers J, Martin Wallace. *Pavimentos Asfálticos*. 1962.
- [12] American association of state highway and transportation officials (aashto). *AASHTO T 96: Abrasión de los Angeles*.
- [13] American association of state highway and transportation officials (aashto). *AASHTO T 176: Equivalente de Arena*.
- [14] American association of state highway and transportation officials (aashto). *AASHTO T 43: Peso Específico*.



- [15] Pavimentos. *Universidad Mayor de San Simón*, page 644, 2004.
- [16] American society for testing materials (astm). *ASTM D 977: Las Emulsiones Asfálticas Aniónicas*.
- [17] American society for testing materials (astm). *ASTM D 2397: Las Emulsiones Asfálticas Catiónicas*.
- [18] American society for testing materials (astm). *ASTM D 3628: Emulsiones Asfálticas*.
- [19] American society for testing materials (astm). *ASTM D 2027: Cutbacks de Curado Medio*.
- [20] American society for testing materials (astm). *ASTM D 2026: Cutbacks de Curado Lento*.
- [21] American society for testing materials (astm). *ASTM D 2028: Cutbacks de Curado Rápido*.
- [22] American association of state highway and transportation officials (aashto). *AASHTO T 49: Ensayo de Penetración*.
- [23] American society for testing materials (astm). *ASTM D 946: Penetración en Materiales Bituminosos*.
- [24] American society for testing materials (astm). *ASTM D 5: Ensayo de Penetración*.
- [25] American association of state highway and transportation officials (aashto). *AASHTO E 102: Ensayo de Viscosidad*.
- [26] American society for testing materials (astm). *ASTM D 445: Viscosidad cinemática*.
- [27] American society for testing materials (astm). *ASTM D 92: Ensayo Punto de Inflamación*.
- [28] American association of state highway and transportation officials (aashto). *AASHTO T 51: Ductilidad*.
- [29] American society for testing materials (astm). *ASTM D 113: Ensayo de Ductilidad*.
- [30] American association of state highway and transportation officials (aashto). *AASHTO T 44: Solubilidad*.
- [31] American society for testing materials (astm). *ASTM D 4: Solubilidad*.
- [32] American society for testing materials (astm). *ASTM D 70: Peso Específico*.
- [33] American society for testing materials (astm). *ASTM D 36: Ensayo de punto de reblandecimiento*.
- [34] American association of state highway and transportation officials (aashto). *AASHTO T 78: Destilación*.
- [35] American society for testing materials (astm). *ASTM D 402: Destilación*.
- [36] American association of state highway and transportation officials (aashto). *AASHTO T 50: Ensayo del Flotador*.



- [37] American society for testing materials (astm). *ASTM D 139: Ensayo del Flotador.*
- [38] American association of state highway and transportation officials (aashto). *AASHTO T 59: Sedimentación.*
- [39] American society for testing materials (astm). *ASTM D 244: Sedimentación.*
- [40] American association of state highway and transportation officials (aashto). *AASHTO T 59: Demulsibilidad, tamizado.*
- [41] American society for testing materials (astm). *ASTM D 244: Demulsibilidad, tamizado.*
- [42] American association of state highway and transportation officials (aashto). *AASHTO T 29: Mezcla con cemento.*
- [43] Jorge B. Cepeda Aldape. *Análisis del comportamiento de mezclas asfálticas a fisuración por fatiga mediante la aplicación de un nuevo ensayo dinámico a tracción directa.* PhD thesis, 2002.
- [44] Carcaño R. S. & Moreno E. I. Yam, J. L. C. *Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto.* 2003.
- [45] Ing. Sielene Minaya Gonzalez; M.I. Abel Ordóñez Huaman. *Manual de Laboratorio Ensayo para pavimentos.* 2001.
- [46] American association of state highway and transportation officials (aashto). *AASHTO T 225: Marshall.*
- [47] American association of state highway and transportation officials (aashto). *AASHTO T 27.*
- [48] American society for testing materials (astm). *ASTM D 1188.*
- [49] American society for testing materials (astm). *ASTM D 2726.*
- [50] American society for testing materials (astm). *ASTM D 2041.*
- [51] Carlos Rodolfo Marín Uribe, Guzmán Meléndez, and María Rosa. Modelación de una estructura de pavimento utilizando los módulos dinámicos obtenidos en laboratorio aplicando las metodologías marshall y superpave. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 6(11):53–63, 2007.
- [52] Daniel Cauas. Definición de las variables, enfoque y tipo de investigación.
- [53] Fernández y Baptista Herbández. *Metodología de la Investigación.* 1980.
- [54] J.M. Martínez Álvarez. Mapas geológicos: Explicación e interpretación. 1979.
- [55] Secretaria nacional de información.
- [56] María José. Dra García Eiler, Luciana Martina. Correa. Caracterización geotécnica de Áridos de la provincia de buenos aires como material de uso vial y digitalización de los resultados. 2010.
- [57] Instituto ecuatoriano de normalización (inen). *INEN 696: Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso.*



