



UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE CIENCIAS MATEMÁTICAS Y FÍSICAS
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL.

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A
LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

VIAS

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONTROL DE CALIDAD EN
MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE DE UN DISEÑO
CONVENCIONAL Y DE UN DISEÑO ADICIONANDO TEREFTALATO
DE POLIETILENO

AUTOR: CAICEDO CAMPOVERDE KEVIN DANNY

TUTOR: ING. VARGAS JIMÉNEZ JULIO ALBERTO, M.Sc.

GUAYAQUIL, SEPTIEMBRE 2019

Agradecimiento

Agradezco primero a Dios por la fuerzas y deseos de superación que me ha otorgado a lo largo de mi carrera como estudiante.

A la Universidad de Guayaquil, a los docentes de mi carrera, a mis familiares y compañeros de carrera, todos juntos formaron en mí valores y actitudes necesarias para poder llegar hasta la cumbre de la carrera.

Al Dr. Rolando Vila que me ayudado con los ensayos en su laboratorio ubicado en la Universidad Católica Santiago de Guayaquil que con el interés investigativo ha impartido sus conocimientos acerca del tema para llevar a cabo este proyecto.

A los docentes, el Ing. Julio Vargas y el Ing. Carlos Mora, por darme el seguimiento necesario para la aprobación de mi tema de tesis, fueron piezas claves en la realización de este proyecto de tesis.

Al Ing. Guido Fernando Verdaguer Campos y al Ing. Juan Carlos Cornejo Illescas, que son pilares fundamentales en mi camino pre profesional y que me han dado su apoyo sin interés para poder culminar mis estudios siendo mis jefes a cargo en proyectos.

Caicedo Campoverde Kevin Danny

Dedicatoria

Dedico este tema de tesis primero a Dios, por la sabiduría y el esfuerzo que ha derramado en mí para llegar a esta parte de mis estudios, y las bendiciones que día a día he recibido de su parte, pilar fundamental en mi vida y en mis estudios.

A mi padre el Ing. Danny Manuel Caicedo Alcívar que siempre me ha brindado su apoyo en mis estudios y me ha impartido el deseo de superación, con sus enseñanzas y consejos.

A mi madre Gloria Elvira Campoverde Rivas que ha estado presente en mi carrera brindándome su apoyo incondicional en este largo y duro camino de mis estudios.

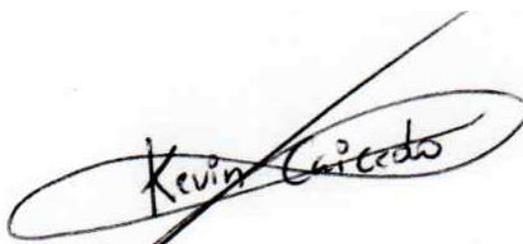
A mi abuelita la Sra. María Asunción Rivas Mero que con el simple hecho de estar pendiente en mis estudios me ha ayudado a superarme.

Caicedo Campoverde Kevin Danny

Declaración Expresa

Artículo XI.- del Reglamento Interno de Graduación de la Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas de la Universidad de Guayaquil.

La Responsabilidad de los hechos ideas y doctrinas expuestas en este Trabajo de Titulación corresponden exclusivamente al Autor y al Patrimonio Intelectual de la Universidad de Guayaquil.

A handwritten signature in black ink, reading "Kevin Caicedo", is written over a light blue horizontal line. The signature is stylized and cursive.

Kevin Danny Caicedo Campoverde

C.I. 0955198130

Tribunal de Graduación.

Ing. Fausto Cabrera Montes, M. Sc.
Decano

Ing. Julio Vargas Jiménez, M. Sc.
Tutor

Vocal

Vocal



Universidad de Guayaquil
Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas
Escuela de Ingeniería Civil

UNIDAD DE TITULACION
Telf: 2283348

ANEXO 11

Guayaquil, 23 de agosto del 2019

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR REVISOR

Ing. Carlos Mora Cabrera, MSc., habiendo sido nombrado tutor del trabajo de titulación **ANALISIS COMPARATIVO DEL CONTROL DE CALIDAD EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE DE UN DISEÑO CONVENCIONAL Y DE UN DISEÑO ADICIONANDO TEREFTALATO EN POLIETILENO** certifico que el presente, elaborado por CAICEDO CAMPOVERDE KEVIN DANNY, con C. I. N° 0955198130, del núcleo estructurante Vías de Comunicaciones, con mi respectiva supervisión como requerimiento parcial para la obtención del título de **INGENIERO CIVIL**, en la Carrera de Ingeniería Civil, ha sido **REVISADO Y APROBADO** en todas sus partes, encontrándose apto para su sustentación.


Ing. Carlos Mora Cabrera, MSc.
DOCENTE TUTOR REVISOR
C.I. 0200290286

Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas
CFG. RECIBIDO 23/8/19
HORA: 14:30
Carrera de Ingeniería Civil




Universidad de Guayaquil
Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas
Escuela de Ingeniería Civil

UNIDAD DE TITULACION
Tel: 2283348

ANEXO 12

LICENCIA GRATUITA INTRANSFERIBLE Y NO EXCLUSIVA PARA EL USO NO COMERCIAL DE LA OBRA CON FINES NO ACADÉMICOS

Yo, **KEVIN DANNY CAICEDO CAMPOVERDE**, con C.I. N° **0955198130**, certifico que los contenidos desarrollados en este trabajo de titulación, cuyo título es **"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONTROL DE CALIDAD EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE DE UN DISEÑO CONVENCIONAL Y DE UN DISEÑO ADICIONANDO TEREFALATO DE POLIETILENO"** son de mi absoluta propiedad y responsabilidad y según el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN, autorizo el uso de una licencia gratuita intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la presente obra con fines no académicos, en favor de la Universidad de Guayaquil, para que haga uso del mismo, como fuera pertinente.

FECHA: 30 de agosto del 2019

CAICEDO CAMPOVERDE KEVIN DANNY
C.I. N° 0955198130

"CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN (Registro Oficial n. 899-Dic./2016) Artículo 114.- De los titulares de derechos de obras creadas en las instituciones de educación superior y centros educativos.- En el caso de las obras creadas en centros educativos, universidades, escuelas politécnicas, institutos superiores técnicos, tecnológicos, pedagógicos, de arte y los conservatorios superiores, e institutos públicos de investigación como resultado de su actividad académica o de investigación tales como trabajos de titulación, proyectos de investigación o innovación, artículos académicos, u otros análogos, sin perjuicio de que pueda existir relación de dependencia, la titularidad de los derechos patrimoniales corresponderá a los autores. Sin embargo, el establecimiento tendrá una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra con fines académicos.

ÍNDICE GENERAL

Capítulo I Generalidades

1.1.	Introducción.....	1
1.2.	Antecedentes.....	2
1.3.	Justificación.....	3
1.4.	Objetivos.....	6
1.4.1.	Objetivo General.....	6
1.4.2.	Objetivos Específicos.....	6
1.5.	Alcance.....	7
1.6.	Metodología.....	8
1.7.	Estructura del Trabajo.....	9

Capítulo II Marco Teórico

2.1.	Características de los Materiales.....	11
2.1.1.	Cemento Asfáltico.....	12
2.1.2.	Materiales Granulares.....	16
2.1.2.1.	Agregado Grueso.....	19
2.1.2.2.	Agregado Fino.....	20
2.1.2.3.	Piedra Caliza.....	21
2.1.3.	Tereftalato de Polietileno (PET).....	22
2.1.3.1	Modificación de Ligantes Mediante Adición de Plástico.....	24
2.2.	Mezclas Asfálticas.....	27
2.2.1.	Clasificación de las Mezclas Asfálticas.....	29
2.2.2.	Propiedades de las Mezclas Asfálticas para Capas de Rodadura.....	30
2.2.3.	Mezcla Asfáltica en Caliente.....	31
2.2.4.	Consideraciones para la Selección y Proyecto de una Mezcla Asfáltica.....	34
2.2.5.	Principales Defectos en Revestimientos Asfálticos.....	36

Capítulo III Metodología

3.1. Caracterización de Materiales Constitutivos.	44
3.1.1. Ensayos de Caracterización al Cemento Asfáltico.	44
3.1.1.1. Gravedad Específica (ASTM D70-97).	49
3.1.1.2. Penetración de Cemento Asfáltico (ASTM -D5).	51
3.1.1.3. Punto de Reblandecimiento (ASTM D-36).	53
3.1.1.4. Índice de Penetración (ASTM D-3381).	55
3.1.1.5. Ductilidad (ASTM D-113).	56
3.1.1.6. Punto de Inflamación y Combustión (ASTM D-92).	58
3.1.1.7. Viscosidad a 60 °C (ASTM D 2171).	61
3.1.1.8. Viscosidad a 135 °C (ASTM D 2170).	62
3.1.1.9. Ensayo del Horno de Película Delgada Rodante	64
3.1.1.10. Ensayo de Viscosidad a 60 °C al Residuo Envejecido RTFO.	65
3.1.1.11. Ensayo de Viscosidad a 135 °C al Residuo Envejecido RTFO. ..	67
3.1.1.12. Ensayo de Penetración al Residuo Envejecido RTFO	68
3.1.1.13. Ensayo de Ductilidad al Residuo Envejecido RTFO	70
3.1.1.14. Módulo de Corte Dinámico al Asfalto Original.	71
3.1.1.15. Módulo de Corte Dinámico al Asfalto a RFTO.	76
3.1.1.16. Módulo de Corte Dinámico PAV (AASHTO T-315).	78
3.1.1.17. Rigidez al Desplazamiento Ensayo BBR (AASHTO T-313).	81
3.1.1.18. Grado SUPERPAVE (AASHTO M-320).	82
3.1.2. Ensayos de Caracterización a los Agregados.	86
3.1.2.1. Granulometría (ASTM D 422).	88
3.1.2.1.1. Granulometría del Agregado Grueso 1".....	90
3.1.2.1.2. Granulometría del Agregado Intermedio ½".....	92
3.1.2.1.3. Granulometría del Agregado Fino ¼".....	93
3.1.2.2. Equivalente de Arena (ASTM D 2419).	95
3.1.2.3. Desgaste en la Máquina De Los Ángeles (INEN 860).	96
3.1.2.4. Durabilidad a los Sulfatos: Agregados Fino y Grueso.....	97

3.1.2.5.	Índice de Plasticidad (INEN 691 - INEN 692).....	101
3.1.2.6.	Partículas Alargadas y Planas (ASTM D 4791).	103
3.1.2.7.	Partículas con una Cara Fracturada (ASTM D 5121).....	105
3.1.2.8.	Porcentaje de Vacíos en Agregados Pasante del Tamiz No. 8..	107
3.1.2.9.	Deletéreos Agregado Fino (INEN 698).	109
3.1.2.10.	Deletéreos Agregado Grueso (INEN 698).	111
3.1.2.11.	Densidad, Densidad Relativa y Absorción.....	111
3.1.2.11.1.	Gravedad Específica y Absorción del Agregado Grueso ...	112
3.1.2.11.2.	Gravedad Específica y Absorción del Agregado Intermedio	114
3.1.2.11.3.	Gravedad Específica y Absorción del Agregado Fino	115
3.1.3.	Tereftalato de Polietileno (PETS).....	117
3.2.	Diseño de las Mezclas Asfálticas.	119
3.2.1.	Diseño Mezcla Asfáltica Convencional.	122
3.2.1.1.	Mezcla de Agregados.	122
3.2.1.2.	Diseño de Mezcla con Cemento Asfáltico.	125
3.2.1.3.	Determinación de Parámetros Volumétricos.....	127
3.2.1.4.	Análisis de Estabilidad y Flujo.....	133
3.2.1.5.	Determinación del Porcentaje Óptimo de Cemento Asfáltico.....	138
3.2.2.	Diseño Mezcla Asfáltica Agregando PETS.	144
3.2.2.1.	Mezcla de Agregados.	146
3.2.2.2.	Diseño de Mezcla con Cemento Asfáltico.	148
3.2.2.3.	Determinación de Parámetros Volumétricos.....	150
3.2.2.4.	Análisis de Estabilidad y Flujo.....	151
3.2.2.5.	Determinación del Porcentaje Óptimo de Cemento Asfáltico.....	155
3.3.	Control de Calidad de la Mezcla.	160
3.3.1.	Control de Calidad Mezcla Convencional.	161
3.3.1.1.	TSR Relación De Esfuerzo De Tensión.....	161
3.3.1.2.	Módulo de Rigidez.	164
3.3.1.3.	Deformación Permanente.	167
3.3.1.4.	Fatiga.	170
3.3.2.	Control De Calidad Mezcla Agregando PETS.....	175
3.3.2.1.	TSR Relación De Esfuerzo De Tensión.....	176

3.3.2.2.	Módulo de Rigidez.	177
3.3.2.3.	Deformación Permanente.	180
3.3.2.4.	Fatiga.	183

Capítulo IV Análisis de Resultados

4.1.	Análisis Comparativo del Cemento Asfáltico.....	189
4.2.	Análisis Comparativo de los Agregados.....	206
4.3.	Análisis Comparativo de la Mezcla Asfáltica.....	209
4.3.1.	Parámetros Volumétricos.....	210
4.3.2.	Módulo de Rigidez.	212
4.3.3.	Deformación Permanente.	213
4.3.4.	Fatiga.	216
4.4.	Análisis Comparativo Económico.....	220

Capítulo V Consideraciones Finales

5.1.	Conclusiones.....	223
5.2.	Recomendaciones.	226
5.3.	Limitaciones.	227

Bibliografía

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Conformación del Asfalto	12
Ilustración 2: Productos y Temperaturas de Destilación	14
Ilustración 3: Propiedades de Rocas	18
Ilustración 4: Síntesis de Reacciones del PET.....	24
Ilustración 5: Mapa de Zonificación de PG de la República del Ecuador.	48
Ilustración 6: Curva Reológica Asfalto Original Convencional.....	74
Ilustración 7: Curva Reológica Asfalto Original Agregando PETS.....	75
Ilustración 8: Curva Reológica Asfalto Después RTFO Convencional.	76
Ilustración 9: Curva Reológica Asfalto Después RTFO Agregando PETS.	77
Ilustración 10: Curva Reológica PAV al Asfalto Envejecido Convencional.....	79
Ilustración 11: Curva Reológica PAV al Asfalto Envejecido Agregando PETS.....	80
Ilustración 12: Clasificación por Grado de Desempeño.....	83
Ilustración 13: Clasificación por Grado de Desempeño.....	84
Ilustración 14: Especificaciones de Granulometría para Agregado Grueso.	89
Ilustración 15: Curva Granulométrica Agregado Grueso 1”.....	91
Ilustración 16: Curva Granulométrica Agregado Intermedio ½”.....	93
Ilustración 17: Curva Granulométrica Agregado Fino ¼”.....	94
Ilustración 18: Límite Líquido.....	102
Ilustración 19: Carta de Plasticidad.	103
Ilustración 20: PET Triturado Utilizado en la Investigación.....	118
Ilustración 21: Granulometría de los Agregados para la Mezcla Convencional.....	125
Ilustración 22: Peso Específico Vs % De Asfalto Mezcla Convencional.....	140
Ilustración 23: Estabilidad Vs % De Asfalto Mezcla Convencional.....	140
Ilustración 24: Flujo Vs % De Asfalto Mezcla Convencional.....	141
Ilustración 25: % De Vacíos Vs % De Asfalto Mezcla Convencional.....	141
Ilustración 26: % De Vacíos Llenos Con Asfalto Vs % De Asfalto Mezcla Convencional.	142
Ilustración 27: % De Volumen Mineral Vs % De Asfalto Mezcla Convencional.....	142
Ilustración 28: Granulometría Mezcla Adicionando PETS.....	148
Ilustración 29: Peso Específico Vs % De Asfalto Mezcla Agregando PETS.	156
Ilustración 30: Estabilidad Vs % De Asfalto Mezcla Agregando PETS.....	157
Ilustración 31: Flujo Vs % De Asfalto Mezcla Agregando PETS.	157
Ilustración 32: % De Vacíos Vs % De Asfalto Mezcla Agregando PETS.	158
Ilustración 33: % De Vacíos Asfalto Vs % De Asfalto Mezcla PETS.....	158
Ilustración 34: % De Volumen Mineral Vs % De Asfalto Mezcla PETS.....	159

Ilustración 35: Configuración de la Carga y Rotura del Ensayo TSR.	162
Ilustración 36: Ensayo de Modulo de Rigidez Briqueta 1 Mezcla Convencional. ..	166
Ilustración 37: Ensayo de Modulo de Rigidez Briqueta 2 Mezcla Convencional....	166
Ilustración 38: Ensayo de Modulo de Rigidez Briqueta 3 Mezcla Convencional. ..	167
Ilustración 39: Ensayo de Deformación Creep Briqueta 4 Mezcla Convencional..	169
Ilustración 40: Ensayo de Deformación Creep Briqueta 5 Mezcla Convencional..	169
Ilustración 41: Ensayo de Deformación Creep Briqueta 6 Mezcla Convencional..	170
Ilustración 42: Deformación Vs Numero de Repeticiones Mezcla Convencional. .	171
Ilustración 43: Ensayo de Fatiga Briqueta 7 Mezcla Convencional.	172
Ilustración 44: Ensayo de Fatiga Briqueta 8 Mezcla Convencional.	173
Ilustración 45: Ensayo de Fatiga Briqueta 9 Mezcla Convencional.	173
Ilustración 46: Módulo de Esfuerzo Briqueta 7 Mezcla Convencional.	174
Ilustración 47: Módulo de Esfuerzo Briqueta 8 Mezcla Convencional.	174
Ilustración 48: Módulo de Esfuerzo Briqueta 9 Mezcla Convencional.	175
Ilustración 49: Ensayo de Modulo De Rigidez Briqueta 1 Mezcla PETS.	179
Ilustración 50: Ensayo de Modulo De Rigidez Briqueta 2 Mezcla PETS.	179
Ilustración 51: Ensayo de Modulo De Rigidez Briqueta 3 Mezcla PETS.	180
Ilustración 52: Ensayo de Deformación Creep Briqueta 4 Mezcla PETS.	182
Ilustración 53: Ensayo de Deformación Creep Briqueta 5 Mezcla PETS.	182
Ilustración 54: Ensayo de Deformación Creep Briqueta 6 Mezcla PETS.	183
Ilustración 55: Deformación Vs Numero De Repeticiones Mezcla PETS.	184
Ilustración 56: Ensayo de Fatiga Briqueta 7 Mezcla Agregando PETS.	185
Ilustración 57: Ensayo de Fatiga Briqueta 8 Mezcla Agregando PETS.	186
Ilustración 58: Ensayo de Fatiga Briqueta 9 Mezcla Agregando PETS.	186
Ilustración 59: Módulo de Esfuerzo Briqueta 7 Mezcla Agregando PETS.	187
Ilustración 60: Módulo de Esfuerzo Briqueta 8 Mezcla Agregando PETS.	187
Ilustración 61: Módulo de Esfuerzo Briqueta 9 Mezcla Agregando PETS.	188
Ilustración 62: Granulometría de los Agregados para la Mezcla Convencional.	208
Ilustración 63: Granulometría de los Agregados para la Mezcla PETS.	209
Ilustración 64: Deformación Vs Numero de Repeticiones Mezcla Convencional. ..	218
Ilustración 65: Deformación Vs Numero de Repeticiones Mezcla PETS.	218

Índice de Tablas

Tabla 1: Metodología del Trabajo	43
Tabla 2: Ensayos de Caracterización por Viscosidad.....	45
Tabla 3: Ensayos de Caracterización del Cemento Asfáltico Posterior al RTFO.....	46
Tabla 4: Ensayos de Clasificación Superpave para Asfaltos.	46
Tabla 5: Criterio de Diseño Mezclas para Concreto Asfáltico, por Temperatura.	47
Tabla 6: Requisitos de Viscosidad a 60 °C a Base de Asfalto Original.....	49
Tabla 7: Valores de Gravedad Específica a 25°C de la Muestra Convencional.	50
Tabla 8: Valores de Gravedad Específica a 25°C de la Muestra Agregando PETS. 51	
Tabla 9: Información General del Ensayo de Penetración.....	52
Tabla 10: Valores de Penetración de la Muestra Convencional.	52
Tabla 11: Valores de Penetración de la Muestra Agregando PETS.	52
Tabla 12: Especificación del Ensayo de Penetración.	53
Tabla 13: Valores del Punto de Reblandecimiento de la Muestra Convencional.....	54
Tabla 14: Valores del Punto de Reblandecimiento de la Muestra Agregando PETS..	54
Tabla 15: Especificación Del Ensayo De Reblandecimiento.....	55
Tabla 16: Información General del Índice de Penetración de la Muestra Convencional.	56
Tabla 17: Información del Índice de Penetración de la Muestra Agregando PETS. .	56
Tabla 18: Especificación del Índice de Penetración.....	56
Tabla 19: Información General del Ensayo de Ductilidad.	58
Tabla 20: Valores de Ductilidad de la Muestra Convencional.....	58
Tabla 21: Valores de Ductilidad de la Muestra Agregando PETS.....	58
Tabla 22: Especificación del Ensayo de Ductilidad.....	58
Tabla 23: Valores de Inflamación y Combustión de la Muestra Convencional.	60
Tabla 24: Valores de Inflamación y Combustión de la Muestra Agregando PETS. .	60
Tabla 25: Especificación del Ensayo de Inflamación y Combustión.	60
Tabla 26: Información General del Ensayo de Viscosidad al Residuo Original.	61
Tabla 27: Valores de Viscosidad a 60 °C de la Muestra Convencional.	62
Tabla 28: Valores de Viscosidad a 60 °C de la Muestra Agregando PETS.....	62
Tabla 29: Especificación del Ensayo.	62
Tabla 30: Información General del Ensayo de Viscosidad Cinemática a 135 °C.....	63
Tabla 31: Valores de Viscosidad Cinemática de la Muestra Convencional.	63
Tabla 32: Valores de Viscosidad Cinemática de la Muestra Agregando PETS	63
Tabla 33: Especificación del Ensayo.	64
Tabla 34: Valores de RTFO Mezcla Convencional.	64
Tabla 35: Valores de RTFO Mezcla Agregando PETS.....	65

Tabla 36: Especificación del Ensayo RTFO.....	65
Tabla 37: Información General del Ensayo de Viscosidad a 60 °C RTFO.....	66
Tabla 38: Valores de Viscosidad a 60 °C RTFO de la Muestra Convencional.	67
Tabla 39: Valores de Viscosidad a 60 °C RTFO de la Muestra Convencional.	67
Tabla 40: Especificación del Ensayo.	67
Tabla 41: Ensayo de Viscosidad Cinemática a 135 °C al RTFO.	68
Tabla 42: Valores de Viscosidad Cinemática de la Muestra Convencional.	68
Tabla 43: Valores de Viscosidad Cinemática de la Muestra Agregando PETS.	68
Tabla 44: Especificación del Ensayo.	68
Tabla 45: Información General del Ensayo de Penetración.....	69
Tabla 46: Valores de Penetración RTFO de la Muestra Convencional.....	69
Tabla 47: Valores de Penetración RTFO de la Muestra Agregando PETS.	69
Tabla 48: Información General del Ensayo de Ductilidad.	70
Tabla 49: Valores de Ductilidad RTFO de la Muestra Convencional.	70
Tabla 50: Valores de Ductilidad RTFO de la Muestra Agregando PETS.....	71
Tabla 51: Especificación del Ensayo de Ductilidad RTFO.....	71
Tabla 52: Información General del Ensayo DSR al Asfalto Original.	73
Tabla 53: Valores del DSR de la Muestra de Asfalto Original Convencional.....	73
Tabla 54: Valores del DSR de la Muestra de Asfalto Original Agregando PETS.....	74
Tabla 55: Información General del Ensayo DSR al Asfalto Original.	76
Tabla 56: Valores del DSR de la Muestra de Asfalto RTFO Convencional.....	76
Tabla 57: Valores del DSR de la Muestra de Asfalto RTFO Agregando PETS.	77
Tabla 58: Información General del Ensayo PAV al Asfalto Envejecido.	78
Tabla 59: Valores del PAV de la Muestra de Asfalto Envejecido Convencional.	79
Tabla 60: Valores del PAV de la Muestra de Asfalto Envejecido Agregando PETS.	80
Tabla 61: Información General del Ensayo BBR al Asfalto.....	81
Tabla 62: Valores del BBR de la Muestra de Asfalto Envejecido Convencional.	82
Tabla 63: Valores del BBR de la Muestra de Asfalto Envejecido Agregando PETS.	82
Tabla 64: Resumen Ensayos Reológicos Convencional.	85
Tabla 65: Resumen Ensayos Reológicos de Asfalto Agregando PETS.	85
Tabla 66: Constitución del Material Pétreo.	87
Tabla 67: Características Físicas y Mecánicas del Material Pétreo.....	87
Tabla 68: Mallas Granulométricas.	88
Tabla 69: Granulométrica del Material Grueso 1”.....	90
Tabla 70: Granulométrica del Material Intermedio ½”.....	92
Tabla 71: Granulométrica del Material Fino ¼”.....	93
Tabla 72: Ensayo Equivalente de Arena.....	96
Tabla 73: Ensayo Desgaste en la Máquina De Los Ángeles al Material Grueso.	97

Tabla 74: Especificaciones del Ensayo de Abrasión De Los Ángeles.	97
Tabla 75: Fracciones para el Ensayo del Material Fino.	99
Tabla 76: Fracciones para el Ensayo del Material Grueso.	99
Tabla 77: Ensayo de Durabilidad a los Sulfatos en Agregados Gruesos y Finos. ...	100
Tabla 78: Especificaciones del Ensayo.	100
Tabla 79: Límite Líquido INEN 691.	101
Tabla 80: Límite Plástico INEN 692.	102
Tabla 81: Valores del Ensayo de Partículas Alargadas y Planas.	104
Tabla 82: Especificaciones del Ensayo de Partículas Alargadas y Planas.	104
Tabla 83: Valores de Partículas Fracturadas con una Cara Fracturada.	106
Tabla 84: Agregado Grueso con dos o más Caras Fracturadas.	107
Tabla 85: Especificaciones para Partículas Fracturadas de un Cara Fracturada. ...	107
Tabla 86: Especificaciones para Partículas Fracturadas de dos o más Caras Fracturadas.	107
Tabla 87: Resultados de Porcentaje de Vacíos Agregado Fino.	109
Tabla 88: Especificaciones del Ensayo de Angularidad para Agregado Fino.	109
Tabla 89: Resultados De Ensayo De Porcentaje De Deletéreos Agregados Finos.	110
Tabla 90: Especificaciones del Ensayo de Porcentaje de Deletéreos Agregados Finos.	110
Tabla 91: Ensayo de Porcentaje de Deletéreos Agregados Grueso.	111
Tabla 92: Especificaciones del Ensayo de Porcentaje de Deletéreos Agregados Gruesos.	111
Tabla 93: Gravedad Específica y Absorción del Agregado Grueso.	113
Tabla 94: Gravedad Específica y Absorción del Agregado Intermedio.	114
Tabla 95: Resultados de Gravedad Específica y Absorción del Agregado Fino.	116
Tabla 96: Proceso de Reciclaje del PET.	117
Tabla 97: Caracterización del PET Datos Suministrados por la Empresa Intercia.	119
Tabla 98: Criterios MOP para Diseño de Mezclas Asfálticas.	121
Tabla 99: Tabla de Granulometrías.	123
Tabla 100: Análisis Granulométrico de la Mezcla Convencional.	124
Tabla 101: Porcentaje Inicial de Cemento Asfáltico Mezcla Convencional.	126
Tabla 102: Gravedades Específicas de la Mezcla Convencional.	132
Tabla 103: Propiedades de la Mezcla Asfáltica Convencional.	135
Tabla 104: Factor de Corrección de la Estabilidad.	137
Tabla 105: Valores de Estabilidad y Flujo de la Mezcla Convencional.	138
Tabla 106: Criterios MTOP para la Mezcla Convencional.	143
Tabla 107: Determinación de la Mezcla Convencional.	144
Tabla 108: Criterio de Diseño para Mezclas Asfálticas Agregando PETS.	145

Tabla 109: Granulometría para la Mezcla Cerradas ASTM D3515.....	146
Tabla 110: Granulometría de los Agregados para la Mezcla Agregando PETS.	147
Tabla 111: Porcentaje Inicial de Cemento Asfáltico Mezcla Agregando PETS.	149
Tabla 112: Gravedades Específicas de la Mezcla Agregando PETS.	150
Tabla 113: Propiedades de la Mezcla Asfáltica Agregando PETS.	152
Tabla 114: Factor de Corrección de la Estabilidad.	154
Tabla 115: Valores de Estabilidad y Flujo de la Mezcla Agregando PETS.....	155
Tabla 116: Resultados para la Mezcla Agregando PETS.....	159
Tabla 117: Determinación De La Mezcla Agregando PETS.	160
Tabla 118: Análisis de Entrada y Generales Mezcla Convencional.....	163
Tabla 119: Saturación a Vacío Parcial a 25°C Mezcla Convencional.....	163
Tabla 120: Acondicionamiento en Condición Húmeda: Mezcla Convencional.	164
Tabla 121: Cálculo del TSR (Tensil Strength Ratio), Relación de Esfuerzo de Tensión Mezcla Convencional.	164
Tabla 122: Resultados del Módulo de Rigidez 20°C Mezcla Convencional.....	165
Tabla 123: Resultados del Creep Dinámico Mezcla Convencional.....	168
Tabla 124: Resultados Módulo de Rigidez Mezcla Convencional.	171
Tabla 125: Parámetros de Análisis de Entrada y Generales Mezcla Agregando PETS.....	176
Tabla 126: Saturación a Vacío Parcial Mezcla Agregando PETS.....	176
Tabla 127: Acondicionamiento en Condición Húmeda Mezcla Agregando PETS. ...	177
Tabla 128: Cálculo del TSR, Relación de Esfuerzo de Tensión Mezcla Agregando PETS.....	177
Tabla 129: Resultados del Módulo de Rigidez 20°C Mezcla Agregando PETS.	178
Tabla 130: Resultados del Creep Dinámico Mezcla Agregando PETS.	181
Tabla 131: Resultados Módulo de Rigidez Mezcla Agregando PETS.	184
Tabla 132: Resultados Cemento Asfáltico Convencional.	190
Tabla 133: Resultados Cemento Asfáltico Modificado con PETS.....	192
Tabla 134: Requisitos de Cementos Asfálticos de Viscosidad a 60 °C a Base de Asfalto Original.	194
Tabla 135: Clasificación Superpave Cemento Asfáltico Convencional.....	199
Tabla 136: Clasificación Superpave Cemento Asfáltico Modificado PETS.....	201
Tabla 137: Clasificación por Grado de Desempeño.	204
Tabla 138: Clasificación por Grado de Desempeño.	205
Tabla 139: Ensayos los Agregados Pétreos utilizados en la Mezcla.	206
Tabla 140: Granulometría de la Mezcla Convencional.	207
Tabla 141: Granulometría de la Mezcla Adicionando PETS.....	208
Tabla 142: Características Volumétricas de la Mezcla Convencional.....	211

Tabla 143: Características Volumétricas de la Mezcla Agregando PETS.	211
Tabla 144: Resultados de Modulo de Rigidez a la Mezcla Convencional.....	212
Tabla 145: Resultados de Modulo de Rigidez a la Mezcla Agregando PETS.	213
Tabla 146: Creep dinámico mezcla convencional de la mezcla agregando PETS.	215
Tabla 147: Resultados Módulo de Rigidez Mezcla Convencional.	217
Tabla 148: Resultados Módulo de Rigidez Mezcla Agregando PETS.	217
Tabla 149: Análisis de Precio Unitario de Mezcla Convencional.	220

Resumen

En el siguiente trabajo se realiza una investigación de la implementación de PETS como componente del cemento asfáltico tipo AC-20. Para la realización metodológica se realizaron primero los ensayos de calidad de los agregados gruesos y finos; así como el del cemento asfáltico convencional y modificado con 1% de PETS. Para el diseño se respetaron los procedimientos de las distintas normas utilizadas en nuestro medio local, analizando el método y la forma que permitiera introducir el material plástico de una forma viable y óptima; es decir, que se generen resultados positivos. Una vez realizado los diseños, tanto para el método convencional, como para el diseño agregando el material plástico; comparamos dichas mezclas en caliente, en su desempeño como en su grado económico, para conocer si es viable aplicarlas en las carreteras de nuestro medio. Teniendo resultados sorprendentes; la economía de aprovechamiento de recursos, determinando la cantidad de material plástico que se utilizaría en nuestro medio aplicando este método de diseño. Por último, damos recomendaciones y aplicaciones para proyectos futuros para que se realicen más investigaciones en temas de drenaje y adherencia a los distintos tipos de estructuras de pavimento.

PALABRAS CLAVES: ANÁLISIS COMPARATIVO – MEZCLAS ASFÁLTICAS – CONTROL DE CALIDAD – CONVENCIONAL – MODIFICADA.

Abstract

In the following work, an investigation of the implementation of PETS as a component of asphalt cement type AC-20 is carried out. For the methodological realization, the quality tests of the coarse and fine aggregates were first performed; as well as that of conventional and modified asphalt cement with 1% PETS. For the design the procedures of the different norms used in our local environment were respected, analyzing the method and the way that allowed to introduce the plastic material in a viable and optimal way; that is, positive results are generated. Once the designs have been made, both for the conventional method and for the design by adding the plastic material; We compare these hot mixes, in their performance as in their economic degree, to know if it is feasible to apply them on the roads of our environment. Having surprising results; the economics of resource utilization, determining the amount of plastic material that would be used in our environment by applying this design method. Finally, we give recommendations and applications for future projects so that more research is carried out on drainage issues and adherence to the different types of pavement structures.

KEYWORDS: COMPARATIVE ANALYSIS - ASPHALT MIXES - QUALITY CONTROL – CONVENTIONAL – MODIFIED.

Capítulo I

Generalidades

1.1. Introducción

Este capítulo está dedicado exclusivamente a la presentación del proyecto, dentro del marco de su línea de investigación en Vías. Así como a la definición de los objetivos planteados al finalizar el mismo, planteamientos básicos y delimitaciones, que son la base de todos los desarrollos presentado en la tesis.

En la actualidad, la mezcla asfáltica más utilizada en Ecuador es la mezcla asfáltica en caliente (MAC). La capa de rodadura es la mezcla asfáltica en caliente, lo cual se forma de una mezcla de agregados junto con asfalto. (Ministerio de Obras Publicas y Comunicaciones, 2002)

Actualmente la construcción de vías de comunicación se ha asociado con el desarrollo económico sostenible de una determinada población, así pues, se tiene que la elaboración de dichos proyectos representa un gasto económico considerable en materiales de construcción. Dentro de nuestro medio se utiliza cemento asfaltico de la refinería de Esmeraldas, tipo AC-20, en mezclas asfálticas estas son susceptibles a los cambios de temperatura. Por otra parte se tiene que la industria del reciclaje ha aumentado en el mercado del mundo, el Tereftalato de Polietileno, PET por sus siglas en

inglés, es uno de los elementos más utilizado en nuestro medio, se lo puede encontrar en los envases de bebidas plásticas, que según el MAE (MINISTERIO DEL AMBIENTE, 2012), la cantidad de recolección de botellas plásticas ha aumentado del 2012 a la actualidad en un 80%. Por último, se han realizado diversas investigaciones, de cómo aprovechar el plástico en obras civiles; pero no se emplean aún en nuestro medio este tipo de infraestructuras debido a falta de investigaciones más profundas de los ensayos de caracterización y de desempeño dinámico a las mezclas asfálticas, con este tipo de material reciclado.

1.2. Antecedentes.

En la ciudad de Medellín; en Colombia, en la Universidad Nacional de Colombia se han realizado los estudios pertinentes acerca del comportamiento dinámico de una mezcla con Tereftalato de Polietileno. Estos ensayos se han realizado con materiales de plantas asfálticas de dicha región; con resultados positivos en las normativas que rigen mencionado país, dichos resultados serán evaluados en nuestro medio con los materiales utilizados en nuestra región, pero con los porcentajes de las investigaciones ya realizadas. Con un tamaño de Tereftalato de Polietileno de 0,5 -2,0 mm y con un porcentaje en mezcla de cemento asfáltico de 1%.

En nuestro país se tiene que el implemento de carreteras de primer orden va ligado al progreso y al desarrollo de la región, dichas carreteras son en su mayoría de pavimento flexible; debido a su considerable valor económico, se han realizado investigaciones con

el fin de implementar materiales reciclados para la reducción de costos; sin dejar a un lado el cumplimiento del nivel de servicio y desempeño óptimo por el cual fue diseñado.

El MTOP con su norma ecuatoriana vial MOP - 001-F 2002, nos presenta los tipos de ensayos de control de calidad en la etapa de construcción de la estructura de pavimento flexible, con el fin del correcto funcionamiento de las vías.

Tomando en cuenta los problemas existentes en el país, donde por la falta de recursos y materiales de calidad se presentan muchos problemas en las vías, sobre todo la aparición de baches y camellones según el constructor Oscar Yacelga (La Hora, 2008); se pretende diseñar y evaluar los materiales con el fin de obtener una mezcla que cumpla con los requisitos de economía, calidad y asequibilidad; y comparar dichos resultados con la mezcla tradicional para ver la accesibilidad en la economía de nuestro medio y tomando en consideración que cumpla con la normativa arriba mencionada, y evaluar la calidad de las dos mezclas.

1.3. Justificación

En el campo de la ingeniería civil; en la actualidad, la economía y el medio ambiente son dos temas que deben estar ligados, en conjunto de la calidad de los materiales y del trabajo relacionado. La economía estuvo durante gran parte de su historia ajena a los temas de medio ambiente, se consideraba a la tierra como uno de sus tres factores

productivos que hacían el crecimiento económico y la riqueza de las naciones (Sidgwick, 1887).

Un economista moderno defiende un desarrollo sostenible, en que sean compatibles un crecimiento elevado y estable de la producción de bienes y servicios, con un progreso social extendido, una producción del medio ambiente y un uso correcto (prudente y eficiente) de los recursos naturales. (Sidgwick, 1887)

En nuestro medio; Ecuador, en el año 2016 la producción petrolera del país presento un incremento anual de 1,3%, según el BCE (Banco Central del Ecuador). En 2018 la producción de derivados para cubrir el mercado interno alcanzo el 100,7%; es decir supero el volumen estimado al inicio del ejercicio (El Telégrafo, 2019) una cifra alarmante, ya que lo ideal es que disminuya este rubro, teniendo en cuenta la situación del medio ambiente y el daño que causan este tipo de polímeros por su condición de difícil degradación. En nuestro país registra índices de aprovechamiento de este material muy bajo en comparación con otras regiones latinas.

Ecuador produce 4,1 millones de toneladas de residuos sólidos al año. De esta cantidad el 25% es potencialmente reciclaje, pero los recicladores de base solo recuperan el 7% (El Universo, 2018).

A nivel mundial se ha detectado islas de plásticos flotantes en los mares del Mediterráneo, según el columnista; Aristos Georgiou, en el mar Mediterráneo se ha descubierto una isla flotante de desechos plásticos, la cual tiene una extensión de varias decenas de kilómetros y yace frente a las islas de Córcega (territorio francés) y Elba

(territorio italiano). Este problema es tan alarmante que incluso han catalogado esta acumulación como el séptimo continente. (Georgiou, 2019)

En los últimos años se vienen realizando investigaciones que exponen la reutilización de productos derivados del petróleo de difícil degradación tales como el GCR, el EPS y el PET (Tereftalato de Polietileno), en los cuales se puede disminuir la huella ecológica y preservar la vida natural. Dentro de esta premisa se encuentra mi tema de tesis para la obtención del título de ingeniería civil.

Una mezcla asfáltica adicionando Tereftalato de Polietileno reciclado como elemento constitutivo del cemento asfáltico presenta mejoría en las propiedades reológicas, generando un aumento en la resistencia a la deformación plástica y al envejecimiento, ya que favorece la transparencia de carga entre las partículas por las propiedades del Tereftalato de Polietileno, exhibe características deseables para una capa de transición o una superficie de rodadura, dentro de una estructura de pavimento. Los análisis de la investigación servirán para determinar la viabilidad técnica y económica de las adiciones de Tereftalato de Polietileno reciclado en las mezclas asfálticas, obteniendo un efecto similar al de las fibras poliméricas para refuerzo del esqueleto mineral.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General.

- Diseñar y Comparar mezclas asfálticas en caliente que contengan el Tereftalato de Polietileno con las mezclas convencionales que se utilizan en nuestro medio, mediante ensayos de control de calidad según MOP - 001-F 2002, para evaluar las características mecánicas de las mezclas, y determinar si es viable su uso en las carreteras de nuestra región.

1.4.2. Objetivos Específicos.

- Realizar ensayos de caracterización de los materiales utilizados en las mezclas asfálticas de la investigación de acuerdo a las normas MOP - 001-F 2002.
- Diseñar una mezcla asfáltica añadiendo Tereftalato de Polietileno (PET), a partir de investigaciones ya realizadas que utilizaremos como patrón de referencia a lo largo de la investigación.
- Analizar las propiedades mecánicas y volumétricas de la mezcla asfáltica añadiendo Tereftalato de Polietileno (PET), comparando con una mezcla clásica convencional y con las normas arriba mencionadas.

- Realizar un balance de viabilidad técnico-económico de la mezcla incorporando el Tereftalato de Polietileno (PET), para ser utilizadas en proyectos de infraestructuras viales.

1.5. Alcance

Para la realización del diseño de la mezcla asfáltica adicionando Tereftalato de Polietileno (PET), partiremos de una investigación realizada de la Universidad Nacional de Colombia, en las que nos indica un tamaño de Tereftalato de Polietileno de 0,5 -2,0 mm y con un porcentaje en mezcla de 1%.

Los ensayos se realizarán dentro del laboratorio de asfalto de la Universidad Católica Santiago de Guayaquil; a cargo del Dr. Ing. Rolando Vila, con los equipos correspondientes, de acuerdo a las normas AASHTO y/o ASTM.

Los materiales del agregado Pétreo fueron proporcionados por la cantera Mina “Tucho”, ubicado en el cantón Playas, en la provincia de Guayas. El Tereftalato de Polietileno será proporcionado por Intercia, ubicada en el norte de la ciudad de Guayaquil y el Cemento Asfáltico será proporcionado por la refinería del Pacífico ubicada en Esmeraldas, y corresponde al ligante AC-20 virgen.

1.6. Metodología

Debido que en la actualidad en gran parte de nuestro país se usan pavimentos flexibles, se va a realizar ensayos correspondientes para determinar las propiedades mecánicas de los materiales a utilizarse ya que están directamente relacionados en los resultados de la mezcla asfáltica en caliente. Por ende, se realizará varios ensayos para determinar qué tan adecuado y fiable es la utilización de Tereftalato de Polietileno reciclado en una mezcla asfáltica como estructura de un pavimento.

Los ensayos a realizarse para determinar los objetivos planteados son:

- Caracterización de los materiales que intervienen en las mezclas tanto convencional como la modificada con PETS. El cemento asfáltico tendrá un análisis riguroso debido que a este componente se le agrega el 1% de PETS. Los agregados pétreos serán los mismos para las dos mezclas; para el plástico se proporciona información necesaria por parte del distribuidor del PETS.
- Ensayos Marshall para mezclas con adicción de PETS reciclado y para mezclas convencionales, mediante la Determinación de parámetros volumétricos y Análisis de estabilidad y flujo.
- Ensayos de Control de Calidad: Módulo de rigidez, deformación permanente y fatiga.
- Análisis de Precio Unitario: Comparativo para mezclas convencionales y mezclas agregando PETS reciclado.

1.7. Estructura del Trabajo

Capítulo 1 – Se presenta una breve introducción, dedicada a la justificación del trabajo desarrollado y la definición de sus objetivos. Así como los alcances y la metodología a emplear en la tesis.

Capítulo 2 – Se hace una revisión bibliográfica específica, con el fin de recopilar y exhibir los conceptos básicos que motivan el desarrollo de este trabajo y que serán útiles posteriormente para su comprensión. También se incluyen las principales fallas que se dan en la aplicación de los trabajos de asfaltado, y sus respectivas correcciones a realizar en la aplicación del mismo.

Capítulo 3 – Se describe la metodología usada a lo largo de las etapas de caracterización de materiales, diseños de mezcla, y finalmente su evaluación de desempeño, todas basadas en los equipos y procedimientos sugeridos por la Normativa MOP-001-F-2002 y las recomendaciones establecidas en el manual de Diseño Construcción y Desempeño Para Mezclas de Tráfico Pesado y el Manual de Diseño y Construcción de Mezclas SMA de la NAPA (National Asphalt Pavement Association).

Capítulo 4 – En este capítulo se analizan los resultados de todas las pruebas de laboratorio desarrolladas a lo largo de la investigación, para los diferentes componentes

que forman parte de cada mezcla, tanto convencional como la modificada con PETS; luego se realiza el análisis comparativo de las mezclas con las dosificaciones establecidas en el capítulo anterior, tantos parámetros volumétricos como de desempeño. Finalmente se realiza una comparación técnica y económica de los dos tipos de mezclas, justificando la realización de estudio del tema.

Capítulo 5 – Se plasman las conclusiones del trabajo, y se hacen recomendaciones para el mejoramiento y la optimización de los diseños de obras ingenieriles afines a esta experiencia. También se realiza una breve explicación del tema relacionado al medio ambiente y la aplicación correspondiente en el campo de la ingeniería ambiental, justificando el desarrollo del tema en otros tipos de estudios aplicables a la ingeniería verde.

Capítulo II

Marco Conceptual

Este capítulo contiene el resultado investigativo de bibliografía o literatura acerca del tema. Se presenta definiciones básicas para el entendimiento del proyecto de la tesis y antecedentes en el área de la ingeniería civil; en su estructura de vías, pavimentos flexibles; que constituyeron el estado de la técnica en mezclas asfálticas con incorporación de residuos poliméricos para mejorar su desempeño. Así también como las fallas en mala práctica constructiva en la realización de este tipo de pavimentos. Se da la explicación de los materiales constitutivos de las mezclas asfálticas; así como también los tipos de ensayos que se deben realizar para su control de calidad, se detallara el uso comercial de cada componente, sus características físicas y mecánicas que deben tener en la implementación en obra.

2.1. Características de los Materiales

Este apartado nos permitirá entender con más detalle los tipos de materiales que se utilizan en la preparación de mezclas asfálticas, sus características mecánicas, físicas y químicas; así también, sus orígenes. Teniendo en consideración sus estructuras internas

y su importancia en la mezcla, se realiza una revisión bibliográfica necesaria para la comprensión, previo al diseño de la mezcla asfáltica.

2.1.1. Cemento Asfáltico.

La ASTM define al asfalto o cemento asfáltico como “un cementante de color marrón oscuro a negro en el que sus componentes predominantes son los asfáltenos que pueden ser naturales u obtenidos como residuo en la refinación del petróleo crudo”. (Institute, The Asphalt Handbook, 1989).

Este material es viscoso, pegajoso y de color negro; su consistencia es variable, está constituido mayormente por una mezcla de hidrocarburos pesados. Se la obtiene de yacimientos naturales o se obtiene por refinación del petróleo. (Institute, Superpave, Performance graded asphalt binder specifications and testing superpave serie No 1 (SP-1), 1993).

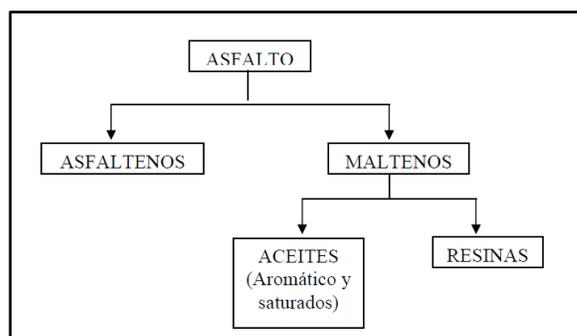


Ilustración 1: Conformación del Asfalto

Fuente: (Institute, The Asphalt Handbook, 1989)

Ente las propiedades físicas y mecánicas, que nos sirven para calificar la capacidad de un asfalto; son las siguientes:

- a. Viscosidad: Propiedad de un fluido que tiende a oponerse a su flujo cuando se le aplica una fuerza. Los fluidos de alta viscosidad presentan mayor resistencia a fluir en comparación de un fluido con baja viscosidad que fluye con facilidad. Cabe recalcar que la viscosidad es inversamente proporcional a la temperatura; es decir, a mayor temperatura menor viscosidad. (ASTM, 2010)
- b. Elasticidad: Propiedad que tienen los materiales para volver a su estado al finalizar o disminuir la carga que los modifica. (ASTM, 2010)
- c. Resistencia al corte: Es la capacidad de resistencia a altas temperaturas, la cual se determina mediante un “reómetro de corte dinámico”, que es el aparato que imprime una fuerza cosenoidal con la que se miden dichas resistencias. (ASTM, 2010)
- d. Ductilidad: Es la capacidad de disipación de energía que tiene un material dentro de su rango plástico. La rotura del material depende de la deformación del mismo. En el caso del asfalto, la ductilidad le permite normalmente tener mejores propiedades aglomerantes, cabe recalcar que los asfaltos con una ductilidad muy elevada son usualmente susceptibles a los cambios de temperatura. (ASTM, 2010).

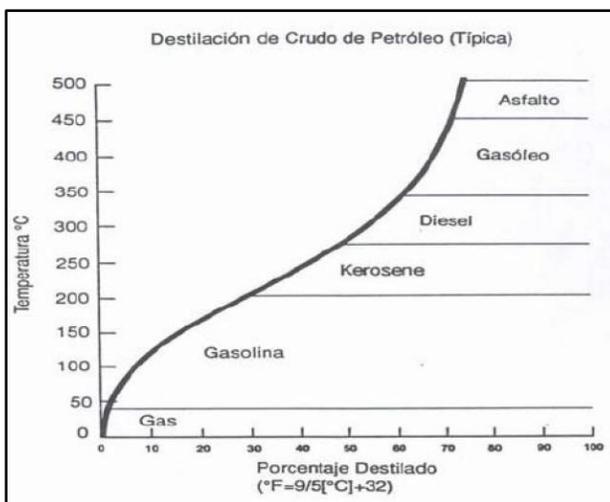


Ilustración 2: Productos y Temperaturas de Destilación

Fuente: (ARQHYS.com, 2007)

Los productos asfálticos para pavimentos como se mencionó arriba se obtiene de la refinación del crudo en la torre de vacío, y se clasifican en:

- a) **Asfaltos Rebajados:** Son materiales asfálticos líquidos compuestos por asfalto y un solvente, utilizados regularmente en la elaboración de carpetas de mezclas en frío e impregnaciones. Actualmente son considerados peligrosos para el medio ambiente debido a que el solvente se evapora al ser esparcido en el pavimento. (ARQHYS.com, 2007)
- b) **Emulsiones Asfálticas:** Son materiales asfálticos líquidos estables, compuestos por la unión de agua y asfalto a través de una solución jabonosa. (ARQHYS.com, 2007)
- c) **Asfaltos soplados con aire:** Son asfaltos sometidos a un tratamiento de soplado de aire a altas temperaturas para proporcionar ciertas características deseadas para

la realización de ciertos trabajos como aplicaciones hidráulicas, material para techar, etc. (ARQHYS.com, 2007)

d) Asfaltos AC: Son los cementos asfálticos obtenidos del proceso de destilación del petróleo. También se los conoce como asfaltos no modificados. (ARQHYS.com, 2007)

e) Asfaltos Modificados: Son los cementos asfálticos combinados con algún polímero para mejorar las propiedades físicas de este. (ARQHYS.com, 2007)

Como se mencionó antes el asfalto ecuatoriano proviene de la refinería de Esmeraldas, proporcionado por la empresa Petroecuador; tipo AC-20 (Asfalto no modificado), que cumple con las normas de calidad NTE-INEN 2515 Cemento Asfáltico-Clasificación por Viscosidad. Dichos asfaltos, según investigaciones realizadas en nuestro medio, tienen un exceso de parafina (11,5%) y lo recomendable es 2,5%. A esto se le aumenta que carece de nitrógeno, lo cual lo hace vulnerable al sol y la lluvia. Esto se agrava con los cambios de clima y temperaturas que sufren nuestro país. Cabe recalcar que de acuerdo con la norma AASHTO-M20, el asfalto no modificado se clasificaba en cinco grados estándares de consistencia obtenidos de la prueba de penetración: 40-50, 60-70, 85-100, 120-150 y 200-300, donde los números indicaban el valor de penetración permitido por grado, e iban en un rango de mayor a menor en orden expuesto. La prueba de viscosidad se ha vuelto fundamental para la clasificación de los asfaltos, la cual se mide en poises a 60°C de temperatura. Esta clasificación, según la norma AASHTO-M226, está dividida en dos series de grados: la primera consiste en grados de AC-2.5, AC-5, AC-10, AC-20, AC-40 y a veces AC-30, donde la numeración

indicada la viscosidad en cientos de poises a 60°C. La segunda, consiste en grados de AR-1000, AR-2000, AR-4000, AR-8000 Y AR-16000, donde la numeración indica la viscosidad en poises, pero después de que el asfalto ha sido sometido a la prueba de RTFO.

