



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA INGENIERÍA CIVIL

TEMA:

**“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA
MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE
ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO
NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”**

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

AUTORES:

KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA
HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR

TUTOR:

ING. DANIEL CAMPOVERDE CAMPOVERDE, MSc.

LA LIBERTAD, ECUADOR

2024

UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TEMA:

**“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA
MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE
MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM
ASPHALT TESTER”**

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

AUTOR:

**KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA
HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR**


TUTOR:


ING. DANIEL CAMPOVERDE CAMPOVERDE, MSc.

LA LIBERTAD – ECUADOR

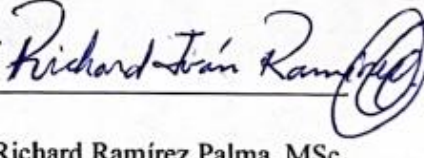
2024

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. 
Ing., Lucrecia Moreno Alcívar, PhD.
DIRECTOR DE CARRERA

f. 
Ing., Daniel Campoverde C., MSc.
DOCENTE TUTOR

f. 
Ing., Jonny Villao Borbor, MSc.
DOCENTE ESPECIALISTA

f. 
Ing., Richard Ramírez Palma, MSc.
DOCENTE UIC

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación quiero dedicárselo en primera instancia a Dios, por guiar mi camino y brindarme salud, fuerza y voluntad para seguir adelante en el cumplimiento de mis objetivos de vida.

A mis padres, Wigberto Orrala y Edilma Figueroa mis principales pilares para que este cimiento asentado en bases sinuosas llamada vida no se derrumbe, porque son mi fortaleza y motivación en el diario vivir.

A mis abuelitos Benigno Orrala, Máximo Figueroa y Carmelina Vera, que, aunque no estén físicamente conmigo conformaron parte sustancial de mi desarrollo como persona, los llevaré siempre en mi corazón y todos y cada uno de mis logros llevarán su nombre cual derechos de autor.

A Melanie Solórzano mi sempiterno, protagonista de la hipérbole de mis alegrías, mi mentor de la vida y principal vínculo afectivo en su máximo esplendor que nunca dejó de creer en mí y me brinda su apoyo inconmensurable.

Kevin Andrés Orrala Figueroa.

A mis queridos padres: Adolfo Rodríguez y Alba Borbor, quienes son mi base y guía; mis logros son consecuencia de su inconmensurable afecto y confianza, y de su arduo trabajo.

A mis afectuosos abuelos: Cipriano Rodríguez, Justina González, Artemino Borbor y Juana Tomalá, quienes en su estancia terrenal me colmaron de amor, seguridad y gentileza; sus enseñanzas y memorias son mi perpetua motivación.

A mis preciosos sobrinos: Jaiden, Santiago y Francisco, quienes son mi impulso constante para mejorar, mi fortaleza en los días malos y la fuente de mis más grandes alegrías.

A mis apreciados amigos: Betzaida Macias, Marissa Rodríguez y Justyn Barbotó, quienes me han concedido el honor de su afable amistad y no flaquearon su fe en mí.

Helen Melina Rodríguez Borbor.

CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO

Ing., Daniel Rosendo Campoverde Campoverde, MSc.

TUTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Universidad Estatal Península de Santa Elena

En calidad de tutor del trabajo de investigación para titulación del tema **“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”** elaborado por los estudiantes, **KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA** y **HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR**, con **C.I.: 0959849409** y **C.I.: 2400310799**, egresado de la carrera de Ingeniería Civil, de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, me permito declarar que una vez analizado en el sistema antiplagio COMPILATIO, luego de haber cumplido con los requerimientos exigidos de valoración, la presente tesis, se encuentra con un 4 % de la valoración permitida.

Adjunto reporte de similitud

Atentamente,

f. _____

Ing., Daniel Rosendo Campoverde Campoverde

DOCENTE TUTOR

orralla-rodriguez antiplagio

4%
Textos sospechosos



4% Similitudes
< 1% similitudes entre comillas
0% entre las fuentes mencionadas
< 1% Idiomas no reconocidos

Nombre del documento: orralla-rodriguez antiplagio.docx
ID del documento: d21769e9062fa783ba36b579a637b639c25a93c0
Tamaño del documento original: 9,77 MB

Depositante: DANIEL ROSENDO CAMPOVERDE
CAMPOVERDE
Fecha de depósito: 21/6/2024
Tipo de carga: interface
fecha de fin de análisis: 21/6/2024

Número de palabras: 26.495
Número de caracteres: 168.197

Ubicación de las similitudes en el documento:



Fuentes principales detectadas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	www.ecoeediciones.com 1 fuente similar	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (29 palabras)
2	repository.eafit.edu.co 1 fuente similar	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (71 palabras)
3	Documento de otro usuario #023f6 El documento proviene de otro grupo 1 fuente similar	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (70 palabras)
4	TESIS VERONICA B - PABLO L.docx | TESIS VERONICA B - PABLO L #146720 El documento proviene de mi biblioteca de referencias 1 fuente similar	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (44 palabras)
5	repositorio.upse.edu.ec https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/10566/1/UPSE-TIC-2023-0056.pdf	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (45 palabras)

Fuentes con similitudes fortuitas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	www.obraspublicas.gob.ec	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (37 palabras)
2	Documento de otro usuario #23abf0 El documento proviene de otro grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (17 palabras)
3	 Todos los Tipos de PAVIMENTOS Urbanos y sus características">inforcivil.com > Todos los Tipos de PAVIMENTOS Urbanos y sus características https://inforcivil.com/pavimentos-flexibles/	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (35 palabras)
4	repositorio.ucsg.edu.ec http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/1421/3/IT-U-CSG-PRE-ING-IC-88.pdf.txt	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (28 palabras)
5	cybertesis.uni.edu.pe http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/20.500.14076/15344/1/pereyra_re.pdf	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (21 palabras)

Fuente mencionada (sin similitudes detectadas) Estas fuentes han sido citadas en el documento sin encontrar similitudes.

- <http://www.larevista.ec/orientacion/educacion/guia-de-novedades-academicas>

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, **KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA** y **HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR**, declaramos bajo juramento que el presente trabajo de titulación denominado “**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER**”, no tiene antecedentes de haber sido elaborado en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera de Ingeniería Civil, lo cual es un trabajo exclusivamente inédito de nuestra autoría.

Por medio de la presente declaración cedemos los derechos de autoría y propiedad intelectual, correspondientes a este trabajo, a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, según lo establecido por la ley de propiedad intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

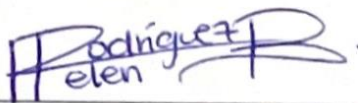
Atentamente,

f. 

Kevin Andrés Orrala Figueroa

C.I. 0959849409

AUTOR DE TESIS

f. 

Helen Melina Rodríguez Borbor

C.I. 2400310799

AUTOR DE TESIS

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

Ing., Daniel Rosendo Campoverde Campoverde, MSc.

TUTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Universidad Estatal Península de Santa Elena

En mi calidad de Tutor del presente trabajo “ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER” previo a la obtención del Título de **INGENIERO CIVIL**, elaborado por el Sr. **KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA** y la Srta. **HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR**, egresado de la carrera de **INGENIERÍA CIVIL**, Facultad Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, me permito declarar que luego de haber orientado, estudiado y revisado, la apruebo en todas sus partes.

Atentamente,

f.  _____

Ing., Daniel Rosendo Campoverde Campoverde

C.I.: 0997906803

DOCENTE TUTOR

CERTIFICACIÓN DE GRAMATOLOGÍA

Lcda. Betty Ruth Gómez Suárez, Mgtr.
Celular: 0962183538
Correo: bettyruthgomez@educacion.gob.ec

CERTIFICACIÓN GRAMATICAL Y ORTOGRÁFICA

Yo, **BETTY RUTH GÓMEZ SUÁREZ**, en mi calidad de **LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA EDUCACIÓN Y MAGÍSTER EN DISEÑO Y EVALUACIÓN DE MODELOS EDUCATIVOS**, por medio de la presente tengo a bien indicar que he leído y corregido el Trabajo de Integración Curricular previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil, denominado **“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”**, de los estudiantes: **ORRALA FIGUEROA KEVIN ANDRÉS** y **RODRÍGUEZ BORBOR HELEN MELINA**.

Certifico que está redactado con el correcto manejo del lenguaje, claridad en las expresiones, coherencia en los conceptos e interpretaciones, adecuado empleo en la sinonimia. Además de haber sido escrito de acuerdo a las normas de ortografía y sintaxis vigentes.

En cuanto puedo decir en honor a la verdad y autorizo a los interesados hacer uso del presente como estime conveniente.

Santa Elena, 19 de Junio del 2024



Lcda. Betty Ruth Gómez Suárez, Mgtr.
CI. 0915036529

LICENCIADO EN CIENCIAS DE LA EDUCACIÓN
MAGÍSTER EN DISEÑO Y EVALUACIÓN DE MODELOS EDUCATIVOS
N° DE REGISTRO DE SENECYT 1050-2014-86052892

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a mi familia quien siempre deposito su apoyo en mí, y me permitieron dar pasos agigantados en el proceso académico por el que he atravesado a lo largo de los años.

Mis sinceros agradecimientos al Ing. Daniel Campoverde, tutor y cabecilla de esta investigación que con su profesionalismo y experticia supo guiar el proceso de la investigación, y de mi formación académica en reiteradas ocasiones. Así como también a los docentes con los que tuve el gusto ser estudiante y nutrirme de su vasto conocimiento.

A Helen Rodríguez Borbor por ser partícipe del presente trabajo de titulación de la mano con su apoyo y gran amistad, por soportarme y tener paciencia a lo largo de todo el proceso de titulación.

A los amigos que supieron convertirse en mi círculo social más íntimo e importante en el desarrollo de mi vida académica y social. Por brindarme su mano y comprensión.

A comercial Angelito y sus sucursales, y a mis jefes Ángel y Krystel por haberme brindado la oportunidad de sustentarme económicamente a través de un entorno de trabajo módico acorde a mis necesidades, por soportar mis permisos y ausencias al trabajo y principalmente por considerarme amigo antes que empleado.

Kevin Andrés Orrala Figueroa.

Mis agradecimientos radican esencialmente a mis padres, Adolfo Rodríguez y Alba Borbor, que han dedicado gran parte de su vida a formar de mí una excelente persona, quienes con esfuerzo y sacrificio constante han permitido el desarrollo de las diferentes fases de mi vida, acompañándome siempre con entusiasmo, confianza y paciencia, aun a pesar de los altibajos. A ustedes debo todos mis logros y dichas futuras de mi camino académico y profesional, y por usted contemplo alcanzar el éxito de mis metas y aspiraciones subsiguientes.

A mi familia, por las innumerables ocasiones que depositaron en mí palabras de motivación y apoyo, que han sido una base primordial para no desfallecer, no solo en este, sino en todos mis procesos cursados, su fe en mí me alienta enormemente.

Extiendo mi gratitud, al Ing., Daniel Campoverde por ser participe como tutor, su compromiso, tiempo y conocimientos nos permitió el desarrollo exitoso de este trabajo de titulación.

A mi amigo y compañero en esta odisea, Kevin Orrala, por su paciencia, comprensión, apoyo y compromiso, fue un honor compartir las alegrías y pesares presentados en este proceso.

A mis compañeros y amigos de la universidad, quienes me brindaron aliento, ánimo, estadía y maravillosas experiencias durante la carrera, gracias por mantener su fe intacta en mis capacidades y convertirse en parte importante de mi vida.

Helen Melina Rodríguez Borbor.

CONTENIDO

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	ii
DEDICATORIA	iii
CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO	v
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	vii
CERTIFICACIÓN DEL TUTOR	viii
CERTIFICACIÓN DE GRAMATOLOGÍA.....	ix
AGRADECIMIENTOS	x
CONTENIDO	xii
LISTA DE FIGURAS	xviii
LISTA DE TABLAS	xx
LISTA DE ECUACIONES	xxii
RESUMEN.....	xxiii
ABSTRACT	xxiv
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN	25
1.1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	27
1.2. ANTEDECENTES	29
1.3. HIPÓTESIS	32
1.3.1. Hipótesis General.....	32
1.3.2. Hipótesis Específicas.....	32
1.4. OBJETIVOS.....	32

1.4.1.	Objetivo General.....	32
1.4.2.	Objetivos Específico.....	33
1.5.	ALCANCE.....	33
1.6.	VARIABLES	34
1.6.1.	Variable Independiente	34
1.6.2.	Variable Dependiente	34
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.....		35
2.1.	CARACTERÍSTICAS DE LA ESTRUCTURA DE UN PAVIMENTO.....	36
2.1.1.	Subrasante.....	37
2.1.2.	Subbase.....	37
2.1.3.	Bases de Agregados.....	38
2.1.4.	Capas de Rodadura.....	42
2.2.	TIPOS DE PAVIMENTOS	46
2.2.1.	Pavimento Flexible.....	46
2.2.2.	Pavimentos Con Capas Asfálticas Gruesas.....	47
2.2.3.	Estructuras de pavimentos constituidas de Capas Tratadas con Ligantes Hidráulicos.....	48
2.2.4.	Estructuras de Pavimentos Mixtas.....	49
2.2.5.	Estructura de Pavimento Rígido.....	50
2.2.6.	Estructuras de Pavimento Semirrígidas.....	51
2.3.	COMPONENTES DE LA MEZCLA ASFÁLTICA.....	51
2.3.1.	Asfalto.....	52

2.3.2.	Agregados Pétreos.....	53
2.4.	DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA	58
2.4.1.	Tipología de las Mezclas Asfálticas.	58
2.4.2.	Características Volumétricas de Mezclas Asfálticas	61
2.4.3.	Propiedades Consideradas en el Diseño de Mezclas Asfálticas.	62
2.4.4.	Propiedades Volumétricas de Mezclas Compactadas	65
2.4.5.	Método Marshall.....	75
2.4.6.	Módulo Dinámico.....	77
2.4.7.	Fórmula General de Witczak.....	79
CAPITULO III: METODOLOGÍA		81
3.1.	TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN	81
3.1.1.	Tipo.	81
3.1.2.	Nivel.....	81
3.2.	MÉTODO, ENFOQUE Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	82
3.2.1.	Método.	82
3.2.2.	Enfoque.....	82
3.2.3.	Diseño.....	82
3.3.	POBLACIÓN Y MUESTRA.....	83
3.3.1.	Población.....	83
3.3.2.	Muestra.....	83

3.4. METODOLOGÍA DEL O.E.1: DISEÑAR UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE LA METODOLOGÍA MARSHALL, QUE CUMPLA CON LOS ESTÁNDARES DE LA RELACIÓN ESTABILIDAD/FLUJO MARSHALL PARA ASEGURAR EL CUMPLIMIENTO DE LAS ESPECIFICACIONES.....	84
3.4.1. Recolección de Materiales.....	84
3.4.2. Caracterización de Materiales para Dosificaciones de Mezclas Asfálticas en Caliente.	86
3.4.3. Dosificación para Diseño de Mezcla.....	94
3.4.4. Elaboración De Especímenes De Conformidad Al Método Marshall. 95	
3.5. METODOLOGIA DEL O.E.2: ENSAYAR EN EL EQUIPO NAT LOS ESPECÍMENES DE LA MEZCLA DISEÑADA A UNA TEMPERATURA Y FRECUENCIA CONSTANTE PARA LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LA MEZCLA	108
3.6. METODOLOGÍA DEL O.E.3: DETERMINAR EL MÓDULO DINÁMICO EN FUNCIÓN DE OTRAS CORRELACIONES, MODIFICANDO LA FRECUENCIA Y MANTENIENDO LA TEMPERATURA, PARA COMPARARLOS CON LOS DATOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO EN NAT, ESTABLECIENDO LA MEJOR CORRELACIÓN DE APROXIMACIÓN DE MÓDULOS DINÁMICOS PARA EL MÉTODO MARSHALL	112
3.7. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	118
CAPITULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	120
4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS O.E.1: DISEÑAR UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE LA METODOLOGÍA MARSHALL, QUE CUMPLA CON LOS	

ESTÁNDARES DE LA RELACIÓN ESTABILIDAD/FLUJO MARSHALL PARA ASEGURAR EL CUMPLIMIENTO DE LAS ESPECIFICACIONES	120
4.1.1. Ensayo de Granulometría.	120
4.1.2. Ensayo de Gravedad Especifica de Agregado Grueso	121
4.1.3. Ensayo de Gravedad Específica de Agregado Fino	121
4.1.4. Ensayo de Abrasión de los Ángeles	123
4.1.5. Dosificación de Mezcla Asfáltica Convencional.....	123
4.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS O.E.2: ENSAYAR EN EL EQUIPO NAT LOS ESPECÍMENES DE LA MEZCLA DISEÑADA A UNA TEMPERATURA Y FRECUENCIA CONSTANTE PARA LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LA MEZCLA.	129
4.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS O.E.3: DETERMINAR EL MÓDULO DINÁMICO EN FUNCIÓN DE OTRAS CORRELACIONES, MODIFICANDO LA FRECUENCIA Y MANTENIENDO LA TEMPERATURA, PARA COMPARARLOS CON LOS DATOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO EN NAT, ESTABLECIENDO LA MEJOR CORRELACIÓN DE APROXIMACIÓN DE MÓDULOS DINÁMICOS PARA EL MÉTODO MARSHALL.....	132
4.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	137
CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	140
5.1. CONCLUSIONES.....	140
5.2. RECOMENDACIONES.....	142
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	144

ANEXOS149

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Estructura del pavimento	37
Figura 2 Perfil típico de una estructura de pavimento flexible	47
Figura 3 Perfil típico de una estructura de pavimento con capa asfáltica gruesa	48
Figura 4 Perfil típico de una estructura de pavimento con capas tratadas con ligantes hidráulico	49
Figura 5 Perfil típico de una estructura de pavimento con estructura mixta.....	50
Figura 6 Perfil típico de una estructura de pavimento rígido con junta con pasadores	50
Figura 7 Perfil típico de una estructura semirrígida.....	51
Figura 8 Prueba de módulo dinámico (complejo).....	78
Figura 9 Ubicación de la empresa S.A CM Construcciones.....	84
Figura 10 Agregado 3/4 proveniente de la cantera Chivería	85
Figura 11 Agregado Arena.....	85
Figura 12 Agregado Piedra Chispa (Cisco)	86
Figura 13 Cemento Asfáltico	86
Figura 14 Muestras de agregados finos y gruesos para tamizar	87
Figura 15 Tamizado de los agregados gruesos, cisco y piedra $\frac{3}{4}$	91
Figura 16 Lavado del material grueso para ensayo abrasión de los Ángeles	92
Figura 17 Equipo para ensayo de abrasión Los Ángeles	92
Figura 18 Material en el tambor con sus esferas.....	93
Figura 19 Materiales usados para la mezcla: cisco, piedra $\frac{3}{4}$ y arena	96
Figura 20 Mezclado del asfalto con los materiales pétreos	97
Figura 21 Compactación del espécimen	98
Figura 22 Desencofrado de los especímenes compactados	99
Figura 23 Especimen N° 1, peso en aire	100
Figura 24 Especimen N° 1, peso sumergido.....	100
Figura 25 Especimen N° 1, peso saturado superficialmente seco	101
Figura 27 Calibrador, equipo de medición.....	101
Figura 26 Medición del espesor de los especímenes	101

Figura 28 Briquetas sumergidas en Baño María a 60 °C.....	102
Figura 29 Briqueta y dial colocados en la prensa Marshall.....	103
Figura 30 Equipo RICE	105
Figura 31 Equipo NAT modelo NU-10 Cooper.....	109
Figura 32 Bastidor de montaje LVTD	109
Figura 33 Espécimen montado en el dispositivo adecuado para realizar los ensayos de Modulo.....	110
Figura 34 Mecanismo de carga en modulos de rigidez.....	111
Figura 35 Software MonDinamic desarrollado por Jose J. Lara R.	117
Figura 36 Diagrama VTM vs % Asfalto.....	124
Figura 37 Diagrama Bulk vs % Asfalto.....	125
Figura 38 Diagrama Estabilidad vs % Asfalto.....	125
Figura 39 Diagrama % VMA vs % Asfalto	126
Figura 40 Diagrama % VFA vs % Asfalto	126
Figura 41 Diagrama Flujo vs % Asfalto	127
Figura 42 Diagrama Estabilidad/Flujo vs % Asfalto	127
Figura 43 Diagrama Polvo/Asfalto efectivo vs % Asfalto.....	128
Figura 44 Variación del tiempo de pulso de tensión vertical equivalente con la velocidad y profundidad del vehículo.....	130
Figura 45 Módulos dinámicos de las muestras y línea de tendencia.	131
Figura 46 Módulo dinámico a 20 °C y frecuencia de 0,1 Hz.....	133
Figura 47 Módulo dinámico a 20 °C y frecuencia de 0,5 Hz.....	133
Figura 48 Módulo dinámico a 20 °C y frecuencia de 1 Hz.....	134
Figura 49 Módulo dinámico a 20 °C y frecuencia de 5 Hz.....	134
Figura 50 Módulo dinámico a 20 °C y frecuencia de 8,33 Hz.....	135
Figura 51 Módulo dinámico a 20 °C y 10 Hz.	135
Figura 52 Módulo dinámico a 20 °C y 25 Hz.	136
Figura 53 Módulos dinámicos obtenidos de la Formula General de Witczak...	137

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 <i>Granulometría para materiales de Subbase</i>	38
Tabla 2 <i>Recomendaciones para uso de material de base</i>	39
Tabla 3 <i>Granulometría Base Clase 1</i>	40
Tabla 4 <i>Granulometría Base Clase 2</i>	40
Tabla 5 <i>Granulometría Base Clase 3</i>	41
Tabla 6 <i>Granulometría Base Clase 4</i>	42
Tabla 7 <i>Granulometría de materiales para la Capa de Rodadura de Hormigón Asfáltico Mezclado en Sitio</i>	43
Tabla 8 <i>Granulometría para Mezcla Asfáltica Normal (MAC)</i>	44
Tabla 9 <i>Graduación Superpave para Agregado de tamaño nominal máximo de 19 mm</i>	45
Tabla 10 <i>Graduación Superpave para Agregado de tamaño nominal máximo de 25 mm</i>	45
Tabla 11 <i>Exigencias Para Control de Calidad del Agregado</i>	58
Tabla 12 <i>Granulometría Tradicional</i>	87
Tabla 13 <i>Cantidades mínimas para el ensayo de Gravedad Específica</i>	88
Tabla 14 <i>Especificaciones del método y cantidades de materiales a utilizar según la granulometría del material</i>	90
Tabla 15 <i>Especificaciones que debe seguir la combinación de los agregados según su porcentaje de pasante del tamiz</i>	94
Tabla 16 <i>Graduación de una mezcla asfáltica convencional</i>	95
Tabla 17 <i>Estabilidades de la mezcla asfáltica convencional</i>	103
Tabla 18 <i>Flujos de la mezcla asfáltica convencional</i>	104
Tabla 19 <i>Cantidad mínima de la muestra, según el tamaño máximo nominal del agregado</i>	104
Tabla 20 <i>Criterio de diseño Marshall para Superficies y Bases</i>	107
Tabla 21 <i>Criterios Marshall para VMA</i>	107
Tabla 22 <i>Ensayos que se pueden ejecutar en NAT</i>	108
Tabla 23 <i>Componentes de la ecuación en forma rescrita</i>	113

Tabla 24 <i>Requisitos para el ligante de asfalto clasificado por viscosidad a 60 °C (140 °F) (clasificación basada en el asfalto original).</i>	115
Tabla 25 <i>Parámetros del diseño Marshall utilizados en la fórmula de Witczak.</i>	116
Tabla 26 <i>Porcentajes de pasantes de los materiales pétreos por tamiz y abertura</i>	120
Tabla 27 <i>Gravedad específica del agregado grueso, piedra ³/₄</i>	121
Tabla 28 <i>Gravedad específica del agregado grueso, cisco</i>	121
Tabla 29 <i>Gravedad específica del agregado fino, cisco</i>	122
Tabla 30 <i>Gravedad específica del agregado fino, arena</i>	122
Tabla 31 <i>Gravedad específica de la combinación de agregados</i>	122
Tabla 32 <i>Dosificación de agregados para mezcla asfáltica</i>	123
Tabla 33 <i>Resultados de las propiedades volumétricas de la mezcla convencional</i>	124
Tabla 34 <i>Resultados de mezcla asfáltica convencional en concordancia a la normativa</i>	128
Tabla 35 <i>Módulos de rigidez de los especímenes.</i>	130
Tabla 36 <i>Módulos dinámicos en Psi y Mpa a una penetración de asfalto AC-20 de 60.</i>	136

LISTA DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1 G_{mb} mediante el Método SSD	67
ECUACIÓN 2 Gravedad específica aparente	67
ECUACIÓN 3 G_{sb} para el agregado grueso.....	69
ECUACIÓN 4 G_{sb} para el agregado fino	69
ECUACIÓN 5 G_{sb} para la mezcla de agregados.....	70
ECUACIÓN 6 Gravedad Específica Aparente (G_{sa})	70
ECUACIÓN 7 Gravedad Específica Efectiva del agregado (G_{se})	71
ECUACIÓN 8 Porcentaje de Vacíos de Aire en la Mezcla Compactada.....	71
ECUACIÓN 9 Porcentaje de Vacíos de Aire en la Mezcla Compactada.....	71
ECUACIÓN 10 Porcentaje VMA en mezcla compactada.....	72
ECUACIÓN 11 Porcentaje VMA en mezcla compactada.....	72
ECUACIÓN 12 Porcentaje de VFA en mezcla compactada	73
ECUACIÓN 13 Porcentaje de VFA en mezcla compactada	73
ECUACIÓN 14 Absorción de aglutinante.....	73
ECUACIÓN 15 Absorción de aglutinante.....	74
ECUACIÓN 16 Contenido efectivo de aglutinante de una mezcla	74
ECUACIÓN 17 Contenido efectivo de aglutinante de una mezcla	74
ECUACIÓN 18 Módulo Dinámico.....	78
ECUACIÓN 19 Módulo Dinámico Absoluto.....	78
ECUACIÓN 20 Fórmula General de Witczak.....	79
ECUACIÓN 21 Porcentaje de desgaste del material.....	93
ECUACIÓN 22 Gravedad Especifica Máxima Teórica	105
ECUACIÓN 23 Frecuencia de carga	111
ECUACIÓN 24 Fórmula de Witczak segmentada	112
ECUACIÓN 25 Viscosidad del asfalto según Witczak y Hwang	114

“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”

Autores: Kevin Andrés Orrala Figueroa y Helen Melina Rodríguez Borbor

Tutor: Ing. Daniel Rosendo Campoverde Campoverde, MSc.

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue evaluar el comportamiento de una mezcla asfáltica convencional utilizando el equipo Nottingham Asphalt Tester (NAT) a 20°C y una frecuencia de carga constante de 8,33 Hz. El estudio incluye la exposición de diagramas con los módulos dinámicos para caracterizar la resistencia de la mezcla. Se exploraron metodologías de correlación para módulos dinámicos, involucrando parámetros de diseño tipo Marshall y reológicos del cemento asfáltico, para frecuencias de 0,1 a 25 Hz, que moldean velocidades de 0 a 70 km/h aproximadamente y cambios climáticos del pavimento. En la segunda etapa, se probaron 12 especímenes con un 5,35% de asfalto AC-20, obteniendo un módulo promedio de 3984 Mpa, caracterizando la mezcla como satisfactoria en conformidad al rango de 3000 a 4000 Mpa de conformidad con la norma del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), con una desviación estándar de 666 y un coeficiente de variación de 16,7%. En la tercera etapa, se utilizó la normativa M226-24 (2004) para estimar la viscosidad del asfalto AC-20 a 25°C y aplicar la fórmula de Witczak junto a parámetros Marshall, obteniendo módulos dinámicos de 1300 a 5300 Mpa a 20°C. Los resultados denotan la efectividad de las metodologías aplicadas, incitando a la exploración de pruebas adicional a las mezclas asfálticas.

Palabras Clave: Comportamiento dinámico, Módulo Dinámico, Parámetros de diseño Marshall, Mezcla Asfáltica, Nottingham Asphalt Tester.

“ANALYSIS OF THE DYNAMIC BEHAVIOR OF A CONVENTIONAL ASPHALT MIXTURE THROUGH DYNAMIC MODULE TESTS USING THE NOTTINGHAM ASPHALT TESTER EQUIPMENT”

Authors: Kevin Andrés Orrala Figueroa & Helen Melina Rodríguez Borbor

Tutor: Ing. Daniel Rosendo Campoverde Campoverde, MSc.

ABSTRACT

The objective of this research was to evaluate the behavior of a conventional asphalt mix using the Nottingham Asphalt Tester (NAT) at 20°C and a constant load frequency of 8.33 Hz. The study includes presenting diagrams with dynamic modules to characterize the mix's resistance. Correlation methodologies for dynamic modules were explored, involving Marshall design parameters and rheological parameters of the asphalt cement, for frequencies from 0.1 to 25 Hz, which model speeds from 0 to 70 km/h approximately and climatic changes of the pavement. In the second stage, 12 specimens with 5.35% AC-20 asphalt were tested, obtaining an average modulus of 3984 MPa, characterizing the mix as satisfactory in accordance with the regulation of the Ministry of Transport and Public Works (MTOP) standard range of 3000 to 4000 MPa, with a standard deviation of 666 and a coefficient of variation of 16.7%. In the third stage, the M226-24 (2004) standard was used to estimate the viscosity of AC-20 asphalt at 25°C and apply the Witczak formula along with Marshall parameters, obtaining dynamic modules from 1300 to 5300 MPa at 20°C. The results denote the effectiveness of the applied methodologies, encouraging the exploration of additional tests on asphalt mixes.

Keywords: Dynamic behavior, Dynamic Modules, Marshall design parameters, Asphalt Mixes, Nottingham Asphalt Tester.

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

Un aspecto significativo para el progreso económico del Ecuador se centra en la comercialización de bienes y servicios a nivel nacional e internacional movilizado a lo largo de toda la red vial existente del país, a razón de esto las redes viales demandan diseños óptimos que aseguren el alto desempeño de toda la estructura de pavimento y logre la eficacia de su serviciabilidad. En la actualidad, gran parte de la red vial está compuesta de pavimento flexible; lo que conduce a uno de los mayores problemas que afronta el país respecto a la infraestructura vial: la poca durabilidad de la capa de rodadura. La calidad de la capa de rodadura, que a la vez determinan su vida útil, es la principal meta de las autoridades competentes, para financiar los costos de construcción y el mantenimiento de una vía, por ello se debe tener en cuenta las mejores opciones de tipos de materiales, su producción, transporte y dosificación (Contreras Chóez & Delgado Fernández, 2017).

Entre las características que determinan la cualidad del pavimento concurren las propiedades mecánicas y dinámicas, fundamentales para establecer parámetros cruciales, como el dimensionamiento en el diseño, la rehabilitación o el reforzamiento de la estructura de pavimento (Higuera Sandoval et al., 2011). Su comportamiento mecánico y dinámico está influenciado tanto por las propiedades de la mezcla en su conjunto como por las características individuales de los materiales que la componen (Ortiz Hernández et al., 2017). El análisis de las propiedades mecánicas incluye la evaluación de la resistencia a la deformación permanente y la resistencia a la tensión indirecta, entre otras, con el objetivo de garantizar que la mezcla tenga un buen desempeño durante toda su vida útil. (Delgado Alamilla et al., 2017). La conducta dinámica de una mezcla asfáltica está en dependencia de la variación de la temperatura y la frecuencia aplicada de la carga, así como por las propiedades del asfalto y los agregados empleados en su fabricación. (Vidal Valenca, 2006).

El módulo dinámico es una de las propiedades más importantes de las mezclas bituminosas, ya que determina la respuesta tenso-deformacional de este material bajo las cargas del tráfico, los agentes ambientales y los asentamientos de las capas subyacentes (Mateos Moreno & Soares, 2015). Esta propiedad determina cómo la mezcla asfáltica responde a la deformación, dependiendo de la temperatura y la velocidad de aplicación de la carga (frecuencias). Las frecuencias reflejan la velocidad de los vehículos en operación, mientras que las temperaturas corresponden a las condiciones ambientales que el pavimento puede enfrentar. (Delgado Alamilla et al., 2017). Además, el módulo dinámico refleja las características de las mezclas asfálticas que evolucionan a lo largo de la vida útil del pavimento, debido a factores como el envejecimiento del cemento asfáltico, la acumulación de fatiga, y la disminución progresiva de vacíos en las mezclas asfálticas causada por las cargas vehiculares, entre otros aspectos. (Lara Ruíz, 2021). Existen diversas metodologías para determinar el módulo dinámico de una mezcla asfáltica, incluyendo ensayos de laboratorio, monogramas y el uso de fórmulas o correlaciones. (Higuera Sandoval et al., 2011).

A partir de lo expuesto, se presenta la premisa que considerar el módulo dinámico como parámetro fundamental en el diseño de mezclas asfálticas permite concebir información efectiva del comportamiento mecánico y dinámico de la mezcla y en consecuencia el desenvolvimiento del pavimento en su vida de servicio, sin embargo, durante los últimos años el modelo usado para el diseño de las mezclas asfálticas en pavimento flexible es la metodología Marshall que permite en base a la estabilidad y el flujo Marshall llegar a una correlación de un módulo de rigidez de la carpeta asfáltica, no obstante, este parámetro solo analiza un estado de carga específica y tiene la particularidad de considerar a la estructura como un medio rígido, lo que no coincide con la funcionalidad de servicio del pavimento (Noboa López & Vega Naranjo, 2014).

Esta investigación tiene el propósito de evaluar el comportamiento dinámico de una mezcla asfáltica convencional, diseñada bajo los parámetros estándar del Método Marshall, a través del análisis del módulo dinámico, un parámetro poco usado, que se obtendrán de dos fuentes, una directa resultante de someter 12 especímenes al ensayo en el equipo NAT a una temperatura de 20°C y frecuencia constante y otra

indirecta en función de correlacionar parámetros de diseño empleando la fórmula de Witczak , de este modo se pretende explorar otras alternativas que permitan hallar módulos representativos para el diseño de pavimentos flexibles, y en fase de prueba con la normativa MTOP, caracterizando la mezcla asfáltica convencional y así obtener una adecuada calificación en función del módulo de rigidez.

1.1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El sistema de carreteras y caminos en Ecuador se conoce como la red vial nacional, y está compuesto por la red vial estatal (que incluye las redes primaria y secundaria), la red vial provincial (vías terciarias) y la red vial cantonal (caminos vecinales). El 74 % de la red vial estatal está pavimentada y, según datos del Ministerio de Transporte, un 62 % se encuentra en buenas condiciones, pero sólo el 2 % de la red cantonal tiene un estado bueno (Corporación Andina de Fomento, 2020).

En el país, es común observar que los pavimentos asfálticos presentan fisuras, deformaciones o daños por efecto del agua a pocos años de su construcción o rehabilitación. Esta situación afecta negativamente la inversión económica y compromete el bienestar y seguridad vial de los usuarios. Este suceso se da aún si se sigue la metodología Marshall para el control y diseño de una mezcla asfáltica de calidad, siendo este hecho que indica que el método puede ser insuficiente. La conducta de la mezcla asfáltica está vinculado a sus rasgos dinámicos ante las fuerzas ejercidas por el tráfico vehicular. Las tecnologías tradicionales para controlar y garantizar la calidad de las superficies estructurales del pavimento suelen no medir la respuesta dinámica de los materiales locales y no se utilizan como parámetros directos de diseño (Núñez Gavilánez, 2014).

No obstante, la correcta determinación de las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica exige evaluaciones complejas y el conocimiento de otras áreas, como la metrología, la instrumentación y el tratamiento de datos, además de un entendimiento más eficaz acerca del comportamiento mecánico viscoelástico del material. El ensayo de módulo dinámico es uno de ellos, cuya finalidad es valorar las características viscoelásticas de una mezcla asfáltica, ya que dicho ensayo

posibilita conocer dos parámetros mecánicos: el ángulo de fase (δ) en correspondencia con el módulo dinámico ($|E^*|$) (Delgado Alamilla et al., 2018). La severidad de considerar el módulo dinámico para reformar el diseño de pavimentos se debe a que El módulo dinámico es una característica mecánica esencial en el diseño de pavimentos asfálticos. Esta propiedad determina las propiedades viscoelásticas lineales de la mezcla asfáltica, considerando la temperatura y la velocidad de aplicación de la carga. Además, es un parámetro clave en la Guía de Diseño Empírico-Mecanicista de pavimentos (MEPDG) de 2002. (Delgado Alamilla et al., 2017).

En el método mecanístico-empírico, se emplean principios básicos de la mecánica de materiales, como los módulos de rigidez y el coeficiente de Poisson, para calcular las respuestas de una capa de pavimento: esfuerzos, desplazamientos y deformaciones. Estos cálculos se utilizan como base para predecir el deterioro del pavimento mediante funciones de transferencia, que incluyen fenómenos como agrietamiento, formación de roderas y aumento de la rugosidad (medido por el IRI, Índice de Regularidad Internacional), entre otros (Arias Barrantes, 2020). Sin embargo, en nuestra situación, el uso de este parámetro está restringido debido a las dificultades para obtener la curva maestra, pues no todos los laboratorios en el país tienen el equipo de laboratorio estandarizado necesario, y aquellos que lo tienen no lo utilizan con regularidad debido a que no es una práctica habitual en nuestro entorno (Noboa López & Vega Naranjo, 2014).

Ante las actuales demandas de calidad en las estructuras de pavimentos, la evaluación y modernización de sistemas de diseños es imperativo, y surge la interrogativa general ¿es eficiente mantener los actuales estándares de diseño de mezclas asfálticas?, derivando en las siguientes interrogantes de nuestro interés en específico: ¿Qué tan eficiente es el módulo dinámico para determinar la funcionabilidad de una mezcla asfáltica convencional?, y ¿Cuál es la variación del módulo dinámico de la mezcla asfáltica obtenida por ensayo de laboratorio y los valores calculados en función de la fórmula de Witczak?

1.2. ANTEDECENTES

Arias (2012) ostenta que los antecedentes de la investigación reflejan los avances y el estado actual del conocimiento en un área determinada y sirven de modelo o ejemplo para futuras investigaciones.

En el ámbito internacional, se considera la investigación de Vidal Valencia (2006) basado en el “Comportamiento dinámico de mezclas asfálticas”. El objetivo del estudio fue establecer las ecuaciones constitutivas de los módulos dinámicos y estimarlos mediante un método indirecto utilizando un equipo ultrasónico para las mezclas asfálticas utilizadas en el Valle de Aburrá, considerando la temperatura y la frecuencia de carga. La metodología involucró la caracterización de agregados y asfaltos provenientes de tres plantas que suministran mezclas asfálticas en la región, así como la fabricación de briquetas con mezcla asfáltica conforme a especificaciones regionales y nacionales. El estudio encontró que el incremento en la frecuencia de carga se traduce en un aumento del módulo dinámico, y que dicho módulo varía significativamente a temperaturas entre 25 °C y 35 °C. Dado que la temperatura en el Valle de Aburrá puede superar los 40 °C, se observó que los módulos dinámicos no superan los 2000 MPa a una frecuencia de 1 Hz. Además, se determinó que, a frecuencias altas, los módulos dinámicos son más elevados y, por consiguiente, los amortiguamientos son menores, lo que sugiere que las mezclas asfálticas sufren menos deformaciones a velocidades más altas de vehículos.