- [58] American society for testing materials (astm). *ASTM C 88: Durabilidad al Sulfato de Sodio y Magnesio.*
- [59] Instituto ecuatoriano de normalización (inen). *INEN 863: Durabilidad al Sulfato de Sodio y Magnesio.*
- [60] Instituto ecuatoriano de normalización (inen). *INEN 860: Abrasión Los Angeles.*
- [61] American society for testing materials (astm). *ASTM D 3744: Índice de Durabilidad.*
- [62] American association of state highway and transportation officials (aashto). *AASHTO T 210: Índice de Durabilidad.*
- [63] American society for testing materials (astm). *ASTM D 4791: Partículas Chatas y Alargadas.*
- [64] American society for testing materials (astm). *ASTM D 5821: Caras Fracturadas.*
- [65] American association of state highway and transportation officials (aashto). *AASHTO T 961: Caras Fracturadas.*
- [66] American society for testing materials (astm). *ASTM C 127: Porcentaje de Absorción y Peso Específico Neto (agregado grueso).*
- [67] American association of state highway and transportation officials (aashto). *AASHTO T 85: Porcentaje de Absorción y Peso Específico Neto (agregado grueso).*
- [68] American society for testing materials (astm). *ASTM D 1664: Adherencia.*
- [69] American association of state highway and transportation officials (aashto). *AASHTO T 182: Adherencia.*
- [70] American society for testing materials (astm). *ASTM D 2419: Equivalente de Arena.*
- [71] American society for testing materials (astm). *ASTM C 1252: Angularidad de agregado fino.*
- [72] American association of state highway and transportation officials (aashto). *AASHTO T 304: Angularidad de agregado fino.*
- [73] American society for testing materials (astm). *ASTM D 4318: Índice de Plasticidad (malla N°40 y malla N°200) .*
- [74] American society for testing materials (astm). *ASTM C 128: Porcentaje de Absorción y Peso Específico Neto (agregado fino).*
- [75] American association of state highway and transportation officials (aashto). *AASHTO T 84: Porcentaje de Absorción y Peso Específico Neto (agregado fino).*
- [76] Miguel J. Sevilla. *Soluciones progresivas en el método de Mínimos Cuadrados.* 1989.
- [77] Sergio Cruces Álvarez. *El método de mínimos cuadrados.* Universidad de Sevilla, page 39, 1985.
- [78] UNAM. *Propiedades de matrices y determinantes,* 2005.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

[79] José Luis Sanz Contreras & C. Panadero García. *Los áridos en el mundo actual y su relación con la geología y la ordenación territorial*. 1890.



APÉNDICE A

CODIFICACIÓN DEL PROGRAMA REALIZADO EN MATLAB

A.1 Codificación del programa

A.1.1 Archivo MAC.m

Descripción: A continuación se presenta el código del archivo MAC.m en la Figura A.1, el cual ayuda a seleccionar el tipo de mezcla asfáltica en caliente tipo (2) o (3).



```
function varargout = MAC(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn',  @MAC_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',   @MAC_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',   [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end
if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
function MAC_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);
function varargout = MAC_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;
a=imread('logos.jpg');
image(a);
axis off;
function CONTINUAR_Callback(hObject, eventdata, handles)
global MAC_op
MAC_op=get(handles.MAC_3, 'Value') +2;
close
Seleccion_aridos
function MAC_3_Callback(hObject, eventdata, handles)
function axes2_ButtonDownFcn(hObject, eventdata, handles)
```

Figura A.1: Codificación del archivo MAC.m

A.1.2 Archivo Seleccion-aridos.m

Descripción: A continuación se presenta el código del archivo Seleccion-aridos.m en las figuras A.2, A.3 y A.4, este archivo lo que permite es seleccionar los áridos de la base de datos creada para poder realizar la mezcla asfáltica en caliente.



```
function varargout = Seleccion_aridos(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Seleccion_aridos_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @Seleccion_aridos_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [], ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end
if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
function Seleccion_aridos_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);
global arido3_4 arido3_8 arido3_16 arena MAC_op granulometrias_diseno asf Li Ls txt1 txt2 txt3 txt4 nombre_diseno
hoja_husos=xlsread('HUSOS-GRANULOMETRICOS','husos');
if MAC_op==2
    [arido3_4,txt1]=xlsread('cantera.xlsx','3-4');
    set(handles.popupmenu1,'String',txt1(1,2:end));
    [hoja_gran_disenos,nombre_diseno]=xlsread('diseno.xlsm','3-4');
    granulometrias_diseno=hoja_gran_disenos(1:end-1,:);
    asf=hoja_gran_disenos(end,:);
    Li=hoja_husos(:,1);
    Ls=hoja_husos(:,2);
else
```

Figura A.2: Codificación del archivo Seleccion-aridos.m

```
else
    set(handles.popupmenu1,'Visible','off')
    set(handles.text2,'Visible','off')
    [hoja_gran_disenos,nombre_diseno]=xlsread('diseno.xlsm','3-8');
    granulometrias_diseno=hoja_gran_disenos(1:end-1,:);
    asf=hoja_gran_disenos(end,:);
    Li=hoja_husos(:,3);
    Ls=hoja_husos(:,4);
end
[arido3_8,txt2]=xlsread('cantera.xlsx','3-8');
[arido3_16,txt3]=xlsread('cantera.xlsx','3-16');
[arena,txt4]=xlsread('cantera.xlsx','arena');
set(handles.popupmenu2,'String',txt2(1,2:end));
set(handles.popupmenu3,'String',txt3(1,2:end));
set(handles.popupmenu4,'String',txt4(1,2:end));
function varargout = Seleccion_aridos_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;
function popupmenu1_Callback(hObject, eventdata, handles)
function popupmenu1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function popupmenu2_Callback(hObject, eventdata, handles)
function popupmenu2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

Figura A.3: Codificación del archivo Seleccion-aridos.m