2.1.2. Materiales Granulares.

La mezcla asfáltica está formada por asfalto y agregados pétreos, una mezcla tradicional puede contener un promedio de 6% de asfalto y 94% de agregados con respecto a su peso.

Un agregado es un material geológico que se utiliza principalmente en el campo de la construcción ya que como su nombre lo indica, sirven para agregar a distintos materiales como el cemento y el agua para formar otro tipo de materiales muy útiles en la construcción tanto de edificaciones como de carreteras. Los agregados más utilizados en la construcción son los que se derivan de las rocas metamórficas, sedimentarias e ígneas y es importante que todos estos agregados conserven las características físicas y químicas de su roca madre (Vizcardo Otero & Trinidad Santos , 2014).

- **Rocas ígneas:** Son aquellas rocas que se forman cuando un material rocoso, caliente y móvil como el magma se solidifica, se produce una cristalización por el enfriamiento y unión de las partículas que lo conforman. Existe dos tipos de rocas ígneas; las intrusivas que son producidas a altas profundidades (interior de la

corteza terrestre), y las extrusivas que se producen a una profundidad baja o en la superficie (Servicio Geologico Mexicano , 2017).

- **Rocas metamórficas:** Las rocas metamórficas se originan de rocas preexistentes que ha tenido cambios en su estructura y mineralogía por varios cambios físicos y químicos. Las transformaciones se producen bajo la superficie, las propiedades físicas y químicas de la roca resultante de esta transformación dependerán de los agentes del metamorfismo, de la estructura y composición de su roca original y de la cantidad del tiempo que la roca original tuvo su proceso de metamorfosis (Servicio Geologico Mexicano , 2017).
- **Rocas sedimentarias:** como su nombre lo indica son rocas que se producen por una acumulación de sedimentos que por efectos físicos y químicos producen nuevos materiales. Se forman a orillas del rio, en valles, lagos, etc. y cubren el 75% de la superficie terrestre formando estratos o capas de este material (EcuRed, 2018).

Tipo de Roca	Dureza/Tenacidad	Resistencia al desprendimiento	Textura superficial	Forma fracturada
Ignea:				
Granito	Regular	Regular	Regular	Regular
Sienita	Bueno	Regular	Regular	Regular
Diorita	Bueno	Regular	Regular	Bueno
Basalto	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
Diabasa	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
Gabro	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
Sedimentaria:				
Caliza, Dolomita	Pobre	Bueno	Bueno	Regular
Arenisca	Regular	Bueno	Bueno	Bueno
Chert	Bueno	Regular	Pobre	Bueno
Lutita	Pobre	Pobre	Regular	Regular
Metamórfica:				
Gneis	Regular	Regular	Bueno	Bueno
Esquisto	Regular	Regular	Bueno	Regular
Pizarra	Bueno	Regular	Regular	Regular
Cuarcita	Bueno	Regular	Bueno	Bueno
Mármol	Pobre	Bueno	Regular	Regular
Serpentina	Bueno	Regular	Regular	Regular

Ilustración 3: Propiedades de Rocas

Fuente: (Servicio Geológico Mexicano , 2017).

El material granular en una mezcla asfáltica representa aproximadamente un 94% en peso de toda la mezcla asfáltica por lo tanto es importante conocer las características físicas y químicas de este tipo de material ya que tendrán un papel importante en la capacidad portante de un pavimento. Los agregados utilizados en la generación de mezclas asfálticas se clasifican de acuerdo a su fuente de origen y son:

- a) **Agregados Naturales:** Son aquellos agregados que no se someten a un proceso para poder utilizarlos. Están formados de partículas que son producidas por la erosión y la degradación. De estas se obtienen las gravas y las arenas crudas sin embargo estas no se utilizan en la elaboración de las mezclas asfálticas porque son muy grandes y presentan gran cantidad de material fino.
- b) **Agregados Procesados:** En este tipo de agregados se encuentran las gravas y las arenas procesadas las cuales serán necesarias para realizar la mezcla

asfáltica. Se obtienen mediante el triturado y tamizado de las rocas obtenidas de forma natural con el fin de modificarlas para que cumpla con una granulometría específica para la elaboración de las mezclas asfálticas.

- c) **Agregados Sintéticos:** Son aquellos que no existe en la naturaleza, sino que se originan de un proceso físico y químico de otros materiales como por ejemplo el vidrio volcánico, escoria, tierra procesada, etc. Este tipo de agregados tienen una alta resistencia al desgaste, por lo que no son recomendadas para las mezclas asfálticas, al no cumplir con el ensayo de la máquina de abrasión De Los Ángeles. En el campo de la construcción de pavimentos este tipo de materiales son nuevos en su uso y se los aplica principalmente en superficies que necesiten una alta resistencia al deslizamiento.

2.1.2.1. Agregado Grueso.

Son partículas de rocas que constituyen el cuerpo de la matriz de mezcla asfáltica. Aportan en alto grado a la resistencia mecánica. El agregado grueso consiste en partículas gruesas que se encuentran retenidas en el tamiz número 4 (4.76mm) que se obtienen en minas o canteras y están formados por rocas y gravas trituradas. Las rocas donde proceden los agregados gruesos deben cumplir con requisitos de calidad, ser sanas y durables. Los agregados gruesos obtenidos en canteras deben presentar partículas limpias y resistentes con una textura adecuada y sin material vegetal con el fin

de garantizar calidad y un buen desempeño (Ministerio de Obras Publicas y Comunicaciones, 2002).

El agregado grueso presenta un papel muy importante en las mezclas asfálticas sobre todo en la trabajabilidad ya que el exceso de este material causa problemas a la hora de la compactación en la obra. Igualmente, si existe un desbalance entre el agregado grueso y el agregado fino (más agregado grueso que fino) se producen una gran cantidad de vacíos que pueden causar problemas en el desempeño del pavimento. Los agregados gruesos deben cumplir ciertas características mecánicas para poder ser utilizados en las mezclas asfálticas, en el capítulo siguiente mencionaremos los ensayos que se realizan y las específicas que estos deben cumplir.

2.1.2.2. Agregado Fino.

Son materiales que están formados por arena ya sea natural, triturada o una mezcla de los dos. Al igual que los agregados gruesos deben proceder de rocas sanas y limpias con el fin de brindar una alta calidad a la mezcla asfáltica. El agregado fino se define como todo el material que pasa del tamiz numero 4 (4,76mm) y que es retenido en el tamiz No. 200 (75mm).

Así como el agregado grueso, el agregado fino presenta varias ventajas en una mezcla asfáltica, sus partículas finas rellenan los espacios vacíos entre los agregados gruesos. Sin embargo, el exceso de material fino puede ser perjudicial en la compactación porque reduce su resistencia. Por lo tanto, considerando las ventajas y desventajas de los

distintos materiales que conforman una mezcla asfáltica es importante mantener una proporción adecuada para asegurar una estructura de pavimento de calidad. Estos agregados son de potencial importancia debido a que le da a la mezcla la trabajabilidad necesaria para su implementación en obra y reduce el porcentaje de vacíos.

2.1.2.3. Piedra Caliza.

La piedra caliza es una roca sedimentaria que está formada de carbonato de sodio e impurezas, presenta varias características físicas y químicas que le permite a este material ser utilizado en el ámbito de la construcción esencialmente en la generación de cal para la producción de cemento, también se utiliza bastante en el diseño de chimeneas o baldosas por su alta resistencia y durabilidad. Al igual que los agregados pétreos, la piedra caliza puede ser natural, procesada o artificial, por lo tanto, se los pueden encontrar de distintos tamaños de acuerdo a su utilización. Esta filler mineral se lo utiliza generalmente para contrarrestar el porcentaje de vacíos que se presentan en la mezcla, para el diseño de la mezcla convencional no fue necesario la colocación de este elemento; mientras que para la mezcla modificada con PETS, adicionamos este material debido a recomendaciones de investigaciones.

2.1.3. Tereftalato de Polietileno (PET).

El Tereftalato de Polietileno, conocido como PET, es un polímero termoplástico que tiene una estructura alifática y aromática, semi-cristalina y hace parte de la familia de los poliésteres. Su denominación oficial es polioxitereftaloila de oxietileno. (Alzate, 2017)

Los termoplásticos son polímeros que poseen la capacidad de tornarse fluidos con el calentamiento y después de un proceso de enfriamiento, vuelven a su estado inicial sin ninguna alteración en sus propiedades. Esa característica permite que los termoplásticos sean moldeados y reciclados sin afectar sus propiedades físicas. Algunas ventajas del PET sobre otros tipos de termoplásticos son: la estabilidad térmica, la facilidad de procesamiento, la estabilidad química y la estabilidad hidrolítica, causada por la presencia de anillos aromáticos, alta resistencia mecánica a temperaturas elevadas su baja densidad, brillo, transparencia y bajos costos de producción (Bustamante, 2008).

El PET fue producido por primera vez por dos químicos británicos, John Rex Whinfield y James Tennant Dixon, en 1941, y desde entonces fue bien recibido en el ámbito de los materiales industriales por su alta temperatura de fusión, que se encuentra en torno a los 260°C. La presencia de anillos aromáticos en su cadena polimérica principal dificulta la entrada de materiales que puedan degradarlo. Inicialmente, el PET fue utilizado en fibras para la fabricación de tejidos, ya que después de la segunda guerra mundial, se presentó un desabastecimiento en la industria textil, cuya producción estaba basada en fibras de algodón, lino y lana, por lo que el poliéster constituyó una alternativa viable para sustituir

estos materiales tradicionales. A partir de 1970, las primeras botellas de PET fueron fabricadas en Estados Unidos y en Europa. (Bustamante, 2008)

Actualmente, se tiene una producción de PET a nivel mundial de cerca de 30 millones de toneladas por año, donde alrededor del 70% está destinado a la industria de los empaques, siendo la mayor parte para bebidas carbonatadas (MINISTERIO DEL AMBIENTE, 2012).

En lo que respecta a la producción de PET, se tiene un proceso dividido en tres etapas desde el punto de vista químico: Pre-polimerización, poli-condensación y polimerización en estado sólido.

La pre-polimerización consiste en la fabricación de un pre-polímero llamado Oligómero Tereftalato de Bis (2-hidroxietileno), BHET. En la poli-condensación, el PET es producido a partir del calentamiento gradual de BHET. Para la fabricación de fibras textiles, esos dos procesos son suficientes, sin embargo, para la producción de empaques y botellas se requiere un material con un alto peso molecular (>30.000 g/mol), por lo que se hace necesaria la tercera etapa de polimerización en estado sólido, que consiste en dejar el producto en un mayor grado de cristalinidad, en el que el material puede ser moldeado (Alzate, 2017).

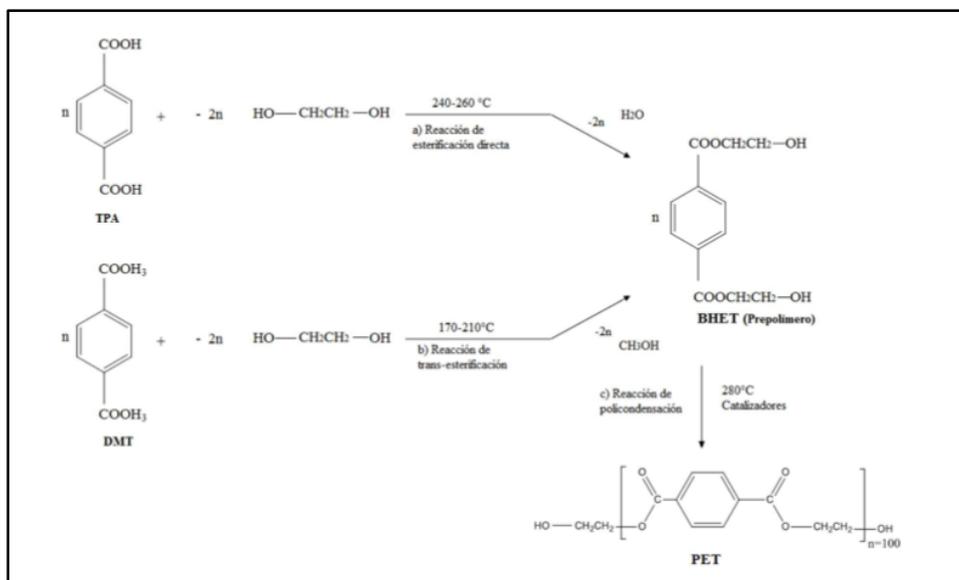


Ilustración 4: Síntesis de reacciones del PET.

Fuente: (Alzate, 2017).

2.1.3.1 Modificación de Ligantes Mediante Adición de Plástico.

Para tema de investigación propia el ligante ha sido modificado con la implementación del material plástico. Este material modificará las características físicas y mecánicas del cemento asfáltico y por ende también será determinante en el cambio de la mezcla.

Durante varios años ha habido numerosos aditivos cuya incorporación al cemento asfáltico se ha estudiado a fin de modificar las características reológicas de los mismos. Existen aditivos cuyo éxito ha sido creciente, este es el caso de los polímeros, principalmente a que las modificaciones que introducen en los ligantes bituminosos los convierte en capas de soportar condiciones extremas de tráfico y de temperatura. Estos polímeros deben cumplir una serie de requisitos:

- Disposición en cantidades suficientes.
- No degradación a temperaturas normales para mezclas asfálticas.
- Mezclado normal con el ligante bituminoso.
- Mejorar la resistencia a las deformaciones plásticas a altas temperaturas, sin aumentar la viscosidad del ligante en temperaturas de puesta en obra; o a su vez hacerlo más rígido o frágil a bajas temperaturas.
- Economía en la implementación de los equipos que se utilizan para su adicción.

El uso más general son los polímeros termoplásticos, el PVC concretamente, se ha conseguido notables mejoras sobre las propiedades de los ligantes original, en los siguientes puntos: aumento de la viscosidad y de la ductilidad; reducción de la susceptibilidad térmica: disminución del envejecimiento; aumento de la resistencia al ataque de aceites y de combustibles; un aumento considerable de la cohesión de las mezclas y refuerzo químico árido-ligante para cualquier tipo de agregado pétreo. (Melus, 1885)

Los polímeros son muy utilizados para estos fines y pueden ser adicionados en el ligante, constituyendo un asfalto modificado, o bien directamente sobre la mezcla, dependiendo entre otras cosas de la infraestructura para la modificación y el mezclado con que se cuente (Melus, 1885).

En el caso de las mezclas asfálticas modificadas con polímeros, se mejoran mucho las características del pavimento flexible, en aspectos como la disminución de las deformaciones permanentes, fisuras por fatiga y por gradiente térmico, como también la adherencia asfalto-agregado (Melus, 1885).

Según Hameau y Druon señalan que la elección del polímero más adecuado para dicha modificación del cemento ha de guiarse por los siguientes principios:

- No son adecuados los polímeros muy reticulados, demasiado ramificados o incluso demasiado polares, así como los que poseen radicales estéricos en proporción elevada, pues ello impediría conseguir cementos suficientemente deformables a bajas temperaturas; es decir, no frágiles.
- Para que la estructura molecular del polímero pueda distribuirse en la estructura molecular del cemento sin perturbarla se necesitan polímeros con fuerzas de unión intermolecular relativamente moderadas.
- Son necesarios polímeros con cadenas macromoleculares suficientemente largas que permiten una flexibilidad elevada. En el mismo sentido, solo son adecuados los polímeros con una configuración atáctica, es decir, con poca regularidad estructural.
- Para que en la fabricación de las mezclas bituminosas se mantengan valores de la viscosidad suficientemente bajos que permiten la envuelta, deben excluirse los elastómeros poco polidispersos y con peso molecular por encima de 500000.

A pesar de todas las ventajas, los polímeros presentan costos elevados en comparación con los demás materiales usados para la producción de mezclas asfálticas convencionales, por esta razón, se busca que las adiciones sean lo más pequeñas posible. Así pues, hay una tendencia creciente a nivel mundial que se enfoca en la sustitución de los polímeros comerciales por polímeros reciclados, como es el caso de los residuos de botellas de PET trituradas (Alzate, 2017).

Esta tendencia también se presenta en la adición de polímeros directamente sobre la mezcla asfáltica. El caso más común son las fibras de polipropileno, de polietileno e inclusive de PET (poliéster). Fundamentalmente, el refuerzo con fibras aumenta la resistencia mecánica de la mezcla y mejora su comportamiento en relación con la fatiga. No obstante, la incorporación de polímeros triturados directamente sobre la mezcla o la sustitución parcial de los agregados por polímeros también ha mostrado buenos resultados en investigaciones recientes, desde el punto de vista ambiental debido a que utiliza mayores volúmenes de materiales reciclados (Alzate, 2017).

2.2. Mezclas Asfálticas

Las mezclas asfálticas o concretos asfálticos son el producto de la combinación de un ligante de origen bituminoso (cemento asfáltico) y agregado pétreos, en proporciones adecuadas y definidas previamente en el diseño. Pueden ser elaboradas en caliente, semi-caliente, fría, incluso en la propia vía en plantas móviles. (ASTM D5, 2013)

Las mezclas asfálticas, también reciben el nombre de aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua. Se fabrican en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan (Alzate, 2017).

Las mezclas asfálticas se emplean en la construcción de pavimentos, ya sea en capas de rodadura o en capas inferiores y su función es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica a los usuarios de las vías de comunicación. Actualmente en nuestro medio local es bastante utilizada en la construcción de pavimentos debido a su economía con respecto a otros tipos de materiales.

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

Las mezclas asfálticas deben cumplir con varias características para que se considere que la vía construida con la misma es de buena calidad:

- Debe presentar una alta resistencia a las cargas vehiculares.
- Ser fácilmente trabajable en el momento de su colocación y compactación.
- Ser impermeable para que cuando haya precipitaciones o inundaciones el pavimento no presenten problemas por los agentes atmosféricos.
- La mezcla debe presentar características de durabilidad es decir que presente una alta resistencia a varios agentes externos que desgastan el pavimento.

2.2.1. Clasificación de las Mezclas Asfálticas.

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

a. Por la Temperatura de puesta en obra.

- Mezclas asfálticas en Caliente: Se fabrican con asfaltos a unas temperaturas elevadas, en el rango de los 150 grados centígrados, según la viscosidad del ligante, se calientan también los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos. La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores al ambiente, pues en caso contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente.
- Mezclas asfálticas en Frío: El ligante suele ser una emulsión asfáltica (debido a que se sigue utilizando en algunos lugares los asfaltos fluidificados), y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.

b. Por la proporción de Vacíos en la mezcla asfáltica. - Este parámetro suele ser imprescindible para que no se produzcan deformaciones plásticas como consecuencia del paso de las cargas y de las variaciones térmicas.

- Mezclas Cerradas o Densas: La proporción de vacíos no supera el 6 %.
- Mezclas Semi-cerradas o Semi-densas: La proporción de vacíos está entre el 6 % y el 10 %.

- Mezclas Abiertas: La proporción de vacíos supera el 12 %.
- Mezclas Porosas o Drenantes: La proporción de vacíos es superior al 20 %.

c. Por el Tamaño máximo del agregado pétreo.

- Mezclas Gruesas: Donde el tamaño máximo del agregado pétreo excede los 10mm.
- Mezclas Finas: También llamadas microaglomerados, pueden denominarse también morteros asfálticos, pues se trata de mezclas formadas básicamente por un árido fino incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico. El tamaño máximo del agregado pétreo determina el espesor mínimo con el que ha de extenderse una mezcla que vendría a ser del doble al triple del tamaño máximo de la carpeta asfáltica.

d. Por la Granulometría.

- Mezclas Continuas: Una cantidad muy distribuida de diferentes tamaños de agregado pétreo en su granulometría.
- Mezclas Discontinuas: Una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo en su granulometría.

2.2.2. Propiedades de las Mezclas Asfálticas para Capas de Rodadura.

Las capas de rodadura son primordiales en cuanto a pavimento nos referimos, es la capa de transmisión de las cargas de tránsito a la estructura del pavimento, por ello debe

contar con un número de propiedades físicas y mecánicas, con el fin de cumplir con los requisitos de desempeño, estabilidad y seguridad.

La capa superior de un pavimento es la que debe proporcionar una superficie de rodadura segura, confortable y estética. Como todas las exigencias deseables para una superficie de rodadura no pueden optimizarse simultáneamente hay que equilibrar las propiedades contrapuestas para llegar a las soluciones más satisfactorias. Los materiales asfálticos proporcionan superficies continuas y cómodas para la rodadura de los vehículos. No obstante, hay que establecer un balance entre la durabilidad, rugosidad, impermeabilidad, y otras características útiles o imprescindibles para el usuario. En las capas de rodadura el uso de agregados de alta calidad y de aditivos se justifica por las solicitaciones a que están sometidas. Actualmente la modificación de ligantes se ha generalizado para carreteras importantes persiguiéndose la optimización de la respuesta mecánica y de la durabilidad de la mezcla. Por la misma razón, la calidad de los agregados es absolutamente imprescindible, aunque todo ello suponga un costo mayor para el pavimento (Melus, 1885).

2.2.3. Mezcla Asfáltica en Caliente.

Constituye el tipo más generalizado de mezcla asfáltica y se define como mezcla asfáltica en caliente la combinación de un ligante hidrocarbonado, agregados incluyendo el polvo mineral y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del agregado queden muy bien recubiertas por una película homogénea de ligante. Su

proceso de fabricación implica calentar el ligante y los agregados (excepto, eventualmente, el polvo mineral de aportación) y su puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior al ambiente. A continuación, se muestra la evolución de los métodos de diseños de mezclas asfálticas en caliente.

1. The Hubbard-Field (1920's). Método de diseño de mezclas asfálticas, fue uno de los primeros métodos en evaluar contenidos de vacíos en la mezcla y en el agregado mineral. Usaba una estabilidad como prueba para medir la deformación. Funcionó adecuadamente para evaluar mezclas con agregado pequeño o granulometrías finas, pero no también para mezclas con granulometrías que contenían agregados grandes. (Institute, Superpave, Performance graded asphalt binder specifications and testing superpave serie No 1 (SP-1), 1993)
2. Método Marshall (1930's). Método de diseño de mezclas asfálticas, desarrollado durante la 2da. Guerra Mundial y después fue adaptado para su uso en carreteras. Utiliza una estabilidad y porcentaje de vacíos como pruebas fundamentalmente. Excepto cambios en las especificaciones, el método no ha sufrido modificación desde los años 40's. (Institute, Superpave, Performance graded asphalt binder specifications and testing superpave serie No 1 (SP-1), 1993)
3. Método Hveem (1930's). Método de diseño de mezclas asfálticas, desarrollado casi en el mismo tiempo que el método Marshall. Evalúa una estabilidad pseudotriaxial (Institute, Superpave, Performance graded asphalt binder specifications and testing superpave serie No 1 (SP-1), 1993)

4. Método de la Western Association of State Highway on Transportation Officials. WASHTO (1984). Este método de diseño de mezclas recomendó cambios en los requerimientos del material y especificaciones de diseño de mezclas para mejorar la resistencia a las roderas. (Institute, Superpave, Performance graded asphalt binder specifications and testing superpave serie No 1 (SP-1), 1993)
5. Método de Asphalt Aggregate Mixture Analysis System. AAMAS (1987). La necesidad de cambios en el diseño de mezclas fue reconocida, tardaron 2 años para desarrollar un nuevo proyecto para el diseño de mezclas, que incluía un nuevo método de compactación en laboratorio y la evaluación de las propiedades volumétricas, desarrollo de pruebas para identificar las deformaciones permanentes, grietas de fatiga y resistencia a las grietas a baja temperatura. (Institute, Superpave, Performance graded asphalt binder specifications and testing superpave serie No 1 (SP-1), 1993)
6. Método SUPERPAVE (1993) El método AAMAS, sirvió como punto de inicio del método SUPERPAVE, que contiene un nuevo diseño volumétrico completo de mezcla, con funcionamiento basado en predicción a través de modelos y métodos de ensayo en laboratorio, grietas por fatiga y grietas por baja temperatura. Los modelos de predicción de funcionamiento fueron completados satisfactoriamente hasta el año 2000. El diseño volumétrico de mezclas en el SUPERPAVE es actualmente implementado en varios estados de los EUA, debido a que ha sido reconocida una conexión entre las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica caliente y su correcto funcionamiento. Tiene su resultado, ahora la aceptación en el control de calidad ha sido cambiada a propiedades volumétricas. SUPERPAVE

promete un funcionamiento basado en métodos o ensayos de laboratorio que pueden ser usados para identificar la resistencia a las deformaciones plásticas de los pavimentos. (Institute, Superpave, Performance graded asphalt binder specifications and testing superpave serie No 1 (SP-1), 1993)

2.2.4. Consideraciones para la Selección y Proyecto de una Mezcla Asfáltica.

En muchas ocasiones, el proyecto de una mezcla asfáltica se reduce a determinar su contenido de ligante, sin embargo, esa es solo la última fase de un proceso más amplio, que requiere de un estudio cuidadoso de todos los factores involucrados, a fin de garantizar un comportamiento adecuado de la mezcla y un considerable ahorro económico en la solución. Las fases de las que consta el proyecto de una mezcla son las siguientes:

a) Análisis de las condiciones en las que va a trabajar la mezcla: tráfico, tipo de infraestructura (carretera, vía urbana, aeropuerto, etc.), la capa de la que se trata (rodadura, intermedia o base) y espesor, naturaleza de las capas subyacentes, intensidad del tráfico pesado, clima, etc. Asimismo, hay que distinguir si se trata de un firme nuevo o de una rehabilitación. (Alzate, 2017)

b) Determinación de las propiedades fundamentales que ha de tener la mezcla, dadas las condiciones en las que ha de trabajar. Debe establecerse la resistencia a las deformaciones plásticas o la flexibilidad, entre otras. (Alzate, 2017)

c) Elección del tipo de mezcla que mejor se adapte a los requerimientos planteados, incorporando en este análisis las consideraciones económicas o de puesta en obra que haya que considerar. (Alzate, 2017)

d) Materiales disponibles, elección de los agregados pétreos, los cuales deben cumplir con determinadas especificaciones, pero que en general serán los disponibles en un radio limitado y, por lo tanto, a un costo razonable. Asimismo, hay que elegir el polvo mineral de aportación. (Alzate, 2017)

e) Elección del tipo de ligante: asfalto, asfalto modificado, emulsión asfáltica, el costo es siempre un factor muy relevante. (Alzate, 2017)

f) Dosificación o determinación del contenido óptimo de ligante según un proceso que debe adaptarse al tipo de mezcla, la cual debe hacerse para distintas combinaciones de las fracciones disponibles del agregado pétreo, de manera que las granulometrías conjuntas analizadas estén dentro de un huso previamente seleccionado. (Alzate, 2017)

g) Otros factores a tener en cuenta en el diseño y selección de una mezcla asfáltica son los siguientes: Exigencias de seguridad vial, Estructura del firme, Técnicas de Diseño y Ejecución, Sitio de construcción del pavimento (topografía, temperatura, terreno, periodo de lluvias trazado de la vía, entre otros), Condiciones de drenaje, Consideraciones económicas. (Alzate, 2017).

2.2.5. Principales Defectos en Revestimientos Asfálticos.

La durabilidad en mezclas asfálticas es una propiedad elemental de los pavimentos, estos deben ofrecer resistencia al envejecimiento y contra la acción del agua. La durabilidad potencial es la resistencia de la mezcla a los cambios de temperatura y el efecto del agua en conjunto, en resumen, una durabilidad relativamente baja de las capas de rodadura es unas de las principales razones del deterioro de las condiciones de servicio de los pavimentos.

Los deterioros de los pavimentos asfálticos se deben a una serie de factores como lo pueden ser el medioambiente (lluvia, gradientes de temperatura), tráfico (cargas por eje, presión de inflado de los neumáticos, intensidad), materiales inadecuados, procesos de elaboración de las mezclas inapropiados, técnicas de construcción deficientes (transporte, extensión y compactación), fórmula de trabajo deficiente. Todos estos defectos se pueden detectar una vez que se haya concluido la obra, como por ejemplo una mala textura superficial, geometría, aspecto y también estos defectos se pueden detectar en un periodo considerable de tiempo durante la vida de servicio del pavimento. Entre las principales causas que producen el efecto antes mencionado podemos destacar las siguientes:

1. Fallos en la Construcción

Durante la fase de construcción y puesta en obra de las mezclas asfálticas se pueden producir errores y fallos accidentales, como:

- La segregación de la mezcla del pavimento, que a su vez se puede clasificar en los tipos siguientes: Segregación aleatoria, Segregación transversal y Segregación longitudinal, bien sea en el centro o en los lados.
- Defectos en las mezclas difíciles de compactar. Los dos tipos extremos de mala compactibilidad de las mezclas ocurren con las poco trabajables y con las blandas.

Las mezclas poco trabajables también llamadas agrias, tienen un esqueleto mineral con rozamiento interno muy elevado, debido al empleo de agregados cúbicos, duros y de alta textura, así como a granulometrías determinadas y a cementos rígidos. El mayor peligro, suponiendo que su comportamiento estructural sea el previsto, radica en la necesidad de que la compactación sea enérgica y contundente sin llegar a romper las partículas minerales. Una mala densidad final reduce la durabilidad notablemente. Pueden producirse mezclas blandas por algunos de los factores siguientes: Uso de agregados pétreos con partículas redondeadas o pulidas tales como la arena natural, falta de la cantidad adecuada de filler mineral y la excesiva humedad en la mezcla.

2. Exudaciones.

La exudación se caracteriza por la presencia de ligante libre o polvo mineral incorporado en la superficie del pavimento. Las superficies ricas en asfalto, especialmente en tiempo húmedo, pueden llegar a ser deslizantes si han perdido su textura. Las causas de las exudaciones son las siguientes: Exceso de ligante asfáltico, Escaso contenido de vacíos y liberación de los ligantes asfálticos de las capas inferiores debido a partes exudadas en las capas inferiores, dotaciones irregulares en los

tratamientos de adherencia entre capas asfálticas y ligante asfáltico libre por mala adhesividad con los agregados pétreos.

3. Segregaciones.

La segregación, disgregación y peladura, es la separación de las partículas minerales de la superficie del pavimento. El agregado fino, se separa de las partículas de mayor tamaño, lo que da lugar a una apariencia de capa de pavimento erosionada y rugosa. Las causas de este defecto son las siguientes: Esfuerzos cortantes horizontales en la superficie de rodadura, debidos a la acción de los neumáticos de los vehículos, entrada de agua en el pavimento a través de los huecos de la propia mezcla. La presión hidrostática considerable creada por las sollicitaciones del tráfico puede causar la separación de las partículas minerales de la capa superficial. Este tipo de disgregación ocurre inmediatamente después de la puesta en obra de la capa asfáltica, con malas condiciones climatológicas o compactación escasa. La extensión de la disgregación puede limitarse con el tiempo y emisiones y vertidos de carburantes de los vehículos con el tiempo, de forma que los disolventes actúan contaminando los ligantes asfálticos.

4. Desenvuelta o desplazamiento de los agregados pétreos.

El desplazamiento del ligante asfáltico por el agua se puede producir al disminuir la adhesividad entre él y la superficie mineral de las partículas. El ligante es desplazado por

el agua o por el vapor de agua y a veces por la combinación de algún agente que haya contaminado el pavimento. Se identifica de la forma siguiente:

5. Textura superficial inadecuada.

La textura de la superficie de rodadura es una característica esencial para la seguridad de la rodadura de los vehículos. Las causas de una textura inadecuada son las siguientes:

- Pulimento de los agregados, por ser blandos.
- Y/o granulometría con excesivos finos.
- Exceso de ligante en superficie.
- Segregaciones de la mezcla en la puesta en obra.
- Contaminaciones de la superficie.

6. Agrietamientos y fisuras.

El agrietamiento y fisuración es un mecanismo habitual de fallo mecánico por fatiga de una capa de pavimento. Aparte de ello, las grietas prematuras indican un problema de diseño o de construcción de la mezcla asfáltica. Las causas son las siguientes:

- Las grietas comienzan en la zona donde la tracción por flexión es máxima y progresan bajo las cargas repetidas. Se suele formar un mapa de grietas formado por un conjunto de grietas longitudinales y transversales.
- La deformación elástica transversal se produce con las flexiones de la capa de pavimento. La grieta inicial comienza longitudinalmente al lado exterior

de la huella de la rueda. Esta grieta es seguida por otra paralela en el borde interior de la huella.

- El uso del asfalto de alta viscosidad puede ocasionar que las mezclas sean menos resistentes al efecto acumulado de las flexiones.
- Los cambios extremos de temperaturas pueden causar en un pavimento cambios de volumen que producen grietas térmicas que, usualmente son transversales.
- La combinación de grietas longitudinales y de transversales, puede formar elementos o losas rectangulares independientes. Aunque la causa de este agrietamiento no sea debido a las cargas, una vez producida, las sollicitaciones del tráfico incrementarán severamente el deterioro al haber perdido las capas su continuidad física y resistente.
- También se producen grietas longitudinales en las juntas de trabajo. Ocurren cuando las juntas se compactan de forma insuficiente y/o a baja temperatura. Cuando crecen las grietas longitudinales, el agua penetra en el firme, deteriorándolo.
- Las grietas aleatorias por fatiga, se suelen formar por la fatiga de la mezcla asfáltica en alguna de las capas. Estas grietas están relacionadas con las sollicitaciones del tráfico. Las grietas comienzan en la parte inferior de las capas donde las tensiones son más altas, formándose una o dos grietas longitudinales próximas a las huellas de las ruedas y terminan con un estado generalizado de superficie agrietada. Normalmente la fatiga es más

acusada en la parte externa del carril con más tráfico, debido a las condiciones de borde.

7. Bombeo de finos.

Aunque éste es un defecto muy habitual en los pavimentos de concreto hidráulico, también puede producirse en las grietas de las capas superiores asfálticas rígidas, si el soporte tiene exceso de finos, humedad u otras contaminaciones. También se ha detectado muy frecuentemente el fenómeno en las grietas reflejadas de las bases tratadas con cemento, línea débil por la que penetra el agua, deteriorando la base.

8. Deformaciones plásticas.

Son las variaciones permanentes del perfil superficial de la capa de mezcla asfáltica por acumulación de deformaciones permanentes y/o por desplazamiento de la masa de la misma. Son de distintos tipos:

- El arrollamiento se asocia normalmente a una baja estabilidad de las mezclas que se manifiesta en una deformación plástica perpendicular al eje de la vía.
- Las roderas, que se producen transversalmente, en la huella de las ruedas de los vehículos con densificación y/o desplazamiento lateral.

Capítulo III

Metodología

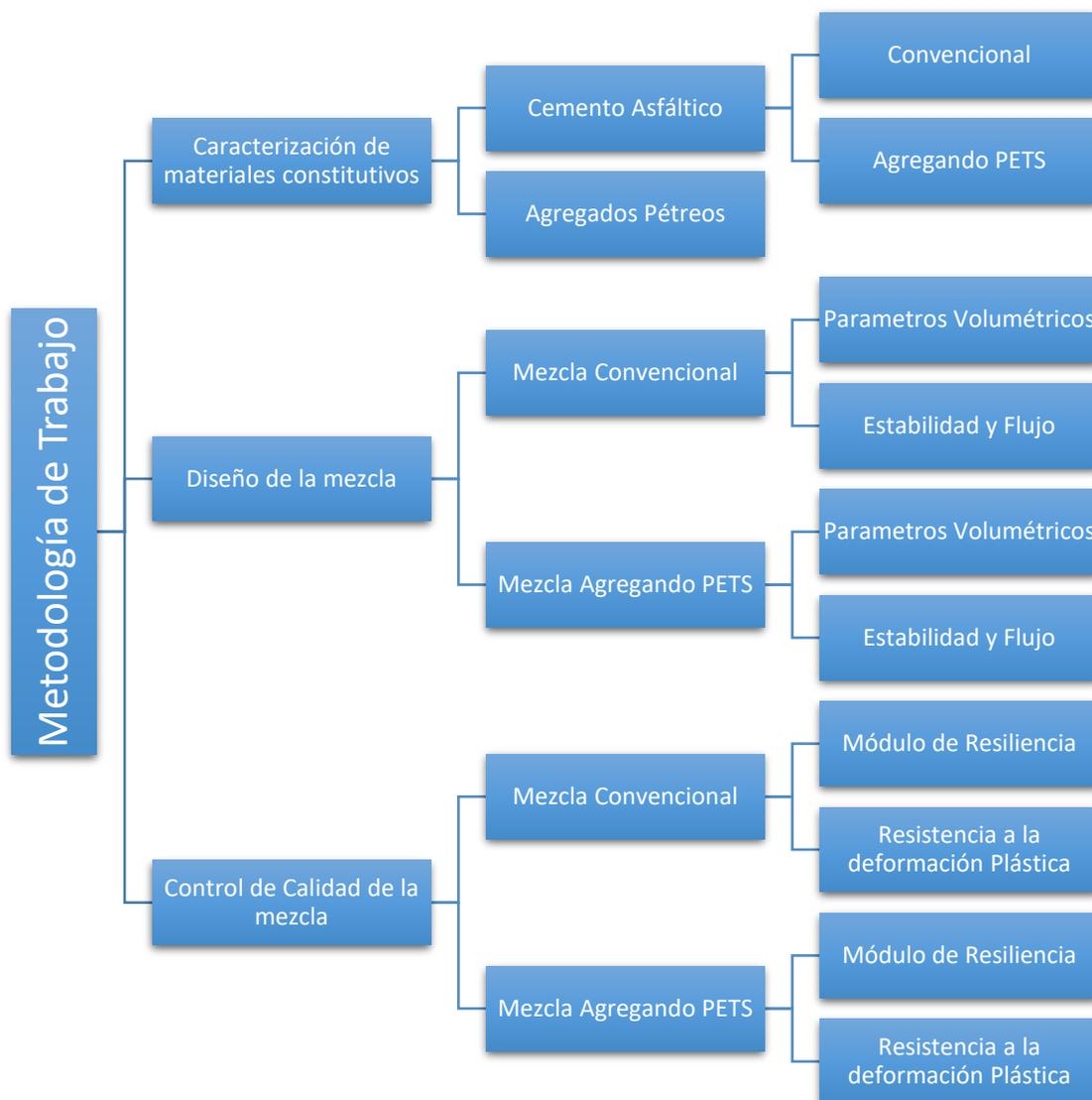
La metodología general para la realización de la tesis consiste en la revisión bibliográfica con el objetivo de obtener información adecuada sobre el tema de investigación e identificar las variables que inciden en el comportamiento de las mezclas asfálticas con adicción de polímeros, en particular el PET, en forma específica los aspectos relacionados con su contribución dentro del esqueleto mineral.

En resumen, el capítulo de la metodología explica los tipos de ensayos que se le realizan a los componentes de la mezcla asfáltica, previo a su diseño. Las características, y las tablas que se presentan en la normativa MOP-001-F-2002 y el diseño de acuerdo al método más utilizado en nuestro medio.

Se realizarán pruebas de laboratorio para caracterizar los materiales constituyentes, se diseñó la mezcla mediante el método Marshall, para controlar los parámetros volumétricos y mecánicos. Finalmente se llevó a cabo una estimación de su efecto en la resistencia a la deformación plástica mediante la prueba de pista en laboratorio, así como la prueba de tracción indirecta para determinar el módulo resiliente de las mezclas. Todos los análisis experimentales se basan en la normativa MOP-001-F-2002 y las recomendaciones establecidas en el manual de Diseño Construcción y Desempeño Para Mezclas de Tráfico Pesado y el Manual de Diseño y Construcción de Mezclas SMA de la

NAPA (National Asphalt Pavement Association), para control de calidad de diseño de mezclas asfálticas, para construcción de caminos y carreteras.

Tabla 1: Metodología del Trabajo



Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.1. Caracterización de Materiales Constitutivos

En el desarrollo de la etapa experimental de la investigación fueron usados principalmente tres materiales:

1. Agregados Pétreos: se utilizarán los materiales triturados de la Mina “Tucho”, ubicado en el cantón Playas, en la provincia de Guayas.
2. Cemento Asfáltico: proviene de la refinería del Pacífico ubicada en Esmeraldas, y corresponde al ligante AC-20 virgen, usado en la producción de mezclas asfálticas para el proyecto: *“Estudio de asfaltos modificados para estacionamiento en puerto aguas profundas Posorja”*.
3. PET: reciclado triturado que provee la empresa Intercia, ubicada en el norte de la ciudad de Guayaquil.

3.1.1. Ensayos de Caracterización al Cemento Asfáltico.

El cemento asfáltico proviene de la refinería del Pacífico ubicada en Esmeraldas, y corresponde al ligante AC-20 virgen, usado en la producción de mezclas asfálticas para el proyecto: *“Estudio de asfaltos modificados para estacionamiento en puerto aguas profundas Posorja”*. De donde se extrajo un lote de muestras suficiente para la ejecución de los ensayos de esta tesis.

Se realizará los ensayos correspondientes al cemento asfáltico en su estado normal, y adicionando el PET con el fin de comprobar si cumple con los parámetros establecidos por la norma MOP - 001-F 2002.

Para el cemento asfáltico se desarrollaron una serie de pruebas de caracterización, cuya síntesis se presenta en la Tabla 2. Estas son las pruebas de caracterización del cemento asfáltico por viscosidad:

Tabla 2: Ensayos de Caracterización del Cemento Asfáltico por Viscosidad

ENSAYO	NORMA	UNIDAD	ESPECIFICACIÓN
Gravedad Especifica	ASTM D70-97	g/cm^3	Mínimo 1.00
Penetración de cemento asfáltico	ASTM D5-97	mm	Rango 60 - 70
Punto de Reblandecimiento	ASTM D92-78	$^{\circ}C$	Rango 48 - 57
Índice de Penetración	ASTM D-3381	%	Mínimo -1.5 Máximo+1
Ductilidad	ASTM D113-99	cm	Mínimo 100
Punto de Inflamación y combustión	ASTM D92-78	$^{\circ}C$	Mínimo 232
Viscosidad a 60 $^{\circ}C$	ASTM D 2171	$Pa \cdot s$	Rango 160 - 240
Viscosidad a 135 $^{\circ}C$	ASTM D 2170	mm^2/s	Mínimo 300

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Luego de realizar el ensayo del horno de película delgada rodante o RTFO; a 163 $^{\circ}C$ y 85 minutos; posteriormente es utilizado para múltiples ensayos, entre ellos los siguientes:

Tabla 3: Ensayos de Caracterización del Cemento Asfáltico posterior al RTFO.

ENSAYO	NORMA	UNIDAD	ESPECIFICACIÓN
Penetración de cemento asfáltico	ASTM D5-97	mm	
Cambio de masa RTFO	ASTM D 2872	%	Máximo 1
Viscosidad a 60 °C RTFO	ASTM D 2171	Pa . s	Máximo 800
Viscosidad a 135 °C RTFO	ASTM D 2170	mm ² /s	Mínimo 300

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Por último, se realizan las pruebas de clasificación SuperPave para asfaltos según la AASHTO M 320. A continuación, se presenta una tabla la cual nos indica los ensayos realizados para la clasificación SuperPave:

Tabla 4: Ensayos de Clasificación SuperPave para asfaltos.

ENSAYO	NORMA	UNIDAD	ESPECIFICACIÓN
Módulo de Corte Dinámico Original ($G/\sin \delta$; 10 rad/seg)	AASHTO T-315	kPa	Mínimo 1
Módulo de Corte Dinámico RTFO ($G/\sin \delta$; 10 rad/seg)	AASHTO T-315	kPa	Mínimo 2,2
Módulo de Corte Dinámico PAV ($G/\sin \delta$; 10 rad/seg)	AASHTO T-315	kPa	Mínimo 2,2
Rigidez al desplazamiento Mpa (60 seg.) BBR	AASHTO T-313	kPa Valor m	Máximo 300 Mínimo 0.300
Grado SuperPave	AASHTO M-320		Rango 58 - 16

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Para la selección del cemento asfáltico se utilizaron los siguientes criterios técnicos:

- En los Métodos de Diseño de Mezclas Para Concreto Asfáltico del Instituto del Asfalto, MS-2, se establece que el tipo de cemento asfáltico a usar está en función de la temperatura media anual de la zona del proyecto. La temperatura media

anual de Guayaquil supera los 24 °C por lo que se requiere de un asfalto que tenga características entre AC-20 y AC-40. El asfalto que produce la refinería de Esmeraldas se encuentra dentro de esas características y será el utilizado para la realización del proyecto. Ver Tabla 5.

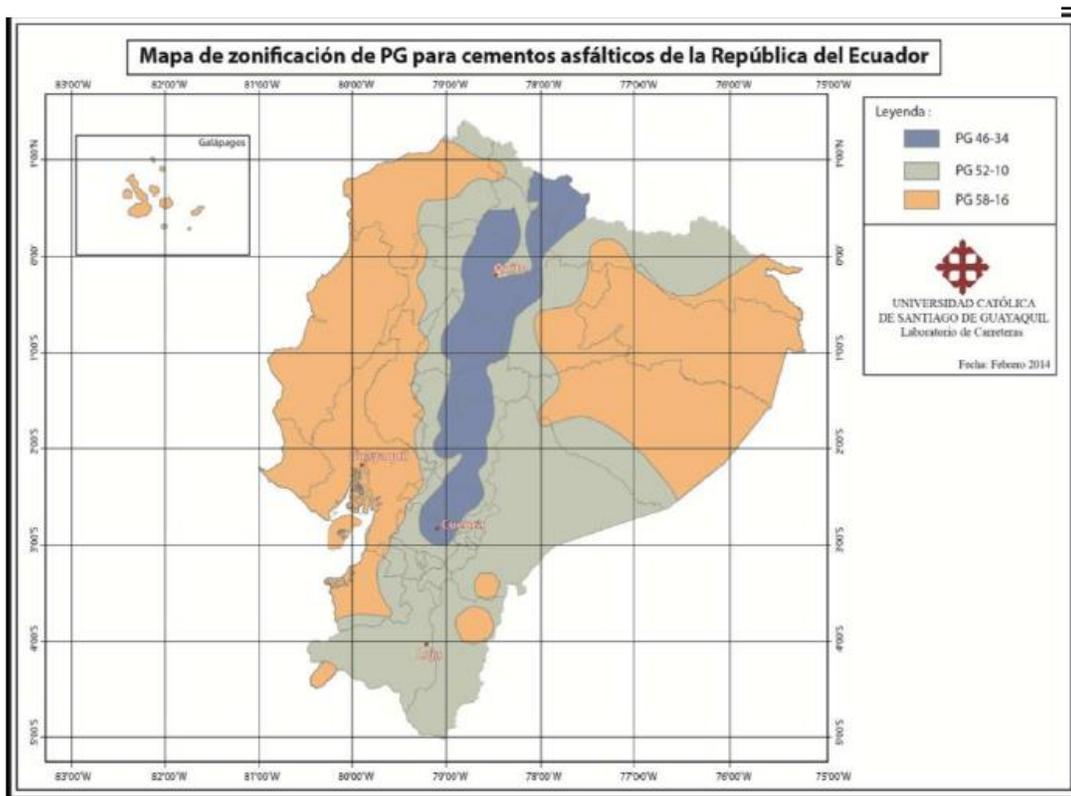
Tabla 5: Criterio de Diseño Mezclas Para Concreto Asfáltico del Instituto del Asfalto, por Temperatura.

CONDICIONES DE TEMPERATURA	GRADO DE ASFALTO	
Frío, temperatura media anual del aire $\leq 7^{\circ}\text{C}$ (45°F)	AC-5, AR-2000, 120/150 pen.	AC-10, AR-4000, 85/100 pen.
Templado, temperatura media anual del aire $\leq 7^{\circ}\text{C}$ (45°F) y 24°C (75°F)	AC-10 AR-4000, 85/100 pen.	AC-20, AR-8000, 60/70 pen.
Caliente, temperatura media anual del aire $\geq 24^{\circ}\text{C}$ (75°F)	AC-20, AR-8000, 60/70 pen.	AC-40 AR-16000, 40/50 pen.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

- Según la NAPA (Asociación Nacional de Pavimento de Asfalto, por sus siglas en ingles), se debe usar un aglutinante o cemento asfáltico que cumpla con uno o dos grados más de la calificación PG que las recomendadas para el área geográfica de SuperPave:

Ilustración 5: Mapa de zonificación de PG para cementos asfálticos de la República del Ecuador.



Fuente: (Institute, Superpave, Performance graded asphalt binder specifications and testing superpave serie No 1 (SP-1), 1993)

- De acuerdo al mapa de zonificación de grado PG en el Ecuador, el asfalto requerido para el presente proyecto es de grado de desempeño PG: 58 -16. El asfalto producido por la refinería de Esmeraldas tiene un grado PG: 64 -28.

Para la aceptación de los cementos asfálticos se puede considerar por: el grado de viscosidad, por el grado de desempeño y por el grado de penetración. Para la determinación del cemento asfáltico se usará por grado de viscosidad el cual se utiliza en el país; utilizando la norma NTE INEN 2515 enmienda 1.

Tabla 6: Requisitos de Cementos Asfálticos de viscosidad a 60 °C a base de asfalto original.

Ensayo	Unidad	Grado de Viscosidad										Norma de ensayo
		AC-6		AC-10		AC-20		AC-30		AC-42		
		Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	
Viscosidad absoluta, 60 °C	Pa s	60 ± 20		100 ± 20		200 ± 40		300 ± 60		420 ± 60		ASTMD 2171
Viscosidad cinemática, 135 °C	mm ² s ⁻¹	175	--	250	--	300	--	350	--	400	--	ASTMD 2170
Punto de Inflamación	°C	177	--	219	--	232	--	232	--	232	--	NTE INEN 808
w, Solubilidad en tricloroetileno, ^c	%	99,0	--	99,0	--	99,0	--	99,0	--	99,0	--	NTE INEN 915
Gravedad específica 25 °C/25 °C		Informe		Informe		Informe		Informe		Informe		ASTMD70
Índice de Penetración ^a		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		ASTM D5/D5M
Residuo de ensayos de película fina en horno rotatorio:												
Viscosidad, 60 °C	Pa s	--	300	--	500	--	800	--	1 200	--	2 000	ASTMD 2171
Cambio de masa,	% w/w	--	1,5	--	1,0	--	1,0	--	1,0	--	1,0	ASTMD 2872
Ductilidad ^a , 25 °C [77 °F], 5 cm/min	cm	100	--	75	--	50	--	40	--	25	--	NTE INEN 916
^a Si la ductilidad es menor a 100, el material debe ser aceptado, solo si la ductilidad a 15,5 °C es mínimo 100 a una velocidad de tiro de 5 cm/min.												
^b Índice de penetración = $\frac{1952 - 500 \log pen - 20 SP}{50 \log pen - SP - 120}$												
donde:												
pen = penetración a 25 °C, 100 g, 5 s												
SP = punto de ablandamiento (°C) ASTM D36												
^c Solubilidad en bromuro de propilo N puede ser un método alternativo a la solubilidad en TCE.												

Fuente: (ASTM, 2010).

3.1.1.1. Gravedad Específica (ASTM D70-97).

Se entiende como gravedad específica de un material, a la relación de su peso en aire a una temperatura determinada, al peso de un volumen igual de agua a la misma temperatura, generalmente a los 25°C y se expresa como gravedad específica a 25°C. (ASTM D70-03, 2003)

Gravedad específica o también conocida como densidad relativa establece la densidad de los asfaltos usando el picnómetro a la temperatura que se requiere, además nos ayuda a identificar la calidad que tiene el material junto a su origen ya que nos da la relación del peso por unidad de volumen. (ASTM D70-03, 2003)

Es importante que la precisión sea de 0.001 gramos y que se deba sumergir el picnómetro durante 30 minutos antes de pesar. Se usa el método del picnómetro cuando se tienen bitúmenes que son semisólidos y para emulsiones ya que se necesita de otras ecuaciones y de otro proceso cuando tenemos materiales muy viscosos. (ASTM D70-03, 2003)

$$\text{Densidad Relativa de la muestra} = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)}$$

$$\text{Densidad de la muestra} = \text{Densidad Relativa de la muestra} * \text{Densidad del agua}$$

Tabla 7: Valores de Gravedad Específica a 25°C de la muestra convencional.

Datos	Valores
A: Masa del picnómetro (más tapa)	31,645
B: Masa del picnómetro lleno de agua	62,985
C: Masa del picnómetro parcialmente lleno con asfalto	50,360
D: Masa del picnómetro más asfalto y más agua	63,190
Densidad relativa de la muestra	1,0111
Densidad del agua a la temperatura de ensayo (kg/m ³)	997
Densidad de la muestra (kg/m ³)	1008,04

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 8: Valores de Gravedad Específica a 25°C de la muestra agregando PETS.

Datos	Valores
A: Masa del picnómetro (más tapa)	32,784
B: Masa del picnómetro lleno de agua	61,992
C: Masa del picnómetro parcialmente lleno con asfalto	54,620
D: Masa del picnómetro más asfalto y más agua	62,257
Densidad relativa de la muestra	1,012
Densidad del agua a la temperatura de ensayo (kg/m ³)	997
Densidad de la muestra (kg/m ³)	1009,25

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.1.1.2. Penetración de Cemento Asfáltico (ASTM -D5).