Asimismo, se cita el trabajo de Brito y Corredor (2018) que trata del “Análisis del comportamiento mecánico y dinámico de mezclas asfálticas con agregados procedentes del Rio Sogamoso y mejoradas con cemento Portland”. El objetivo fue analizar el comportamiento dinámico y mecánico de mezclas tipo MDC-19 elaboradas con agregados procedentes del Rio Sogamoso y mejoradas con cemento Portland, la metodología que se empleo fue diseñar una mezcla típica en caliente (MDC-19) a través del sistema Marshall determinando características típicas de la muestra para llegar al porcentaje óptimo de asfalto, para la mezcla modificada con cemento como filler se varió los porcentajes (0%, 25%, 50%, 75%, 100%). Posterior a obtenerlas cantidades adecuadas se realizó briquetas en el compactador giratorio y se evaluó el módulo de las briquetas convencionales y las modificadas

empleando el marco de carga DTS-30. Los resultados presentan que la mezcla modificada con 75 y 100% de cemento obtuvo mayores valores de módulo dinámico siendo recomendadas para temperaturas de 21.1°C y 54.4°C, mientras que para temperaturas de 37.8°C la mezcla convencional obtuvo mayores módulos.

Se tiene presente también el trabajo de Higuera Sandoval et al. (2011), fundamentado en la "Determinación de Módulos Dinámicos de una mezcla asfáltica mediante correlaciones". El trabajo tuvo por objetivo probar distintas metodologías y sus variables, usadas con frecuencia para predecir el módulo dinámico de una mezcla asfáltica. La metodología abordada fue usar formulas teóricas desarrolladas por distintas fuentes, aplicando las variables implícitas en cada procedimiento, con base en datos derivados de un ensayo de tracción indirecta previamente realizada a la mezcla, estos resultados fueron comparados para determinar la precisión de estos con respecto al ensayo de laboratorio. Dentro de los métodos desarrollados se tiene monogramas, programa Shell y las fórmulas de: Bonnaure y otros, Instituto del Asfalto, Heukelom y Klomp, y Witczak. Como resultados este trabajo obtuvo que el módulo dinámico obtenido por cualquiera de estas metodologías teóricas será superior al resultado conseguido en laboratorio, pues cada metodología considera variables particulares que hacen que el módulo fluctúe, se señaló, además, que la Formula de Witczak es la que se asemeja más a los datos previos.

En el ámbito nacional, se presenta la disertación de Espín y Jaramillo (2016) basado en "Caracterización en mezclas asfálticas diseñadas en caliente a partir de la construcción de curvas de módulo dinámico". El objetivo se centró en construir curvas maestras de mezclas asfálticas en caliente utilizadas en la ciudad de Quito, generando información para el diseño de pavimentos, módulo dinámico, el mismo que permitirá el desarrollo adecuado de la teoría de diseño Mecánico – Empírico M-E PDG dentro del sector. La metodología aplicada consistió en recolectar muestras de mezcla asfáltica de 3 plantas y realizarles ensayos de laboratorio para caracterizar las propiedades de los agregados, seguido se calculó el módulo dinámico mediante la ecuación de Witczak, según lo referido en la norma de la Asociación Americana de Funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte (AASHTO) TP 62-03, y se construyó la curva maestra con los valores obtenidos. Los resultados de este trabajo exponen que los valores de módulo dinámico para

mezclas asfálticas que van a ser utilizadas como carpeta asfáltica, los valores varían desde 17000MPa hasta 29000MPa, y para la mezcla asfáltica que será utilizada como base asfáltica los valores de módulo dinámico varían entre 18000Mpa y 20000Mpa. Comprobando que los valores para mezclas usadas como carpeta deben ser mayores, puesto a que estas estarán expuestas directamente a las condiciones propias del entorno como son cargas dinámicas y la temperatura.

Se cita también el trabajo de Avedaño y López (2017) que expone la “Caracterización de curvas maestras mediante la caracterización de mezclas asfálticas en caliente obteniendo el módulo dinámico de plantas asfálticas dentro de la provincia de Imbabura”. Dicho trabajo cuya finalidad era la obtención de curvas maestras del módulo dinámico para una mezcla asfálticas diseñadas en caliente manejadas en la provincia de Imbabura para obtener un valor de referencia de módulo dinámico para diseños de estructuras de pavimentos, dejando de manifiesto un mecanismo para el adecuado manejo de la teoría de diseño empírico mecanicista estipulado en MPDG. El método se desarrolló cumpliendo los ensayos pertinentes que posibilitan caracterizar los agregados y el asfalto AC-20, incontinenti para ensayar de conformidad a AASHTO TP 62-03; donde se estipula una combinación de 5 temperaturas con 6 frecuencias para la realización de la metodología, en ese caso, de las mezclas de las dos plantas asfálticas, con 9 especímenes para cada planta, consiguiendo los Módulos Dinámicos en el equipo Universal. Se encontró que el comportamiento de las dos mezclas asfálticas es bastante parecido, ya que muestran valores de módulo dinámico superiores a 10,000 MPa a bajas temperaturas, y claramente superiores a 10,000 MPa a altas temperaturas, especialmente bajo cargas pesadas y velocidades de circulación bajas.

Dentro del ámbito local, no se registran investigaciones que aborden el parámetro del módulo dinámico como componente en el diseño de mezclas asfálticas, solo hay evidencias de diseños de mezclas asfálticas considerando los parámetros de flujo y estabilidad Marshall.

1.3. HIPÓTESIS

1.3.1. Hipótesis General

La evaluación del módulo dinámico de una mezcla asfáltica convencional utilizando el equipo NAT obtendrá valores representativos del comportamiento dinámico de la mezcla que deberían ser considerados para el diseño de pavimentos flexibles y el control de las mezclas asfálticas.

1.3.2. Hipótesis Específicas

H.E1.: El diseño de la mezcla asfáltica convencional mediante la metodología Marshall cumplirá con los estándares de relación estabilidad/flujo Marshall para asegurar el cumplimiento de las especificaciones.

H.E2.: El ensayo en el equipo NAT de los especímenes de la mezcla diseñada a una temperatura y frecuencia constante evaluará el comportamiento dinámico de la mezcla asfáltica.

H.E3.: La determinación del módulo dinámico en función de otras correlaciones modificando la frecuencia y manteniendo la temperatura para compararlos con los datos obtenidos en el ensayo NAT permitirá establecer la mejor correlación de aproximación de módulos dinámicos para el método Marshall.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General

Evaluar el módulo dinámico de una mezcla asfáltica convencional utilizando el equipo NAT con el fin de obtener valores representativos del comportamiento dinámico de la mezcla que deberían ser considerados para el diseño de pavimentos flexibles y el control de las mezclas asfálticas.

1.4.2. Objetivos Específico

O.E1.: Diseñar una mezcla asfáltica convencional mediante la metodología Marshall, que cumpla con los estándares de la relación estabilidad/flujo Marshall para asegurar el cumplimiento de las especificaciones.

O.E2.: Ensayar en el equipo NAT los especímenes de la mezcla diseñada a una temperatura y frecuencia constante para la evaluación del comportamiento dinámico de la mezcla.

O.E3.: Determinar el módulo dinámico en función de otras correlaciones, modificando la frecuencia y manteniendo la temperatura, para compararlos con los datos obtenidos en el ensayo en NAT, estableciendo la mejor correlación de aproximación de módulos dinámicos para el método Marshall.

1.5. ALCANCE

El presente estudio comprende la evaluación del módulo dinámico y los parámetros mecánicos de una mezcla asfáltica convencional bajo una misma temperatura y frecuencia constante mediante el equipo NAT, facilitado por la Universidad Católica Santiago de Guayaquil (UCSG), que en teoría son valores más reales y confiables que describen el comportamiento dinámico de la mezcla asfáltica bajo diferentes parámetros, temperatura, carga y frecuencia que simulan las condiciones a las que se va a enfrentar la mezcla in situ. Además se determinaran módulos dinámicos manteniendo la temperatura constante y variando frecuencias en el rango definidas en la norma AASHTO T 342, mediante un modelo de correlaciones propuesto en la guía MEPDG denominado modelo de predicción del módulo dinámico de Witczak, a partir de todos los datos se pondrá de manifiesto la variación, fiabilidad y valores más cercanos y acertados respecto a la normativa MTOP, por supuesto esto permitirá escoger un valor más preciso y valido con el que se debería trabajar en un proyecto real de pavimentación y asfaltado evitando desperdicios o deficiencias al momento de trabajar con un módulo distinto que no cumpla con las exigencias requeridas para cumplir las expectativas en cuanto a resistencia y durabilidad de la carpeta asfáltica.

El alcance de esta investigación está limitado al número de briquetas ensayadas en el equipo NAT, pues 4 juegos de briquetas serán ensayadas bajo una misma

temperatura pero a diferentes frecuencias, como recomendación se deben ensayar como mínimo 3 temperaturas distintas para efectos de modelamiento más cercana a la realidad y los efectos que tendrá la mezcla asfáltica bajo cambios de temperatura, ya que las vías están expuestas a cambios climáticos inevitables, sin contar con el calor que genera la fricción de circulación de los vehículos, sin embargo, en el presente trabajo de titulación se trabajara con la temperatura nominal de un laboratorio, es decir 20 °C, basándose en la normativa de la American Society for Testing and Materials (ASTM) D4123.

Trabajar con más temperaturas supondría 3 juegos de briquetas adicionales por cada temperatura, y por consiguiente más ensayos que deben ser cubiertos por los participantes de la investigación, quedando de manifiesto para futuras investigaciones el estudio de los módulos dinámicos a diferentes temperaturas, diferentes frecuencias o diferentes tipos de materiales como agregados en la mezcla.

1.6. VARIABLES

1.6.1. Variable Independiente

Metodología ASTM para ensayos en el equipo NAT.

Metodología Witzak.

1.6.2. Variable Dependiente

Módulo dinámico de una mezcla asfáltica de diseño convencional

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

Al presente los pavimentos flexibles son principalmente utilizados a nivel mundial debido a su versatilidad de construcción y adaptabilidad a diversas condiciones de tráfico, además su resistencia a asentamientos menores y su capacidad para soportar un cierto grado de deformación sin daños significativos los hacen muy adecuados para regiones con diferentes condiciones geo-climáticas, en función de esto es indispensable garantizar un óptimo diseño estructural del pavimento, enfatizando que una capa de rodadura diseñada apropiadamente desempeña un papel fundamental en la protección de las capas de pavimento subyacentes, pues al distribuir eficazmente las cargas de tráfico y reducir la tensión se prolonga significativamente la vida útil del pavimento, minimizando la necesidad de reparaciones y mantenimiento frecuentes; consecuentemente las mezclas asfálticas figuran una parte esencial para los pavimentos flexibles, pues no solo se trata de la parte más costosa de la estructura sino que un diseño óptimo de la mezcla asfáltica contribuye a la creación de una superficie factible y resistente que mejora la seguridad general de los usuarios.

La AASHTO define la mezcla asfáltica como una combinación en proporciones exactas de asfalto y agregados pétreos, producidos en planta de asfalto y mezclados en forma caliente, donde las proporciones de estos materiales establecen las características físicas de una mezcla y, para conseguir el desempeño que tendrá como pavimento.

Se emplean dos enfoques de diseño frecuentes para establecer las propiedades adecuadas del asfalto y el agregado en una mezcla: el Método Marshall y el Método Hveem, ambos métodos se usan ampliamente en el diseño de mezclas asfálticas para pavimentación. La elección entre estos dos métodos depende principalmente de las preferencias en ingeniería, ya que cada uno posee características y ventajas particulares, y proporcionan resultados satisfactorios cuando son aplicados adecuadamente (Asphalt Institute, 2001, p. 57)

2.1. CARACTERÍSTICAS DE LA ESTRUCTURA DE UN PAVIMENTO

Los pavimentos para carreteras y vías urbanas están compuestos por múltiples capas superpuestas de materiales seleccionados, formando estructuras viales. Estas estructuras están diseñadas para resistir tanto las cargas del tráfico como las condiciones climáticas (función estructural). Además, deben proporcionar un tránsito cómodo y seguro para los vehículos durante un período prolongado (objetivo funcional). Las cargas dinámicas de los vehículos generan tensiones y deformaciones en las capas del pavimento, tanto vertical como horizontalmente. La estructura se asienta sobre una subrasante natural o sobre una plataforma preparada, como una subrasante mejorada, estabilizada o un terraplén que cumple la función de capa de conformación (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015, p. 44).

La Norma Ecuatoriana Vial (NEVI-2012) detalla que el pavimento se constituye de varias capas: carpeta asfáltica, base, subbase, que estarán apoyadas sobre la cimentación que se compone por la subrasante. Por su parte, González Morgado (2018) expone que el pavimento se compone por una serie de capas continuas y superpuestas colocadas sobre la subrasante, compactadas una después de la siguiente acorde a procesos estandarizados de control de calidad con el objetivo de cumplir con la capacidad de resistencia de cargas de tránsito futuras aplicadas, las que no deben extenderse de límite de la capacidad portante de la subrasante, considerando implementar sistemas de drenaje (bombeo y peralte) en su diseño.

De conformidad con Manual de Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes (2013) precisado en la NEVI-12 presentado por el Ministerios de Transporte y Obras Públicas, se define los siguientes conceptos y especificaciones.

Figura 1

Estructura del pavimento



Nota. Tomado de *Tipos de Pavimentos*, por Luis Loría Salazar, 2019.

2.1.1. Subrasante.

“La superficie superior de la obra base, preparada como cimiento para la estructura del pavimento y los bordes”.

2.1.2. Subbase.

“Capas, de grosor determinado, de materiales granulares o no, que cumplen especificaciones explícitas, las que se sitúan sobre una subrasante aceptada, que pueda resistir la superficie Base” (pág. 57).

Los agregados utilizados deben cumplir con ciertos requisitos: un coeficiente de desgaste máximo del 50% según el ensayo de abrasión de los Ángeles, una porción que pase por el tamiz N° 40 con índice de plasticidad valorado por debajo de 6, asimismo con el límite líquido máximo de 25, y una capacidad de soporte igual o superior al 30% de CBR. Las subbases de agregado se clasifican de acuerdo con estos criterios (pág. 340):

- **Clase 1:** Las subbases se componen de agregados triturados derivados de roca o gravilla, según se indica en la tabla 1. El tamaño máximo nominal del material graduado debe ser de 1 pulgada y media (1” ½),

con al menos el 30% del agregado proveniente del proceso de trituración.

- **Clase 2:** Las subbases están compuestas por agregados obtenidos mediante trituración o cribado de yacimientos de piedra natural fragmentada o gravilla. Según lo indicado en la tabla 1, el tamaño máximo nominal del material graduado debe ser de 2 pulgadas, y al menos el 30% del agregado seleccionado debe provenir del proceso de trituración o cribado.
- **Clase 3:** Son subbases construidas con agregados naturales y procesados que cumplan con un tamaño máximo nominal de 3”.

Tabla 1

Granulometría para materiales de Subbase

TAMIZ	SUBBASE CLASE 1		SUBBASE CLASE 2		SUBBASE CLASE 3	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
3” 76.2 mm						100
2” 50.4 mm	-	-		100		-
1 ½” 38.1 mm		100	70	100		-
N° 4 4.75 mm	30	70	30	70	30	70
N° 40 0.425 mm	10	35	15	40		-
N° 200 0.075 mm	0	15	0	20	0	20

Nota. Proporciones en peso pasante de malla para su base. Tomado de *Manual de Especificaciones para la Construcción de Caminos y Puentes (NEVI-2012)* (p. 341), por Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), 2013.

2.1.3. Bases de Agregados.

“Capa (o capas), de espesor definido, de materiales sujetos a determinadas especificaciones, colocada sobre la subbase o la subrasante para soportar las capas de Superficie o Rodadura”.

En cualquier cuestión, la fracción del límite pasante por el tamiz N° 40 tiene que ser menor a 25, así mismo, el índice de plasticidad tiene que ser un valor por debajo de 6. La proporción de desgaste por las fuerzas abrasivas de los agregados granulares debe encontrarse por debajo del 40%, el soporte de CBR debe ser un valor superior o igual al 80%. Los materiales tienen que ser naturalezas sólidas

limpias, y resistentes, independientes al polvo, o suciedades, arcilla u otros elementos extraños.

La clase y tipo de base se elegirá en concordancia con el tipo de vía y su utilidad, seguidamente se presenta las recomendaciones para el uso de los diferentes tipos de material de base, según la NEVI-12 (pág. 372).

Tabla 2

Recomendaciones para uso de material de base

MATERIAL ESPECIFICADO	TIPO DE CARRETERA	No. CARRILES	TPDA
BASE CLASE 1	Para uso principalmente en aeropuertos y carreteras con intenso nivel de tráfico.	8 a 12	> 50.000
BASE CLASE 2	Carreteras de 2 hasta 6 carriles con un ancho mínimo por carril de 3.65 m. se incluye franja central desde 2 a 4 m.	2 a 6	8.000 – 50.000
BASE CLASE 3	Vías internas de urbanizaciones con bajo nivel de tráfico	2 a 4	1.000 – 8.000
BASE CLASE 4	Caminos vecinales	2	< 1.000

Nota. Tomado de *Manual de Especificaciones para la Construcción de Caminos y Puentes (NEVI-2012)* (p. 372), por Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), 2013.

2.1.3.1. Tipos de Bases.

- **Base Clase 1:** Son bases compuestas por agregado grueso y fino completamente triturado, uniformemente graduado dentro de los límites granulométricos especificados para los Tipos A y B (pág. 372).

Tabla 3*Granulometría Base Clase 1*

TAMIZ		BASE CLASE 1 TIPO A		BASE CLASE 1 TIPO B	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
2"	50.4 mm		100		100
1 ½"	37.5 mm	70	100	70	100
1"	25 mm	55	85	60	90
¾"	19 mm	50	80	45	75
3/8"	9.5 mm	35	60	30	60
N° 4	4.75 mm	25	50	20	50
N° 10	2 mm	20	40	10	25
N° 40	0.425 mm	10	25	2	12
N° 200	0.075 mm	2	12		

Nota. En la tabla se contemplan las proporciones medidas en peso que pasantes de malla para Base Clase 1. Tomado de *Manual de Especificaciones para la Construcción de Caminos y Puentes (NEVI-2012)* (p. 373), por Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), 2013.

- **Base Clase 2:** Son bases formadas por fragmentos de roca o grava triturada, en las que al menos el 50% en peso de la fracción de agregado grueso debe ser triturada. Estas bases deben estar graduadas uniformemente dentro de los límites granulométricos especificados (pág. 373).

Tabla 4*Granulometría Base Clase 2*

TAMIZ		BASE CLASE 2	
		Mín.	Máx.
2"	50 mm		100
1 ½"	37.5 mm	70	100
1"	25 mm	55	85
¾"	19 mm	47	75
3/8"	9.5 mm	35	65
N° 4	4.75 mm	25	55
N° 10	2 mm	15	45
N° 40	0.425 mm	5	25
N° 200	0.075 mm	0	10

Nota. Tabla que contiene las proporciones para cada pasante de malla en peso para Base Clase 2. Tomado de *Manual de Especificaciones para la Construcción de Caminos y Puentes (NEVI-2012)* (p. 374), por Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), 2013.

- **Base Clase 3:** Son bases compuestas por fragmentos de roca o grava triturada, en las que al menos el 25% en peso de la fracción de agregado grueso debe estar triturada. Estas bases deben estar uniformemente graduadas dentro de los límites granulométricos especificados. Si es necesario cumplir con los requisitos de graduación, se puede añadir relleno mineral proveniente de trituración adicional o arena fina (pág. 373).

Tabla 5

Granulometría Base Clase 3

TAMIZ	BASE CLASE 3	
	Mín.	Máx.
2"	50 mm	100
1"	25 mm	70
¾"	19 mm	60
3/8"	9.5 mm	40
N° 4	4.75 mm	30
N° 10	2 mm	15
N° 40	0.425 mm	10
N° 200	0.075 mm	0

Nota. Proporciones en peso pasantes de los tamices de malla exigidos para clasificación de Base Clase 3. Tomado de *Manual de Especificaciones para la Construcción de Caminos y Puentes (NEVI-2012)* (p. 374), por Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), 2013.

- **Base Clase 4:** Son bases compuestas por agregados obtenidos mediante trituración o cribado de piedra naturalmente fragmentada o de gravilla, uniformemente graduados dentro de los límites granulométricos especificados (pág. 373).

Tabla 6*Granulometría Base Clase 4*

	TAMIZ	BASE CLASE 4	
		Mín.	Máx.
2"	50 mm		100
1"	25 mm	60	90
N° 4	4.75 mm	20	50
N° 200	0.075 mm	0	15

Nota. Se contemplan las proporciones en peso pasantes de malla para clasificación de Base Clase 4. Tomado de *Manual de Especificaciones para la Construcción de Caminos y Puentes (NEVI-2012)* (p. 374), por Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP), 2013.

2.1.4. Capas de Rodadura.

“La superficie superior de la carretera, diseñada para aportar comodidad al tránsito, debe ser antideslizante, impenetrable y capaz de resistir tanto la abrasión del tráfico como los efectos adversos del clima, y está hecha de material especificado”.

2.1.4.1. Riego de imprimación.

El riego de imprimación se define como la aplicación de un ligante hidrocarbonado sobre una capa granular, antes de colocar sobre ella una capa o tratamiento bituminoso.

2.1.4.2. Riego de adherencia.

El riego de adherencia se define como la aplicación de una emulsión bituminosa encima de una superficie asistida con ligantes hidro-carbonados o conglomerados hidráulicos, previo a colocación de cualquier espécimen de capa bituminosa que este exenta de un tratamiento superficial con gravilla o una lechada bituminosa.

2.1.4.3. Tratamiento superficial bituminoso.

Se define como el riego de un ligante asfáltico protegido por un estrato de agregado, de grosor igual al tamaño máximo del mismo, ejecutado con la

finalidad de conseguir una superficie antideslizante, uniforme, que resista a los factores climáticos e impenetrable, sin embargo, esto no aumenta la capacidad de soporte.

El material bituminoso por utilizar podrá ser:

- Cemento asfáltico
- Asfaltos diluidos
- Emulsiones asfálticas

2.1.4.4. Superficie de rodadura en hormigón asfáltico mezclado in situ.

Radica en una superficie de rodadura de hormigón asfáltico combinado en el terreno y ubicada por sobre una base elaborada adecuadamente o sobre un pavimento ya construido. Se manipula una granulometría abierta y fina para un material pulverizado en 90%. Aparte de que previo a añadir asfalto a la mezcla in situ, los agregados deben estar completamente secos y bien mezclados en las proporciones correctas.

Tabla 7

Granulometría de materiales para la Capa de Rodadura de Hormigón Asfáltico Mezclado en Sitio

ABERTURA DE TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada	
	3/8" Máximo	1/4" Máximo
1/2" (12.7 mm)	100	-
3/8" (9.5 mm)	90 – 100	100
1/4" (6.3 mm)	55 – 75	85 – 100
Nº 4 (4.75 mm)	30 – 50	-
Nº 8 (2.38 mm)	15 – 32	15 – 32
Nº 16 (1.18 mm)	0 – 15	0 – 15
Nº 200 (0.075 mm)	0 - 3	0 - 3

Nota. Tomado de *Manual de Especificaciones para la Construcción de Caminos y Puentes (NEVI-2012)* (p. 414), por Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), 2013.

2.1.4.5. Superficie de rodadura de hormigón asfáltico en caliente.

De conformidad con la normativa NEVI-12 (2013), se presenta como una superficie asfáltica bituminosa hecha en caliente y ejecutada encima de una superficie preparada e imprimada de forma adecuada. Las mezclas bituminosas para empleo en pavimentación en caliente se compondrán de agregados minerales, finos, filler mineral y material bituminoso. Las mezclas asfálticas corresponden a dos tipos detallados a continuación:

- a) **Mezcla Asfáltica Normal (MAC).** La gradación de la mezcla asfáltica normal (MAC) deberá responder a las siguientes especificaciones granulométricas:

Tabla 8

Granulometría para Mezcla Asfáltica Normal (MAC)

TAMIZ	Porcentaje que pasa		
	MAC - 1	MAC - 2	MAC - 3
25 mm (1")	100	-	-
19 mm (3/4")	80	100	-
12,5 mm (1/2")	67 – 85	80 – 100	-
9,5 mm (3/8")	60 – 77	70 – 88	100
4,75 mm (N° 4)	43 – 54	51 – 68	65 – 87
2 mm (N° 10)	29 – 45	38 – 52	43 – 61
0,425 mm (N° 40)	14 – 25	17 – 28	16 – 29
0,180 mm (N° 80)	8 – 17	8 – 17	9 – 19
0,075 mm (N° 200)	04 - 8	05 - 8	05 – 10

Nota. Tomado de *Manual de Especificaciones para la Construcción de Caminos y Puentes (NEVI-2012)* (p. 420), por Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), 2013.

- b) **Mezcla Superpave.** Las mezclas de agregados deben cumplir con los tamaños nominales máximos de 19 mm y 25 mm. La curva de la granulometría del material granular tiene que estar comprendida entre los puntos de inspección y evitar principalmente la zona restrictiva. El tipo de asfalto utilizado en estas mezclas debe cumplir con la clasificación Superpave – SHRP, AASHTO, MP – 1. Asimismo, la calidad de los agregados debe seguir lo establecido por la metodología SHRP.

Tabla 9*Gradación Superpave para Agregado con TMN de 19 mm*

Tamaño del tamiz mm	Puntos de control		Línea de Máxima Densidad	Zona de restricción		Fórmula de Mezcla	Tolerancia
				Mínimo	Máximo		
25		100	100				
19	100	90	88,4				
12,5			73,2				
9,5			59,6				
4,75			49,5			*	(6)
2,36	49	23	34,6	34,6	34,6	*	(6)
1,18			25,3	22,3	28,3		*
0,6			18,7	16,7	20,7	*	(4)
0,3			13,7	13,7	13,7	*	(3)
0,15			10				
0,075	8	2	7,3			*	(2)

Nota. Tomado de *Manual de Especificaciones para la Construcción de Caminos y Puentes (NEVI-2012)* (p. 421), por Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), 2013.

Tabla 10*Gradación Superpave para Agregado de tamaño nominal máximo de 25 mm*

Tamaño del tamiz mm	Puntos de control		Línea de Máxima Densidad	Zona de restricción		Fórmula de Mezcla	Tolerancia
				Mínimo	Máximo		
37,5		100	100				
25	100	90	83,3				
19			73,6				
12,5			61,0				
9,5			53,9			*	(6)
4,75			39,5	39,5	39,5	*	(6)
2,36			28,8	26,8	30,8		
1,18			21,1	18,1	24,1	*	(4)
0,6			15,6	13,6	17,6	*	(3)
0,3			11,4	11,4	11,4		
0,15			8,3			*	(2)
0,075			6,1				

Nota. Tomado de *Manual de Especificaciones para la Construcción de Caminos y Puentes (NEVI-2012)* (pp. 421 - 422), por Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), 2013.

2.1.4.6. Capa bituminosa de sellado.

Se refiere a una capa bituminosa que se aplica sobre una capa de material bituminoso, ya sea sola o con el repartimiento de agregados destinados a

recubrimiento, sobre una superficie de rodadura asfáltica que ya está en servicio y ha sido terminada.

2.1.4.7. *Capa de rodadura de hormigón hidráulico.*

Consiste en la elaboración, transporte, colocación, consolidación y acabado de una mezcla de hormigón hidráulico como estructura de pavimento, con o sin refuerzo; la ejecución de juntas, el acabado, el curado y demás actividades necesarias para la correcta construcción del pavimento.

2.2. TIPOS DE PAVIMENTOS

Según Rondón Quintana & Reyes Lizcano (2015) el pavimento se clasifica en los siguientes tipos:

2.2.1. Pavimento Flexible.

Este tipo de estructuras viales se define como sistemas compuestos por una capa asfáltica que se superpone a capas de menor rigidez, constituida generalmente en su interior por materiales granulares no trabajados o ligados (base, subbase y, incluso a veces subrasante mejorada), las cuales a su vez descansan sobre el terreno natural o la subrasante. Estas capas estructurales están diseñadas para disipar los esfuerzos generados por las cargas del tránsito, de manera que, al llegar a la subrasante, esta debe resistir los esfuerzos mecánicos sin sufrir deformaciones que puedan comprometer la funcionalidad o la integridad estructural de la vía. La carpeta asfáltica en un pavimento flexible está formada por la capa de rodadura, la base intermedia y la base asfáltica, pero puede estar exclusivamente por la capa de rodadura si se trata de niveles bajos de tránsito; siendo las funciones principales de la carpeta asfáltica:

- **Estructural:** Esta capa debe ser diseñada y construida de manera que pueda resistir los efectos de la fatiga y la acumulación de deformaciones permanentes causadas por las cargas cíclicas de los vehículos.
- **Funcional:** Como esta capa recibe directamente las cargas superficiales del pavimento, debe ser diseñada y construida de manera que permita

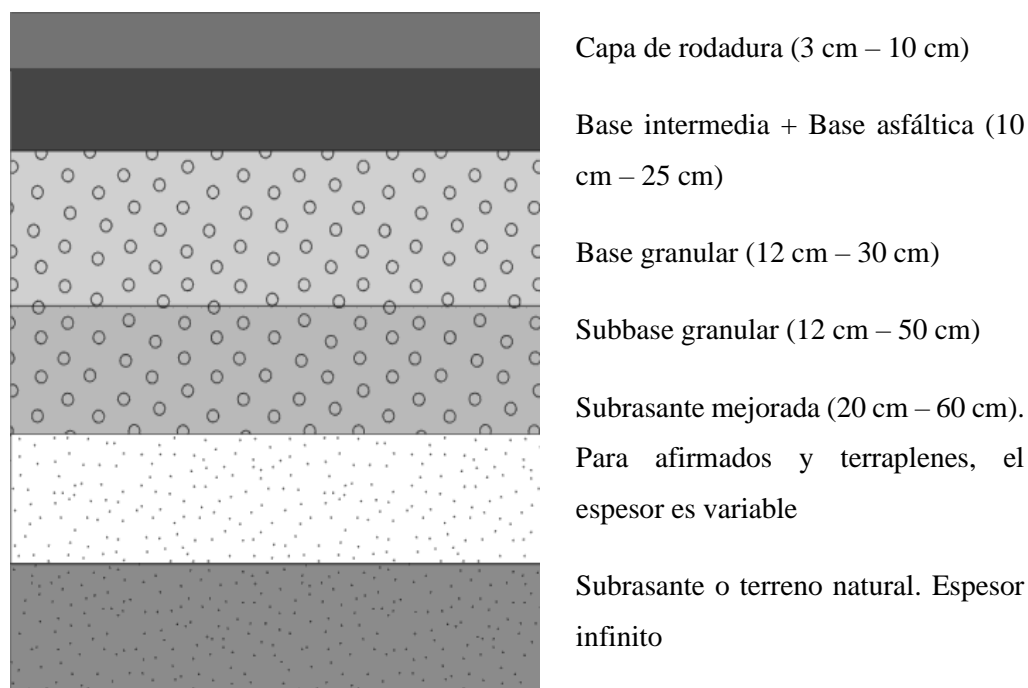
una circulación cómoda y segura de los vehículos durante la vida útil del pavimento.

- **Impermeabilización:** Esta capa evita que el agua penetre directamente hacia las capas inferiores, lo cual ayuda a prevenir la pérdida de resistencia al corte que podría afectar a las capas granulares de base y subbase.

Cada estrato de la superficie de pavimento asfáltico consiste en mezclas asfálticas compuestas de materiales granulares, conocidos como agregado pétreo, que están unidos mediante un material asfáltico o asfalto. Estas mezclas típicamente incluyen agregados pétreos con diversas granulometrías y estándares de calidad mínimos. Además, pueden variar en función dentro de la estructura del pavimento y en el tipo de material asfáltico o ligante empleado.

Figura 2

Perfil típico de una estructura de pavimento flexible



Nota. Tomado de *PAVIMENTOS. Materiales, construcción y diseño* (p. 45), por H. Rondón Quintana & F. Reyes Lizcano, 2015.

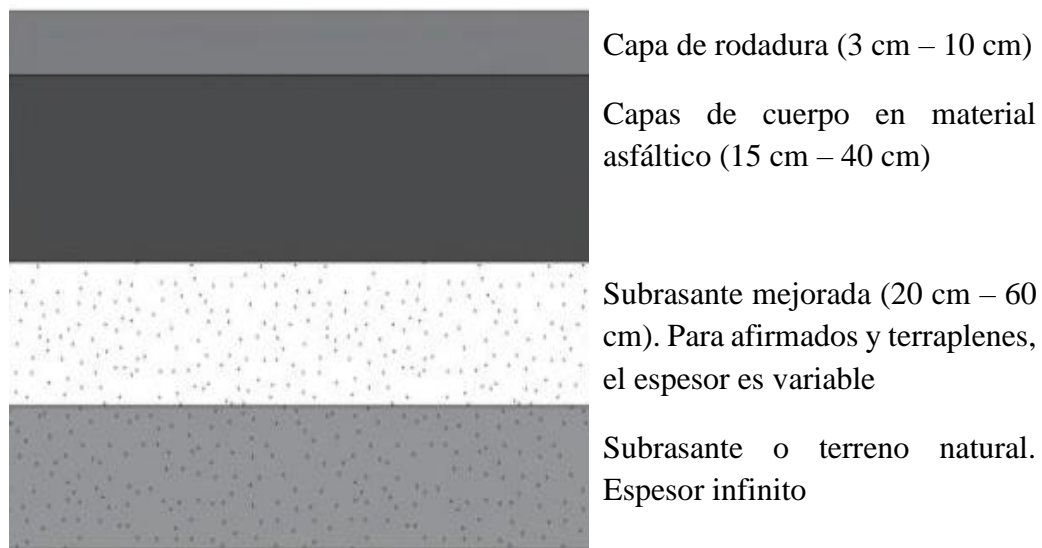
2.2.2. Pavimentos Con Capas Asfálticas Gruesas.

La capa de rodadura asfáltica de esta estructura de pavimento descansa sobre materiales tratados con ligantes asfálticos (capa asfáltica gruesa), los cuales,

a su vez, se apoyan sobre una subrasante mejorada, un manto de conformación o solamente sobre el terreno natural, obedeciendo la tipología de la subrasante. La resistencia y rigidez a fuerzas de tipo tensoras de las superficies cimentadas con materiales asfálticos permiten la disipación horizontal de los esfuerzos, lo que reduce el esfuerzo vertical en la subrasante y previene deformaciones permanentes antes de que la capa asfáltica presente signos de fatiga.

Figura 3

Perfil típico de una estructura de pavimento con capa asfáltica gruesa



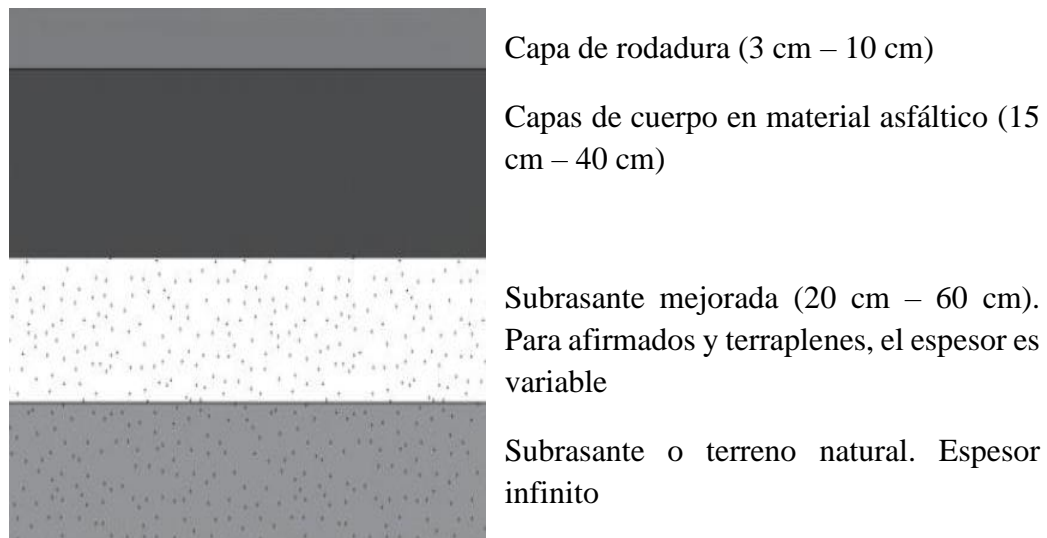
Nota. Tomado de *PAVIMENTOS. Materiales, construcción y diseño* (p. 46), por H. Rondón Quintana & F. Reyes Lizcano, 2015.

2.2.3. Estructuras de pavimentos constituidas de Capas Tratadas con Ligantes Hidráulicos.

Estas estructuras, por lo general las conforman una superficie de rodadura asfáltica que yace sobre un componente soporte combinado por materiales trabajados con aglutinantes hidráulicos en una o más capas (base y subbase). Esto asevera que los esfuerzos verticales transferidos a la estructura de pavimento sean mínimos. En contraste, las capas ligadas con cemento hidráulico soportan esfuerzos por fatiga y carga significativamente elevados.

Figura 4

Perfil típico de una estructura de pavimento con capas tratadas con ligantes hidráulico



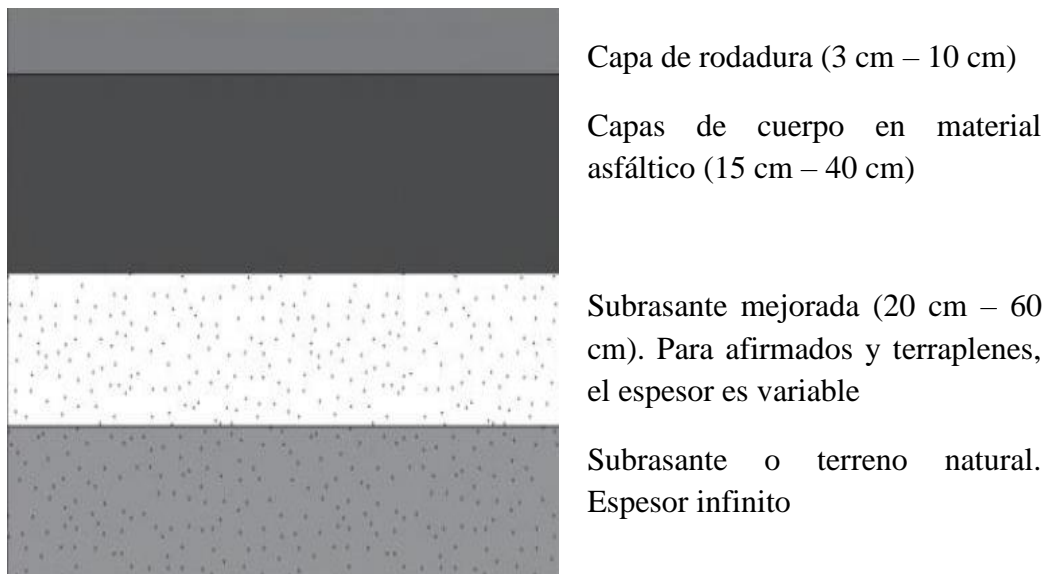
Nota. Tomado de *PAVIMENTOS. Materiales, construcción y diseño* (p. 46), por H. Rondón Quintana & F. Reyes Lizcano, 2015.

2.2.4. Estructuras de Pavimentos Mixtas.

La estructura está compuesta por una capa asfáltica (que incluye la capa de rodadura y una base de asfalto), gravitada sobre un estrato granular trabajada o ligada con elementos hidráulicos. Para estas estructuras, se recomienda que el espesor de la capa asfáltica sea igual al de la capa tratada con cementantes hidráulicos. La capa de materiales tratados con ligantes hidráulicos actúa como subbase y, debido a su rigidez, disipa los esfuerzos verticales transmitidos a la subrasante, lo cual reduce las deformaciones en la carpeta asfáltica. Además, las capas asfálticas, generalmente compuestas por gravas bituminosas, ayudan a regular la estructura y retardar la aparición superficial de fisuras transversales originadas en la capa tratada con ligantes hidráulicos.