```
function popupmenu3_Callback(hObject, eventdata, handles)
function popupmenu3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function popupmenu4_Callback(hObject, eventdata, handles)
function popupmenu4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function continuar_Callback(hObject, eventdata, handles)
global arido3_4 arido3_8 arido3_16 arena aridos MAC_op txt1 txt2 txt3 txt4 nombres_aridos
nombres_aridos={};
aridos=[];
i=0;
if MAC_op==2
aridos(:,1)=arido3_4(:,get(handles.popupmenu1,'Value'));
nombres_aridos{1}=txt1(1,1+get(handles.popupmenu1,'Value'));
i=1;
end
aridos(:,i+1)=arido3_8(:,get(handles.popupmenu2,'Value'));
nombres_aridos{i+1}=txt2(1,1+get(handles.popupmenu2,'Value'));
aridos(:,i+2)=arido3_16(:,get(handles.popupmenu3,'Value'));
nombres_aridos{i+2}=txt3(1,1+get(handles.popupmenu3,'Value'));
aridos(:,i+3)=arena(:,get(handles.popupmenu4,'Value'));
nombres_aridos{i+3}=txt4(1,1+get(handles.popupmenu4,'Value'));
close
ajuste
```

Figura A.4: Codificación del archivo Seleccion-aridos.m

A.1.3 Archivo ajuste.m

Descripción: El código del archivo ajuste.m en las figuras A.5, A.3 y A.4, este archivo permite realizar el cálculo de los porcentajes de los áridos y del asfalto óptimo, mediante mínimos cuadrados.



```
function varargout = ajuste(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn',  @ajuste_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @ajuste_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',   [], ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end
if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
function ajuste_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);
global MAC_op nombres_aridos
if MAC_op==3
    set(handles.a1, 'Visible', 'off')
    set(handles.text2, 'Visible', 'off')
    set(handles.fa1, 'Visible', 'off')
    set(handles.na2, 'String', nombres_aridos{1})
    set(handles.na3, 'String', nombres_aridos{2})
    set(handles.na4, 'String', nombres_aridos{3})
else
    set(handles.na1, 'String', nombres_aridos{1})
    set(handles.na2, 'String', nombres_aridos{2})
    set(handles.na3, 'String', nombres_aridos{3})
    set(handles.na4, 'String', nombres_aridos{4})
end
```

Figura A.5: Codificación del archivo ajuste.m



```
function varargout = ajuste_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;
function a1_Callback(hObject, eventdata, handles)
function a1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function a2_Callback(hObject, eventdata, handles)
function a2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function a3_Callback(hObject, eventdata, handles)
function a3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function a4_Callback(hObject, eventdata, handles)
function a4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function calcular_Callback(hObject, eventdata, handles)
global Ls Li aridos gran_comb1 MAC_op
Gm=(Ls+Li)/2;
B=Gm;
i=0;
p=[];
q=[];
if MAC_op==2
```

Figura A.6: Codificación del archivo ajuste.m



```
i=1;
x=zeros(4,1);
if get(handles.fa1,'Value')==1
    x(i)=str2double(get(handles.a1,'String'))/100;
    B=B-aridos(:,i)*x(i);
    q=[q,i];
else
    p=[p,i];
end
else
    x=zeros(3,1);
end
if get(handles.fa2,'Value')==1
    x(i+1)=str2double(get(handles.a2,'String'))/100;
    B=B-aridos(:,i+1)*x(i+1);
    q=[q,i+1];
else
    p=[p,i+1];
end
if get(handles.fa3,'Value')==1
    x(i+2)=str2double(get(handles.a3,'String'))/100;
    B=B-aridos(:,i+2)*x(i+2);
    q=[q,i+2];
else
    p=[p,i+2];
end
if get(handles.fa4,'Value')==1
    x(i+3)=str2double(get(handles.a4,'String'))/100;
    B=B-aridos(:,i+3)*x(i+3);
    q=[q,i+3];
else
```

Figura A.7: Codificación del archivo ajuste.m



```
    p=[p,i+3];
end
x(p)=(aridos(:,p)*aridos(:,p))\ (aridos(:,p)*B);
x(p)=x(p)/sum(x(p))*(1-sum(x(q)));

for i=1:length(x)
    if x(i)<0
        msgbox('Considere eliminar un arido o fijar un valor minimo')
    end
end
i=0;
if MAC_op==2
    i=1;
    set(handles.a1,'String',num2str(round(x(i)*100)))
end
set(handles.a2,'String',num2str(round(x(i+1)*100)))
set(handles.a3,'String',num2str(round(x(i+2)*100)))
set(handles.a4,'String',num2str(round(x(i+3)*100)))
set(handles.suma,'String',num2str(round(sum(x)*100)))
gran_comb1=aridos*x;
function Graficar_Callback(hObject, eventdata, handles)
grid on
grid minor
hold on
ylim([0 100])
set(gca, 'XTickLabel',{'1"', '3/4"', '1/2"', '3/8"', '#4', '#8', '#30', '#50', '#200', 'Fondo'})
xlabel('TAMIZ')
ylabel('% QUE PASA');
global Ls Li gran_comb1 MAC_op aridos
hold on
plot(Ls,'--','color','k')
plot(Li,'--','color','k')
```

Figura A.8: Codificación del archivo ajuste.m