La penetración, está definida como la consistencia de un material bituminoso y es expresada por la distancia que una aguja standard penetra verticalmente en una muestra de material en condiciones de peso, tiempo y temperatura conocidas. Si las condiciones del ensayo no son especificadas se entiende que el peso total de la aguja y accesorios, el tiempo y la temperatura son respectivamente 100 gramos; 5 segundos y 25°C. La penetración se indica en centésimas de centímetro. (ASTM D5, 2013)

Este método sirve como cuantificación de la consistencia del asfalto a 25 °C, además es de gran ayuda ya que con este se podrá caracterizar al asfalto para tener en cuenta si este es un asfalto elástico o es rígido, lo que daría una idea de cómo se va a comportar el material. Los asfaltos que presentan una consistencia rígida, tendrán menor deformación al aplicarse la carga (aguja normalizada) que los asfaltos que son más blandos. (ASTM D5, 2013)

Es importante que no se tenga ningún tipo de fricción al momento de realizar el ensayo además la superficie del material debe ser lisa para que la aguja sea apoyada de manera correcta y no se dé una deformación anterior y también se debe tomar en cuenta que la aguja debe rozar ya que tampoco debe estar arriba de la superficie del material. (ASTM D5, 2013)

(ASTM D5, 2013) afirma: "Consistencia de un material bituminoso expresado como la distancia en décimas de milímetro que una aguja estándar penetra verticalmente en una muestra del material, bajo condiciones conocidas de carga, tiempo y temperatura".

Tabla 9: Información general del ensayo de penetración.

Datos	Valores
Temperatura de ensayo (°C)	25,00
Carga (g)	100,00
Tiempo de carga (seg.)	5,00

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 10: Valores de penetración de la muestra convencional.

Punto	1	2	3	4	5	6	Promedio
Penetración (0.1 mm)	69	65	64	67	65	68	66.33

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 11: Valores de penetración de la muestra agregando PETS.

Punto	1	2	3	4	5	6	Promedio
Penetración (0.1 mm)	68	62	59	72	69	62	65.33

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 12: Especificación del Ensayo de penetración.

NTE INEN 2515-2010, TABLA 5, GRADO AC-20	MÍNIMO	60
RESULTADO A = 66.33 (1/10mm)	CUMPLE	
RESULTADO B = 65.33 (1/10mm)	CUMPLE	

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.1.1.3. Punto de Reblandecimiento (ASTM D-36).

Se define el punto de reblandecimiento de un material bituminoso, como la temperatura a la cual una probeta; también llamada pastilla, del material en forma de disco, mantenida horizontalmente dentro de un anillo; es obligado a deformarse por el peso de una bola de acero y toca una superficie de un baño (matraz de vidrio) situada a una pulgada (2.54 cm) cuando se calienta a una velocidad determinada del baño con agua destilada y glicerina. (ASTM, 2010)

Los asfaltos de diferente tipo reblandecen a temperaturas distintas. El punto de reblandecimiento se determina usualmente por el método de ensayo arbitrario de anillo y bola. Aunque este ensayo no se incluye en las especificaciones para los asfaltos de pavimentación, se emplea frecuentemente para caracterizar los materiales más duros empleados en otras aplicaciones e indica la temperatura en la cual los asfaltos se hacen fluidos. (ASTM, 2010)

Este método mide de una manera indirecta la consistencia que puede tener el asfalto es decir el punto de ablandamiento como menciona el ensayo el cual debe estar en el

rango de 30 a 200 °C esto se debe a que el asfalto al ser calentado de manera gradual de un estado el cual es poco fluido a un estado menos viscoso. (ASTM, 2010)

Es ensayo se realiza mediante el ensayo de anillo y bola pese a que existen otros ensayos, y se debe realizar con agua destilada ya que pueden presentarse burbujas de aire o con glicerina, esto va a depender si el material bituminoso tiene el punto de reblandecimiento inferior o superior a 80 °C, siendo agua si es menor a 80 °C y glicerina para el caso de que este sea mayor a 80 °C. (ASTM, 2010)

(Ministerio de Obras Publicas y Comunicaciones, 2011) afirma: “menor temperatura a la que una muestra, suspendida en un anillo horizontal de dimensiones especificadas, es forzada a caer 25 mm por el peso de una bola de acero especificada, cuando la muestra se calienta mediante incrementos a una velocidad prescrita”.

Tabla 13: Valores del punto de Reblandecimiento de la muestra convencional.

Punto	1	2	Promedio
Punto de ablandamiento (°C)	50,10	50,00	50,05

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 14: Valores del punto de Reblandecimiento de la muestra agregando PETS.

Punto	1	2	Promedio
Punto de ablandamiento (°C)	49,95	48,75	49,35

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 15: Especificación del Ensayo de Reblandecimiento.

NTE INEN 2515-2010, TABLA 5, GRADO AC-20	RANGO (48 – 57) °C
RESULTADO A = 50,05 (°C)	CUMPLE
RESULTADO B = 49,35 (°C)	CUMPLE

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.1.1.4. Índice de Penetración (ASTM D-3381).

Debido a que el asfalto es un material termoplástico ya que se comporta como líquido viscoso cuando está a altas temperaturas, como sólidos a bajas temperaturas y como material visco-elástico cuando está sometido a temperaturas intermedias, se le da un criterio a la medida de susceptibilidad, influenciado en los valores de penetración y del punto de ablandamiento. (ASTM, 2010)

El fundamento del índice de penetración se basa en decir que; se tiene una relación lineal entre el logaritmo de penetración y la temperatura, esto mediante una pendiente que se ve relacionada por la susceptibilidad térmica que tiene el asfalto. Relacionando esto se obtuvo que los asfaltos tienen la temperatura correspondiente al punto de reblandecimiento cuando se tiene una penetración de 800. (ASTM, 2010).

$$I.P. = \left[\frac{1952 - 500 * \log Penetracion - 20 * Punto de Ablandamiento}{50 * \log Penetracion - Punto de Ablandamiento - 120} \right]$$

Tabla 16: Información general del índice de penetración de la muestra convencional.

Datos	Valores
Penetración a 25 °C, 100g, 5seg.	66.33
Punto de Ablandamiento (°C)	50.05
Índice de Penetración	-0.509

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 17: Información general del índice de penetración de la muestra agregando PETS.

Datos	Valores
Penetración a 25 °C, 100g, 5seg.	65.33
Punto de Ablandamiento (°C)	49.35
Índice de Penetración	-0,731

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 18: Especificación del Índice de Penetración.

NTE INEN 2515:2010, Tabla 7, Grado AC-20		mínimo	-1,5 %	máximo	1 %
Resultado A		Cumple			
Resultado B		Cumple			

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.1.1.5. Ductilidad (ASTM D-113).

El ensayo de ductilidad, de la distancia en centímetros que una muestra normalizada de un producto asfáltico puede alargarse antes de romperse. Este ensayo se realiza con cementos asfálticos y con los residuos de destilación de los asfaltos líquidos y emulsionantes. El ensayo se hace con una briqueta moldeada del material que se va a

probar traccionando las dos extremidades de $5 \pm 0,25$ cm por minuto y a una temperatura de $25 \pm 0,5$ °C. (ASTM, 2013)

Lo que trata de realizar el ensayo es medir la elongación que se genera en el asfalto obtenido por la destilación del crudo el cual es muy grande que en las rotulas donde el asfalto se presenta como ligante se produce antes por fallo de ductilidad. Los asfaltos dúctiles tienen mejores propiedades aglomerantes pero los que tienen gran ductilidad puede tener grandes deformaciones debido a grandes temperaturas. (ASTM, 2013)

Se presenta una gran discusión en el ensayo ya que este va a depender de varias características como lo son; la consistencia, reología, cohesión, entre otras. Pero no mide ninguna de estas propiedades, sino la ductilidad. (ASTM, 2013)

Se debe tomar en cuenta si el ensayo es normal o no, ya que va a influir en el valor de la ductilidad. Si se estiro el material de manera que se convierte en un hilo y se rompe cuando el hilo no posee sección transversal es un ensayo normal, pero si llega a tener contacto con el fondo de baño o con la superficie, además que se una con otro hilo, este no es considerado como ensayo normal. (ASTM, 2013).

(Ministerio de Obras Publicas y Comunicaciones, 2011) Afirma: “La ductilidad de un material bituminoso es la longitud, medida en cm., a la cual se alarga (elongación) antes de romperse cuando dos extremos de una briqueta, se traccionan a la velocidad y temperatura especificadas”.

Tabla 19: Información general del ensayo de ductilidad.

Datos	Valores
Temperatura de ensayo (°C)	25,00
Aditivo para la densidad del agua	No

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 20: Valores de ductilidad de la muestra convencional.

Molde	1	2	Promedio
Ductilidad	151.25	148.75	150
Ensayo Normal	Si	Si	Normal

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 21: Valores de ductilidad de la muestra agregando PETS.

Molde	1	2	Promedio
Ductilidad	102,8	107,3	105,05
Ensayo Normal	Si	Si	Normal

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 22: Especificación del Ensayo de Ductilidad.

NTE INEN 2515-2010, TABLA 5, GRADO AC-20	Mínimo	100 cm.
RESULTADO A = 110,95 (cm.)	CUMPLE	
RESULTADO B = 105,05 (cm.)	CUMPLE	

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.1.1.6. Punto de Inflamación y Combustión (ASTM D-92).

Se define el punto de inflamación (o de llama) como la temperatura a la que se producen destellos por inflamación de los vapores desprendidos por el material

bituminoso al ser este tratado en las condiciones que se especifican en el ensayo. (ASTM, 2010)

El punto de inflamación indica la temperatura crítica por encima de la cual habrán de tomarse las precauciones adecuadas durante la manipulación y puesta en obra del producto bituminoso de manera de evitar el peligro de incendio, así como para determinar la calidad del solvente y del asfalto. (ASTM, 2010)

El punto de combustión (o de fuego) es la temperatura a la que se produce la combustión de estos vapores, por lo menos durante cinco segundos, en condiciones de ensayo. (ASTM, 2010)

Lo que trata de determinar el ensayo de chispa y llama es encontrar los puntos de inflamación y de combustión esto se debe a que en obra se corren peligros debido a que se puede producir un incendio, es por eso que el punto de inflamación indica la temperatura crítica para saber que se puede generar riesgo en los alrededores. (ASTM, 2010)

Se debe tomar en cuenta que al momento de realizar los ensayos no deben existir corrientes de aire ni movimientos que sean bruscos ya que puede generarse otros datos, además que debe ser un lugar oscuro para que se puede apreciar y distinguir de mejor manera los puntos de inflamación y de combustión. (ASTM, 2010)

Inflamación. - (Salvador & Salvador) afirma: “temperatura a la que se producen los destellos por inflamación de los valores desprendidos por el material bituminoso”.

Combustión. - (Salvador & Salvador) afirma: “temperatura a la que se produce la combustión de estos vapores, por lo menos durante 5 segundos”).

Punto de inflamación y combustión corregido

$$= \text{Punto de inflamación y combustión} + 0.033 * (760 - K)$$

Tabla 23: Valores de inflamación y combustión de la muestra convencional.

Datos	Valores
Punto de inflamación (°C)	291,01
Punto de combustión (°C)	316,1
K: Presión barométrica (mm Hg)	548,3
Punto de inflamación corregido (°C)	298
Punto de combustión corregido (°C)	323

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 24: Valores de inflamación y combustión de la muestra agregando PETS.

Datos	Valores
Punto de inflamación (°C)	273
Punto de combustión (°C)	305
K: Presión barométrica (mm Hg)	548,3
Punto de inflamación corregido (°C)	280
Punto de combustión corregido (°C)	312

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 25: Especificación del Ensayo de inflamación y combustión.

NTE INEN 2515:2010, Tabla 7, Grado AC-20	mínimo	232
Resultado A	Cumple	
Resultado B	Cumple	

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.1.1.7. Viscosidad a 60 °C (ASTM D 2171).

Se realizará el ensayo con un viscosímetro de vacío Cannon, presente en el laboratorio en el cual se utilizará el termómetro adyacente al viscosímetro tipo capilar el cual no debe tener una variación mayor a los 0.02 °C, además de utilizarse dos controladores de tiempo con una precisión de 0.1 seg. (ASTM, 2010)

El factor de calibración se deberá obtener con los bulbos los cuales son de tipo B, C y D, además de dos viscosímetros con tamaño N° 100 y 200 con un rango de viscosidades. Para determinar el valor de la Viscosidad (poises) se debe multiplicar el factor dado en laboratorio con el tiempo de flujo expresado en segundos. Se debe siempre mencionar la temperatura del ensayo y el vacío que se está aplicando, todo esto junto con los resultados que se obtuvieron en el ensayo (Ministerio de Obras Publicas y Comunicaciones, 2011).

$$\text{Viscosidad} = K * \text{tiempo promedio}$$

Tabla 26: Información general del ensayo de Viscosidad al residuo original.

Datos	
Temperatura de ensayo °C	60
Número de Viscosímetro	100
Código de viscosímetro	L 807

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 27: Valores de Viscosidad a 60 °C de la muestra convencional.

Datos	B	C	D
Tiempo de flujo 1 (seg)	75,19	141,15	215,89
Tiempo de flujo 2 (seg)	72,11	143,25	217,64
Tiempo promedio (seg)	73,65	142,20	216,82
K: Factor de calibración (Poises/seg)	3,180	1,601	1,066
Viscosidad (Pa*seg)	234,21	227,66	231,13

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 28: Valores de Viscosidad a 60 °C de la muestra agregando PETS.

Datos	B	C	D
Tiempo de flujo 1 (seg)	72,98	142,11	215,77
Tiempo de flujo 2 (seg)	71,03	140,27	219,23
Tiempo promedio (seg)	72,01	141,19	217,61
K: Factor de calibración (Poises/seg)	3,180	1,601	1,066
Viscosidad (Pa*seg)	228,99	226,04	231,97

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 29: Especificación del Ensayo.

NTE INEN 2515:2010, Tabla 7, Grado AC-20	Mínimo	160	Máximo	240
Resultado A=231	Cumple			
Resultado B=229	Cumple			

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.1.1.8. Viscosidad a 135 °C (ASTM D 2170).

La viscosidad cinemática a 135 °C es fundamental ya que no solo nos ayuda a comparar con la tabla de la norma NTE INEN 2515, también nos ayuda a determinar cómo se va a comportar el material con respecto a la temperatura, con este valor se

garantiza que se den condiciones adecuadas para el asfalto, respecto al transporte y colocación del mismo.

También se utiliza este valor para el cálculo de la temperatura a la que se debe mezclar el asfalto junto con su compactación, analizando con el ensayo de viscosidad absoluta a 60 °C.

Viscosidad Cinemática. - (ASTM, 2010) afirma: " La relación de la viscosidad a la densidad de un líquido. Es una medida de la resistencia al flujo de un líquido bajo gravedad".

Tabla 30: Información general del ensayo de Viscosidad cinemática a 135 °C.

Datos	Valores
Temperatura de ensayo (°C)	135

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 31: Valores de Viscosidad cinemática de la muestra convencional.

Datos	
Viscosidad con viscosímetro rotatorio	380,93
Densidad relativa de la muestra a 25 °C	1,00804
Viscosidad cinemática (mm ² /s)	384

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 32: Valores de Viscosidad cinemática de la muestra agregando PETS.

Datos	
Viscosidad con viscosímetro rotatorio	369,58
Densidad relativa de la muestra a 25 °C	1,00925
Viscosidad cinemática (mm ² /s)	373

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 33: Especificación del Ensayo.

NTE INEN 2515:2010, Tabla 7, Grado AC-20	mínimo	300
Resultado A	Cumple	
Resultado B	Cumple	

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.1.1.9. *Ensayo del Horno de Película Delgada Rodante (ASTM D 2872).*

El ensayo del horno de película delgada rodante o RTFO como son sus siglas en inglés, nos ayuda a evaluar la susceptibilidad al envejecimiento que se da en el asfalto cuando este está siendo mezclado lo que va a afectar su vida útil. Lo que trata de simular es envejecer al asfalto para posteriormente ser utilizado para múltiples ensayos.

Lo que trata de medir el ensayo es la variación de masa que es una medida de volatilidad que se da en el asfalto sea por ganancia o por pérdida respecto a su masa original previo a que este es calentado. Si el resultado es de signo negativo quiere decir que se generó una pérdida de masa mientras que se da un aumento de masa cuando este es de sentido positivo.

Tabla 34: Valores de RTFO mezcla convencional.

Botella	1	2
Masa de botella + asfalto antes (g)	198,275	206,372
Masa de botella + asfalto después (g)	198,325	206,442
Cambio de masa (%)	-0,05	-0,07
Cambio de masa promedio (%)	-0,06	

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 35: Valores de RTFO mezcla agregando PETS.

Botella	1	2
Masa de botella + asfalto antes (g)	188,970	213,838
Masa de botella + asfalto después (g)	189,005	213,863
Cambio de masa (%)	-0,035	-0,025
Cambio de masa promedio (%)	-0,03	

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 36: Especificación del Ensayo RTFO.

NTE INEN 2515:2010, Tabla 7, Grado AC-20 RTFO	máximo	1 %
Resultado A	Cumple	
Resultado B	Cumple	

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.1.1.10. Ensayo de Viscosidad a 60 °C al Residuo Envejecido RTFO (ASTM D 2171).

Este dato proporciona información preliminar del comportamiento del asfalto posterior a la etapa de envejecimiento RTFO. Se mide la viscosidad del asfalto acondicionado RTFO y se compara con el valor inicial de viscosidad absoluta del asfalto en condición original. De esta información se obtiene la razón de viscosidades. Es una forma muy cuantitativa de determinar el envejecimiento del asfalto después del acondicionamiento RTFO, para los asfaltos clasificados por grado de viscosidad se utiliza el valor de 3.0 máximo., como razón de viscosidades.

Con este dato se obtiene información previa del comportamiento que tiene el asfalto antes de la etapa de envejecimiento RTFO. En este ensayo se mide la viscosidad del asfalto acondicionado RTFO para comparar con el valor inicial de viscosidad absoluta del asfalto en condición original. Con el ensayo de viscosidad a 60 °C al residuo envejecido RTFO se obtiene la razón de viscosidades (Ministerio de Obras Publicas y Comunicaciones, 2011).

Se realizará el ensayo con un viscosímetro de vacío Cannon, presente en el laboratorio en el cual se utilizará el termómetro adyacente al viscosímetro tipo capilar el cual no debe tener una variación mayor a los 0.02 °C, además de utilizarse dos controladores de tiempo con una precisión de 0.1 seg.

El factor de calibración se deberá obtener con los bulbos los cuales son de tipo B, C y D, además de dos viscosímetros con tamaño N° 100 y 200 con un rango de viscosidades. Para determinar el valor de la Viscosidad (poises) se debe multiplicar el factor dado en laboratorio con el tiempo de flujo expresado en segundos. Se debe siempre mencionar la temperatura del ensayo y el vacío que se está aplicando, todo esto junto con los resultados que se obtuvieron en el ensayo (Ministerio de Obras Publicas y Comunicaciones, 2011).

$$\text{Viscosidad} = K * \text{tiempo promedio}$$

Tabla 37: Información general del ensayo de Viscosidad a 60 °C RTFO.

Datos	
Temperatura de ensayo °C	60
Numero de Viscosímetro	200
Código de viscosímetro	K 628

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 38: Valores de Viscosidad a 60 °C RTFO de la muestra convencional.

Datos	B	C	D
Tiempo de flujo 1 (seg)	60,190	117,582	168,555
Tiempo de flujo 2 (seg)	64,369	121,056	175,566
Tiempo promedio (seg)	62,279	119,319	172,061
K: Factor de calibración (Poises/seg)	10,82	5,792	3,993
Viscosidad (Pa*seg)	673,864	691,096	687,04

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 39: Valores de Viscosidad a 60 °C RTFO de la muestra convencional.

Datos	B	C	D
Tiempo de flujo 1 (seg)	69,658	129,698	186,896
Tiempo de flujo 2 (seg)	65,456	125,368	182,923
Tiempo promedio (seg)	67,557	127,533	184,914
K: Factor de calibración (Poises/seg)	10,82	5,792	3,993
Viscosidad (Pa*seg)	730,967	738,671	738,362

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 40: Especificación del Ensayo.

NTE INEN 2515:2010, Tabla 7, Grado AC-20	máximo	800
Resultado A=684	Cumple	
Resultado B=736	Cumple	

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.1.1.11. Ensayo de Viscosidad a 135 °C al Residuo Envejecido RTFO (ASTM D 2170).

Viscosidad Cinemática. - (ASTM, 2010) afirma: “ La relación de la viscosidad a la densidad de un líquido. Es una medida de la resistencia al flujo de un líquido bajo gravedad”.

Tabla 41: Información general del ensayo de Viscosidad cinemática a 135 °C al RTFO.

Datos	Valores
Temperatura de ensayo (°C)	135

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 42: Valores de Viscosidad cinemática de la muestra convencional.

Datos	
Viscosidad con viscosímetro rotatorio	592,24
Densidad relativa de la muestra a 25 °C	1,00804
Viscosidad cinemática (mm ² /s)	567

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 43: Valores de Viscosidad cinemática de la muestra agregando PETS.

Datos	
Viscosidad con viscosímetro rotatorio	599,46
Densidad relativa de la muestra a 25 °C	1,00925
Viscosidad cinemática (mm ² /s)	605

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 44: Especificación del Ensayo.

NTE INEN 2515:2010, Tabla 7, Grado AC-20	mínimo	300
Resultado A	Cumple	
Resultado B	Cumple	

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.1.1.12. Ensayo de Penetración de Cemento Asfáltico al Residuo Envejecido RTFO (ASTM -D5).

La penetración, está definida como la consistencia de un material bituminoso y es expresada por la distancia que una aguja standard penetra verticalmente en una muestra

de material en condiciones de peso, tiempo y temperatura conocidas. Si las condiciones del ensayo no son especificadas se entiende que el peso total de la aguja y accesorios, el tiempo y la temperatura son respectivamente 100 gramos; 5 segundos y 25°C. La penetración se indica en centésimas de centímetro. (ASTM D5, 2013) afirma: "Consistencia de un material bituminoso expresado como la distancia en décimas de milímetro que una aguja estándar penetra verticalmente en una muestra del material, bajo condiciones conocidas de carga, tiempo y temperatura".

Tabla 45: Información general del ensayo de penetración.

Datos	Valores
Temperatura de ensayo (°C)	25,00
Carga (g)	100,00
Tiempo de carga (seg.)	5,00

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 46: Valores de penetración RTFO de la muestra convencional.

Punto	1	2	3	4	5	6	Promedio
Penetración (0.1 mm)	43	44	44	40	42	40	42

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 47: Valores de penetración RTFO de la muestra agregando PETS.

Punto	1	2	3	4	5	6	Promedio
Penetración (0.1 mm)	47	42	43	48	44	46	45

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.1.1.13. *Ensayo de Ductilidad de Cemento Asfáltico al Residuo Envejecido RTFO (ASTM D 113-99).*

En el cemento asfáltico es una medida de cuanto puede llegar a estirarse una muestra de asfalto antes de que se rompa en dos el material bituminoso, según la norma ASTM D 113. Al momento del corte se toma la medida en centímetros y esta es la ductilidad de la muestra, a mayor ductilidad mejores propiedades aglomerantes tiene la muestra, sin embargo, si un cemento asfáltico tiene una excesiva ductilidad es susceptible a los cambios de temperatura y fácilmente deformables.

(Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, 2011) Afirma: “La ductilidad de un material bituminoso es la longitud, medida en cm., a la cual se alarga (elongación) antes de romperse cuando dos extremos de una briqueta, se traccionan a la velocidad y temperatura especificadas”.

Tabla 48: Información general del ensayo de ductilidad.

Datos	Valores
Temperatura de ensayo (°C)	25,00
Aditivo para la densidad del agua	No

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 49: Valores de ductilidad RTFO de la muestra convencional.

Molde	1	2	Promedio
Ductilidad	65,25	63,15	64
Ensayo Normal	Si	Si	Normal

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 50: Valores de ductilidad RTFO de la muestra agregando PETS.

Molde	1	2	Promedio
Ductilidad	58.85	53.15	56
Ensayo Normal	Si	Si	Normal

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 51: Especificación del Ensayo de Ductilidad RTFO.

NTE INEN 2515-2010, TABLA 5, GRADO AC-20	Mínimo	50 cm.
RESULTADO A = 64 (cm.)	CUMPLE	
RESULTADO B = 56 (cm.)	CUMPLE	

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.1.1.14. Módulo de Corte Dinámico al Asfalto Original (AASHTO T-315).

Por medio de los componentes del ángulo de fase (δ) y el módulo de corte complejo (G^*) se evalúan las características viscosas y elásticas de los cementos asfálticos que dependen principalmente de la temperatura y frecuencia de carga. A altas temperaturas el asfalto tiene un comportamiento fluido y viscoso mientras que a bajas temperaturas se comporta como sólidos elásticos. Según (AASHTO T 315, 2016) el procedimiento de ensayo consiste en colocar una pequeña muestra de asfalto, previamente preparada en un molde de silicona, entre una placa fija y una oscilante que rota de manera semicircular asemejando un ciclo de oscilación, de acuerdo a las siguientes especificaciones:

- Asfalto original y envejecido en horno RTFO. Se emplean platillos de 25 mm y separación de 1 mm para temperaturas altas: 46°C o más.

- Asfalto con envejecimiento secundario (PAV). Se emplean platillos de 8 mm y separación de 2 mm para temperaturas entre 4°C y 40°C.

Se selecciona la temperatura apropiada de acuerdo a la especificación SuperPave y se realiza el barrido de temperaturas correspondiente.

Los resultados del ensayo DSR (Reómetro de corte dinámico) se relacionan con las fallas comunes en los cementos asfálticos tal como:

Deformación Permanente o Ahuellamiento. - Es causada por elevadas temperaturas en el pavimento y ocurre principalmente en los primeros años de la vida de servicio en presencia de cargas repetitivas de vehículos, por lo que el envejecimiento RTFO es más representativo. La magnitud de las deformaciones permanentes según la norma AASHTO M 320 definió un factor $G^*/\sin(\delta)$ para medir la rigidez del cemento asfáltico y la resistencia a las deformaciones permanentes o ahuellamientos. La especificación tiene un límite máximo para el parámetro de control $G^*/\sin(\delta)$ de 1.0 para el ligante original y de 2.2 para el residuo RTFO considerando una temperatura media de servicio para el cemento asfáltico. (AASHTO T 315, 2016)

Agrietamiento por fatiga. - Es causado por el daño acumulado de un incremento lineal del deterioro del asfalto que se manifiesta por medio de grietas o fisuras. El asfalto a ensayar es aquel que sale del envejecimiento secundario (PAV) que simula el estado más crítico y más representativo a la fatiga con el tiempo. El procedimiento utiliza los factores $G^*/\sin(\delta)$ para analizar la resistencia a la fatiga que presenta la muestra bajo ciertas condiciones de temperatura. La especificación tiene un límite máximo de 5000

kPa para el factor $G^* \sin \delta$ considerando una temperatura media de servicio para el cemento asfáltico procedente del RTFO y PAV. (AASHTO T 315, 2016)

Estos parámetros nos permitirán saber las posibles fallas que tendrá la mezcla con respecto al cemento asfáltico.

Tabla 52: Información general del ensayo DSR al Asfalto Original.

Datos del Equipo	
DSR	
Software	Rheology Advantage Navigator
Versión	5.7.0
Fabricante	TA Instruments 1994 - 2006
Geometría	25 mm. Steel Plate

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 53: Valores del DSR de la muestra de Asfalto Original convencional.

Temperatura (°C)	52	58	64	70	76	82	Resultado
δ (Grados)	78,50	80,09	82,10	84,35	86,15	87,51	64
$G / \sin \delta$ (kPa)	4,5	2,6	1,266	0,6034	0,3044	0,1633	1,266

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

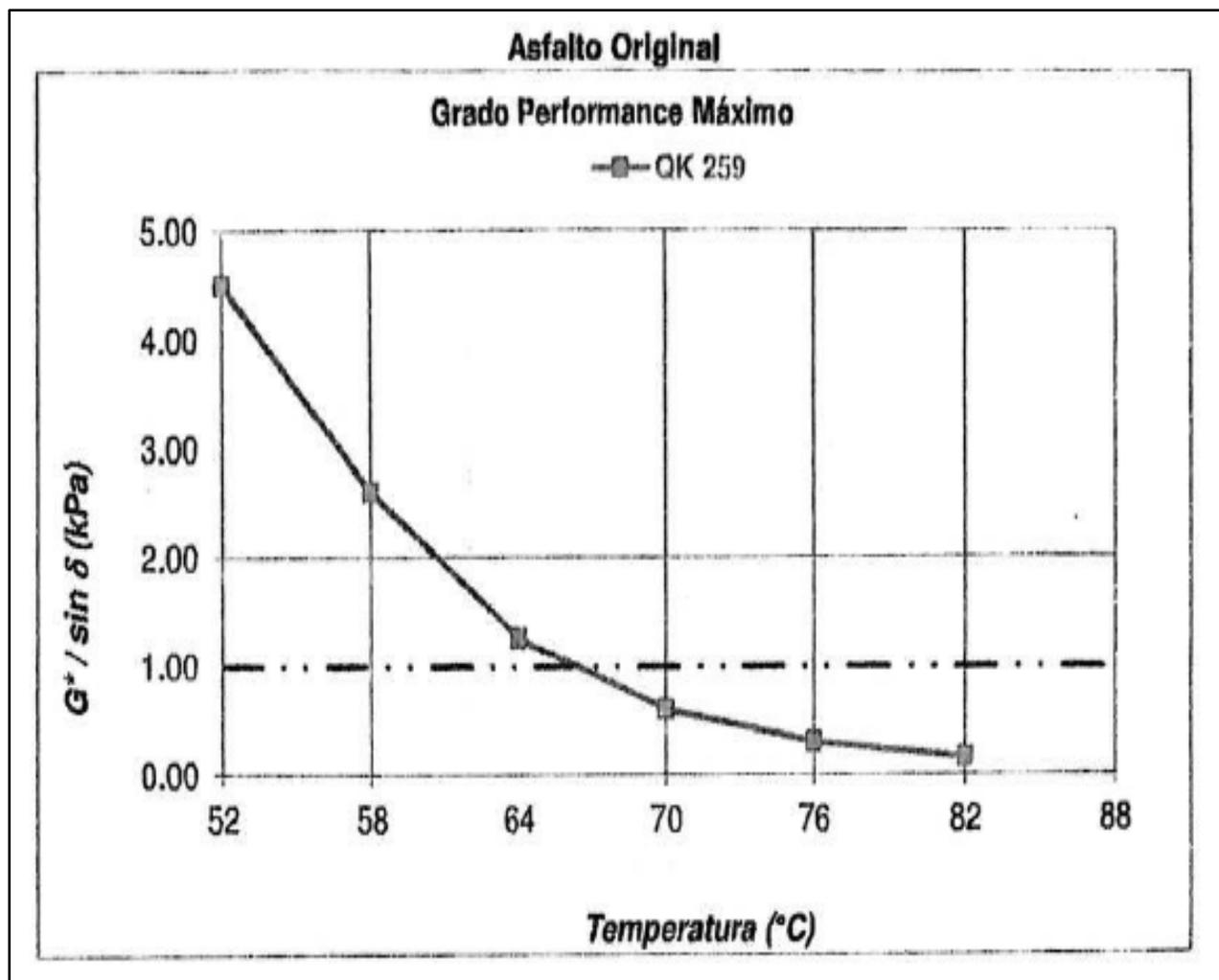


Ilustración 6: Curva Reológica Asfalto Original convencional.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 54: Valores del DSR de la muestra de Asfalto Original agregando PETS.

Temperatura (°C)	76	70	64	Resultado
δ (Grados)	76,41	73,07	70,19	70
$G / \sin \delta$ (kPa)	0,8690	1,6020	2,9980	1,6020

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

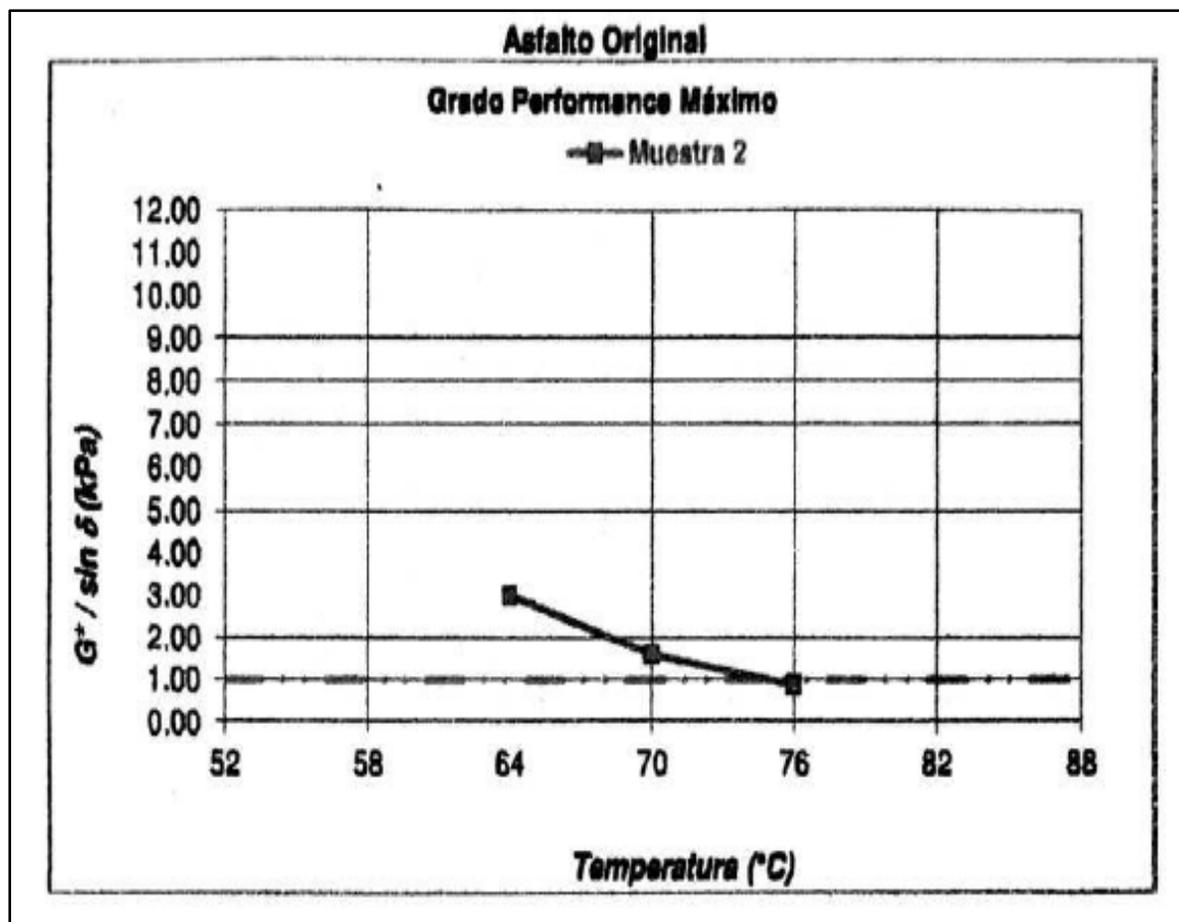


Ilustración 7: Curva Reológica Asfalto Original Agregando PETS.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Especificación Asfalto Original $G' / \sin \delta$ Mínimo 1.0 kPa.

3.1.1.15. Módulo de Corte Dinámico al Asfalto a RTFO (AASHTO T-315).

Tabla 55: Información general del ensayo DSR al Asfalto Original.

Datos del Equipo	
DSR	
Software	Rheology Advantage Navigator
Versión	5.7.0
Fabricante	TA Instruments 1994 - 2006
Geometría	25 mm. Steel Plate

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 56: Valores del DSR de la muestra de Asfalto RTFO convencional.

Temperatura (°C)	52	58	64	70	76	82	Resultado
δ (Grados)	66,46	70,20	73,97	77,47	80,50	82,91	64
$G' / \sin \delta$ (kPa)	19,470	8,663	3,963	1,878	0,915	0,469	3,963

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

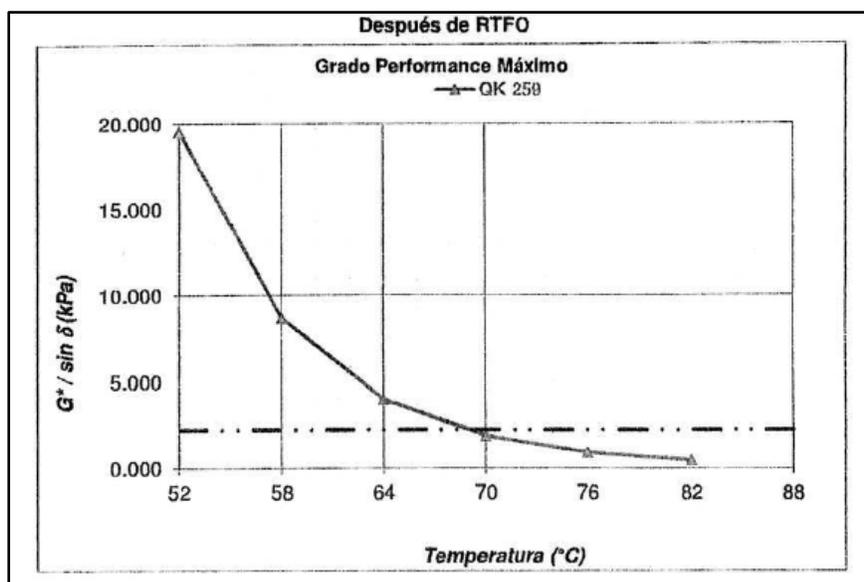


Ilustración 8: Curva Reológica Asfalto Después RTFO convencional.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 57: Valores del DSR de la muestra de Asfalto RTFO agregando PETS.

Temperatura (°C)	82	76	70	64	Resultado
δ (Grados)	66,21	64,87	62,54	61,09	70
$G' / \sin \delta$ (kPa)	1,890	3,366	5,998	10,668	5,998

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

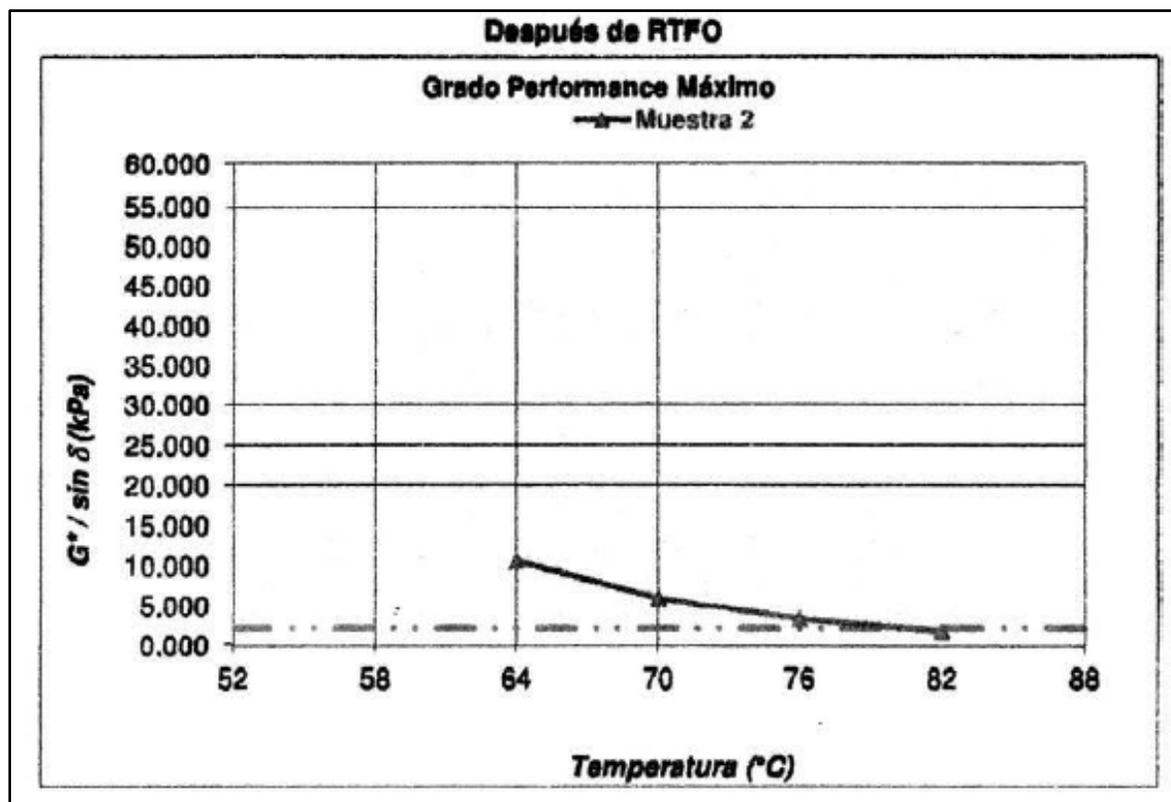


Ilustración 9: Curva Reológica Asfalto Después RTFO Agregando PETS.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Especificación Asfalto Original $G' / \sin \delta$ Mínimo 2.2 kPa

3.1.1.16. Módulo de Corte Dinámico PAV (AASHTO T-315).

Cámara de envejecimiento a presión (PAV).- El equipo PAV utiliza la temperatura y la presión para simular en un tiempo relativamente pequeño el envejecimiento que sufrirá el asfalto durante un largo tiempo de servicio. (7 a 10 años).

El procedimiento según la norma ASTM 6521 se realiza luego que los ligantes asfálticos hayan pasado el envejecimiento primario ya descrito, ensayándolos durante 20 horas en la cámara PAV. Posteriormente se miden las propiedades físicas para estimar el comportamiento del asfalto.

Este parámetro nos ayuda a contemplar en la situación crítica de servicio como se comportará la mezcla asfáltica, es de vital importancia tener este parámetro, previo al diseño de la mezcla para saber la posible falla con relación al envejecimiento que esta sufrirá.

Tabla 58: Información general del ensayo PAV al Asfalto Envejecido.

Datos del Equipo	
PAV	
Software	Rheology Advantage Navigator
Versión	5.7.0
Fabricante	TA Instruments 1994 - 2006
Geometría	8 mm. Steel Plate

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 59: Valores del PAV de la muestra de Asfalto Envejecido convencional.

Temperatura (°C)	31	28	25	22	19	16	Resultado
δ (Grados)	45,65	43,78	41,95	40,12	38,62	36,50	22
$G' / \sin \delta$ (kPa)	884,5	1311	1922	2750	3863	5370	2750

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

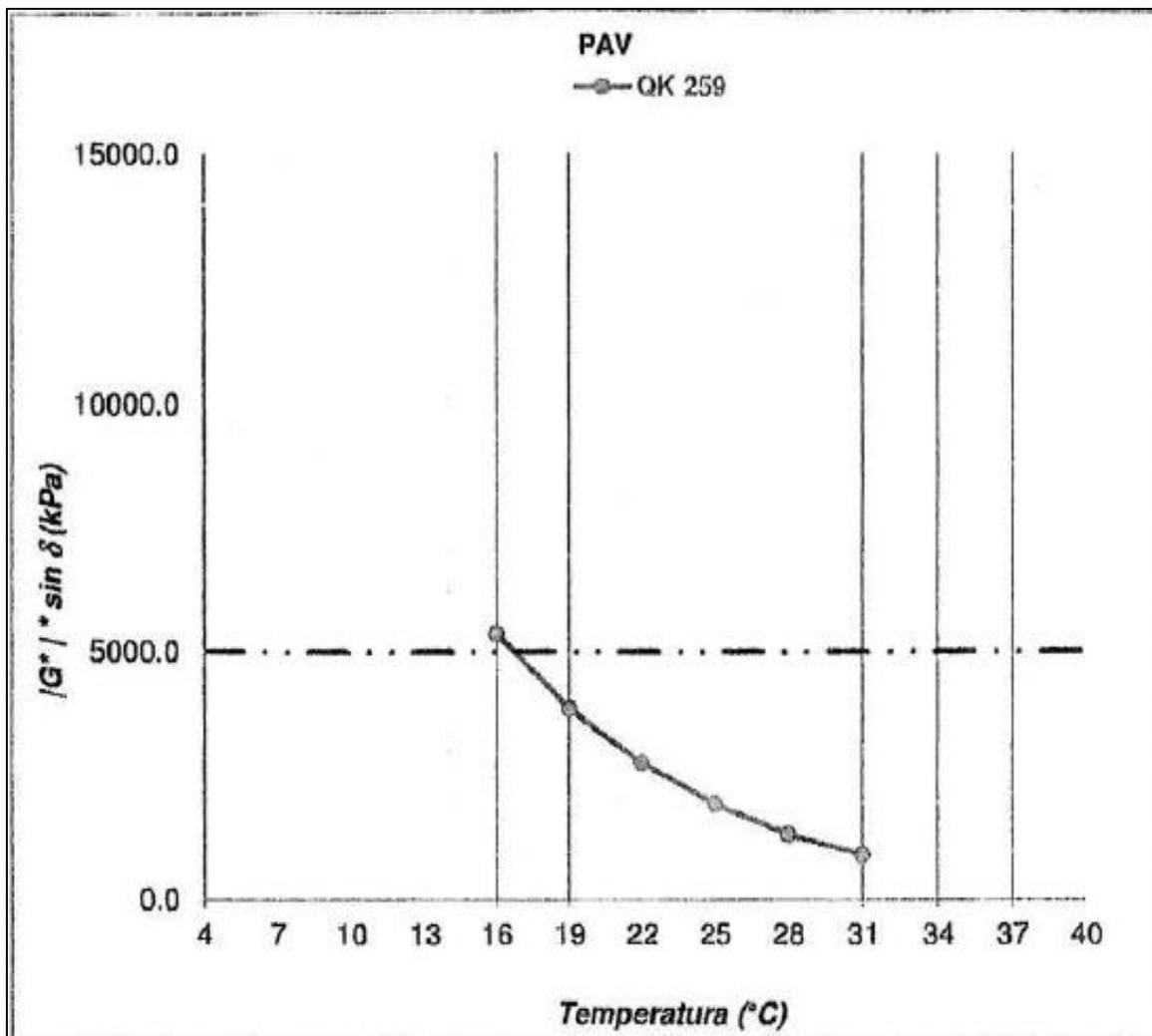


Ilustración 10: Curva Reológica PAV al Asfalto Envejecido convencional.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 60: Valores del PAV de la muestra de Asfalto Envejecido agregando PETS.

Temperatura (°C)	34	31	28	25	Resultado
δ (Grados)	40,40	39,00	37,60	36,27	28
$G' / \sin \delta$ (kPa)	668	931	1315	1828	1315

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

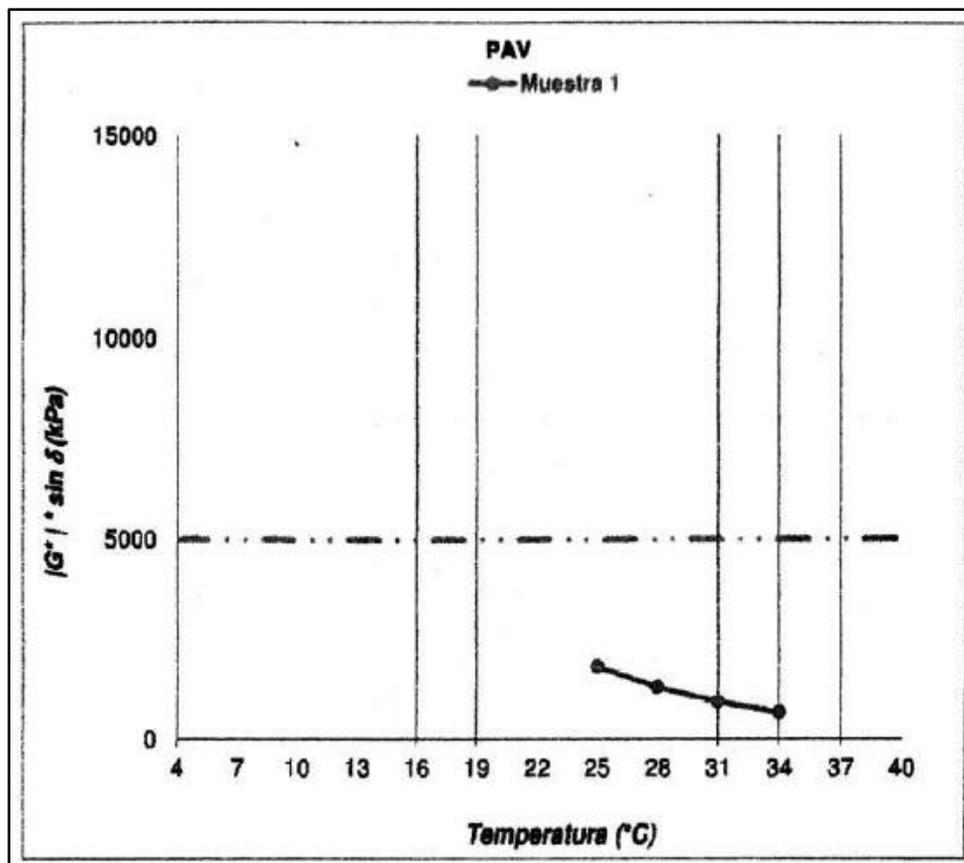


Ilustración 11: Curva Reológica PAV al Asfalto Envejecido agregando PETS.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Especificación PAV Asfalto Envejecido $G' / \sin \delta$ Máximo 5000 kPa.

3.1.1.17. Rigidez al Desplazamiento Ensayo BBR (AASHTO T-313).

Reómetro de viga a flexión (BBR). - Este equipo determina la rigidez de fluencia del ligante asfáltico a la deformación o flexión, bajo la aplicación de una carga constante en un ambiente de baja temperatura.

De acuerdo a la norma (AASHTO T 315, 2016) el procedimiento parte inicialmente de la preparación del molde de la viga cuyas medidas y lubricación se encuentran ya establecidas, en la que se vierte el cemento asfáltico procedente del PAV, procurando no dejar ningún vacío y sus esquinas bien definidas para que no afecten a su geometría.

Una vez realizada la muestra, se la deja reposar a temperatura ambiente durante 60 ± 5 minutos, posteriormente se enrasa la superficie excedente y se la coloca dentro del BBR sin ensayar para bajar su temperatura a la del ensayo. Transcurridos 60 ± 5 minutos se procede a realizar el ensayo en el equipo bajo las temperaturas establecidas.

Tabla 61: Información general del ensayo BBR al Asfalto.

Datos del Equipo	
BBR	
Software	BBRw 1.23
Versión	BBR Software versión 1.23
Fabricante	1999 – 2003 Cannon® Instrument Company, USA

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 62: Valores del BBR de la muestra de Asfalto Envejecido convencional.

NÚMERO DE VIGAS	1	2	1	2	Diferencia	Resultado
Temperatura (PG)	-28		-22			-28
Temperatura (°C)	-18		-12			-18
m-value	0,306	0,304	0,339	0,341	0,002	0,305
Stiffness (kPa)	190	183	87	89	7	186,5

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 63: Valores del BBR de la muestra de Asfalto Envejecido Agregando PETS.

NÚMERO DE VIGAS	1	2	1	2	Diferencia	Resultado
Temperatura (PG)	-28		-22			-22
Temperatura (°C)	-18		-12			-12
m-value	0,280	0,281	0,309	0,306	0,003	0,308
Stiffness (kPa)	167	166	85	85.04	0,4	85

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Especificaciones:

m-value Mínimo 0,300

Stiffness Máximo 300 kPa

3.1.1.18. Grado SUPERPAVE (AASHTO M-320).

El sistema de clasificación PG recogido en la normativa NTE INEN 3030 analiza al cemento asfáltico en las tres etapas características a las que será expuesto:

- Betunes en estado original: Previo a cualquier proceso de mezclado.

- Betunes envejecidos en RTFO: A semeja la exposición que sufre el asfalto durante los procesos de mezclado, transporte y puesta en obra de la mezcla.
- Betunes envejecidos en PAV: Envejecimiento durante un largo período de tiempo en servicio. La muestra a ensayar en PAV proviene del RTFO.

GRADO LIGANTE	PG 70						PG 76					PG 82				
	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-10	-16	-22	-28	-34
Temperatura máxima de diseño del pavimento, promedio de 7 días, °C (a)	< 70						< 76					< 82				
Temperatura mínima de diseño del pavimento, °C (a)	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34
ASFALTO ORIGINAL																
Temperatura Flash Point, T48; Mínima °C	230															
Viscosidad, ASTM D4402; (b) Máximo 3 Pa*s, Temperatura de ensayo, °C	135															
Corte Dinámico, TP5; (c) G*/sen (δ) Mínimo: 1.00 kPa, Temperatura de ensayo a 10 rad/s, °C	70						76					82				
HORNO DE PELÍCULA DELGADA ROTATORIA																
Pérdida de masa, Máxima, %	1.00															
Corte Dinámico, TP5; G*/sen (δ) Mínimo: 2.20 kPa, Temperatura de ensayo a 10 rad/s, °C	70						76					82				
ENVEJECIMIENTO EN RECIPIENTE PRESURIZADO																
Temperatura de Envejecimiento en PAV, °C (d)	100 (110)						100 (110)					100 (110)				
Corte Dinámico, TP5; G*/sen (δ) Máximo: 5000 kPa, Temperatura de ensayo a 10 rad/s, °C	34	31	28	28	22	19	37	34	31	28	25	40	37	34	31	28
ENVEJECIMIENTO EN RECIPIENTE PRESURIZADO																
Endurecimiento Físico (e)	INFORMAR															
Módulo de Rigidez, TP1; (f) S máximo: 300 MPa; valor mínimo de m: 0.300 Temperatura de ensayo a 60 s, °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24
Tracción directa, TP3; (f) Deformación de Rotura mínima: 1% temperatura de ensayo a 1.0 mm/min, °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24

Ilustración 12: Clasificación por Grado de Desempeño.