Figura 5

Perfil típico de una estructura de pavimento con estructura mixta



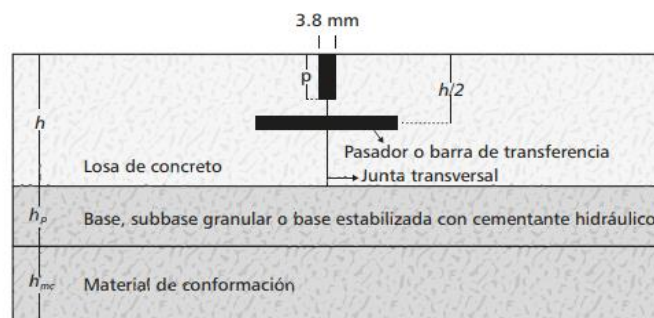
Nota. tomado de *PAVIMENTOS. Materiales, construcción y diseño* (p. 47), Por H. Rondón Quintana & F. Reyes Lizcano, 2015.

2.2.5. Estructura de Pavimento Rígido.

Por lo general, estas estructuras consisten en una losa de concreto hidráulico con un espesor de 18 a 30 cm, que descansa sobre una capa granular sin tratamiento o estabilizada con cemento hidráulico. Debido al alto módulo elástico del concreto, los esfuerzos generados por el tráfico se reducen en flexión por la losa de concreto, mientras que los esfuerzos de compresión se distribuyen ampliamente y se transfieren a la subrasante en cantidades mínimas.

Figura 6

Perfil típico de una estructura de pavimento rígido con junta con pasadores



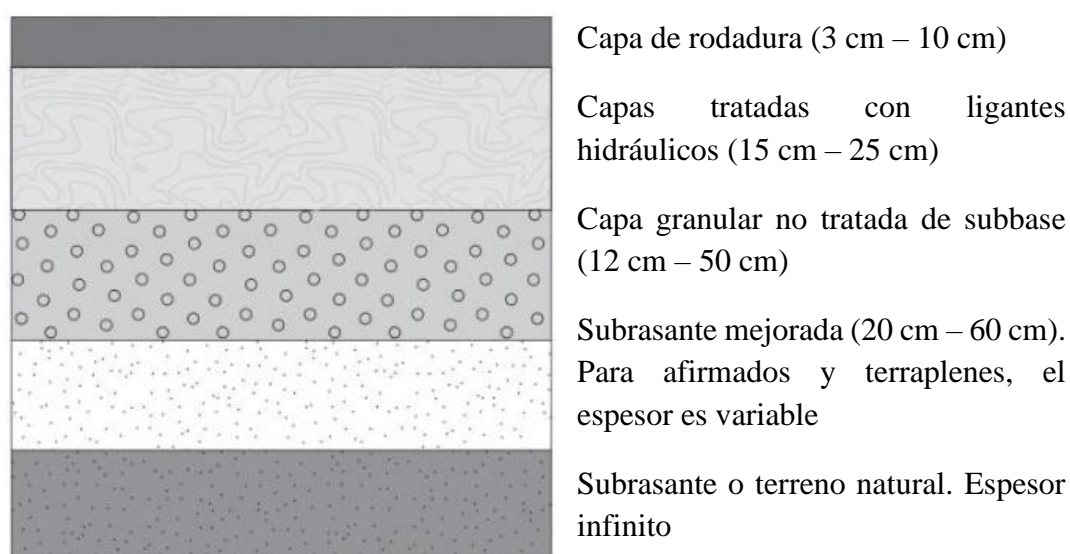
Nota. tomado de *PAVIMENTOS. Materiales, construcción y diseño* (p. 47), Por H. Rondón Quintana & F. Reyes Lizcano, 2015.

2.2.6. Estructuras de Pavimento Semirrígidas

Está compuesta por una superficie asfáltica que reposa sobre un estrato de materiales con cementantes hidráulicos para su estabilización, así, simultáneamente se superponen en estratos granulares no tratados de subbase y subrasante en estado natural o mejorada.

Figura 7

Perfil típico de una estructura semirrígida



Nota- tomado de *PAVIMENTOS. Materiales, construcción y diseño* (p. 48), Por H. Rondón Quintana & F. Reyes Lizcano, 2015.

2.3. COMPONENTES DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

Las distintas variedades de mezclas asfálticas están compuestas por agregados pétreos que cumplen con requisitos específicos de granulometría. Como expresa el Instituto de Asfalto (2001) una medida que se ha mantenido a lo largo de la historia del asfalto en construcciones: La calidad de un pavimento depende tanto de los materiales utilizados como de la precisión del proceso constructivo. El uso de materiales y técnicas constructivas deficientes no puede ser compensado por ningún equipo sofisticado. (pág. 9)

Por su parte, Merizalde Andrade (2017) señala que una mezcla asfáltica consiste en un ligante asfáltico mezclado con partículas de agregado pétreo que poseen características mineralógicas específicas. Estas partículas se combinan en proporciones adecuadas para proporcionar una estructura sólida a la mezcla

asfáltica, con propiedades físicas y mecánicas apropiadas, lo que resulta en un buen rendimiento una vez que se pone en servicio (pág. 6).

2.3.1. Asfalto.

Es un aglomerante de color que puede variar de pardo a negro oscuro, con una consistencia sólida, semisólida o líquida, compuesto principalmente por betunes que se encuentran naturalmente o se obtienen por destilación del petróleo. Es resistente, altamente adhesivo, impermeable y duradero. Esta sustancia plástica proporciona flexibilidad controlable a las mezclas de áridos con las que suele combinarse (Asphalt Institute, 1977, p. 28).

El Instituto de Asfalto (2001, p. 11) menciona que el tipo de asfalto comúnmente utilizado en la construcción de pavimentos se conoce como Cemento Asfáltico. Este material es pegajoso y viscoso, lo que facilita su adherencia a las partículas de agregado, convirtiéndolo en un excelente aglutinante para unir partículas de materiales granulares para pavimentos mixturados en caliente.

2.3.1.1. Clasificación del asfalto.

Por su aplicación, el asfalto puede clasificarse de las siguientes formas:

- a) **Cemento Asfáltico.** Conforme Ramírez Montenegro (2015), el cemento asfáltico es una mezcla de hidrocarburos naturales o pirógenos con derivados no metálicos de origen líquido, semi sólido, y gaseoso, que puede diluirse en bisulfato de carbono. Proviene del proceso de destilación de petróleo, donde se eliminan solventes volátiles y aceites naturales. Es el más usado en la construcción de pavimentos debido a su propiedad de viscosidad, pues crea una adherencia con el material pétreo, resultando en un ligante de alta calidad que cubre completamente los agregados de la mezcla.

Tipán Guañuna (2012, p. 21) detalla que los cementos asfálticos tienen que ser calentados a temperaturas aproximadas de 150° C, con la finalidad de

alcanzar un grado de fluidez que permite su correcto manejo (bombeo y mezclado), a la vez que se calientan los agregados a la misma temperatura.

b) Asfaltos Diluidos. Para Týpan Guañuna (2012, pág. 22) son materiales asfálticos de consistencia blanda o fluida, resultantes de la ductilidad del cemento asfáltico con destilados del petróleo. Los diluyentes usados originan productos menos viscosos que pueden ser manejados y aplicados a temperaturas más bajas.

c) Emulsiones Asfálticas. Una emulsión asfáltica se compone principalmente de tres elementos: asfalto, agua y un agente emulsivo. Ocasionalmente, puede contener otros aditivos como estabilizantes, mejoradores de recubrimiento, mejoradores de adherencia o agentes de control de rotura. Este tipo de emulsión se forma cuando el asfalto se divide mecánicamente en partículas microscópicas y se dispersa en agua con la ayuda de un agente emulsivo. Las diminutas gotas de asfalto permanecen uniformemente dispersas en la emulsión hasta el momento de su uso. La naturaleza química del sistema emulsivo/asfalto/agua determina las propiedades de la dispersión y la estabilidad de la suspensión (Asphalt Institute y Asphalt Emulsion Manufacturers Association, 1976).

d) Asfaltos Oxidados. Arenas Pancca y Cabana Chauca, p. (2015, p. 24) explican que los asfaltos oxidados son asfaltos sometidos a procesos de deshidrogenación y posteriormente a procesos de polimerización, donde se expone el asfalto a elevadas temperaturas a través de una corriente de aire para conseguir el mejoramiento de sus características.

2.3.2. Agregados Pétreos.

Rondón Quintana & Reyes Lizcano (2015) sostienen:

El término técnico "agregados pétreos" en pavimentos se utiliza para describir un conjunto de partículas inertes que incluyen gravas, arenas y finos y/o filler, ya sean naturales o triturados. Estos materiales se emplean tanto en la fabricación de mezclas asfálticas y concretos hidráulicos como en materiales

estabilizados, además de ser manipulados en la construcción de superficies y estratos de terraplén, subbase y base granular, en general, en pruebas de granulometría por tamizado, se registran como gravas las partículas con diámetro entre 2 mm y 6.4 cm. Las partículas con diámetro entre 0.075 y 2 mm se clasifican como arenas, pudiendo ser gruesas o finas, mientras que las partículas con un diámetro inferior a 0.075 mm se denominan arcillas. Estas últimas pueden ser llamadas filler o polvo mineral si no muestran plasticidad al contacto con el agua, es decir, si su índice de plasticidad es igual a cero (IP=0). (pág. 38).

El agregado dentro de una estructura de pavimento representa entre el 90% y 95% del peso total, así mismo, comprende el 75% y el 85% del volumen, mayoritariamente. La selección adecuada del agregado tiene un impacto significativo en el comportamiento de un pavimento, ya que este material proporciona la mayoría de las características de capacidad de carga (Asphalt Institute, 2001, pág. 36).

2.3.2.1. Clasificación de Agregados.

El Manual de Principios de Construcciones de Pavimentos para Mezcla Asfáltica en Caliente (Asphalt Institute, 2001) expone que los agregados, según su origen, se clasifican en los siguientes tipos:

- a) **Agregados Naturales:** Son aquellos agregados utilizados en su estado natural, con un mínimo procesamiento. Estos materiales están constituidos por partículas que se forman naturalmente debido a procesos de erosión y degradación, como la acción del viento, el agua, el movimiento del hielo y procesos químicos. Los agregados naturales más frecuentes en las estructuras de pavimento son la grava y la arena. La grava se caracteriza típicamente por partículas con un tamaño igual o superior a 6.35 mm (1/4 de pulgada). La arena determinada por partículas con un tamaño menor de 6.35 mm (1/4 de pulgada) pero mayor de 0.075 mm (No. 200). Las partículas más pequeñas que 0.075 mm (No. 200) se conocen como relleno mineral (filler), compuesto por materiales como la arcilla o limo de manera más frecuente.

- b) Agregados Procesados:** Son aquellos agregados que han sido triturados y tamizados antes de su utilización. Estos provienen principalmente de dos fuentes: gravas naturales que se trituran para adecuarlas mejor al pavimento de mezcla asfáltica, y fragmentos grandes de lechos de roca y piedras que deben reducirse en tamaño antes de emplearse en pavimentación.
- c) Agregados Sintéticos:** Los agregados sintéticos o artificiales no se encuentran de forma natural; son el resultado de procesos físicos o químicos aplicados a materiales. Algunos se generan como subproductos en procesos industriales, como el refinamiento de materiales, mientras que otros se producen mediante el procesamiento de materias primas específicamente para su uso como agregados.

2.3.2.2. Propiedades del Agregado.

Según el Instituto de Asfalto (2001) un agregado deberá tener las siguientes propiedades para ser considerado como un material de calidad:

- **Gradación y Tamaño Máximo de Partícula.** Las descripciones para calificar como pavimento asfáltico de mezcla en caliente instituyen que las partículas de agregado están comprendidas dentro del rango, en concreto, de tamaños y siendo así que cada tamaño de partícula cumple su participación en proporciones definidas.
- **Tamaño Máximo de Partícula**

Es necesario determinar el tamaño de la partícula más grande en la muestra, ya que las especificaciones establecen un tamaño máximo permitido para cada tipo de agregado utilizado.

 - Tamaño nominal máximo de partícula se refiere al tamiz más grande en una serie de tamices donde por lo menos más del 10% de partículas de material se retienen en la malla.
 - Tamaño de partícula máximo se entiende bajo este concepto como el tamiz con más abertura mismo por el cual el 100% de

partículas del agregado son pasantes de este, y habitualmente es un tamiz más grande que el TMN de la muestra.

- **Distribución del agregado por Granulometría**

Se determina a partir del análisis de tamices realizado sobre las muestras tomadas de un agregado.

- Agregado grueso: roca o porción de esta, atrapado por el tamiz de 2.36 mm (No. 8).
- Agregado fino: porcentaje de muestra pasante del tamiz 2.36 (No. 8).
- Relleno mineral: fragmentos de agregado clasificado como fino pasante del tamiz de 0.60 mm (No. 30).
- Polvo mineral: pulverizado de agregado fino pasante del tamiz de 0.075mm (No. 200).

- **Textura de la Superficie.** Esta característica no solo influye en la facilidad de trabajar y en la resistencia final de la mezcla para pavimentación, sino también en las propiedades de resistencia al deslizamiento de la superficie del pavimento. Una textura rugosa aumenta la resistencia del pavimento al evitar el movimiento relativo de las partículas entre sí. Además, las superficies rugosas facilitan la adherencia de las partículas de asfalto en comparación con las superficies lisas.

- **Limpieza.** Se puede evaluar visualmente, pero el método más preciso para determinar esto es mediante el tamizado por lavado, donde se compara el peso de la muestra de agregado antes y después del lavado, proporcionando dimensiones exactas de proporciones de material no deseado mucho más fino o pequeño que 0.075 mm (No. 200).

- **Capacidad de Absorción.** Si un agregado muestra alta absorción, seguirá absorbiendo asfalto incluso después del mezclado inicial, lo que resultará en una menor cantidad de asfalto disponible en la superficie para unir las otras partículas de agregado.

- **Dureza.** Los agregados tienen que cumplir con la capacidad de oponer resistencia al desgaste irreparable y degradaciones tanto durante la fabricación, ubicación, imprimación y compactación de mezcla asfáltica en pavimentaciones, como a lo largo de la vida útil del pavimento.
- **Afinidad con el Asfalto.** Es la capacidad del agregado de aceptar y retener una capa de asfalto. Las calizas, dolomitas y rocas traheadas muestran una alta afinidad con el asfalto.
- **Forma de Partículas.** La geometría de la partícula influye en la facilidad de trabajar la mezcla de pavimentación durante su colocación, así como en la cantidad de energía necesaria para compactarla hasta alcanzar la densidad requerida. Además, la forma de las partículas también impacta la resistencia estructural del pavimento a lo largo de su vida útil.
- **Peso Específico.** El peso específico de un agregado se define como la relación entre su peso y el volumen ocupado por el mismo volumen de agua. Esta medida es fundamental para entender las propiedades de peso y volumen de los materiales, especialmente en la producción de mezclas donde tanto el agregado como el asfalto se proporcionan según su peso. Además, el peso específico de los agregados es crucial para conocer el porcentaje de vacíos llenos de aire en mezclas asfálticas debidamente compactadas. Mismo cálculo que se realiza evaluando el peso específico de una muestra del mixturado de pavimento, así, después se restan los pesos específicos del agregado y el asfalto. Este resultado proporciona una indicación del volumen de los espacios vacíos de aire presentes en la muestra compactada.

2.3.2.3. *Exigencias de calidad de los agregados minerales.*

De acuerdo con las especificaciones técnicas vigentes del Manual de Especificaciones generales para la Construcción de Carreteras y Puentes (MTO, 2002) se resume lo siguiente.

Tabla 11*Exigencias Para Control de Calidad del Agregado*

PRUEBAS	Agregados	
	Gruesos	Finos
FORMA	Caras fracturadas (>80% - 2) Planas y alargadas (<10%) Abrasión Los Ángeles	Angularidad (>45%)
DUREZA	(<40%) Sulfatos (<12%)	Sulfatos (<12%)
LIMPIEZA	Deletéreos (<1%)	Deletéreos (<1%) Equivalente de arena (>50%) Índice de plasticidad (<4%)
ADHERENCIA	Resistencia retenida en el agua em prueba de tracción indirecta (>80%) Peladura de la mezcla en agua hirviendo (>95%)	

Nota. Material de estudio de la asignatura de Pavimentos (Vila Romaní, 2015)

2.4. DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA

Cepeda Aldape (2002) manifiesta que el diseño de mezcla asfáltica consiste en la selección del tipo y granulometría de agregados a usar, y de la elección del tipo y contenido de asfalto, de modo que se obtengan propiedades idóneas para la mezcla que cumplan con los requerimientos del proyecto vial. Para lograrlo, es crucial elegir los materiales de la mezcla de manera adecuada y asegurar las proporciones correctas entre ellos. Este proceso implica comprender las propiedades más relevantes de las mezclas y cómo afectan el comportamiento de la estructura del pavimento.

2.4.1. Tipología de las Mezclas Asfálticas.

2.4.1.1. *Mezcla asfáltica en caliente.*

Se trata del tipo más común de mezclas asfálticas, que consisten en una combinación de ligante hidrocarbonado, agregados (incluyendo material mineral en polvo) y ocasionalmente aditivos, de tal modo, toda la constitución del agregado esté completamente cubiertas por una película homogénea de aglutinante. La producción involucra incrementar la temperatura del ligante y también de los agregados, y su colocación requiere

temperaturas significativamente superiores a las ambientales. Estas mezclas se producen típicamente con asfaltos estándar, aunque a veces se utilizan asfaltos modificados. Las proporciones varían generalmente entre el 3% y el 6% de asfalto en volumen respecto a los agregados pétreos (Padilla Rodríguez, 2004).

2.4.1.2. Mezcla asfáltica en frío.

Se refieren a las mezclas producidas utilizando emulsiones asfálticas, y su aplicación principal se encuentra en la construcción y el mantenimiento de carreteras secundarias. Para retardar el envejecimiento de las mezclas en frío, se suele aconsejar el sellado mediante lechadas asfálticas. Estas mezclas se destacan por su facilidad de manejo después de su fabricación, incluso durante varias semanas, esto se debe a que el aglutinante mantiene una baja viscosidad por un largo período, gracias al uso de emulsiones con asfalto fluidificado. La viscosidad aumenta gradualmente durante el almacenamiento, lo cual facilita su manejo en grandes cantidades almacenadas. Sin embargo, una vez aplicadas en una capa delgada, experimentan un endurecimiento rápido debido a la evaporación del fluidificante (Cárdenas Alchundia, 2014).

2.4.1.3. Mezcla porosa o drenante.

Se utilizan en capas de rodadura, especialmente en carreteras de alta velocidad, y se elaboran con asfaltos modificados en proporciones que oscilan entre el 4.5% y el 5% del peso de los agregados pétreos. Cuando se emplean asfaltos convencionales, se aplican en vías secundarias, urbanas o como capas base debajo de pavimentos de hormigón. Estas mezclas se utilizan en caliente para tráfico de alta intensidad y como capas de rodadura con un espesor aproximado de 4 cm. Facilitan la evacuación rápida del agua de lluvia mediante infiltración en la calzada (Padilla Rodríguez, 2004).

2.4.1.4. Microaglomerados.

Son mezclas que tienen un tamaño máximo de agregado pétreo que no excede los 10 mm, lo cual las hace adecuadas para aplicaciones en capas delgadas. Esta categoría incluye los microaglomerados en frío, también conocidos como lechadas asfálticas densas, y los microaglomerados en

caliente, que tienen un espesor inferior a los 3 cm. Estos materiales se emplean en una variedad de tratamientos superficiales. Históricamente, se han considerado apropiados para áreas urbanas para evitar problemas relacionados con las alturas de los pasos a desnivel y los bordillos, permitiendo la aplicación de capas delgadas. Algunos microaglomerados presentan texturas rugosas y están compuestos por agregados pétreos de alta calidad y asfaltos modificados, diseñados específicamente para vías de alta velocidad (Cárdenas Alchundia, 2014).

2.4.1.5. Masillas.

Son mezclas que contienen altas proporciones de polvo mineral y ligante, de modo que, si se incluye agregado grueso, este se encuentra disperso en la masa formada por estos componentes. Este tipo de mezcla no depende de la interacción interna de los materiales para su comportamiento, sino que su resistencia se debe a la cohesión proporcionada por la viscosidad de la masa de ligante y polvo mineral (Padilla Rodríguez, 2004).

2.4.1.6. Mezclas de alto módulo.

Estas mezclas se elaboran en caliente, destacando principalmente las de alto módulo destinadas a capas de base, las cuales se fabrican con asfaltos de alta rigidez. A veces, estos asfaltos están modificados y contienen aproximadamente un 6% de asfalto en relación con la masa de los agregados pétreos, con una proporción de polvo mineral bastante elevada, entre el 8% y el 10%. Son mezclas que exhiben un módulo de elasticidad elevado, que oscila entre los 13,000 y los 20,000 Mpa a una temperatura de 20°C, y poseen una resistencia a la fatiga muy considerable. Estas mezclas se utilizan en capas con espesores que varían entre 8 y 15 cm, ya sea en rehabilitaciones o en la construcción de nuevas superficies de carretera con tráfico de intensidad media o alta. La principal ventaja en comparación con las bases de grava-cemento radica en la ausencia de agrietamiento debido a la retracción, mientras que, en comparación con las mezclas convencionales de gran espesor, su ventaja reside en una mayor capacidad para absorber tensiones y, en general, una mayor resistencia a la fatiga, lo que permite un ahorro en términos de espesor (Cárdenas Alchundia, 2014).

2.4.2. Características Volumétricas de Mezclas Asfálticas

Según el Instituto de Asfalto (2001) una muestra de mezcla puede ser analizada para determinar un futuro desempeño estructural.

- **Densidad de la mezcla.** La densidad de la mezcla compactada se define como su peso por unidad de volumen (el peso de un volumen específico de la mezcla). En análisis y ensayos aplicados a diseños de mezclas asfálticas, se expresa la densidad de la muestra previamente compactada en unidades de kilogramos por metro cúbico (kg/m^3) o libras por pie cúbico (lb/ft^3). Se calcula multiplicando la gravedad específica del agua, normalmente de 1000 kg/m^3 o $62,41 \text{ Lb/ft}^3$, por la gravedad específica de la mezcla total (págs. 57 - 58).
- **Vacíos de aire, o simplemente vacíos.** Los vacíos en una mezcla asfáltica son pequeños espacios de aire o bolsas de aire que se encuentran entre los agregados recubiertos en la mezcla compactada final. Es necesario mantener un determinado porcentaje de vacíos que posibilita una compactación adicional proporcionado por el tráfico y suministrar espacios necesarios para el asfalto desarrolle un mecanismo para fluir mientras suscita esta compactación adicional. Los vacíos en porcentaje admitidos para capas de base y superficiales suele estar entre el 3% y el 5%, dependiendo del diseño. Es importante destacar que a medida que disminuye la cantidad de vacíos, la permeabilidad de la mezcla también disminuye. En cambio, tener una cantidad muy baja de vacíos consigue provocar exudación de asfalto. La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados: a mayor densidad, menor porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa (pág. 58).
- **Vacíos en el agregado mineral.** Los espacios de aire existentes entre las partículas del agregado dentro de una mezcla compactada son denominados vacíos en el agregado mineral (VMA), incluyendo los espacios llenos de asfalto. El VMA representa los espacios disponibles para albergar el volumen efectivo de asfalto y los vacíos necesarios en la mezcla. Mantener valores mínimos de VMA es crucial para asegurar

un espesor adecuado de la película de asfalto y la durabilidad de la mezcla. Reducir los valores de VMA por debajo de los mínimos recomendados para economizar en el contenido de asfalto es perjudicial y contraproducente para la calidad del pavimento (pág. 58).

- **Contenido de asfalto.** Porcentaje de asfalto comprendido en la mezcla, siendo fundamental y determinado según criterios establecidos en el método de diseño que se desee trabajar. Para el contenido de asfalto óptimo en la mezcla dependerá de las características específicas del agregado, y cualquier variación en el contenido de relleno mineral afectará las propiedades de la mezcla. La capacidad del agregado para absorber asfalto es crucial para determinar el contenido óptimo de asfalto (pág. 60).

2.4.3. Propiedades Consideradas en el Diseño de Mezclas Asfálticas.

- a) **Estabilidad.** Se refiere a la capacidad de la mezcla asfáltica para resistir la deformación y el deslizamiento provocados por las cargas del tránsito vehicular. La estabilidad de un pavimento se manifiesta cuando mantiene su forma sin desarrollar deformaciones permanentes, corrugaciones u otros signos de desplazamiento de la mezcla.

La estabilidad está principalmente influenciada por dos factores: la fricción y la cohesión. La fricción interna está determinada por la textura superficial, la forma de las partículas y la distribución granulométrica del agregado, así como por la densidad de la mezcla y la cantidad y tipo de asfalto. Por otro lado, la cohesión está relacionada con el contenido de asfalto en la mezcla (Garnica et al., 2005).

- b) **Durabilidad.** En el Manual de Métodos de Diseño de Mezclas del Instituto de Asfalto (2015, pág. 11) puntualiza que la durabilidad de un pavimento asfáltico es la capacidad para resistir factores como el

envejecimiento de asfalto, desintegración del agregado y despojo de la capa asfáltica del agregado.

Estos factores son producto del clima, el tráfico o la composición de los dos factores a la vez. Universalmente, el tiempo de vida útil de la mezcla se puede optimizar empleando tres métodos:

- Diseño de una mezcla aprovechando una graduación muy densa de un material tolerante a la infiltración,
- Maximizar el espesor de la capa asfáltica en los agregados,
- Compactar la mezcla para que sea impermeable.

c) Resistencia al daño por humedad o impermeabilidad. La capacidad de un pavimento asfáltico para oponer resistencia a la penetración de volúmenes de aire y agua se conoce como su impermeabilidad. Esta propiedad tiene relación directa con el contenido de vacíos presente en la mezcla compactada. Aunque el contenido de vacíos proporciona una indicación del potencial de paso de aire y agua a través del pavimento, es más crucial considerar la naturaleza de estos vacíos que su cantidad exacta.

El grado de impermeabilidad depende del tamaño de los vacíos, independientemente de si están interconectados, y de la accesibilidad de estos vacíos a la superficie del pavimento. Aunque es importante lograr cierto nivel de impermeabilidad para asegurar la durabilidad de las mezclas compactadas, prácticamente todas las mezclas asfálticas utilizadas en la construcción de carreteras tienen cierta permeabilidad. Esta permeabilidad es aceptable siempre y cuando se mantenga dentro de los límites especificados (Asphalt Institute, 2001, pág. 63).

d) Flexibilidad. La durabilidad de una mezcla asfáltica se refiere a su potencial para tolerar los efectos adversarios que el aire, temperatura, agua, y tráfico traen consigo, los cuales pueden causar el envejecimiento del asfalto, la desintegración del agregado y la separación del asfalto del agregado. Una mezcla asfáltica de calidad debe mantener su integridad

estructural y no experimentar un envejecimiento excesivo a lo largo de su vida útil en servicio (Garnica et al., 2005).

- e) **Resistencia a la fatiga.** Echeverría Rodríguez (2011) menciona que es la resistencia del pavimento a los esfuerzos producidos tras el paso repetitivo del tráfico. La falla producida es el agrietamiento por fatiga o piel de cocodrilo; se presenta cuando se tiene una estructura de pavimento de un espesor inadecuado en la carpeta superficial (muy delgada o rígida). Considerando que, al incrementar el porcentaje de vacíos de aire, por diseño o por compactación, se reduce la resistencia a la fatiga del pavimento.

- f) **Resistencia al fracturamiento por bajas temperaturas.** El agrietamiento por bajas temperaturas normalmente ocurre cuando la temperatura en la superficie del pavimento cae lo suficiente como para producir tensión inducida térmicamente en la capa de HMA que excede la resistencia a la tracción de la mezcla asfáltica. El resultado son grietas transversales que son perpendiculares a la línea central de la carreta y, a menudo, están espaciadas equidistantemente. Estas grietas comienzan en la superficie y avanzan hacia abajo.

La magnitud, la velocidad de enfriamiento, la frecuencia de las bajas temperaturas y la rigidez del ligante asfáltico son los principales factores que afectan la gravedad del agrietamiento. En general, la solución a este problema es la elección adecuada del aglomerante (Asphalt Institute, 2015).

- g) **Resistencia al deslizamiento.** La resistencia al deslizamiento de un pavimento se refiere a su capacidad para reducir el riesgo de deslizamiento al aumentar la adherencia entre los neumáticos y la superficie asfáltica, especialmente en condiciones húmedas (hidroplaneo). Es crucial que la superficie del pavimento tenga una textura rugosa y áspera, ya que esto mejora la adherencia con los neumáticos. Para lograrlo, los agregados utilizados deben ser duraderos

y resistentes al desgaste bajo condiciones de tráfico, siendo los agregados calcáreos los menos adecuados en este aspecto. Además, es importante minimizar la exudación del asfalto, ya que un exceso de este puede reducir la resistencia al deslizamiento (Quispe Martinez, 2018).

h) Trabajabilidad. La trabajabilidad se refiere a la facilidad con la que un mixturado de pavimentación logra colocarse y ser compactada. Esta propiedad puede mejorarse ajustando los parámetros de diseño de la mezcla, seleccionando el tipo de agregado adecuado y ajustando su granulometría.

La temperatura de la mezcla influye en la viscosidad del asfalto, lo cual, aunque no es la causa principal de problemas de trabajabilidad, sí tiene un impacto significativo en esta propiedad. Una temperatura demasiado baja puede complicar el proceso de trabajo con la mezcla, opuesto a esto, si la temperatura es demasiado alta provoca que la mezcla fluya más de lo normal, haciéndola más blanda e igualmente difícil de trabajarla. Por último, la proporción y grado del asfalto influyen también en la trabajabilidad de la mezcla (Asphalt Institute, 2001, págs. 63-64).

2.4.4. Propiedades Volumétricas de Mezclas Compactadas

2.4.4.1. Gravedad específica bulk de la mezcla compactada (G_{mb}).

Como lo establece el Instituto de Asfalto (2015, pág. 41), la determinación de la gravedad específica aparente (G_{mb}) de las muestras moldeadas en laboratorio y núcleos de carreteras es un componente fundamental del diseño y las pruebas de la mezcla asfáltica. Los cálculos de gravedad específica implican una masa dividida por un volumen, multiplicado por la unidad de masa de agua.

Existen tres métodos principales estandarizados para determinar la gravedad específica aparente en el laboratorio.

El más común es usado en muestras relativamente no absorbentes (impermeables), densas y utiliza la masa seca superficialmente saturada (SSD) en el cálculo. Este método se describe en las siguientes normas:

- **ASTM D2726** Gravedad Específica Aparente y Densidad de Mezclas Bituminosas Compactadas No Absorbentes;
- **AASHTO T 166** Gravedad Específica Aparente de Mezcla Asfáltica Compactada en Caliente (HMA) Utilizando Muestras Saturadas Con Superficie Seca.

Hay dos métodos destinados a muestras relativamente absorbentes (permeables). El primero es el método CoreLok, que se describe en los siguientes procedimientos:

- **ASTM D6752** Gravedad Específica Aparente y Densidad de Mezclas Bituminosas Compactadas Utilizando el Método de Sellado al Vacío Automático;
- **AASHTO T 331** Gravedad Específica Aparente y Densidad de Mezcla Asfáltica Compactada en Caliente (HMA) Utilizando el Método de Sellado al Vacío Automático.

Al igual que el método CoreLok, el método cubierto de parafina está diseñado para usarse en muestras de mezcla compactada con absorción de agua (infiltración) superior al 2.0 por ciento en volumen. Sella la superficie de asfalto de manera similar a las bolsas selladas al vacío. El procedimiento de prueba esta estandarizado en lo siguiente:

- **ASTM D1188** Gravedad Específica Aparente y Densidad de Mezclas Bituminosas Compactadas Utilizando Muestras Recubiertas;
- **AASHTO T 275** Gravedad Específica Aparente de Mezcla Asfáltica Compactada en Caliente (HMA) Utilizando Muestras Recubiertas de Parafina.

a) ***Determinación de G_{mb} mediante el Método SSD.***

El método SSD se emplea en muestras de mezclas compactadas con una absorción de agua menor o igual al 2,0 por ciento del volumen de la muestra

según lo designado en AASHTO T 166 o ASTM D2726. La absorción de agua se puede determinar de la siguiente manera:

$$\% \text{ agua absorbida por volumen} = 100 \times \frac{(B - A)}{(B - C)} \quad (1)$$

Donde:

Ecuación

A = masa seca de la muestra en el aire

B = masa saturada superficialmente seca de la muestra en el aire

C = masa de la muestra en agua

Después de mezclar y compactar la mezcla. La masa de la muestra se determina al aire (seca), mientras que se sumerge en agua, y luego nuevamente al aire después de secar la superficie (superficie saturada y seca). Lo siguiente será colocar la muestra directamente bajo el agua y determinar su masa. La masa saturada de la superficie seca (SSD) se obtiene secando rápidamente la muestra para que la superficie no quede brillante. La gravedad específica aparente es la masa de la muestra dividida por la masa (volumen) de agua que desplaza.

$$G_{mb} = \frac{A}{(B - C)} \quad (2)$$

Donde:

A = masa seca de la muestra en el aire

B = Masa saturada de superficie seca (SSD) de la muestra en el aire

C = masa de la muestra en agua a 77°F (25°C)

b) Gravedad Específica Máxima Teórica, G_{mm} .

La determinación de la gravedad específica máxima teórica (G_{mm}) de las mezclas asfálticas sueltas es otro componente importante en el diseño y prueba de la mezcla asfáltica que involucra una masa dividida por un volumen multiplicado por la unidad de masa de agua. Si las muestras de G_{mb} y G_{mm} tuvieran el mismo peso seco en el aire, los numeradores de la ecuación de gravedad específica serían los mismos para G_{mb} y G_{mm} , pero el

denominador del cálculo de G_{mm} es menor porque no incluye el volumen de aire. Por lo tanto, G_{mm} siempre debe ser un número mayor que G_{mb} .

La práctica más comúnmente utilizada para determinar la gravedad específica máxima teórica está estandarizada en los siguientes métodos de prueba ASTM y AASHTO:

- **ASTM D2041** Gravedad Específica Máxima Teórica y Densidad de Mezclas Bituminosas para Pavimentos
- **AASHTO T 209** Gravedad Específica Máxima Teórica y Densidad de la Mezcla Asfáltica en Caliente (HMA).

Hallar la gravedad máxima teórica consiste en tres pasos básicos. La mezcla suelta se calienta y se separa en agregados sueltos recubiertos individualmente. Se separa una masa mínima, especificada en T 209, de la mezcla seca suelta y se coloca en un picnómetro calibrado y se cubre con agua. Se coloca una tapa de vacío y se fija el picnómetro y se coloca sobre una mesa vibratoria. Se pone en marcha una bomba de vacío y se utiliza la lectura del manómetro o del manómetro absoluto para determinar el ajuste de vacío adecuado. Una vez que se obtiene el vacío adecuado (casi absoluto, 27,5 mm Hg), se pone en marcha la mesa agitadora. Esto proporciona una agitación suave para ayudar a eliminar el aire entre las partículas. La agitación asegura que el aire en la mezcla esté lo más cerca posible de cero. G_{mm} es la masa del agregado recubierto dividida por el volumen del agregado recubierto. Los huecos de aire se calculan a partir de las gravedades específicas aparente y máxima (G_{mb} y G_{mm}). La relación entre estas dos gravedades específicas es en realidad el porcentaje en volumen de sólidos (en forma decimal).

2.4.4.2. Gravedad Específica Bulk (Seca) del agregado (G_{sb}).

a) G_{sb} para el agregado grueso.

El G_{sb} grueso se determina utilizando AASHTO T 85 o ASTM C127. El tamaño de la muestra de prueba se especifica y determina por el tamaño nominal máximo del agregado. Este procedimiento requiere que el agregado

seco esté saturado para determinar el volumen del agregado más los huecos permeables al agua.

$$G_{sb} = \frac{m}{v\rho} = \frac{\text{masa de agregado secado en horno}}{(\text{volumen de agregado} + \text{huecos permeables de agua}) * \rho}$$

$$= \frac{A}{B - C} \quad (3)$$

Donde:

G_{sb} = Gravedad específica bulk (seca) del agregado

A = masa de la muestra secada en el horno

B = masa de la muestra saturada superficialmente seca (SSD) en el aire

C = masa de la muestra saturada en agua

b) G_{sb} para el agregado fino.

El G_{sb} fino se determina utilizando AASHTO T 84 o ASTM C128. El agregado seco se satura nuevamente para tener en cuenta el volumen del agregado más los huecos permeables al agua.

Después de que el agregado fino se haya secado hasta una condición de superficie seca saturada (SSD) (como se especifica en AASHTO T 84), el volumen del agregado fino SSD se determina sumergiendo la muestra en un matraz volumétrico (picnómetro) para desairarlo. En AASHTO T 84 se sugiere retirar el agregado fino y el agua del picnómetro y secar hasta obtener una masa constante.

$$G_{sb} = \frac{m}{v\rho} = \frac{\text{masa de agregado secado en horno}}{(\text{volumen de agregado} + \text{huecos permeables de agua}) * \rho}$$

$$= \frac{A}{B + S - C} \quad (4)$$

Donde:

G_{sb} = Gravedad específica bulk (seca) del agregado

A = masa de la muestra secada en el horno

B = masa del picnómetro lleno de agua

S = masa de la muestra saturada superficialmente seca (SSD)

C = masa del picnómetro con muestra y agua hasta la marca de calibración

c) *G_{sb} para la mezcla de agregados.*

Una vez que se ha determinado la gravedad específica bulk (seca) para cada agregado, la gravedad específica bulk (seca) combinada para la mezcla total de agregados se calcula de la siguiente manera:

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}} \quad (5)$$

Dónde:

G_{sb} = gravedad específica aparente (seca) del agregado

P₁, P₂, P_n = porcentajes en peso de los áridos 1, 2, hasta n

G₁, G₂, G_n = gravedad específica bulk (seca) de los agregados 1, 2, hasta n

2.4.4.3. Gravedad Específica Aparente (G_{sa}).

G_{sa} es la relación entre la masa del agregado secado al horno y el volumen del agregado excluyendo el volumen de los huecos ocupados por el agua absorbida. El volumen de G_{sa} es menor que el volumen utilizado para calcular el G_{sb}; por lo tanto, el valor de G_{sa} siempre será mayor que el valor de G_{sb}.

$$G_{sa} = \frac{m}{v\rho} = \frac{\text{masa de agregado secado en horno}}{(\text{volumen total de agregados}) * \rho} = \frac{A}{A - C} \quad (6)$$

Donde:

G_{sb} = Gravedad específica aparente del agregado

A = masa de la muestra secada en el horno

C = masa de la muestra saturada en agua

2.4.4.4. *Gravedad Específica Efectiva del agregado (G_{se}).*

La gravedad específica efectiva es la relación entre la masa seca en horno de una unidad de volumen de agregado (incluido tanto el volumen sólido del agregado como los huecos penetrables al agua sin contenido de asfalto) y la concentración del mismo volumen de agua. El G_{se} se puede calcular de la siguiente manera:

$$G_{se} = \frac{P_s}{\frac{100}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \quad (7)$$

Siendo:

G_{se} = la gravedad específica efectiva del agregado

P_s = porcentaje de agregado por peso total de la mezcla

P_b = porcentaje de aglutinante por peso total de la mezcla, al que se realizó la prueba G_{mm}

G_{mm} = gravedad específica máxima de la mezcla de pavimentación

G_b = gravedad específica del aglutinante

2.4.4.5. *Porcentaje de Vacíos de Aire en Mezclas Compactadas.*

Consiste en pequeños espacios de aire entre partículas de agregado recubiertas, la propiedad P_a se define mediante la siguiente relación:

$$P_a = 100 * \frac{V_a}{V_{mb}} \quad (8)$$

Aunque esta proporción se puede determinar de distintas maneras desemejantes, la ecuación descrita a continuación es la que más se maneja:

$$P_a = 100 - \frac{100 * P_{mb}}{G_{mm}} \quad (9)$$

Siendo:

P_a = vacíos llenos de aire en la mezcla previamente compactada, medida en porcentaje del volumen total de la mezcla.