```
i=0;
if MAC_op==2
    i=1;
    xx(i)=str2num(get(handles.a1,'String'))/100;
end
xx(i+1)=str2num(get(handles.a2,'String'))/100;
xx(i+2)=str2num(get(handles.a3,'String'))/100;
xx(i+3)=str2num(get(handles.a4,'String'))/100;
gran_comb1=aridos*xx';
plot(gran_comb1,'-', 'color', 'b', 'linewidth', 4, 'color', rand(1,3));
function encontrar_asfalto Callback(hObject, eventdata, handles)
global granulometrias_diseno gran_comb1 asf nombre_diseno nombre_diseno_asfalto
Error=zeros(size(granulometrias_diseno,2),1);
for i=1:size(granulometrias_diseno,2)
    Error(i)=norm(granulometrias_diseno(i)-gran_comb1,2);
end
[ii,jj]=find(Error==min(Error));
set(handles.asfalto,'String',num2str(asf(ii)))
nombre_diseno_asfalto=nombre_diseno(1,1+ii);
function fijar_Callback(hObject, eventdata, handles)
function fa1_Callback(hObject, eventdata, handles)
if get(hObject,'Value')==1
    set(handles.sa1,'Visible','On')
    set(handles.a1,'Visible','Off')
    set(handles.sa1,'String',get(handles.a1,'String'))
else
    set(handles.sa1,'Visible','Off')
    set(handles.a1,'Visible','On')
end
function fa2_Callback(hObject, eventdata, handles)
if get(hObject,'Value')==1
```

Figura A.9: Codificación del archivo ajuste.m



```
        set(handles.sa2,'Visible','On')
        set(handles.a2,'Visible','Off')
        set(handles.sa2,'String',get(handles.a2,'String'))
    else
        set(handles.sa2,'Visible','Off')
        set(handles.a2,'Visible','On')
    end
end
function fa3_Callback(hObject, eventdata, handles)
if get(hObject,'Value')==1
    set(handles.sa3,'Visible','On')
    set(handles.a3,'Visible','Off')
    set(handles.sa3,'String',get(handles.a3,'String'))
else
    set(handles.sa3,'Visible','Off')
    set(handles.a3,'Visible','On')
end
function fa4_Callback(hObject, eventdata, handles)
if get(hObject,'Value')==1
    set(handles.sa4,'Visible','On')
    set(handles.a4,'Visible','Off')
    set(handles.sa4,'String',get(handles.a4,'String'))
else
    set(handles.sa4,'Visible','Off')
    set(handles.a4,'Visible','On')
end
function borrar_Callback(hObject, eventdata, handles)
cla
function volver_Callback(hObject, eventdata, handles)
close
MAC
```

Figura A.10: Codificación del archivo ajuste.m