Fuente: (AASHTO T 315, 2016)

Las clasificaciones comprenden:

- Clasificación a altas temperaturas utilizando el parámetro $G^*/\text{sen}(\delta)$ obtenido con el equipo DSR (reómetro de corte directo) en muestras con el envejecimiento primario (RTFO). Dicho parámetro está asociado con el ahuellamiento.

- Control a temperaturas intermedias utilizando el parámetro G^* sen (δ) obtenido con el equipo DSR en muestras con el envejecimiento secundario (PAV). Dicho parámetro está asociado con la fatiga.
- Clasificación a bajas temperaturas utilizando los resultados del BBR (reómetro de viga en flexión) en muestra con envejecimiento secundario (PAV). Dicho parámetro está asociado con el agrietamiento a bajas temperaturas.

GRADO LIGANTE	PG 46			PG 52						PG 58				PG 64							
	-34	-40	-46	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-46	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40
Temperatura mínima de diseño del pavimento, promedio de 7 días, °C (a)	-46			-52						-58				-64							
Temperatura mínima de diseño del pavimento, °C (a)	> -34	> -40	> -46	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40	> -46	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40
ASFALTO ORIGINAL																					
Temperatura Flash Point, T48; Mínima °C	230																				
Viscosidad, ASTM D4402; (b) Máximo 3 Pa·s, Temperatura de ensayo, °C	135																				
Corte Dinámico, TP3; (c) G^* sen (δ) Mínimo: 1.00 kPa, Temperatura de ensayo a 10 rad/s, °C	46			52						58				64							
BORNO DE PELÍCULA DELGADA ROTATORIA																					
Perdida de masa, Máximo, %	1.00																				
Corte Dinámico, TP3; G^* sen (δ) Mínimo: 2.20 kPa, Temperatura de ensayo a 10 rad/s, °C	46			52						58				64							
ENVEJECIMIENTO EN RECIPIENTE PRESURIZADO																					
Temperatura de Envejecimiento en PAV, °C (d)	90			100						100				100							
Corte Dinámico, TP3; G^* sen (δ) Mínimo: 5000 kPa, Temperatura de ensayo a 10 rad/s, °C	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16
Endurecimiento Físico (e)	INFORMAR																				
Módulo de Rigidez, TP1; (f) S mínimo: 300 MPa; valor mínimo de m: 0.300 Temperatura de ensayo a 60 s, °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30
Tracción directa, TP3; (f) Deformación de Rotura mínima: 1% temperatura de ensayo a 1.0 mm/min, °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30

Ilustración 13: Clasificación por Grado de Desempeño.

Fuente: (AASHTO T 315, 2016)

Según los ensayos realizados de DSR, PAV y BBR tanto en las muestras originales como al RTFO, se puede emplear las tablas arriba indicadas para evaluar y clasificar el

tipo de asfalto por su Grado de Desempeño (PG) en la mezcla convencional y en la mezcla agregando PETS.

Tabla 64: Resumen ensayos Reológicos convencional.

Ensayo	Variable	Especif	Resultado	Temp (°C)
Asfalto Original	$|G^*| / \sin \delta$	min 1.0 kPa	1.266	64
RTFOT	$|G^*| / \sin \delta$	min 2.2 kPa	3.963	64
Cambio de masa	%	max 1.0	-0.06%	
PAV	$|G^*| \sin \delta$	max 5000 kPa	2750	22
BBR	m-value	min 0.300	0.305	-18
	Stifness	max 300 kPa	187	-18

CHOVA

PG 64 -28

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 65: Resumen ensayos Reológicos de Asfalto agregando PETS.

Ensayo	Variable	Especif	Resultado	Temp (°C)
Asfalto Original	$|G^*| / \sin \delta$	min 1.0 kPa	1.820	70
RTFOT	$|G^*| / \sin \delta$	min 2.2 kPa	5.695	70
Cambio de masa	%	max 1.0	-0.57%	
PAV	$|G^*| \sin \delta$	max 5000 kPa	1315	28
BBR	m-value	min 0.300	0.312	-12
	Stifness	max 300 kPa	85	-12

Asfalto modificado

PG 70 -22

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.1.2. Ensayos de Caracterización a los Agregados.

Los agregados que forman una mezcla asfáltica deben cumplir ciertas especificaciones para que la mezcla asfáltica presente una alta calidad durante toda su vida útil. Por lo tanto, para comprobar que los agregados pétreos que conforman la mezcla asfáltica presenten características físicas y químicas necesarias para garantizar la durabilidad y resistencia en la estructura de pavimento, se debe realizar varios ensayos en laboratorio, los mismos que son especificados en diferentes normas de la construcción.

Para la producción de la mezcla asfáltica se utilizarán los materiales triturados de la Mina "Tucho", ubicada en el cantón Playas, en la provincia de Guayas, los mismos que han sido sometidos a procesos de trituración obteniendo tres fracciones, que mezclados en las proporciones de diseño den como resultado una carpeta asfáltica de tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ ". De donde se extrajo un lote de muestras suficiente para la ejecución de los ensayos de esta tesis.

Se realizará los ensayos correspondientes al material pétreo a utilizar en el diseño de la mezcla; debido a que la implementación de PETS se la realiza en caliente al cemento asfáltico, se realizará solo las pruebas a una muestra de agregados pétreos, con el fin de comprobar si cumple con los parámetros establecidos por la norma MOP - 001-F 2002.

En el diseño del pavimento se ha considerado la aplicación de tres capas asfálticas de 7,5 cm. Para evitar el arrastre y segregación de los agregados al momento del tendido de la mezcla asfáltica se ha tomado en cuenta la recomendación del instituto del asfalto

de que el tamaño máximo del agregado sea de la mitad a la tercera parte del espesor de la capa a aplicar; por lo tanto, el tamaño máximo a utilizar será de una pulgada (25 mm), en las tres capas.

Tabla 66: Constitución del material pétreo.

Fracción	Tamaño
1 Gruesa	Pasante de 1" Retenido en ½"
2 Intermedia	Pasante de ½" Retenido en ¼"
3 Fina	Pasante de ¼" Arena
4 Filler Mineral	Cal

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

A continuación, se presenta un cuadro resumen de los ensayos elaborados en el control de calidad del material pétreo, tanto a la fracción gruesa como la fina; además de los ensayos a la fracción mineral con sus correspondientes especificaciones técnica:

Tabla 67: Características Físicas y Mecánicas del material pétreo.

Ensayo	Unidad	Norma	Especificación
Equivalente de arena	(%)	ASTM D 2419	50% mínimo
Desgaste en la máquina de los Ángeles	(%)	INEN 860	40% máximo
Durabilidad a los sulfatos agregado fino	(%)	INEN 863	18% máximo
Durabilidad a los sulfatos agregado grueso	(%)	INEN 863	18% máximo
Índice de plasticidad	(%)	INEN 691 INEN 692	4% máximo
Partículas alargadas y planas	(%)	ASTM D 4791	10% máximo
Partículas con una cara fracturada	(%)	ASTM D 5821	80% mínimo
Partículas con dos caras fracturadas	(%)	ASTM D 5821	85% mínimo
Porcentaje de vacíos en agregados pasante del tamiz No. 8	(%)	ASTM C 1252	45% mínimo
Deletéreos agregado fino	(%)	INEN 698	1% máximo
Deletéreos agregados gruesos	(%)	INEN 698	1% máximo

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.1.2.1. Granulometría (ASTM D 422).

La granulometría es un indicador de la distribución de las partículas de los agregados por un análisis de tamices compuestos por una malla de alambre que tienen aberturas cuadradas, el tamaño de las aberturas varía de acuerdo al tamaño de los agregados.

El ensayo consiste en colocar el agregado en la serie de tamices representados en la tabla 3.24. Inmediatamente realizar movimientos circulares para garantizar que todas las partículas pasen por cada uno de los tamices. Es importante que antes del ensayo se haga un cuarteo de los agregados es decir colocar la muestra en un separador para obtener una muestra que abarque la mayor parte de las partículas. Los resultados del ensayo se expresan como porcentaje acumulado de la cantidad de material que pasa en cada uno de los tamices utilizados (Maila, 2013).

Tabla 68: Mallas Granulométricas.

Características Granulométricas			
Agregado Grueso		Agregado Fino	
Número	Dimensión (mm)	Número	Dimensión (mm)
3"	75	No. 8	2,36
2"	50	No. 16	1,18
1 1/2"	37,5	No. 30	0,60
1"	25	No. 50	0,30
3/4"	19	No. 100	0,150
1/2"	12,5	No. 200	0,075
3/8"	9,5		
No. 4	4,75		

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Se considera que los agregados gruesos se dividen en tres grupos de acuerdo a su granulometría:

- Agregados tipo A: son aquellos materiales donde sus partículas se caracterizan por ser trituradas y están formadas por piedra, grava, arena, etc.
- Agregados tipo B: materiales donde el 50% de las partículas que forman el agregado grueso están formadas por materiales triturados y los demás materiales son obtenidos de depósitos naturales.
- Agregados tipo C: aquellos materiales donde las partículas provienen de depósitos naturales o por trituración según las disponibilidades de la zona.

Para obtener el tipo de agregado se compara la granulometría obtenida de los agregados gruesos, con los siguientes requerimientos que se especifican en la MOP-001F-2002.

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través los tamices de malla cuadrada		
	A	B	C
2" (50.8 mm.)	100	—	—
1 1/2" (38.1 mm.)	90 - 100	100	—
1" (25.4 mm.)	—	90 - 100	100
3/4" (19.0 mm.)	56 - 80	—	90 - 100
1/2" (12.5 mm.)	—	56 - 80	—
3/8" (9.5 mm.)	—	—	56 - 80
Nº 4 (4.75 mm.)	23 - 53	29 - 59	35 - 65
Nº 8 (2.36 mm.)	15 - 41	19 - 45	23 - 49
Nº 50 (0.30 mm.)	4 - 16	5 - 17	5 - 19
Nº 200 (0.075 mm.)	0 - 6	1 - 7	2 - 8

Ilustración 14: Especificaciones de granulometría para agregado grueso.

Fuente: (MOP - 001-F , 2002)

3.1.2.1.1. Granulometría del Agregado Grueso 1”.

Tabla 69: Granulométrica del material Grueso 1”.

Granulometría Agregado Grueso					
Malla	Abertura (mm)	Peso retenido parcial (g)	Peso retenido acumulado (g)	% de peso retenido acumulado	% de peso pasante acumulado
3”	75,00	-	-	-	-
2 ½”	63,00	-	-	-	-
2”	50,00	-	-	-	-
1 ½”	37,50	0,00	0,00	0,00	100,00
1”	25,00	0,00	0,00	0,00	100,00
¾”	19,00	780,00	780,00	15,70	84,30
½”	12,50	2547,00	3327,00	67,00	33,00
⅜”	9,50	1516,00	4843,00	97,50	2,50
No.4	4,75	95,00	4938,00	99,40	0,60
No.8	2,36	-	-	-	-
No. 10	2,00	-	-	-	-
No.16	1,18	-	-	-	-
No.30	0,60	-	-	-	-
No. 40	0,425	-	-	-	-
No.50	0,297	-	-	-	-
No.100	0,15	-	-	-	-
No.200	0,075	-	-	-	-
<No. 200	0	-	-	-	-
Masa inicial		4968,00			

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

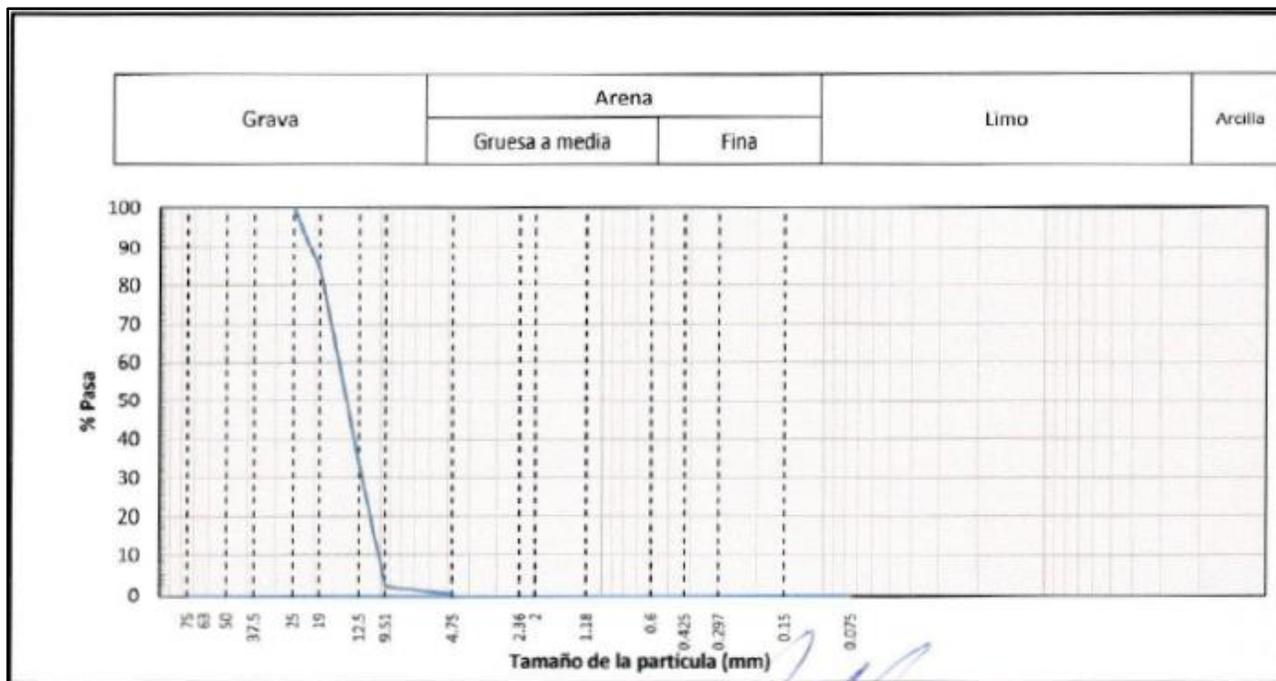


Ilustración 15: Curva Granulométrica Agregado Grueso 1”.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Según la clasificación; el agregado grueso es de tipo B, esta se la realiza para determinar el tipo de ensayo que se le realizara en la prueba de Abrasión de los Ángeles y para tener una idea del tipo de material a utilizar. A continuación, se realiza una breve descripción al mismo de acuerdo a su clasificación:

Agregados tipo B: materiales donde el 50% de las partículas que forman el agregado grueso están formadas por materiales triturados y los demás materiales son obtenidos de depósitos naturales.

3.1.2.1.2. Granulometría del Agregado Intermedio ½”.

Tabla 70: Granulométrica del material Intermedio ½”.

Granulometría Agregado Intermedio					
Malla	Abertura (mm)	Peso retenido parcial (g)	Peso retenido acumulado	% de peso retenido acumulado (g)	% de peso pasante acumulado (g)
3”	75,00	-	-	-	-
2 ½”	63,00	-	-	-	-
2”	50,00	-	-	-	-
1 ½”	37,50	-	-	-	-
1”	25,00	-	-	-	-
¾”	19,00	-	-	-	-
½”	12,50	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8”	9,50	399,00	399,00	12,40	88,00
No.4	4,75	2735,00	3134,00	97,20	3,00
No.8	2,36	90,00	3224,00	100,00	0,00
No. 10	2,00	-	-	-	-
No.16	1,18	-	-	-	-
No.30	0,60	-	-	-	-
No. 40	0,425	-	-	-	-
No.50	0,297	-	-	-	-
No.100	0,15	-	-	-	-
No.200	0,075	-	-	-	-
<No. 200	0	-	-	-	-
Masa inicial		3224,00			

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

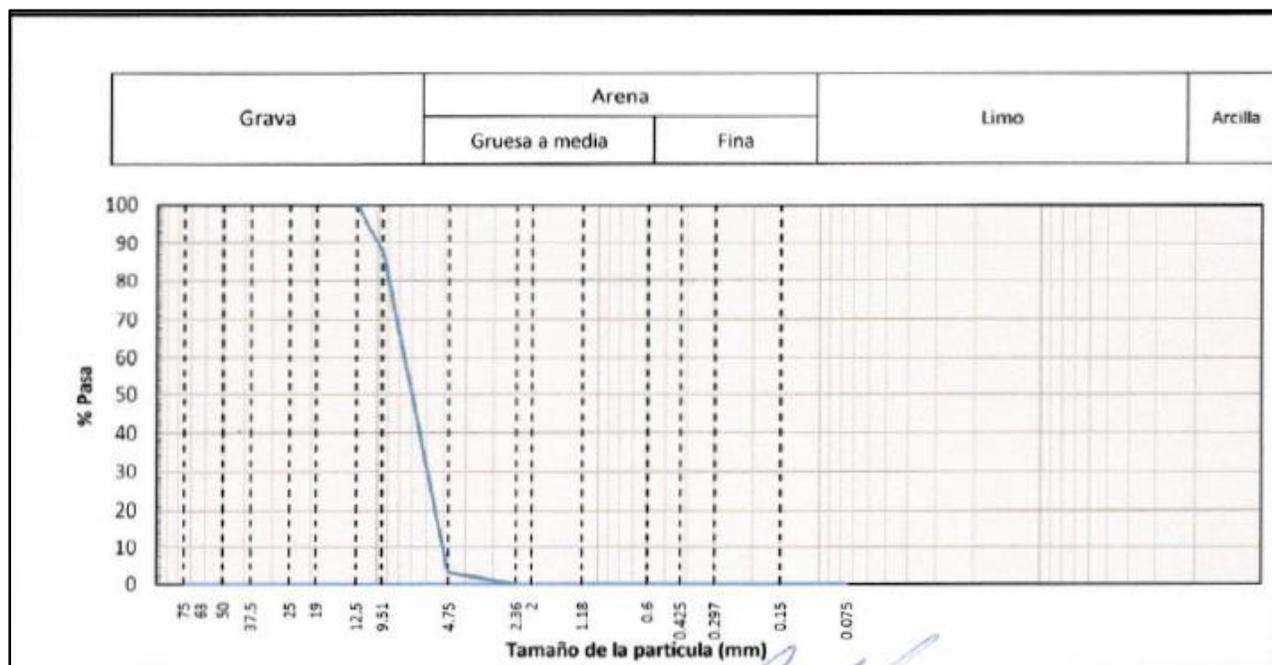


Ilustración 16: Curva Granulométrica Agregado Intermedio 1/2".

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.1.2.1.3. Granulometría del Agregado Fino 1/4".

Tabla 71: Granulométrica del material Fino 1/4".

Granulometría Agregado Fino					
Malla	Abertura (mm)	Peso retenido parcial (g)	Peso retenido acumulado (g)	% de peso retenido acumulado (g)	% de peso pasante acumulado (g)
3"	75,00	-	-	-	-
2 1/2"	63,00	-	-	-	-
2"	50,00	-	-	-	-
1 1/2"	37,50	-	-	-	-

1"	25,00	-	-	-	-
3/4"	19,00	-	-	-	-
1/2"	12,50	-	-	-	-
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00
No.4	4,75	31,90	31,90	4,60	95,40
No.8	2,36	180,30	212,20	30,72	69,28
No.16	1,18	91,80	304,00	44,01	55,99
No.30	0,60	71,50	375,50	54,36	45,64
No.50	0,297	109,80	485,30	70,26	29,74
No.100	0,15	87,40	572,80	82,92	17,08
No.200	0,075	52,80	625,60	90,56	9,44
<No. 200	0	65,20	690,80	100,00	0,00
Masa inicial		690,80			

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

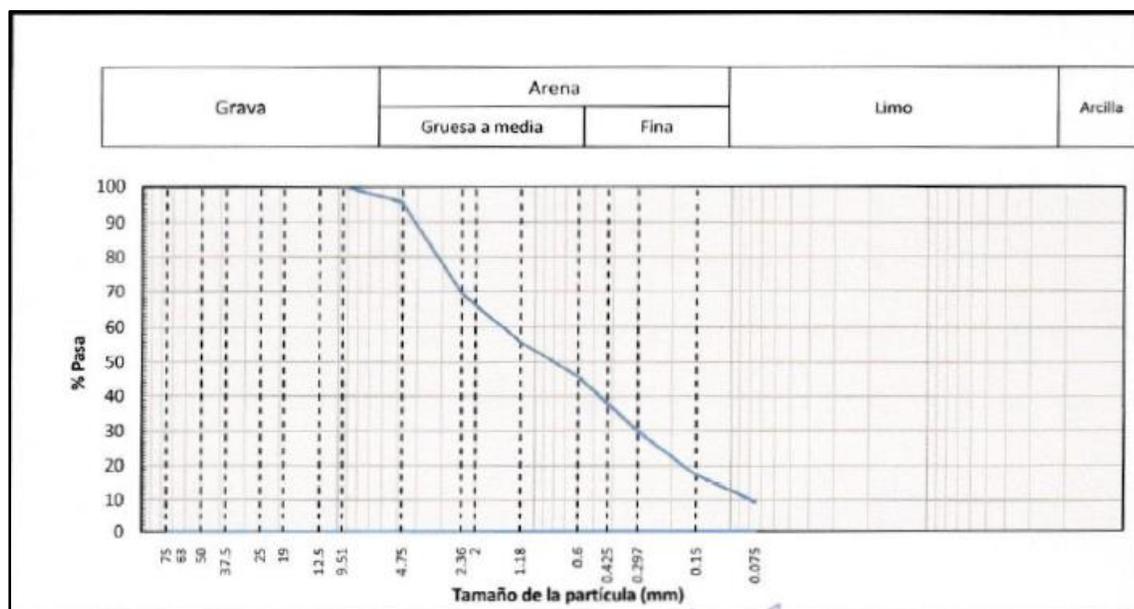


Ilustración 17: Curva Granulométrica Agregado Fino 1/4".

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.1.2.2. Equivalente de Arena (ASTM D 2419).

Como se mencionó anteriormente, el agregado fino está conformado por todo tipo de material por lo tanto este ensayo da como resultado un indicador de las proporciones de limos, arcillas, agregados finos y polvos granulares que existen en materiales que pasan el tamiz No.4 (4.75mm). Sirve principalmente para conocer la cantidad necesaria de agregado fino y sus cambios de calidad y resistencia en la construcción. El proceso consiste en colocar una cantidad de agregado fino con solución floculante en una probeta, esta se la agita y se logra que la arcilla se desprenda de las partículas de arena las mismas que tiempo después se sedimentan y permiten diferenciar una capa de arena sedimentada y una capa de arcilla en suspensión. (MOP - 001-F , 2002)

Un pavimento necesita la menor cantidad de finos posible, sobre todo de arcillas, que son los materiales que en contacto con el agua causan un gran daño al pavimento, pues es necesario saber si la cantidad de fino que contienen los materiales que serán utilizados en la estructura del pavimento es la adecuada. (MOP - 001-F , 2002)

Este ensayo tiene por objeto determinar la proporción relativa del contenido de polvo fino o material arcilloso perjudicial que contienen los suelos o agregados. Es un procedimiento que se utiliza en el campo para una rápida determinación de esta proporcionalidad. (MOP - 001-F , 2002).

Utiliza la siguiente fórmula para determinar el equivalente de arena según la normativa:

$$EA(\%) = \frac{Na}{Nt} * 100$$

Dónde:

EA (%)= Equivalente de Arena dado en porcentaje.

Na (pulgadas)= Lectura de Arena en pulgadas.

Nt (pulgadas)= Lectura de Arcilla en pulgadas.

Cabe recalcar que la agitación realizada es mecánica.

Tabla 72: Ensayo Equivalente de Arena.

Muestra No.	Lectura de Arcilla (Nt) pulgadas	Lectura de Arena (Na) pulgadas	Equivalente de Arena (EA) %
1	5.70	3.70	65
2	5.70	3.60	65
3	5.70	3.70	69
Promedio			66

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.1.2.3. *Desgaste en la Máquina De Los Ángeles (INEN 860).*

Este ensayo consiste en medir la resistencia al desgaste de los agregados gruesos empleando la máquina de los ángeles. El ensayo de abrasión de los agregados gruesos es importante realizarlo ya que está relacionada con la resistencia y durabilidad de las estructuras. Su proceso consiste en colocar la muestra de agregado grueso en un tambor giratorio las cuales miden su porcentaje de desgaste mediante unas bolas de acero que giran dentro del tambor a 500 revoluciones. (MOP - 001-F , 2002).

El número de bolas de acero y la cantidad de muestra que se coloca en el tambor giratorio dependerá del tipo de agregado. Una vez que hayan pasado las 500 revoluciones se tamiza en el mismo tamiz donde se retuvo el material inicial y se pesa para así obtener el porcentaje de desgaste de la muestra. Las normas ASTM especifican que el agregado grueso deberá tener un desgaste menor del 40% para que sea un material adecuado para las mezclas asfálticas. (MOP - 001-F , 2002).

Tabla 73: Ensayo Desgaste en la Máquina de los Ángeles al material grueso.

Resultados	
Gradación Tipo	B
Masa Inicial (gramos)	5000.90
Retenido Tamiz No. 12 después de 500 revoluciones (gramos)	3776.00
Perdida de las 500 revoluciones (gramos)	1224.90
% Perdida de las 500 revoluciones	24.49

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 74: Especificaciones del Ensayo de abrasión de los Ángeles.

MOP-001F-2002 Sección 811. Agregados para hormigón asfáltico.	máximo 40%
Resultado para piedra caliza	Cumple
Resultado para el agregado grueso	Cumple

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.1.2.4. Durabilidad a los Sulfatos: Agregados Fino y Grueso (INEN 863).

El ataque de los sulfatos es uno de los mayores problemas que afectan a cualquier tipo de estructura y es una de las más peligrosas porque afecta directamente a la

resistencia del material. Los sulfatos se encuentran principalmente en el suelo, en el agua o en diferentes desechos industriales, por lo tanto, es importante asegurar un material que sea capaz de resistirlo. Por lo tanto, se realiza ensayos en laboratorio para simular la afectación que tendría este componente en los agregados de una muestra asfáltica. (Ministerio de Obras Publicas y Comunicaciones, 2002)

El ensayo consiste en separar mediante recipientes varios tamaños de material que ha pasado por los tamices analizados y han sido lavados, secados y pesados previamente. Una vez que el material se ha separado en varias fracciones, se introduce una solución de sulfato en todas las muestras que cubran todo el material de los recipientes. Posteriormente se hace un lavado de las muestras para quitar el sulfato y se le seca. Después se pasa por los tamices iniciales y se pesa con el fin de relacionar el peso de las muestras originales y el peso una vez realizado el ensayo. (MOP - 001-F , 2002).

Para el agregad fino se lava bien sobre el tamiz de No. 50; se seca hasta masa constante, a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ y se separa en las diferentes fracciones por medio de un tamizado realizado de la siguiente manera: se efectúa primero una separación aproximada, por medio de la serie de los tamices indicados en la tabla siguiente de cada una de las fracciones obtenidas de esta forma se separa la suficiente cantidad de muestra para poder obtener 100 gramos, después de tamizar sobre el correspondiente tamiz hasta el rechazo. Las partículas de agregado fino que quedan atrapadas en la malla del tamiz, no se emplean en la preparación de la muestra. Las

muestras de 100 gramos, de cada una de las fracciones, después del tamizado final, se pesan y colocan por separado en los recipientes para ensayo. (MOP - 001-F , 2002).

Tabla 75: Fracciones para el ensayo del material fino.

Fracciones	
Pasa Tamiz	Tenido en Tamiz
3/8" (9.5mm)	No. 4 (4.75mm)
No. 4 (4.75mm)	No. 8 (2.36mm)
No. 8 (2.36mm)	No. 16 (1.18mm)
No. 16 (1.18mm)	No. 30 (0.60mm)
No. 30 (0.60mm)	No. 50 (0.30mm)

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Para el agregado grueso se lo lava bien, se seca hasta peso constante, a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ y se separa en las diferentes fracciones indicadas en la tabla siguiente, por tamizado hasta que no pase más material. La cantidad requerida de cada una de estas fracciones, se pesa y se coloca, por separado, en los recipientes para ensayo. En el caso de las fracciones con tamaño superior a 19mm (3/4"), se cuenta también el número de partículas.

Tabla 76: Fracciones para el ensayo del material grueso.

Tamices mm (pulgadas)	Masa en gramos
Material de 37.5mm a 63mm (1 1/2" a 2 1/2") Compuesto de:	5000±300
Material de 37.5mm a 50mm (1 1/2" a 2")	2000±200
Material de 50mm a 63mm (2" a 2 1/2")	3000±300
Material de 19mm a 37.5mm (3/4" a 1 1/2") Compuesto de:	1500±50
Material de 19mm a 25mm (3/4" a 1")	500±30

Material de 25mm a 37.5mm (1" a 1 1/2")	1000±50
Material de 9.5mm a 19mm (3/8" a 3/4")	1000±10
Compuesto de:	
Material de 9.5mm a 12.5mm (3/8" a 1/2")	330±5
Material de 12.5mm a 19mm (1/2" a 3/4")	670±10
Material de 4.75mm a 9.5mm (No. 4 a 3/8")	300±5

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 77: Ensayo de Durabilidad a los Sulfatos en agregados gruesos y finos.

Tamaño de las aberturas del tamiz	Gradación de la muestra original (%)	Masa de las fracciones de ensayo, antes del ensayo (gramos)	Masa de las fracciones de ensayo, después del ensayo (gramos)	Porcentaje que pasa el tamiz designado luego del ensayo (%)	Porcentaje ponderado de pérdida (%)
Ensayo de Desempeño del Agregado Fino					
Menor a 150 µm	19,13	-	-	-	-
De 300µm a 150µm	9.84	-	-	-	-
De 600µm a 300µm	11.19	100.00	93.00	7.00	0.80
De 1.18µm a 600µm	10.80	100.00	89.90	10.10	1.10
De 2.36µm a 1.18µm	13.90	100.00	77.70	22.30	3.10
De 4.75µm a 2.36µm	30.17	100.00	86.90	13.10	4.00
De 9.5µm a 4.75µm	4.97	100.00	78.90	21.10	1.0
Totales	100.00				10.00
Ensayo de Desempeño del Agregado Grueso					
63mm a 50mm	63mm a 37.5mm				
50mm a 37.5mm					
37.5mm a 25mm	37.5mm a 19mm	11.00	505.40	492.20	2.60
25mm a 19mm		505.4 g			
19mm a 12.5mm	19mm a 9.5mm	670.5 g	1004.20	969.60	3.40
12.5mm a 9.5mm		333.7 g			
9.5mm a 4.75mm	9.5mm a 4.75mm	302.1 g	302.10	259.00	14.30
Total		100.00	-	-	7.80

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 78: Especificaciones del ensayo.

MOP-001F-2002 Sección 811. Agregados para hormigón asfáltico.	Máximo	18%
Resultado para agregado fino	Cumple	
Resultado para agregado grueso	Cumple	

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.1.2.5. Índice de Plasticidad (INEN 691 - INEN 692).

El límite plástico de un suelo es el contenido más bajo de agua, determinado por este procedimiento, en el cual el suelo permanece en estado plástico. El índice de plasticidad de un suelo es el tamaño del intervalo de contenido de agua, expresado como un porcentaje de la masa seca del suelo, dentro del cual el material está en un estado plástico. Este índice corresponde a la diferencia numérica entre el límite líquido y el límite plástico del suelo.

Se puede definir el índice de plasticidad (IP) de un suelo como la diferencia entre su límite líquido y su límite plástico.

$$\text{Índice de Plasticidad} = \text{Límite Líquido} - \text{Límite Plástico}$$

Cuando el límite líquido o el límite plástico no se puedan determinar, el índice de plasticidad se informará con la abreviatura NP (No Plástico). Así mismo, cuando el límite plástico resulte igual o mayor que el límite líquido, el índice de plasticidad se informara como NP (No Plástico).

Tabla 79: Límite Líquido INEN 691.

LÍMITE LÍQUIDO (INEN 691)											
Prueba No.	Peso Capsula	Peso Cap + Suelo Húm.	Peso Cap + Suelo Seco	Peso de agua	Peso de suelo seco	% Humedad	% Prom. Humedad	Numero de golpes			
								1	2	3	Prom

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 80: Límite Plástico INEN 692.

LÍMITE PLÁSTICO (INEN 692)							
Prueba No.	Peso Capsula	Peso Cap + Suelo Húm.	Peso Cap + Suelo Seco	Peso de agua	Peso de suelo seco	% Humedad	% Prom. Humedad

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Resumen:

LL (Límite Líquido) =NP

LP (Límite Plástico) =NP

IP (Índice de Plasticidad) =NP

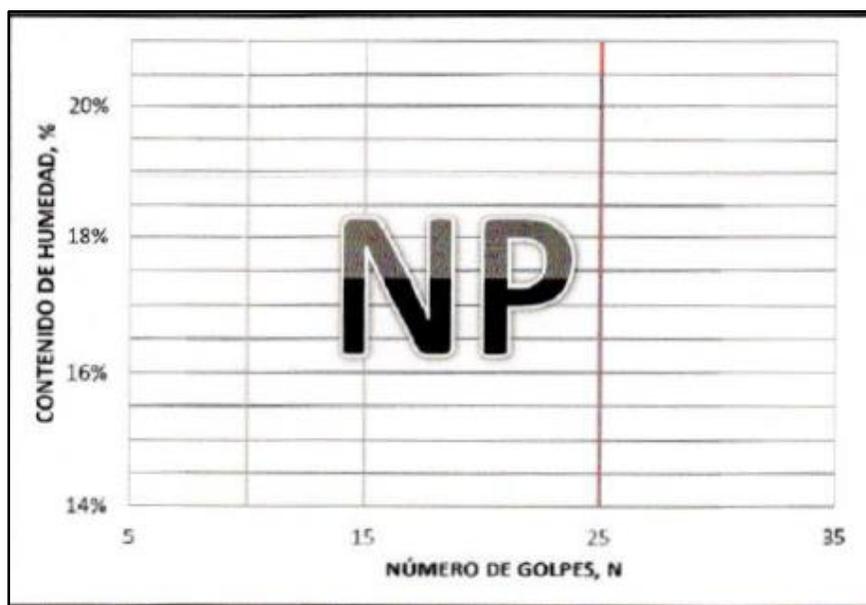


Ilustración 18: Límite Líquido.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

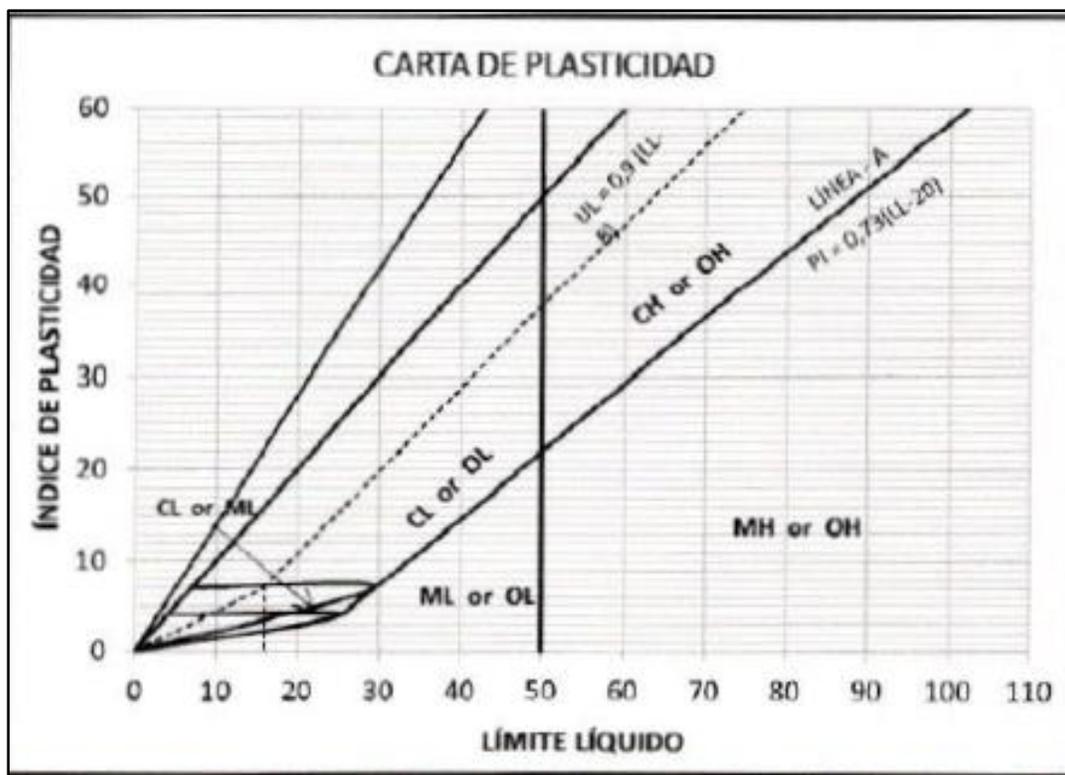


Ilustración 19: Carta de Plasticidad.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.1.2.6. *Partículas Alargadas y Planas (ASTM D 4791).*

Las partículas alargadas y planas en una mezcla asfáltica juegan un papel muy importante en la construcción del pavimento ya que una cantidad considerado de estas partículas puede afectar directamente a la consolidación del material y dificultad en la colocación. Por lo tanto, es necesario determinar el porcentaje de peso de partículas alargadas y planas en relación a su peso total, que se encuentran en los agregados que

se utilizará para la conformación de la mezcla asfáltica. Este ensayo se realiza para materiales retenidos en tamiz No. 4 (4.75mm) en el cual sirve para obtener la partícula del agregado grueso donde la relación entre las dimensiones máximas y mínimas es mayor a 5 (MOP - 001-F , 2002).

El concepto es el porcentaje en peso del agregado grueso cuya relación entre las dimensiones máximas y mínimas es mayor a 5. Las partículas alargadas son indeseables porque tienden a quebrarse durante la construcción y bajo tránsito. El procedimiento se aplica a agregados mayores de 4.75mm. Para medir la relación de dimensiones de una muestra representativa de las partículas del agregado se emplea un calibrador. Se miden dos valores: porcentaje de partículas planas y porcentaje de partículas alargadas. (MOP - 001-F , 2002).

Tabla 81: Valores del ensayo de partículas alargadas y planas.

N° del Tamiz		% Retenido Parcial del Agregado	N° de Partículas en cada fracción antes del ensayo	N° de Partículas alargadas y planas en cada fracción	% de Partículas alargadas y planas en cada fracción	% de Partículas alargadas y planas
Pasa	Retiene					
2"	1 1/2"					
1 1/2"	1"					
1"	3/4"	11	100	0	0	0.00
3/4"	1/2"	27	100	0	0	0.00
1/2"	3/8"	21	100	0	0	0.00
3/8"	No. 4	42	100	0	0	0.00
Porcentaje Total de Partículas Alargadas						0.00

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 82: Especificaciones del ensayo de partículas alargadas y planas.

MOP-001F-2002 Sección 811. Agregados para hormigón asfáltico.	Máximo	10%
Resultado para agregado grueso	Cumple	

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.1.2.7. Partículas con una Cara Fracturada (ASTM D 5121).

La forma de la partícula de los agregados puede afectar la trabajabilidad durante su colocación; así como la cantidad de fuerza necesaria para compactarla a la densidad requerida y la resistencia de la estructura del pavimento durante su vida de servicio. (MOP - 001-F , 2002).

Las partículas irregulares y angulares generalmente resisten el desplazamiento (movimiento) en el pavimento, debido a que se entrelazan al ser compactados. El mejor entrelazamiento se da, generalmente, con partículas de bordes puntiagudos y de forma cubica, producidos, casi siempre por trituración. Este método describe la determinación del porcentaje, en peso, de una muestra de agregado grueso que presenta una, dos o más caras fracturadas.

Cara Fracturada: una cara angular, lisa o superficie fracturada de una partícula de agregado formada por trituración, otros medios artificiales o por naturaleza.

Partícula Fracturada: una partícula de agregado es fracturada si tiene el número mínimo de caras fracturadas especificadas (usualmente uno o dos).

Partícula fracturada. – Según (Ministerio de Transportes y Obras Publicas, 2013): “Se considera una cara fracturada si el área proyectada es mayor o igual al 25% del área máxima proyectada y la cara es puntiaguda y margen bien definido.”

Se utiliza material grueso retenido en el tamiz No.4 para obtener la cantidad de partículas fracturadas que se encuentran en la muestra. El ensayo es de gran importancia

ya que se necesita aumentar la resistencia a corte de los agregados mediante la fricción que existe en las partículas que también brindan estabilidad en las mezclas asfálticas. (Ministerio de Transportes y Obras Publicas, 2013)

El ensayo consiste en separar las partículas fracturadas de la muestra, lavarlas y pesarlas una vez que se hayan secado con el fin de obtener el porcentaje de partículas con caras fracturadas.

$$P = \frac{M_f}{M_t} * 100$$

Dónde:

P: porcentaje de partículas con caras fracturadas.

M_f: masa de las partículas fracturadas con el menor número de caras fracturadas especificadas.

M_t: Masa del total de partículas

Tabla 83: Valores de partículas fracturadas para agregado grueso con una cara fracturada.

Total de Agregado con una cara Fracturada (%)						
N° del Tamiz		Peso Muestra (g)	Peso material con caras fracturadas (g)	Material con caras fracturadas (%)	Granulometría (%) retenido	Promedio de caras fracturadas (%)
Pasaja	Retiene					
1"	3/4"	100	100	100	18	18
3/4"	1/2"	100	100	100	36	36
1/2"	3/8"	100	100	100	46	46
Porcentaje de partículas con una cara fracturada						100

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 84: Valores de partículas fracturadas para agregado grueso con dos o más caras fracturadas.

Total de Agregado con dos o más caras Fracturadas (%)						
N° del Tamiz		Peso Muestra (g)	Peso material con caras fracturadas (g)	Material con caras fracturadas (%)	Granulometría (%) retenido	Promedio de caras fracturadas (%)
Pasa	Retiene					
1"	3/4"	100	100	100	18	18
3/4"	1/2"	100	100	100	36	36
1/2"	3/8"	100	100	100	46	46
Porcentaje de partículas con una cara fracturada						100

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 85: Especificaciones para partículas fracturadas de un cara fracturada.

MOP-001F-2002 Sección 811. Agregados para hormigón asfáltico.	Una cara fracturada	85%
	Mínimo	
Resultado para agregado grueso	Cumple	

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 86: Especificaciones para partículas fracturadas de dos o más caras fracturadas.

MOP-001F-2002 Sección 811. Agregados para hormigón asfáltico.	Dos o más caras fracturadas	80%
	Mínimo	
Resultado para agregado grueso	Cumple	

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.1.2.8. **Porcentaje de Vacíos en Agregados Pasante del Tamiz No. 8 (ASTM C 1252).**

El ensayo de angularidad para los agregados finos sirve para obtener el porcentaje de vacíos de este material con el fin de determinar las características de angularidad de los

agregados. Si el material posee un porcentaje de vacíos alto, se considera que posee más partículas fracturadas que partículas esféricas. Consiste en colocar el material suelto en un cilindro con un volumen establecido y pesarlo. Existen 3 métodos para realizar este ensayo:

Método A: el porcentaje de vacíos se obtiene bajo condiciones que depende de la forma y la textura del agregado analizado y se realiza el ensayo con una muestra obtenida del resultado de un tamizado del agregado fino. La muestra utilizada en este método es obtenida por materiales que pasa el tamiz No. 8 y que se retiene en el No. 100 (Ministerio de Obras Publicas y Comunicaciones, 2011).

Método B: al igual que el método A el porcentaje de vacíos depende de la forma y la textura del agregado analizado, en este caso se realiza el ensayo con muestras más fracciones que el método A y puede resultar un poco más largo realizarlo (Ministerio de Obras Publicas y Comunicaciones, 2011).

Método C: el porcentaje obtenido en este método depende de la forma y textura de la partícula y se utiliza material que pasa el tamiz No. 4 del material que se ha obtenido directamente del banco (Ministerio de Obras Publicas y Comunicaciones, 2011).

Este ensayo tiene como objetivo determinar el porcentaje de vacíos independientemente de los métodos que se aplique, ya que es un indicador útil para conocer varias propiedades del material como estabilidad, trabajabilidad, etc.

La realización del informe utilizamos la siguiente fórmula para calcular el porcentaje de vacíos en el material fino.

$$\%U = \frac{V - \left(\frac{F}{G}\right)}{V} * 100$$

Tabla 87: Resultados de porcentaje de vacíos agregado fino.

Porcentaje de Vacíos en el Agregado Fino sin compactar				
Volumen del Medidor Cilíndrico	V	ml	100,80	100,80
Masa Neta del Agregado Fino en el medidor	F	g	143,50	143,70
Gravedad Especifica del Agregado Fino	G	g/cm ³	2,623	2,623
Porcentaje de Vacíos en el Agregado Fino	%U	g	46%	46%
Promedio			46%	

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 88: Especificaciones del ensayo de angularidad para agregado fino.

MOP-001F-2002 Sección 811. Agregados para hormigón asfáltico.	Mínimo	45%
Resultado para agregado fino	Cumple	

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.1.2.9. Deletéreos Agregado Fino (INEN 698).

Las partículas perjudiciales que se encuentran en los agregados que conforman una mezcla asfáltica, puede producir varios problemas en su capacidad sobre todo al momento de la adhesión entre los agregados y el cemento asfáltico lo que debilita su capacidad y resistencia. Estas partículas pueden ser aceites, esquistos, vegetación, etc. (Ministerio de Obras Publicas y Comunicaciones, 2011). El ensayo se realiza tanto para agregados finos y agregados gruesos y consiste en separar en recipientes varias

muestras de los diferentes materiales y posteriormente sumergirlos en un líquido viscoso que permitirá que las partículas perjudiciales floten a la superficie y así poder pesar esas partículas para poder determinar el porcentaje que existe en el total de la muestra.

Este método se refiere a la determinación aproximada de los terrones de arcilla y de las partículas deleznable (friables) en los agregados. Los materiales deletéreos son definidos como el porcentaje en peso de contaminantes como esquistos, madera, mica y carbón mezclados con los agregados. Puede aplicarse tanto a agregados finos como a gruesos. El ensayo se realiza tamizando el agregado, por vía húmeda, sobre tamices prescritos. El porcentaje en peso del material perdido como resultado del tamizado húmedo se informa como el porcentaje de la masa de arcilla y partículas friables. Hay, evidentemente, un amplio rango de máximos porcentajes permisibles de arcilla y partículas friables.

Tabla 89: Resultados de ensayo de porcentaje de deletéreos agregados finos.

Tamiz		Peso inicial lavado seco (g)	Peso final lavado seco (g)	Peso Perdido (g)	% Terrones arcilla y Partículas Friables
Pasa	Retiene				
No. 4	No. 8	18,60	37,50	0,10	0,29
No. 8	No. 16	19,00			
Porcentaje de Partículas Friables en Agregado Fino					0,29

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 90: Especificaciones del ensayo de porcentaje de deletéreos agregados finos.

MOP-001F-2002 Sección 811. Agregados para hormigón asfáltico.	Máximo	1%
Resultado para agregado fino	Cumple	

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.1.2.10. Deletéreos Agregado Grueso (INEN 698).

Tabla 91: Resultados de ensayo de porcentaje de deletéreos agregados Grueso.

Tamiz		Peso inicial lavado seco (g)	Peso final lavado seco (g)	Peso Perdido (g)	Gradación de la muestra original (g)	% Terrones arcilla y partículas friables	Porcentaje Ponderado (%)
Pasa	Retiene						
1"	3/4"	1087,20	1087,00	0,20	11,00	0,02	0,00
3/4"	3/8"	2007,70	2007,50	0,20	48,00	0,01	0,00
3/8"	No. 4	1062,20	1061,00	1,20	41,00	0,11	0,05
Porcentaje de Partículas Friables en Agregado Grueso							0,05

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 92: Especificaciones del ensayo de porcentaje de deletéreos agregados gruesos.

MOP-001F-2002 Sección 811. Agregados para hormigón asfáltico.	Máximo	1%
Resultado para agregado Grueso	Cumple	

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.1.2.11. Determinación de la Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica) y Absorción (INEM 857).

Gravedad específica. - Según (AASHTO T 315, 2016):“La relación entre la masa de un volumen de material a una temperatura dada, y la masa del mismo volumen de agua destilada a dicha temperatura dada.”

Absorción. - Según (Ministerio de Transportes y Obras Publicas, 2013):” Proceso por el cual un líquido es arrastrado dentro de un cuerpo sólido poroso y tiende a llenar los

poros permeables del mismo; también se conoce como el aumento en masa de un cuerpo sólido poroso, resultante de la penetración de un líquido dentro de sus poros permeables”.

Gravedad específica en condición seca al horno. - Según (Ministerio de Transportes y Obras Publicas, 2013):” Es la relación entre la masa del volumen de un material (incluyendo los poros permeables e impermeables en el material, pero excluyendo los vacíos entre las partículas del material) a una temperatura dada, a la masa del mismo volumen de agua destilada a la temperatura dada.”

Gravedad específica en condición saturada superficialmente seca. – Según (Ministerio de Transportes y Obras Publicas, 2013):” Es la relación entre la masa del volumen de un material incluyendo la masa de agua dentro de los poros en el material (pero excluyendo los vacíos entre las partículas) a una temperatura dada, a la masa del mismo volumen de agua destilada a la temperatura dada.”

Gravedad específica aparente. – Según (Ministerio de Transportes y Obras Publicas, 2013):“La masa por unidad de volumen ocupado por el conjunto de las partículas del agregado a granel (incluyendo el volumen de las partículas individuales y el volumen de los vacíos entre las partículas)”.

3.1.2.11.1. Gravedad Específica y Absorción del Agregado Grueso (ASTM C127).

Este ensayo consiste en colocar una muestra del agregado en el horno hasta que tenga un peso constante, luego se sumerge en el agua aproximadamente 24 horas para

que sus espacios internos se llenen totalmente de agua. Una vez que el agua ha llenado todo el poro del agregado, se saca del agua y se seca solamente la superficie y por consiguiente se pesa. Luego se coloca el material en un contenedor bajo el agua para obtener el peso aparente mediante el desplazamiento del agua. Una vez realizado todo el proceso se vuelve a secar hasta que tenga un peso constante y se le pesa por última vez para así obtener los valores de peso seco (Ministerio de Transportes y Obras Publicas, 2013).

$$\text{Gravedad específica en condición seca al horno del agregado (BULK)} = \frac{A}{B - C} * K$$

$$\text{Gravedad específica en condición saturada superficialmente seca (S.S.S.)} = \frac{B}{B - C} * K$$

$$\text{Gravedad específica aparente} = \frac{A}{A - C} * K$$

$$\text{Absorción} = \frac{B - A}{A} * 100 * K$$

Dónde:

A= Peso Secado al horno

B= Peso Saturado seco

C= Peso en Agua material saturado

K= factor de corrección por temperatura (K=0,997).

Tabla 93: Resultados de Gravedad específica y absorción del agregado grueso.

Gravedad Específica y Absorción de Agregado Grueso		
Pasa tamiz 1"	Retiene tamiz 3/4"	
Masa muestra saturada seca B	g	5113,80
Masa en agua del agregado saturado C	g	3138,50
Temperatura (T)	°C	25
Masa muestra seca A	g	4997,10

Factor de corrección por temperatura K		0,997
Gravedad BULK		2,522
Gravedad S.S.S.		2,581
Gravedad Especifica Aparente		2,681
Absorción		2,34%

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.1.2.11.2. *Gravedad Específica y Absorción del Agregado Intermedio (ASTM C127).*

$$\text{Gravedad específica en condición seca al horno del agregado (BULK)} = \frac{A}{B - C} * K$$

$$\text{Gravedad específica en condición saturada superficialmente seca (S.S.S.)} = \frac{B}{B - C} * K$$

$$\text{Gravedad específica aparente} = \frac{A}{A - C} * K$$

$$\text{Absorción} = \frac{B - A}{A} * 100 * K$$

Dónde:

A= Peso Secado al horno

B= Peso Saturado seco

C= Peso en Agua material saturado

K= factor de corrección por temperatura (K=0,997).

Tabla 94: Resultados de Gravedad específica y absorción del agregado intermedio.