G_{mm} = gravedad específica máxima de la mezcla de pavimentación

G_{mb} = peso específico aparente de la mezcla de pavimentación

2.4.4.6. *Porcentaje VMA en mezcla compactada.*

También denominado en su estado de abreviación como VMA, representan el espacio vacío entre las partículas de agregado en una mezcla de pavimentación compactada, incluyendo tanto los huecos de aire como el volumen efectivo de asfalto. Este valor se muestra como una proporción en porcentaje del volumen total de la mezcla. El VMA, generalmente se obtiene del cálculo que involucra el peso específico bulk del agregado y se denota en porcentaje del volumen bulk de la mezcla de pavimentación compactada. Para calcular el VMA, se resta el volumen ocupado por el agregado (determinado por su peso específico bulk) del volumen bulk total de la mezcla de pavimentación compactada. Y se define mediante la siguiente relación:

$$VMA = 100 * \frac{V_a + V_{be}}{V_{mb}} \quad (10)$$

VMA se calcula más fácilmente utilizando la siguiente ecuación:

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb}P_s}{G_{sb}} \quad (11)$$

Dónde:

VMA = vacíos en el agregado mineral

Gmb = peso específico aparente de la mezcla de pavimentación

Ps = porcentaje de agregado por peso total de la mezcla

Gsb = gravedad específica bulk (seca) del agregado

Va = volumen de huecos en la mezcla compactada, normalmente en cm³

Vbe = volumen del aglutinante efectivo (no absorbido), normalmente en cm³

Vmb = volumen total de mezcla compactada, típicamente en cm³

2.4.4.7. *Porcentaje de VFA en mezcla compactada.*

Los vacíos llenados con asfalto (VFA) es el porcentaje en volumen del VMA que se llena con el ligante efectivo. Los VFA, al igual que los VMA, también tienden a aumentar a medida que la mezcla se vuelve más fina y gana más superficie total de agregado. El VFA se puede calcular con cualquiera de las siguientes ecuaciones.

$$VFA = 100 * \frac{V_{be}}{V_{be} + V_a} \quad (12)$$

El VFA se calcula más fácilmente con la siguiente ecuación:

$$VFA = 100 - \frac{VMA - P_a}{VMA} \quad (13)$$

Dónde:

VFA = vacíos llenos de asfalto

VMA = vacíos en el agregado mineral

Pa : vacíos llenos de aire en la mezcla primero a compactación, proporción en porcentaje del volumen total de la mezcla.

Vbe = volumen del aglutinante eficaz (no absorbido), normalmente en cm³

Va = volumen de huecos en la mezcla compactada, normalmente en cm³

2.4.4.8. *Absorción de aglutinante.*

El porcentaje de absorción de aglutinante (Pba) es el porcentaje en masa de aglutinante que se absorbe en el agregado. Se supone que la cantidad de aglutinante absorbida por el agregado es un valor constante; por lo tanto, se calcula en base a la masa del agregado. Tenga en cuenta que, si la absorción se calculara en función de la masa total de la mezcla, el porcentaje de absorción cambiaría según la cantidad de aglutinante agregado a la mezcla.

Se define mediante la siguiente relación:

$$P_{ba} = 100 * \frac{M_{ba}}{M_s} \quad (14)$$

Pba se calcula más fácilmente con la siguiente ecuación:

$$P_{ba} = 100 * \frac{(G_{se} - G_{sb})}{(G_{se} * G_{sb})} * G_b \quad (15)$$

Dónde:

Pba = conglomerante absorbido, porcentaje en masa de agregado

Gse = gravedad específica efectiva del agregado

Gsb = gravedad específica aparente (seca) del agregado

Gb = gravedad específica del aglutinante

Mba = masa del asfalto absorbido, normalmente en gramos

Ms = masa del agregado, típicamente en gramos

2.4.4.9. Contenido efectivo de aglutinante de una mezcla de pavimentación.

El contenido efectivo de conglomerante (Pbe) de una mezcla de pavimentación es el porcentaje en masa de conglomerante que permanece en el exterior de las partículas de árido y no es absorbido. Es eficaz o utilizable como “pegamento” que une la mezcla y gobierna el rendimiento de una mezcla de pavimentación asfáltica.

Tenga en cuenta que Pbe se expresa como porcentaje de la masa total de la mezcla. Eso significa que matemáticamente, $P_{ba} + P_{be} \neq P_b$, el contenido total de conglomerante, porque Pba es un porcentaje del agregado total y Pbe es un porcentaje de la mezcla total. Sin embargo, la masa del agregado total y la masa de la mezcla total tienen una magnitud tan cercana que, en un sentido práctico, cuando se calcula al 0,1 por ciento más cercano, los contenidos de aglutinante absorbido y efectivo sumados generalmente equivalen al contenido total de aglutinante. Se puede calcular de la siguiente manera:

$$P_{be} = 100 * \frac{M_{be}}{M_{mb}} \quad (16)$$

Pbe se calcula más fácilmente con la siguiente ecuación:

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba}}{100} * P_s \quad (17)$$

Dónde:

P_{be} = aglutinante eficaz, porcentaje en masa de la mezcla
 P_b = aglutinante total, porcentaje en masa de la mezcla
 P_{ba} = conglomerante absorbido, porcentaje en masa de agregado
 P_s = agregado total, porcentaje en masa de mezcla
 M_{be} = masa del aglutinante eficaz, normalmente en gramos
 M_{mb} = masa de la mezcla total, normalmente en gramos

2.4.5. Método Marshall.

Bruce Marshall, quien precedentemente ocupaba el deber de ingeniero de Bitúmenes en el Departamento de Carreteras del Estado de Mississippi, creó el Método Marshall para el diseño de mezclas de pavimentación. El Cuerpo de Ingenieros decidió adoptar y adaptar este método para la inspección y diseño de mezclas de tipo pavimento bituminoso in situ, en parte porque utilizaba equipos portátiles.

El objetivo del Método Marshall es encontrar la cantidad óptima de asfalto para una mezcla específica de agregados. Además, este método proporciona datos sobre las propiedades de las mezclas asfálticas en caliente y establece los requisitos óptimos de densidad y contenido de vacíos que deben cumplirse durante la construcción del pavimento (Asphalt Institute, 2001, pág. 70).

El diseño desarrollado a probado no ser el mejor por no simular adecuadamente las condiciones de carga y sobre estimar el contenido de asfalto llevando a deformaciones plásticas excesivas, pero tiene la ventaja de ser sencillo de aplicar y los costos del equipo para desarrollarlo son económicos. (Garduño Pérez, 2005)

Se preparan los especímenes o briquetas calentando y mezclando asfalto y material acompañante del tipo granular, los cuales luego se compactan por impacto utilizando moldes estandarizados. Según la norma ASTM D1559, las medidas estandarizadas de los especímenes o briquetas están comprendidas en 64 mm (2 ½ pulgadas) de altura y 102 mm (4

pulgadas) de diámetro. En este procedimiento de diseño evalúa varios aspectos importantes como el porcentaje de vacíos en la mezcla, la densidad, los vacíos rellenos de asfalto y los vacíos en el agregado. Además, se realizan pruebas de estabilidad y flujo en los especímenes compactados previamente. (Ayala Cabrera & Heredia Miranda, 2019)

2.4.5.1. Parámetros resistentes y pruebas.

a) Estabilidad y Flujo Marshall.

La prueba de estabilidad y flujo se realiza para determinar los valores de cohesión y fricción de una mezcla asfáltica. La estabilidad se define como la máxima resistencia en Newtons que desarrolla un espécimen estándar a 60 °C durante el ensayo. Por otro lado, el valor de flujo corresponde a la deformación o variación del diámetro de la briqueta en unidades de 0.25 mm (1/100 de pulgada) desde la carga inicial hasta la máxima carga que se da en la ruptura mientras se lleva a cabo la prueba de estabilidad (Asphalt Institute, 2014).

El ensayo procede del siguiente modo, según el Instituto de Asfalto (2014).

- (a) Determinar la altura de la muestra.
- (b) Sumergir la muestra en un baño de agua a $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ($140^{\circ}\text{F} \pm 1,8^{\circ}\text{F}$) durante 30 a 40 minutos antes del ensayo.
- (c) Secar la superficie de cada briqueta retirada del baño María y posteriormente colocarla en la mordaza inferior, asegurándose de ajustar la mordaza superior de manera que la probeta o muestra se encuentre centrada en el equipo de carga.
- (d) Aplicar carga al espécimen a una velocidad constante de deformación de 51 mm (5 pulgadas) por minuto hasta que se produzca la falla del espécimen.
- (e) Definir el punto de falla como la lectura máxima de carga alcanzada durante la prueba.
- (f) Durante la prueba de estabilidad, si no se cuenta con un equipo de registro automático, es necesario conservar el medidor de flujo adyacente a

la superficie denominada como barra guía. Así, cuando la carga cese y empiece a decrecer, se actúe rápido para la toma de lectura y denotarla como el valor conclusivo de flujo. La diferencia entre este valor final de flujo y el inicial se expresa en unidades de 0.25 mm (1/100 de pulgada).

b) *Contenido Óptimo de Asfalto.*

Para determinar este contenido, se fabricarán cinco conjuntos de tres briquetas, cada uno con un porcentaje de asfalto diferente. Se calculará el promedio de los parámetros volumétricos, como el porcentaje de vacíos en la mezcla (V_a), el porcentaje de vacíos en los agregados (VMA), el porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA), y la gravedad específica bruta de la mezcla (G_{mb}), así como los parámetros de resistencia, como la estabilidad y el flujo. Con estos datos se generarán las gráficas correspondientes.

Para determinar el contenido óptimo de asfalto, se deben seguir los criterios establecidos en el Método Marshall. Se seleccionará un porcentaje de asfalto que permita obtener un promedio de los límites de vacíos en la mezcla, que es del 4%. Con este contenido de asfalto, se calcularán las cantidades de las propiedades volumétricas. Así mismo, si los resultados reflejan el cumplimiento con los requisitos especificados en las Tablas, entonces se considerará que dicho contenido es óptimo. En caso de que alguno de los criterios no se cumpla, será necesario realizar unos cambios que se ajusten a la normativa vigente o en últimas instancias el rediseño de la mezcla (Asphalt Institute, 2014).

2.4.6. Módulo Dinámico.

Para materiales viscoelásticos lineales como mezclas de HMA, la relación tensión-deformación bajo una carga sinusoidal continua se define por su módulo dinámico complejo (E^*). Este es un número complejo que relaciona la tensión con la deformación para materiales viscoelásticos lineales sujetos a carga sinusoidal aplicada continuamente en el dominio de la frecuencia. El módulo complejo se define como la relación entre la amplitud de la tensión sinusoidal en un momento

dado, t , y la frecuencia de carga angular, ω , $\delta = \delta_o \sin(\omega t)$ y la amplitud de la deformación sinusoidal $\varepsilon = \varepsilon_o \sin(\omega t - \phi)$, al mismo tiempo y frecuencia, que resulta en una respuesta de estado estable (Dougan et al., 2003).

Puede ser matemáticamente modelada como:

$$E^* = \delta/\varepsilon = \delta_o \mathbf{e}^{i\omega t} / \varepsilon_o \mathbf{e}^{i(\omega t - \phi)} = \delta_o \sin \omega t / \varepsilon_o \sin(\omega t - \phi) \quad (18)$$

Donde:

δ_o = esfuerzo pico (máximo)

ε_o = tensión máxima (máxima)

ϕ = ángulo de fase, grados

ω = velocidad angular

t = tiempo, segundos

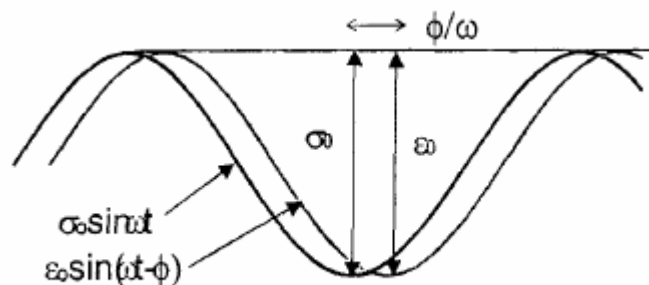
i = componente imaginaria del módulo complejo

Analógicamente en términos de cálculo, el módulo dinámico se puntualiza como el valor absoluto del módulo complejo, o:

$$|E^*| = \delta_o / \varepsilon_o \quad (19)$$

Figura 8

Prueba de módulo dinámico (complejo)



Nota. tomado de E^* - *DYNAMIC MODULUS. Test Protocol – Problems and Solutions* (p. 2), Por Dougan et al. (2003).

Existen varios métodos prácticos para la obtención de los módulos dinámicos de las carpetas asfálticas, entre los que se tiene: ensayos de laboratorio, formulas empíricas y nomogramas.

Mediante ensayos de laboratorio los más frecuentes son:

- Ensayo de compresión encofinada
- Ensayos de mezclas asfálticas con la norma ASTM D3497-79 (2003)
- Tensión por flexión de una viga con carga aplicada en el tercio central

En cuanto el uso de fórmulas generales para la determinación del módulo dinámico de carpetas asfálticas se tiene las siguientes:

- Del Instituto del Asfalto
- Fórmulas de Heukelom y Klomp
- Formula General de Witczak

2.4.7. Fórmula General de Witczak.

La ecuación general de Witczak se aplica a partir de parámetros volumétricos y de características específicas de los agregados y del ligante asfáltico en un rango de temperaturas (-17.7 a 54.4 °C) y frecuencias de carga (0.1 a 25 Hz) (Elizondo et al., 2007).

$$\begin{aligned}
 & \log E^* \\
 & = 3.750063 + 0.02932\rho_{200} - 0.0011767(\rho_{200})^2 - 0.002841\rho_4 \\
 & - 0.058097V_a - 0.802208\left(\frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a}\right) \\
 & + \frac{3.871977 - 0.0021\rho_4 + 0.003958\rho_{38} - 0.000017(\rho_{38})^2 + 0.005470\rho_{34}}{1 + e^{(-0.603313 - 0.31335 \log(f) - 0.393532 \log(\eta))}}
 \end{aligned} \tag{20}$$

Donde:

E^* : Módulo dinámico de la carpeta asfáltica, psi

V_a : Contenido de vacíos de aire, %

V_{beff} : Contenido de asfalto efectivo, % por volumen

ρ_{34} : Porcentaje retenido acumulado en la malla de 19 mm (3/4 pulg)

ρ_{38} : Porcentaje retenido acumulado en la malla de 9.53 mm (3/8 pulg)

ρ_4 : Porcentaje retenido acumulado en la malla No. 4

ρ_{200} : Porcentaje pasando en la malla No. 200

η : Viscosidad del asfalto al envejecimiento y temperatura de interés, 10^6 Poise

f : Frecuencia correspondiente a la velocidad de operación y la altura de la muestra de asfalto

CAPITULO III: METODOLOGÍA

3.1. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN

3.1.1. Tipo.

Conforme Esteban Nieto (2018) la investigación aplicada se enfoca en resolver los problemas que surgen en los procesos de producción, distribución, circulación y consumo de bienes y servicios en diversas actividades humanas. Su objetivo principal es mejorar, perfeccionar u optimizar el funcionamiento de sistemas, procedimientos, normas y reglas tecnológicas existentes a la luz de los avances científicos y tecnológicos. Por lo tanto, este tipo de investigación no se evalúa en términos de verdadero, falso o probable, sino en términos de eficiencia, deficiencia, ineficiencia, eficacia o ineficacia.

Este trabajo es de tipo aplicada, pues tiene el propósito de analizar la funcionabilidad de una mezcla asfáltica con relación al módulo dinámico con la finalidad de evidenciar resultados más específicos del comportamiento de la mezcla como una superficie de rodadura, en contaste, con la caracterización que proporciona la relación Estabilidad/Flujo del método Marshall, evaluando también la eficiencia de los parámetros considerados para el diseño y control de calidad de las estructuras de pavimento.

3.1.2. Nivel.

Kinney y Taylor ostentan que la investigación exploratoria es el primer paso en una serie de estudios orientados a proporcionar información para la toma de decisiones, pues su objetivo es formular hipótesis sobre problemas potenciales y oportunidades en la situación de decisión (Universidad Latinoamericana, 2017).

Esta investigación tiene un nivel exploratorio porque pretende informar sobre el comportamiento dinámico de la mezcla asfáltica, a partir del análisis de su módulo dinámico, indagando más sobre este parámetro y las posibilidades que ofrece para el diseño y control de calidad mezclas asfálticas.

3.2. MÉTODO, ENFOQUE Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

3.2.1. Método.

Quezada Abad et al. (2018) señalan que “el método deductivo se fundamenta en el razonamiento que permite formular juicios partiendo de argumentos generales para demostrar, comprender o explicar los aspectos particulares de la realidad”, en la presente investigación se parte de generalidades sobre el diseño de mezclas asfálticas, que permiten entender el posterior análisis del comportamiento dinámico sintetizado en el estudio del módulo dinámico de la mezcla obtenida, con la finalidad de estimar la veracidad de su vida útil.

3.2.2. Enfoque.

Para Hernández Sampieri et al. (2014) los métodos mixtos consisten en una serie de procedimientos empíricos, sistemáticos, y trascendentales de indagación que contienen la recaudación y el examen de datos cualitativos y cuantitativos, estos datos se integran y discuten conjuntamente, permitiendo realizar inferencias basadas en toda la información recopilada y proporcionando un entendimiento más completo del fenómeno estudiado; para este caso se contempla el enfoque mixto pues se presentan las características y propiedades de los materiales, de la mezcla asfáltica y del pavimento como antecedentes para comprender el tema tratado, teniendo la parte cualitativa, mientras que los datos cuantitativos están presentes dentro de las normativas y ensayos que se tomaron para el desarrollo de la investigación.

3.2.3. Diseño.

Ramos Galarza (2021) declara que “la investigación experimental se identifica por la operación intencionadamente de la variable independiente y el estudio de la consecuencia ocasionada sobre una variable dependiente”, en la presente investigación el interés es analizar los resultados de los módulos dinámicos obtenidos a partir de someter los especímenes a variaciones de frecuencias que asemejan la variabilidad de tránsito, mostrando el comportamiento de las mezclas asfálticas desde una perspectiva dinámica poco usual en el medio local y no tan

estudiada a nivel nacional, denotando así también el carácter experimental del estudio.

3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.3.1. Población.

Arias (2012) define que “la población o universo es un conjunto infinito o finito de factores con peculiaridades comunes para las cuales serán ampliables las conclusiones de la indagación, la misma delimitada por el problema y por los objetivos de estudio”, según este concepto, para este trabajo se toma como población de estudio las briquetas o especímenes de mezcla asfálticas convencional previamente elaboradas.

3.3.2. Muestra.

Tamayo y Tamayo (2004) interpreta que la muestra se basa en el principio de que las partes representan la población de las que se tomaron, reflejando así las características de la población proveniente e indicando su representatividad, es decir, para generalizar con precisión sobre una población, es esencial contar con una muestra completamente representativa, por lo tanto, la validez de la generalización depende tanto de la validez como del tamaño de la muestra.

Conforme lo expuesto, la muestra representativa del presente trabajo de investigación son las 12 briquetas de mezcla asfáltica convencional, las mismas que fueron ensayadas bajo en fin de analizar el comportamiento dinámico de la mezcla.

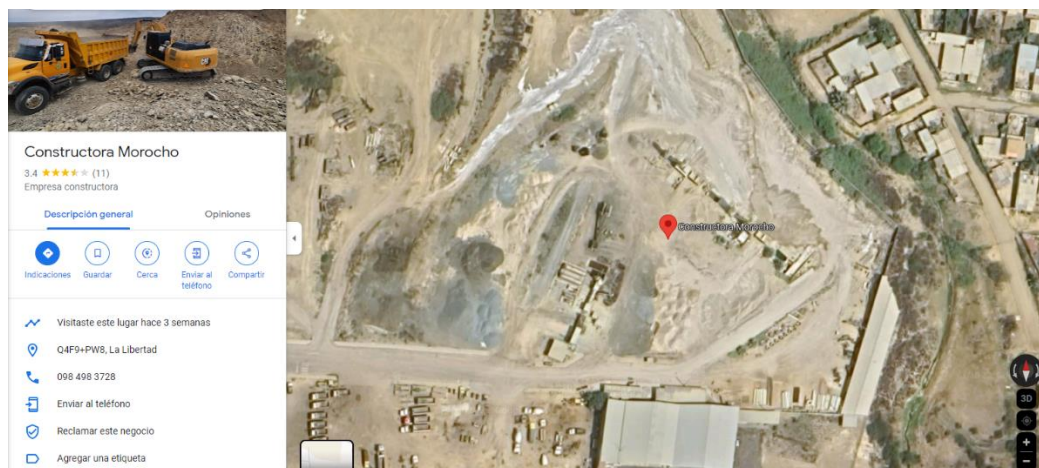
3.4. METODOLOGÍA DEL O.E.1: DISEÑAR UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE LA METODOLOGÍA MARSHALL, QUE CUMPLA CON LOS ESTÁNDARES DE LA RELACIÓN ESTABILIDAD/FLUJO MARSHALL PARA ASEGURAR EL CUMPLIMIENTO DE LAS ESPECIFICACIONES

3.4.1. Recolección de Materiales.

Para el diseño de la mezcla asfáltica se solicitó aproximadamente 40kg de muestras de materiales, que fueron proporcionado por el campamento de la empresa del Ing. Carlos Morocho Duque S.A CM Construcciones, ubicada en el cantón La Libertad, tal como se observa en la Figura 9; se suministró piedra $\frac{3}{4}$, piedra cisco $\frac{3}{8}$, y arena, para los ensayos correspondientes, con procedencia de Guayas, y Santa Elena.

Figura 9

Ubicación de la empresa S.A CM Construcciones



Nota. Ubicación del campamento de la constructora del Ing., *Carlos Morocho Duque S.A. CM Construcciones*, proveedora de los agregados calificados para mezclas asfálticas, figura extraída de *Google Maps*.

Los agregados por utilizar se presentan en las siguientes figuras:

Figura 10

Agregado 3/4 proveniente de la cantera Chivería



Nota. Agregado $\frac{3}{4}$ disponible en la constructora, que proviene de la cantera Chivería en Guayaquil.

Figura 11

Agregado Arena



Nota. Agregado fino: arena natural; proveniente del Rio Guayas.

Figura 12

Agregado Piedra Chispa (Cisco)



Nota. Agregado de tamaño *intermedio*: cisco o piedra chispa; procedente del cerro El tablazo ubicado en Santa Elena.

Figura 13

Cemento Asfáltico



Nota. Cemento asfáltico tipo AC 20, procedente de Esmeraldas.

3.4.2. Caracterización de Materiales para Dosificaciones de Mezclas Asfálticas en Caliente.

Los agregados incorporados a las mezclas asfálticas, sean convencionales o modificadas, deben evaluar sus propiedades y resistencia a través de ensayos de laboratorio: granulometría de los agregados, gravedad específica y absorción, y abrasión de los Ángeles y cumplir con las exigencias acorde a la norma ASTM, de modo que se pueda obtener una dosificación adecuada con los agregados para que

sea posible la elaboración de un diseño óptimo de mezclas asfálticas, en este caso, con un tamaño máximo nominal de 3/4"(19 mm), evaluadas en el presente trabajo.

3.4.2.1. Caracterización del agregado.

a) Granulometría.

Haciendo uso de los agregados presentados se procede a pasar una determinada cantidad de cada material en forma individual por un tamizado mediante mallas de distinta gradación de acuerdo con las exigencias de la normativa ASTM y MTOP para “mezclas asfálticas en caliente” a partir del tamaño máximo nominal $\frac{3}{4}$.

Tabla 12

Granulometría Tradicional

AGREGADO	% PASANTES										
	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 8	No. 16	No. 30	No.5	No.10	No.20
	25,4	19,0	12,7	9,5	4,75	2,36	1,18	0,60	0,30	0,15	0,075
1 PIEDRA A 3/4	100	100	51,23	12,73	0,37	0,10	0,10	0,09	0,09	0,08	0,05
2 ARENA	100	100	100	98,60	96,69	94,07	90,02	79,92	14,48	2,51	0,48
3 CISCO	100	100	100	96,12	66,23	44,95	31,11	22,40	14,17	8,78	4,69

Nota. Granulometría de los agregados realizada en el laboratorio de mecánica de suelos de la UPSE.

Figura 14

Muestras de agregados finos y gruesos para tamizar



b) Gravedad específica de los materiales.

- I. Gravedad específica y absorción del agregado grueso.** Los equipos implicados y la ejecución de los procedimientos para determinar la gravedad específica de los agregados gruesos se establecen en las normas AASHTO T-85 y ASTM C-127, donde se presenta las cantidades recomendadas para ensayar el material previsto, especificadas en la Tabla 13, en este caso, para la piedra $\frac{3}{4}$ con un tamaño máximo nominal de 19.0 mm se prueba con una cantidad un poco mayor a la indicada a razón de obtener resultados procesos con menos errores por pérdida.

Tabla 13

Cantidades mínimas para el ensayo de Gravedad Específica en la mezcla tradicional o convencional.

Tamaño nominal, mm (pulg)	Cantidad mínima, gr.
12,5 (1/2)	2000
19,0 (3/4)	3000
25,0 (1)	4000
37,5 (1 1/2)	5000

Nota. Especificaciones de masa mínima de la muestra en gramos a usar en el ensayo de acuerdo con el tamaño nominal, extraído de ASTM D75.

Aproximadamente ± 5200 gramos del material grueso es lavado para eliminar excedentes de impurezas que contenga y acto seguido es llevado al horno a 110 °C durante 1 hora, posteriormente se sumerge en agua durante 24 horas.

Pasado las 24 horas se retira la muestra del agua, y se tamiza por la malla N° 4 y se desecha el pasante. Se seca con una franela para alcanzar el estado superficialmente seco S.S.S. y se pesan más o menos los 5000 gramos y se registra el dato para posterior calculo. Se coloca la muestra en la canastilla adecuada para el ensayo, la cual debe estar suspendida y sumergida completamente en agua para poder registrar el peso del material sumergido. Finalmente, la muestra se retira en un recipiente y es llevada al horno para capturar su peso en la condición seca y poder calcular las gravedades específicas.

II. Gravedad específica y absorción del agregado fino. Los equipos usados y procedimientos desarrollados para determinar la gravedad específica aparente y Bulk de los agregados finos se detallan en AASHTO T84 y la normativa internacional ASTM C-128.

Para realizar este ensayo se debe extraer una muestra de aproximadamente 1000 gramos y dejar secar al horno a 110°C, posterior a eso se lleva a un recipiente y se llena de agua hasta sumergir la muestra y se deja reposar 24 horas. Cuando se haya cumplido el tiempo establecido, la muestra debe ser extraída del agua con cuidado de manera que no haya pérdida del material, y ser llevada a una superficie lisa donde se pueda esparcir hasta asegurar que vuelva a su condición de seco, para ello se procede a llevar a exposición solar o alguna fuente de calor.

Una vez seco el material, se necesita un molde cónico con su pisón, para comprobar que el material se encuentra en su estado idóneo para el ensayo de gravedad y absorción, el procedimiento sigue como se detalla: el molde cónico es colocado sobre la superficie de manera que el radio más grande quede abajo, se coloca material dentro del cono y se procede a compactar levemente con el pisón a 25 golpes, puede ser en 3 capas, 10 golpes la primera capa, 8 la segunda capa y 7 la tercera capa, acto seguido retirar el cono para que el material caiga por acción de la gravedad, la misma que debe estar a una altura no menos de unos 5 mm respecto a la muestra. Si el cono se levanta y el material cae por encima de los 5 mm respecto de la muestra, quiere decir que el material se ha secado más de lo permitido, por lo que se debe adicionar un pequeño contenido de agua y repetir el proceso.

Una vez habiendo comprobado que el material se encuentra en el estado óptimo, aproximadamente 500 gramos del material en la condición saturada superficialmente seca se colocan en un matraz y se llena con agua hasta la marca que indica el recipiente, con anterioridad haber pesado el matraz lleno de agua hasta la marca. Se da unos golpecitos, maniobramos para retirar partículas de aire o vacío dentro del matraz y

se procede a pesar. Y se retira el material en un recipiente y se lleva al horno a 110°C por 24 horas para extraer el material en su estado seco.

c) *Desgaste por medio de la máquina de abrasión de Los Ángeles.*

El Ensayo de Desgaste por medio de la máquina de abrasión de Los Ángeles, referido de las normas ASTM C-131 o AASHTO T-96 y ASTM C-535, comprende la medición de resistencia a las fuerzas abrasivas que están en puntos de contacto de un agregado refiriéndose al desgaste/abrasión, en este caso del material $\frac{3}{4}$ y del agregado grueso cisco. Para este ensayo necesitamos la máquina de abrasión de Los Ángeles, un tambor giratorio, y esferas de acero normadas. A partir de la granulometría se puede deducir con qué método trabajar, A, B, C, y D según el agregado empiece a retener material.

El agregado $\frac{3}{4}$ no contiene ninguna cantidad al pasar por los tamices 1 $\frac{1}{2}$, 1 pulgadas, por lo que el primer método no es el que corresponde a este material, y se descarta el método A. Al igual se procede a tamizar según lo estipula el método B y se puede observar que si está en cumplimiento con el rango establecido, ya que lo que pasa el tamiz $\frac{3}{4}$ de abertura 19 mm y el mismo material se retiene en el tamiz $\frac{1}{2}$, además, también hay material en el $\frac{1}{2}$ y retiene en $\frac{1}{4}$. Una vez definido por qué método se va a trabajar se procede a recolectar el material necesario para realizar el ensayo según lo estipula la norma ASTM C-131.

Tabla 14

Especificaciones del método y cantidades de materiales a ensayar según la granulometría del agregado o muestra.

ABERTURAS				METODO			
PASA TAMIZ		RETENIDO EN TAMIZ		A	B	C	D
Nº	"mm"	Nº	"mm"	Cantidad de material a emplear			
1	37,50	1	25,00	1250±2			
1/2				5			
1	25,00	3/4	19,00	1250±2			
				5			
3/4	19,00	1/2	12,50	1250±2	2500±1		
				5	0		

1/2	12,50	3/8	9,50	1250±2 5	2500±1 0		
3/8	9,50	1/4	6,25			2500±1 0	
1/4	6,25	N°4	4,76			2500±1 0	
N° 4	4,76	N°8	2,38				5000±1 0
Total				5000±1 0	5000±1 0	5000±1 0	5000±1 0
Número de Esferas				12	11	8	6
Número de Revoluciones				500	500	500	500
Tiempo de Rotación en "min"				15	15	15	15

Nota. Tabla que contiene el peso de agregado granular y cantidad de Esferas a utilizar para materiales de diámetros gruesos hasta de 38,1 mm (1 1/2") (Ensayo de Abrasión ASTM C - 131)

Figura 15

Tamizado de los agregados gruesos, cisco y piedra 3/4



Nota. Se necesita tamizar el material grueso para corroborar a qué método pertenece.

Ya con el método establecido a emplear, se procede a pesar la cantidad de material necesario para realizar el ensayo según la Tabla 14 del ASTM C-131, en ambos casos tanto para el cisco como para el 3/4 son 2500 gramos, por lo que SE recomienda separar 3000 gramos para asegurar que después del lavado, y secado al horno haya una pérdida por debajo de la cantidad de material usado.

Figura 16

Lavado del material grueso para ensayo abrasión de los Ángeles



Nota. El material grueso debe lavarse para eliminar impurezas y polvo en él.

Luego de este proceso llevar al horno por 24 horas y al sacar la muestra dejar reposar hasta que enfríe y pesar los 2500 gramos que dicta la norma. La cantidad de material es llevada al tambor giratorio de acero donde se colocan ambas muestras del mismo material con su respectivo número de bolas de acero, según lo requiera el método, 11 esferas para el método B (piedra $\frac{3}{4}$) y 8 esferas para el método C (agregado grueso del cisco) ambas a 500 revoluciones por 15 “min”.

Figura 17

Equipo para ensayo de abrasión Los Ángeles



Figura 18

Material en el tambor con sus esferas



Nota. Material después del ensayo, con las esferas de acero y el material de pérdida por las fuerzas abrasivas.

Luego el material es retirado y acto seguido se tamiza con la malla N°12, el material que pase el tamiz es desechado y se pesa el material restante para obtener el desgaste del material mediante las fórmulas:

$$\%desgaste = \frac{P_{inicial} - P_{final}}{P_{inicial}} \cdot 100 \quad (21)$$

Siendo:

$P_{inicial}$ = Peso del material en gramos evaluado antes del ensayo.

P_{final} = Peso del material en gramos evaluado después del ensayo.

%Desgaste = desgaste del material en términos de porcentaje.

Por norma, cada material debe presentar un desgaste máximo del 45%. Basándonos en estos valores, se puede concluir que el material es muy resistente y capaz de soportar las cargas. Si el desgaste del material supera el 45%, entonces se considera que no soporta adecuadamente las cargas y no es apto para su uso en la mezcla.

3.4.3. Dosificación para Diseño de Mezcla.

La incorporación de los materiales para una mezcla debe estar controlada acorde a las exigencias de la norma ASTM D3515, a partir del tamaño máximo nominal del agregado que en este caso es $\frac{3}{4}$, así como el cumplimiento de las exigencias establecidas en norma ecuatoriana MTOP. A partir los datos suscitados a partir de ensayos granulométricos y los porcentajes que se obtuvieron como pasantes para cada abertura de malla, la combinación correcta de porcentajes de los agregados se prevé para conseguir la curva granulométrica ajustada al rango requerido por las normas, respetando las debidas tolerancias; esto asegurara una formula optima de diseño de las briquetas.

Tabla 15

Especificaciones que debe seguir la combinación de los agregados según su porcentaje de pasante del tamiz

Denominación de la mezcla y tamaño máximo nominal del agregado.						
Tamaño del tamiz		1 in (25,0 mm)	3/4 in (12,5 mm)	1/2 in (12,5 mm)	3/8 in (9,5 mm)	No. 4 (4,75 mm)
1 1/2"	37,5 (mm)	100	...	...	...	...
1"	26,5 (mm)	90 - 100	100	...	...	...
3/4"	19 (mm)	...	90 - 100	100	...	...
1/2"	12,5 (mm)	56 - 80	...	90-100	100	...
3/8"	9,5 (mm)	...	56-80	...	90-100	100
No. 4	4,75 (mm)	29 - 59	35-65	44-74	55-85	80-100
No. 8	2,36 (mm)	19 - 45	23-49	28-58	32-67	65-100
No. 16	1,18 (mm)	...	...	...	...	40-80
No. 30	0,6 mm	...	...	...	...	25-65
No. 50	0,3 mm	5-17	5-19	5-21	7-23	7-40
No.100	0,15 mm	...	...	...	..	3-20
No.200	0,075 mm	1-7	2-8	2-10	2-10	2-10
Betún, % en peso de la mezcla total						
Rango		3-9	4-10	4-11	5-12	6-12

Nota. Manual de la institución asfáltica de mezclas asfálticas en caliente, Serie No.22, 2nd edición.

Tabla 16*Graduación de una mezcla asfáltica convencional*

AGREGA DO	% DE AGREG ADO	% PASANTE DEL TAMIZ No.										
		1"	3/4 "	1/2 "	3/8 "	No. 4	No. 8	No. 16	No. 30	No. 50	No.2 00	
PIEDR A 3/4	30,00	30	30	15,3 7	3,82	0,11	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,01
AREN A	20,00	20	20	20	19,7 2	19,3 4	18,8 1	18,0 0	15,9 8	2,90	0,10	
CISCO	50,00	50	50	50	48,0 6	32,1 2	22,4 8	15,5 5	11,2 0	7,08	2,34	
MEZCLA DE AGREGADOS		10 0	10 0	85,4	71,6	52,6	41,3	33,6	27,2	10,0	2,5	

Nota. Graduación de los agregados con una composición de piedra $\frac{3}{4}$, arenas, cisco con 30%, 20% y 50% respectivamente.

3.4.4. Elaboración De Especímenes De Conformidad Al Método Marshall.

Para este apartado se procede con la elaboración de especímenes a partir del diseño de mezcla asfáltica convencional según la metodología Marshall. La metodología Marshall constituye ensayos para mezclas compactadas en caliente, con una serie de briquetas elaboradas con la misma granulometría y diferentes contenidos de asfalto, con un tamaño de 2,5 pulgadas en espesor y 4 pulgadas en diámetro.

Las briquetas preparadas con el método se rompen en la prensa Marshall determinando la estabilidad (resistencia) y flujo, así como con otros ensayos se pueden determinar pesos y densidades, o la gravedad específica máxima teórica (RICE). Dichos ensayos hacen posible la obtención del diseño óptimo de la mezcla mediante la evaluación y cálculo de propiedades como la gravedad específica volumétrica (Gmb), el volumen de asfalto (Vbe), la densidad aparente o bulk del agregado en la mezcla compactada (Vsb), la gravedad específica máxima teórica (Gmm), el contenido de asfalto efectivo (Pbe), vacíos llenos de asfalto (VFA), vacíos en el agregado mineral (VMA), el porcentaje de vacíos llenos de aire (Va) y la absorción de asfalto (Pba).

3.4.4.1. *Elaboración de briquetas.*

A partir del diseño de mezcla asfáltica convencional, previamente trabajado con la ayuda de la herramienta Excel, en concordancia con la granulometría de cada material, se llegó a una composición de mezcla con un 50% de agregado medio cisco, 30% de material grueso $\frac{3}{4}$, y 20% de material fino arena, la equivalencia en gramos deberá ajustarse al total de 1200 gramos de material requerido para la elaboración de cada briqueta, cumpliendo con las especificaciones.

Figura 19

Materiales usados para la mezcla: cisco, piedra $\frac{3}{4}$ y arena



Para la elaboración de las briquetas es indispensable el uso de variados implementos, como una estufa eléctrica, ollas resistentes a altas temperaturas, recipientes de aluminio, cucharetas, guantes térmicos, wype, gasolina, termómetro, mandil.

Posterior a tener todos los implementos, se inicia el proceso colocando a calentar el material previamente dosificado hasta alcanzar la temperatura correspondiente, en un rango de entre 140°C y 160°C. A su vez, el cemento asfáltico es calentado a la misma temperatura de los agregados, aproximadamente 160°C, cumplido este parámetro se procede a pesar el porcentaje de asfalto a trabajar, en gramos.

Figura 20

Mezclado del asfalto con los materiales pétreos



Nota. El cemento asfáltico tipo AC-20 muestra una alta rigidez a temperatura ambiente, pero experimenta cambios en su viscosidad cuando se calienta.

Una vez se tenga la cantidad en gramos del asfalto diluido con una temperatura de 160°C, se mezcla con los agregados calentados en una olla con la hornilla encendida con movimientos envolventes, asegurándose de esparcir el asfalto hasta obtener una mezcla visualmente homogénea, procurando que la temperatura se mantenga; obtenida la mezcla, se pesan 1200 gramos de la mezcla bituminosa en una tara.

3.4.4.2. Compactación de los especímenes Marshall.

Se debe preparar el martillo de compactación propiamente con la base de madera, el molde metálico y el collarín. Antes de que se vierta la mezcla, se coloca dentro del molde una película de papel recortada al tamaño interno del molde, que facilita el movimiento al espécimen en su compactación cara a cara.