```
function suma_Callback(hObject, eventdata, handles)
function suma_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function imprimir_Callback(hObject, eventdata, handles)
global nombres_aridos nombre_diseno_asfalto MAC_op
excelObject = actxserver('Excel.Application');
currentFolder = pwd;
resultados=excelObject.Workbooks.Open(strcat(currentFolder,'\','Resultados'));
set(excelObject,'DisplayAlerts',0);
n=excelObject.ActiveWorkbook.Worksheets.Add;
n.Name='Asfalto';
excelObject.ActiveWorkbook.Worksheets.Item(2).Delete
resultados.Save
excelObject.Workbooks.Open(strcat(currentFolder,'\','CANTERAS','.xlsm'));
if MAC_op==2
tipo={'3-4','3-8','3-16','arena'};
else
    tipo={'3-8','3-16','arena'};
end
for n=1:length(nombres_aridos)
    excelObject.Run('cop',(char(strcat(tipo{n},' (' ,nombres_aridos{n},')'))));
end
excelObject.Workbooks.Open(strcat(currentFolder,'\','diseno'));
excelObject.Run('cop_asf',char(nombre_diseno_asfalto));
resultados.Save
Quit(excelObject)
delete(excelObject)
msgbox('Los resultados se han exportado exitosamente al archivo Resultados.xlsx')
```

Figura A.11: Codificación del archivo ajuste.m



APÉNDICE B

ANÁLISIS DE LOS ÁRIDOS EN LABORATORIO

B.1 Material triturado 3/4”

B.1.1 Cantera de Uzhupud

Descripción: A continuación en la figura B.1 se presentan los resultados de los ensayos realizados en laboratorio para el material triturado de 3/4” de la cantera de Uzhupud.



1. ANALISIS GRANULOMETRICO - NORMA INEN 696

TAMIZ No.	P. RETENIDOS PARCIALES [gr.]	P. RETENIDOS ACUMULADOS [gr.]	% RET. ACUMULADO S [gr.]	% QUE PASA [gr.]
1"	31,00	31,00	0,62	99,38
3/4"	44,00	75,00	1,50	98,50
1/2"	3790,80	3865,80	77,32	22,68
3/8"	789,00	4654,80	93,10	6,90
No.4	281,70	4936,50	98,73	1,27
No.8	4,60	4941,10	98,82	1,18
No.30	1,90	4943,00	98,86	1,14
No.50	1,80	4944,80	98,90	1,10
No.100	5,00	4949,80	99,00	1,00
No.200	7,70	4957,50	99,15	0,85
Fondo	42,50	5000,00	100,00	0,00
TOTAL	5000,00			

2. ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION - NORMAS ASTM C127/ AASHTO T85

A. Peso del material sumergido [gr.]	1000,00
B. Peso del picnómetro + Agua + Material [gr.]	5363,00
C. Peso del picnómetro +Agua [gr.]	4720,00
D. Peso del material seco [gr.]	990,70

RESULTADOS

Peso Específico Neto (Bulk)	$D/(C+A-B)=$	2,8
Peso Esp. Saturado Superficialm	$A/(C+A-B)=$	2,801
Peso Específico Aparente	$D/(D+C-B)=$	2,849
Porcentaje de Absorción	$A-D/D*100=$	1,000

3. ESPECIFICACIONES AGREGADOS GRUESOS

Ensayo	Requerimientos	Análisis	Observación	Norma
Abrasión Los Angeles	35% máx	13%	Si cumple	ASTM C131/ AASHTO T96/ INEN 860
Partículas Chatas y Alargadas	10% máx	9%	Si cumple	ASTM D4791
Caras Fracturadas	100% una cara y 80% dos caras fracturadas	100-80	Si cumple	ASTM D5821
Porcentaje de Absorción	3,5% máx	1%	Si cumple	ASTM C127/ AASHTO T85
Adherencia	+ 95	> 95%	Si cumple	ASTM D1664/ AASHTO 182
Peso Específico Neto	2,5 gr/cm3 MIN	2,8	Si cumple	ASTM C127/ AASHTO T85

Figura B.1: Resultados de los ensayos realizados con el material triturado de 3/4”

B.1.2 Cantera de Vipesa

Descripción: Se presenta a continuación en la figura B.2 los resultados obtenidos en laboratorio del análisis del material triturado de 3/4” de la cantera de Vipesa.



1. ANALISIS GRANULOMETRICO - NORMA INEN 696

TAMIZ No.	P. RETENIDOS PARCIALES [gr.]	P. RETENIDOS ACUMULADOS [gr.]	% RET. ACUMULADOS [gr.]	% QUE PASA [gr.]
1"	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	39,00	39,00	0,78	99,22
1/2"	2154,00	2193,00	43,86	56,14
3/8"	1343,00	3536,00	70,72	29,28
No.4	1404,00	4940,00	98,80	1,20
No.8	41,00	4981,00	99,62	0,38
No.30	2,00	4983,00	99,66	0,34
No.50	1,30	4984,30	99,69	0,31
No.100	0,80	4985,10	99,70	0,30
No.200	2,20	4987,30	99,75	0,25
Fondo	12,70	5000,00	100,00	0,00
TOTAL	5000,00			

2. ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION - NORMAS ASTM C127/ AASHTO T85

A. Peso del material sumergido [gr.]	1000,00
B. Peso del picnómetro + Agua + Material [gr.]	5325,00
C. Peso del picnómetro +Agua [gr.]	4720,00
D. Peso del material seco [gr.]	981,60

RESULTADOS

Peso Específico Neto (Bulk)	$D/(C+A-B)=$	2,5
Peso Esp. Saturado Superficialm	$A/(C+A-B)=$	2,532
Peso Específico Aparente	$D/(D+C-B)=$	2,606
Porcentaje de Absorción	$A-D/D*100=$	0,019

3. ESPECIFICACIONES AGREGADOS GRUESOS

Ensayo	Requerimientos	Análisis	Observación	Norma
Abrasión Los Angeles	35% máx	18%	Si cumple	ASTM C131/ AASHTO T96/ INEN 860
Partículas Chatas y Alargada:	10% máx	2%	Si cumple	ASTM D4791
Caras Fracturadas	100% una cara y 80% dos caras fracturadas	100-80	Si cumple	ASTM D5821
Porcentaje de Absorción	3,5% máx	2%	Si cumple	ASTM C127/ AASHTO T85