Gravedad Específica y Absorción de Agregado Intermedio			
Pasa tamiz 3/4"		Retiene tamiz No. 8	
Masa muestra saturada seca B	g		4989,10
Masa en agua del agregado saturado C	g		3057,60
Temperatura (T)	°C		25
Masa muestra seca A	g		4888,90
Factor de corrección por temperatura K			0,997
Gravedad BULK			2,524

Gravedad S.S.S.		2,575
Gravedad Especifica Aparente		2,670
Absorción		2,05%

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.1.2.11.3. Gravedad Específica y Absorción del Agregado Fino (ASTM C128).

El ensayo consiste en colocar una muestra de agregado fino seco en agua por 24 horas para que todos sus poros estén llenos de agua. Luego se coloca la muestra mojada en una superficie y se lo mezcla suavemente hasta conseguir así la condición de un secado superficial. Posteriormente se coloca agua en el picnómetro hasta una medida correspondiente y se introduce 500g de la muestra de agregado con superficie seca. Una vez colocado el material y el agua hasta la medida requerida, se procede a eliminar todas las burbujas de aire de la muestra mediante métodos manuales como la agitación del matraz (Ministerio de Transportes y Obras Publicas, 2013). Cuando se observe que ya no existe ninguna burbuja, se procede a pesar la muestra del agua, matraz y agregado como conjunto, se le retira el agregado y se procede a secar hasta tener una masa constante para así obtener el peso de la masa seca.

$$\text{Gravedad específica en condición seca al horno del agregado (BULK)} = \frac{A}{B + D - C} * K$$

$$\text{Gravedad específica en condición saturada superficialmente seca (S.S.S.)} = \frac{D}{B + D - C} * K$$

$$\text{Gravedad específica aparente} = \frac{A}{B + A - C} * K$$

$$\text{Absorción} = \frac{D - A}{A} * 100$$

Dónde:

A=Masa muestra seca

B=Masa del picnómetro + Agua a la temperatura

C=Masa del picnómetro + Muestra + Agua

D=Masa muestra saturada con superficie seca

Tabla 95: Resultados de Gravedad específica y absorción del agregado fino.

Gravedad Específica y Absorción de Agregado Fino		
Pasa tamiz No. 8	Retiene tamiz No. 200	
Masa muestra saturada con superficie seca D	g	1000,00
Masa del picnómetro + muestra + Agua C	g	1872,20
Temperatura (T)	°C	25
Masa del picnómetro + Agua a la temperatura B	g	1255,80
Masa muestra seca A	g	986,00
Factor de corrección por temperatura K		0,997
Gravedad BULK		2,563
Gravedad S.S.S.		2,599
Gravedad Especifica Aparente		2,660
Absorción		1,42%

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.1.3. Tereftalato de Polietileno (PETS).

Para la modificación de las mezclas asfálticas se trabajó con PET reciclado, cortado en escamas y lavado, reciclado triturado que provee la empresa Intercia, ubicada en el norte de la ciudad de Guayaquil.

Cabe recalcar que la incorporación del PET fue a través del cemento asfáltico tipo AC-20 de la refinería del Pacífico ubicada en Esmeraldas, modificando propiedades, proceso que se lo realiza en caliente.

El proceso de reciclaje del PET se compone de varias etapas de lavado y de trituración, hasta obtener un material libre de impurezas y en los tamaños requeridos para los procesos posteriores.

Este material normalmente se somete a fundición y procesos de extrusión, con lo que se cierra el ciclo convencional de reaprovechamiento.

Tabla 96: Proceso de reciclaje del PET.



Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Para efectos de esta investigación se han seleccionado un tamaño de Tereftalato de Polietileno de 0,5 -2,0 mm y con un porcentaje en mezcla de 1%; llamada ripio de PET, según algunas de las referencias a nivel internacional, pero del mismo modo haciendo un balance con la capacidad de producción de las plantas trituradoras en Guayaquil, que usualmente manejan rangos granulométricos muy similares.

Se realizó la implementación del PETS, en el cemento asfáltico en caliente a 180 °C, a partir del 1% de diseño con la granulometría arriba mencionada; es decir se realizó la mezcla una vez llegado el cemento asfáltico a la planta.



Ilustración 20: PET triturado utilizado en la investigación.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Se considera que el PET triturado conserva las propiedades del material original, debido a que durante el proceso de reciclaje no se someten a ninguna sustancia o temperatura elevada, que pudiese afectar su naturaleza. La empresa Intercia suministró

los datos contenidos en la Tabla siguiente, como características significativas de las escamas usadas en la investigación.

Tabla 97: Caracterización del PET. Datos suministrados por la empresa Intercia.

Ensayo	Norma	Valor reportado
Densidad	ISO-1183	1,365 g/cm ³
Elongación a la rotura	ISO-527	20%
Punto de Fusión	ISO-3146	255 °C
Módulo elasticidad en tensión	ISO-527	3200 MPa
Temperatura máxima de servicio	ISO-075	175 °C

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.2. Diseño de las Mezclas Asfálticas

Para la realización de mezclas asfálticas en caliente cerrada y continua como se explicó anteriormente, es importante seleccionar el material granulométrico de manera correcta ya que de este modo se obtendrá economía por parte del ligante y un buen comportamiento por parte de la carpeta de rodadura.

Se debe de realizar un sin número de ensayos para sacar los puntos importantes del ensayo como lo son la estabilidad y flujo, el porcentaje de vacíos, porcentaje de asfalto, etc. para que además puedan cumplir con las normativas vigentes en la construcción. El método a realizar es el método Marshall el cual es aplicable en mezclas asfálticas en caliente que además tienen material cuyo tamaño máximo es de 25.4mm.

Para el método de mezclas asfálticas en caliente, se deben realizar previamente varias operaciones las cuales influyen en gran medida el resultado, como los son:

- Previo ensayo de los agregados para determinar si se cumple con los requerimientos y especificaciones de la norma.
- Previo ensayo del ligante para determinar si se cumple con los requerimientos y especificaciones de la norma.
- La dosificación de los agregados cumpla las normas y especificaciones a lo que refiere a la granulometría.
- Se debe determinar el peso específico tanto de los agregados como el ligante asfáltico para utilizar dentro de los análisis de vacíos y de la densidad de las mezclas.

El principal objetivo al realizar las mezclas asfálticas en caliente por el método Marshall es determinar la relación que existe entre la densidad y volumen de las mezclas y poder analizarlas, además de determinar la estabilidad y flujo de las briquetas compactas para poder analizarlas y comparar sus resultados con las normas técnicas.

La estabilidad y flujo mencionados anteriormente son importantes para determinarlas y analizarlas las cual significan:

- **Estabilidad:** Máxima carga en libras que puede resistir la biqueta normalizada a 60°C cuando se realiza el ensayo de rotura a compresión (Salvador & Salvador).
- **Flujo:** Movimiento o deformación total que se produce en la biqueta desde el comienzo hasta la carga máxima durante el ensayo de estabilidad, expresada en centésimas de pulgada (Salvador & Salvador).

Se utilizará el Método Marshall el cual consiste en ensayar una serie de probetas, cada una preparada con la misma granulometría y con diferentes contenidos de asfalto. El tamaño de las probetas es de 2.5 pulgadas de espesor y 4 pulgadas de diámetro. Dichas probetas se preparan siguiendo un procedimiento específico para calentar el asfalto y los agregados, mezclar y compactar.

Las probetas preparadas con el método se rompen en la prensa Marshall, determinado su estabilidad (resistencia) y deformación. Para conocer los porcentajes de vacíos de las mezclas fabricadas, se determinarán previamente los pesos específicos de los materiales empleados y de las probetas compactadas, antes del ensayo de rotura.

De acuerdo a la **tabla 405-5-4** del (MOP - 001-F , 2002) se establecen los siguientes criterios:

Tabla 98: Criterios MOP para diseño de mezclas asfálticas.

Criterios MOP	Mínimo	Máximo
Compactación, numero de golpes en cada cara de la probeta	75	
Estabilidad (libras)	2200	-
Flujo (pulgada/100)	8	14
Porcentaje de vacíos (%)	3	5
Porcentaje de vacíos en el agregado mineral VAM (%)	12	-
Relación filler/betún	0,8	1,2
% De estabilidad retenida luego de 7 días en agua temperatura ambiente	70	-
% De resistencia de la mezcla al daño causado por el agua (TSR)	80	-

Fuente: (MOP - 001-F , 2002)

3.2.1. Diseño Mezcla Asfáltica Convencional.

El siguiente diseño tiene como objeto determinar el contenido óptimo de asfalto para una mezcla específica de agregados; así como también proporcionar información sobre las características físicas y mecánicas de mezcla asfáltica en caliente, de tal manera que sea posible establecer su cumplimiento con respecto a las especificaciones técnicas.

Se utilizará el Método Marshall el cual consiste en ensayar una serie de probetas, cada una preparada con la misma granulometría y con diferentes contenidos de asfalto. El tamaño de las probetas es de 2.5 pulgadas de espesor y 4 pulgadas de diámetro. Dichas probetas se preparan siguiendo un procedimiento específico para calentar el asfalto y los agregados, mezclar y compactar.

Las probetas preparadas con el método se rompen en la prensa Marshall, determinado su estabilidad (resistencia) y deformación. Para conocer los porcentajes de vacíos de las mezclas fabricadas, se determinaron previamente los pesos específicos de los materiales empleados y de las probetas compactadas, antes del ensayo de rotura.

3.2.1.1. Mezcla de Agregados.

Para la obtención de la mezcla de los agregados, es importante usar agregados que presenten una buena granulometría, es por eso que se realizó la mezcla con tres tipos

de agregados como los son fino, grueso e intermedio para que al unirlos estos ocupen todos los espacios y reduciendo el porcentaje de vacíos y tener muestras más compactas.

Para la mezcla de agregados se trabajó con un 25 % de material grueso, 20 % de material intermedio y un 55 % de material fino, con el fin de que el material fino logre cubrir todos los espacios que se generan al momento de realizar las briquetas, además para la obtención de la curva granulométrica por mallas se tomó una de las granulometrías indicadas en las tablas de la (MOP - 001-F , 2002).

Tabla 99: Tabla de Granulometrías.

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada			
	¾"	½"	3/8"	Nº4
1" (25.4 mm.)	100	--	--	--
¾" (19.0 mm.)	90 - 100	100	--	--
½" (12.7 mm.)	--	90 - 100	100	--
3/8" (9.50 mm.)	56 - 80	--	90 - 100	100
Nº 4 (4.75 mm.)	35 - 65	44 - 74	55 - 85	80 - 100
Nº 8 (2.36 mm.)	23 - 49	28 - 58	32 - 67	65 - 100
Nº 16 (1.18 mm.)	--	--	--	40 - 80
Nº 30 (0.60 mm.)	--	--	--	25 - 65
Nº 50 (0.30 mm.)	5 - 19	5 - 21	7 - 23	7 - 40
Nº 100 (0.15 mm.)	--	--	--	3 - 20
Nº 200 (0.075 mm.)	2 - 8	2 - 10	2 - 10	2 - 10

Fuente: (MOP - 001-F , 2002).

Para la obtención de los porcentajes que se deben mezclar para realizar las briquetas se procedió por tomar los valores intermedios de la curva como se muestra, y de esta manera tener una granulometría de la curva para que precise en la mitad y no este con más material fino que grueso y viceversa. Las especificaciones de las curvas máximas y mínimas y de la faja de trabajo están en la normativa (MOP - 001-F , 2002).

Tabla 100: Análisis Granulométrico de la mezcla convencional.

Análisis Granulométrico												
Tamiz	Granulometría Individual fracción:			Porcentaje de aporte			Combinación	Especificación		Faja de trabajo		Tolerancias
	1	2	3	25%	20%	55%		Min.	Max.	Min.	Max.	
				1	2	3						
1"	100	100	100	25	20	55	100	100	100	100	100	±8
¾"	87,10	100	100	25	20	55	96,80	90	100	90	100	±8
½"	26,40	100	100	7	20	55	81,60					±8
3/8"	2,70	81,70	100	1	16	55	72	56	80	65	79	±7
No. 4	1,20	2,20	94,60	0	0,40	52	52,80	35	65	46	60	±7
No. 8	0,20	0,30	67,40	0	0,10	37	37,20	23	49	31	43	±6
No. 50	0	0	28	0	0	15	15,40	5	19	10	19	±5
No. 200	0	0	10,20	0	0	6	5,60	2	8	3	8	±3

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

En el siguiente cuadro diseñamos la granulometría combinada para los agregados de acuerdo a las curvas máximas y mínimas y a la faja de trabajo que se presentan en la normativa MOP, donde los números 1 (agregado grueso 1"), 2 (agregado intermedio ½") y 3 (agregado fino ¼"). Se presenta su respectiva combinación y el porcentaje de tolerancias de acuerdo a las normas arriba mencionadas.

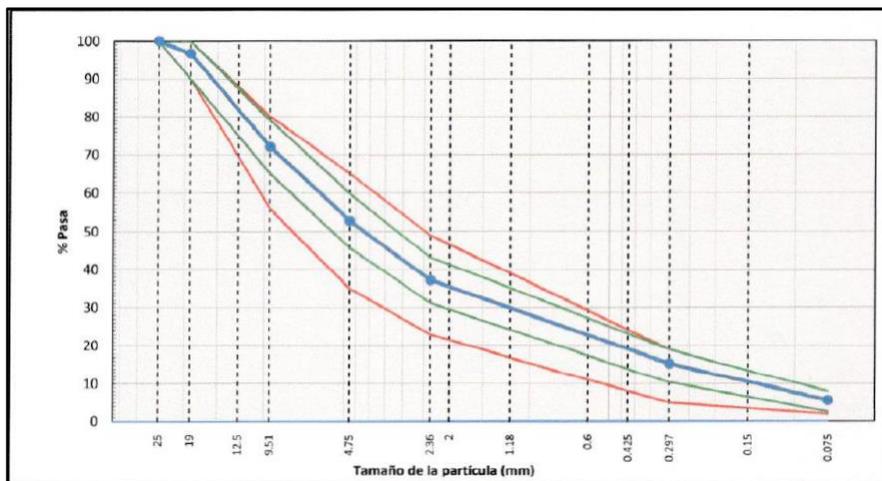


Ilustración 21: Granulometría de los agregados para la Mezcla convencional.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.2.1.2. *Diseño de Mezcla con Cemento Asfáltico.*

Para tener una idea del valor inicial de asfalto que se debe tomar se empleará una ecuación 1, la cual nos indica el valor con el que se debe trabajar para el método Marshall en donde emplea los valores tomados de la curva granulométrica y relaciona esta para darnos el resultado.

Para obtener el valor inicial del asfalto se utilizará el método francés el cual consiste en obtener el área superficial de los agregados (S), y de esta manera nos da de forma directa el porcentaje de cemento asfáltico empleando la curva granulométrica con respecto a la briqueta.

$$S = 0.17G + 0.33g + 2.30A + 12a + 135f \quad (1)$$

Dónde:

G: Porcentaje de agregado que pasa el tamiz 3/8”.

g: Porcentaje de agregado que pasa el tamiz 3/8” y se retiene en el # 4.

A: Porcentaje de agregado que pasa el tamiz # 4 y se retiene en el # 50.

a: Porcentaje de agregado que pasa el tamiz # 50 y se retiene en el # 200.

f: Porcentaje de agregado que pasa el tamiz # 200.

Una vez obtenido el valor del área superficial de los agregados se coloca el valor del coeficiente del tráfico el cual se encuentra entre $M = 3,75$ y $4,25$. Para el diseño estudiado se tomó el valor de 4 siendo este un valor medio por el cual es conservador.

Finalmente, para obtener el valor del porcentaje de asfalto se debe reemplazar el valor obtenido del área superficial y el coeficiente del tráfico en la ecuación 2.

$$P = M * P^{0,2} \quad (2)$$

Tabla 101: Porcentaje Inicial de cemento asfaltico mezcla convencional.

Calculo del Porcentaje de Asfalto			
G	Mayor a 3/8”	28,00	0,28
g	3/8” – No. 4	19,20	0,192
A	No. 4 – No. 50	37,40	0,374
a	No. 50 – No. 200	9,80	0,98
f	Pasante No. 200	0,00	0,00
S	$S = 0.17G + 0.33g + 2.30A + 12a + 135f$	5.62	
P	$P = M * P^{0,2}$	5,65	

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Una vez obtenido como resultado el 5,65% de cemento asfáltico, se debe utilizar valores de 0,5 por debajo y por arriba para así obtener 5 diferentes porcentajes de asfalto y ensayar 3 briquetas por cada porcentaje, de esta manera se obtendrá el peso del asfalto (3) que se debe colocar en la mezcla para obtener las briquetas, mezclarlas y posteriormente ensayarlas.

$$\% \text{ Asf} = \frac{W \text{ asfalto}}{W \text{ agregado} + W \text{ asfalto}} \quad (3)$$

3.2.1.3. Determinación de Parámetros Volumétricos.

Es muy importante que para estimar el comportamiento de las mezclas asfálticas sean consideradas las proporciones volumétricas del asfalto y de los componentes del agregado.

Las definiciones, conceptos y fórmulas que se presentan a continuación, correspondientes al numeral de Parámetros Volumétricos, son basados en el Capítulo II del Manual del Instituto del Asfalto.

- Gravedad específica Bulk (Gsb) - Relación entre la masa en el aire de una unidad de volumen de un material permeable (incluyendo vacíos permeables e impermeables del material) a una temperatura indicada, y la masa en el aire de

una unidad de volumen de agua destilada a la temperatura indicada. (Institute, The Asphalt Handbook, 1989).

Debido a que se tiene tres diferentes tipos de materiales como los son el material grueso, intermedio y fino, se tendrán tres diferentes gravedades específicas de los materiales, al momento de obtener el peso específico bruto del agregado total se va a dividir el porcentaje de material que se puso en la mezcla, como se mencionó anteriormente, de 25% de grueso, 20% de intermedio y 55% de fino, para su gravedad específica y todo esto será dividido para el 100% del material ya que la suma de los tres materiales nos da un total del 100%. (Institute, The Asphalt Handbook, 1989).

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

P_1, P_2, P_n - Porcentaje individuales por masa de agregado.

G_1, G_2, G_n .- Gravedad específica neta individual del agregado.

- Peso Específico Máximo Medido (Gmm) – Ensayo RICE, lo que se muestra a continuación son formulas teóricas obtenido de los resultados previamente los cuales van a ser necesarios para obtener el porcentaje óptimo de diseño el cual muestra parámetros de la mezcla asfáltico y su comportamiento para comparar las briquetas con su porcentaje de asfalto. (Institute, The Asphalt Handbook, 1989).

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

Gmm: Peso Específico Máximo Medido.

A: Peso de la muestra seca en el aire.

B: Peso del matraz lleno con agua a 25 C.

C: Peso del matraz con agua y muestra.

- Gravedad específica efectiva (Gse) - Relación entre la masa en el aire de una unidad de volumen de un material permeable (excluyendo vacíos permeables de asfalto) a la temperatura indicada, y la masa en el aire de una unidad de volumen de agua destilada a la temperatura indicada. (Institute, The Asphalt Handbook, 1989).

$$Gse = \frac{Pmm - Pb}{\frac{Pmm}{Gmm} - \frac{Pb}{Gb}}$$

Gmm.- gravedad específica máxima de la mezcla sin vacíos de aire.

Pmm.- porcentaje de masa total de la mezcla suelta (100%).

Pb.- contenido de asfalto con el cual se determina la Gmm.

Gb.- gravedad específica del asfalto.

- Gravedad específica aparente (Gsa) – Relación entre el peso en el aire del volumen de la porción impermeable del agregado a una determinada temperatura y el peso en el aire de un volumen igual de agua destilada, libre de gas, a la misma temperatura. (Institute, The Asphalt Handbook, 1989).

Debido a que se tiene tres diferentes tipos de materiales como los son el material grueso, intermedio y fino, se tendrán tres diferentes gravedades aparentes de los materiales, se va a dividir el porcentaje de material que se puso en la mezcla, como se mencionó anteriormente, de 25% de grueso, 20% de intermedio y 55% de fino, para su gravedad aparente y todo esto será dividido para el 100% del material ya que la suma de los tres materiales nos da un total del 100%.

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

P_1, P_2, P_n - Porcentaje individuales por masa de agregado.

G_1, G_2, G_n .- Gravedad aparente neta individual del agregado.

- Vacíos en el agregado mineral (VMA – Voids in Mineral Aggregate) - Volumen de espacio vacío intergranular entre las partículas del agregado de una mezcla asfáltica compactada, que incluye los vacíos de aire y el contenido de asfalto efectivo, expresado como un porcentaje del volumen total de la muestra. (Institute, The Asphalt Handbook, 1989).

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} * P_s}{G_{sb}}$$

G_{sb} .- gravedad específica Bulk del total de agregado.

G_{mb} .- gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada.

P_s .- contenido de agregado.

- Contenido de asfalto efectivo (P_{be}) - Contenido de asfalto total de una mezcla asfáltica menos la proporción de asfalto absorbido en las partículas del agregado. (Institute, The Asphalt Handbook, 1989).

$$P_{be} = P_b + \frac{P_{ba}}{100} * P_s$$

P_{be} .- Contenido de asfalto efectivo

P_b .- contenido de asfalto.

P_{ba} .- asfalto absorbido.

P_s .- contenido de agregado.

- Vacíos de aire (V_a) - Volumen total de una pequeña bolsa de aire entre las partículas cubiertas del agregado en una mezcla de pavimento compactado, expresado como el porcentaje del volumen neto de la mezcla del pavimento compactado. (Institute, The Asphalt Handbook, 1989).

$$V_a = 100 * \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}}$$

G_{mm} .- gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica.

G_{mb} .- gravedad específica bulk de la mezcla asfáltica compactada.

- Vacíos llenados con asfalto (VFA – Voids Filled with Asphalt) - Volumen de espacio vacío intergranular entre las partículas del agregado que es ocupado por el asfalto efectivo. (Institute, The Asphalt Handbook, 1989).

$$VFA = 100 * \frac{VMA - Va}{VMA}$$

VMA. - vacíos en el agregado mineral.

Va. - vacío de aire en mezclas compactadas.

Tabla 102: Gravedades Específicas de la mezcla convencional.

% Cemento Asfáltico	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	5.10
Gravedad Especifica Bulk mezcla agregados (Gsb)	2.543	2.543	2.543	2.543	2.543	2.543
Gravedad Especifica del asfalto (Gb)	1.008	1.008	1.008	1.008	1.008	1.008
Datos Ensayo RICE:						
Peso muestra en el aire (Gramos)	1493.20	1492.00	1490.90	1491.00	1493.20	1489.20
Peso Frasco + Agua (Gramos)	7976.30	7976.30	7976.30	7976.30	7976.30	7976.30
Peso Frasco + Agua + Muestra (Gramos)	8860.00	8856.60	8851.90	8845.80	8843.80	9195.70
Volumen c.c.	610	612	615	622	626	616
Gravedad Especifica máxima de la mezcla (Gmm)	2.450	2.439	2.423	2.399	2.386	2.418
Gravedad Especifica Efectiva de los agregados (Gse)	2.603	2.612	2.614	2.606	2.612	2.612
Gravedad Especifica Aparente de los agregados (Gsa)	2.671	2.671	2.671	2.671	2.671	2.671
Comprobación:						
Gsa>Gse>Gsb	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
Asfalto Absorbido por el agregado (Pba)	0.93	1.06	1.09	0.97	1.06	1.07
Contenido Asfalto efectivo en mezcla (Pbe)	3.11	3.49	3.96	4.58	5.01	4.09

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Para el análisis de los parámetros volumétricos son tomados 3 pesos de cada uno de los especímenes ensayados: El peso seco o al aire, el peso sumergido y el peso saturado superficialmente seco.

3.2.1.4. *Análisis de Estabilidad y Flujo.*

La estabilidad de una mezcla asfáltica es su capacidad para restringir desplazamiento y deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y textura bajo cargas repetidas. Un pavimento inestable desarrolla ahuellamiento, ondulaciones y otras señales que indican cambios en la mezcla.

Los requisitos reales de estabilidad solo pueden ser determinados a partir de un análisis completo del tránsito esperado. Las especificaciones de estabilidad deben ser lo suficientemente exigentes, pero en ningún caso deben exceder las solicitaciones estimadas de tránsito, ya que valores de estabilidad significativamente altos conllevan a un pavimento poco flexible y menos durable de lo deseado.

La estabilidad depende de la fricción y la adhesión interna. La fricción en las partículas del agregado está relacionada con características como su geometría y su textura superficial. La adhesión interna, por su parte resulta de la compatibilidad del ligante con el esqueleto granular. Un grado propio de fricción y adhesión interna en la mezcla, previene que las partículas de agregado se desplacen unas respecto a otras debido a las fuerzas ejercidas por el tránsito. En general, mientras mayor sea la angularidad de las partículas y más rugosa su textura, más adecuada será la estabilidad. (Institute, Superpave, Performance graded asphalt binder specifications and testing superpave serie No 1 (SP-1), 1993).

Por otro lado, el flujo representa la deformación de la briqueta. Indica propiamente la disminución en el diámetro de la misma.

Las mezclas con valores bajos de fluencia y muy altos de estabilidad son consideradas demasiado frágiles y rígidas para una estructura de pavimento en servicio. Aquellas que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas y tienden a desarrollar con mayor facilidad deformaciones permanentes. (Institute, Superpave, Performance graded asphalt binder specifications and testing superpave serie No 1 (SP-1), 1993).

Para la medición de la estabilidad y el flujo, como se describe en la metodología Marshall, fue necesario seguir la normativa. A continuación, se describe en forma breve el procedimiento:

- Las briquetas son cuerpos cilíndricos de 4 pulgadas de diámetro y 2,5 pulgadas de altura, que se compactaron con un martillo de 10 libras que cayó desde una altura de 18 pulgadas, aplicando 75 golpes por cara.
- Una vez fabricadas las probetas, fueron sumergidas en un baño de agua a 60°C. Esta temperatura representa la condición más extrema de servicio a la que será sometida la mezcla asfáltica en la estructura de pavimento.
- La probeta fue removida del baño, secada y colocada rápidamente en la prensa Marshall, que consiste en un dispositivo que aplica la carga por medio de mordazas perimetrales. Se contó con una celda de carga de 10 [kN] y un sensor de deformación de 50 [mm].

- La carga de ensayo fue aplicada a la probeta en una velocidad constante de 50 [mm/min], hasta la falla, definida como la carga máxima que la briqueta fue capaz de resistir.
- La carga de falla se registró como valor referencia de estabilidad Marshall y la lectura del medidor de deformación se registró como flujo.
- Este proceso se repitió, bajo las mismas condiciones, para cada una de las briquetas sometidas a ensayo.

Para la realización de la siguiente tabla se debe tomar en consideración la gravedad específica del asfalto y la gravedad específica Bulk de los agregados, valores ya establecidos en la tabla 3.98 en la sección anterior.

G_a (Gravedad Especifica del Asfalto) =1,008 g/cm³

G_{sb} (Gravedad Especifica Bulk de los agregados) =2,543 g/cm³

Tabla 103: Propiedades de la mezcla asfáltica convencional.

Muestra No.	% Asfalto	Pesos			Volumen (cm ³)	Gravedad específica Bulk	Volumen C.A.	Volumen Ag.	% Vacíos	% VAM	% Efectivo C.A.
		Aire	Agua	S.S.S							
1	4.00	1184.0	667.9	1187.2	519.3	2.28					
2		1184.8	667.6	1188.6	521	2.274					
3		1116.4	628.2	1118.9	490.7	2.275					
Promedio						2.276	6.97	85.95	7.08	14.05	3.69
4	4.50	1174.4	664.9	1177.3	512.4	2.292					
5		1189.6	673.9	1192.2	518.3	2.295					
6		1183.9	671.0	1186.0	515.0	2.299					
Promedio						2.295	7.89	86.22	5.89	13.78	4.20
7	5.00	1177.7	672.6	1181.0	508.4	2.316					
8		1182.8	676.3	1185.4	509.1	2.323					
9		1188.0	677.5	1189.6	512.1	2.320					
Promedio						2.320	9.06	86.68	4.26	13.32	4.86

10	5.50	1189.8	683.1	1191.3	508.2	2.341					
11		1166.4	669.1	1168.4	499.3	2.336					
12		1185.4	680.1	1186.1	506.0	2.343					
Promedio						2.340	10.57	86.97	2.46	13.03	5.61
13	6.00	1195.7	689.9	1198.3	508.4	2.352					
14		1189.5	686.2	1192.9	506.7	2.348					
15		1186.5	684.2	1190.0	505.8	2.346					
Promedio						2.348	11.58	86.82	1.59	13.18	6.00
Comprobación											
16	5.10	1183.1	679.1	1184. 2	505.1	2.342					
17		1213.7	695.9	1214. 5	518.6	2.340					
18		1180.0	674.6	1182. 6	508.0	2.323					
Promedio						2.335	9.21	87.16	3.63	12.84	5.00

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Para la siguiente tabla se utiliza la prensa Marshall para determinar los valores de estabilidad y flujo y un factor de corrección que determinamos de la tabla que presentamos a continuación; cabe recalcar que los valores de la tabla son proporcionados de la normativa que se presenta:

Tabla 104: Factor de Corrección de la Estabilidad

CORRECCIÓN DE LOS VALORES DE ESTABILIDAD		
VOLUMEN DE LA BRIQUETA (cm ³)	ESPESOR APROXIMADO DE LA BRIQUETA (cm)	FACTOR DE CORRECCIÓN
200 – 213	2.54	5.56
214 – 225	2.70	5.00
226 – 237	2.86	4.55
238 – 250	3.02	4.17
251 – 264	3.17	3.85
265 – 276	3.33	3.57
277 – 289	3.49	3.33
290 – 301	3.65	3.03
302 – 316	3.81	2.78
317 – 328	3.97	2.50
329 – 340	4.13	2.27
341 – 353	4.29	2.08
354 – 367	4.44	1.92
368 – 379	4.60	1.79
380 – 392	4.76	1.67
393 – 405	4.92	1.56
406 – 420	5.08	1.47
421 – 431	5.24	1.39
432 – 443	5.40	1.32
444 – 456	5.56	1.25
457 – 470	5.71	1.19
471 – 482	5.87	1.14
483 – 495	6.03	1.09
496 – 508	6.19	1.04
509 – 522	6.35	1.00
523 – 535	6.51	0.96
536 – 546	6.67	0.93
547 – 559	6.82	0.89
560 – 573	6.96	0.86
574 – 585	7.14	0.83
586 – 598	7.30	0.81
599 – 610	7.46	0.78
611 – 625	7.62	0.76

Fuente: (MOP - 001-F , 2002).

Tabla 105: Valores de estabilidad y flujo de la mezcla convencional.

Muestra No.	% Asfalto	Estabilidad				Flujo (0.01")	VAF	Gmm
		Lectura Dial	Dial	Factor de corrección	Corregido			
1	4.00	460	4335	1.00	4317.50	8		
2		450	4241	0.99	4197.70	7		
3		440	4147	1.11	4595.60	8		
Promedio						4370.30			8	49.59	2.450
4	4.50	455	4288	1.02	4379.70	8		
5		520	4900	1.00	4898.40	9		
6		460	4335	1.01	4385.80	9		
Promedio						4554.60			9	57.24	2.439
7	5.00	525	4948	1.04	5128.80	10		
8		520	4900	1.03	5066.80	10		
9		475	4335	1.02	4577.30	11		
Promedio						4924.30		
10	5.50	490	4335	1.04	4790.40	11		
11		500	4335	1.04	5053.90	12		
12		530	4241	1.05	5224.10	12		
Promedio						5022.80			12	81.11	2.386
13	6.00	460	4335	1.04	4493.50	13		
14		460	4335	1.04	4523.10	13		
15		450	4241	1.05	4438.80	14		
Promedio						4485.10			13	87.91	2.386
Comprobación								
16	5.10	428	4033	1.05	4232.90	13		
17		452	4260	1.00	4253.20	14		
18		411	3873	1.04	4021.10	13		
Promedio						4169.10			13	71.75	2.423

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.2.1.5. Determinación del Porcentaje Óptimo de Cemento Asfáltico.

Para la obtención del porcentaje óptimo de cemento asfáltico se analizó la variación de cada uno de los parámetros de diseño. Por el método Marshall se obtendrán las curvas

de Estabilidad y Flujo, mencionadas anteriormente, y así obtener las gráficas mencionadas posteriormente con los distintos contenidos de cemento asfáltico:

- Porcentaje de vacíos de la mezcla total (Vv) vs Porcentaje de Cemento Asfáltico.
- Peso Específico Bulk vs Porcentaje de Cemento Asfáltico.
- Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral (VAM) vs Porcentaje de Cemento Asfáltico.
- Flujo vs Porcentaje de Cemento Asfáltico.
- Estabilidad Corregida vs Porcentaje de Cemento Asfáltico.

Todos estos gráficos se los realizan de los valores obtenidos de las tablas 3.99 y 3.100; una vez obtenidos los gráficos se determina el valor del porcentaje óptimo de cemento asfáltico. A continuación, se presenta las gráficas obtenidas y el contenido óptimo de asfalto de la mezcla convencional.

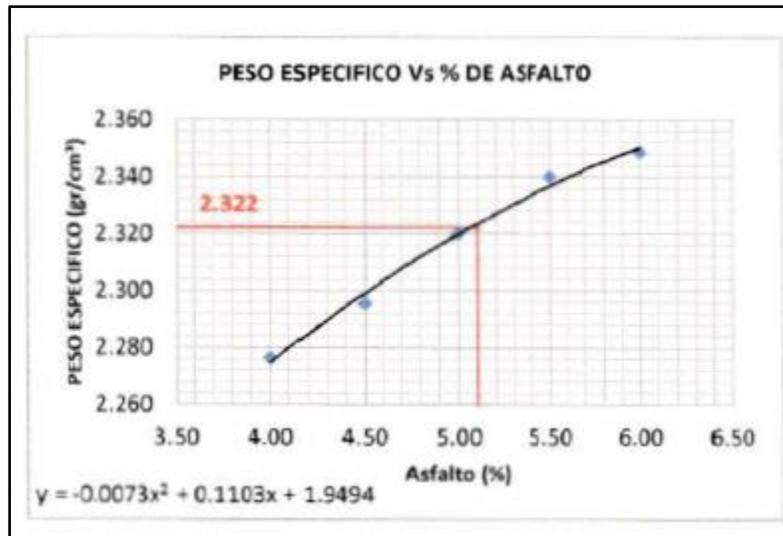


Ilustración 22: Peso Específico vs % de Asfalto mezcla convencional.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

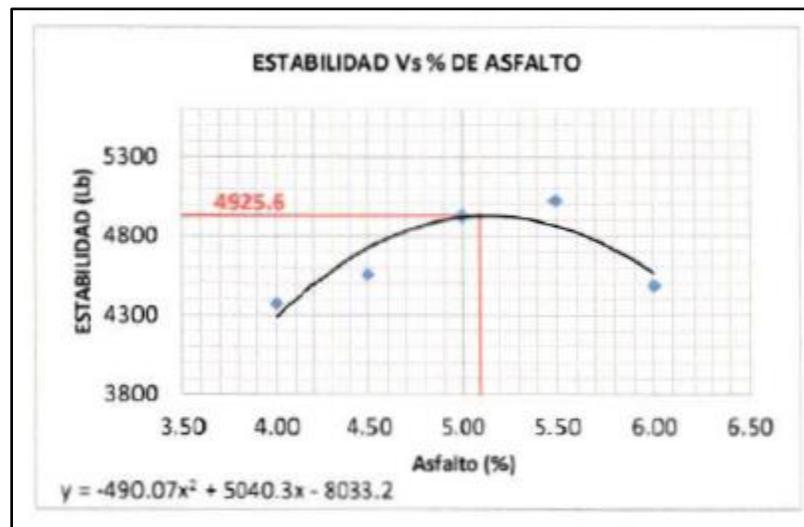


Ilustración 23: Estabilidad vs % de Asfalto mezcla convencional.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

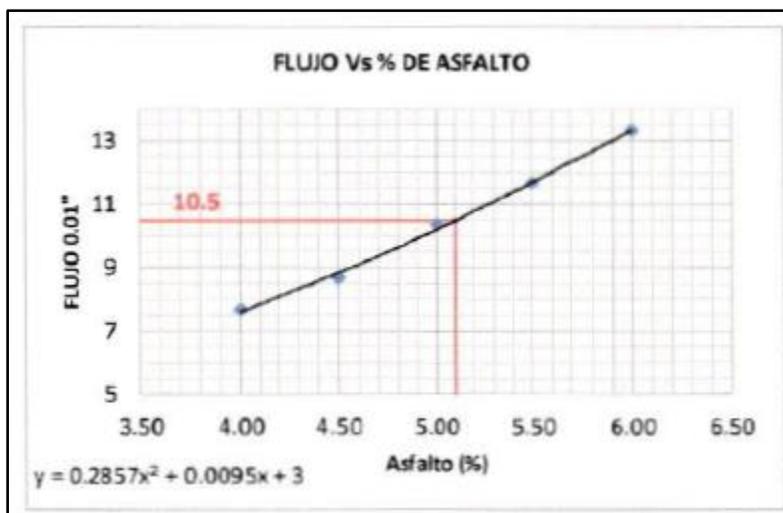


Ilustración 24: Flujo vs % de Asfalto mezcla convencional.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

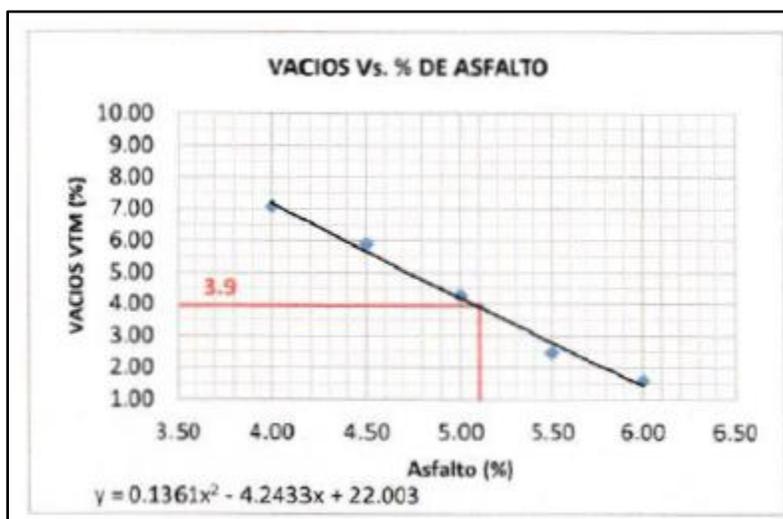


Ilustración 25: % de Vacíos vs % de Asfalto mezcla convencional.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde



Ilustración 26: % de Vacíos llenos con asfalto vs % de Asfalto mezcla convencional.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

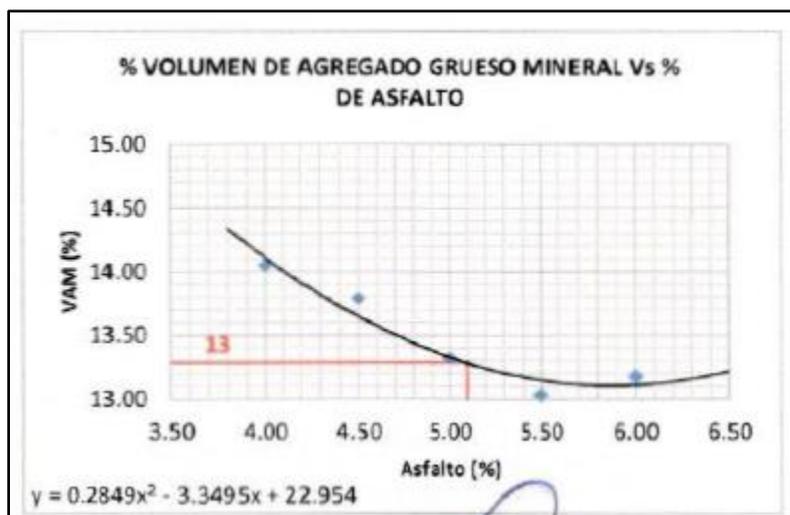


Ilustración 27: % de Volumen de agregado grueso mineral vs % de Asfalto mezcla convencional.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 106: Criterios MTOP para la mezcla convencional.

Criterios MOP	Resultado	Mínimo	Máximo
Estabilidad (libras)	4926	2200	-
Flujo (pulgada/100)	10.50	8	14
Porcentaje de vacíos (%)	3.9	3	5
Porcentaje de vacíos en el agregado mineral VAM (%)	13	12	-
Relación filler/betún	1.10	0,8	1,2
% De estabilidad retenida luego de 7 días en agua temperatura ambiente	85%	70	-
% De resistencia de la mezcla al daño causado por el agua (TSR)	95%	80	-

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

De acuerdo a la gráfica el contenido óptimo de asfalto es de 5,10% por lo que se cumple con los requisitos de la Tabla 3.94. Criterios MOP para diseño de mezclas asfálticas. Partiendo de lo establecido en los criterios de diseño, que nos indica que el contenido óptimo de asfalto es aquel con el que se logra obtener el 4.0 % de vacíos y el cumplimiento de las demás propiedades establecidas en las especificaciones, para este diseño se puede ver en el gráfico que él 4.0 % de vacíos lo obtenemos con 5,10% de Cemento Asfáltico, presentando la mezcla las siguientes características:

De esta combinación se desprende la siguiente formula maestra con sus respectivas tolerancias de acuerdo a las especificaciones:

Tabla 107: Determinación de la mezcla convencional.

Tamiz	% Pasante de Agregado	Tolerancias (MOP-001-F)
1" (25,40 mm)	100	±8%
¾" (19,40 mm)	97	±8%
½" (12,70 mm)	82	±8%
3/8" (9,50 mm)	72	±7%
No. 4 (4,75 mm)	53	±7%
No. 8 (2,36 mm)	37	±6%
No. 50 (0,30 mm)	15	±5%
No. 200 (0,075 mm)	6	±3%
Dosificación de material asfáltico en peso	5,10	±0,3 °C
Temperatura de la mezcla al salir de la mezcladora	150 °C	±10 °C
Temperatura de la mezcla al colocarla en el sitio	135 °C	±10 °C

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.2.2. Diseño Mezcla Asfáltica Agregando PETS.

Para la mezcla adicionando PETS, cabe recordar que la adición del plástico se la realizó en un calefón a 180°C, directo al cemento asfáltico. Por lo que en trabajos investigativos recomiendan agregar filler de origen mineral, para este tipo de mezclas asfálticas, para disminuir los espacios vacíos que se pueden producir en la mezcla. Para la elaboración de las briquetas para los ensayos de diseño fueron de igual cantidades que en el método anteriormente descrito. La metodología es la misma, por lo que ya sea explicado los pasos a seguir y los requerimientos exigidos por la normativa.

Para los criterios de diseño para este tipo de mezclas variamos los requisitos de acuerdo a la convencional, esto se debe a que el presente diseño, al tratarse de una zona de parqueaderos, se han tomado en cuenta las especificaciones MOP-001-F-2002 y las recomendaciones establecidas en el manual de Diseño Construcción y Desempeño Para Mezclas de Tráfico Pesado y el Manual de Diseño y Construcción de Mezclas SMA de la NAPA (National Asphalt Pavement Association). A continuación, se presenta el cuadro respectivo:

Tabla 108: Criterio de diseño para mezclas asfálticas agregando PETS.

Criterios MOP/NAPA	Mínimo	Máximo
Compactación, numero de golpes en cada cara de la probeta	75	
Estabilidad (libras)	1400	-
Porcentaje de vacíos (%)	3	5
% De resistencia de la mezcla al daño causado por el agua (TSR)	70	-

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 109: Granulometría de los agregados para la Mezcla cerradas ASTM D3515.

Graduaciones propuestas para mezclas cerradas (ASTM D3515)									
Abertura de malla	Mezclas cerradas								
	Tamaño máximo nominal del agregado								
	2 in (50 mm)	1 ½ in (37,5 mm)	1 in (25,0 mm)	¾ in (19,0 mm)	½ in (12,5 mm)	3/8 in (9,5 mm)	No. 4 (4,75 mm)	No. 8 (2,36 mm)	No. 16 (1,18 mm)
Graduaciones para mezclas de agregados (grueso, fino y filler)									
2 ½ in. (63mm)	100	...	...	...	...	...	...	...	...
2 in. (50mm)	90 – 100	100	...	...	...	...	...	...	...
1 ½ (37,5mm)	...	90 – 100	100	...	...	...	...	...	...
1 in. (25,0 mm)	60 – 80	...	90 – 100	100	...	...	...	...	...
¾ in. (19,0mm)	...	56 – 80	...	90 – 100	100	...	...	...	...
½ in. (12,5mm)	35 – 65	...	56 – 80	...	90 – 100	100	...	...	...
3/8 in. (9,5mm)	...	...	...	56 – 80	...	90 – 100	100	...	...
No. 4 (4,75mm)	17 – 47	23 – 53	29 – 59	35 – 65	44 – 74	55 – 85	60 – 100	...	100
No. 8 (2,36mm)	10 – 36	15 – 41	19 – 45	23 – 49	28 – 58	32 – 67	65 – 100	...	95 – 100
No. 16 (1,18mm)	...	...	...	...	...	...	40 – 80	...	85 – 100
No. 30 (600 µm)	...	...	...	...	...	...	35 – 65	...	70 – 95
No. 50 (300 µm)	3 – 15	4 – 16	5 – 17	5 – 19	5 – 21	7 – 23	7 – 40	...	45 – 75
No. 100 (150 µm)	...	...	...	...	...	...	3 – 20	...	20 – 40
No. 200 (75 µm)	0 - 5	0 - 6	1 - 7	2 - 8	2 - 10	2 - 10	2 - 10	...	9 - 20
Asfalto, Porcentaje con respecto al peso total de la mezcla									
	2 - 7	3 - 8	3 - 9	4 - 10	4 - 11	5 - 12	6 - 12	7 - 12	8 - 12

Fuente: (ASTM, 2013)

3.2.2.1. Mezcla de Agregados.

Para la obtención de la mezcla de los agregados, es importante usar agregados que presenten una buena granulometría, es por eso que se realizó la mezcla con tres tipos de agregados como los son fino, grueso e intermedio para que al unirlos estos ocupen todos los espacios y reduciendo el porcentaje de vacíos y tener muestras más compactas; Además se adiciona filler mineral para cumplir con los criterios y pueda cumplir todos los espacios que se generen al realizar las briquetas.

Tabla 110: Granulometría de los agregados para la Mezcla agregando PETS.

Análisis Granulométrico														
Tamiz	Granulometría Individual				Porcentaje de aporte				Combinación	Especificación		Faja de trabajo		Tolerancias
	fracción:				45 %	30 %	20 %	5 %		Min.	Max.	Min.	Max.	
	1	2	3	4	1	2	3	4						
1"	100	100	100	100	45	30	20	5	100	100	100	100	100	±8
¾"	98,24	100	100	100	44,2	30	20	5	99	90	100	91	100	±8
½"	29,96	100	100	100	13,5	30	20	5	68	50	74	60	74	±8
3/8"	3,01	80,79	100	100	1,4	24,2	20	5	51	25	60	44	58	±7
No. 4	0,84	4,72	96,76	100	0,4	1,4	19,4	5	26	20	28	20	28	±7
No. 8	0,7	1,47	79,94	100	0,3	0,4	16	5	22	16	24	16	24	±6
No. 16	0	0	69,75	100	0	0	14	5	19	13	21	13	21	±6
No. 30	0	0	60,42	99	0	0	12,1	5	17	12	18	12	18	±5
No. 50	0	0	39,98	94	0	0	8	4,7	13	12	15	12	15	±5
No. 200	0	0	16,15	73	0	0	3,2	3,7	7	6	10	6	10	±3

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Para la mezcla de agregados se trabajó con un 45 % de material grueso, 30 % de material intermedio y un 20 % de material fino, además se coloca un 5% de material filler de descendencia mineral como aporte al agregado fino; con el fin de que el material fino logre cubrir todos los espacios que se generan al momento de realizar las briquetas.

En el cuadro diseñamos la granulometría combinada para los agregados de acuerdo a las curvas máximas y mínimas y a la faja de trabajo que se presentan en la normativa MOP, donde los números 1 (agregado grueso 1"), 2 (agregado intermedio ½") y 3

(agregado fino 1/4") y 4 (cal). Se presenta su respectiva combinación y el porcentaje de tolerancias de acuerdo a las normas arriba mencionadas.

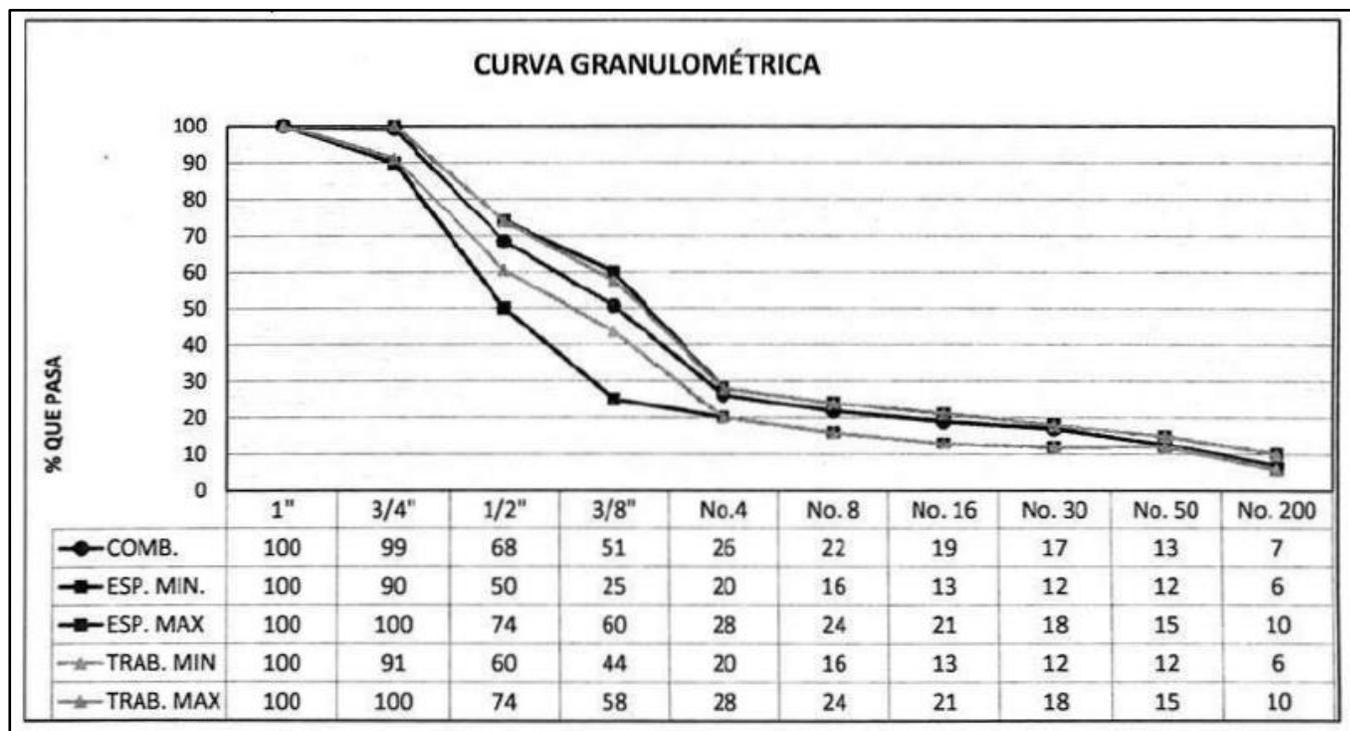


Ilustración 28: Granulometría de los agregados para la Mezcla adicionando PETS.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.2.2.2. *Diseño de Mezcla con Cemento Asfáltico.*

$$S = 0.17G + 0.33g + 2.30A + 12a + 135f \quad (1)$$

Dónde:

G: Porcentaje de agregado que pasa el tamiz 3/8".

g: Porcentaje de agregado que pasa el tamiz 3/8" y se retiene en el # 4.

A: Porcentaje de agregado que pasa el tamiz # 4 y se retiene en el # 50.

a: Porcentaje de agregado que pasa el tamiz # 50 y se retiene en el # 200.

f: Porcentaje de agregado que pasa el tamiz # 200.

Una vez obtenido el valor del área superficial de los agregados se coloca el valor del coeficiente del tráfico el cual se encuentra entre $M = 3,75$ y $4,25$. Para el diseño estudiado se tomó el valor de 4 siendo este un valor medio por el cual es conservador.

Finalmente, para obtener el valor del porcentaje de asfalto se debe reemplazar el valor obtenido del área superficial y el coeficiente del tráfico en la ecuación 2.

$$P = M * P^{0,2} \quad (2)$$

Tabla 111: Porcentaje Inicial de cemento asfaltico mezcla agregando PETS.