Con el material pesado y el molde correctamente ubicado, se vierte la mezcla en caliente, cuidando que la temperatura no haya bajado de 140°C como límite. Inmediatamente se procede a dar los respectivos 25 golpes con ayuda de una espátula y acto seguido se coloca otra película, para finalmente

ajustar y asegurar el molde con el collarín, se sobre ésta el martillo y se procede a dar consecutivamente los golpes con el martillo Marshall.

Figura 21

Compactación del espécimen



De acuerdo con las especificaciones MTOP-001F-2002 se determina para este estudio el número de 75 golpes por cara para un tránsito alto para la compactación Marshall. Acto seguido de terminar los primeros 75 golpes, se remueve el collarín y se procede a darle vuelta al molde para los 75 golpes a la cara opuesta ya compactada, se ajusta el collarín nuevamente y se compacta, el total de 150 golpes por cada briqueta puede llevarse a cabo por una sola persona, no obstante, se recomienda asistencia para sostener el mango del martillo y la base.

Terminado todo el proceso de compactación, las muestras son retiradas y dejan en reposo hasta que se tengan una temperatura adecuada para proceder con el desmoldado, ayudado de una gata especial para las briquetas. Luego se enmarca el espécimen y se deja en un lugar designado libre.

Figura 22

Desenfofrado de los especímenes compactados



El procedimiento llevado a cabo se debe repetir el número de veces correspondientes a 3 briquetas por porcentaje de asfalto, en este caso 4 porcentajes (5%, 5,5%, 6%, 6,5%) con un total de 12 briquetas para el diseño de mezcla asfáltica tradicional.

3.4.4.3. *Ensayos a las briquetas.*

Concluidas todas las briquetas, y después de que hayan reposado, serán sometidas a los siguientes ensayos: ensayo de gravedad específica Bulk de las muestras compactadas, rotura Marshall de las briquetas para obtener estabilidad y flujo y ensayo de gravedad específica máxima teórica.

a) *Gravedad Específica Bulk, AASHTO T166*

La gravedad específica Bulk es a partir del cálculo entre la relación que existe entre su peso al aire y, así mismo, de su volumen. Para este ensayo las muestras deben ser pesadas en tres estados: estado seco al aire, superficialmente seco y estado sumergido o saturado.

Se procede a pesar la muestra seca y se registra como muestra seca al aire (Ws).

Figura 23

Espécimen N° 1, peso en aire



Se prepara una canastilla sumergida en el agua con una balanza encerrada con su peso y se coloca las muestras por unos minutos, no excediendo los 5 min, se registra el peso sumergido (W_{sub}), luego se retira y se seca superficialmente con una franela o toalla, seguidamente se pesa obteniendo el peso saturado superficialmente seco (W_{sss}).

Figura 24

Espécimen N° 1, peso sumergido



Figura 25

Espécimen N° 1, peso saturado superficialmente seco



Con los valores registrados se calcula el peso Bulk, y las densidades que acaba siendo el promedio de los pesos bulk.

b) Cálculo de Volumen y Espesor de briquetas

Para hallar el volumen de las briquetas al peso superficialmente seco se le resta el peso del agua de forma teórica para garantizar una mayor precisión.

Para hallar el espesor de los especímenes se usa un Calibrador o Pie de Rey, tomando varias medidas del ancho y del diámetro de las muestras con las que finalmente se hará un promedio.

Figura 26

Medición del espesor de los especímenes



Figura 27

Calibrador, equipo de medición



c) Estabilidad Marshall Y Ensayo De Flujo

Para este ensayo, se emplea un contenedor metálico con el que se realiza un baño María a las briquetas, este equipo debe ser llenado con agua limpia y ser encendido hasta llegar a una temperatura de 140°F (60°C); una vez llegado a la temperatura se introduce de forma individual y ordenadas las muestras, colocándolas de manera escalonada con el propósito de que todas se calienten por igual, haciendo uso de guantes de látex para prevenir incidentes por la temperatura del agua. Los especímenes deber estar sumergidas por un periodo de 30 a 40 min, verificando constantemente que la temperatura se mantenga constante.

Figura 28

Briquetas sumergidas en Baño María a 60 °C



A su vez, la mordaza se lleva al horno para calentarse y se retira minutos antes del tiempo estimado de 30 min. Posteriormente se irán sacando las muestras una por una, se elimina el exceso de agua con una toalla y se coloca adecuadamente en la parte central de la mordaza, e inmediatamente se traslada a la Prensa Marshall.

Figura 29

Briqueta y dial colocados en la prensa Marshall



Seguidamente, el medidor de flujo (dial) se posiciona sobre la barra guía marcada y se verifica que la lectura marque cero; en caso contrario, se ajusta. Se aplica una carga a una velocidad de deformación de aproximadamente 50.8 mm/min hasta que ocurra la falla, momento en el cual se registra el punto máximo de rotura, conocido como estabilidad Marshall, expresada en kilogramos. El dial se mantiene firme hasta que ocurre la ruptura y la lectura comienza a disminuir; se registra esta lectura como flujo, medida en centésimas de pulgada.

Tabla 17

Estabilidades de la mezcla asfáltica convencional

ESTABILIDAD MARSHALL			
Muestras	1	2	3
5%	2688,95	2910,51	3309,59
5,50%	2907,87	3013,69	2879,21
6%	2752,88	3055,13	2840,85
6,5%	2752,22	2853,85	2733,7

Nota. Estabilidades registradas en el equipo de rotura Marshall, del diseño de mezcla asfáltica convencional.

Tabla 18*Flujos de la mezcla asfáltica convencional*

MUESTRAS	FLUJOS		
	1	2	3
5%	10,9	10,8	11,7
5,50%	11,5	12	12,4
6%	12,9	12,7	13
6,5%	13,8	13,5	14

Nota. Flujos registrados por el dial al momento del punto máximo de rotura.

d) Ensayo de Análisis de Gravedad Específica Máxima Teórica (RICE).

Acorde la norma ASTM D2041, se establece el uso de muestras de mezclas sueltas o no compactadas. La cantidad de material necesario varía según el tamaño máximo nominal de la mezcla y las especificaciones para el ensayo se describen en la Tabla 19.

Tabla 19*Cantidad mínima de la muestra, según el tamaño máximo nominal del agregado*

Tamaño máximo nominal del agregado; mm(pulgada)	Muestra mínima (gr)
50,0 (2)	6000
37,5 (1 1/2)	4000
25,0 (1)	2500
19,0 (3/4)	2000
12,5 (1/2)	1500
9,5 (3/8)	1000
4,75 (N°4)	500

Nota. Contenido de la cantidad más pequeña, en gramos, aceptable de la muestra, en función del tamaño máximo nominal del agregado, extraído de ASTM D 2041.

Para este caso se determina que la muestra utilizada son 2000 gramos, conforme el tamaño máximo nominal de piedra $\frac{3}{4}$ que se seleccionó.

Luego de tener la cantidad exacta a ensayar, se procede a llenar el picnómetro con agua hasta la marca, se coloca la tapa y se registra como picnómetro + agua (B).

Después de este proceso, se retira el agua del picnómetro y se coloca la muestra de 2000 gr, para este estudio, y cuidadosamente se coloca agua hasta cubrir completamente la muestra quedando sumergida.

Se coloca un caucho protector de la tapa de vidrio para evitar fisuras por la vibración del equipo, finalmente se ensambla la tubería encargada de extraer los vacíos y se enciende la máquina.

Figura 30

Equipo RICE



El equipo debe estar encendido por lo menos de 20 a 30 min, hay que tener cuidado de mantenerlo en a una presión de -0,3 bar ($25 \pm 1,5$ mm de Hg).

Habiendo transcurrido el tiempo necesario, se levanta la tapa y se llena hasta la marca del picnómetro, se coloca la tapa metálica y se procede a pesar el picnómetro + muestra + agua (C).

De este modo con la siguiente ecuación se hallaremos la gravedad específica máxima teórica:

$$G_{mm} = \frac{A}{A + B - C} \quad (22)$$

Donde:

A= peso seco de la muestra

B= peso del picnómetro + agua

C= peso del picnómetro + agua + muestra

e) *Determinación del óptimo contenido de asfalto*

Con todos los datos obtenidos en los ensayos, con ayuda de una hoja electrónica Excel se tabulan los datos, para así construir las curvas necesarias para la interpretación del diseño Marshall. Para este caso, se utilizó el método NAPA, en TAS 14 el cual consiste en determinar el contenido óptimo de asfalto que se corresponde con una medida especificada de 4% de vacíos, típicamente, o también conocido como el punto medio del rango de volúmenes de vacíos llenos de aire. A partir de la construcción de la gráfica de la curva VTM vs %asfalto, siendo VTM el eje vertical y %asfalto el eje horizontal, se traza una línea recta desde el punto $V_a=4\%$ que intercepte con la curva, y a partir de la intersección se traza una línea perpendicular al eje %asfalto, dicho valor es el % asfalto óptimo.

A partir de %óptimo de asfalto se determina las siguientes propiedades, entrando en la gráfica con dicho valor hasta interceptar con las curvas de: Estabilidad vs % Asfalto, Vacíos en el agregado mineral vs % Asfalto y VFA vs Porcentaje de Asfalto.

Luego se compara cada uno de los valores obtenidos en las gráficas y si todos están dentro de las especificaciones establecidas en la norma, como se visualiza en la Tabla 20, entonces este valor se convierte en el contenido óptimo de asfalto al ser satisfactorio, caso contrario el diseño de la mezcla debe ser rediseñado.

Tabla 20*Criterio de diseño Marshall para Superficies y Bases*

TIPO DE TRAFICO	Muy pesado		Pesado		Medio		Liviano	
CRITERIOS MARSHALL	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
No. Golpes/cara	75		75		50		50	
Estabilidad (lbs)	2200	----	1800	-----	1200	-----	1000	2400
Flujo (pulg/100)	8	14	8	14	8	16	8	16
% vacíos en la mezcla								
- Capa de rodadura	3	5	3	5	3	5	3	5
- Capa intermedia	3	8	3	8	3	8	3	8
- Capa base	3	9	3	9	3	9	3	9
% vacíos agregados	Valores establecidos en la tabla 12							
Relac. Filler/betún	0,8	1,2	0,8	1,2				
% Estabilidad retenida luego de 7 días en agua temperatura ambiente								
- Capa de rodadura	70	---	70	-----				
- Capa intermedia	60	---	60	-----				
% Vacíos llenos de asfalto	65	75	65	75	65	78	70	80
Relación E/F (Kg/cm)	1700 - 4000							

Nota. Tabla que contiene los parámetros que debe cumplir los resultados obtenidos correspondientes con él % óptimo de asfalto. Tomado de norma MTOP-001F.2002

Tabla 21*Criterios Marshall para VMA*

TMN, mm	VMA mínimo, %		
	Vacíos de aire de diseño, %		
	3,0	4,0	5,0
4,75	16	17	18
9,5	14	15	16
12,5	13	14	15
19,0	12	13	14

Nota. Valores que debe cumplir el VMA correspondiente con el % óptimo de asfalto. Tomado de norma MTOP-001F-2002.

3.5. METODOLOGIA DEL O.E.2: ENSAYAR EN EL EQUIPO NAT LOS ESPECÍMENES DE LA MEZCLA DISEÑADA A UNA TEMPERATURA Y FRECUENCIA CONSTANTE PARA LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LA MEZCLA

El siguiente ensayo fue realizado en la UCSG, en el equipo NAT, con una muestra de 12 briquetas del tipo Marshall con el software desarrollado por Keith Cooper.

Tabla 22

Ensayos que se pueden ejecutar en NAT.

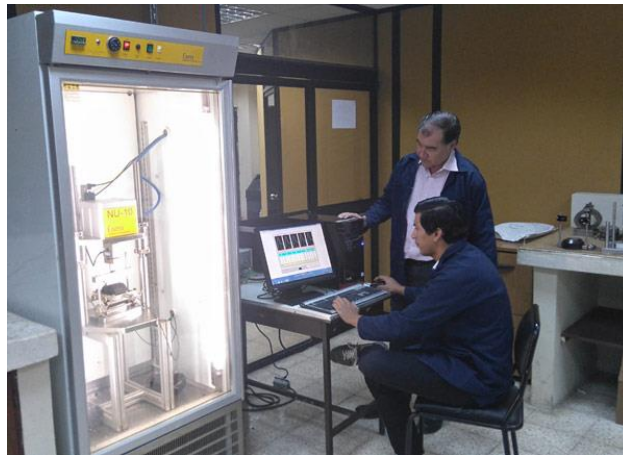
CARACTERISTICAS POR DETERMINAR	NORMA DE ENSAYO
MODULOS	En 12697-26 Anexo C ASTM D4123 AASHTO TP31 AASHTO TP62 INV E 749-13 INV E 754-07
FATIGA	EN 12697-24 Anexo E INV E 784-13
DEFORMACION PERMANENTE	EN 12697-25 Métodos A & B

Nota. Contiene los ensayos que se pueden realizar mediante el NAT Tomado de Guía de manejo simplificada para la realización de los ensayos de módulo resiliente y módulo dinámico, mediante la utilización del equipo NAT del laboratorio de suelos y pavimentos de la UPTC.

Para la ejecución y desarrollo del ensayo es necesario conocer los accesorios con los que posibilitan la correcta ejecución.

Figura 31

Equipo NAT modelo NU-10 Cooper

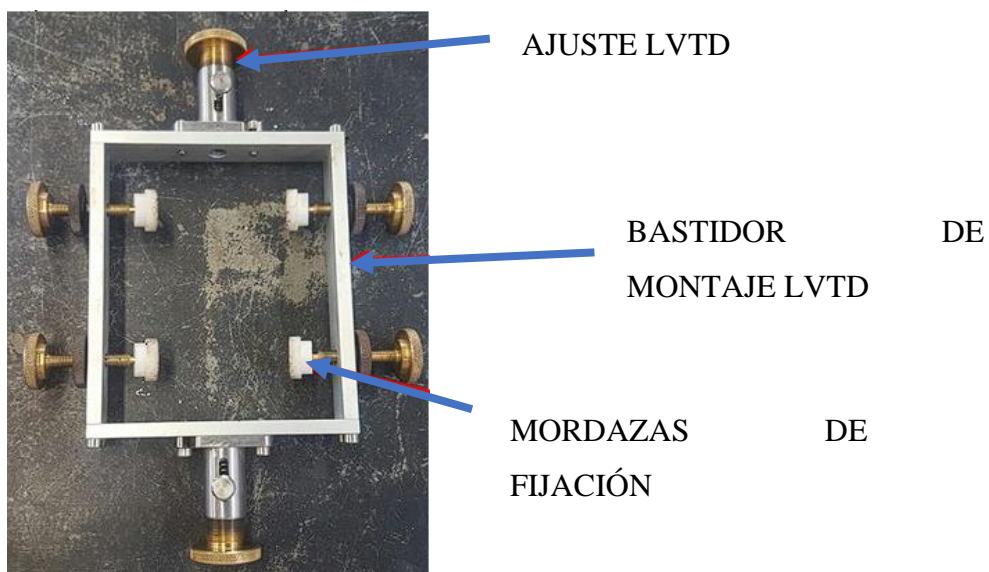


Nota. Equipo NAT de la UCSG, laboratorio de carreteras. Tomado de LA REVISTA. EL UNIVERSO, en: <http://www.larevista.ec/orientacion/educacion/guia-de-novedades-academicas>.

Así como también se necesitan una serie de accesorios como: bastidor de montaje LVTD, para muestras con un diámetro de 100mm a 150 mm, para permitir la alineación, fijación y ajuste de los especímenes, así como sus mordazas de fijación y ajuste LVTD.

Figura 32

Bastidor de montaje LVTD

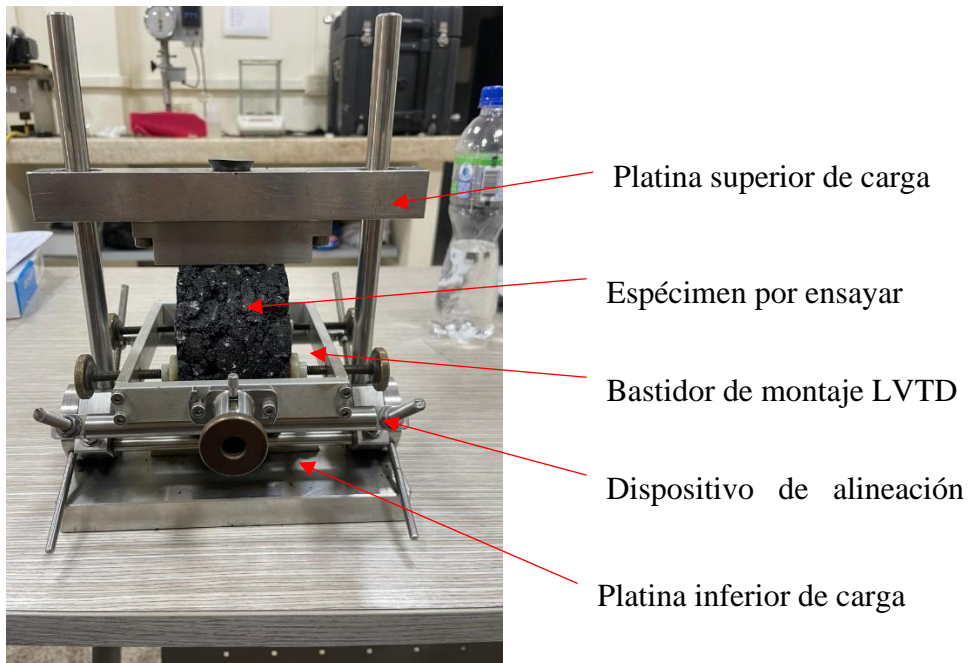


Nota. Muestra del bastidor de montaje LVTD. Tomado de *Guía de manejo simplificada para la realización de los ensayos de módulo resiliente y módulo dinámico, mediante la utilización del equipo NAT del laboratorio de suelos y pavimentos de la UPTC.* Por Jhonatan Pardo y Johan Peña (2017).

Las briquetas serán colocadas sobre la platina inferior de carga previamente montado en un dispositivo de alineación LVTD con ayuda del bastidor de montaje LVTD, y sobre todo el conjunto de piezas se coloca la platina superior de carga.

Figura 33

Espécimen montado en el dispositivo adecuado para realizar los ensayos de Modulo

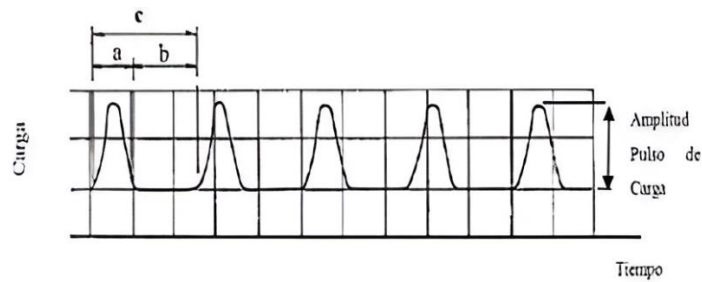


Nota. Muestra del montaje de un espécimen a ensayar, Laboratorio de carreteras de UCSG. Fuente: elaboración propia.

Para determinar la frecuencia a la que se va a trabajar los siguientes especímenes, se tomara de referencia el tiempo de inicio de pulso de carga y el punto en que la carga es máxima, hasta el reposo, proporcionados por el Laboratorio de carreteras de la UCSG. La temperatura para ensayar son 20°C, valor que es automatizado en el software del equipo previamente.

Figura 34

Mecanismo de carga en módulos de rigidez



Nota. figura que muestra los mecanismos de carga en ensayos de módulo de rigidez.

De la siguiente figura se expresa la ecuación para hallar la frecuencia de carga de la que se está trabajando:

$$f = \frac{1}{a + b} \quad (23)$$

Donde:

f = Frecuencia

a = Pulse width (ancho de pulso)

b = Rest period (periodo de relajación).

Tabla 23

Frecuencia en Hz de las muestras ensayadas en NAT a temperatura constante 20°C

FRECUENCIA(Hz)	t
8,33	0,12

Nota. Tabla que contiene la frecuencia calculada a la que se ensayaron los especímenes a temperatura constante 20°C.

3.6. METODOLOGÍA DEL O.E.3: DETERMINAR EL MÓDULO DINÁMICO EN FUNCIÓN DE OTRAS CORRELACIONES, MODIFICANDO LA FRECUENCIA Y MANTENIENDO LA TEMPERATURA, PARA COMPARARLOS CON LOS DATOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO EN NAT, ESTABLECIENDO LA MEJOR CORRELACIÓN DE APROXIMACIÓN DE MÓDULOS DINÁMICOS PARA EL MÉTODO MARSHALL

Para el análisis de predicción de módulos dinámicos existen algunos modelos que se pueden emplear, como el Método Bonnaure (Shell), el método AASHTO, método Heukelom y Klomp, Método Hwang y Witczak, siendo este último el método para emplear en este estudio. Con el fin de correlacionar los parámetros del método Marshall para determinar módulos dinámicos aproximados y poder predecir el comportamiento de la mezcla asfáltica de diseño.

El rango de temperaturas dentro el cual este método es válido esta entre -17,7 a 54,4 °C, pero para este estudio se decidió en el alcance mantener la temperatura constante a 20 °C, y el rango que se propone esta entre 0,1 a 25 Hz, en este caso se usara valores de 0,1 Hz, 0,5 Hz, 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz y 25 Hz.

En la fórmula de Witczak están involucradas seis variables, porcentajes de finos, porcentaje de asfalto, porcentaje de vacíos, viscosidad del asfalto A 70°F, frecuencia de aplicación de carga y temperatura de las muestras; dentro de ella se dividen en dos grupos correspondientes a propiedades únicas de cada mezcla que dependen del diseño que se tiene, y el otro grupo depende directamente de las condiciones bajo la cual se somete al cemento asfáltico.

La ecuación se puede presentar en su forma sinusoidal y segmentada para facilitar su manejo:

$$\text{Log } |E^*| = A + B + C \quad (24)$$

En la Tabla 24 se muestran los componentes A, B y C de la ecuación respectivamente.

Tabla 24

Componentes de la ecuación en forma rescrita.

COMPONENTE DE LA ECUACIÓN
$A = 0,0750063 + 0,02932 \cdot P_{200} - 0,001767(P_{200})^2 - 0,002841 \cdot P_4 - 0,058097 \cdot V_a$
$B = -0,0802208 \cdot \frac{V_{b_{eff}}}{(V_{b_{eff}} + V_a)}$
$C = \frac{3,871977 - 0,0021 \cdot P_4 + 0,003958 \cdot P_{38} - 0,000017(P_{38})^2 + 0,005470 \cdot P_{34}}{1 + e^{(-0,603313 - 0,313351 \cdot \log(f) - 0,393532 \cdot \log(\eta))}}$

Nota: La tabla contiene las partes de la ecuación sinusoidal propuesta por Witczak para aproximación de módulos dinámicos.

Donde:

$|E^*|$: Módulo dinámico, Psi

η : viscosidad del cemento asfáltico, 10^6 Poise

f: frecuencia de carga, Hz

V_a : huecos con aire en la mezcla asfáltica, %

$V_{b_{eff}}$: contenido efectivo de cemento asfáltico, % en volumen

P_{34} : porcentaje acumulado retenido en la malla 3/4"

P_{38} : porcentaje acumulado retenido en la malla de 3/8"

P_4 : porcentaje acumulado retenido en la malla N°4.

Por otro lado, también existen ecuaciones para determinar los parámetros reológicos del cemento asfáltico a través de ensayos de módulo de corte complejo del cemento asfáltico (G^*) y medir el ángulo de fase (δ) en un rango de temperaturas y frecuencias de 1,59 Hz.

Pero dado el alcance de esta investigación no se cuenta con el equipo necesario para determinar la viscosidad del cemento asfáltico, pero existen ecuaciones que Witczak y Hwang proponen para estimar la viscosidad del asfalto a partir de la penetración a 77 °F:

$$\eta = 29\,508,2 (P_{77\text{ °F}})^{-2,1939} \quad (25)$$

Donde:

η : viscosidad del asfalto

P: penetración del asfalto a 77 °F

El presente estudio utiliza el cemento asfáltico AC-20, y su valor de penetración lo podemos encontrar en la normativa AASHTO M226-80 (2004

Tabla 25

Requisitos para el ligante de asfalto clasificado por viscosidad a 60 °C (140 °F) (clasificación basada en el asfalto original).

PRUEBA	GRADO DE VISCOSIDAD					
	AC-2.5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
Viscosidad, 60°C (140 °F), Pa's (Poises)	25±5 (250±50)	50±10 (500±100)	100±20 (1000±200)	200±40 (2000±400)	300±60 (3000±600)	400±80 (4000±800)
Viscosidad, 135 °C (275 °F), mm ² /s — mínimo	125	175	250	300	350	400
Penetración, 25 °C (77 °F), 100 g, 5 s — mínimo	220	140	80	60	50	40
Punto de Inflamación, COC, °C (°F) — mínimo	163 (325)	177 (350)	219 (425)	232 (450)	232 (450)	232 (450)
Solubilidad en tricloroetileno, porcentaje — mínimo	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0
Pruebas de residuos de horno en película delgada						
Pérdida por calentamiento, porcentaje — máximo ^a	—	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5
Viscosidad, 60 °C (140 °F), Pa's (Poises) — máximo	100 (1000)	200 (2000)	400 (4000)	800 (8000)	1200 (12000)	1600 (16000)
Ductilidad, 25 °C (77 °F), 5cm/min, cm mínimo	100 ^b	100	75	50	40	25
Spot test (cuando y según se especifique) ^c						
Disolvente nafta estándar	Negativo para todos los grados					
Disolvente de nafta-xileno, porcentaje de xileno	Negativo para todos los grados					
Disolvente de Heptano-xileno, porcentaje de xileno	Negativo para todos los grados					

^a El Uso de la pérdida por requerimiento de calefacción es opcional.

^b Si la ductilidad es inferior a 100 cm, se aceptará el material, si la ductilidad a 15,6 °C (60 °F) es de 100 como mínimo.

^c El uso del Spot test es opcional. Cuando así se especifique, el ingeniero deberá indicar si para determinar el cumplimiento del requisito se utilizará el solvente nafta estándar, el disolvente nafta-xileno, y, además, en el caso de disolventes de xileno, el porcentaje de xileno a utilizar.

Nota: Se contempla la penetración del Asfalto AC-20 a 77 °F tomada de AASHTO M 226-24 (2004).

Por otro lado, del diseño de mezclas asfálticas del tipo Marshall podemos establecer los parámetros correspondientes que serán ingresados en la ecuación para la predicción de módulos mediante la ecuación de Witczak, los valores se encuentran en la siguiente tabla, sin olvidar que:

$$V_{\text{beff}} = \text{VMA} - V_a$$

Donde:

V_{beff} : contenido de asfalto efectivo en % volumen

VMA: contenido de vacíos en el agregado mineral

V_a : contenido de vacíos llenos de aire.

Tomando en cuenta los datos de la Tabla 26.

Tabla 26

Parámetros del diseño Marshall utilizados en la fórmula de Witczak.

PARAMETROS DEL DISEÑO MARSHALL	
P_{34}	0
P_{38}	28
P_4	48
P_{200}	2
VMA	13,35
V_a	4
V_{beff}	9,35

Nota. Se exhibe el contenido de los parámetros a usar en la ecuación de Witczak para la aproximación de módulos dinámicos de la mezcla asfáltica convencional. Elaboración propia.

En cuanto a la obtención de módulos dinámicos, se hace uso de las herramientas de software para facilitar los cálculos a efectos de ensayo-error, explorar otras alternativas dentro del rango de aplicación de la fórmula de Witczak.

En este caso se hizo uso de la herramienta “Mondinamic” o “Modulo dinámico $|E^*|$ Witczak 1-37A” proporcionado por el desarrollador Jose J. Lara R. a continuación se muestra una ventana del software:

Figura 35

Software MonDinamic desarrollado por José J. Lara R.

Módulo Dinámico [E*] Witczak 1-37A
Desarrollador: José J. Lara R

Módulo Dinámico Referencias

Gradacion Mezcla Asfáltica

Acumulado retenido en malla 3/4, P3/4 %

Acumulado retenido en malla 3/8, P3/8 %

Acumulado retenido en malla No. 4, P4 %

Pasa la malla No. 200, P200 %

Reologia

Viscosidad del cemento asfáltico a la temperatura de interes, n 10⁶ Poise

Frecuencia de Carga, f Hz

Parametros volumetricos mezcla asfáltica

Contenido "vacios" llenos con aires, Va %

Contenido efectivo de asfalto, Vbeff % en volumen

Calcular

Módulo Dinámico [E*] psi

Salir Acerca de

Nota. Software utilizado para estimar los módulos dinámicos a partir de parámetros granulométricos del diseño de mezcla asfáltica y de parámetros reológicos.

3.7. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Tabla 27

Cuadro de operacionalización de variables

Variables	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de Medición
Metodología ASTM para ensayos en el equipo NAT.	Estándares internacionales que desarrolla y contiene publicaciones con acuerdos voluntarios de directrices técnicas destinadas a una amplia gama de productos, sistemas y servicios y materiales.	Ensayo de laboratorio a la mezcla asfáltica con % óptimo de asfalto diseñada por método Marshall.	✓ Parámetros volumétricos y de resistencia del método Marshall ✓ Ensayo de modulo en NAT.	✓ % Óp. asfalto	%
				✓ Densidades	g/cm ³
Metodología de Witczak	El modelo de Witczak propuesto en la guía de diseño MEPDG, que es ampliamente utilizada en los Estados Unidos para el diseño y análisis de pavimentos.	Obtención de módulo dinámico por correlaciones de manera analítica.	✓ Parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica ✓ Condiciones reológicas del cemento asfáltico.	✓ Estabilidad/flujo	kg/cm
				✓ Estabilidad	Kg
				✓ Flujo	0,01”;
				✓ Módulos dinámicos	mm MPa, Psi
				✓ Retenidos acumulados	%
				✓ Contenido efectivo de asfalto	%
				✓ Vacíos de aire	%
				✓ Viscosidad del asfalto	%
				✓ Frecuencia de aplicación.	%
				✓ Módulo dinámico	10 ⁶ Poises

Variables	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de Medición
Módulo dinámico de una mezcla asfáltica de diseño convencional	Es la magnitud absoluta del módulo complejo que caracteriza las propiedades elásticas de un material viscoelástico cuando está bajo una carga sinusoidal o haversine.	Ensayo de laboratorio mediante equipo NAT y correlaciones mediante fórmulas de Witczak	✓ Comportamiento dinámico de mezcla asfálticas, pruebas desempeño viscoelástica.	✓ Módulo dinámico ✓ Módulo de rigidez	Hz Mpa MPa MPa

CAPITULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS O.E.1: DISEÑAR UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE LA METODOLOGÍA MARSHALL, QUE CUMPLA CON LOS ESTÁNDARES DE LA RELACIÓN ESTABILIDAD/FLUJO MARSHALL PARA ASEGURAR EL CUMPLIMIENTO DE LAS ESPECIFICACIONES

4.1.1. Ensayo de Granulometría.

Como se realizó un diseño de mezcla convencional constituida por material grueso piedra $\frac{3}{4}$, material medio piedra chispa cisco y material fino arena natural, se realizó el ensayo de granulometría de cada material según ASTM C136 y los resultados se contemplan en la Tabla 28.

Tabla 28

Porcentajes de pasantes de los materiales pétreos por tamiz y abertura

AGREGADO	% PASANTES										
	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 8	No. 16	No. 30	No.50	No.100	No.200
	25,4	19,0	12,7	9,5	4,75	2,36	1,18	0,60	0,30	0,15	0,075
1 PIEDRA A 3/4	100	100	51,23	12,73	0,37	0,10	0,10	0,09	0,09	0,08	0,05
2 ARENA	100	100	100	98,60	96,69	94,07	90,02	79,92	14,48	2,51	0,48
3 CISCO	100	100	100	96,12	66,23	44,95	31,11	22,40	14,17	8,78	4,69

Nota: la tabla contiene los porcentajes de pasante de los agregados a usar para el diseño de mezcla asfáltica.

4.1.2. Ensayo de Gravedad Especifica de Agregado Grueso

El ensayo se llevó a cabo de conformidad a la norma ASTM C-127 para los agregados piedra $\frac{3}{4}$ y cisco. Los resultados obtenidos están contemplados en la Tabla 29 y Tabla 30, respectivamente.

Tabla 29

Gravedad especifica del agregado grueso, piedra $\frac{3}{4}$

VARIABLE	RESULTADO	UNIDAD
Gsb	2,791	gr/cm ³
Gsssb	2,795	gr/cm ³
Gsa	2,802	gr/cm ³
% Absorción	0,14	%

Tabla 30

Gravedad especifica del agregado grueso, cisco

VARIABLE	RESULTADO	UNIDAD
Gsb	2,403	gr/cm ³
Gsssb	2,480	gr/cm ³
Gsa	2,603	gr/cm ³
% Absorción	3,20	%

4.1.3. Ensayo de Gravedad Específica de Agregado Fino

El ensayo de gravedad especifica de agregado fino se llevó a cabo de conformidad con ASTM C-128 para los agregados cisco y arena. Los resultados están contemplados en la Tabla 31 y Tabla 32, respectivamente

Tabla 31*Gravedad específica del agregado fino, cisco*

VARIABLE	RESULTADO	UNIDAD
Gsb	2,550	gr/cm ³
Gsssb	2,576	gr/cm ³
Gsa	2,618	gr/cm ³
% Absorción	3,20	%

Tabla 32*Gravedad específica del agregado fino, arena*

VARIABLE	RESULTADO	UNIDAD
Gsb	2,527	gr/cm ³
Gsssb	2,409	gr/cm ³
Gsa	2,679	gr/cm ³
% Absorción	2,25	%

La gravedad específica de la mezcla asfáltica se obtuvo de la fórmula de combinación de agregados teniendo en cuenta la constitución del agregado cisco, 56% material grueso retenido en la malla N8 y pasante de la misma, 44% material fino; para la determinación de la gravedad específica neta del cisco. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 33.

Tabla 33*Gravedad específica de la combinación de agregados*

AGREGADO	%	Gs
Piedra 3/4	2,791	gr/cm ³
Piedra cisco	2,468	gr/cm ³
Arena gruesa	2,527	gr/cm ³
Gs Total de la mezcla	2,569	%

4.1.4. Ensayo de Abrasión de los Ángeles

Los resultados del ensayo de abrasión de los Ángeles fueron evaluados mediante el análisis del material que pasó a través de la malla de $\frac{3}{4}$ de pulgada y quedó retenido en la malla de $\frac{1}{2}$ de pulgada, así como del material que pasó a través de la malla de $\frac{1}{2}$ de pulgada y quedó retenido en la malla de $\frac{3}{8}$ de pulgada. Después se sometieron a fuerzas abrasivas en la máquina de desgaste de los Ángeles, el desgaste del agregado piedra $\frac{3}{4}$ fue de 8,88% mientras que para el agregado cisco fue de 24%.

4.1.5. Dosificación de Mezcla Asfáltica Convencional

De conformidad con la normativa MTOP-001F-2002 y en conjunto con el análisis de comportamiento de mezclas asfálticas convencionales para una granulometría combinada con un TMN $\frac{3}{4}$ y sus agregados finos y material medio, se obtuvo la siguiente dosificación para el siguiente diseño de estudio, contemplado en la Tabla 34.

Tabla 34

Dosificación de agregados para mezcla asfáltica

MEZCLA ASFALTICA	
AGREGADO	%DISEÑO
PIEDRA 3/4	30
CISCO	50
ARENA GRUESA	20
TOTAL	100%

Nota. Composición final de la mezcla asfáltica a partir de la granulometría de los agregados. Elaborada por autores.

Para el análisis del diseño de mezcla asfáltica se tomaron muestras de 1200 gr por briqueta, con 1 juego de 3 briquetas por porcentaje de asfalto comprendidas en un rango de 5% a 6,5%. Con ayuda de una hoja de cálculo y con los resultados obtenidos de ensayos de gravedad específica, densidades, rice, estabilidad y flujo.

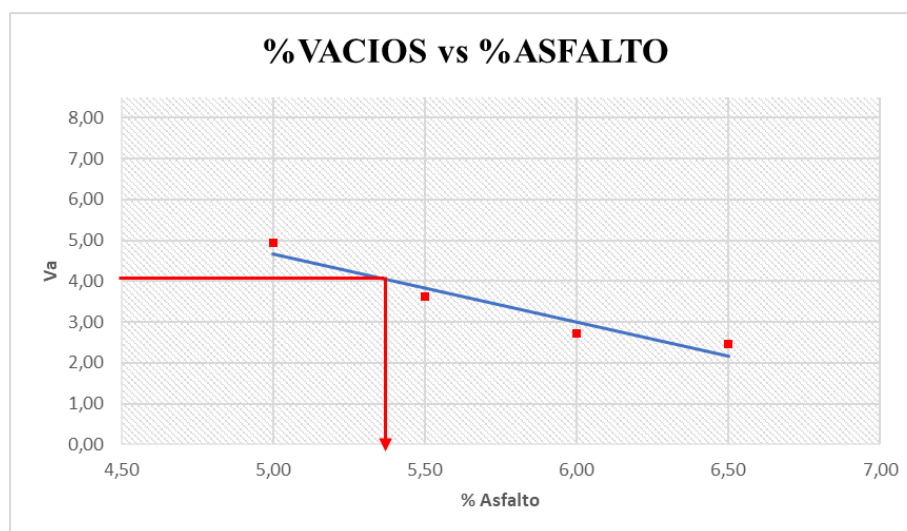
Finalmente se llevó a cabo la construcción de graficas correspondientes a cada propiedad volumétrica del diseño de mezcla asfáltica en caliente por el método Marshall, presentados en la Tabla 35.

Tabla 35*Resultados de las propiedades volumétricas de la mezcla convencional*

%Asfalto	Densidad	%Vacíos	%VM A	%VF A	Flujo	Estabilidad	E/F (kg/mm)	Polvo/asfalto
5,00	2,34	4,93	13,41	63,25	11,1	2391,9	383,66	0,67
5,50	2,36	3,61	13,32	72,88	12,0	2682,4	401,14	0,59
6,00	2,37	2,71	13,39	79,77	13,0	2872,9	394,46	0,54
6,50	2,36	2,45	14,04	82,55	13,8	2777,6	361,06	0,49
%OP 5,35	2,35	4,00	13,35	69,64	11,7	2595,3	395,90	0,61

Nota. La tabla contempla los resultados de las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica convencional con diferente contenido de asfalto. Elaborada por autores.

Para el porcentaje óptimo del asfalto para el diseño de mezcla asfáltica del estudio se escogió un valor de V_a de 4% para evaluar el cumplimiento de los valores dentro los rangos establecidos en la NEVI-12, dando como resultado un porcentaje óptimo de 5,35%, empleando la gráfica de VTM vs porcentaje de asfalto.

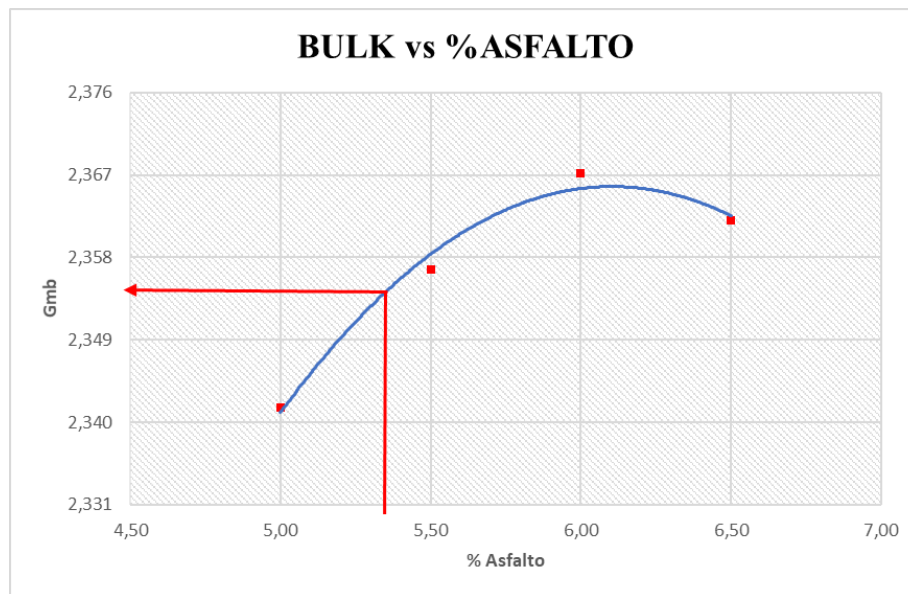
Figura 36*Diagrama VTM vs % Asfalto*

Nota. Se aprecia en la gráfica el 4% de V_a que permite determinar el porcentaje óptimo de asfalto.