Adherencia	+ 95	> 95%	Si cumple	ASTM D1664/ AASHTO 182
Peso Específico Neto	2,5 gr/cm3 MIN	2,5	Si cumple	ASTM C127/ AASHTO T85

Figura B.2: Resultados de los ensayos realizados con el material triturado de 3/4"

B.1.3 Cantera de B. Vintimilla

Descripción: A continuación en la figura B.3 se da a conocer los resultados que se obtuvieron en laboratorio para el material triturado de 3/4" de la cantera de B. Vintimilla.



1. ANALISIS GRANULOMETRICO - NORMA INEN 696

TAMIZ No.	P. RETENIDOS PARCIALES [gr.]	P. RETENIDOS ACUMULADOS [gr.]	% RET. ACUMULADOS [gr.]	% QUE PASA [gr.]
1"	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	31,00	31,00	0,62	99,38
1/2"	2876,00	2907,00	58,16	41,84
3/8"	1496,00	4403,00	88,10	11,90
No.4	561,00	4964,00	99,32	0,68
No.8	1,00	4965,00	99,34	0,66
No.30	2,00	4967,00	99,38	0,62
No.50	2,00	4969,00	99,42	0,58
No.100	3,00	4972,00	99,48	0,52
No.200	7,00	4979,00	99,62	0,38
Fondo	19,00	4998,00	100,00	0,00
TOTAL	4998,00			

2. ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION - NORMAS ASTM C127/ AASHTO T85

A. Peso del material sumergido [gr.]	1372,00
B. Peso del picnómetro + Agua + Material [gr.]	5570,00
C. Peso del picnómetro + Agua [gr.]	4700,00
D. Peso del material seco [gr.]	1364,00

RESULTADOS

Peso Específico Neto (Bulk)	$D/(C+A-B)=$	2,7
Peso Esp. Saturado Superficialm	$A/(C+A-B)=$	2,733
Peso Específico Aparente	$D/(D+C-B)=$	2,761
Porcentaje de Absorción	$A-D/D*100=$	0,006

3. ESPECIFICACIONES AGREGADOS GRUESOS

Ensayo	Requerimientos	Análisis	Observación	Norma
Abrasión Los Angeles	35% máx	14%	Si cumple	ASTM C131/ AASHTO T96/ INEN 860
Partículas Chatas y Alargadas	10% máx	4%	Si cumple	ASTM D4791
Caras Fracturadas	100% una cara y 80% dos caras fracturadas	100-80	Si cumple	ASTM D5821
Porcentaje de Absorción	3,5% máx	1%	Si cumple	ASTM C127/ AASHTO T85
Adherencia	+ 95	> 95%	Si cumple	ASTM D1664/ AASHTO 182
Peso Específico Neto	2,5 gr/cm3 MIN	2,7	Si cumple	ASTM C127/ AASHTO T85

Figura B.3: Resultados de los ensayos realizados con el material triturado de 3/4"

B.2 Material triturado 3/8"

B.2.1 Cantera de B. Vintimilla

Descripción: A continuación en la figura B.4 se presentan los resultados de los ensayos realizados en laboratorio para el material triturado de 3/8" de la cantera de B. Vintimilla.



1. ANALISIS GRANULOMETRICO - NORMA INEN 696

TAMIZ No.	P. RETENIDOS PARCIALES [gr.]	P. RETENIDOS ACUMULADOS [gr.]	% RET. ACUMULADOS [gr.]	% QUE PASA [gr.]
1"	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	4,00	4,00	0,27	99,73
No.4	889,00	893,00	59,53	40,47
No.8	480,00	1373,00	91,53	8,47
No.30	59,00	1432,00	95,47	4,53
No.50	6,00	1438,00	95,87	4,13
No.100	5,00	1443,00	96,20	3,80
No.200	4,00	1447,00	96,47	3,53
Fondo	53,00	1500,00	100,00	0,00
TOTAL	1500,00			

2. ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION - NORMAS ASTM C127/ AASHTO T85

A. Peso del material sumergido [gr.]	400,00
B. Peso del picnómetro + Agua + Material [gr.]	4951,00
C. Peso del picnómetro +Agua [gr.]	4700,00
D. Peso del material seco [gr.]	393,00

RESULTADOS

Peso Específico Neto (Bulk)	$D/(C+A-B)=$	2,6
Peso Esp. Saturado Superficialm	$A/(C+A-B)=$	2,685
Peso Específico Aparente	$D/(D+C-B)=$	2,768
Porcentaje de Absorción	$A-D/D*100=$	0,018

3. ESPECIFICACIONES AGREGADOS GRUESOS

Ensayo	Requerimientos	Análisis	Observación	Norma
Abrasión Los Angeles	35% máx	31%	Si cumple	ASTM C131/ AASHTO T96/ INEN 860
Partículas Chatas y Alargadas	10% máx	8%	Si cumple	ASTM D4791
Caras Fracturadas	100% una cara y 80% dos caras fracturadas	100-80	Si cumple	ASTM D5821
Porcentaje de Absorción	3,5% máx	2%	Si cumple	ASTM C127/ AASHTO T85
Adherencia	+ 95	> 95%	Si cumple	ASTM D1664/ AASHTO 182
Peso Específico Neto	2,5 gr/cm3 MIN	2,6	Si cumple	ASTM C127/ AASHTO T85

Figura B.4: Resultados de los ensayos realizados con el material triturado de 3/8”

B.2.2 Canteras de Santa Isabel

Descripción: Se presenta a continuación en la figura B.5 los resultados obtenidos en laboratorio del análisis del material triturado de 3/8” de la cantera de Santa Isabel.



1. ANALISIS GRANULOMETRICO - NORMA INEN 696

TAMIZ No.	P. RETENIDOS PARCIALES [gr.]	P. RETENIDOS ACUMULADOS [gr.]	% RET. ACUMULADOS [gr.]	% QUE PASA [gr.]
1"	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	17,00	17,00	1,21	98,79
3/8"	5,00	22,00	1,57	98,43
No.4	1171,00	1193,00	85,21	14,79
No.8	171,00	1364,00	97,43	2,57
No.30	12,00	1376,00	98,29	1,71
No.50	1,00	1377,00	98,36	1,64
No.100	1,00	1378,00	98,43	1,57
No.200	3,00	1381,00	98,64	1,36
Fondo	19,00	1400,00	100,00	0,00
TOTAL	1400,00			

2. ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION - NORMAS ASTM C127/ AASHTO T85