Calculo del Porcentaje de Asfalto			
G	Mayor a 3/8"	49,00	0,49
g	3/8" – No. 4	25,00	0,25
A	No. 4 – No. 50	13,00	0,13
a	No. 50 – No. 200	6,00	0,06
f	Pasante No. 200	5,00	0,05
S	$S = 0.17G + 0.33g + 2.30A + 12a + 135f$	5,93	
P	$P = M * P^{0,2}$	5,71	

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Una vez obtenido como resultado el 5,70% de cemento asfaltico, se debe utilizar valores de 0,5 por debajo y por arriba para así obtener 5 diferentes porcentajes de asfalto y ensayar 3 briquetas por cada porcentaje, de esta manera se obtendrá el peso del asfalto (3) que se debe colocar en la mezcla para obtener las briquetas, mezclarlas y posteriormente ensayarlas.

$$\% Asf = \frac{W_{asfalto}}{W_{agregado} + W_{asfalto}} \quad (3)$$

3.2.2.3. Determinación de Parámetros Volumétricos.

El método es igual al descrito a la mezcla convencional por lo que el cuadro queda establecido de igual manera, sin olvidar que los valores de la gravedad especifican Bulk de los agregados variará debido a la adicción de filler mineral; así como el valor de la gravedad aparente de los agregados; ambos valores al igual que el valor de la gravedad específica del cemento asfáltico debido a que se le agrego el material plástico.

Para la elaboración del diseño se tomaron 18 briquetas. A continuación, se presenta la tabla con las gravedades específicas de la mezcla adicionando PETS.

Tabla 112: Gravedades Específicas de la mezcla agregando PETS.

% Cemento Asfáltico	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	5.20
Gravedad Especifica Bulk mezcla agregados (Gsb)	2.541	2.541	2.541	2.541	2.541	2.541
Gravedad Especifica del asfalto (Gb)	1.009	1.009	1.009	1.009	1.009	1.009
Datos Ensayo RICE:						
Peso muestra en el aire (Gramos)	1505.30	1485.50	1477.70	1492.20	1488.90	1502.10
Peso Frasco + Agua (Gramos)	7976.90	7976.90	7976.90	7976.90	7976.90	7976.90
Peso Frasco + Agua + Muestra (Gramos)	8857.60	8841.60	8832.60	8836.10	8829.50	8849.30
Volumen c.c.	624.60	620.80	622.00	633.00	636.30	629.70
Gravedad Especifica máxima de la mezcla (Gmm)	2.410	2.393	2.376	2.357	2.340	2.385
Gravedad Especifica Efectiva de los agregados (Gse)	2.577	2.577	2.577	2.575	2.573	2.576
Gravedad Especifica Aparente de los agregados (Gsa)	2.668	2.668	2.668	2.668	2.668	2.668
Comprobación:						
Gsa>Gse>Gsb	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
Asfalto Absorbido por el agregado (Pba)	0.56	0.56	0.56	0.53	0.51	0.55
Contenido Asfalto efectivo en mezcla (Pbe)	3.96	4.47	4.97	5.50	6.02	4.68

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Para el análisis de los parámetros volumétricos son tomados 3 pesos de cada uno de los especímenes ensayados: El peso seco o al aire, el peso sumergido y el peso saturado superficialmente seco.

3.2.2.4. Análisis de Estabilidad y Flujo.

Se realiza el mismo cálculo que el establecido en la mezcla convencional, para la medición de la estabilidad y el flujo, como se describe en la metodología Marshall, fue necesario seguir la normativa. A continuación, se describe en forma breve el procedimiento:

- Las briquetas son cuerpos cilíndricos de 4 pulgadas de diámetro y 2,5 pulgadas de altura, que se compactaron con un martillo de 10 libras que cayó desde una altura de 18 pulgadas, aplicando 75 golpes por cara.
- Una vez fabricadas las probetas, fueron sumergidas en un baño de agua a 60°C. Esta temperatura representa la condición más extrema de servicio a la que será sometida la mezcla asfáltica en la estructura de pavimento.
- La probeta fue removida del baño, secada y colocada rápidamente en la prensa Marshall, que consiste en un dispositivo que aplica la carga por medio de mordazas perimetrales. Se contó con una celda de carga de 10 [kN] y un sensor de deformación de 50 [mm].

- La carga de ensayo fue aplicada a la probeta en una velocidad constante de 50 [mm/min], hasta la falla, definida como la carga máxima que la briqueta fue capaz de resistir.
- La carga de falla se registró como valor referencia de estabilidad Marshall y la lectura del medidor de deformación se registró como flujo.
- Este proceso se repitió, bajo las mismas condiciones, para cada una de las briquetas sometidas a ensayo.

Para la realización de la siguiente tabla se debe tomar en consideración la gravedad específica del asfalto y la gravedad específica Bulk de los agregados, valores ya establecidos en la tabla 3.98 en la sección anterior.

G_a (Gravedad Especifica del Asfalto) =1,009 g/cm³

G_{sb} (Gravedad Especifica Bulk de los agregados) =2,541 g/cm³

Tabla 113: Propiedades de la mezcla asfáltica agregando PETS.

Muestra No.	% Asfalto	Pesos			Volumen (cm ³)	Gravedad específica Bulk	Volumen C.A.	Volumen Ag.	% Vacíos	% VAM	% Efectivo C.A.
		Aire	Agua	S.S.S							
1	4.50	1183.5	673.7	1195.1	521.4	2.270					
2		1185.9	674.9	1198.1	523.2	2.267					
3		1197.5	680.0	1208.2	528.2	2.267					
Promedio						2.268	8.86	85.25	5.90	14.75	2.04
4	5.00	1183.1	669.9	1189.0	519.1	2.279					
5		1195.8	677.7	1203.1	525.4	2.276					
6		1188.0	674.0	1192.1	518.1	2.293					
Promedio						2.283	10.04	85.35	4.60	14.65	4.47
7	5.50	1189.5	676.8	1194.4	517.6	2.298					
8		1203.5	684.5	1208.1	523.6	2.299					
9		1184.4	674.0	1189.6	515.6	2.297					
Promedio						2.298	11.25	85.47	3.28	14.53	4.97

10	6.00	1189.3	678.6	1192.8	514.2	2.313					
11		1184.0	673.0	1187.1	514.1	2.303					
12		1194.0	679.0	1197.2	518.2	2.304					
Promedio						2.307	12.51	85.34	2.15	14.66	5.50
13	6.50	1179.8	671.8	1182.3	503.0	2.311					
14		1183.5	673.0	1186.4	502.9	2.305					
15		1188.0	675.0	1191.0	516.0	2.302					
Promedio						2.306	13.69	84.87	1.44	15.13	6.02
Comprobación											
16	5.20	1181.6	672.6	1186.1	513.5	2.301					
17		1181.0	670.7	1186.7	516.0	2.289					
18		1186.5	674.3	1193.2	518.9	2.287					
Promedio						2.292	10.56	85.53	3.91	14.47	4.68

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Para la siguiente tabla se utiliza la prensa Marshall para determinar los valores de estabilidad y flujo y un factor de corrección que determinamos de la siguiente figura:

Tabla 114: Factor de Corrección de la Estabilidad.

CORRECCION DE LOS VALORES DE ESTABILIDAD		
VOLUMEN DE LA BRIQUETA (cm ³)	ESPESOR APROXIMADO DE LA BRIQUETA (cm)	FACTOR DE CORRECCIÓN
200 – 213	2.54	5.56
214 – 225	2.70	5.00
226 – 237	2.86	4.55
238 – 250	3.02	4.17
251 – 264	3.17	3.85
265 – 276	3.33	3.57
277 – 289	3.49	3.33
290 – 301	3.65	3.03
302 – 316	3.81	2.78
317 – 328	3.97	2.50
329 – 340	4.13	2.27
341 – 353	4.29	2.08
354 – 367	4.44	1.92
368 – 379	4.60	1.79
380 – 392	4.76	1.67
393 – 405	4.92	1.56
406 – 420	5.08	1.47
421 – 431	5.24	1.39
432 – 443	5.40	1.32
444 – 456	5.56	1.25
457 – 470	5.71	1.19
471 – 482	5.87	1.14
483 – 495	6.03	1.09
496 – 508	6.19	1.04
509 – 522	6.35	1.00
523 – 535	6.51	0.96
536 – 546	6.67	0.93
547 – 559	6.82	0.89
560 – 573	6.96	0.86
574 – 585	7.14	0.83
586 – 598	7.30	0.81
599 – 610	7.46	0.78
611 – 625	7.62	0.76

Fuente: (MOP - 001-F , 2002).

Tabla 115: Valores de estabilidad y flujo de la mezcla agregando PETS.

Muestra No.	% Asfalto	Estabilidad				Flujo (0.01")	VAF	Gmm
		Lectura Dial	Dial	Factor de corrección	Corregido			
1	4.50	338	3233.0	1.00	3233.00	10		
2		308	2947.6	0.96	2829.70	9		
3		312	2985.7	0.96	2866.30	9		
Promedio						3031.40			9	60.02	2.410
4	5.00	280	2681.0	1.00	2681.00	11		
5		317	3033.3	0.96	2911.90	9		
6		307	2938.1	1.00	2938.10	10		
Promedio						2796.50			10	68.56	2.393
7	5.50	322	3080.8	1.00	3080.80	11		
8		279	2671.5	0.96	2564.70	10		
9		280	2681.0	1.00	2681.00	12		
Promedio						2822.70			11	77.46	2.376
10	6.00	272	2604.8	1.00	2604.80	11		
11		291	2671.5	0.96	2785.80	12		
12		245	2681.0	1.00	2347.40	12		
Promedio						2695.30			12	85.34	2.357
13	6.50	255	2442.8	1.04	2540.50	12		
14		250	2395.1	1.04	2490.90	13		
15		220	2108.9	1.00	2108.90	13		
Promedio						2380.10			13	90.47	2.340
Comprobación								
16	5.20	300	2871.5	1.00	2871.50	12		
17		289	2766.8	1.00	2766.80	11		
18		318	3042.8	1.00	3042.80	12		
Promedio						2893.70			12	72.98	2.385

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.2.2.5. Determinación del Porcentaje Óptimo de Cemento Asfáltico.

Para la obtención del porcentaje óptimo de cemento asfáltico se analizó la variación de cada uno de los parámetros de diseño. Por el método Marshall se obtendrán las curvas

de Estabilidad y Flujo, mencionadas anteriormente, y así obtener las gráficas mencionadas posteriormente con los distintos contenidos de cemento asfáltico:

- Porcentaje de vacíos de la mezcla total (Vv) vs Porcentaje de Cemento Asfáltico.
- Peso Específico Bulk vs Porcentaje de Cemento Asfáltico.
- Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral (VAM) vs Porcentaje de Cemento Asfáltico.
- Flujo vs Porcentaje de Cemento Asfáltico.
- Estabilidad Corregida vs Porcentaje de Cemento Asfáltico.

Todos estos gráficos se los realizan de los valores obtenidos de las tablas 3.99 y 3.100; una vez obtenidos los gráficos se determina el valor del porcentaje óptimo de cemento asfáltico. A continuación, se presenta las gráficas obtenidas y el contenido óptimo de asfalto de la mezcla convencional.

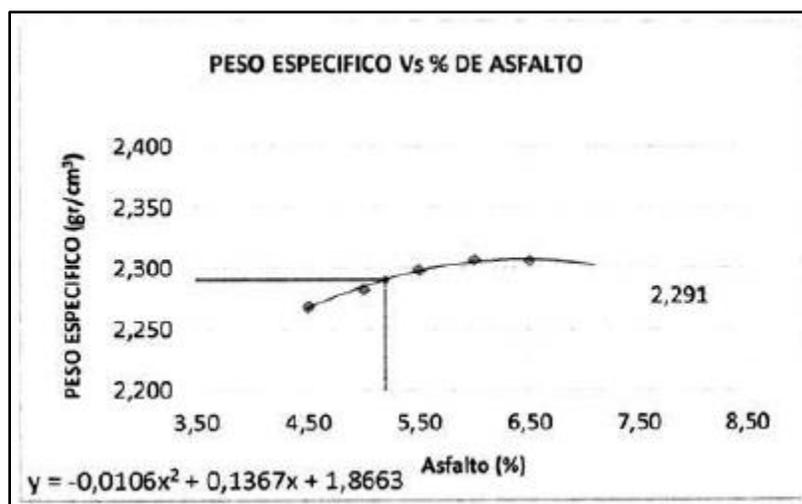


Ilustración 29: Peso Específico vs % de Asfalto mezcla agregando PETS.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

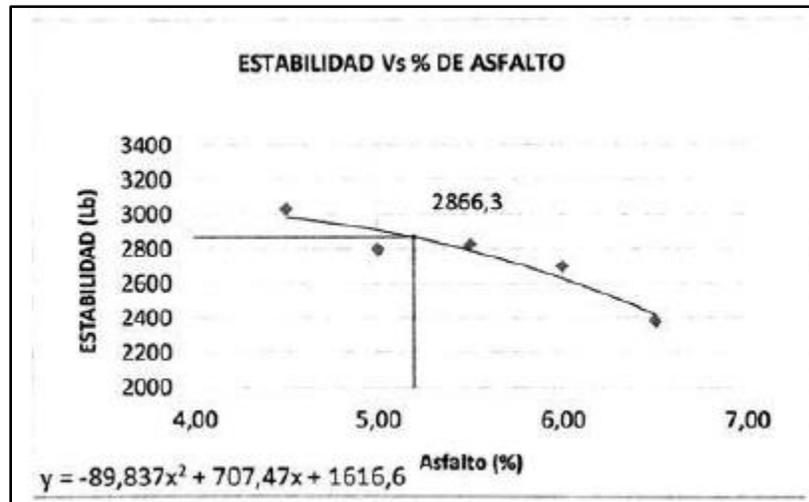


Ilustración 30: Estabilidad vs % de Asfalto mezcla agregando PETS.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

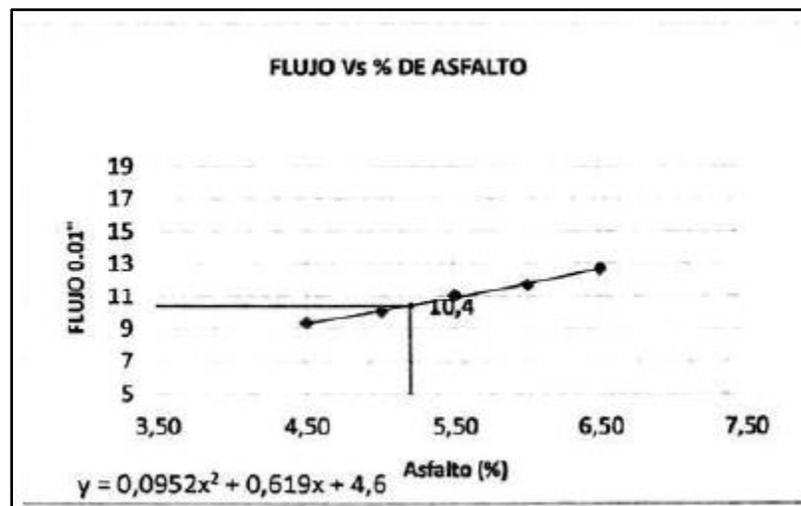


Ilustración 31: Flujo vs % de Asfalto mezcla agregando PETS.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

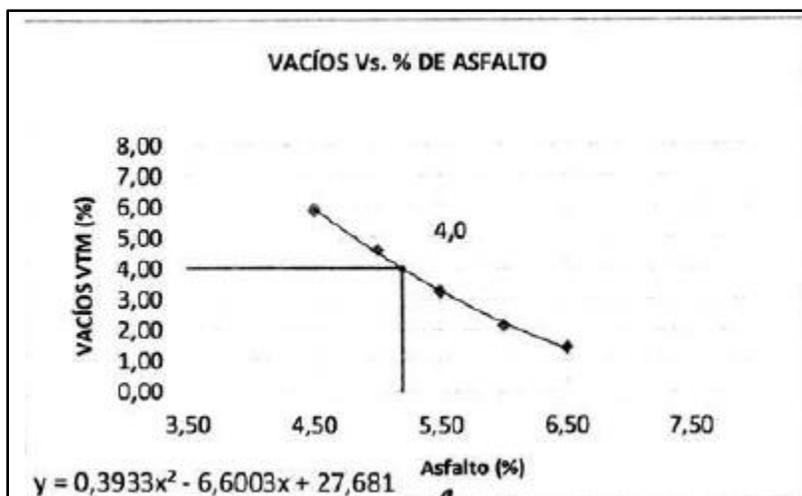


Ilustración 32: % de Vacíos vs % de Asfalto mezcla agregando PETS.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

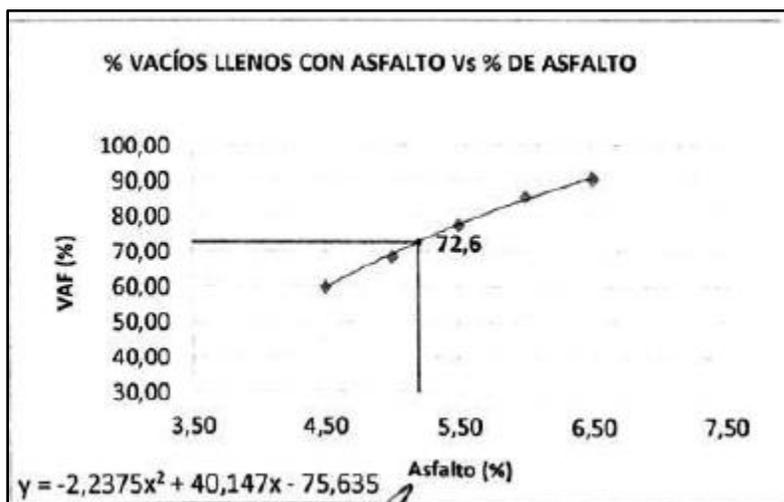


Ilustración 33: % de Vacíos llenos con asfalto vs % de Asfalto mezcla agregando PETS.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde



Ilustración 34: % de Volumen de agregado grueso mineral vs % de Asfalto mezcla agregando PETS.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

De acuerdo a la gráfica el contenido óptimo de asfalto es de 5,0% por lo que se cumple con los requisitos de la Tabla 3.94. Criterios MOP para diseño de mezclas asfálticas. Partiendo de lo establecido en los criterios de diseño, que indica que el contenido óptimo de asfalto es aquel con el que se logra obtener el 4.0% de vacíos y el cumplimiento de las demás propiedades establecidas en las recomendaciones, para este diseño se puede verificar en el gráfico que él 4.0% de vacíos se obtiene con 5.0% de Cemento Asfáltico, presentando la mezcla las siguientes características:

Tabla 116: Resultados para la mezcla agregando PETS.

Criterios MOP	Resultado
Peso Específico (g/cm ³)	2.292
Estabilidad (libras)	2893.7
Flujo (pulgada/100)	12
Porcentaje de vacíos (%)	3.91
% De resistencia de la mezcla al daño causado por el agua (TSR)	96.1%

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Quedando el diseño final de la mezcla como muestra el siguiente cuadro:

Tabla 117: Determinación de la mezcla agregando PETS.

Tamiz	% Pasante de Agregado	Tolerancias (MOP-001-F)
1" (25,40 mm)	100	±8%
¾" (19,40 mm)	99	±8%
½" (12,70 mm)	68	±8%
3/8" (9,50 mm)	51	±7%
No. 4 (4,75 mm)	26	±7%
No. 8 (2,36 mm)	22	±6%
No. 16 (1,18 mm)	19	±6%
No. 50 (0,30 mm)	17	±5%
No. 200 (0,075 mm)	7	±3%
Dosificación de material asfáltico en peso	5,0	±0,3 °C
Temperatura de la mezcla al salir de la mezcladora	150 °C	±10 °C
Temperatura de la mezcla al colocarla en el sitio	135 °C	±10 °C

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.3. Control de Calidad de la Mezcla

Esta sección corresponde a los ensayos de desempeño estructural efectuados sobre las mezclas, buscando determinar su comportamiento en un nivel más específico, luego de exhibir características satisfactorias en el ensayo bajo la metodología Marshall. Ya que estas pruebas presentan un alto grado de especificidad y no se cuenta con los equipos necesarios a nivel interno, en la Universidad Guayaquil, las muestras fueron ensayadas en el laboratorio de la Universidad Católica Santiago de Guayaquil, contando con supervisión permanente durante su ejecución y con todas las consideraciones de la normativa. Las pruebas de módulo de rigidez, compresión cíclica sin confinar (creep

dinámico) y fatiga, realizadas con el equipo Nottingham Asphalt Tester (NAT). Estas pruebas corresponden a 9 briquetas.

Las mezclas asfálticas, como parte integrante de un pavimento, deben presentar ciertas propiedades estructurales y funcionales que aseguren el buen comportamiento de las mismas durante su vida de servicio.

3.3.1. Control de Calidad Mezcla Convencional.

Para el desarrollo de esta fase de la investigación realizamos ensayos de laboratorio a la mezcla asfáltica convencional, para determinar diferentes tipos de parámetros que nos serviría para la comparación con las normativas. En cada ensayo se especifica la norma a emplear y los procedimientos respectivos para su elaboración; así como las tablas con los cálculos respectivos.

3.3.1.1. *TSR (Tensile Strength Ratio), Relación De Esfuerzo De Tensión.*

El ensayo de tracción indirecta implica la aplicación de una carga de compresión a lo largo de los ejes diametrales del espécimen cilíndrico. La mecánica del ensayo es tal que un estado de tensiones de tracción casi uniformes se desarrolla a lo largo del plano diametral. (ASTM, 2013)

El ensayo de tracción indirecta reproduce el estado de tensiones en la fibra inferior de la capa asfáltica o zona de tracción. Es un método práctico y sencillo para caracterizar las propiedades de las mezclas bituminosas o evaluar el fallo provocado por tensiones de tracción. (ASTM, 2013)

Dicho ensayo consiste en cargar una probeta cilíndrica con una carga de compresión diametral a lo largo de dos generatrices opuestas como se lo apreciara en la siguiente figura. Este tipo de carga provoca un esfuerzo de tracción relativamente uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical y esta tracción es la que agota la probeta y desencadena la rotura en el plano diametral. (ASTM, 2013).

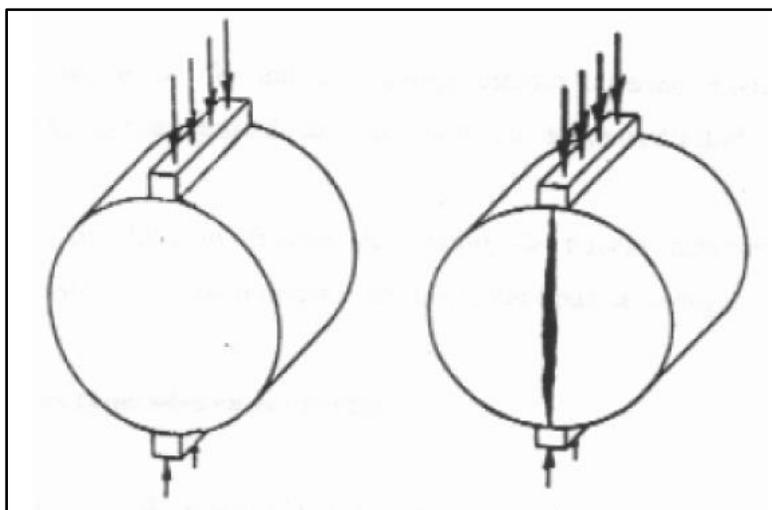


Ilustración 35: Configuración de la carga y Rotura del ensayo TSR.

Fuente: (ASTM, 2013).

La reacción de los especímenes a la carga puede ser captada por medio de un registrador de multicanales o un dispositivo de adquisición de datos analógico digital. A continuación, se presenta los resultados de la prueba TSR aplicada en el diseño de la

mezcla convencional. Iniciando con una prueba de susceptibilidad a la humedad. (ASTM, 2013)

El ensayo de susceptibilidad es la norma AASHTO T 283. Este ensayo que no se basa en el desempeño sirve para identificar si una combinación de ligante asfáltico y agregado es susceptible a la acción del agua.

Tabla 118: Parámetros de análisis de entrada y generales mezcla convencional.

Parámetros de análisis de entrada y generales	Símbolo	Condición Húmeda			Condición Seca		
		1	2	3	4	5	6
Numero de espécimen	No.						
Diámetro (m)	D	101,60	101,60	101,60	101,60	101,60	101,60
Espesor (m)	t	65,56	66,47	65,63	66,40	65,83	66,54
Peso Seco Aire (g)	A	1193,90	1197,00	1184,80	1174,30	1187,40	1186,40
Peso Saturado Superficialmente Seco (g)	B	1197,70	1203,20	1194,20	1178,00	1193,70	1200,00
Peso Sumergido (g)	C	670,40	674,50	669,30	657,80	666,10	672,00
Volumen de Espécimen (B-C)	E	527,30	528,70	524,90	520,20	527,60	528,00
Gravedad Especifica Bulk (Gmb) (A/E)	F	2,264	2,264	2,257	2,257	2,251	2,247
Gravedad Especifica Teórica Máxima (Gmm)	G	2,418	2,418	2,418	2,418	2,418	2,418
% de Vacíos (Va) (100*(G-F)/G)	H	6,400	6,370	6,650	6,600	6,900	7,100
Volumen de Vacío Aire (H*E)/100	J	33,54	33,66	34,91	34,55	36,53	37,35
Carga Resultante Especímenes en Seco	P				7098,00	6888,00	7644,00

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 119: Saturación a vacío parcial: 5 minutos a una presión de 20 in de Hg en agua destilada a 25°C mezcla convencional.

Saturación a vacío parcial: 5 minutos a una presión de 20 in de Hg en agua destilada a 25°C					
Peso Saturado Superficialmente Seco (g)	B`	1215.8	1218.5	1207.4	Nota: Un grado de saturación aceptable esta entre 55 y 80%, según ASTM D 4867, sección 8.6.3., si el grado de saturación es menor a 55% usar más presión de vacío y/o tiempo, si el grado de saturación es mayor a 80%, el espécimen ha sido dando y debe ser descartado.
Peso Sumergido (g)	C`	682.0	681.2	675.2	
Volumen del Espécimen (B`-C`)	E`	533.0	537.3	532.2	
Volumen de aguas Absorbida (B`-A)	J`	21.9	21.5	22.6	
% Saturación (100*J`/J)		65.3%	63.9%	64.7%	
% Hinchamiento (100*(E`-E)/E)		1.2%	1.6%	1.4%	

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 120: Acondicionamiento en condición húmeda: Baño María a 60°C por 24 horas mezcla convencional.

Acondicionamiento en condición húmeda: Baño María a 60°C por 24 horas					
Espesor (m)	t''	65.67	66.63	65.70	Nota: Según ASTM D 4867 en su sección 8.9.1., un grado de saturación mayor al 80% después del acondicionamiento en húmedo por 24 horas a 60°C es considerado como aceptable.
Peso Saturado Superficialmente Seco (g)	B''	1222.8	1225.1	1215.4	
Peso Sumergido (g)	C''	692.0	691.2	685.2	
Volumen (B''-C'')	E''	530.8	533.9	530.2	
Volumen de agua Absorbida (B''-A)	J''	28.9	28.1	30.6	
% Saturación (100*J''/J)		86%	83%	88%	
% Hinchamiento (100*(E''-E)/E)		0.01	0.01	0.00	
Carga Resultante Especímenes en Seco	p''	6888.0	6804.0	6720.0	

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 121: Cálculo del TSR (Tensil Strength Ratio), Relación de Esfuerzo de Tensión mezcla convencional.

Cálculo del TSR (Tensil Strength Ratio), Relación de Esfuerzo de Tensión					
Esfuerzo de especímenes en seco (kPa), (2000*P/p*t''*D)	Std				669.81 | 655.63 | 719.82
Esfuerzo de especímenes en húmedo (kPa), (2000*P/p*t''*D)	2	658.33	641.39	641.58	
Promedio de Esfuerzo Especímenes en Seco	681.75	Nota: La especificación MOP-001-f requiere un TSR mayor o igual a 80%, para una mezcla asfáltica en caliente diseñada por el método Marshall.			
Promedio de Esfuerzo Especímenes en Húmedo	647.10				
Relación de Esfuerzo de Tensión Stb/Std	94.9%				

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.3.1.2. Módulo de Rigidez.

Indica la capacidad de distribuir la carga y proteger las capas subyacentes por lo que es una propiedad dominante en el comportamiento del pavimento. Su evaluación en el equipo NAT se realizó a la temperatura de 20°C, empleando un nivel de deformación

controlada de 5 micrones y ondas haversine con intervalo de tiempo entre el inicio del pulso de carga y el punto en el que la carga es máxima, de 0,12 segundos. Los resultados obtenidos son:

Tabla 122: Resultados del módulo de rigidez 20°C mezcla convencional.

Muestras	Módulo de Rigidez 20 °C (MPa)
1	3928
2	3396
3	3357
Promedio	3560
Desviación Estándar	319
Coefficiente Variación	9.0

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

De acuerdo a la propuesta de exigencias para pruebas de desempeño con equipo NAT desarrollada por el Laboratorio de Carreteras de la UCSG, y en fase de prueba por parte del MTOP, la calificación de las mezclas asfálticas para capas de rodadura en función del módulo de rigidez es la siguiente:

- 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

Basado en el criterio anterior, los resultados obtenidos son satisfactorios.

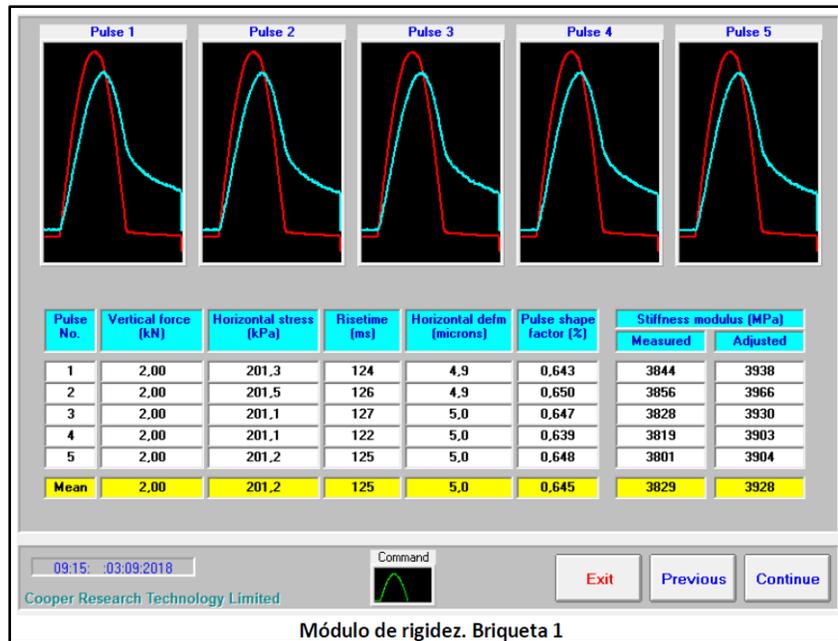


Ilustración 36: Ensayo de Modulo de rigidez Briqueta 1 mezcla convencional.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

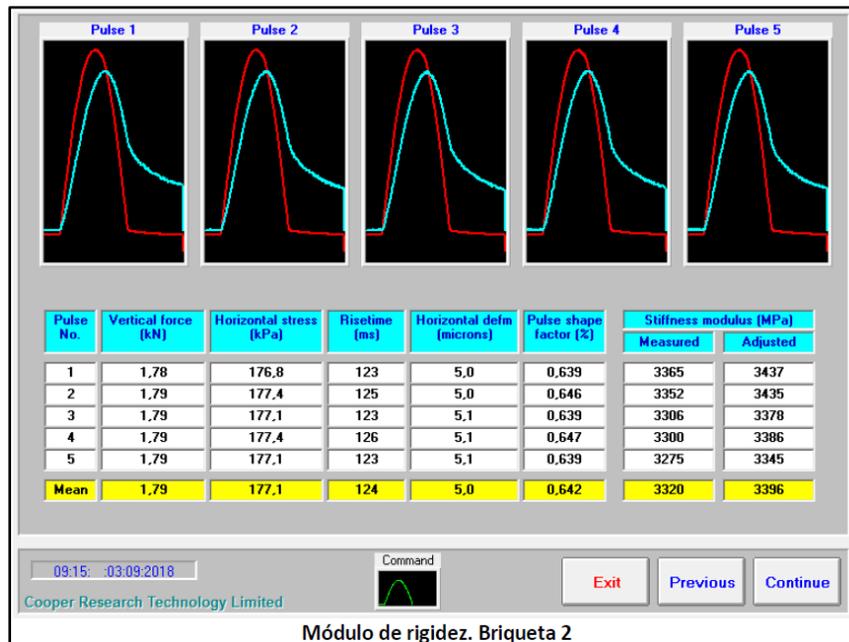
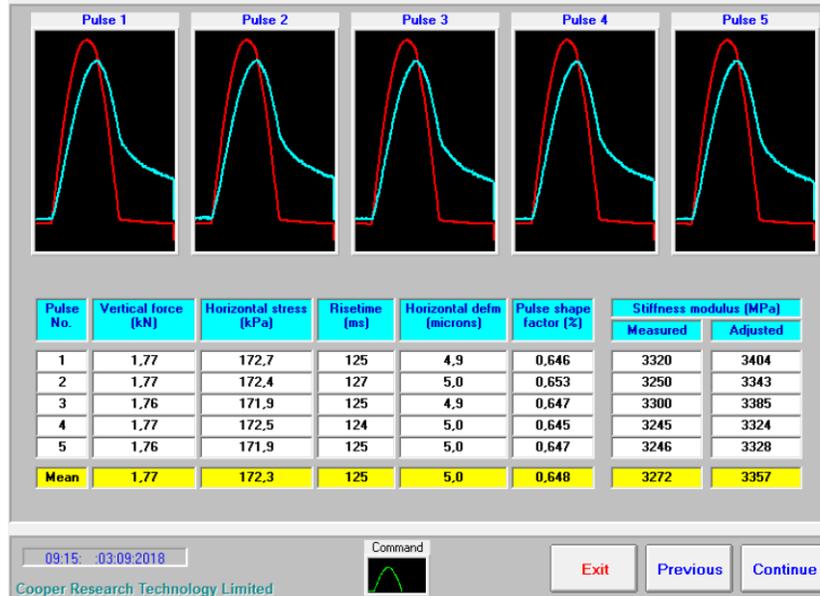


Ilustración 37: Ensayo de Modulo de rigidez Briqueta 2 mezcla convencional.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde



Módulo de rigidez. Briqueta 3

Ilustración 38: Ensayo de Módulo de rigidez Briqueta 3 mezcla convencional.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.3.1.3. Deformación Permanente.

La prueba de compresión cíclica uniaxial se realiza para estimar el comportamiento ante las deformaciones plásticas. Un ciclo de carga consiste en la aplicación de una presión durante 1 segundo seguido por 1 segundo de descanso, con ondas cuadráticas. El ensayo se ejecuta a una temperatura de 40°C, con una magnitud de carga de 100 kPa, midiendo las deformaciones provocadas por 3600 repeticiones de dicha carga. Los resultados obtenidos son:

Tabla 123: Resultados del creep dinámico mezcla convencional.

Muestras	Creep Dinámico (%)
4	0.403
5	0.366
6	0.401
Promedio	0.39
Desviación Estándar	0.026
Coeficiente Variación	6.7

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

De acuerdo a la propuesta de exigencias para pruebas de desempeño con equipo NAT la calificación de las mezclas asfálticas en función del porcentaje de deformación en la prueba de compresión cíclica es la siguiente:

- Mezclas satisfactorias: valores menores o iguales a 1%
- Mezclas inadecuadas: valores mayores a 1%.

A partir del resultado promedio obtenido la mezcla puede considerarse satisfactorios.

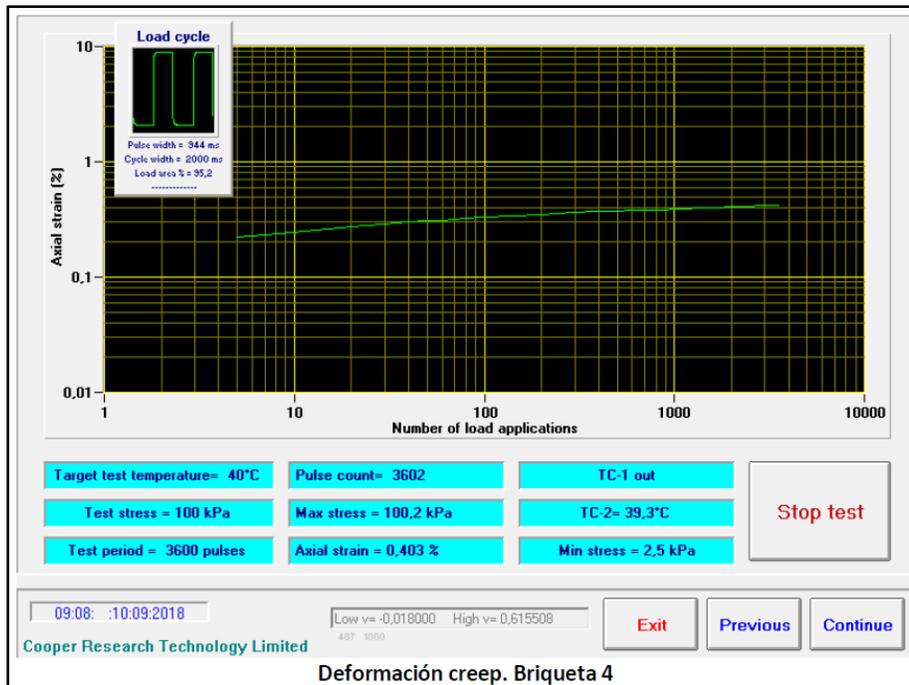


Ilustración 39: Ensayo de Deformación Creep Briqueta 4 mezcla convencional.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

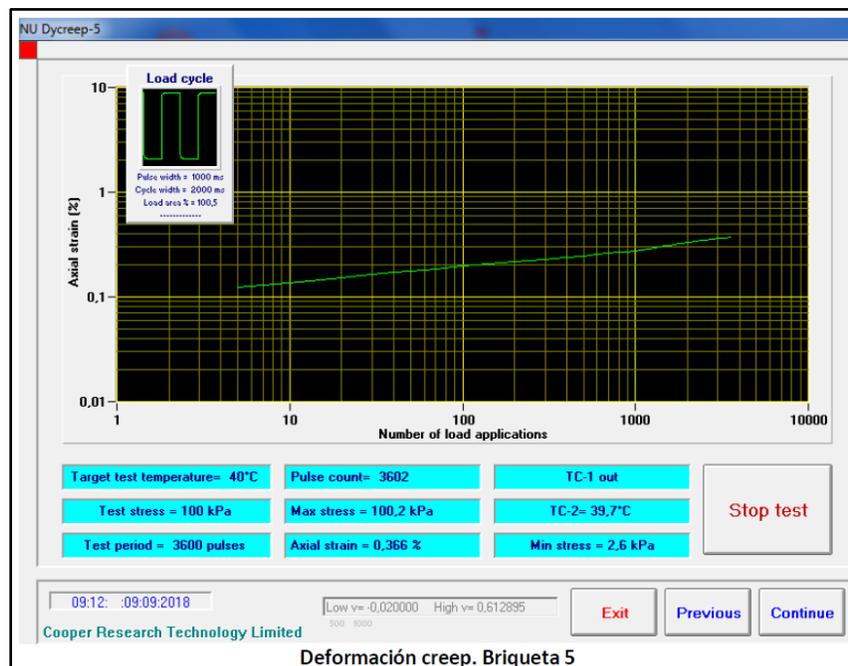
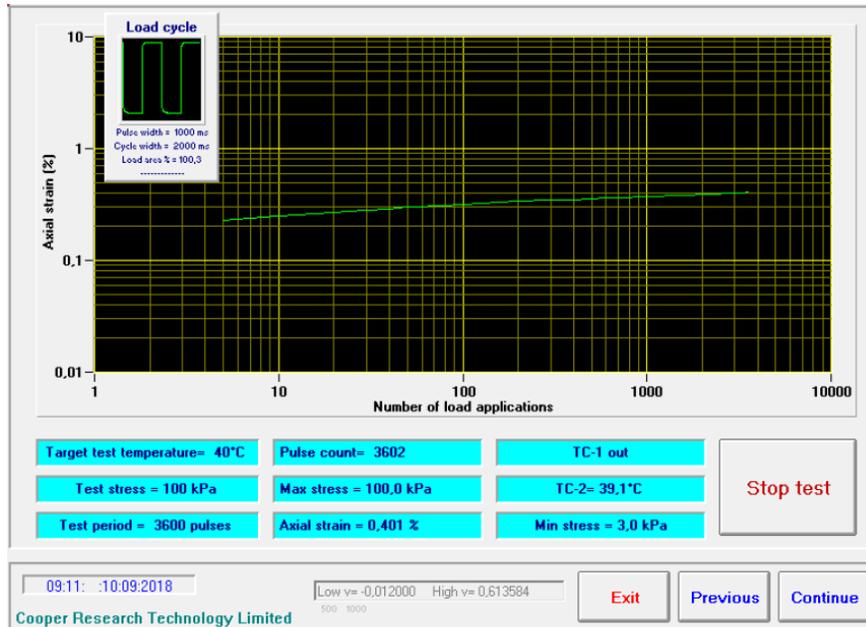


Ilustración 40: Ensayo de Deformación Creep Briqueta 5 mezcla convencional.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde



Deformación creep. Briqueta 6

Ilustración 41: Ensayo de Deformación Creep Briqueta 6 mezcla convencional.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.3.1.4. *Fatiga.*

La prueba de fatiga se realizó por el método diametral o de tracción indirecta, aplicado a la briqueta un esfuerzo controlado. Previamente, tiene que determinarse el módulo de rigidez bajo el mismo esfuerzo. Con la prueba de fatiga se obtiene el número de aplicaciones de carga requeridas para alcanzar la rotura o una deformación máxima de 5 mm. El tiempo de carga es de 120 milisegundos y la temperatura para el estudio fue de 20°C. Los resultados suelen representarse en gráficas log-log, relacionando el número de repeticiones para el fallo en el eje de las abscisas con los esfuerzos o las deformaciones en el eje de las ordenadas. Los resultados obtenidos son:

Para la siguiente tabla debemos tener en cuenta un coeficiente de Poisson de 0,35.

Tabla 124: Resultados Módulo de Rigidez mezcla convencional.

Esfuerzo (KPa)	Repeticiones	Deformación (* 10 ⁻⁶)	Módulo de Rigidez (MPa)
200			
250			
300	11241	217	2836
350			
400	3461	299	2743
450	1961	347	2662
500			

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

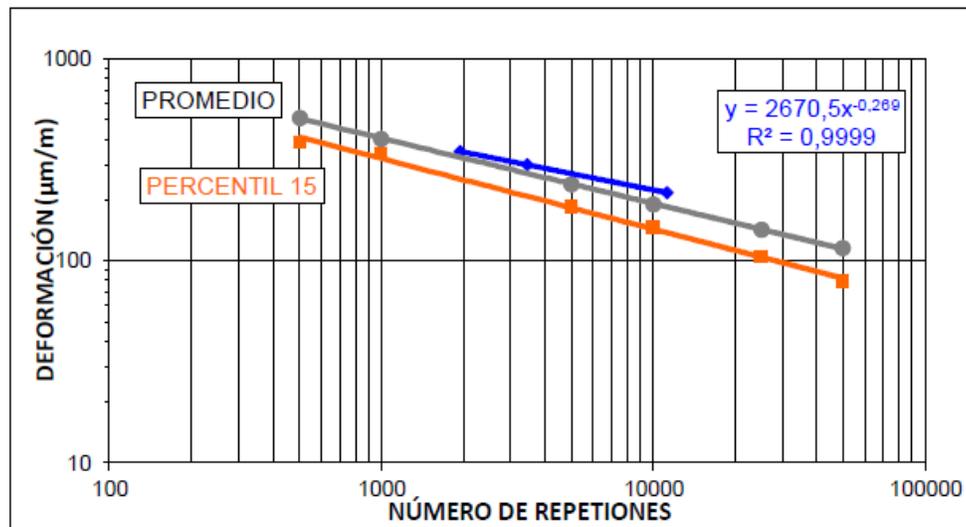


Ilustración 42: Deformación vs Numero de repeticiones mezcla convencional.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Puede observarse en color azul y con la ecuación de ajuste incluida, el comportamiento a la fatiga evaluado. Según la propuesta de exigencias para pruebas de desempeño con equipo NAT la calificación de las mezclas asfálticas en función de su fatiga es la siguiente:

“Si los puntos para la mezcla en particular analizada caen por debajo de la línea del percentil (color naranja), el comportamiento estimado será INADECUADO. Si los puntos se ubican por arriba de la línea del promedio (color gris), el comportamiento estimado será SATISFACTORIO. Entre ambas líneas el comportamiento no puede garantizarse como bueno, aunque puede considerarse como TOLERABLE mientras se desarrollan más estudios que aporten a la reducción de este umbral.”

De acuerdo a la línea de ajuste obtenida con los resultados de las pruebas de fatiga realizadas, la mezcla puede considerarse satisfactoria.

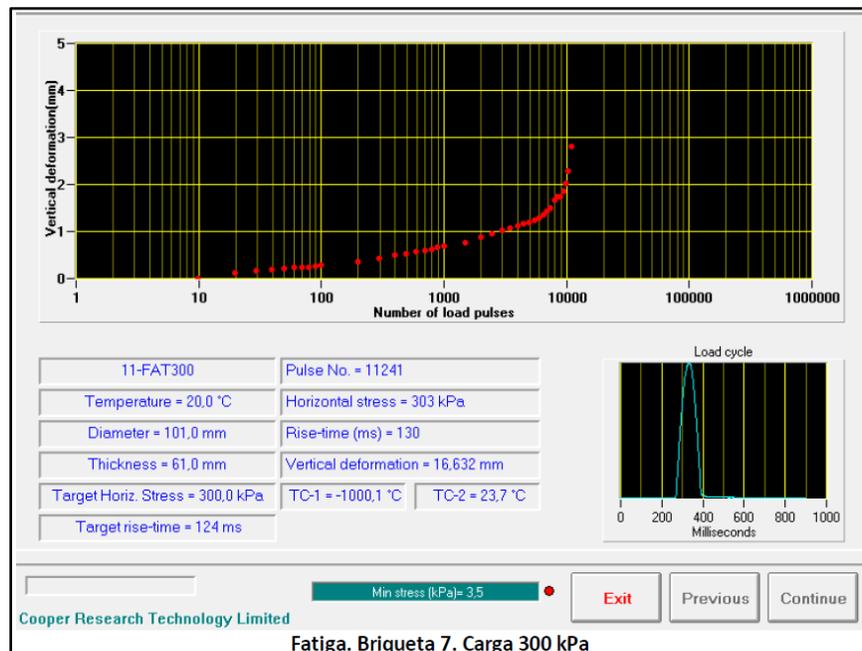


Ilustración 43: Ensayo de Fatiga Briqueta 7 mezcla convencional.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

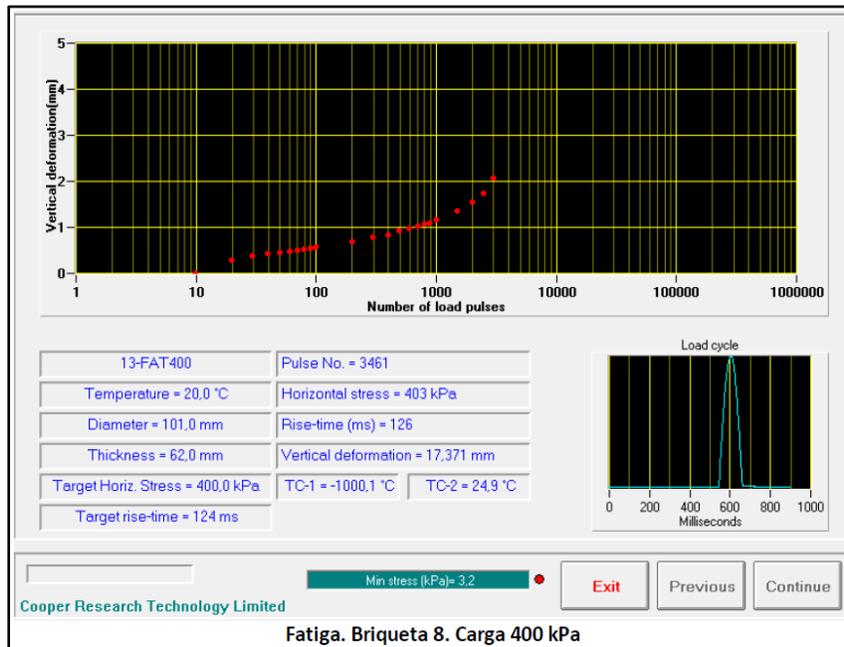


Ilustración 44: Ensayo de Fatiga Briqueta 8 mezcla convencional.
Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

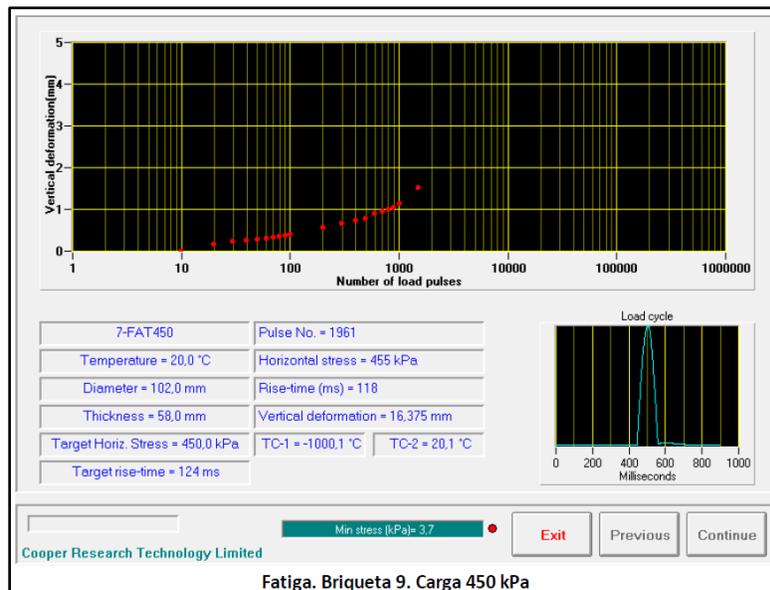


Ilustración 45: Ensayo de Fatiga Briqueta 9 mezcla convencional.
Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

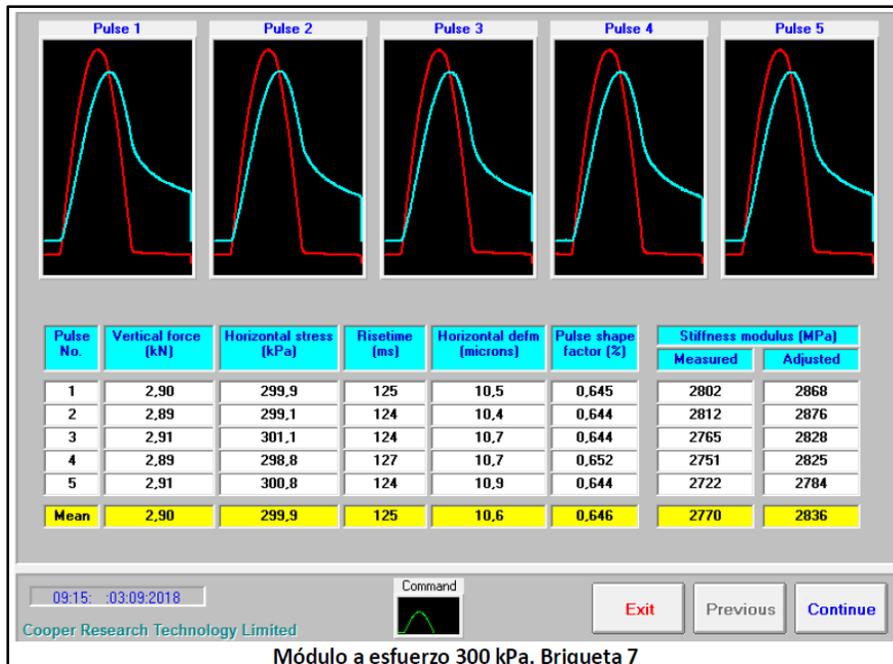


Ilustración 46: Módulo de Esfuerzo Briqueta 7 mezcla convencional.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

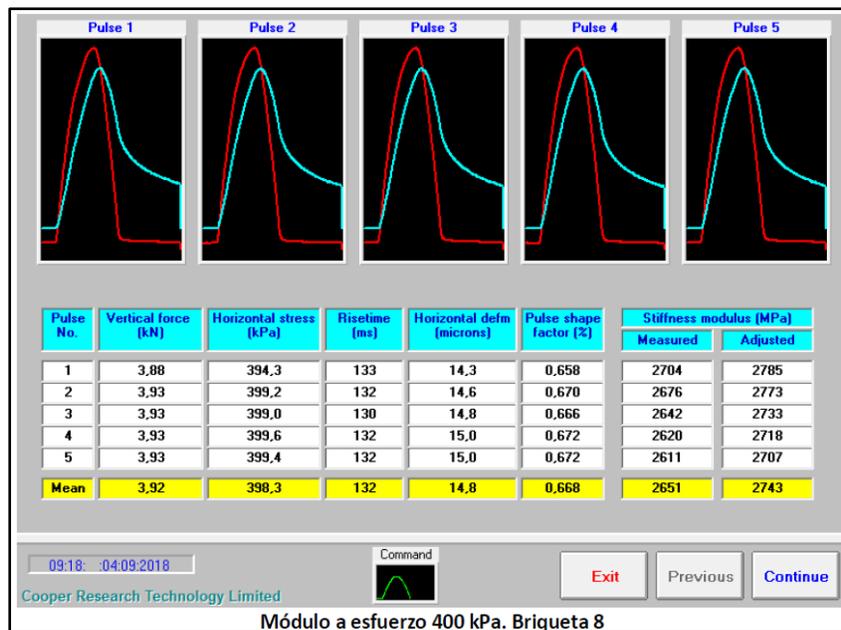


Ilustración 47: Módulo de Esfuerzo Briqueta 8 mezcla convencional.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

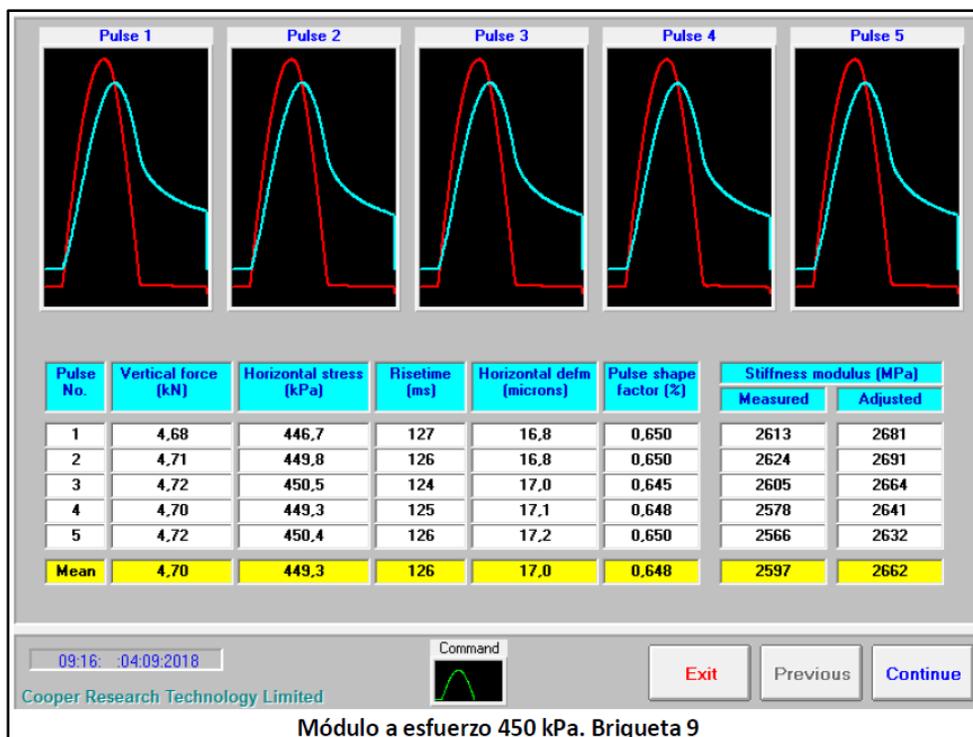


Ilustración 48: Módulo de Esfuerzo Briqueta 9 mezcla convencional.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.3.2. Control De Calidad Mezcla Agregando PETS.