En la Figura 36, se contempla cómo se determina el porcentaje óptimo de asfalto entrando en la gráfica VTM vs % asfalto con 4% de vacío de aire, obteniendo así un valor de 5,35. Valor que servirá para la construcción de las demás gráficas.

Figura 37

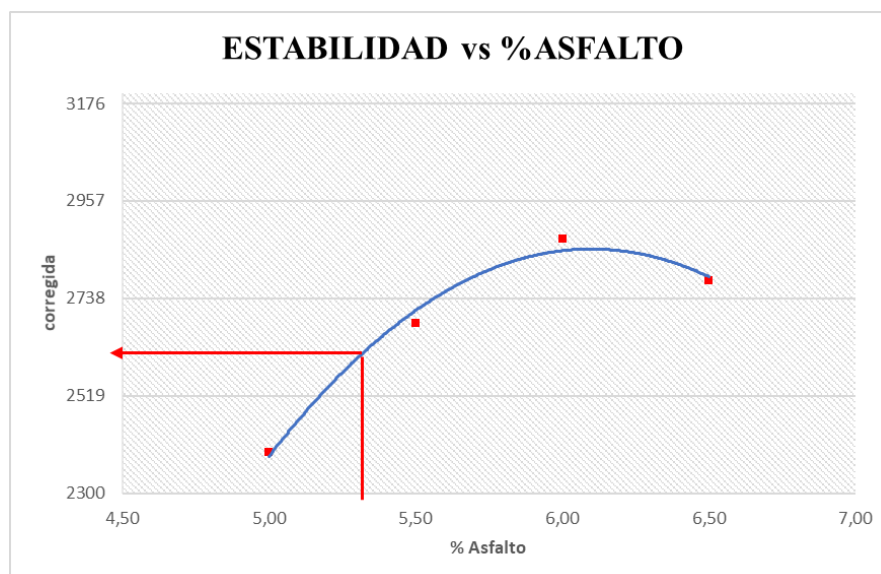
Diagrama Bulk vs % Asfalto



En la Figura 37, para un diseño de asfalto óptimo de 5,35% se estima una gravedad específica Bulk de 2,352

Figura 38

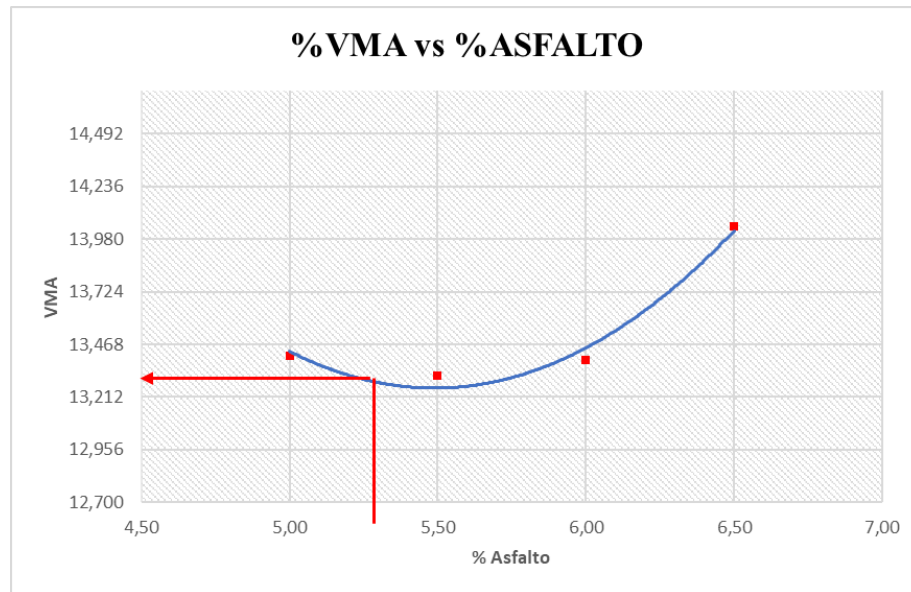
Diagrama Estabilidad vs % Asfalto



De la Figura 38, la estabilidad que resulta para un porcentaje de asfalto de 5,35% es de 2878,86. De conformidad con la normativa MTOP, este valor se encuentra en un resultado satisfactorio ya que, para un tránsito pesado como el considerado en este estudio, la estabilidad debe ser mayor que 1800 Lb.

Figura 39

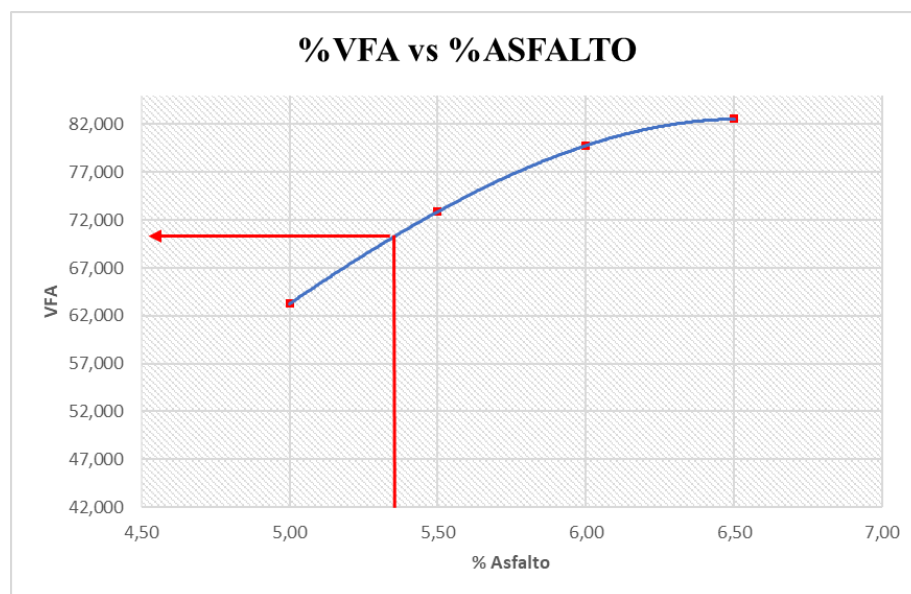
Diagrama % VMA vs % Asfalto



De la figura 39, tomando como referencia el TMN del diseño de la mezcla asfáltica convencional es de $\frac{3}{4}$ " (19.0 mm), el porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral según los criterios Marshall establecidos en la normativa NEVI-12 es de 13%, el VMA de diseño es 13,345% siendo este un resultado adecuado.

Figura 40

Diagrama % VFA vs % Asfalto

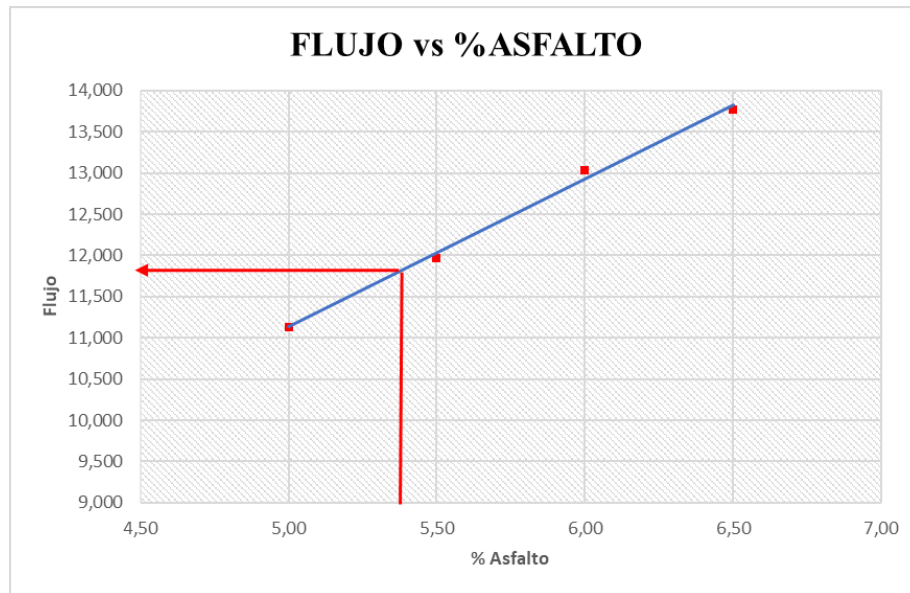


De la Figura 40, el porcentaje de vacíos llenos de asfalto para un porcentaje óptimo de asfalto de 5,35% es de 69,64%. De conformidad con la normativa NEVI-

12, este valor se encuentra dentro del rango aceptable para un tránsito alto o pesado que va desde 65 a 75%.

Figura 41

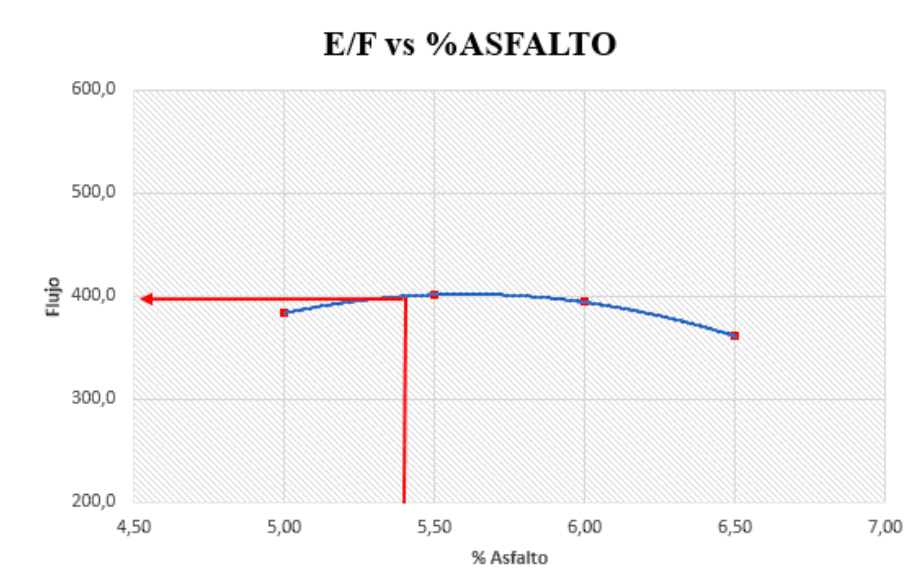
Diagrama Flujo vs % Asfalto



La Figura 41 muestra que para un porcentaje de asfalto de 5,35% el flujo es de 11,72. De conformidad con la normativa NEVI-12 MTOP, este resultado se encuentra dentro del rango aceptable para un tránsito alto o pesado que va desde 8 a 14 (0,01”).

Figura 42

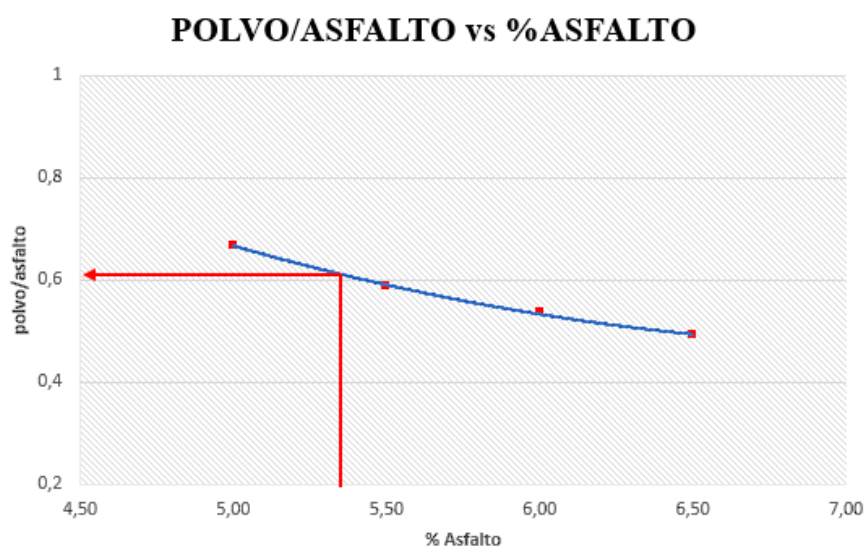
Diagrama Estabilidad/Flujo vs %Asfalto



En la figura 42, según la normativa NEVI-12, la relación E/F o también llamada rigidez de Marshall en cumplimiento eficaz debe estar comprendida en un rango de 1700 kg/cm a 4000 kg/cm, para un porcentaje óptimo de asfalto de 5,35 se obtiene una relación E/F de 395,9 kg/mm, y en sus unidades correspondientes a la norma esto es 3959 kg/cm quedando de manifiesto que está dentro de los rangos en normativa.

Figura 43

Diagrama Polvo/Asfalto efectivo vs % Asfalto



En la figura 43, de conformidad a la norma NEVI-12, las especificaciones de relación polvo/asfalto efectivo se encuentra en el rango mayores a 0,6 y no mayor a 1,3. En el diseño se obtuvo un valor de polvo/asfalto efectivo de 0,61 para un porcentaje óptimo de asfalto de 5,35%.

Tabla 36

Resultados de mezcla asfáltica convencional en concordancia a la normativa

RESULTADOS	VERIFICACION	
ESTABILIDAD	2595	CUMPLE
FLUJO	11,72	CUMPLE
% VACIOS	4	CUMPLE
% VMA	13,35	CUMPLE
% VFA	69,6	CUMPLE
RELACIÓN ESTABILIDAD/FLUJO	395,9	CUMPLE
POLVO/ASFALTO EFECTIVO	0,61	CUMPLE

Nota. La tabla contiene los resultados de los parámetros volumétricos en concordancia con la normativa.

4.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS O.E.2: ENSAYAR EN EL EQUIPO NAT LOS ESPECÍMENES DE LA MEZCLA DISEÑADA A UNA TEMPERATURA Y FRECUENCIA CONSTANTE PARA LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LA MEZCLA.

Los resultados obtenidos en las pruebas de módulo de rigidez realizadas con el equipo NAT corresponden a 12 briquetas que fueron enviadas al Laboratorio de Carreteras de la UCSG.

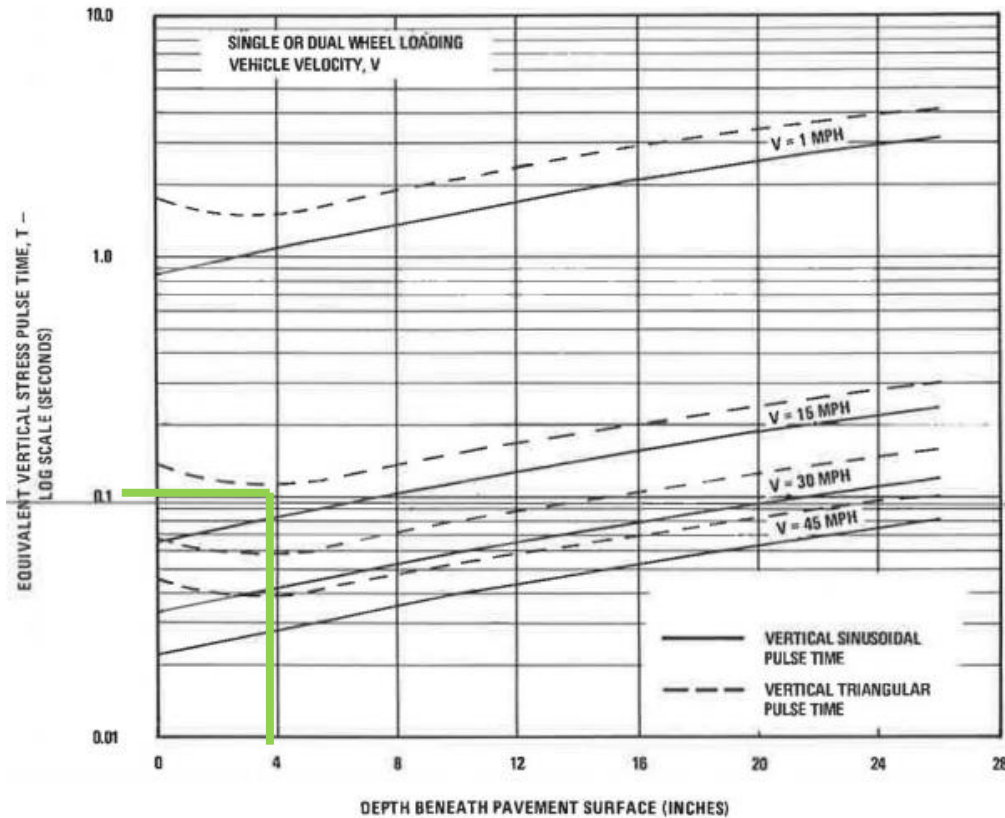
El módulo rígido indica la capacidad de distribuir la carga y proteger las capas subyacentes, siendo una propiedad fundamental en el comportamiento del pavimento. La evaluación en el equipo NAT se llevó a cabo a una temperatura de 20°C, utilizando un nivel de deformación controlada de 5 micrones y ondas haversine con un intervalo de tiempo entre el inicio del pulso de carga y el punto de carga máxima de 0,12 segundos.

Un factor importante para la realización exitosa de este ensayo es conocer las características del sistema de aplicación de la carga. En el laboratorio de pavimentos de la UCSG se presentaba la dificultad que no era clara la frecuencia de ensayo a la cual el equipo NAT ejecutaba el ensayo de tracción indirecta, es por esto por lo que después de una indagación en fuentes virtuales se pudo establecer que la frecuencia representativa para una carga de tránsito es de 8,33 Hz, esto a partir de la Ecuación 23, con T de 0,12 segundos.

A partir de esta información también se puede establecer la velocidad de diseño del tránsito a la que se está ejecutando el ensayo en el NAT Tomado de AASHTO, el ábaco a continuación:

Figura 44

Variación del tiempo de pulso de tensión vertical equivalente con la velocidad y profundidad del vehículo.



En la figura 44, el monograma propuesto por Richard D. Barksdale propone la relación que existe entre el tiempo de pulsación de carga sinusoidal y triangular y la velocidad de diseño a la que se hace referencia, en este caso con un valor de 0,12 s y una profundidad de 4 in, (espesor de especímenes), se hace una aproximación de 12 millas por hora, aproximadamente 20 km/h.

Tabla 37

Módulos de rigidez de los especímenes.

MUESTRAS	MODULOS 20°C (Mpa)
1	2495
2	3801
3	3394
4	3746
5	3936

6	4650
7	4235
8	3411
9	2815
10	4794
11	4518
12	5014
Promedio	3984
Desv. Estándar	666
Coef. Variación	16,7

Nota. Resultados ensayados correspondientes a 12 especímenes en el equipo NAT a 20°C.

Según las especificaciones propuestas para las pruebas de desempeño utilizando el equipo NAT, establecidas por el Laboratorio de Carreteras de la UCSG y actualmente en fase de prueba por parte del MTOP, la clasificación de las mezclas asfálticas para capas de rodadura se determina según el módulo de rigidez como sigue:

Mezclas satisfactorias: 3.000 a 4.000 MPa

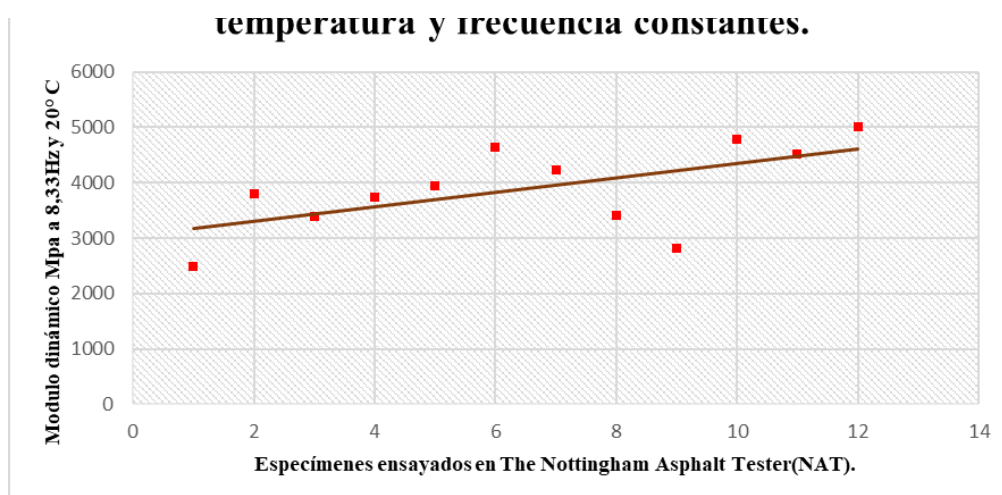
Mezclas tolerables: 2.500 a 3.000 MPa y 4.000 a 5.000 MPa

Mezclas inadecuadas: menores a 2.500 MPa o mayores a 5.000 MPa.

Los resultados pueden ser representados en un diagrama de dispersión, representando los módulos de rigideces en el eje y, como se representa en la Figura 45.

Figura 45

Módulos dinámicos de las muestras y línea de tendencia.



Nota. Gráfica que muestra los módulos dinámicos de la mezcla asfáltica convencional ensayadas a 20 °C y 8,33hz.

En la figura 45, se presentan los módulos dinámicos de la mezcla asfáltica convencional diseñada con un porcentaje óptimo de asfalto de 5,35% y con un coeficiente de variación de 16,7% y desviación estándar de 666% a efectos de corrección y agrupación de la tendencia de los datos.

Basado en el criterio anterior, los resultados obtenidos, es decir, el promedio de los módulos se encuentra dentro del rango para mezclas satisfactorias.

4.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS O.E.3: DETERMINAR EL MÓDULO DINÁMICO EN FUNCIÓN DE OTRAS CORRELACIONES, MODIFICANDO LA FRECUENCIA Y MANTENIENDO LA TEMPERATURA, PARA COMPARARLOS CON LOS DATOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO EN NAT, ESTABLECIENDO LA MEJOR CORRELACIÓN DE APROXIMACIÓN DE MÓDULOS DINÁMICOS PARA EL MÉTODO MARSHALL

El método de Witczak permite estimar los módulos dinámicos de una mezcla asfáltica a partir de parámetros de Marshall y reológicos del cemento asfáltico, los parámetros obtenidos del diseño de mezcla asfáltica se contemplan en la Tabla 26. La viscosidad se debe establecer, preferiblemente, a partir de ensayos con equipo Reómetro Dinámico de Corte, no obstante, en la teoría según Hwang y Witczak permiten aproximar la viscosidad del asfalto a partir de su penetración a 25 °C (77 °F), en este caso, del asfalto AC-20, la penetración de este último según la Tabla 25 es 60 en unidades de 0,1 mm de acuerdo con la norma AASHTO M226-24 (2004).

Con estos valores, la viscosidad del asfalto AC-20 con una penetración de 60 a partir de la ecuación 1,1 es $3,705584 \times 10^6$ Poises.

Los módulos dinámicos (Psi) se calcularon a una temperatura constante de 20 °C variando la frecuencia en 0,1 Hz, 0,5 Hz, 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz y 25 Hz, en el software MonDinamic.

Figura 46

Módulo dinámico a 20 °C y frecuencia de 0,1 Hz.

Gradacion Mezcla Asfáltica	
Acumulado retenido en malla 3/4", P3/4	0 %
Acumulado retenido en malla 3/8", P3/8	28 %
Acumulado retenido en malla No. 4, P4	48 %
Pasa la malla No. 200, P200	2 %

Reologia	
Viscosidad del cemento asfáltico a la temperatura de interes, n	3,705584 10 ⁶ Poise
Frecuencia de Carga, f	0,1 Hz

Calcular

Módulo Dinámico [E*] 195737,179 psi

Salir Acerca de

Nota. Módulo dinámico de 195737,179 Psi corresponde a una temperatura de 20 °C y 0,1 Hz, de conformidad a los parámetros de diseño de la mezcla asfáltica.

Figura 47

Módulo dinámico a 20 °C y frecuencia de 0,5 Hz.

Gradacion Mezcla Asfáltica	
Acumulado retenido en malla 3/4", P3/4	0 %
Acumulado retenido en malla 3/8", P3/8	28 %
Acumulado retenido en malla No. 4, P4	48 %
Pasa la malla No. 200, P200	2 %

Reologia	
Viscosidad del cemento asfáltico a la temperatura de interes, n	3,705584 10 ⁶ Poise
Frecuencia de Carga, f	0,5 Hz

Calcular

Módulo Dinámico [E*] 304825,271 psi

Salir Acerca de

Nota. Módulo dinámico de 304825,271 Psi corresponde a una temperatura de 20 °C y 0,5 Hz, de conformidad a los parámetros de diseño de la mezcla asfáltica.

Figura 48

Módulo dinámico a 20 °C y frecuencia de 1 Hz.

The screenshot shows a software window titled "Módulo Dinámico [E*] Witzak 1-37A" with a developer name "Desarrollador: José J. Lara R". The interface is divided into several sections:

- Gradacion Mezcla Asfáltica:** Four input fields for sieve analysis: "Acumulado retenido en malla 3/4", P3/4" (0%), "Acumulado retenido en malla 3/8", P3/8" (28%), "Acumulado retenido en malla No. 4, P4" (48%), and "Pasa la malla No. 200, P200" (2%).
- Reologia:** "Viscosidad del cemento asfáltico a la temperatura de interes, n" (3,705584 10⁶ Poise) and "Frecuencia de Carga, f" (1 Hz).
- Parametros volumetricos mezcla asfáltica:** "Contenido 'vacios' llenos con aires, Va" (4%) and "Contenido efectivo de asfalto, Vbeff" (9,35% en volumen).

A "Calcular" button is highlighted with a blue dashed border. Below the inputs, the result "Módulo Dinámico [E*]" is displayed as 365335,072 psi. "Salir" and "Acerca de" buttons are also visible.

Nota. Módulo dinámico de 365335,072 Psi corresponde a una temperatura de 20 °C y 1 Hz, de conformidad a los parámetros de diseño de la mezcla asfáltica.

Figura 49

Módulo dinámico a 20 °C y frecuencia de 5 Hz

The screenshot shows the same software window as Figure 48, but with the "Frecuencia de Carga, f" input field set to 5 Hz. The "Calcular" button is highlighted with a blue dashed border. The resulting "Módulo Dinámico [E*]" is displayed as 542028,536 psi. All other input parameters remain the same as in Figure 48.

Nota. Módulo dinámico de 542028,536 Psi corresponde a una temperatura de 20 °C y 5 Hz, de conformidad a los parámetros de diseño de la mezcla asfáltica.

Figura 50

Módulo dinámico a 20 °C y frecuencia de 8,33 Hz.

The screenshot shows a software window titled 'Módulo Dinámico [E*] Witzak 1-37A' with the developer 'Desarrollador: José J. Lara R'. The interface is divided into several sections:

- Gradacion Mezcla Asfáltica:** Four input fields for sieve analysis: 'Acumulado retenido en malla 3/4", P3/4' (0%), 'Acumulado retenido en malla 3/8", P3/8' (28%), 'Acumulado retenido en malla No. 4, P4' (48%), and 'Pasa la malla No. 200, P200' (2%).
- Reologia:** 'Viscosidad del cemento asfáltico a la temperatura de interes, n' (3,705584 10⁶ Poise) and 'Frecuencia de Carga, f' (8,33 Hz).
- Parametros volumetricos mezcla asfáltica:** 'Contenido "vacios" llenos con aires, Va' (4%) and 'Contenido efectivo de asfalto, Vbeff' (9,35% en volumen).

A 'Calcular' button is highlighted in blue. Below the input fields, the result is displayed as 'Módulo Dinámico [E*] 609328,120 psi'. There are also 'Salir' and 'Acerca de' buttons.

Nota. Módulo dinámico de 609328,120 Psi corresponde a una temperatura de 20 °C y 8,33 Hz, de conformidad a los parámetros de diseño de la mezcla asfáltica.

Figura 51

Módulo dinámico a 20 °C y 10 Hz.

The screenshot shows the same software window as Figure 50, but with the 'Frecuencia de Carga, f' input field set to 10 Hz. The calculated dynamic modulus is now 'Módulo Dinámico [E*] 634777,444 psi'. All other input parameters remain the same.

Nota. Módulo dinámico de 634777,444 Psi corresponde a una temperatura de 20 °C y 10 Hz, de conformidad a los parámetros de diseño de la mezcla asfáltica.

Figura 52

Módulo dinámico a 20 °C y 25 Hz.

Módulo Dinámico [E*] Witzak 1-37A
Desarrollador: José J. Lara R

Módulo Dinámico Referencias

Gradacion Mezcla Asfáltica

Acumulado retenido en malla 3/4", P3/4: 0 %

Acumulado retenido en malla 3/8", P3/8: 28 %

Acumulado retenido en malla No. 4, P4: 48 %

Pasa la malla No. 200, P200: 2 %

Reología

Viscosidad del cemento asfáltico a la temperatura de interes, η : 3,705584 10⁶ Poise

Frecuencia de Carga, f: 25 Hz

Parametros volumetricos mezcla asfáltica

Contenido "vacios" llenos con aires, Va: 4 %

Contenido efectivo de asfalto, Vbeff: 9,35 % en volumen

Calcular

Módulo Dinámico [E*]: 773218,171 psi

Salir Acerca de

Nota. Módulo dinámico de 773218,171 Psi corresponde a una temperatura de 20 °C y 25 Hz, de conformidad a los parámetros de diseño de la mezcla asfáltica.

Para la clasificación de mezclas satisfactorias, tolerables o inadecuadas según MTOP es conveniente expresar los módulos en MPa, a efectos de comparación.

Tabla 38

Módulos dinámicos en Psi y Mpa a una penetración de asfalto AC-20 de 60.

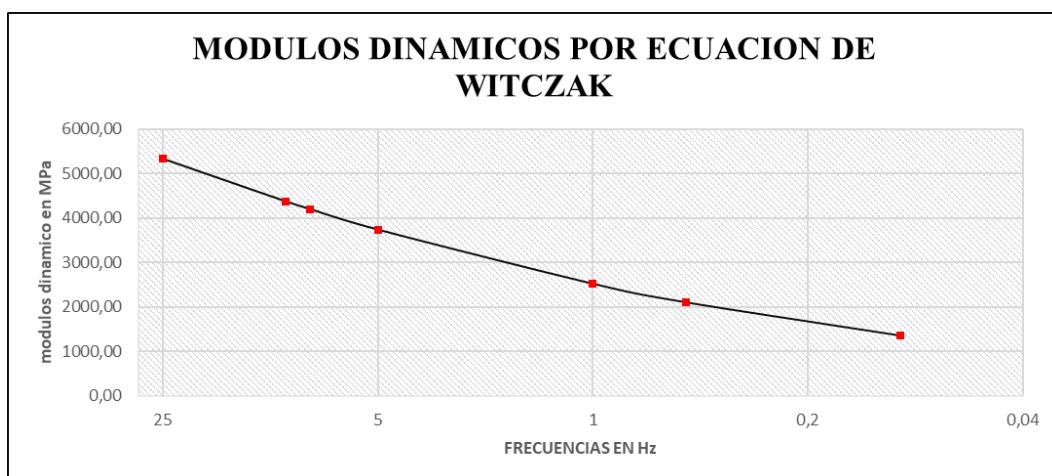
PENETRACION A 60		
$\eta=3,70558$		
FRECUENCIA (Hz)	MODULOS DINAMICOS (PSI)	MODULOS DINAMICOS (MPA)
0,1	195737,18	1349,56
0,5	304825,27	2101,70
1	365335,07	2518,90
5	542028,54	3737,16
8,33	609328,12	4201,17
10	634777,44	4376,64
25	773218,17	5331,15

Nota. Módulos dinámicos obtenidos con la fórmula de Witzak evaluados a 20 °C y diferentes frecuencias.

A continuación, se presenta el diagrama de módulos (Mpa) vs frecuencia y su línea de tendencia a partir de los módulos dinámicos obtenidos analíticamente, en la Figura 53.

Figura 53

Módulos dinámicos obtenidos de la Formula General de Witczak.



Nota. Diagrama de módulos dinámicos vs frecuencias, obtenidas por el método de Witczak evaluadas a 20 °C y diferentes frecuencias.

4.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En bases al primer objetivo, se llevó a cabo la metodología Marshall, incluyendo la selección de materiales adecuados, la preparación y compactación de especímenes, hasta la instancia final de aplicar los ensayos correspondientes a la relación Estabilidad/Flujo, con lo que seguidamente se definió conforme a este parámetro la calidad de la propuesta de diseño de mezcla; para este trabajo se consiguió una Estabilidad/Flujo de 3959 kg/cm, lo que nos indica de forma general que se tiene una mezcla rígida resistente a las deformaciones permanentes, del mismo modo, en el estudio realizado por Brito Mendoza & Corredor Vargas (2018), presenta una relación Estabilidad/Flujo de 3732.71 kg/cm.; la similitud de los datos deja en evidencia que se cumplió a cabalidad con la metodología descrita, y que para ambos casos las mezclas obtuvieron resultados dentro del rango normado para valores aceptados de modulo Marshall, 1700 – 4000 kg/cm. Por otra parte, también se estimó la relación Polvo/Asfalto efectivo, obteniendo el 0.61% como resultado,

considerando que este parámetro está normado en un rango de 0.6 a 1.3 según la NEVI-12, nuestra mezcla cumple en el límite lo admisible, puntualizando que existe una cantidad adecuada de asfalto, pero no el suficiente polvo mineral para conseguir una mezcla rígida, en contraste con lo estimado a partir de la Estabilidad/Flujo, por lo que definimos que estos parámetros no guardan relación entre sí en casos donde se tiene una cantidad mínima de polvo mineral, como en el presente estudio.

Referente al segundo objetivo, se consiguió ensayar en el equipo NAT 12 especímenes de la mezcla asfáltica convencional a una temperatura de 20°C y frecuencia de 8.33 Hz, la finalidad de mantener estos valores constantes fue para evaluar con más precisión la capacidad de la mezcla para soportar cargas repetidas sin la inferencia de variables externas y concebir mejor su comportamiento dinámico bajo las condiciones propuestas, en este caso un condicionamiento común de tráfico moderado a una temperatura ambiente. Los resultados obtenidos del ensayo en NAT enuncian un valor de 3984 Mpa de módulo, clasificando la mezcla asfáltica como una mezcla satisfactoria, indicando una alta rigidez y resistencia que señala que en la práctica la mezcla proporcionará una superficie de pavimento duradera y resistente a la fatiga, adecuado para carreteras de tráfico moderado y condiciones climáticas templadas. Aunque nuestra mezcla consolidó un buen módulo, está limitado a una única temperatura y frecuencia, no obstante, si se desea una visión más completa del comportamiento dinámico bastará con ensayar muestras a variaciones de temperatura y frecuencia, como se aprecia en la propuesta de investigación de Avedaño Salazar & López Ayala (2017), que a partir de ensayos de laboratorio detallan un módulo de entre 5000 a 6000 Mpa considerando una temperatura de 21°C y frecuencias de 10 Hz, es apreciable la variación del módulo, pero radica en la variabilidad de la condición ensayada, así pues se tiene claro la versatilidad de resultados de módulo dinámicos aunque se aplique mecanismos similares para ensayar.

En consideración al tercer objetivo, se implementó la Fórmula General de Witczak para la predicción de módulos dinámicos, y la fórmula de viscosidad presentado por el Instituto de Asfalto; este modelo fue considerado porque los parámetros que usa la formulación están en función de parámetros Marshall, facilitando su aplicación. Para el desarrollo de este apartado, la viscosidad del cemento asfáltico

se determinó mediante las fórmulas pertinentes en función de una penetración de 60 (0,1 mm) unidades a una temperatura de 77° F, valor normado tomado de AASHTO M226-24 para el asfalto tipo AC-20, seguido se introdujo los datos pertinentes a un software que contenía la fórmula de Witczak y se calculó los módulos variando la frecuencia, se obtuvo que los resultados varían conforme la frecuencia sube, y al comparar con los datos del equipo NAT se observan similitudes y diferencias que se atribuyen a la variabilidad de la carga, teniendo que a mayores frecuencias habrá un mayor módulo. Analizando la similitud, se registró mediante la fórmula de Witczak un módulo de 4201.17 MPa, mientras que con el ensayo directo se obtuvo un resultado de 3984 Mpa, figurando que entre ambos valores hay un margen de error de aproximadamente 5% se reconoce que se puede inferir el módulo dinámico mediante la fórmula Witczak considerando los parámetros previos obtenidos del método Marshall. En consecuencia a la variación de la frecuencia se obtuvo un rango de valores de entre 1300 Mpa a 5300 Mpa, en donde se evidencia una diversificación de módulos, no obstante, estos cambios se justifican por las variables que intervienen, tal como se evidencia en el trabajo de Higuera Sandoval et al. (2011), donde se probó distintos enfoques de la fórmula de Witczak en función a factores distintos a la viscosidad, obteniendo módulos más altos a los conseguidos mediante ensayos de laboratorio, esto concierne a que los resultados de los métodos teóricos serán superiores al del ensayo de laboratorio, debido a que el ensayo de laboratorio representa características específicas del entorno para el que se diseña la mezcla, en cambio, en los enfoques teóricos, no todas las variables del entorno ejercen influencia, lo que puede resultar en estimaciones o resultados más elevados, anticipando la influencia que estas variables pueden tener en los resultados.

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Con relación al primer objetivo, se puede concluir que la mezcla convencional diseñada cumple con la normativa MTOP con una relación de E/F de 3959 kg/cm, teniendo una mezcla de alta rigidez, resistente a deformaciones permanentes bajo cargas moderadas de tráfico, y en función al cumplimiento de los estándares de revisión se asegura que la mezcla es de alta calidad y es adecuada para su uso en proyectos de pavimentación. No obstante, cumplir con los requisitos volumétricos y mecánicos del método Marshall para el diseño de mezclas asfálticas en caliente no asegura que la mezcla posea las propiedades adecuadas necesarias para un buen desempeño, además, las estimaciones dentro de este método pueden ser muy susceptibles a variaciones en función a los parámetro evaluados, pues al valorar la mezcla por la relación Polvo/Asfalto efectivo tendríamos una mezcla con tendencia a ser blanda, al menos cuando se tiene una cantidad mínima de polvo mineral, presentando una incongruencia con la clasificación obtenida mediante los métodos más refinados también desarrollados, infiriendo que la caracterización y evaluación de la mezcla a partir de este método podría ser parcial.