A. Peso del material sumergido [gr.]	600,00
B. Peso del picnómetro + Agua + Material [gr.]	3819,00
C. Peso del picnómetro +Agua [gr.]	3441,00
D. Peso del material seco [gr.]	588,00

RESULTADOS

Peso Específico Neto (Bulk)	$D/(C+A-B)=$	2,6
Peso Esp. Saturado Superficialm	$A/(C+A-B)=$	2,703
Peso Específico Aparente	$D/(D+C-B)=$	2,800
Porcentaje de Absorción	$A-D/D*100=$	0,020

3. ESPECIFICACIONES AGREGADOS GRUESOS

Ensayo	Requerimientos	Análisis	Observación	Norma
Abrasión Los Angeles	35% máx	23%	Si cumple	ASTM C131/ AASHTO T96/ INEN 860
Partículas Chatas y Alargadas	10% máx	9%	Si cumple	ASTM D4791
Caras Fracturadas	100% una cara y 80% dos caras fracturadas	100-80	Si cumple	ASTM D5821
Porcentaje de Absorción	3,5% máx	2%	Si cumple	ASTM C127/ AASHTO T85
Adherencia	+ 95	> 95%	Si cumple	ASTM D1664/ AASHTO 182
Peso Especifico Neto	2,5 gr/cm ³ MIN	2,6	Si cumple	ASTM C127/ AASHTO T85

Figura B.5: Resultados de los ensayos realizados con el material triturado de 3/8"

B.2.3 Cantera de Vipesa

Descripción: A continuación en la figura B.6 se da a conocer los resultados que se obtuvieron en laboratorio para el material triturado de 3/8" de la cantera de Vipesa.



1. ANALISIS GRANULOMETRICO - NORMA INEN 696

TAMIZ No.	P. RETENIDOS PARCIALES [gr.]	P. RETENIDOS ACUMULADOS [gr.]	% RET. ACUMULADOS [gr.]	% QUE PASA [gr.]
1"	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	0,00	0,00	0,00	100,00
No.4	1447,70	1447,70	96,51	3,49
No.8	29,10	1476,80	98,45	1,55
No.30	2,30	1479,10	98,61	1,39
No.50	0,30	1479,40	98,63	1,37
No.100	1,70	1481,10	98,74	1,26
No.200	2,20	1483,30	98,89	1,11
Fondo	16,70	1500,00	100,00	0,00
TOTAL	1500,00			

2. ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION - NORMAS ASTM C127/ AASHTO T85

A. Peso del material sumergido [gr.]	1000,00
B. Peso del picnómetro + Agua + Material [gr.]	5363,00
C. Peso del picnómetro +Agua [gr.]	4720,00
D. Peso del material seco [gr.]	990,70

RESULTADOS

Peso Especifico Neto (Bulk)	$D/(C+A-B)=$	2,8
Peso Esp. Saturado Superficialm	$A/(C+A-B)=$	2,801
Peso Especifico Aparente	$D/(D+C-B)=$	2,849
Porcentaje de Absorción	$A-D/D*100=$	0,009

3. ESPECIFICACIONES AGREGADOS GRUESOS

Ensayo	Requerimientos	Análisis	Observación	Norma
Abrasión Los Angeles	35% máx	23%	Si cumple	ASTM C131/ AASHTO T96/ INEN 860
Partículas Chatas y Alargada	10% máx	9%	Si cumple	ASTM D4791
Caras Fracturadas	100% una cara y 80% dos caras fracturadas	100-80	Si cumple	ASTM D5821
Porcentaje de Absorción	3,5% máx	1%	Si cumple	ASTM C127/ AASHTO T85
Adherencia	+ 95	> 95	Si cumple	ASTM D1664/ AASHTO 182
Peso Especifico Neto	2,5 gr/cm3 MIN	2,8	Si cumple	ASTM C127/ AASHTO T85

Figura B.6: Resultados de los ensayos realizados con el material triturado de 3/8”

B.3 Material triturado 3/16”

B.3.1 Cantera de Huascachaca

Descripción: A continuación en la figura B.7 se presentan los resultados de los ensayos realizados en laboratorio para el material triturado de 3/16” de la cantera de Huascachaca.



1. ANALISIS GRANULOMETRICO - NORMA INEN 696

TAMIZ No.	P. RETENIDOS PARCIALES [gr.]	P. RETENIDOS ACUMULADOS [gr.]	% RET. ACUMULADOS [gr.]	% QUE PASA [gr.]
1"	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	0,00	0,00	0,00	100,00
No.4	76,00	76,00	5,07	94,93
No.8	409,00	485,00	32,33	67,67
No.30	489,00	974,00	64,93	35,07
No.50	149,00	1123,00	74,87	25,13
No.100	115,00	1238,00	82,53	17,47
No.200	55,00	1293,00	86,20	13,80
Fondo	207,00	1500,00	100,00	0,00
TOTAL	1500,00			

2. ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION - NORMAS ASTM C127/ AASHTO T85

A. Peso del material sumergido [gr.]	500,00
B. Peso del picnómetro + Agua + Material [gr.]	5011,00
C. Peso del picnómetro +Agua [gr.]	4700,00
D. Peso del material seco [gr.]	486,00

RESULTADOS

Peso Especifico Neto (Bulk)	$D/(C+A-B)=$	2,6
Peso Esp. Saturado Superficialmente Se	$A/(C+A-B)=$	2,646
Peso Especifico Aparente	$D/(D+C-B)=$	2,777
Porcentaje de Absorción	$A-D/D*100=$	0,029

3. ESPECIFICACIONES AGREGADOS FINOS

Ensayo	Requerimientos	Análisis	Observación	Norma
Índice de Plasticidad (Malla N°40)	NP	NP	Si cumple	ASTM D4318
Índice de Plasticidad (Malla N°200)	4% máx	0,6%	Si cumple	ASTM D4318
Porcentaje de Absorción	4% máx	2,9%	Si cumple	ASTM C128/ AASHTO T84
Peso Especifico Neto	2,5 gr/cm3 MIN	2,6	Si cumple	ASTM C128/ AASHTO T84

Figura B.7: Resultados de los ensayos realizados con el material triturado de 3/16"

B.3.2 Cantera de San Vicente

Descripción: Se presenta a continuación en la figura B.8 los resultados obtenidos en laboratorio del análisis del material triturado de 3/16" de la cantera de San Vicente.