Al igual que se realizó el control de calidad a la mezcla convencional se realiza lo mismo con la mezcla que contiene el PET, siguiendo los mismos ensayos y procedimientos. Por lo que se adjunta los resúmenes de los ensayos y sus respectivas especificaciones.

Durante la realización de los ensayos se procedió con la fabricación de 15 briquetas de la mezcla asfáltica que contiene como componente el material plástico. Estas briquetas tienen las dimensiones establecidas por la norma MOP - 001-F 2002.

3.3.2.1. TSR (Tensil Strength Ratio), Relación De Esfuerzo De Tensión.

Tabla 125: Parámetros de análisis de entrada y generales mezcla agregando PETS.

Parámetros de análisis de entrada y generales	Símbolo	Condición Húmeda			Condición Seca		
		No.	1	2	3	4	5	6
Numero de espécimen	No.						
Diámetro (m)	D	101,60	101,60	101,60	101,60	101,60	101,60
Espesor (m)	t	69,00	69,00	69,60	69,30	69,00	68,30
Peso Seco Aire (g)	A	1182,30	1174,80	1208,00	1181,70	1184,00	1201,10
Peso Saturado Superficialmente Seco (g)	B	1196,70	1188,40	1217,00	1193,00	1196,00	1210,40
Peso Sumergido (g)	C	666,60	662,20	676,80	665,50	665,20	672,00
Volumen de Espécimen (B-C)	E	530,10	526,20	540,20	527,50	531,70	538,40
Gravedad Especifica Bulk (Gmb) (A/E)	F	2,230	2,233	2,236	2,240	2,227	2,231
Gravedad Especifica Teórica Máxima (Gmm)	G	2,388	2,388	2,388	2,388	2,388	2,388
% de Vacíos (Va) (100*(G-F)/G)	H	6,602	6,507	6,356	6,190	6,750	6,580
Volumen de Vacío Aire (H*E)/100	J	35,00	34,24	34,34	32,65	35,89	35,43
Carga Resultante Especímenes en Seco	P				6,43	5,33	5,54

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 126: Saturación a vacío parcial: 5 minutos a una presión de 20 in de Hg en agua destilada a 25°C mezcla agregando PETS.

Saturación a vacío parcial: 5 minutos a una presión de 20 in de Hg en agua destilada a 25°C					
Peso Saturado Superficialmente Seco (g)	B`	1207.4	1198.7	1229.5	Nota: Un grado de saturación aceptable esta entre 55 y 80%, según ASTM D 4867, sección 8.6.3., si el grado de saturación es menor a 55% usar más presión de vacío y/o tiempo, si el grado de saturación es mayor a 80%, el espécimen ha sido dando y debe ser descartado.
Peso Sumergido (g)	C`	671.1	668.0	689.0	
Volumen del Espécimen (B`-C`)	E`	536.3	530.7	540.5	
Volumen de aguas Absorbida (B`-A)	J`	25.1	23.9	21.5	
% Saturación (100*J`/J)		71.72 %	69.8%	62.61 %	
% Hinchamiento (100*(E`-E)/E)		1.17%	0.86%	0.06%	

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 127: Acondicionamiento en condición húmeda: Baño María a 60°C por 24 horas mezcla agregando PETS.

Acondicionamiento en condición húmeda: Baño María a 60°C por 24 horas					
Espesor (m)	t''	69.90	69.37	70.10	Nota: Según ASTM D 4867 en su sección 8.9.1., un grado de saturación mayor al 80% después del acondicionamiento en húmedo por 24 horas a 60°C es considerado como aceptable.
Peso Saturado Superficialmente Seco (g)	B''	1217.9	1210.9	1237.8	
Peso Sumergido (g)	C''	678.9	672.2	694.9	
Volumen (B''-C'')	E''	539.0	538.7	542.9	
Volumen de agua Absorbida (B''-A)	J''	35.6	36.1	29.8	
% Saturación (100*J''/J)		101.72	105.43	86.79	
% Hinchamiento (100*(E''-E)/E)		1.68	2.38	0.50	
Carga Resultante Especímenes en Seco	p''	5.04	5.92	5.88	

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 128: Cálculo del TSR (Tensil Strength Ratio), Relación de Esfuerzo de Tensión mezcla agregando PETS.

Cálculo del TSR (Tensil Strength Ratio), Relación de Esfuerzo de Tensión							
Esfuerzo de especímenes en seco (kPa), (2000*P/p*t''*D)	Std				5.81	4.84	5.09
Esfuerzo de especímenes en húmedo (kPa), (2000*P/p*t''*D)	2	4.52	5.35	5.26			
Promedio de Esfuerzo Especímenes en Seco	5.25	Nota: La especificación MOP-001-f requiere un TSR mayor o igual a 80%, para una mezcla asfáltica en caliente diseñada por el método Marshall.					
Promedio de Esfuerzo Especímenes en Húmedo	5.04						
Relacion de Esfuerzo de Tensión Stb/Std	96.1%						

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.3.2.2. Módulo de Rigidez.

Indica la capacidad de distribuir la carga y proteger las capas subyacentes por lo que es una propiedad dominante en el comportamiento del pavimento. Su evaluación en el equipo NAT se realizó a la temperatura de 20°C, empleando un nivel de deformación controlada de 5 micrones y ondas haversine con intervalo de tiempo entre el inicio del

pulso de carga y el punto en el que la carga es máxima, de 0,12 segundos. Los resultados obtenidos son:

Tabla 129: Resultados del módulo de rigidez 20°C mezcla agregando PETS.

Muestras	Módulo de Rigidez 20 °C (MPa)
1	3347
2	3457
3	3214
Promedio	3339
Desviación Estándar	122
Coeficiente Variación	3.6

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

De acuerdo a la propuesta de exigencias para pruebas de desempeño con equipo NAT desarrollada por el Laboratorio de Carreteras de la UCSG, y en fase de prueba por parte del MTOP, la calificación de las mezclas asfálticas para capas de rodadura en función del módulo de rigidez es la siguiente:

- 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

Basado en el criterio anterior, los resultados obtenidos son satisfactorios.

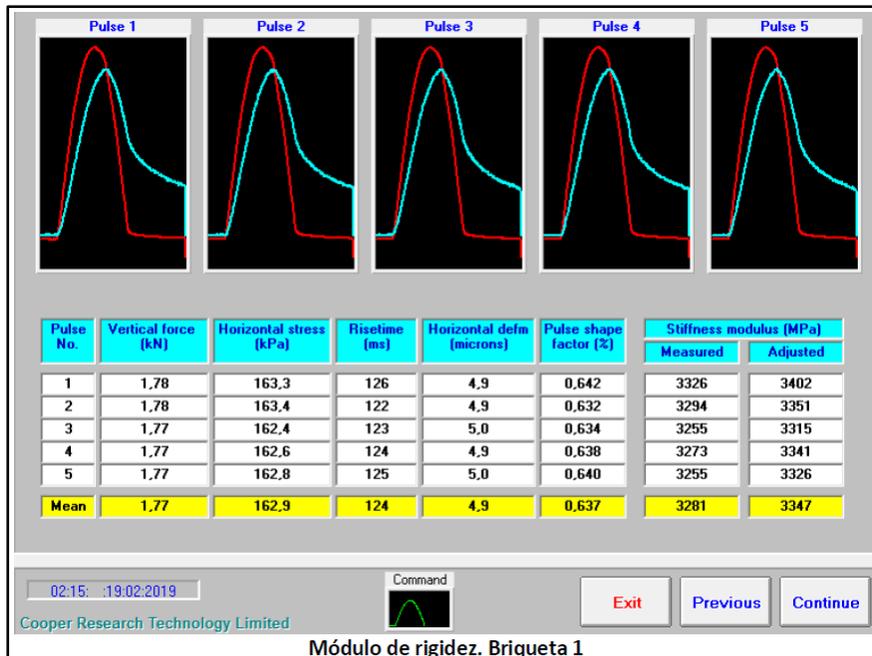


Ilustración 49: Ensayo de Modulo de rigidez Briqueta 1 mezcla agregando PETS.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

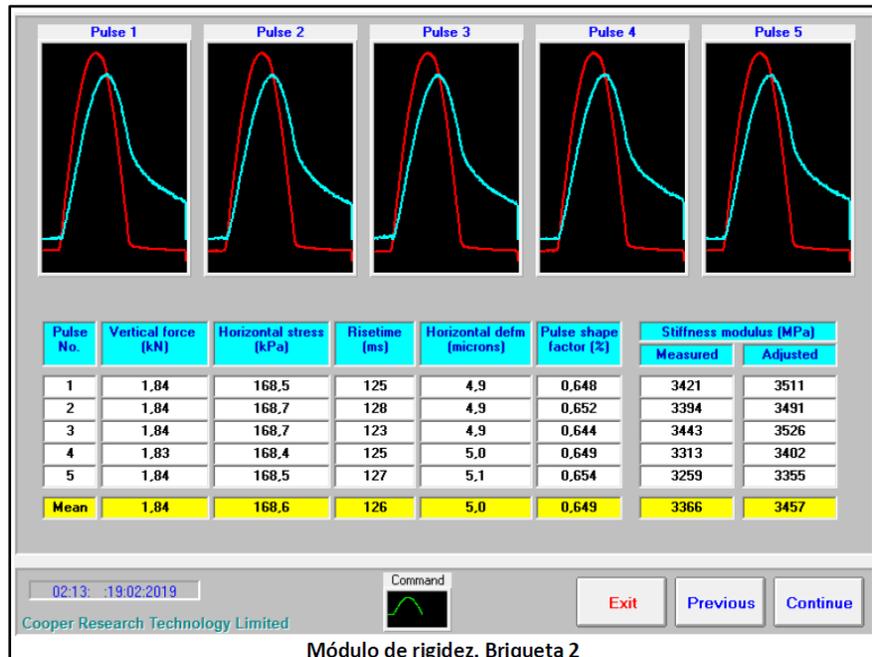


Ilustración 50: Ensayo de Modulo de rigidez Briqueta 2 mezcla agregando PETS.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

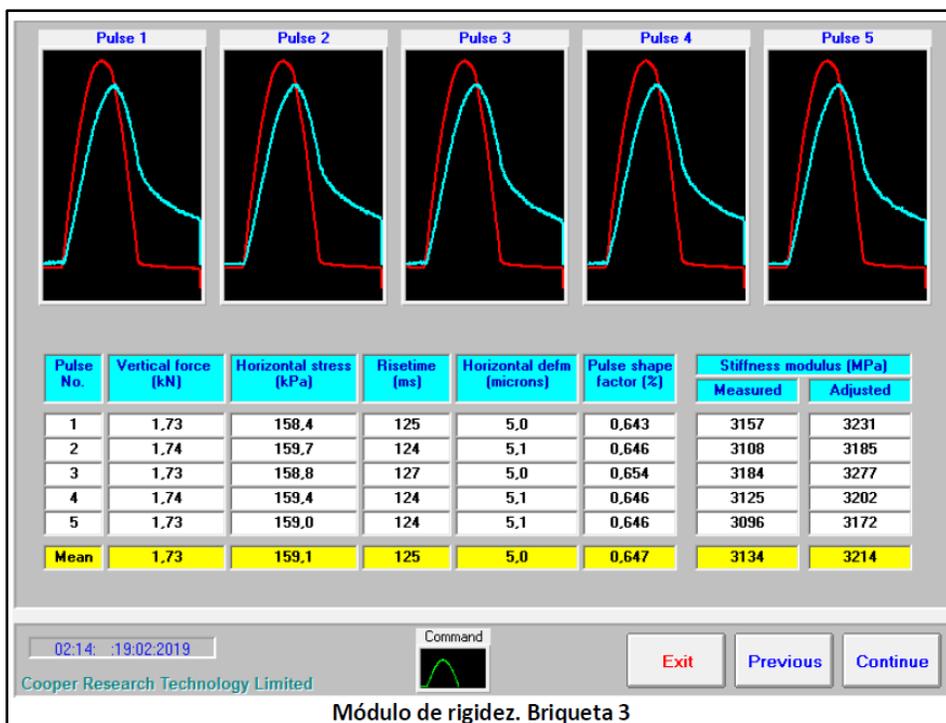


Ilustración 51: Ensayo de Modulo de rigidez Briqueta 3 mezcla agregando PETS.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.3.2.3. *Deformación Permanente.*

La prueba de compresión cíclica uniaxial se realiza para estimar el comportamiento ante las deformaciones plásticas. Un ciclo de carga consiste en la aplicación de una presión durante 1 segundo seguido por 1 segundo de descanso, con ondas cuadráticas. El ensayo se ejecuta a una temperatura de 40°C, con una magnitud de carga de 100 kPa, midiendo las deformaciones provocadas por 3600 repeticiones de dicha carga. Los resultados obtenidos son:

Tabla 130: Resultados del creep dinámico mezcla agregando PETS.

Muestras	Creep Dinámico (%)
4	0.991
5	0.704
6	0.708
Promedio	0.80
Desviación Estándar	0.165
Coefficiente Variación	20.5

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

De acuerdo a la propuesta de exigencias para pruebas de desempeño con equipo NAT la calificación de las mezclas asfálticas en función del porcentaje de deformación en la prueba de compresión cíclica es la siguiente:

- Mezclas satisfactorias: valores menores o iguales a 1%
- Mezclas inadecuadas: valores mayores a 1%.

A partir del resultado promedio obtenido la mezcla puede considerarse satisfactorios.

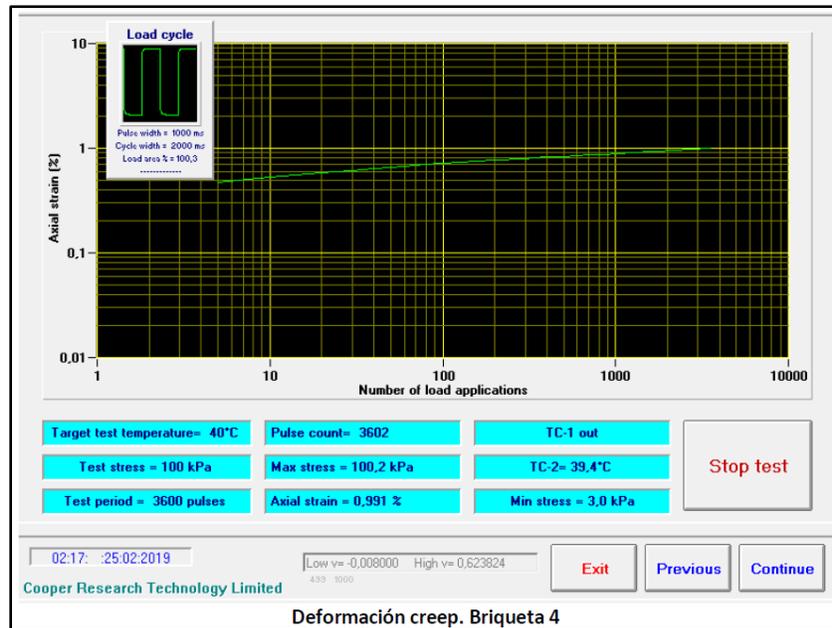


Ilustración 52: Ensayo de Deformación Creep Briqueta 4 mezcla agregando PETS.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

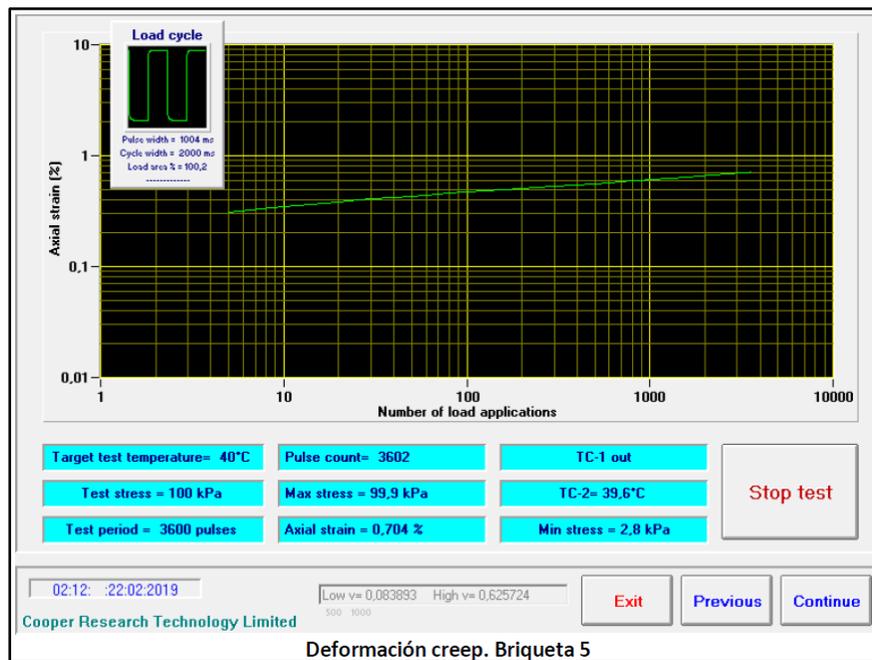


Ilustración 53: Ensayo de Deformación Creep Briqueta 5 mezcla agregando PETS.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde



Ilustración 54: Ensayo de Deformación Creep Briqueta 6 mezcla agregando PETS.
Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

3.3.2.4. *Fatiga.*

La prueba de fatiga se realizó por el método diametral o de tracción indirecta, aplicado a la briqueta un esfuerzo controlado. Previamente, tiene que determinarse el módulo de rigidez bajo el mismo esfuerzo. Con la prueba de fatiga se obtiene el número de aplicaciones de carga requeridas para alcanzar la rotura o una deformación máxima de 5 mm. El tiempo de carga es de 120 milisegundos y la temperatura para el estudio fue de 20°C. Los resultados suelen representarse en gráficas log-log, relacionando el número

de repeticiones para el fallo en el eje de las abscisas con los esfuerzos o las deformaciones en el eje de las ordenadas. Los resultados obtenidos son:

Para la siguiente tabla debemos tener en cuenta un coeficiente de Poisson de 0,35.

Tabla 131: Resultados Módulo de Rigidez mezcla agregando PETS.

Esfuerzo (KPa)	Repeticiones	Deformación (* 10 ⁻⁶)	Módulo de Rigidez (MPa)
300	5431	213	2891
350	1041	355	2021
400	461	601	1534

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

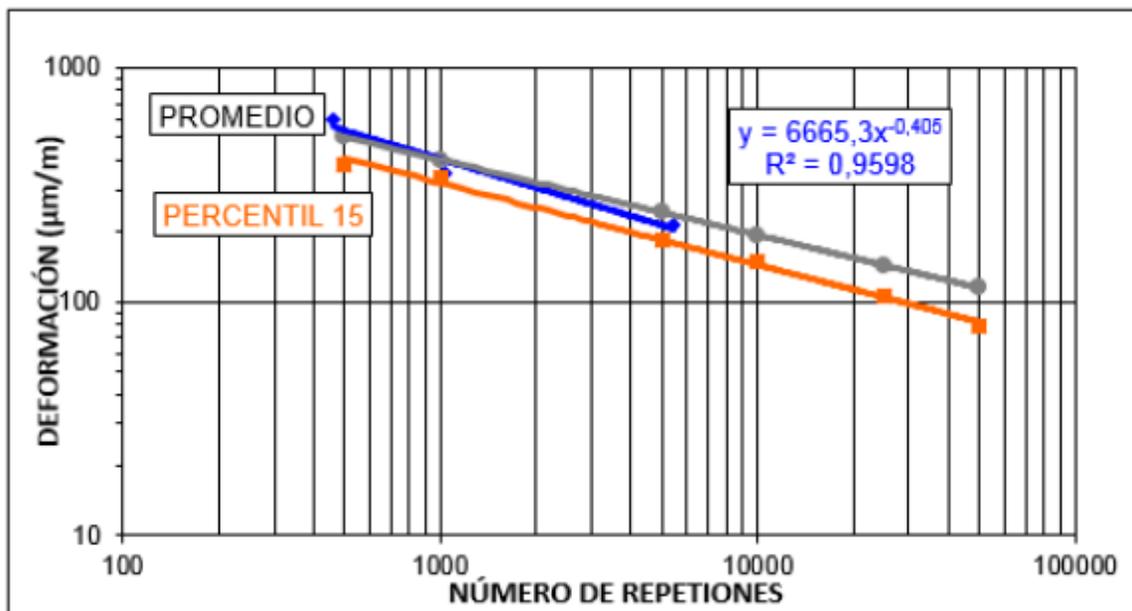


Ilustración 55: Deformación vs Numero de repeticiones mezcla agregando PETS.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Puede observarse en color azul y con la ecuación de ajuste incluida, el comportamiento a la fatiga evaluado. Según la propuesta de exigencias para pruebas de desempeño con equipo NAT la calificación de las mezclas asfálticas en función de su fatiga es la siguiente:

“Si los puntos para la mezcla en particular analizada caen por debajo de la línea del percentil (color naranja), el comportamiento estimado será INADECUADO. Si los puntos se ubican por arriba de la línea del promedio (color gris), el comportamiento estimado será SATISFACTORIO. Entre ambas líneas el comportamiento no puede garantizarse como bueno, aunque puede considerarse como TOLERABLE mientras se desarrollan más estudios que aporten a la reducción de este umbral.”

De acuerdo a la línea de ajuste obtenida con los resultados de las pruebas de fatiga realizadas, la mezcla puede considerarse satisfactoria.

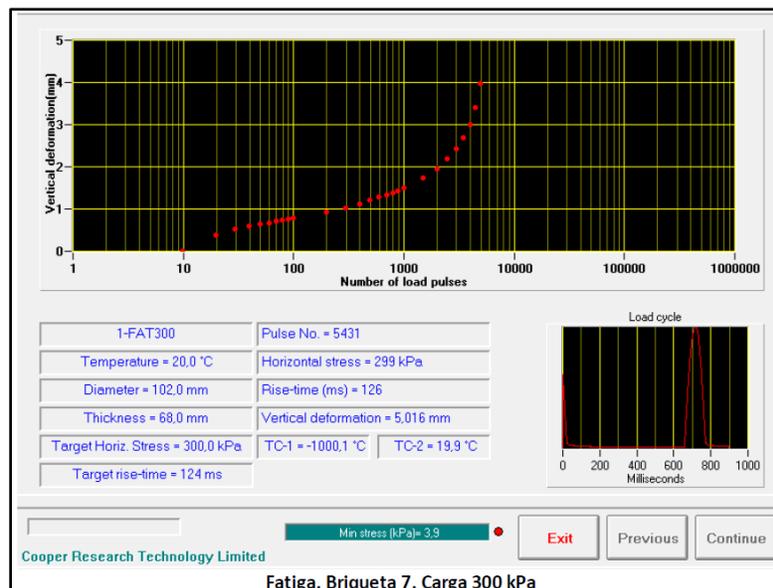


Ilustración 56: Ensayo de Fatiga Briqueta 7 mezcla agregando PETS.
Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

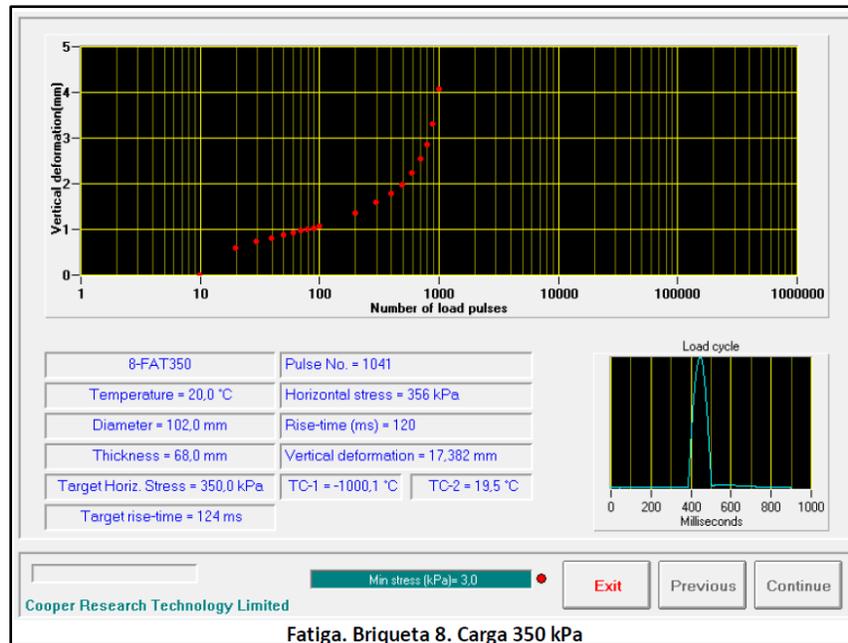


Ilustración 57: Ensayo de Fatiga Briqueta 8 mezcla agregando PETS.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

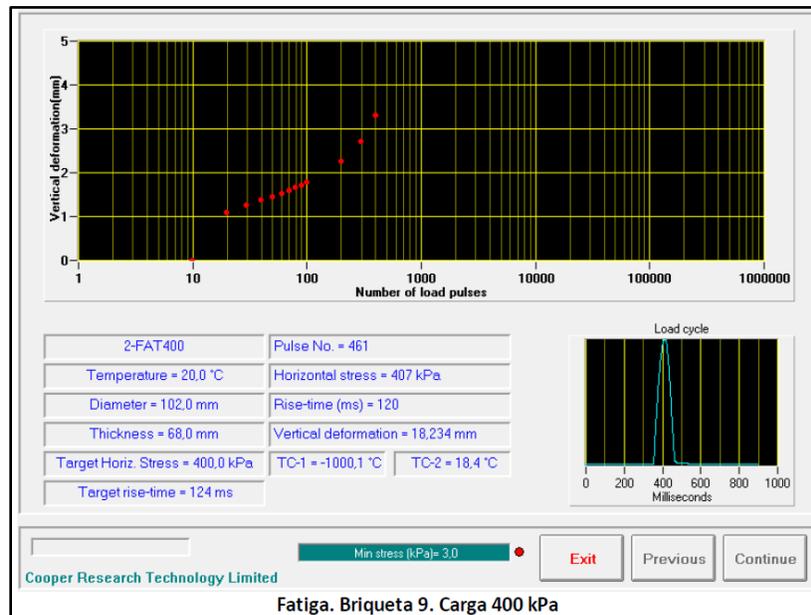


Ilustración 58: Ensayo de Fatiga Briqueta 9 mezcla agregando PETS

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

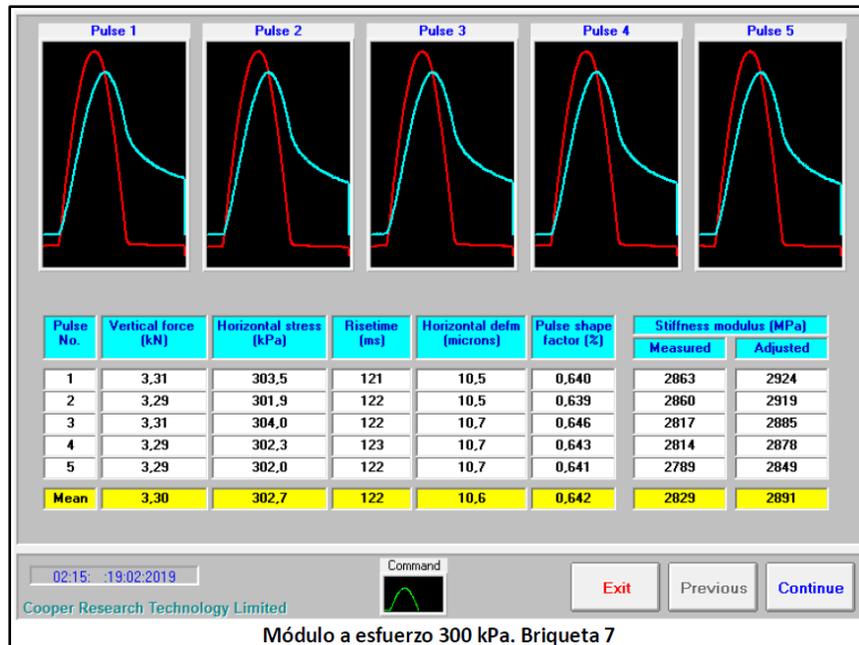


Ilustración 59: Módulo de Esfuerzo Briqueta 7 mezcla agregando PETS.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

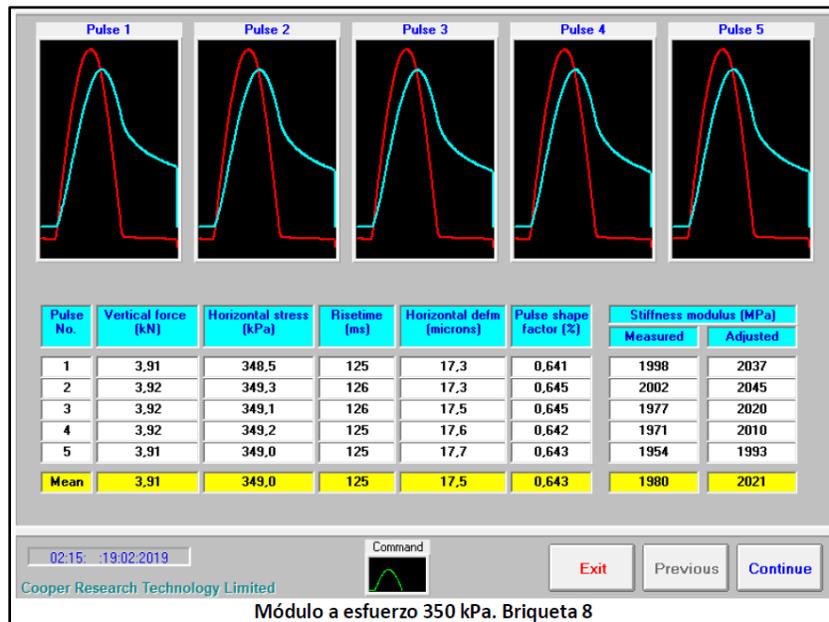
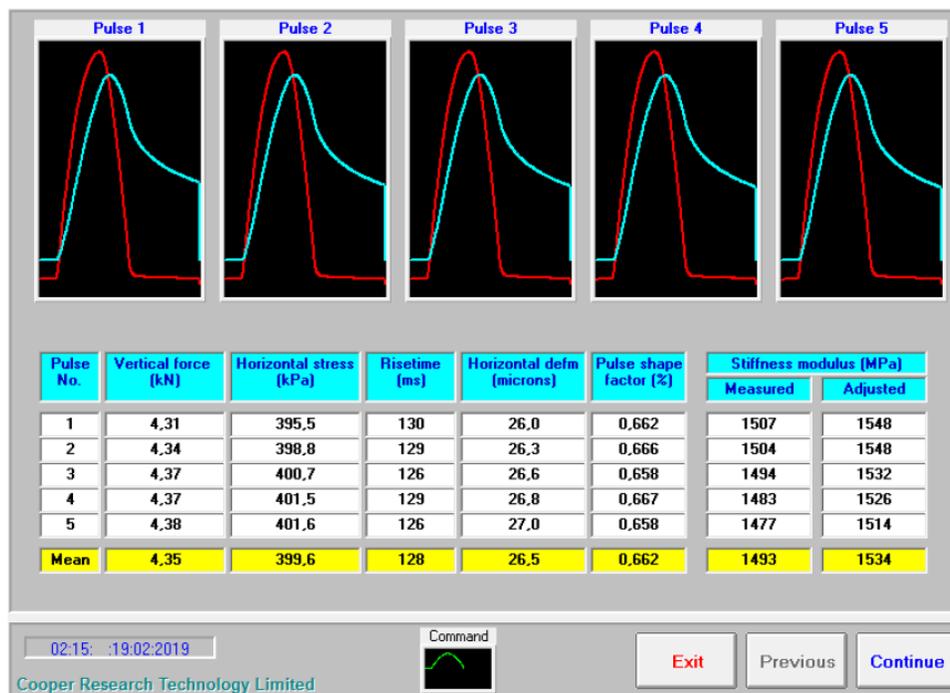


Ilustración 60: Módulo de Esfuerzo Briqueta 8 mezcla agregando PETS.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde



Módulo a esfuerzo 400 kPa. Briqueta 9

Ilustración 61: Módulo de Esfuerzo Briqueta 9 mezcla agregando PETS.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Capítulo IV

Análisis de Resultados.

En este capítulo del trabajo se presentan los análisis comparativos provenientes de los resultados de cada una de las pruebas ejecutadas. En principio, analizaremos la implementación del plástico en el cemento asfáltico y observaremos que cambios se producen y cuáles son las ventajas y desventajas en su aplicación, los parámetros volumétricos de las mezclas con PET respecto a la mezcla convencional. Seguido, se muestra la evaluación en lo que respecta a estabilidad y flujo. Posteriormente, las pruebas de módulo de rigidez, creep dinámico y fatiga. Para finalizar, se desarrolla un diseño básico de una estructura de pavimento, que permita establecer diferencias técnicas y económicas de la mezcla con PET, buscando determinar en forma preliminar su viabilidad para proyectos de construcción de carreteras.

4.1. Análisis Comparativo del Cemento Asfáltico

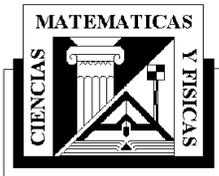
A continuación, presentamos un cuadro resumen de los resultados presentados en el cemento asfáltico tanto para la mezcla convencional; como para la mezcla con la incorporación de PETS. Los primeros cuadros explican la clasificación del cemento asfáltico según su viscosidad como explicamos en los ensayos a tal elemento;

posteriormente analizamos las características reológicas de dicho elemento y sacaremos las conclusiones, en que se modifica según su clasificación SuperPave. Cabe anotar que dichos cuadros contienen los resultados de los ensayos obtenidos en el capítulo anterior.

El asfalto modificado al ser comparado con el convencional presenta:

- Mayor intervalo de plasticidad.
- Mayor cohesión.
- Mejora de la respuesta elástica.
- Mayor resistencia a la acción del agua.
- Mayor resistencia al envejecimiento. (Chiman A. et al, 2000).

Tabla 132: Resultados Cemento Asfáltico convencional.

		INFORME DE RESULTADOS PROPIEDADES DEL CEMENTO ASFÁLTICO		
DATOS DEL PROYECTO				
PROYECTO: ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONTROL DE CALIDAD EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE DE UN DISEÑO CONVENCIONAL Y DE UN DISEÑO ADICIONANDO TEREFTALATO DE POLIETILENO				
MUESTRA: CEMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL				
DATOS DE LA MUESTRA				
CÓDIGO DE LA MUESTRA: 003			PLACA DE TANQUERO: IAH-0712	

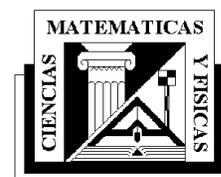
DESCRIPCIÓN: ASFALTO AC-20 ENVEJECIDO A 150°C (REFINERÍA ESMERALDAS)		Nº DE GUÍA: 006-001-000437465			
FECHA INICIO DE TRASLADO: 20-03-2019		Nº DE TANQUE DE REFINERÍA: AO-V10			
FECHA FINAL TRASLADO: 21-03-2019		FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA: 29-03-2019			
DATOS DEL ANÁLISIS					
TEMPERATURA AMBIENTE °C: 19.7		HUMEDAD RELATIVA%: 47			
FECHA INICIO DE ENSAYO: 8-04-2019		FECHA FINAL DE ENSAYO: 8-04-2019			
FECHA EMISIÓN DE INFORME: 10-04-2019					
RESULTADOS DEL ANÁLISIS					
ENSAYO	NORMA	UNIDAD	RESULTADO	ESPECIFICACIÓN	OBSERVACIONES
GRAVEDAD ESPECÍFICA	ASTM D 70-97	g/cm ³	1.00804	MÍNIMO 1	CUMPLE
PENETRACIÓN	ASTM D 5-97	mm	66	MÍNIMO 60	CUMPLE
PUNTO DE REBLANDECIMIENTO	ASTM D 92-78	°C	50.05	RANGO 48-57	CUMPLE
ÍNDICE DE PENETRACIÓN	ASTM D 3381	%	-0.509	RANGO -1.5 A +1	CUMPLE
DUCTILIDAD	ASTM D 113-99	cm	150	MÍNIMO 100	CUMPLE
PUNTO DE INFLAMCIÓN Y COMBUSTIÓN	ASTM D 92-78	°C	298 - 323	MÍNIMO 232	CUMPLE
VISCOSIDAD A 60 °C	ASTM D 2171	Pa .s	231	RANGO 160-240	CUMPLE
VISCOSIDAD A 135 °C	ASTM D 2170	mm ² /s	384	MÍNIMO 300	CUMPLE
ENSAYO AL RESIDUO DE PELÍCULA FINA EN HORNO ROTATORIO					
PENETRACIÓN	ASTM D 5-97	mm	42	ENSAYO	CUMPLE
CAMBIO DE MASA	ASTM D 2872	%	-0.06	MÁXIMO 1	CUMPLE
VISCOSIDAD A 60 °C RTFO	ASTM D 2171	Pa .s	684	MÁXIMO 800	CUMPLE
VISCOSIDAD A 135 °C RTFO	ASTM D 2170	mm ² /s	567	MÍNIMO 300	CUMPLE
DUCTILIDAD	ASTM D 113-99	cm	64	MÍNIMO 50	CUMPLE

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 133: Resultados Cemento Asfáltico modificado con PETS.



**INFORME DE RESULTADOS PROPIEDADES DEL
CEMENTO ASFÁLTICO**



DATOS DEL PROYECTO	
PROYECTO: ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONTROL DE CALIDAD EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE DE UN DISEÑO CONVECCIONAL Y DE UN DISEÑO ADICIONANDO TEREFTALATO DE POLIETILENO	
MUESTRA: CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO AGREGANDEO PETS	
DATOS DE LA MUESTRA	
CÓDIGO DE LA MUESTRA: 016	PLACA DE TANQUERO: IAH-0712
DESCRIPCIÓN: ASFALTO MODIFICADO AC-20 ADICIONANDO PETS	Nº DE GUÍA: 006-001-000437465
FECHA INICIO DE TRASLADO: 20-03-2019	Nº DE TANQUE DE REFINERÍA: AO-V10
FECHA FINAL TRASLADO: 21-03-2019	FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA: 29-03-2019
DATOS DEL ANÁLISIS	
TEMPERATURA AMBIENTE °C: 19.5	HUMEDAD RELATIVA%: 49
FECHA INICIO DE ENSAYO: 8-04-2019	FECHA FINAL DE ENSAYO: 8-04-2019
FECHA EMISIÓN DE INFORME: 10-04-2019	
RESULTADOS DEL ANÁLISIS	

ENSAYO	NORMA	UNIDAD	RESULTADO	ESPECIFICACIÓN	OBSERVACIONES
GRAVEDAD ESPECÍFICA	ASTM D 70-97	g/cm ³	1.00925	MÍNIMO 1	CUMPLE
PENETRACIÓN	ASTM D 5-97	mm	65	MÍNIMO 60	CUMPLE
PUNTO DE REBLANDECIMIENTO	ASTM D 92-78	°C	49.35	RANGO 48-57	CUMPLE
ÍNDICE DE PENETRACIÓN	ASTM D 3381	%	-0.731	RANGO -1.5 A +1	CUMPLE
DUCTILIDAD	ASTM D 113-99	cm	105.05	MÍNIMO 100	CUMPLE
PUNTO DE INFLAMACIÓN Y COMBUSTIÓN	ASTM D 92-78	°C	280 - 312	MÍNIMO 232	CUMPLE
VISCOSIDAD A 60 °C	ASTM D 2171	Pa .s	229	RANGO 160-240	CUMPLE
VISCOSIDAD A 135 °C	ASTM D 2170	mm ² /s	373	MÍNIMO 300	CUMPLE
ENSAYO AL RESIDUO DE PELÍCULA FINA EN HORNO ROTATORIO					
PENETRACIÓN	ASTM D 5-97	mm	45	ENSAYO	CUMPLE
CAMBIO DE MASA	ASTM D 2872	%	-0.03	MÁXIMO 1	CUMPLE
VISCOSIDAD A 60 °C RTFO	ASTM D 2171	Pa .s	736	MÁXIMO 800	CUMPLE
VISCOSIDAD A 135 °C RTFO	ASTM D 2170	mm ² /s	605	MÍNIMO 300	CUMPLE
DUCTILIDAD	ASTM D 113-99	cm	56	MÍNIMO 50	CUMPLE

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

La viscosidad es un indicador fundamental del flujo, suministra información sobre el comportamiento viscoso a altas temperaturas, y no sobre el comportamiento elástico a baja temperatura. En el cemento convencional y la mezcla modificada con PETS, obtuvimos viscosidades entre los rangos estimados de la normativa.

La penetración solo describe la consistencia a temperatura media 25 °C; lo cual hace que la información proporcionada no sea completa, las metodologías actuales de control se basan de las características y propiedades del material y no específicamente del desempeño del mismo a las características del terreno.

Tabla 134: Requisitos de Cementos Asfálticos de viscosidad a 60 °C a base de asfalto original.

Ensayo	Unidad	Grado de Viscosidad										Norma de ensayo
		AC-6		AC-10		AC-20		AC-30		AC-42		
		Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	
Viscosidad absoluta, 60 °C	Pa s	60 ± 20		100 ± 20		200 ± 40		300 ± 60		420 ± 60		ASTMD 2171
Viscosidad cinemática, 135 °C	mm ² s ⁻¹	175	--	250	--	300	--	350	--	400	--	ASTMD 2170
Punto de Inflamación	°C	177	--	219	--	232	--	232	--	232	--	NTE INEN 808
w, Solubilidad en tricloroetileno, ^c	%	99,0	--	99,0	--	99,0	--	99,0	--	99,0	--	NTE INEN 915
Gravedad específica 25 °C/25 °C		Informe		Informe		Informe		Informe		Informe		ASTMD70
Índice de Penetración ^b		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		ASTM D5/D5M
Residuo de ensayos de película fina en horno rotatorio:												
Viscosidad, 60 °C	Pa s	--	300	--	500	--	800	--	1 200	--	2 000	ASTMD 2171
Cambio de masa,	% w/w	--	1,5	--	1,0	--	1,0	--	1,0	--	1,0	ASTMD 2872
Ductilidad ^a , 25 °C [77 °F], 5 cm/min	cm	100	--	75	--	50	--	40	--	25	--	NTE INEN 916
^a Si la ductilidad es menor a 100, el material debe ser aceptado, solo si la ductilidad a 15,5 °C es mínimo 100 a una velocidad de tiro de 5 cm/min.												
^b Índice de penetración = $\frac{1952 - 500 \log pen - 20 SP}{50 \log pen - SP - 120}$												
donde:												
pen = penetración a 25 °C, 100 g, 5 s												
SP = punto de ablandamiento (°C) ASTM D38												
^c Solubilidad en bromuro de propilo N puede ser un método alternativo a la solubilidad en TCE.												

Fuente: (ASTM, 2010)

Para comprender con más detalle la clasificación SuperPave, analizaremos las ventajas de acuerdo a los siguientes conceptos:

Reología, Es la ciencia de la deformación y el flujo. Se trata de una rama de la física y la fisicoquímica, principalmente de la mecánica debido a que estudia fuerzas, deformaciones y velocidades. El término "reología" proviene del griego: "Rhein" que significa "fluir". Por lo tanto, la reología es, literalmente, "la ciencia del flujo". Sin embargo, los experimentos reológicos no se limitan a revelar información sobre el comportamiento del flujo de líquidos, sino también sobre el comportamiento de deformación de los sólidos. La conexión aquí es que una gran deformación producida por las fuerzas de cizalla provoca muchos materiales a fluir. (Salazar, 2011)

Todos los tipos de comportamiento de cizalla, que puede ser descrito de una manera científica, puede ser visto entre dos extremos: el flujo de líquidos viscosos idealmente por un lado y la deformación de los sólidos idealmente elásticos en el otro. El comportamiento de todos los materiales reales se basa en la combinación de ambos un viscoso y una porción elástica, por lo tanto, se le denominan viscoelásticos. (Salazar, 2011)

Modelo lineal viscoelástico, El comportamiento más singular de materiales viscoelásticos es su dependencia a la respuesta mecánica con el tiempo de carga y a la temperatura. A una combinación de tiempo y temperatura, el comportamiento viscoelástico, dentro de un rango lineal, puede ser caracterizado por al menos dos propiedades: la resistencia total a la deformación y la distribución relativa de esa resistencia entre una parte elástica y una parte viscosa. Sin embargo, existen muchos métodos para caracterizar las propiedades viscoelásticas, los ensayos dinámicos (oscilatorios) son la mejor técnica para explicar la singularidad del comportamiento de esta clase de materiales. En el modo de corte son medidos el Módulo complejo (G^*) y el

ángulo de fase (δ). G^* representa la resistencia total a la deformación bajo carga, cuando δ representa la distribución relativa de esa respuesta total entre un componente en fase y otro componente fuera de fase (Salazar, 2011).

La respuesta lineal viscoelástica (LVE) del cemento asfáltico como una función del tiempo o de la frecuencia ha sido bien establecida por investigadores previos y ha sido confirmada por los autores en extensos programas de ensayo que incluyen flexión simple a bajas temperaturas y corte dinámico de intermedias a altas temperaturas (Salazar, 2011). Cualitativamente, la respuesta lineal viscoelástica del cemento asfáltico puede separarse en tres regiones o zonas de comportamiento:

- A bajas temperaturas o cortos tiempos de carga (altas frecuencias), el asfalto se comporta como un sólido vítreo. El módulo depende del tiempo o de la rigidez, acercándose a valores aproximados a 1×10^9 Pa en corte, o de 3×10^9 Pa en tensión-compresión o flexión uniaxial. En esta región, la rigidez es solo ligeramente dependiente de la temperatura y/o tiempo de carga (Salazar, 2011).
- A temperaturas o tiempos de carga (frecuencias) intermedios el asfalto se somete a una transición muy gradual de comportamiento vítreo a fluido. Esta región de transición se caracteriza por un gran retardo en la elasticidad, significando que el material se comporta como cuero-goma. El módulo cambia dramáticamente en esta región a medida que se altera la temperatura o el tiempo de carga (Salazar, 2011).
- A temperaturas altas o tiempos de carga prolongados (bajas frecuencias) el cemento asfáltico se comporta como un fluido viscoso. La deformación, en

condiciones de bajos o moderados esfuerzos y tasas de deformación puede ser descrita por la ley de fluido newtoniano. La velocidad de deformación cortante es proporcional al esfuerzo cortante (Salazar, 2011).

Módulo de complejo G^* , Medida de la resistencia total de un material a la deformación cuando se somete repetidamente al corte. El mismo tiene dos componentes: Una elástica (recuperable) y otra viscosa (no recuperable). (Salazar, 2011)

Ángulo de fase δ , Es un indicador de las proporciones de las deformaciones elástica (recuperable) y viscosa (no recuperable). Un ángulo cercano a cero indica un fluido con características elásticas, por lo contrario, un ángulo cercano a 90° indica un fluido viscoso. (Salazar, 2011)

Las propiedades reológicas del asfalto pueden ser representadas ya sea por la variación de G^* y δ como una función de la frecuencia a temperatura constante comúnmente llamada curva maestra o por la variación de G^* y δ con temperatura a una frecuencia seleccionada o tiempo de carga, comúnmente llamada curva isocronal. Aunque la dependencia del tiempo y la temperatura pueden ser relacionados utilizando la función de cambio de temperatura/frecuencia (Salazar, 2011) para propósitos prácticos es mucho más sencillo presentar datos con respecto a una de las variables (Salazar, 2011). Algunas características únicas y comunes del comportamiento reológico de los asfaltos son:

- A temperaturas altas, el valor de δ se aproxima a 90° para todos los asfaltos, lo cual refleja la aproximación al comportamiento viscoso o

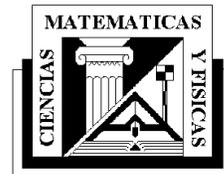
disipación completa de energía en flujo viscoso, el valor de G^* , sin embargo, varía significativamente, reflejando las diferentes propiedades de consistencia (viscosidad) de los asfaltos (Salazar, 2011).

- A partir de la descripción simplificada de las propiedades del asfalto, es claro que sin la distinción entre tipos de respuesta del Asfalto en términos de la resistencia total a la deformación (G^*) y la elasticidad relativa (δ), y sin una medida de las propiedades a rangos de temperatura o frecuencia de carga que correspondan a las condiciones de carga o climáticas del pavimento, la selección de carpetas asfálticas para un mejor comportamiento no es posible (Salazar, 2011).
- Los efectos significativos de oxidación usualmente aparecen después de una considerable vida de servicio. El aumento de valores de G^* y la disminución de valores de δ producen cambios favorables con respecto al desempeño al ahuellamiento, pero son no favorables con respecto al desempeño a agrietamiento térmico. Para agrietamiento por fatiga, el incremento de G^* no es favorable cuando la disminución de δ es generalmente favorable, dependiendo del tipo de pavimento y el modo de daño por fatiga (Salazar, 2011).
- A bajas temperaturas o altas frecuencias los asfaltos tienden a aproximarse al valor límite de G^* de aproximadamente 1,0 GPa y a un valor límite de $\delta = 0,0$ grados. 1,0 Gpa representa la rigidez de los enlaces de carbono e hidrógeno y como los asfaltos alcanzan su volumen mínimo de equilibrio

termodinámico. El valor de $\delta=0$, representa la naturaleza completamente elástica de los asfaltos a esa temperatura (Salazar, 2011).

- A incrementos de temperatura o decrementos de frecuencia, G^* disminuye continuamente cuando δ aumenta continuamente. Lo primero refleja un decremento en la resistencia a la deformación (reblandecimiento) cuando lo segundo refleja un decremento en la elasticidad o habilidad de almacenar energía (Salazar, 2011).

Tabla 135: Resultados Clasificación SuperPave Cemento Asfáltico convencional.