De conformidad con el segundo objetivo, una vez cumplidos los criterios Marshall, fue llevado a cabo el ensayo de rigidez para los 12 especímenes de la mezcla convencional, en condiciones de 20 °C de temperatura y 8,33 Hz de frecuencia, del que se obtuvo como resultado ponderado un Módulo de 3984 MPa, teniendo así una clasificación de Mezcla Satisfactoria de acuerdo con el rango establecido por la MTOP, donde 3000 Mpa consta como valor mínimo y 4000 MPa como valor máximo dentro de esta categoría. El módulo resultante indica que, la mezcla posee una buena capacidad de carga al poseer una alta rigidez siendo resistente a deformaciones elásticas bajo cargas repetitivas, a su vez, sugiere que la mezcla tiene una buena resistencia a la deformación permanente (ahuellamiento) bajo condiciones de tráfico pesado; aun así, estas consideraciones serán efectivas en

condiciones ambientales de temperaturas moderadas. También, acorde el resultado se asevera un comportamiento viscoelástico favorable, que equilibra la elasticidad y la viscosidad necesarias para absorber y distribuir las cargas adecuadamente. Concluyendo, se considera que la mezcla tiene las características necesarias para ser denominada una mezcla de alta calidad, teniendo en general una buena durabilidad bajo condiciones de tráfico normales y temperaturas moderadas, y pese a la caracterización en base al módulo resultante, se mantiene un criterio conservador y se señala que este diseño se puede emplear en un proyecto de pavimentación con un volumen de tráfico moderado y una velocidad modelo de 12 mph o 20km/h aproximadamente, pues por consecuencias de su alta rigidez en condiciones de altas velocidades o temperaturas extremas el desempeño puede no ser eficiente.

Finalmente, en lo que respecta al objetivo 3, el modelo de correlación de módulos dinámicos de Witczak, estipulada en la guía de diseño empírico-mecánico AASHTO 2002 con una sensibilidad de nivel medio en los parámetros volumétricos y reológicos, logro una predicción de modulo dinámico cercano a el valor directamente obtenido con el ensayo. Entonces, fundamentado en que el módulo promedio ensayado de la mezcla fue de 3984 Mpa y el módulo determinado por Witczak fue de 4201.17 MPa, existe un margen de error del 5% en la aplicabilidad de la Fórmula General de Witczak, pero considerando que no es una magna diferencia se acepta la correlación aplicada, sabiendo que el método teórico puesto a prueba considera muchas más variables que un ensayo de laboratorio, las mismas que influyen directamente en los resultados justificándose así el margen de error obtenido. Asimismo, al probar la fórmula con la variación de la frecuencia en rangos de 0,1 a 25 Hz (de 0 km/h a 70 km/h), se presentan módulos dinámicos comprendidos de 1300 Mpa a 5300 Mpa, que clasifican la mezcla como una Mezcla Tolerable (de 2500 a 3000 MPa y 4000 a 5000 MPa), según la MTOP. Este amplio rango sugiere que la mezcla puede exhibir una variabilidad significativa en su rigidez dependiendo de la frecuencia de la carga, teniendo así que, las mezclas asfálticas con valores en el extremo inferior del rango (1300 MPa) son menos rígidas y más flexibles, mientras que aquellas en el extremo superior (5300 MPa) son muy rígidas.

En síntesis, se puede concluir en base a los resultados, que mediante el módulo dinámico se adquieren en medida directa detalles de la rigidez y la capacidad de deformación frente a cargas dinámicas, reflejando de forma más consistente como responderá la mezcla asfáltica bajo condiciones reales de tráfico, además, al tener una visión del comportamiento de la mezcla, se puede ejecutar ajustes precisos en la formulación que optimicen la resistencia y funcionabilidad frente a las necesidades climáticas que el proyecto vial requiera. No obstante, considerando que es una metodología poco aplicada actualmente por los costos que representan los ensayos de laboratorio, hay una versatilidad de modelos teóricos que permiten una inferencia de resultados con base a parámetros manejados en el diseño de la mezcla, así como la ecuación General de Witzak, que tal como se demostró en la presente investigación, provee datos tolerables que permiten una caracterización admisible de la mezcla asfáltica.

5.2. RECOMENDACIONES

- ✓ En lo que respecta al control de calidad de mezclas asfálticas en Ecuador, se recomienda que la mezcla asfáltica diseñada mediante el método Marshall sea verificada a partir de ensayos de comportamiento dinámico, y no este limitado particularmente al cumplimiento de la Estabilidad/Flujo, que solo se propicia detalles de resistencia y deformación bajo cargas estáticas, en contraste del módulo dinámico que permite un análisis más puntual de las propiedades dinámicas, permitiendo estimaciones más realistas de la funcionabilidad de la mezcla como capa de rodadura, con el fin de concebir una estructura de pavimento integra con propiedades adecuadas de resistencia y previniendo problemas, que a su vez, aseveran un desempeño seguro, durable y de calidad.

- ✓ De igual modo, se recomienda el empleo de equipos como el NAT para el estudio de otras propiedades dinámicas que permitan ahondar en la evaluación de criterios y metodologías para el diseño de mezclas asfálticas, concibiendo mejores mecanismos para el diseño y control de calidad de mezclas asfálticas, diversificando el sistema de diseños de pavimentos del

país, con la visión de mejorar la eficacia de las redes viales presentes y futuras.

- ✓ En lo que respecta al modelo de correlación para módulos dinámicos, se recomienda la Fórmula General de Witzak como una metodología indirecta confiable para inferir estos valores; no obstante, se recomienda también para un mejor procedimiento, hacer uso de otros métodos para obtener el parámetro de viscosidad, pues en este caso, el uso de la fórmula propuesta por el Instituto del Asfalto limita esta variable en función de una penetración a 77 °F, dejando de lado otras condiciones de penetración del cemento asfáltico que pueden ser estudiadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO M226-24

AASHTO M226-80

AASHTO T-84

AASHTO T-85

AASHTO T-96

AASHTO T-166

AASHTO T-209

Arenas Pancca, E., & Cabana Chauca, A. R. (2015). *OBTENCIÓN DE ASFALTOS OXIDADOS A NIVEL LABORATORIO A PARTIR DE ASFALTOS CONVENCIONALES MEDIANTE INSUFLACIÓN DE AIRE PARA LA FABRICACIÓN DE MEMBRANAS ASFÁLTICAS*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA.

Arias Barrantes, E. (2020). *PROPUESTA PARA UNA GUÍA DE DISEÑO MECANÍSTICA-EMPÍRICA PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES Y SEMIRÍGIDOS DE COSTA RICA*. UNIVERSIDAD DE COSTA RICA.

Arias, F. (2012). *EL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN. Introducción a la metodología científica* (6a ed.). Editorial Episteme.

Asphalt Institute. (1977). *MANUAL DEL ASFALTO*.

Asphalt Institute. (2001). *PRINCIPIOS DE CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE*. En 2001.

Asphalt Institute. (2014). *ASPHALT MIX DESIGN METHODS* (Seventh Edition).

Asphalt Institute, & Asphalt Emulsion Manufacturers Association. (1976). *MANUAL BÁSICO DE EMULSIONES ASFÁLTICAS*.

ASTM C-127

ASTM C-128

ASTM C-131

ASTM C-135

ASTM C-136

ASTM C-535

ASTM D-75

ASTM D-2041

ASTM D-3515

Avedaño Salazar, K. S., & López Ayala, P. L. (2017). *CONSTRUCCIÓN DE CURVAS MAESTRAS MEDIANTE LA CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE OBTENIENDO EL MÓDULO DINÁMICO DE: PLANTAS ASFÁLTICAS DENTRO DE LA PROVINCIA DE IMBABURA*. PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR.

Brito Mendoza, R. J., & Corredor Vargas, D. A. (2018). *ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DINÁMICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON AGREGADO PROCEDENTE DEL RIO SOGAMOSO Y MEJORADAS CON CEMENTO PORTLAND*. UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA.

Cárdenas Alchundia, G. A. (2014). *ESTUDIO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COLOCADAS EN VÍAS DE LA REGIÓN AMAZÓNICA DEL ECUADOR MEDIANTE PRUEBAS DE DESEMPEÑO*. Universidad Católica Santiago de Guayaquil.

Contreras Chóez, K. G., & Delgado Fernández, A. L. (2017). *ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO BASADO EN EL CICLO DE VIDA ÚTIL DE MEZCLAS DE ASFÁLTO CON POLVO DE CAUCHO EN LA CAPA DE RODADURA*. ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.

Corporación Andina de Fomento. (2020). *ANÁLISIS DE INVERSIONES EN EL SECTOR TRANSPORTE TERRESTRE INTERURBANO LATINOAMERICANO A 2040*. 2020.

- Delgado Alamilla, H., Gómez López, J. A., & Flores Flores, M. (2017). *PROPUESTA DE MÉTODO DE PRUEBA DE MÓDULO DINÁMICO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA MÉXICO. 2017.*
- Delgado Alamilla, H., Gómez López, J. A., & Flores Flores, M. (2018, julio 16). *PROPUESTA DE MODIFICACIÓN DE SECUENCIAS DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO.*
- Dougan, C. E., Stephens, J. E., Mahoney, J., & Hansen, G. (2003). *E*-DYNAMIC MODULUS Test Protocol- Problems and Solutions.*
- Elizondo, F., Ulloa, Á., & Badilla, G. (2007). *PREDICCIÓN DE MÓDULOS RESILIENTES EN MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE EL MODELO DE WITCZAK.*
- Espin Real, E. A., & Jaramillo Guijarro, F. A. (2016). *CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE MEDIANTE LA OBTENCIÓN DE CURVAS MAESTRAS DE MÓDULO DINÁMICO. PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR.*
- Esteban Nieto, N. T. (2018, junio 24). *TIPOS DE INVESTIGACIÓN.*
- González Morgado, D. E. (2018). *METODOLOGÍAS DE REPARACIÓN PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES DE MEDIANO Y BAJO TRÁNSITO. UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO.*
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. (2014). *METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN* (5a ed.). McGRAW-HILL.
- Higuera Sandoval, C. H., Naranjo Barrera, G. M., & Cetina Acuña, J. F. (2011, mayo 9). DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA POR CORRELACIONES. *2011, 20(30).*
- Lara Ruíz, J. J. (2021). *AJUSTE ECUACION DE PREDICCIÓN WITCZAK MODELO NCHRP 1-37A DEL MÓDULO DINÁMICO ($|E^*$) DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.*
- Mateos Moreno, Á., & Soares, J. B. (2015). EL MÓDULO DINÁMICO DE LA MEZCLA BITUMINOSA: IMPORTANCIA, EVALUACIÓN Y ESTIMACIÓN. *2015.*

- Merizalde Andrade, C. J. (2017). *EVALUACIÓN DEL DAÑO POR HUMEDAD EN MEZCLAS ASFÁLTICAS FINAS MEDIANTE PRUEBAS TRIAXIALES Y DE CORTE DIRECTO*. UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL.
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2013). VOLUMEN N° 3 ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CAMINOS Y PUENTES. En 2013 (Vol. 3).
- Noboa López, N. S., & Vega Naranjo, C. E. (2014). *CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE MEDIANTE LA OBTENCIÓN DE CURVAS MAESTRAS DE MÓDULO DINÁMICO*. PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR.
- Nuñez Gavilanez, K. G. (2014). *ESTUDIO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COLOCADAS EN VÍAS DE LA REGIÓN SIERRA DEL ECUADOR MEDIANTE PRUEBAS DE DETERIORO*. UNIVERSIDAD CÁTOLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL.
- Ortiz Hernández, E. H., Ortiz Moncayo, E. H., & Macías Sánchez, L. K. (2017). COMPARATIVE OF THE PROPERTIES OF A DESIGN OF ASPHALTIC MIXING IN CONVENTIONAL HEAT AND THE USE OF POLYMERS IN THE TOSAGUA ROAD. *Nº, 21*, 4–15.
- Padilla Rodríguez, A. (2004). *ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A LAS DEFORMACIONES PLÁSTICAS DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS DENSAS DE LA NORMATIVA MEXICANA MEDIANTE EL ENSAYO DE PISTA*. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Quezada Abad, C., Apolo Vivanco, N., & Santa Gadea, K. (2018). *PROCESOS Y FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA*. UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MACHALA.
- Ramírez Montenegro, M. A. (2015). *EVALUACIÓN DE COMPATIBILIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS, UTILIZANDO AGREGADOS DE LA CANTERA SAN MARTIN CON CEMENTO ASFALTICO PEN60/70 Y EMULSIÓN ASFÁLTICA CSS-1HP*. UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO.

- Ramos Galarza, C. (2021). DISEÑOS DE INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL. *CienciAmérica*, 10(1), 1–7. <https://doi.org/10.33210/ca.v10i1.356>
- Rondón Quintana, H. A., & Reyes Lizcano, F. A. (2015). *PAVIMENTOS. MATERIALES, CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO*. ECOE EDICIONES.
- Tamayo y Tamayo, M. (2004). *EL PROCESO DE LA INVESTIGACIÓN CINETÍFICA* (4a ed.). Editorial Limusa.
- Tipán Guañuna, J. F. (2012). *CONTROL DE CALIDAD DE CEMENTOS ASFÁLTICOS TIPO AP-3 UTILIZADOS EN LA FABRICACIÓN DE HORMIGÓN ASFÁLTICO PARA CAPAS DE RODADURA DE LAS CARRETERAS DEL ECUADOR, MEDIANTE ENSAYOS EN LABORATORIO*. ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO.
- Universidad Latinoamericana. (2017). *INVESTIGACIÓN EXPLORATORIA: Fundamentos básicos*.
- Vidal Valenca, J. (2006). *COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS. 2006*.

ANEXOS

ANEXO I

ENSAYOS DE LABORATORIO PARA MEZCLA ASFÁLTICA



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA
ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**



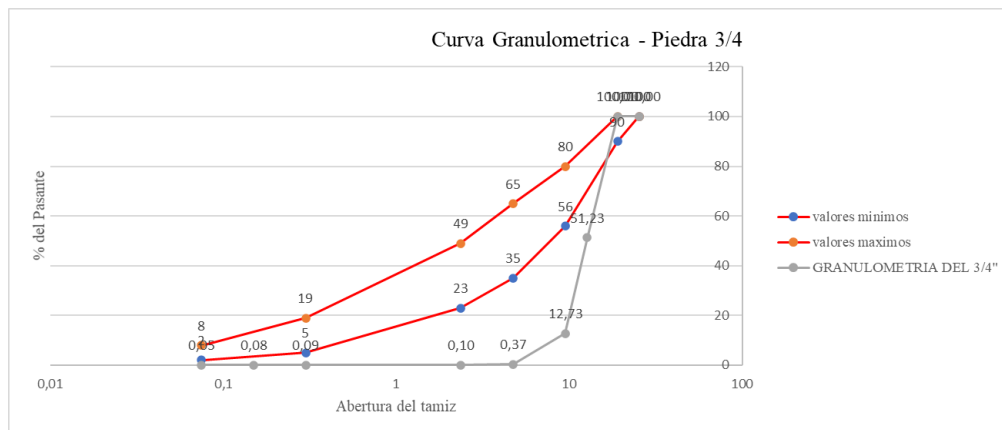
TEMA:	“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”
TUTOR:	ING. DANIEL ROSENDO CAMPOVERDE CAMPOVERDE
TESISTAS:	KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA, HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR

ENSAYO DE GRANULOMETRÍA

Tamaño Máximo Nominal ¾ (19mm)

Agregado Grueso – Piedra ¾

TAMIZ	W PARCIAL	% RETENIDO	% QUE PASA	% RET. ACUM.
1"	0	0	100	0,00
¾"	0	0	100	0,00
½"	3411	48,76584247	51,23	48,77
⅜"	2693	38,50	12,73	87,27
No 4	865	12,37	0,37	99,63
No 8	19	0,27	0,10	99,90
No 16	0	0,00	0,10	99,90
No 30	0,01	0,00	0,09	99,91
No 50	0,31	0,00	0,09	99,91
No 100	0,69	0,01	0,08	99,92
No 200	2,2	0,03	0,05	99,95
FONDO	3,44	0,05	0,00	100,00
TOTAL	6994,65	100		



Realizado por:	Revisado por:
Kevin Orrala Figueroa, Helen Rodríguez Borbor	Ing., Daniel Campoverde C.



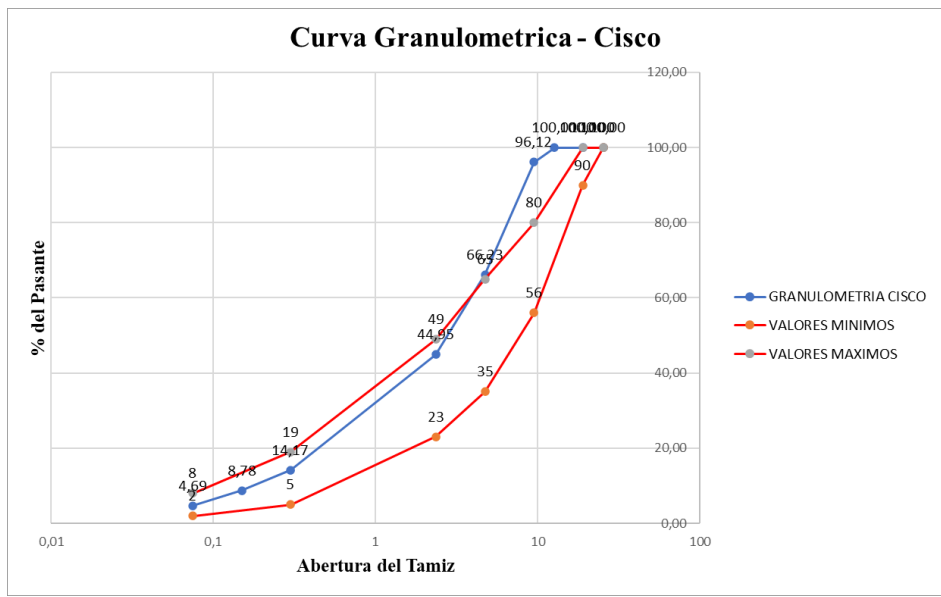
UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



TEMA:	“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”
TUTOR:	ING. DANIEL ROSENDO CAMPOVERDE CAMPOVERDE
TESISTAS:	KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA, HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR

ENSAYO DE GRANULOMETRÍA
Tamaño Máximo Nominal ¾ (19mm)
Agregado Grueso – Cisco

TAMIZ	W PARCIAL	% RETENIDO	% QUE PASA	% RET. ACUM.
1"	0	0	100	0,00
¾"	0	0	100	0,00
½"	0	0,00	100	0,00
⅜"	271	3,88	96,12	3,88
No 4	2087	29,89	66,23	33,77
No 8	1486	21,28	44,95	55,05
No 16	967	13,85	31,11	68,89
No 30	608	8,71	22,40	77,60
No 50	575	8,23	14,17	85,83
No 100	376	5,38	8,78	91,22
No 200	286	4,10	4,69	95,31
FONDO	327,31	4,69	0,00	100,00
TOTAL	6983,31	100		



Realizado por:	Revisado por:
Kevin Orrala Figueroa, Helen Rodríguez Borbor	Ing., Daniel Campoverde C.



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA
ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**



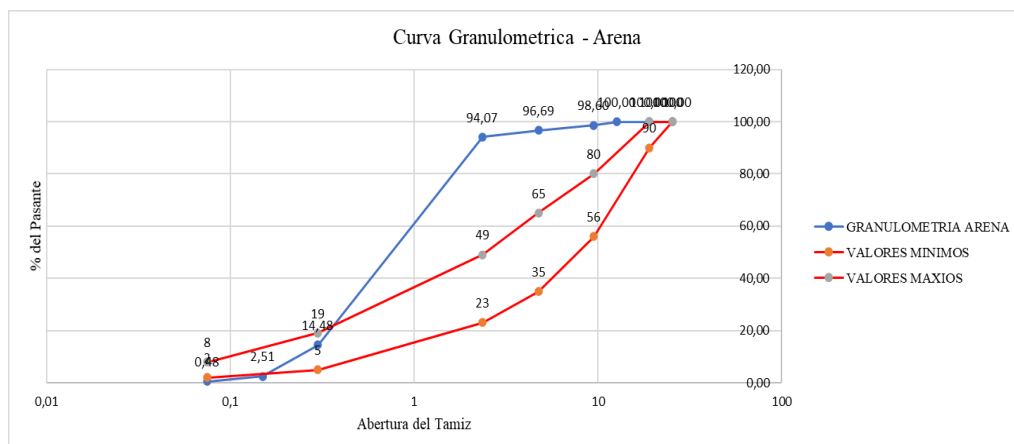
TEMA:	“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”
TUTOR:	ING. DANIEL ROSENDO CAMPOVERDE CAMPOVERDE
TESISTAS:	KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA, HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR

ENSAYO DE GRANULOMETRÍA

Tamaño Máximo Nominal ¾ (19mm)

Agregado Fino - Arena

TAMIZ	W PARCIAL	% RETENIDO	% QUE PASA	% RET. ACUM.
1"	0	0	100	0,00
3/4"	0	0	100	0,00
1/2"	0	0	100	0,00
3/8"	27,77	1,395771972	98,60	1,40
No 4	38,18	1,918997979	96,69	3,31
No 8	52,03	2,6151248	94,07	5,93
No 16	80,51	4,05	90,02	9,98
No 30	201,06	10,11	79,92	20,08
No 50	1302	65,44	14,48	85,52
No 100	238,13	11,97	2,51	97,49
No 200	40,3	2,03	0,48	99,52
FONDO	9,6	0,48	0,00	100,00
TOTAL	1989,58	100		



Realizado por:	Revisado por:
Kevin Orrala Figueroa, Helen Rodríguez Borbor	Ing., Daniel Campoverde C.



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



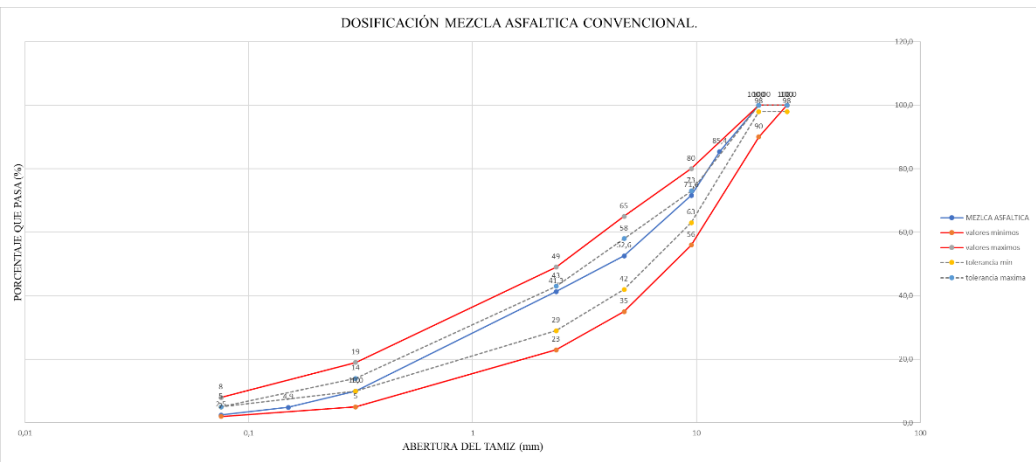
TEMA:	“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”
TUTOR:	ING. DANIEL ROSENDO CAMPOVERDE CAMPOVERDE
TESISTAS:	KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA, HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR

ENSAYO DE GRANULOMETRÍA
 Tamaño Máximo Nominal ¾ (19mm)
 Dosificación de Agregados para Mezcla Asfáltica Convencional

AGREGADO	% PASANTES											
	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No.4	No.8	No.16	No.30	No.50	No.100	No.200	
1 MATERIAL 34	100	100,00	51,23	12,73	4,75	0,37	0,10	0,10	0,09	0,09	0,08	0,05
2 ARENA NATURAL	100	100	100,00	98,60	96,69	94,07	90,02	79,92	14,48	2,51	0,48	
3 CISCO	100	100	100	96,12	66,23	44,95	31,11	22,40	14,17	8,78	4,69	

% Agregados	Dosificación											gr
1 30	30	30,00	15,37	3,82	0,11	0,03	0,03	0,03	0,02	0,01		450,00
2 20	20	20,00	10,25	2,55	0,07	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01		300,00
3 50	50	50,00	25,51	6,41	0,20	0,06	0,06	0,06	0,03	0,03		750,00
2 0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00
100	100	100,00	56,80	35,65	23,49			5,19		2,8		
Mezcla	100,0	100,0	85,4	71,6	52,6	41,3	33,6	27,2	10,0	4,9	2,5	

	3/4"	1/2"	3/8"	No.4	No.8	No.16	No.30	No.50	No.100	No.200	TMN
3/4"	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
1/2"		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
3/8"			✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
N4				✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗



Realizado por:	Revisado por:
Kevin Orrala Figueroa, Helen Rodríguez Borbor	Ing., Daniel Campoverde C.



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA
ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**



TEMA:	“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”
TUTOR:	ING. DANIEL ROSENDO CAMPOVERDE CAMPOVERDE
TESISTAS:	KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA, HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR

ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA

Gs AGREGADO GRUESO (Piedra 3/4)		
W A ENSAYAR	5000	gr
W SECO	4993	gr
W DE CANASTILLA SUMERGIDA	1068	gr
W SUPERFICIALMENTE SECO	5000	gr
W CANAST. SUM+MATERIAL	4279	gr
PESO DE LA MASA SUMERG.	3211	gr
Gsb	2,791	gr/cm ³
A	4993	gr
B	5000	gr
C	3211	gr

- A** = Peso en Aire Agregado Secado al horno
B = Peso en Aire Agregado S.S.S
C = Peso Agregado S.S.S. Sumergido en Agua
Gsb = Gravedad Específica neta del Agregado
Gsssb = Gravedad Específica Saturada Superficialmente Seca (S.S.S. Bulk)
Gsa = Gravedad Específica Seca aparente
% Abs = Porcentaje de Absorción

ECUACIONES	RESULTADOS	
$Gsb = \frac{A}{B - C}$	2,791	gr/cm ³
$Gsssb = \frac{B}{B - C}$	2,795	gr/cm ³
$Gsa = \frac{A}{A - C}$	2,802	gr/cm ³
$\% Abs = \frac{B-A}{A} * 100$	0,14	%

Realizado por:	Revisado por:
Kevin Orrala Figueroa, Helen Rodríguez Borbor	Ing., Daniel Campoverde C.



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA
ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**



TEMA:	“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”
TUTOR:	ING. DANIEL ROSENDO CAMPOVERDE CAMPOVERDE
TESISTAS:	KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA, HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR

ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA

Gs AGREGADO GRUESO (Piedra Cisco)	
W A ENSAYAR	5000 gr
W SECO	4845 gr
W DE CANASTILLA SUMERGIDA	1068 gr
W SUPERFICIALMENTE SECO	5000 gr
W CANAST. SUM+MATERIAL	4052 gr
PESO DE LA MASA SUMERG.	2984 gr
Gsb	2,40 gr/cm ³
A	4845 gr
B	5000 gr
C	2984 gr

A = Peso en Aire Agregado Secado al horno

B = Peso en Aire Agregado S.S.S

C = Peso Agregado S.S.S. Sumergido en Agua

Gsb = Gravedad Específica neta del Agregado

Gsssb = Gravedad Específica Saturada Superficialmente Seca (S.S.S. Bulk)

Gsa = Gravedad Específica Seca aparente

% Abs = Porcentaje de Absorción

ECUACIONES	RESULTADOS
$Gsb = \frac{A}{B - C}$	2,403 gr/cm ³
$Gsssb = \frac{B}{B - C}$	2,480 gr/cm ³
$Gsa = \frac{A}{A - C}$	2,603 gr/cm ³
$\% Abs = \frac{B - A}{A} * 100$	3,20 %

Realizado por:	Revisado por:
Kevin Orrala Figueroa, Helen Rodríguez Borbor	Ing., Daniel Campoverde C.



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA
ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**



TEMA:	“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”
TUTOR:	ING. DANIEL ROSENDO CAMPOVERDE CAMPOVERDE
TESISTAS:	KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA, HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR

ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA

Gs AGREGADO FINO (Piedra Cisco)		
A	495	gr
B	663,9	gr
C	969,8	gr
D	500	gr

- A** = Peso en Aire Agregado Secado al horno
B = Peso del matraz con agua
C = Peso del Matraz con Agregado y Agua hasta la marca
D = Peso del material superficialmente seco
Gsb = Gravedad Específica neta del Agregado
Gsssb = Gravedad Específica Saturada Superficialmente Seca (S.S.S. Bulk)
Gsa = Gravedad Específica Seca aparente
% Abs = Porcentaje de Absorción

ECUACIONES	RESULTADOS	
$Gsb = \frac{A}{B + D - C}$	2,550	gr/cm ³
$Gsssb = \frac{D}{B + D - C}$	2,58	gr/cm ³
$Gsa = \frac{A}{B + A - C}$	2,618	gr/cm ³
$\% Abs = \left(\frac{D - A}{A} \right) * 100$	1,01	%

Gsb Real	44%	1,122	gr/cm ³
----------	-----	-------	--------------------

Realizado por:	Revisado por:
Kevin Orrala Figueroa, Helen Rodríguez Borbor	Ing., Daniel Campoverde C.



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA
ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**



TEMA:	“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”
TUTOR:	ING. DANIEL ROSENDO CAMPOVERDE CAMPOVERDE
TESISTAS:	KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA, HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR

ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA

Gs AGREGADO FINO (Arena)	
A	489
B	659,6
C	966,1
D	500

gr
gr
gr
gr

- A** = Peso en Aire Agregado Secado al horno
B = Peso del matraz con agua
C = Peso del Matraz con Agregado y Agua hasta la marca
D = Peso del material superficialmente seco
Gsb = Gravedad Específica neta del Agregado
Gsssb = Gravedad Específica Saturada Superficialmente Seca (S.S.S. Bulk)
Gsa = Gravedad Específica Seca aparente
% Abs = Porcentaje de Absorción

ECUACIONES	RESULTADOS
$Gsb = \frac{A}{B + D - C}$	2,527
$Gsssb = \frac{D}{B + D - C}$	3,409
$Gsa = \frac{A}{B + A - C}$	2,679
$\% Abs = \left(\frac{D - A}{A} \right) * 100$	2,25

gr/cm³
gr/cm³
gr/cm³
%

Realizado por:	Revisado por:
Kevin Orrala Figueroa, Helen Rodríguez Borbor	Ing., Daniel Campoverde C.



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA
ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**



TEMA:	“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”
TUTOR:	ING. DANIEL ROSENDO CAMPOVERDE CAMPOVERDE
TESISTAS:	KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA, HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR

ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}}$$

G_{sb} = Gravedad Específica Bulk de la Combinación de Agregados
P₁, P₂, P_n = Porcentajes individuales por Peso del Agregado
G₁, G₂, G_n = Gravedad Específica Bulk Individual del Agregado

AGREGADO	PORCENTAJE	G _s
PIEDRA 3/4	30%	2,791
PIEDRA CISCO	50%	2,468
ARENA	20%	2,527
TOTAL MEZCLA	100%	

Realizado por:	Revisado por:
Kevin Orrala Figueroa, Helen Rodríguez Borbor	Ing., Daniel Campoverde C.



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA
ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**



TEMA:	“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”
TUTOR:	ING. DANIEL ROSENDO CAMPOVERDE CAMPOVERDE
TESISTAS:	KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA, HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR

ENSAYO DE ABRASIÓN LOS ÁNGELES

DIÁMETRO				MÉTODO			
Pasa en Tamiz		Retenido en Tamiz		A	B	C	D
N°	"mm"	N°	"mm"	Cantidad de Material a Emplear			
1,5	37,5	1	25	1250±25			
1	25	3/4	19	1250±25			
3/4	19	1/2	12,5	1250±10	2500±10		
1/2	12,5	1/8	9,5	1250±10	2500±10		
1/8	9,5	1/4	6,25			2500±10	
1/4	6,25	N° 4	4,76			2500±10	
N° 4	4,76	N° 8	2,38				5000±10
Total				5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
N° de Esferas				12	11	8	6
N° de Revoluciones				500	500	500	500
Tiempo de Rotación "min"				15	15	15	15

$$\% \text{ Desg.} = \frac{W_{\text{inicial}} - W_{\text{final}}}{W_{\text{inicial}}} * 100$$

Material	Piedra 3/4
Método	B
W inicial	5001
W final	4557
%Desgaste	8,88

Material	Cisco
Método	C
W inicial	5001
W final	3781
%Desgaste	24,40

Realizado por:	Revisado por:
Kevin Orrala Figueroa, Helen Rodríguez Borbor	Ing., Daniel Campoverde C.



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA
ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**



TEMA:	“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”
TUTOR:	ING. DANIEL ROSENDO CAMPOVERDE CAMPOVERDE
TESISTAS:	KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA, HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR

ENSAYO RICE PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS CONVENCIONALES

$$Gmm = \frac{A}{A + B - C}$$

Gmm = Gravedad Específica Teórica máxima

A = Peso en aire de la Mezcla Asfáltica

B = Peso del Picnómetro lleno de Agua

C = Peso del Picnómetro lleno de agua y Mezcla Asfáltica

% ASFALTO	5,0%	
W recip	157	gr
W recip+muestra	2157	gr
Wmuestra	2000	gr
Wpicnom+agua	7407	gr
Wmuestra+recip+agua	8595	gr
Gmm	2,463	

% ASFALTO	5,5%	
W recip	144	gr
W recip+muestra	2144	gr
Wmuestra	2000	gr
Wpicnom+agua	7407	gr
Wmuestra+recip+agua	8589	gr
Gmm	2,445	

% ASFALTO	6,0%	
W recip	153	gr
W recip+muestra	2153	gr
Wmuestra	2000	gr
Wpicnom+agua	7407	gr
Wmuestra+recip+agua	8585	gr
Gmm	2,433	

% ASFALTO	6,5%	
W recip	242	gr
W recip+muestra	2242	gr
Wmuestra	2000	gr
Wpicnom+agua	7407	gr
Wmuestra+recip+agua	8581	gr
Gmm	2,421	

Realizado por:	Revisado por:
Kevin Orrala Figueroa, Helen Rodríguez Borbor	Ing., Daniel Campoverde C.



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



TEMA:	“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”
TUTOR:	ING. DANIEL ROSENDO CAMPOVERDE CAMPOVERDE
TESISTAS:	KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA, HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR

CARACTERÍSTICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL

Gsb=	2,569
G_b:	1,015

Gmm >2,44

MEZCLA No.	% DE ASFALTO	PESO EN GRAMOS			Gmb (AI/SSS-Ag)	Gsc	ENSAYO RICE	% en volúmenes			%Pba	Pbc	VMA	VFA	ESTABILIDAD - LB			FLUJO 0.01"	Volumen
		SECA EN AIRE	S. S. S. EN AIRE	EN AGUA				agregado	Vacios de Aire	Asfalto					Factor de corrección	MEDIDA	CORREGIDA		
a	b	c	d	e	Gmb	Gsc	Gmm	Vsb	Va	Vbc				r	s	t			
1		1.197,4	1.202,3	690,2	2,338									1	2380,3	2380,3	11	512,1	
2		1.202,3	1.207,6	694,3	2,342									1	2403,5	2403,5	11	513,3	
3		1.200,8	1.205,1	692,9	2,344									1	2465,8	2465,8	12	512,2	
Promedio	5,0				2,342	2,663	2,46	86,586	4,930	8,484	1,394	3,676	13,414	63,249		2391,9		11	
1		1.193,2	1.196,4	689,0	2,352									1,04	2468,5	2567,2	12	507,4	
2		1.197,0	1.199,5	693,2	2,364									1,04	2690,1	2797,7	12	506,3	
3		1.202,3	1.204,5	693,8	2,354									1	2730,4	2730,4	12	510,7	
Promedio	5,5				2,357	2,664	2,44	86,684	3,612	9,704	1,399	4,178	13,316	72,875		2682,4		12,0	
1		1.193,4	1.195,4	691,0	2,366									1,04	2862,7	2977,2	13	504,4	
2		1.201,3	1.202,1	692,1	2,355									1	2768,5	2768,5	13	510,0	
3		1.197,2	1.202,0	699,0	2,380									1,04	2686,5	2794,0	13	503,0	
Promedio	6,0				2,367	2,672	2,43	86,610	2,708	10,682	1,513	4,578	13,390	79,774		2872,9		13,0	
1		1.194,4	1.194,8	690,0	2,366									1,04	2664,0	2770,6	14	504,8	
2		1.196,1	1.196,6	691,2	2,367									1,04	2677,5	2784,6	14	505,4	
3		1.209,8	1.210,1	696,0	2,353									1	2649,9	2649,9	14	514,1	
Promedio	6,5				2,362	2,680	2,42	85,960	2,450	11,590	1,627	4,978	14,040	82,551		2777,6		13,8	

Realizado por: Kevin Orrala Figueroa, Helen Rodríguez Borbor	Revisado por: Ing., Daniel Campoverde C.
--	--

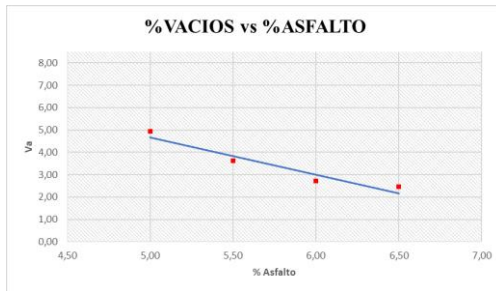


UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA
ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

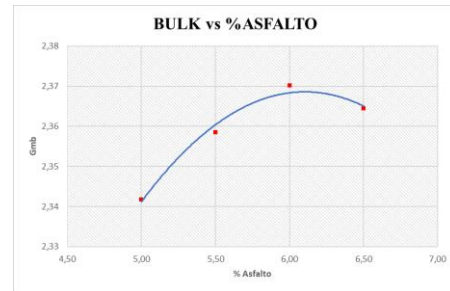


TEMA:	“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”
TUTOR:	ING. DANIEL ROSENDO CAMPOVERDE CAMPOVERDE
TESISTAS:	KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA, HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR

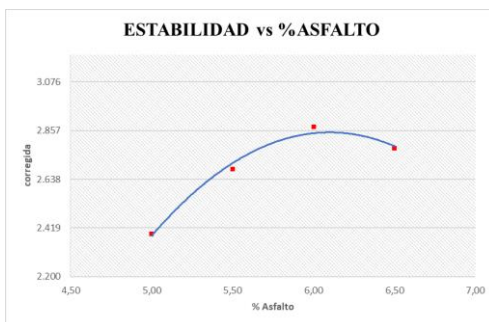
**PARÁMETROS DE DISEÑO SEGÚN MTOP PARA MEZCLA
ASFÁLTICA CONVENCIONAL**



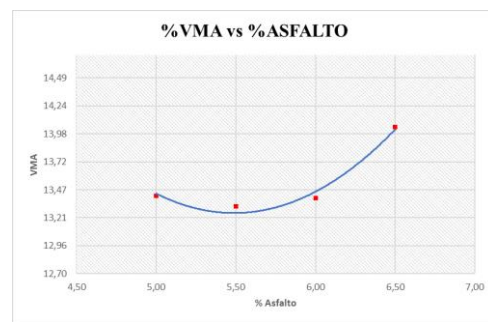
% ÓPTIMO ASFALTO 5,35%



Gmb 2,352



Estabilidad 2595,274



% VMA 13,345

Realizado por: Kevin Orrala Figueroa, Helen Rodríguez Borbor	Revisado por: Ing., Daniel Campoverde C.
--	--

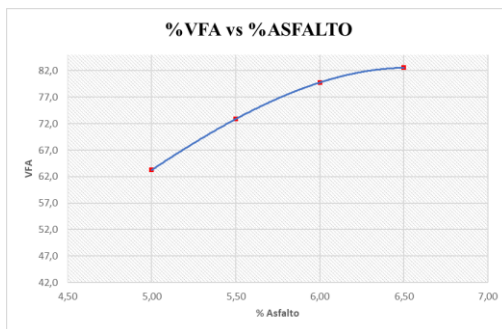


**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA
ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

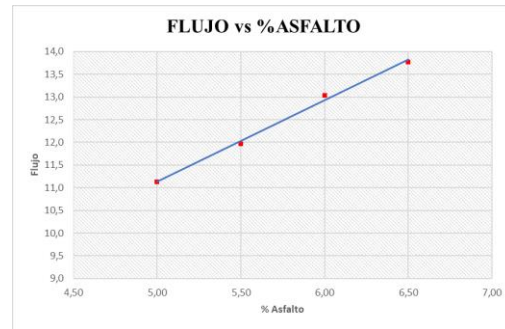


TEMA:	“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”
TUTOR:	ING. DANIEL ROSENDO CAMPOVERDE CAMPOVERDE
TESISTAS:	KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA, HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR

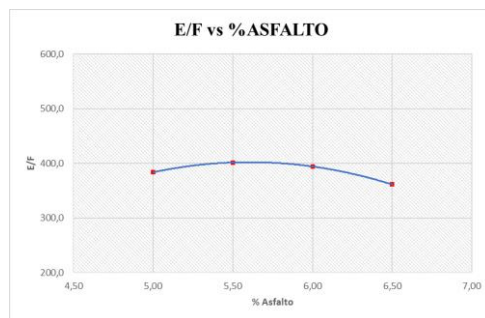
**PARÁMETROS DE DISEÑO SEGÚN MTOP PARA MEZCLA
ASFÁLTICA CONVENCIONAL**



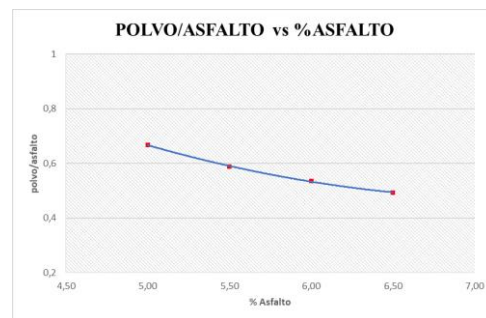
% VFA 69,644



Flujo 11,72



E/F 395,90



POLVO/ASFALTO 0,612

Realizado por:	Revisado por:
Kevin Orrala Figueroa, Helen Rodríguez Borbor	Ing., Daniel Campoverde C.

ANEXOS II

ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO EN EL EQUIPO NAT.



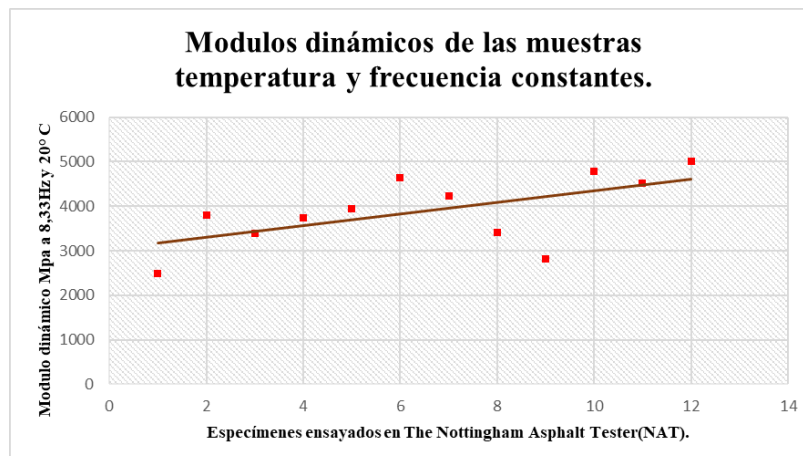
**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA
ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**



TEMA:	“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”
TUTOR:	ING. DANIEL ROSENDO CAMPOVERDE CAMPOVERDE
TESISTAS:	KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA, HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR

**ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO EN EQUIPO NOTTINGHAM
ASPHALT TESTER**

MUESTRA S	MODULOS 20°C (Mpa)
1	2495
2	3801
3	3394
4	3746
5	3936
6	4650
7	4235
8	3411
9	2815
10	4794
11	4518
12	5014
promedio	3984
desv. Estanda	666
coef. Variacio	16,7



Realizado por:	Revisado por:
Kevin Orrala Figueroa, Helen Rodríguez Borbor	Ing., Daniel Campoverde C.

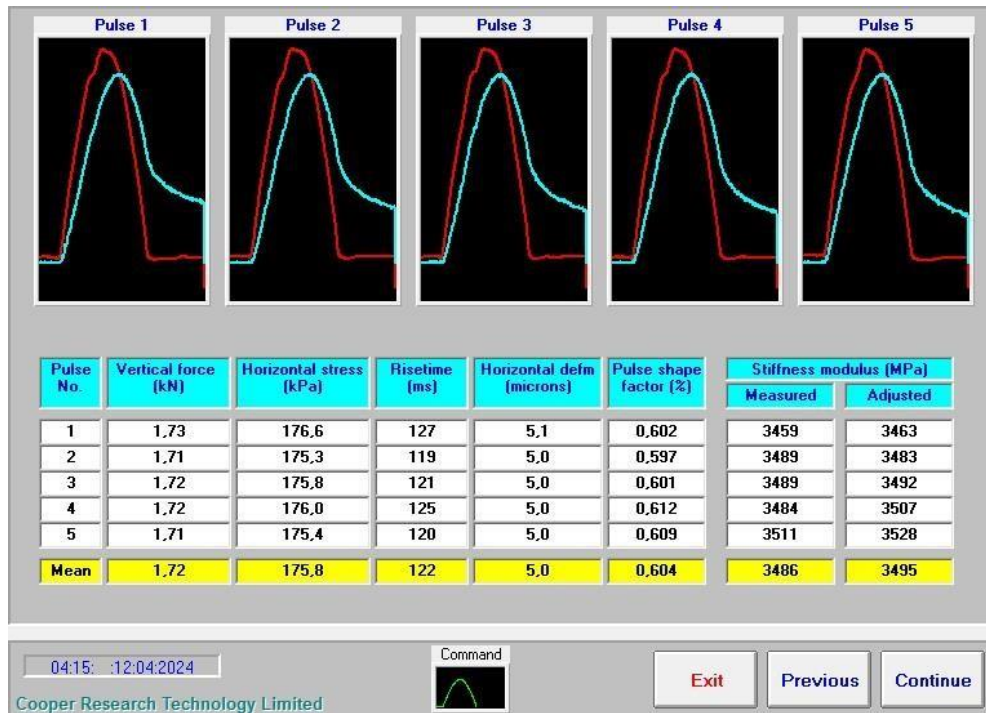


UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



TEMA:	“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”
TUTOR:	ING. DANIEL ROSENDO CAMPOVERDE CAMPOVERDE
TESISTAS:	KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA, HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR

ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO EN EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER
Briqueta 1



Realizado por:	Revisado por:
Kevin Orrala Figueroa, Helen Rodríguez Borbor	Ing., Daniel Campoverde C.

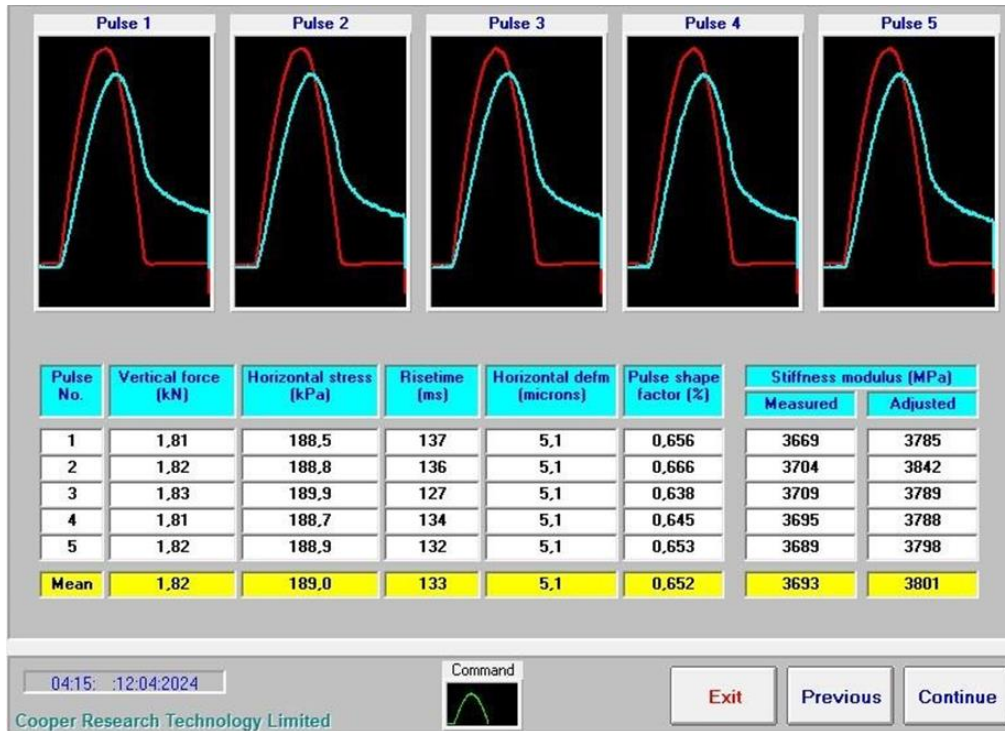


**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA
ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**



TEMA:	“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”
TUTOR:	ING. DANIEL ROSENDO CAMPOVERDE CAMPOVERDE
TESISTAS:	KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA, HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR

**ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO EN EQUIPO NOTTINGHAM
ASPHALT TESTER
Briqueta 2**



Realizado por: Kevin Orrala Figueroa, Helen Rodríguez Borbor	Revisado por: Ing., Daniel Campoverde C.
---	---



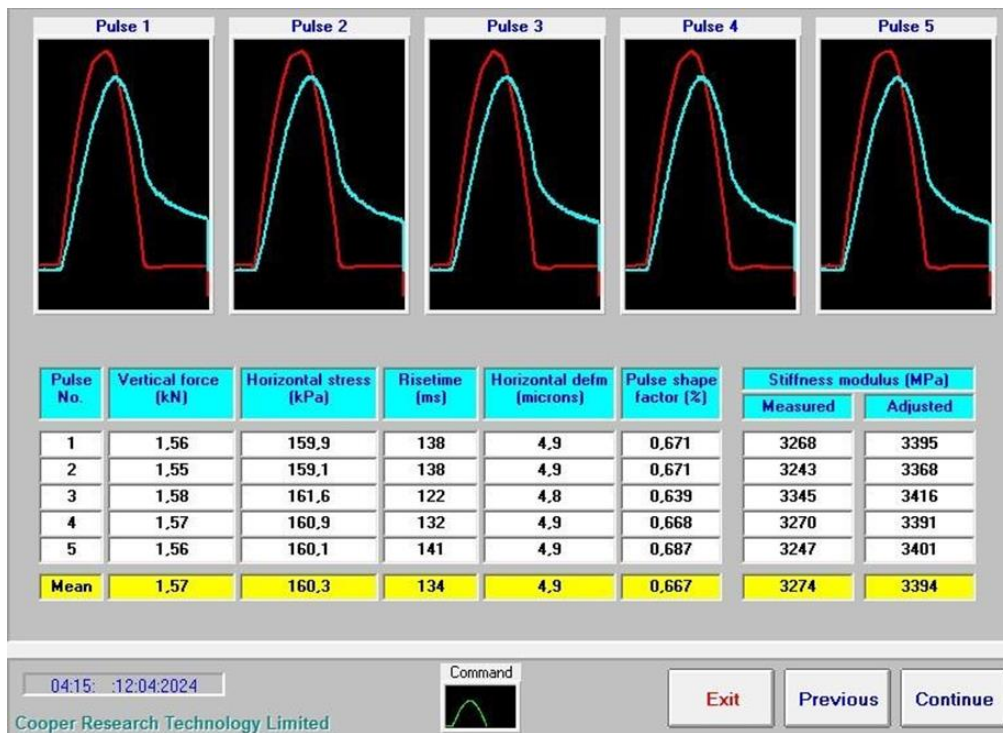
**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA
ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**



TEMA:	“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”
TUTOR:	ING. DANIEL ROSENDO CAMPOVERDE CAMPOVERDE
TESISTAS:	KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA, HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR

**ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO EN EQUIPO NOTTINGHAM
ASPHALT TESTER**

Briqueta 3



Realizado por:	Revisado por:
Kevin Orrala Figueroa, Helen Rodríguez Borbor	Ing., Daniel Campoverde C.

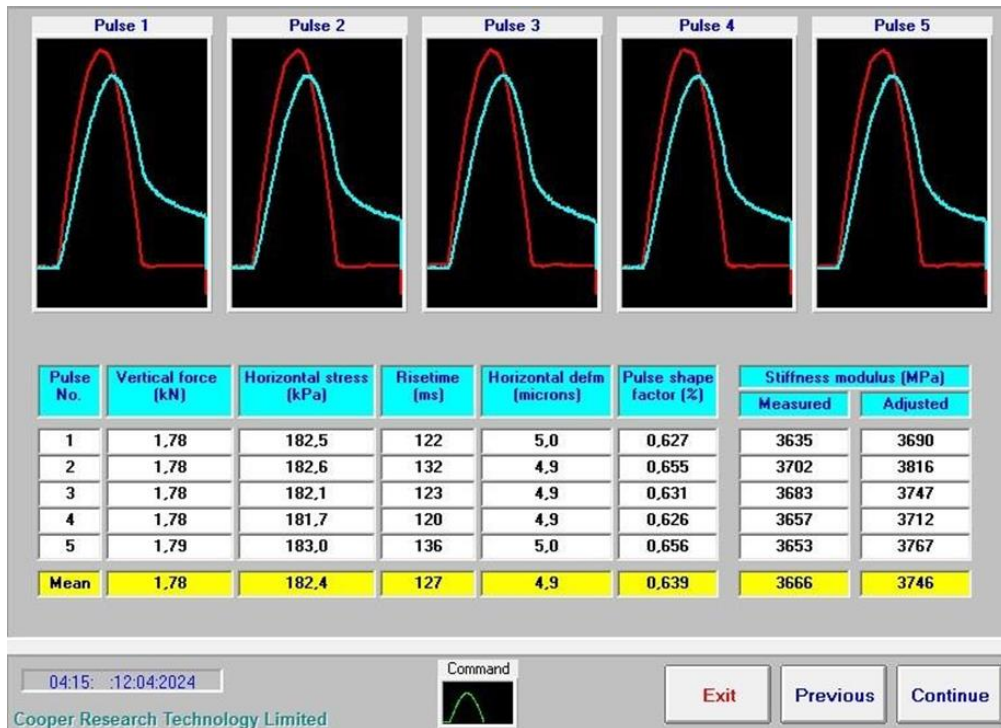


UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



TEMA:	“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”
TUTOR:	ING. DANIEL ROSENDO CAMPOVERDE CAMPOVERDE
TESISTAS:	KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA, HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR

ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO EN EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER
Briqueta 4



Realizado por:	Revisado por:
Kevin Orrala Figueroa, Helen Rodríguez Borbor	Ing., Daniel Campoverde C.

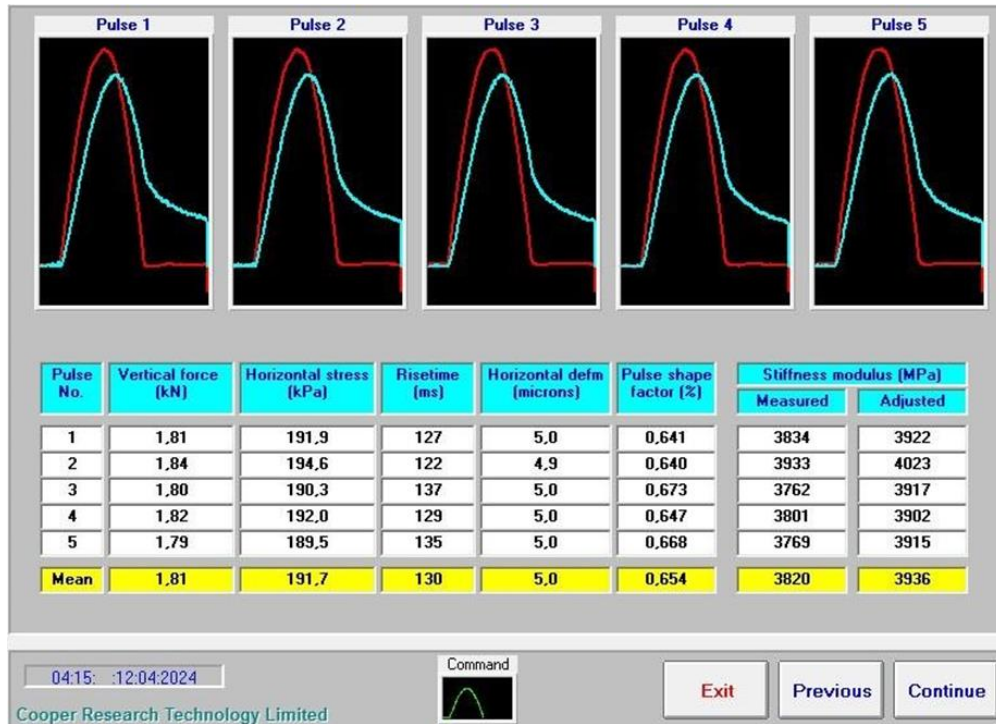


**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA
ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**



TEMA:	“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”
TUTOR:	ING. DANIEL ROSENDO CAMPOVERDE CAMPOVERDE
TESISTAS:	KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA, HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR

**ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO EN EQUIPO NOTTINGHAM
ASPHALT TESTER
Briqueta 5**



Realizado por:	Revisado por:
Kevin Orrala Figueroa, Helen Rodríguez Borbor	Ing., Daniel Campoverde C.

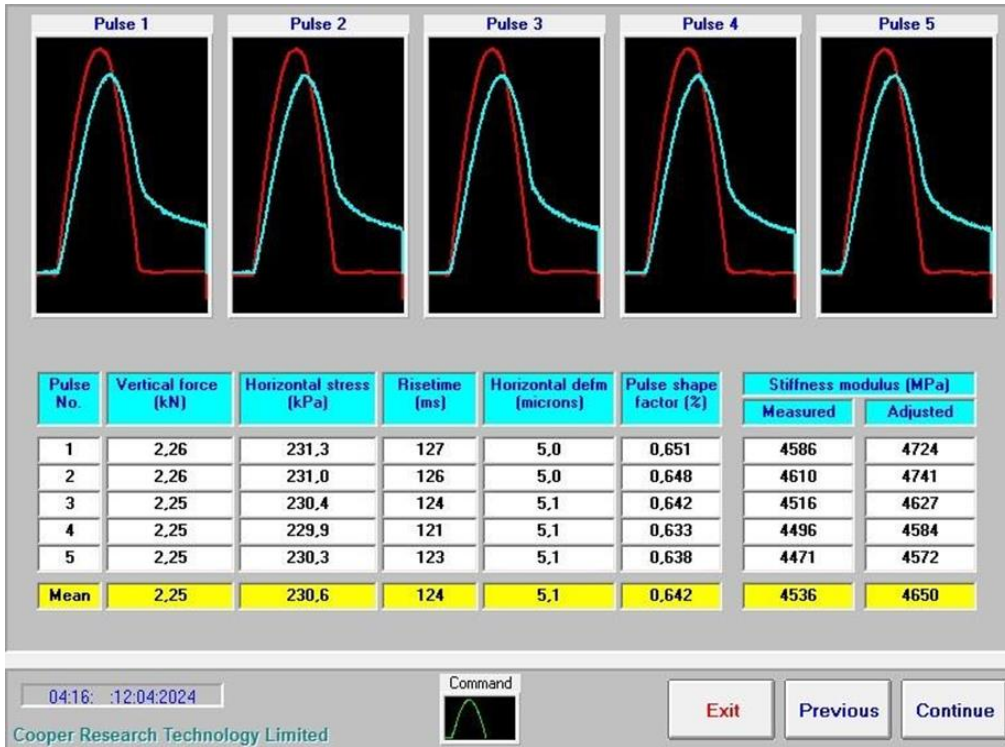


UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



TEMA:	“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”
TUTOR:	ING. DANIEL ROSENDO CAMPOVERDE CAMPOVERDE
TESISTAS:	KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA, HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR

ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO EN EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER
Briqueta 6



Realizado por:	Revisado por:
Kevin Orrala Figueroa, Helen Rodríguez Borbor	Ing., Daniel Campoverde C.

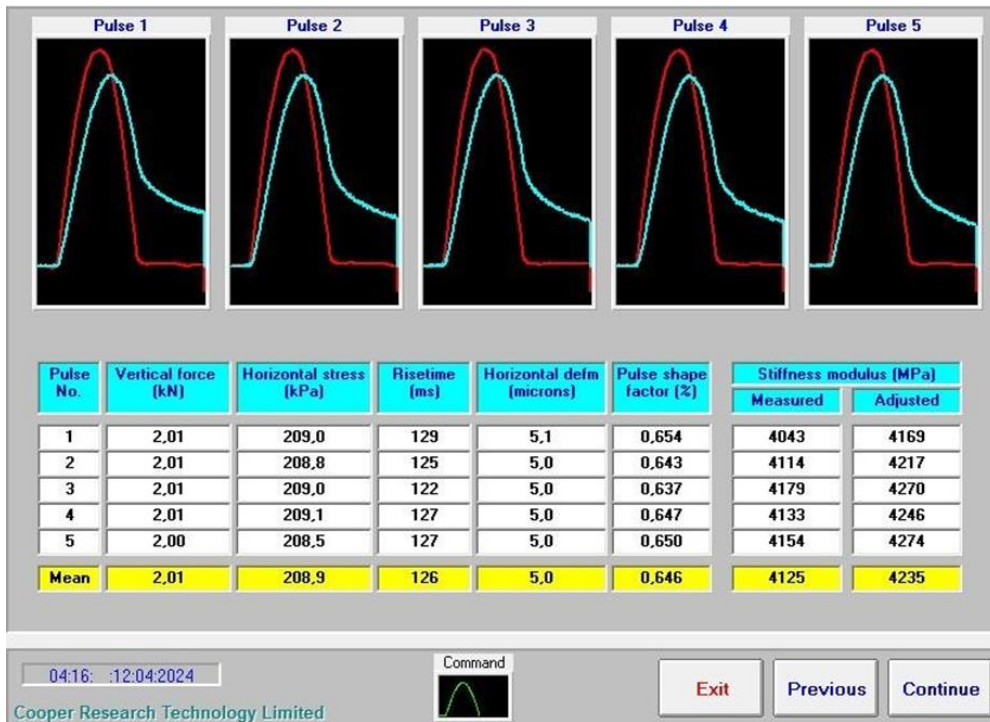


UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



TEMA:	“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”
TUTOR:	ING. DANIEL ROSENDO CAMPOVERDE CAMPOVERDE
TESISTAS:	KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA, HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR

ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO EN EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER
Briqueta 7



Realizado por:	Revisado por:
Kevin Orrala Figueroa, Helen Rodríguez Borbor	Ing., Daniel Campoverde C.

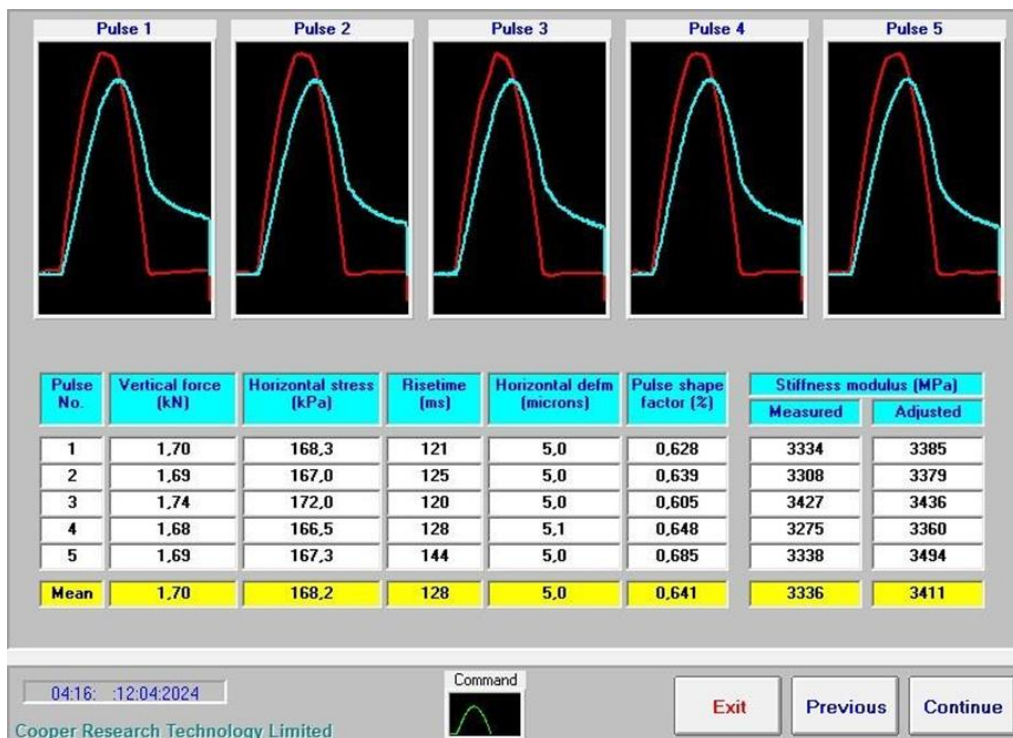


**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA
ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**



TEMA:	“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”
TUTOR:	ING. DANIEL ROSENDO CAMPOVERDE CAMPOVERDE
TESISTAS:	KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA, HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR

**ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO EN EQUIPO NOTTINGHAM
ASPHALT TESTER
Briqueta 8**



Realizado por:	Revisado por:
Kevin Orrala Figueroa, Helen Rodríguez Borbor	Ing., Daniel Campoverde C.



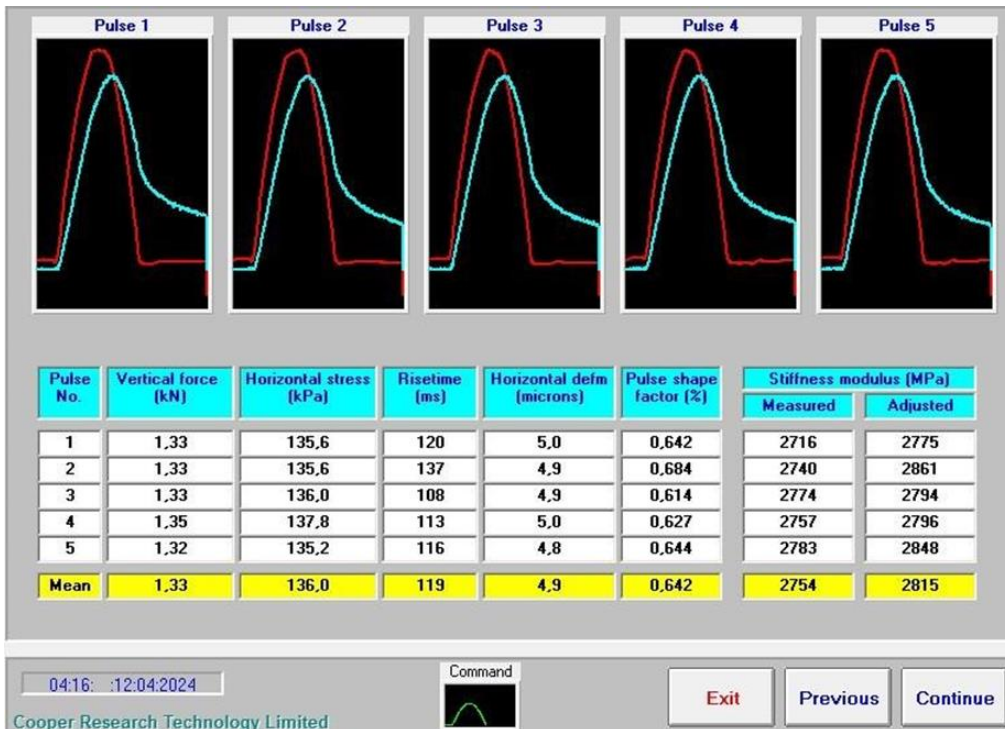
**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA
ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**



TEMA:	“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”
TUTOR:	ING. DANIEL ROSENDO CAMPOVERDE CAMPOVERDE
TESISTAS:	KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA, HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR

**ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO EN EQUIPO NOTTINGHAM
ASPHALT TESTER**

Briqueta 9



Realizado por: Kevin Orrala Figueroa, Helen Rodríguez Borbor	Revisado por: Ing., Daniel Campoverde C.
---	---

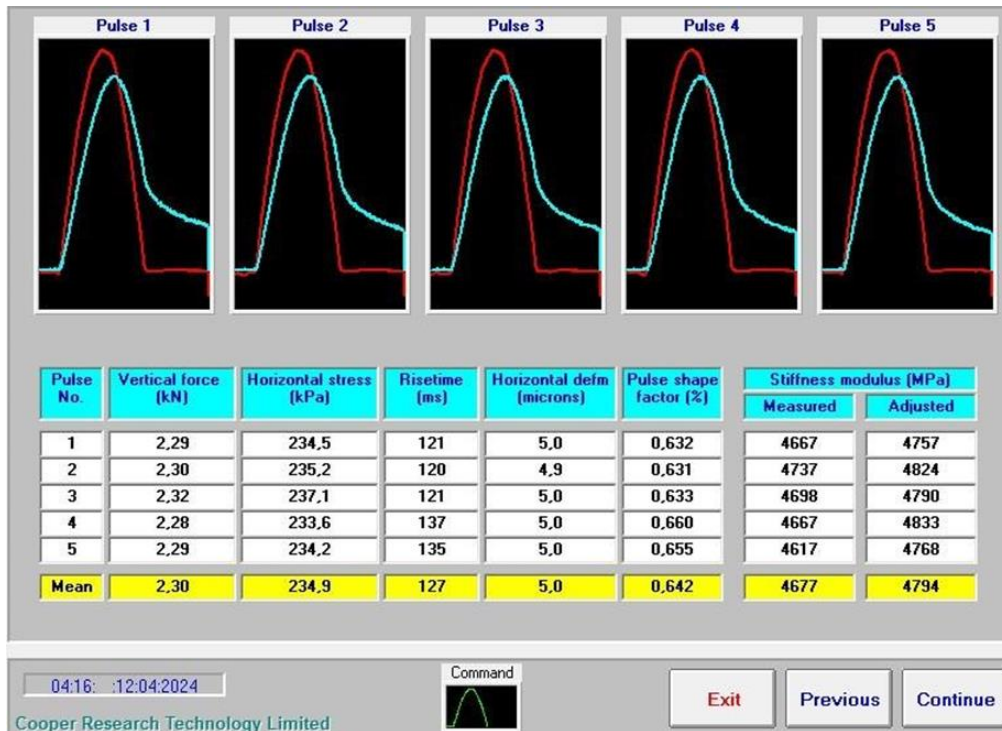


**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA
ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**



TEMA:	“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”
TUTOR:	ING. DANIEL ROSENDO CAMPOVERDE CAMPOVERDE
TESISTAS:	KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA, HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR

**ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO EN EQUIPO NOTTINGHAM
ASPHALT TESTER
Briqueta 10**



Realizado por: Kevin Orrala Figueroa, Helen Rodríguez Borbor	Revisado por: Ing., Daniel Campoverde C.
---	---

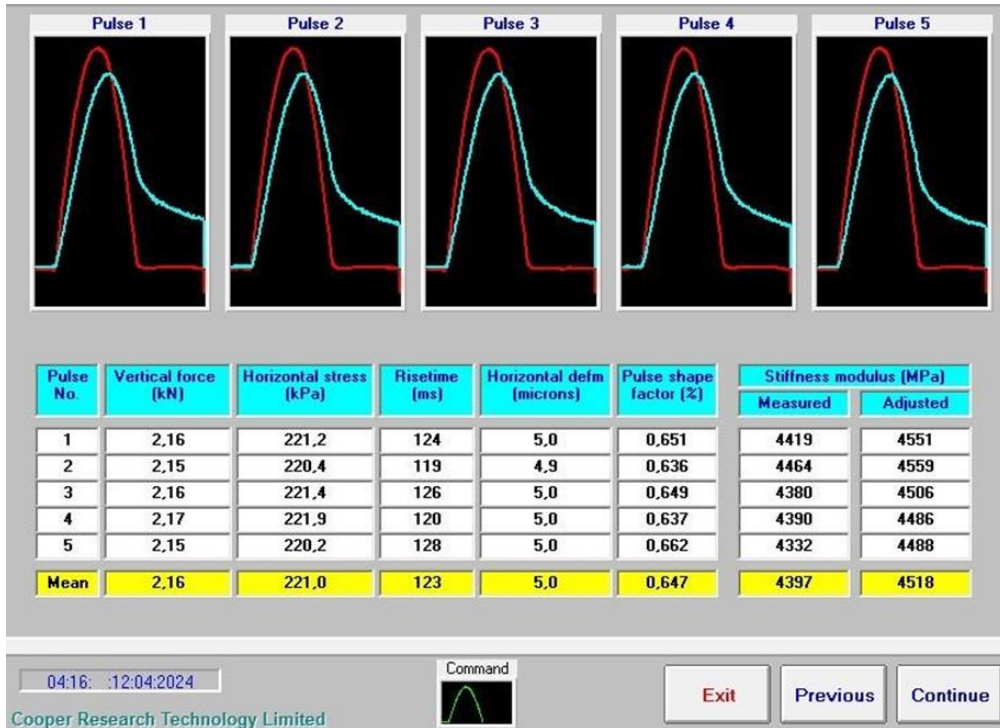


UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



TEMA:	“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”
TUTOR:	ING. DANIEL ROSENDO CAMPOVERDE CAMPOVERDE
TESISTAS:	KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA, HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR

ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO EN EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER
Briqueta 11



Realizado por:	Revisado por:
Kevin Orrala Figueroa, Helen Rodríguez Borbor	Ing., Daniel Campoverde C.

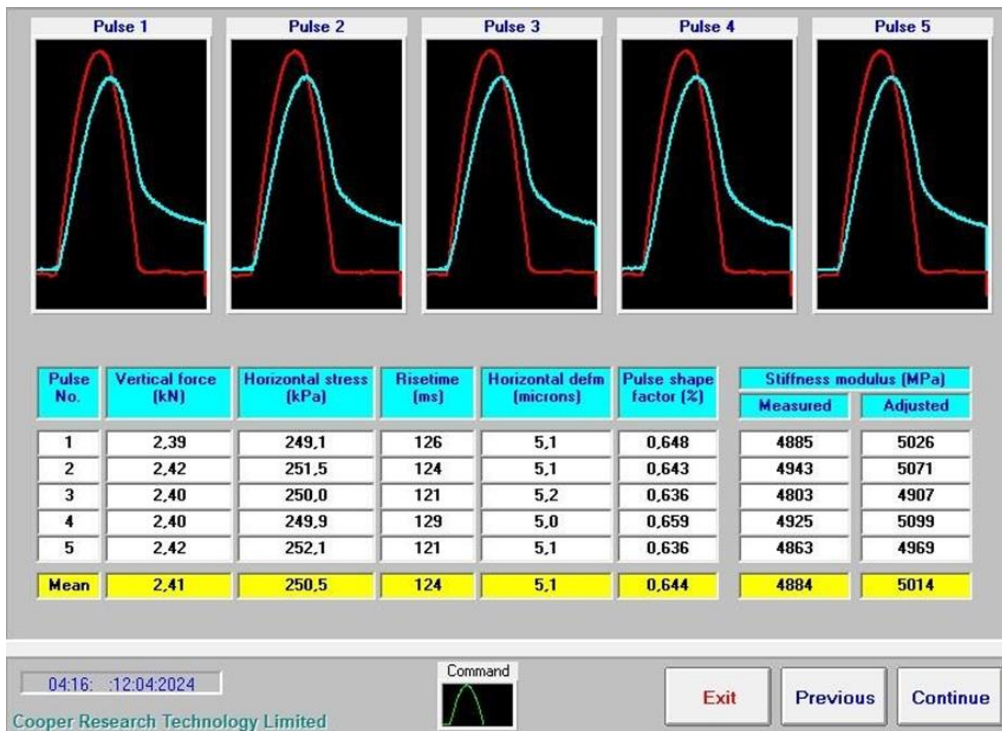


**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA
ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**



TEMA:	“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”
TUTOR:	ING. DANIEL ROSENDO CAMPOVERDE CAMPOVERDE
TESISTAS:	KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA, HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR

**ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO EN EQUIPO NOTTINGHAM
ASPHALT TESTER
Briqueta 12**



Realizado por:	Revisado por:
Kevin Orrala Figueroa, Helen Rodríguez Borbor	Ing., Daniel Campoverde C.

ANEXO III

REGISTRO FOTOGRÁFICO DE ENSAYOS DE LABORATORIO



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA
ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**



TEMA:	“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”
TUTOR:	ING. DANIEL ROSENDO CAMPOVERDE CAMPOVERDE
TESISTAS:	KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA, HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR

ENSAYO DE GRANULOMETRÍA



Realizado por:	Revisado por:
Kevin Orrala Figueroa, Helen Rodríguez Borbor	Ing., Daniel Campoverde C.



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA
ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**



TEMA:	“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”
TUTOR:	ING. DANIEL ROSENDO CAMPOVERDE CAMPOVERDE
TESISTAS:	KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA, HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR

ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA



Realizado por: Kevin Orrala Figueroa, Helen Rodríguez Borbor	Revisado por: Ing., Daniel Campoverde C.
--	--



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA
ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**



TEMA:	“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”
TUTOR:	ING. DANIEL ROSENDO CAMPOVERDE CAMPOVERDE
TESISTAS:	KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA, HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR

ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA



Realizado por:	Revisado por:
Kevin Orrala Figueroa, Helen Rodríguez Borbor	Ing., Daniel Campoverde C.



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA
ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**



TEMA:	“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”
TUTOR:	ING. DANIEL ROSENDO CAMPOVERDE CAMPOVERDE
TESISTAS:	KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA, HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR

ENSAYO DE ABRASIÓN LOS ÁNGELES



Realizado por:	Revisado por:
Kevin Orrala Figueroa, Helen Rodríguez Borbor	Ing., Daniel Campoverde C.



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA
ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**



TEMA:	“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”
TUTOR:	ING. DANIEL ROSENDO CAMPOVERDE CAMPOVERDE
TESISTAS:	KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA, HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR

ELABORACIÓN Y COMPACTACIÓN DE BRIQUETAS



Realizado por: Kevin Orrala Figueroa, Helen Rodríguez Borbor	Revisado por: Ing., Daniel Campoverde C.
---	---



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA
ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**



TEMA:	“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”
TUTOR:	ING. DANIEL ROSENDO CAMPOVERDE CAMPOVERDE
TESISTAS:	KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA, HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR

ENSAYO DE DENSIDAD DE BRIQUETAS



Realizado por:	Revisado por:
Kevin Orrala Figueroa, Helen Rodríguez Borbor	Ing., Daniel Campoverde C.



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA
ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**



TEMA:	“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”
TUTOR:	ING. DANIEL ROSENDO CAMPOVERDE CAMPOVERDE
TESISTAS:	KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA, HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR

ENSAYO DE ESTABILIDAD/FLUJO



Realizado por: Kevin Orrala Figueroa, Helen Rodríguez Borbor	Revisado por: Ing., Daniel Campoverde C.
---	---



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA
ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**



TEMA:	“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”
TUTOR:	ING. DANIEL ROSENDO CAMPOVERDE CAMPOVERDE
TESISTAS:	KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA, HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR

ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA - RICE



Realizado por:	Revisado por:
Kevin Orrala Figueroa, Helen Rodríguez Borbor	Ing., Daniel Campoverde C.



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA
ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**



TEMA:	“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO EL EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT TESTER”
TUTOR:	ING. DANIEL ROSENDO CAMPOVERDE CAMPOVERDE
TESISTAS:	KEVIN ANDRÉS ORRALA FIGUEROA, HELEN MELINA RODRÍGUEZ BORBOR

ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO



Realizado por: Kevin Orrala Figueroa, Helen Rodríguez Borbor	Revisado por: Ing., Daniel Campoverde C.
---	---