1. ANALISIS GRANULOMETRICO - NORMA INEN 696

TAMIZ No.	P. RETENIDOS PARCIALES [gr.]	P. RETENIDOS ACUMULADOS [gr.]	% RET. ACUMULADOS [gr.]	% QUE PASA [gr.]
1"	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	1,00	1,00	0,07	99,93
No.4	155,00	156,00	10,40	89,60
No.8	392,00	548,00	36,53	63,47
No.30	455,00	1003,00	66,87	33,13
No.50	138,00	1141,00	76,07	23,93
No.100	101,00	1242,00	82,80	17,20
No.200	48,00	1290,00	86,00	14,00
Fondo	210,00	1500,00	100,00	0,00
TOTAL	1500,00			

2. ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION - NORMAS ASTM C127/ AASHTO T85

A. Peso del material sumergido [gr.]	450,00
B. Peso del picnómetro + Agua + Material [gr.]	4989,00
C. Peso del picnómetro +Agua [gr.]	4700,00
D. Peso del material seco [gr.]	439,00

RESULTADOS

Peso Especifico Neto (Bulk)	$D/(C+A-B)=$	2,7
Peso Esp. Saturado Superficialmente Sec:	$A/(C+A-B)=$	2,795
Peso Especifico Aparente	$D/(D+C-B)=$	2,927
Porcentaje de Absorción	$A-D/D*100=$	0,025

3. ESPECIFICACIONES AGREGADOS FINOS

Ensayo	Requerimientos	Análisis	Observación	Norma
Índice de Plasticidad (Malla N°40)	NP	NP	Si cumple	ASTM D4318
Índice de Plasticidad (Malla N°200)	4% máx	0,5%	Si cumple	ASTM D4318
Porcentaje de Absorción	4% máx	2,5%	Si cumple	ASTM C128/ AASHTO T84
Peso Especifico Neto	2,5 gr/cm3 MIN	2,7	Si cumple	ASTM C128/ AASHTO T84

Figura B.8: Resultados de los ensayos realizados con el material triturado de 3/16"

B.3.3 Cantera de Uzhupud

Descripción: A continuación en la figura B.9 se da a conocer los resultados que se obtuvieron en laboratorio para el material triturado de 3/16" de la cantera de Uzhupud.



1. ANALISIS GRANULOMETRICO - NORMA INEN 696

TAMIZ No.	P. RETENIDOS PARCIALES [gr.]	P. RETENIDOS ACUMULADOS [gr.]	% RET. ACUMULADOS [gr.]	% QUE PASA [gr.]
1"	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	0,00	0,00	0,00	100,00
No.4	105,50	105,50	7,03	92,97
No.8	400,50	506,00	33,73	66,27
No.30	451,50	957,50	63,83	36,17
No.50	128,50	1086,00	72,40	27,60
No.100	97,20	1183,20	78,88	21,12
No.200	49,90	1233,10	82,21	17,79
Fondo	266,90	1500,00	100,00	0,00
TOTAL	1500,00			

2. ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION - NORMAS ASTM C127/ AASHTO T85

A. Peso del material sumergido [gr.]	440,00
B. Peso del picnómetro + Agua + Material [gr.]	4979,00
C. Peso del picnómetro +Agua [gr.]	4705,00
D. Peso del material seco [gr.]	429,40

RESULTADOS

Peso Especifico Neto (Bulk)	$D/(C+A-B)=$	2,6
Peso Esp. Saturado Superficialmente Se	$A/(C+A-B)=$	2,651
Peso Especifico Aparente	$D/(D+C-B)=$	2,763
Porcentaje de Absorción	$A-D/D*100=$	0,025

3. ESPECIFICACIONES AGREGADOS FINOS

Ensayo	Requerimientos	Análisis	Observación	Norma
Índice de Plasticidad (Malla N°40)	NP	NP	Si cumple	ASTM D4318
Índice de Plasticidad (Malla N°200)	4% máx	1,3%	Si cumple	ASTM D4318
Porcentaje de Absorción	4% máx	2,5%	Si cumple	ASTM C128/ AASHTO T84
Peso Especifico Neto	2,5 gr/cm ³ MIN	2,6	Si cumple	ASTM C128/ AASHTO T84

Figura B.9: Resultados de los ensayos realizados con el material triturado de 3/16"

B.4 Arena de río

B.4.1 Cantera de Huascachaca

Descripción: A continuación en la figura B.10 se presentan los resultados de los ensayos realizados en laboratorio para la arena de río de la cantera de Huascachaca.



1. ANALISIS GRANULOMETRICO - NORMA INEN 696

TAMIZ No.	P. RETENIDOS PARCIALES [gr.]	P. RETENIDOS ACUMULADOS [gr.]	% RET. ACUMULADOS [gr.]	% QUE PASA [gr.]
1"	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	0,00	0,00	0,00	100,00
No.4	64,00	64,00	6,40	93,60
No.8	114,00	178,00	17,80	82,20
No.30	330,00	508,00	50,80	49,20
No.50	192,00	700,00	70,00	30,00
No.100	160,00	860,00	86,00	14,00
No.200	45,00	905,00	90,50	9,50
Fondo	95,00	1000,00	100,00	0,00
TOTAL	1000,00			

2. ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION - NORMAS ASTM C127/ AASHTO T85

A. Peso del material sumergido [gr.]	400,00
B. Peso del picnómetro + Agua + Material [gr.]	4937,00
C. Peso del picnómetro + Agua [gr.]	4700,00
D. Peso del material seco [gr.]	392,00

RESULTADOS

Peso Específico Neto (Bulk)	$D/(C+A-B)=$	2,4
Peso Esp. Saturado Superficialmente Se	$A/(C+A-B)=$	2,454
Peso Específico Aparente	$D/(D+C-B)=$	2,529
Porcentaje de Absorción	$A-D/D*100=$	0,020

3. ESPECIFICACIONES AGREGADOS FINOS

Ensayo	Requerimientos	Análisis	Observación	Norma
Índice de Plasticidad (Malla N°40)	NP	NP	Si cumple	ASTM D4318
Índice de Plasticidad (Malla N°200)	4% máx	1,0%	Si cumple	ASTM D4318
Porcentaje de Absorción	4% máx	2,0%	Si cumple	ASTM C128/ AASHTO T84
Peso Específico Neto	2,5 gr/cm3 MIN	2,4	Si cumple	ASTM C128/ AASHTO T84

Figura B.10: Resultados de los ensayos realizados con la arena de río