	PRUEBAS DE CLASIFICACIÓN SUPERPAVE PARA ASFALTOS	
DATOS DEL PROYECTO		
PROYECTO: ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONTROL DE CALIDAD EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE DE UN DISEÑO CONVENCIONAL Y DE UN DISEÑO ADICIONANDO TEREFTALATO DE POLIETILENO		
MUESTRA: CEMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL		
DATOS DE LA MUESTRA		
CÓDIGO DE LA MUESTRA: 003	PLACA DE TANQUERO: IAH-0712	

DESCRIPCIÓN: ASFALTO AC-20 ENVEJECIDO A 150°C (REFINERÍA ESMERALDAS)		Nº DE GUÍA: 006-001-000437465		
FECHA INICIO DE TRASLADO: 20-03-2019		Nº DE TANQUE DE REFINERÍA: AO-V10		
FECHA FINAL TRASLADO: 21-03-2019		FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA: 29-03-2019		
DATOS DEL ANÁLISIS				
TEMPERATURA AMBIENTE °C: 19.7		HUMEDAD RELATIVA%: 47		
FECHA INICIO DE ENSAYO: 15-06-2019		FECHA FINAL DE ENSAYO: 17-06-2019		
FECHA EMISIÓN DE INFORME: 15-06-2019				
RESULTADOS DEL ANÁLISIS				
PROPIEDAD	MÉTODO	EXIGIDO	RESULTADOS	
LIGANTE ORIGINAL				
MÓDULO DE CORTE DINÁMICO ($G/\sin \delta$, 10rad/seg), (kPa)	52	AASHTO T 315	1.0 MÍNIMO	4.5000
	58			2.6000
	64			1.2660
	70			0.6034
	76			0.3044
	82			0.1633
RESIDUO RTFOT (163°C, 85 MINUTOS)				
MÓDULO DE CORTE DINÁMICO ($G/\sin \delta$, 10rad/seg), (kPa)	52	AASHTO T 315	2.2 MÍNIMO	19.470
	58			8.663
	64			3.963
	70			1.878
	76			0.915
	82			0.469
RESIDUO ENVEJECIDO PAV (100°C, 300 psi, 20 HORAS)				
MÓDULO DE CORTE DINÁMICO ($G/\sin \delta$, 10rad/seg), (kPa)	46	AASHTO T 315	5000 MÁXIMO	884.50
	52			1311.00

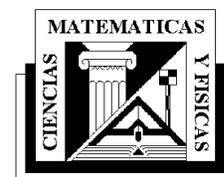
	58			1922.00
	64			2750.00
	70			3863.00
	76			5370.00
RÍGIDEZ AL DESPLAZAMIENTO, Mpa (60 sec)	-28°C	AASHTO T 313	300 MÁXIMO	186.500
VALOR m			0.300 MÍNIMO	0.305
RÍGIDEZ AL DESPLAZAMIENTO, Mpa (60 sec)	-22°C	AASHTO T 313	300 MÁXIMO	88.000
VALOR m			0.300 MÍNIMO	0.340
GRADO PG SUPERPAVE		AASHTO M 320	64 - 28	

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 136: Resultados Clasificación SuperPave Cemento Asfáltico modificado PETS.



**PRUEBAS DE CLASIFICACIÓN SUPERPAVE
PARA ASFALTOS**



DATOS DEL PROYECTO

PROYECTO: ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONTROL DE CALIDAD EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE DE UN DISEÑO CONVENCIONAL Y DE UN DISEÑO ADICIONANDO TEREFTALATO DE POLIETILENO

MUESTRA: CEMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL

DATOS DE LA MUESTRA

CÓDIGO DE LA MUESTRA: 003

PLACA DE TANQUERO: IAH-0712

DESCRIPCIÓN: ASFALTO AC-20 ENVEJECIDO A 150°C
(REFINERÍA ESMERALDAS)

Nº DE GUÍA: 006-001-000437465

FECHA INICIO DE TRASLADO: 20-03-2019

Nº DE TANQUE DE REFINERÍA: AO-V10

FECHA FINAL TRASLADO: 21-03-2019

FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA: 29-03-2019

DATOS DEL ANÁLISIS

TEMPERATURA AMBIENTE °C: 19.7		HUMEDAD RELATIVA%: 47		
FECHA INICIO DE ENSAYO: 15-06-2019		FECHA FINAL DE ENSAYO: 17-06-2019		
FECHA EMISIÓN DE INFORME: 15-06-201				
RESULTADOS DEL ANÁLISIS				
PROPIEDAD				
MÉTODO		EXIGIDO	RESULTADOS	
LIGANTE ORIGINAL				
MÓDULO DE CORTE DINÁMICO (G/sin δ, 10rad/seg), (kPa)	76	AASHTO T 315	1.0 MÍNIMO	0.869
	70			1.602
	64			2.998
RESIDUO RTFOT (163°C, 85 MINUTOS)				
MÓDULO DE CORTE DINÁMICO (G/sin δ, 10rad/seg), (kPa)	82	AASHTO T 315	2.2 MÍNIMO	1.890
	76			3.366
	70			5.998
	64			10.668
RESIDUO ENVEJECIDO PAV (100°C, 300 psi, 20 HORAS)				
MÓDULO DE CORTE DINÁMICO (G/sin δ, 10rad/seg), (kPa)	34	AASHTO T 315	5000 MÁXIMO	668.00
	31			931.00
	28			1315.00
	25			1828.00
RÍGIDEZ AL DESPLAZAMIENTO, Mpa (60 sec)	-18°C	AASHTO T 313	300 MÁXIMO	166.500
VALOR m			0.300 MÍNIMO	0.281
RÍGIDEZ AL DESPLAZAMIENTO, Mpa (60 sec)	-12°C	AASHTO T 313	300 MÁXIMO	85.020
VALOR m			0.300 MÍNIMO	0.308
GRADO PG SUPERPAVE		AASHTO M 320	70 - 22	

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

El grado de desempeño de un ligante asfáltico forma parte de un sistema denominado SUPERPAVE (Superior Performance Pavements) desarrollado en USA en 1987 por el SHRP (Programa Estratégico de Investigación de Carreteras).

La clasificación según el grado de desempeño para ligantes bituminosos tiene base en parámetros relacionados a los principales tipos de fallas (ahuellamiento, fisura y fatiga) debido al tránsito vehicular y las cargas a las que es sometido. Los ensayos miden las propiedades de la muestra a distintas temperaturas, mientras que los valores de especificación permanecen constantes.

De acuerdo con la **tabla 135** y **tabla 136** del análisis reológico, a partir del 1% de concentración de PETS el asfalto base AC-20 de Refinería Esmeraldas PG 64 – 28 sube un grado de desempeño, con respecto a su máxima temperatura de diseño, obteniendo así PG 70 - 22; demostrando que el PETS de baja densidad produce cambios positivos en el asfalto desde que se le agrega bajas concentraciones; sus propiedades mejoran como se puede evidenciar en las **tabla 135** y **tabla 136**, obteniendo así mayor resistencia a la oxidación y envejecimiento a altas temperaturas, por sus características al ser más rígido y resistente a altas temperaturas, puede ser utilizado para soportar cargas estáticas (Transporte pesado) a baja velocidad.

En el sistema de clasificación del asfalto según su grado de desempeño, los ensayos son realizados en muestras de asfalto original y sobre muestras artificialmente envejecidos para simular el envejecimiento durante su etapa constructiva y de vida útil. Las propiedades reológicas que se miden están relacionadas con parámetros de

desempeño de terreno para fallas críticas como el ahuellamiento, agrietamiento por fatiga (Salvador & Salvador).

Ante la necesidad de mejorar las características del asfalto producido en la Refinería de Esmeraldas, la alternativa de incorporación de PETS al ligante asfáltico permitiría contar con productos que tengan un mejor comportamiento bajo la acción del tránsito vehicular y de los distintos factores ambientales, con la capacidad de soportar las condiciones ambientales de las distintas regiones del país con una mayor vida útil del asfalto en las carreteras, evitando de esta manera problemas tempranos de fatiga, ahuellamiento y fisuras.

Tabla 137: Clasificación por Grado de Desempeño.

GRADO LIGANTE	PG 70						PG 76						PG 82					
	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-10	-16	-22	-28	-34		
Temperatura máxima de diseño del pavimento, promedio de 7 días, °C (a)	< 70						< 76						< 82					
Temperatura mínima de diseño del pavimento, °C (a)	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34		
	ASFALTO ORIGINAL																	
Temperatura Flash Point, T48; Mínima °C	230																	
Viscosidad, ASTM D4402; (b) Máximo 3 Pa*s, Temperatura de ensayo, °C	135																	
Corte Dinámico, TP5; (c) G*/sen (δ) Mínimo: 1.00 kPa, Temperatura de ensayo a 10 rad/s, °C	70						76						82					
	HORNO DE PELÍCULA DELGADA ROTATORIA																	
Pérdida de masa, Máxima, %	1.00																	
Corte Dinámico, TP5; G*/sen (δ) Mínimo: 2.20 kPa, Temperatura de ensayo a 10 rad/s, °C	70						76						82					
	ENVEJECIMIENTO EN RECIPIENTE PRESURIZADO																	
Temperatura de Envejecimiento en PAV, °C (d)	100 (110)						100 (110)						100 (110)					
Corte Dinámico, TP5; G*/sen (δ) Máximo: 5000 kPa, Temperatura de ensayo a 10 rad/s, °C	34	31	28	28	22	19	37	34	31	28	25	40	37	34	31	28		
Endurecimiento Físico (e)	INFORMAR																	
Módulo de Rigidez, TP1; (f) S máximo: 300 MPa; valor mínimo de m: 0.300 Temperatura de ensayo a 60 s, °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24		
Tracción directa, TP3; (f) Deformación de Rotura mínima: 1% temperatura de ensayo a 1.0 mm/min, °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24		

Fuente: (Institute, Superpave, Performance graded asphalt binder specifications and testing superpave serie No 1 (SP-1), 1993)

El envejecimiento, característica especial de los asfaltos, moléculas orgánicas reaccionan con el oxígeno del medio ambiente (Oxidación) y cambia su estructura y composición de las moléculas de asfalto. El resultado es una estructura más frágil, y es la razón del término endurecimiento por oxidación o por envejecimiento. Este fenómeno ocurre en el pavimento a una velocidad relativamente baja, si bien es mucho más rápido en un clima cálido que en un clima frío. Así el endurecimiento por oxidación es estacional, y es más marcado en verano que en invierno (Salvador & Salvador). Debido a este tipo de endurecimiento, los pavimentos viejos son más susceptibles al agrietamiento que los nuevos asfaltos nuevos pueden ser propensos a este fenómeno si no se compactan adecuadamente. En este caso, la falta de compactación origina un alto contenido de vacíos en la mezcla, lo que permite que una mayor cantidad de aire ingresar en la mezcla asfáltica y agravar el problema de endurecimiento por oxidación. (Salvador & Salvador).

Tabla 138: Clasificación por Grado de Desempeño.

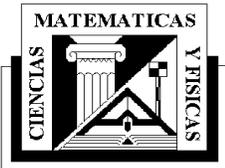
	-34	-40	-46	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-46	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40			
Temperatura máxima de diseño del pavimento, promedio de 7 días, °C (a)	-46			-52						-58						-64								
Temperatura mínima de diseño del pavimento, °C (a)	-34	-40	-46	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-46	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40			
ASFALTO ORIGINAL																								
Temperatura Flash Point, T48, Mínima °C	230																							
Viscosidad, ASTM D4402; (b)	135																							
Máximo 3 Pa ^s , Temperatura de ensayo, °C																								
Corte Dinámico, TP5; (c)	46			52						58						64								
G ^{0.5} /sen (δ) Máximo: 1.00 kPa, Temperatura de ensayo a 10 rad/s, °C																								
HORNO DE PELÍCULA DELGADA ROTATORIA																								
Pérdida de masa, Máximo, %	1.00																							
Corte Dinámico, TP5;	46			52						58						64								
G ^{0.5} /sen (δ) Máximo: 2.20 kPa, Temperatura de ensayo a 10 rad/s, °C																								
ENVEJECIMIENTO EN RECIPIENTE PRESURIZADO																								
Temperatura de Envejecimiento en PAV, °C (d)	90						100						100						100					
Corte Dinámico, TP5;	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16			
G ^{0.5} /sen (δ) Máximo: 5000 kPa, Temperatura de ensayo a 10 rad/s, °C																								
ENFORMAR																								
Endurecimiento Físico (e)																								
Módulo de Elasticidad, TP1; (f)																								
S máximo: 500 MPa; valor mínimo de m: 0.300 Temperatura de ensayo a 60 s, °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30			
Tracción directa, TP1; (g)																								
Deformación de Rotura mínima: 1% temperatura de ensayo a 1.0 mm/min, °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30			

Fuente: (Institute, Superpave, Performance graded asphalt binder specifications and testing superpave serie No 1 (SP-1), 1993).

4.2. Análisis Comparativo de los Agregados

En los agregados pétreos no se pueden comparar resultados ya que se utilizaron los mismos materiales para la implementación de las mezclas tanto convencional como la modificada con PETS. A continuación, se presenta un cuadro resumen de los ensayos realizados con sus respectivos resultados y el cumplimiento de la normativa MOP:

Tabla 139: Resultados a los ensayos de caracterización de los agregados pétreos utilizados en la mezcla.

	<p>CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS A USAR EN MEZCLAS ASFÁLTICAS</p>	
DATOS DEL PROYECTO		
<p>PROYECTO: ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONTROL DE CALIDAD EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE DE UN DISEÑO CONVECCIONAL Y DE UN DISEÑO ADICIONANDO TEREFTALATO DE POLIETILENO</p>		
<p>MUESTRA: AGREGADOS GRUESOS Y FINOS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS</p>		
DATOS DE LA MUESTRA		
<p>LOCALIZACIÓN: PROVINCIA DEL GUAYAS</p>	<p>NORMA: MOP-001-F</p>	
<p>DESCRIPCIÓN: MINA TUCHO</p>	<p>FECHA: 1-06-2019</p>	

ENSAYO	RESULTADO	ESPECIFICACIÓN	OBSERVACIONES
EQUIVALENTE DE ARENA (%)	66%	50 % MÍNIMO	CUMPLE
DESGASTE EN LA MAQUINA DE LOS ANGELES (%)	24,49%	40% MÁXIMO	CUMPLE
DURABILIDAD A LOS SULFATOS AGREGADO FINO (%)	10%	18% MÁXIMO	CUMPLE
DURABILIDAD A LOS SULFATOS AGREGADO GRUESO (%)	7,80%	18% MÁXIMO	CUMPLE
INDICE DE PLASTICIDAD (%)	NP	4% MÁXIMO	CUMPLE
PARTICULAS ALARGADAS Y ACHATADAS (%)	0%	10% MÁXIMO	CUMPLE
PARTICULAS CON UNA CARA FRACTURADA (%)	100%	80% MÍNIMO	CUMPLE
PARTICULAS CON DOS CARAS FRACTURADAS (%)	100%	85% MÍNIMO	CUMPLE
PORCENTAJE DE VACIOS EN AGREGADOS PASANTE DEL TAMIZ NO. 8 (%)	46%	45% MÍNIMO	CUMPLE
DELETEREOS AGREGADO FINO (%)	0,29%	1% MÁXIMO	CUMPLE
DELETEREOS AGREGADO GRUESO (%)	0,05%	1% MÁXIMO	CUMPLE

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Como se indicó en el capítulo anterior, la única diferencia es la granulometría empleada en cada una de las mezclas, la cual se diferencia en la implementación de 5% de material mineral (filler), en la mezcla asfáltica modificada con PETS, con el principal objetivo de llenar en gran cantidad los espacios vacíos que se pueden producir en la mezcla. A continuación, detallamos la granulometría de las mezclas, así como su grafica respectiva:

Tabla 140: Granulometría de la mezcla convencional.

Fracción	Tamaño	%
1	Pasante de 1" Retenido en $\frac{3}{4}$ "	25
2	Pasante de $\frac{3}{4}$ " Retenido en $\frac{3}{8}$ "	20
3	Pasante de $\frac{1}{4}$ " Arena Fina	55

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 141: Granulometría de la mezcla adicionando PETS.

Fracción	Tamaño	%
1	Pasante de 1" Retenido en $\frac{3}{4}$ "	45
2	Pasante de $\frac{3}{4}$ " Retenido en $\frac{3}{8}$ "	30
3	Pasante de $\frac{1}{4}$ " Arena Fina	20
4	Cal	5

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

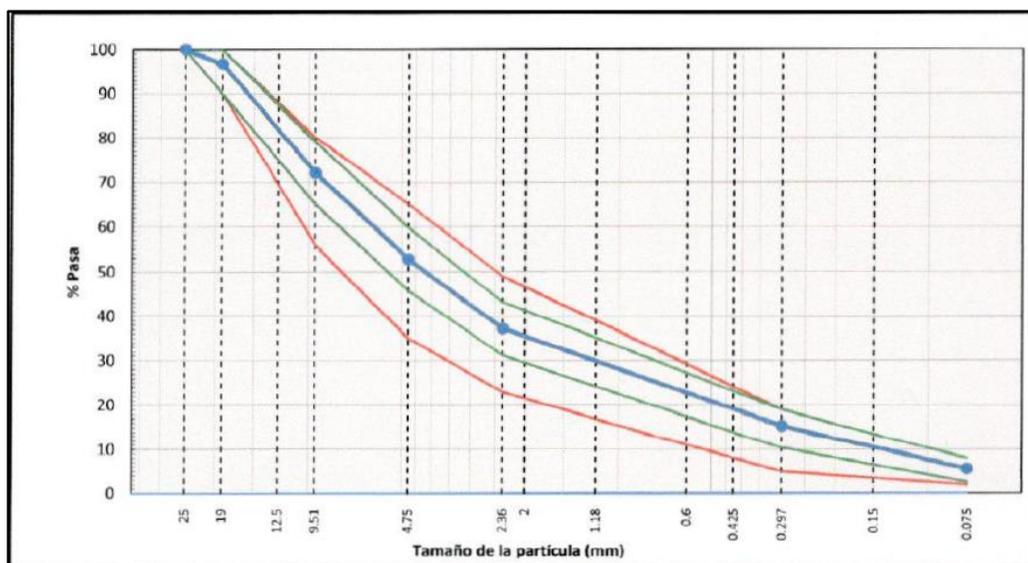


Ilustración 62: Granulometría de los agregados para la Mezcla convencional.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

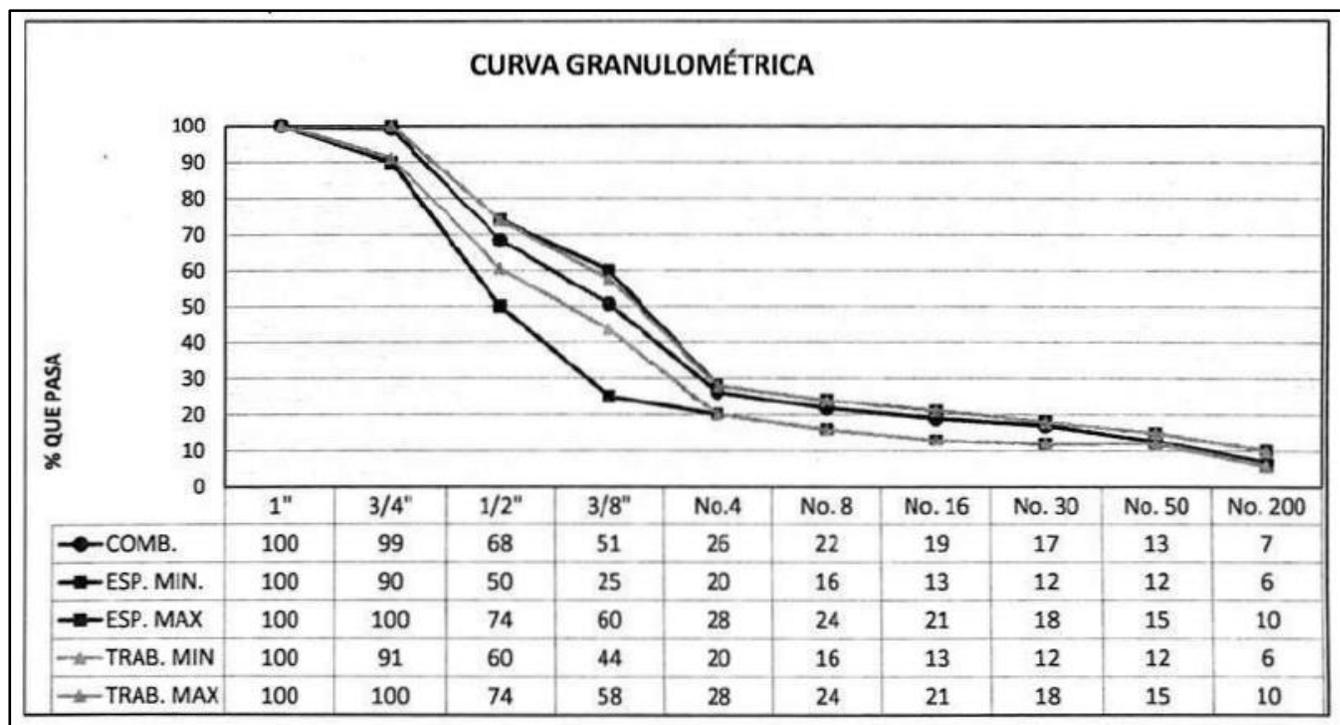


Ilustración 63: Granulometría de los agregados para la Mezcla agregando PETS.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

4.3. Análisis Comparativo de la Mezcla Asfáltica

En el siguiente apartado mostraremos un análisis comparativo a las distintas características de las mezclas asfálticas que se ensayaron como lo son las características volumétricas, esfuerzo de tensión, módulos de rigidez, deformación permanente y la fatiga. Desarrollamos una serie de cuadro comparativos describiendo para cada parámetro las ventajas y las desventajas de los resultados obtenidos en el laboratorio, también marcaremos una descripción económica de las mezclas para tener una idea del costo que se utilizaría en la fabricación de los dos tipos de mezclas estudiadas en el

documento, finalmente hablaremos del aprovechamiento económico sostenible y tocaremos en brevedad la economía sostenible en la parte ecológica.

4.3.1. Parámetros Volumétricos.

Un factor que debe ser tomado en cuenta al considerar el comportamiento de la mezcla asfáltica, son las proporciones volumétricas del asfalto y de los componentes del agregado; resumiendo lo antes dicho sería, los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica.

Las propiedades volumétricas de una mezcla de pavimento compactado, vacíos de aire (V_a); vacíos en el agregado mineral (VMA); vacíos llenados con asfalto (VFA), y contenido de asfalto efectivo (P_{be}) proporcionan una indicación del probable funcionamiento de la mezcla asfáltica.

Cabe recalcar que la determinación del rango de vacíos de aire (3 a 5%) es el nivel deseado después de varios años de tránsito. Esta determinación del rango de los vacíos de aire, normalmente se logra si la mezcla se diseña con el correcto esfuerzo de compactación y el porcentaje de los vacíos después de la construcción se encuentra entre el 6 y 8%, ya que se espera un poco de consolidación con el tránsito.

En el caso de la mezcla asfáltica convencional se tiene que el contenido óptimo de asfalto es del 5,10%, obteniendo las siguientes características volumétricas:

Tabla 142: Características Volumétricas de la mezcla convencional.

Criterios MOP	Resultado	Mínimo	Máximo
Estabilidad (libras)	4926	2200	-
Flujo (pulgada/100)	10.50	8	14
Porcentaje de vacíos (%)	3.9	3	5
Porcentaje de vacíos en el agregado mineral VAM (%)	13	12	-
Relación filler/betún	1.10	0,8	1,2
% De estabilidad retenida luego de 7 días en agua temperatura ambiente	85%	70	-
% De resistencia de la mezcla al daño causado por el agua (TSR)	95%	80	-

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

En el caso de la mezcla con la adición del material plástico en el cemento asfáltico se tiene un contenido óptimo de asfalto de 5.0%, obteniendo las siguientes características volumétricas:

Tabla 143: Características Volumétricas de la mezcla agregando PETS.

Criterios MOP	Resultado
Peso Específico (g/cm ³)	2292
Estabilidad (libras)	2893.7
Flujo (pulgada/100)	12
Porcentaje de vacíos (%)	3.91
% De resistencia de la mezcla al daño causado por el agua (TSR)	96.1%

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

En los cuadros anteriormente descritos tanto el asfalto convencional como el modificado con PETS, contienen igual porcentaje de vacíos con 3,9% y entran en el rango permisible. Una de las limitantes del asfalto modificado es la estabilidad ya que esta se

acerca al mínimo permitido, en comparación con la mezcla convencional, la diferencia es de 2032 libras, lo cual nos indica una resistencia mucho mayor. Debido a este parámetro podemos recomendar la utilización de la mezcla modificada con PETS, a tránsito liviano. En los demás parámetros ensayados en laboratorio las características volumétricas son casi similares, la gran diferencia en la estabilidad (resistencia), nos limita a recomendar la mezcla modificada al tráfico arriba descrito.

4.3.2. Módulo de Rigidez.

Este parámetro nos indica el comportamiento de la capa de rodadura a las cargas de tránsito, es la capacidad de distribuir las cargas sin sufrir daños permanentes. Las especificaciones muestran un rango específico en el cual si se acerca al mínimo el material es muy plástico (tendría problemas de deformaciones permanentes), y si llegase a estar en el rango superior el material es muy rígido (tendría problemas de rotura). Este parámetro mide la rigidez que puede tener la mezcla. A continuación, presentamos los cuadros respectivos de los ensayos realizados a los dos tipos de mezclas:

Tabla 144: Resultados de Modulo de rigidez a la mezcla convencional.

Muestras	Módulo de Rigidez 20 °C (MPa)
1	3928
2	3396
3	3357
Promedio	3560
Desviación Estándar	319
Coeficiente Variación	9.0

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 145: Resultados de Modulo de rigidez a la mezcla agregando PETS.

Muestras	Módulo de Rigidez 20 °C (MPa)
1	3347
2	3457
3	3214
Promedio	3339
Desviación Estándar	122
Coeficiente Variación	3.6

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Dado los valores anteriores presentamos en el párrafo que sigue las tolerancias permisibles para mezclas asfálticas en nuestro medio:

- 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

Basado en el criterio anterior, ambas mezclas entran en el rango de satisfactorias, y se tiene como conclusión que ambas mezclas cumplen con el módulo de rigidez adecuado para brindar servicio en nuestro medio.

4.3.3. Deformación Permanente.

El asfalto es un material que puede ser considerado elástico lineal a temperaturas bajas y frecuencias de cargas altas, pero muestra propiedades viscosas y plásticas a temperaturas mayores. Debido a este comportamiento, las cargas repetidas del tránsito

generan deformaciones permanentes en las capas asfálticas, especialmente durante el periodo de verano.

El comportamiento de las mezclas asfálticas con respecto a las deformaciones permanentes depende fuertemente del tipo de ligante utilizado, así como de la composición de la mezcla, forma y tamaño de las partículas, calidad de los agregados y aditivos, cuando estos son empleados.

La temperatura del asfalto es un factor que afecta fuertemente a la deformación permanente. No solo las temperaturas máximas, sino también los gradientes de temperatura pueden tener una influencia sobre la deformación permanente.

Después de la fase de consolidación al comienzo de la vida de servicio del pavimento, el índice de deformaciones permanentes normalmente decrece con un incremento en las repeticiones de carga, hasta que se vuelve razonablemente constante. Finalmente, el índice de deformación permanente puede comenzar a incrementarse con un aumento en las repeticiones de cargas. Esta última fase ocurre sobre el camino solo en situaciones extremas e indican deterioro total.

La deformación permanente es el deterioro representado por la existencia de una sección transversal de la superficie que ya no ocupa su posición original. Se llama deformación permanente pues representa la acumulación de pequeñas deformaciones producidas con cada aplicación de carga, esta deformación es irrecuperable. Si bien el ahuellamiento (roderas) puede tener varias causas por ejemplo la debilidad de la mezcla por daño de humedad, abrasión y densificación del tránsito.

A continuación, se presenta los resultados de las mezclas ensayadas a la deformación permanente o creep dinámico:

Tabla 146: Resultados del creep dinámico mezcla convencional y de la mezcla agregando PETS.

Muestras	Creep Dinámico (%) convencional	Creep Dinámico (%) modificada con PETS
4	0.403	0.991
5	0.366	0.704
6	0.401	0.708
Promedio	0.39	0.80
Desviación Estándar	0.026	0.165
Coefficiente Variación	6.7	20.5

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

De los resultados anteriores se puede evidenciar que la deformación del método convencional es mucho más baja que la modificada con PETS, además que los resultados de las 3 briquetas del convencional tienen una desviación estándar mucho menor que la modificada con PETS. Ambas muestras ingresan en el rango permitido para la deformación permanente ya que la norma indica valores menores o iguales al 1%. Sacamos como conclusión que la mezcla convencional tiene más durabilidad en cuanto a cambio de temperatura se trata, que la mezcla modificada con PETS, esto es un punto muy importante en cuanto a nuestro medio nos referimos por los fuertes cambio de temperatura que se sufre.

4.3.4. Fatiga.

Aunque generalmente una carga simple no genera grietas en el pavimento, las repeticiones de cargas pueden inducir agrietamientos en las capas confinadas. Los esfuerzos cortantes y de tensión, así como las deformaciones en las capas confinadas, causan la deformación de microgrietas, estas acumuladas con la repetición de cargas pueden generar macrogrietas visibles. Este proceso es llamado fatiga.

El rompimiento por fatiga es causado por numerosos factores que ocurren en forma simultánea. Entre ellos, las cargas pesadas repetidas; deflexiones delgadas bajo ruedas pesadas de carga; deflexiones altas enlazadas a la tensión horizontal en la superficie de la capa de asfalto y mal drenaje, generado por una construcción pobre y un mal diseño del pavimento.

Por lo general la falla por fatiga es virtud propia que el pavimento ha sobrepasado el número de aplicaciones de carga para el cual fue diseñado y en este caso el pavimento solo necesitara una rehabilitación planificada.

Para evitar este tipo de falla por fatiga se recomienda realizar un buen diseño adecuado de la cantidad de cargas pesadas, mantener la sub rasante lo más seca posible, utilizar pavimentos más gruesos, utilizar materiales de pavimentación no susceptibles a la humedad y utilizar mezclas asfálticas elásticas que soporten las deflexiones normales.

El agrietamiento también puede ocurrir como resultado de una combinación de mecanismos como: agrietamiento inducido por el tránsito, agrietamiento por temperatura y agrietamiento por reflexión.

A continuación, presentamos un cuadro de los resultados del ensayo por fatiga tanto para la mezcla convencional como la mezcla modificada con PETS:

Tabla 147: Resultados Módulo de Rigidez mezcla convencional.

Esfuerzo (KPa)	Repeticiones	Deformación (* 10⁻⁶)	Módulo de Rigidez (MPa)
300	11241	217	2836
400	3461	299	2743
450	1961	347	2662

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Tabla 148: Resultados Módulo de Rigidez mezcla agregando PETS.

Esfuerzo (KPa)	Repeticiones	Deformación (* 10⁻⁶)	Módulo de Rigidez (MPa)
300	5431	213	2891
350	1041	355	2021
400	461	601	1534

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

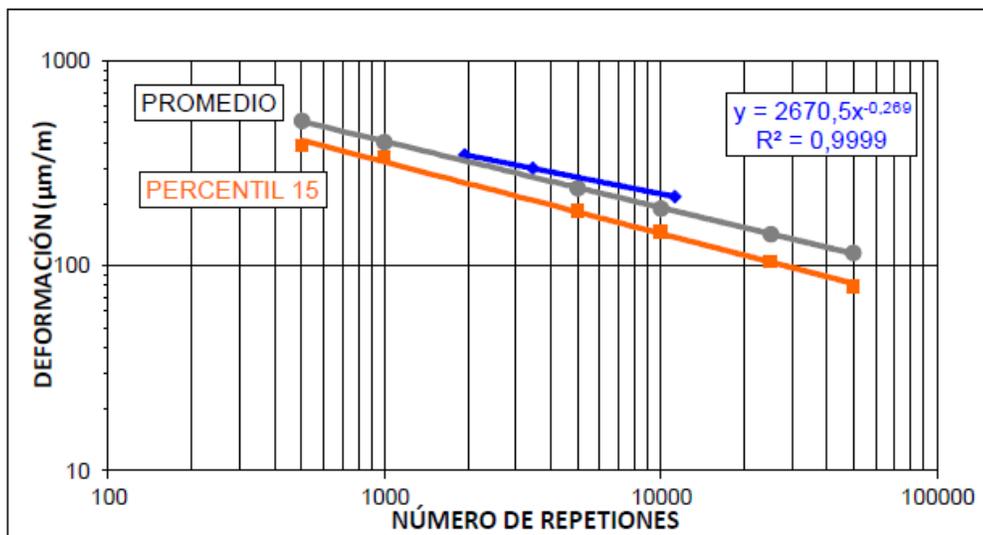


Ilustración 64: Deformación vs Numero de repeticiones mezcla convencional.

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

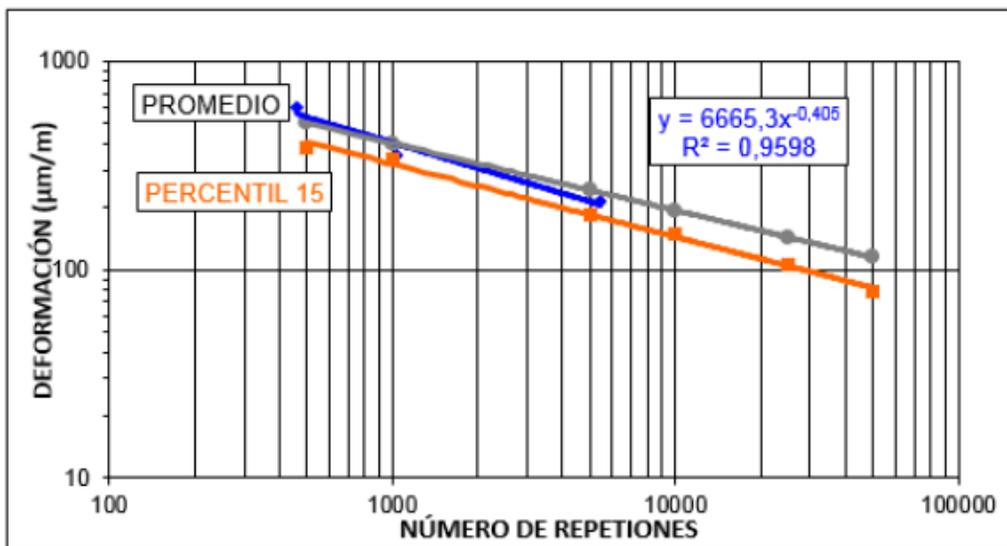


Ilustración 65: Deformación vs Numero de repeticiones mezcla agregando PETS

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

Puede observarse en color azul y con la ecuación de ajuste incluida, el comportamiento a la fatiga evaluado. Según la propuesta de exigencias para pruebas de desempeño con equipo NAT la calificación de las mezclas asfálticas en función de su fatiga es la siguiente:

“Si los puntos para la mezcla en particular analizada caen por debajo de la línea del percentil (color naranja), el comportamiento estimado será INADECUADO. Si los puntos se ubican por arriba de la línea del promedio (color gris), el comportamiento estimado será SATISFACTORIO. Entre ambas líneas el comportamiento no puede garantizarse como bueno, aunque puede considerarse como TOLERABLE mientras se desarrollan más estudios que aporten a la reducción de este umbral.”

De acuerdo a la línea de ajuste obtenida con los resultados de las pruebas de fatiga realizadas, la mezcla puede considerarse satisfactoria para la mezcla convencional, pero para la mezcla modificada con PETS, existe un tramo de la línea azul que se encuentra entre las líneas naranja y gris por lo que es tolerable de acuerdo al párrafo anterior, esto nos indica que esa mezcla tendrá problemas a futuro en cuanto a falla por fatiga referimos, por eso la recomendaciones a este caso es la utilización de este diseño en tránsito liviano, por lo que a fatiga puede tener un problema a futuro menor que el de la mezcla convencional; aunque en el rango de tolerable también tendrá gran desempeño a las deformaciones permanentes; quizás con un porcentaje menor de PETS, tendríamos mejoras para este fallo.

4.4. Análisis Comparativo Económico

Para esta parte de la investigación se realiza un análisis de costo en la producción de este tipo plástico en la carpeta asfáltica, con el fin de evaluar la producción con respecto a la convencional.

Se utiliza un análisis de precio unitario para cada producción, evaluando los diseños y el sobre costo que abarcaría realizar la mezcla modificada con PETS.

Tabla 149: Análisis de precio unitario de mezcla convencional.

CARPETA ASFALTICA E=2" INC. TRANSPORTE					UNIDAD:	M2
EQUIPOS		A	B	C=A*B	R	D=C*R
DESCRIPCION	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO	
Herr. Menores (5 % M/O)						0,024
Pavimentadora de asfalto	1,000	48,000	48,000	0,015		0,720
Rodillo asfaltico	1,000	32,000	32,000	0,015		0,480
Rodillo liso vibratorio	1,000	32,000	32,000	0,015		0,480
SUBTOTAL M						1,704
MANO DE OBRA		A	B	C=A*B	R	D=C*R
DESCRIPCION	CANTIDAD	JORNAL / HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO	
Peones	6,000	3,510	21,060	0,015		0,316
Op. Pavimentadora	1,000	3,740	3,740	0,015		0,056
Op. Rodillo	2,000	3,740	7,480	0,015		0,112
SUBTOTAL N						0,484
MATERIALES			A	B	C=A*B	
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	COSTO		
Mescla Asfáltica	m3	0,065	94,250	6,126		
SUBTOTAL P						6,126

TRANSPORTE		A	B	C=A*B
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	COSTO
Mescla Asfáltica	m3-km	30,000	0,020	0,600
SUBTOTAL O				0,600
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)				8,915
INDIRECTOS Y UTILIDADES			20%	1,783
OTROS INDIRECTOS %				
COSTO TOTAL DEL RUBRO				10,698
VALOR TOTAL				10,70

Elaboración: Kevin Danny Caicedo Campoverde

De acuerdo al análisis de precio unitario anterior para mezclas asfálticas convencionales de nuestro medio determinamos un costo de \$10,70 el metro cuadrado de asfalto utilizado, para la implementación del PETS en la mezcla, en cuanto a mano de obra y transporte no se ve afectado por lo que tomaremos en cuenta el costo del producto, comprado directo a una planta de reciclaje, o bien triturado por cuenta propia de la planta asfáltica.

Luego de revisar el mercado a nivel local (Guayaquil) se puede dar un precio por kilogramo de PETS triturado a la granulometría requerida de \$0,50 aproximadamente. Dado que la dosificación requerida es el 1% del cemento asfáltico se tiene que la dosificación requerida presentara 0,01 kilogramos de PETS por metro cuadrado de mezcla. Por lo tanto, el costo adicional por metro cuadrado de asfalto sería de \$0,25. Lo que sería un costo adicional del 2,34% del costo de producción del asfalto convencional.

Según el consorcio Puerto Limpio, en Guayaquil diariamente se recogen 4000 toneladas de desechos, de las cuales el 14% es aprovechable. Y de esto, la ciudad recicla un 11% y el 3% va al relleno sanitario.

Para un proyecto realizado en la ciudad de Guayaquil, en el cual se produce 60000 m² de asfalto de 5cms de espesor, en una zona de tráfico liviano, de acuerdo a lo recomendado de utilización del asfalto modificado, se puede utilizar alrededor de 10000 botellas de plásticos, considerando que el peso de una botella de plástico es de alrededor 60 gramos, por lo que obtendremos un numero bastante amplio para un proyecto pequeño en la ciudad de Guayaquil.

Capítulo V

Consideraciones Finales.

En esta parte del trabajo nos limitamos a exponer las principales conclusiones y recomendaciones para investigaciones futuras. Se presenta recomendaciones de control de calidad para mezclas asfálticas, ya que se tienen argumentos suficientes para la implementación del plástico en mezclas asfálticas, así también se da un breve repaso de los demás capítulos y se orienta a la investigación más detallada del tema.

5.1. Conclusiones.

Se llevó a cabo un estricto control de calidad de la mezcla asfáltica; tanto convencional como la modificada con PETS; según la normativa MOP, así como la caracterización de los materiales utilizados en la línea de investigación. De lo antes descrito podemos sacar varias conclusiones:

- El módulo de corte complejo G^* aumenta y el ángulo de fase δ disminuye en función de la temperatura, en las mezclas modificadas con PETS originales y envejecidas en RTFO, como se muestra en los gráficos; por efecto del aumento de concentración del polietileno; el resultado es que **incrementa su rigidez, y**

resistencia a la oxidación, mejorando el grado de desempeño a altas temperaturas.

- El factor de ahuellamiento $G^*/\sin \delta$ en las mezclas modificadas aumenta con respecto al asfalto convencional como se muestra en el Gráfico 3.2. y el Gráfico 3.3., esto indica que incrementa su resistencia a la rigidez, y mejora el grado de desempeño a temperaturas altas.
- El módulo de corte complejo G^* aumenta y el ángulo de fase δ disminuye en función a la temperatura, en las mezclas modificadas con PETS envejecidas en RTFO + PAV, como se muestra en los gráficos 3.5. y gráficos 3.7.; por efecto del aumento de concentración del polietileno, el resultado es que incrementa su resistencia al agrietamiento por fatiga, y mejorando el grado de desempeño a temperaturas intermedias.
- En cuanto al material ligante que se utilizó de la refinería de Esmeraldas se puede decir que en el análisis reológico del asfalto convencional AC-20, se tiene un PG 64 – 28; sube un grado de desempeño el asfalto modificado con PETS de la misma refinería con respecto a su máxima temperatura de diseño, obteniendo así PG 70 – 22; demostrando que el PETS, que tiene una densidad baja con respecto a otros polímeros; produce cambios positivos en el asfalto desde que se le agrega bajas concentraciones. Lo que ayuda en este caso al asfalto de la refinería, sosteniéndose como un posible aditivo, de ahí la importancia de futuras investigaciones.

- En cuanto a agregados pétreos referimos para el caso de la mezcla convencional no fue necesario la incorporación de filler mineral; como si lo fue para la mezcla agregando PETS, esto debido a la disminución de vacíos, problema que podríamos a ver tenido en la mezcla modificada con el plástico, esta sugerencia la tomamos de la tesis doctoral propuesta por el Dr. Miguel Ángel Del Val Melus, en España, siendo así necesario la utilización del 5% de filler mineral para aprovechar las características reológicas mencionadas en el párrafo anterior.
- En el control de calidad de la mezclas asfálticas se obtuvieron resultados satisfactorios para la mezcla convencional cumpliendo con todos los lineamientos en cuanto a desempeño requeríamos, he aquí el gran problema que tuvimos para la mezcla modificada con PETS, en cuanto a estabilidad cumple la norma; pero con un rango mínimo de error; por lo que recomendamos la implementación de este material para zonas en las cuales el tráfico sea ligero o liviano; ya que en un periodo menor al convencional sufrirá fallas características a la estabilidad.
- Para el control de calidad referimos el módulo de rigidez, deformación permanente y fatiga, los resultados fueron positivos para ambos casos, siendo la fatiga un resultado tolerable de acuerdo a lo descrito en los cuadros correspondiente, he aquí otra limitación de la mezcla modificada con PETS, que en ese campo cumple la norma, pero como arriba mencionamos para circulación de vehículos livianos o para zonas de parqueo.
- En lo económico no tenemos un cambio abrupto en los costos de las mezclas, obtuvimos precios parecidos, con un precio de la mezcla modificada de 2,34% del

costo de la convencional, por lo que los análisis nos limitamos a considerar como satisfactorios para nuestro medio.

- **Se comprobó que las propiedades reológicas del cemento asfáltico modificado con PETS, que el tiempo de oxidación (resistencia al envejecimiento) es mayor al convencional; mejorando estas propiedades reológicas reduciría el tiempo de mantenimiento de las vías, en comparación a los mantenimientos con mezclas convencionales.**
- Lo más importante en esta investigación fue la parte ecológica, y el aprovechamiento de este material reciclado en nuestro medio ya que podemos implementar alrededor del 4% de las botellas recicladas en nuestro medio; ciudad de Guayaquil, por lo que sentimos satisfactorio en ese caso la implementación del plástico.

5.2. Recomendaciones.

En esta sección damos una serie de recomendaciones para líneas futuras de investigación en cuanto a este caso requiere:

Tener en cuenta los parámetros de drenabilidad en el concreto asfáltico, ya que estos parámetros no se presentaron en esta investigación y son de vital importancia en los diseños modernos de mezclas asfálticas.

Considerar que tipo de ligante se utilizaría para la adherencia del cemento asfáltico a los tipos de rasantes de nuestro medio; así como el comportamiento a las diferentes propuestas de rasantes que se utilizan a nivel nacional.

Considerar un área de prueba asfaltada, con el propósito de ver el comportamiento en la compactación; realizar estudios de este tipo de pruebas ya trabajadas. Este con el fin de establecer el patrón de compactación para minimizar el número de pasadas en la zona apropiada de temperatura y obtener la densidad deseada.

Es fundamental recordar el lavado del material plástico (PETS), puesto que en su mayoría los recipientes contenían bebidas carbonatas, cuyos residuos en algún momento pueden contaminar la mezcla, alterando propiedades beneficiosas.

En la incorporación al cemento asfáltico del plástico es necesario una temperatura elevada alrededor de 180°C, con el propósito de que se adhiera a la mezcla bituminosa, no alteraría las propiedades mecánicas del cemento asfáltico y del PETS.

5.3. Limitaciones.

Los resultados presentados en este documento corresponden a mezclas asfálticas fabricadas con los agregados y asfalto descritos en el capítulo 3. Es factible que se presenten variaciones, si se trabaja con otras fuentes de materiales. Sin embargo, se considera que los resultados son significativos y que se ajustan a los procedimientos descritos en la normativa MOP-001-2002.

Algunas de las pruebas desarrolladas en el marco del trabajo debieron ser ejecutadas en laboratorios externos como lo fue el laboratorio de asfalto de la Universidad Católica Santiago de Guayaquil, básicamente por requerir equipos y personal especializado.

En este estudio se analiza el comportamiento del PET como agregado dentro de una mezcla asfáltica, y se destacan las virtudes respecto al desempeño de la misma y las pocas variaciones en el proceso de producción, como la posibilidad de trabajar sin alterar las temperaturas de mezclado y compactación. Sin embargo, se aceptan y no se discuten los resultados de investigaciones con otros polímeros reciclados, que pudieran requerir otros métodos de preparación.

Bibliografía

AASHTO T 315. (2016). American Association of State Highway and Transportation Officials. *AASHTO Internacional*, 1.

Alamilla, H. D. (2006). *Influencia de la granulometría en las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica*. Mexico DF.

Alzate, A. B. (2017). *Diseño y evaluación del desempeño de una mezcla asfáltica tipo MSC-19 con incorporación de Tereftalato de Polietileno reciclado como agregado constitutivo*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.

Arias, G. (10 de Abril de 2013). *Slideshare*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/leonel321/mezclas-asfalticas-2>

Aristizabal. (2016). *Prezi*. Obtenido de <https://prezi.com/w3dbmskcf9d9/asfalto-liquido-y-emulsiones-asfalticas/>

ARQHYS.com, E. d. (2012 de marzo de 2007). Funiones de asfalto. *Revista ARQHYS*. Obtenido de <https://www.arqhys.com/arquitectura/asfalto-funciones.html>.

ASTM. (2010). Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Asphalts (Bitumens). *ASTM INTERNATIONAL*, 1.

ASTM. (2013). Standard Viscosity-Temperature Chart for Asphalt. *American Standard for Testing and Materials*.

ASTM D5. (2013). Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials. *ASTM International*, 1.

ASTM D70-03. (2003). Standard Test Method for Specific Gravity and Density of Semi-Solid Bituminous Materials (Pycnometer Method) . *ASTM International*, 1.

Bustamante, B. P. (2008). La degradación de los plásticos. *Revista Universal Eafit*.

EcuRed. (3 de Octubre de 2018). *EcuRed*. Obtenido de https://www.ecured.cu/Rocas_sedimentarias

El Telégrafo. (23 de Febrero de 2019). *Producción en la Refinería de Esmeraldas*.

El Universo. (24 de Septiembre de 2018). *Reciclaje de Residuos Plásticos en el Ecuador*.

Georgiou, A. (2019). El problema del plástico. (Newsweek, Ed.)

Institute, A. (1989). The Asphalt Handbook. En *Manual Series No. 4*. Washington D.C.: Library of Congress.

Institute, A. (1993). Superpave, Performance graded asphalt binder specifications and testing superpave serie No 1 (SP-1). En A. o. Officials. Washington D.C.

Internacional, A. (2013). ASTM D 36. *Materials, Standard Test Method for Penetration of Bituminous*, 1.

La Hora. (2008). Ibarra remendada. *La Hora*, pág. 1.

Maila, M. (2013). *Comportamiento de una mezcla asfáltica modificada con polímero etileno vinil acetato* . Quito .

Melus, M. Á. (1885). *Estudio de Laboratorio para la caracterización como material de firmes de carreteras de los plásticos procedentes del tratamiento de residuos sólidos urbanos*. Madrid.

Ministerio de Obras Publicas y Comunicaciones. (2002). Agregados para Hormigon Asfaltico . En *Especificaciones generales para la construccion de caminos y puentes* (pág. 772).

Ministerio de Obras Publicas y Comunicaciones. (2011). *Norma para materiales y ensayo de materiales* .

Ministerio de Transportes y Obras Publicas. (2013). *Norma Ecuatoriana Vial Nevi-12*. Quito.

MINISTERIO DEL AMBIENTE. (2012). ECUADOR INCREMENTÓ LA RECOLECCIÓN DE BOTELLAS PET EN 2012. *COMUNICACIONES - NOTICIAS*.

Montero, T. L., & Miró, R. (2015). El envejecimiento en mezclas asfálticas . *Cuadernos Tecnológicos de la PTC*, 65.

MOP - 001-F . (2002). Especificaciones generales para la construccion de caminos y puentes. *Tomo II*, 287.

Salazar. (2011). *Guia para la realizacion de ensayos y clasificacion de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos*. UCR.

Salvador, P., & Salvador, J. (s.f.). *Manual Visualizado de ensayos para pavimentos*. Quito.

Servicio Geológico Mexicano . (22 de Marzo de 2017). Obtenido de <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Rocas/Rocas-igneas.html>

Sidgwick. (1887). *Los principios de la economía política*. Londres: UTF-8. Worldcat.

Subiaga, A. (2005). EL ESTADO DEL ARTE DE MEDIDAS DE. 4.

Universidad de las Americas Puebla. (2015). Capitulo 1: Estado del arte (Diseño de mezclas asfálticas). En M. Cáceres, *Diseño de mezclas asfálticas* (pág. 33).

Vizcardo Otero , T., & Trinidad Santos , L. (2014). *Agregados para la construccion*. Lima.

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS

TÍTULO Y SUBTÍTULO: Análisis Comparativo del Control de Calidad en Mezclas Asfálticas en Caliente de un Diseño Convencional y de un Diseño Adicionando Tereftalato de Polietileno.

AUTOR:

- Caicedo Campoverde Kevin Danny

TUTOR: Ing. Julio Vargas Jiménez, M.Sc.

REVISOR: Ing. Carlos Mora Cabrera, M.Sc.

INSTITUCIÓN: Universidad de Guayaquil

FACULTAD: Ciencias Matemáticas y Físicas.

CARRERA: Ingeniería Civil

FECHA DE PUBLICACIÓN: 2019

No. DE PÁGS: 228

ÁREAS TEMÁTICAS: Análisis Comparativo del Control de Calidad

PALABRAS CLAVE: < ANÁLISIS COMPARATIVO – MEZCLAS ASFÁLTICAS – CONTROL DE CALIDAD – CONVECIONAL – MODIFICADA >

RESUMEN: En el siguiente trabajo se realiza una investigación de la implementación de PETS como componente del cemento asfáltico tipo AC-20. Para la realización metodológica se realizaron primero los ensayos de calidad de los agregados gruesos y finos; así como el del cemento asfáltico convencional y modificado con 1% de PETS. Para el diseño se respetaron los procedimientos de las distintas normas utilizadas en nuestro medio local, analizando el método y la forma que permitiera introducir el material plástico de una forma viable y óptima; es decir, que se generen resultados positivos. Una vez realizado los diseños, tanto para el método convencional, como para el diseño agregando el material plástico; comparamos dichas mezclas en caliente, en su desempeño como en su grado económico, para conocer si es viable aplicarlas en las carreteras de nuestro medio. Teniendo resultados sorprendentes; la economía de aprovechamiento de recursos, determinando la cantidad de material plástico que se utilizaría en nuestro medio aplicando este método de diseño. Por último, damos recomendaciones y aplicaciones para proyectos futuros para que se realicen más investigaciones en temas de drenaje y adherencia a los distintos tipos de estructuras de pavimento.

No. DE REGISTRO (en base de datos):

No. DE CLASIFICACIÓN:

DIRECCIÓN URL (tesis en la web):

ADJUNTO PDF:



SI



NO

CONTACTO CON AUTOR:

Teléfono: 0998113548

E-mail: kevcaicam@hotmail.com

CONTACTO EN LA INSTITUCIÓN:

Nombre: Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas

Teléfono: 2-283348

E-mail: