

Análisis Comparativo del Comportamiento Mecánico y Dinámico de una Mezcla
Asfáltica Convencional y una Modificada con Residuos Cerámicos Reemplazando Agregados
Fino y Grueso y Utilizando Agregado de la Región del Pescadero en una Msc-25

Silvia Juliana Triana Nigrinis y David Alonso Grandas Castillo

Universidad Pontificia Bolivariana

Autores:

Silvia Juliana Triana Nigrinis, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Pontificia Bolivariana; David Alonso Grandas Castillo, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Pontificia Bolivariana.

Director de trabajo de grado, MSC. Ing. Norma Cristina Solarte Vanegas

La información concerniente a este documento deberá ser enviada a la Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Pontificia Bolivariana, Km 7 vía Piedecuesta. Email:

grandasdavid.96@gmail.com , silvita.triana@gmail.com .

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado No.1

Firma del jurado No.2

Bucaramanga, febrero 19 de 2019

Dedicatoria

Este proyecto de grado está dedicado a:

Dios, que ha sido nuestra luz y nuestra fortaleza durante la realización de este proyecto de grado y a lo largo de toda nuestra vida.

A nuestros padres **Ciro Alonso, María Patricia, Saúl Alfredo y Patricia**. Quienes desde el comienzo de nuestras vidas nos han apoyado incondicionalmente en la búsqueda de nuestros sueños.

A nuestros hermanos **Ángel Camilo y Saúl Andrés** por estar siempre presentes en nuestros momentos de dificultad.

A mi tía **Claudia Marlen Castillo Neuta**, quien ha sido una persona incondicional en mi vida y desde siempre ha cuidado mis pasos, sin la cual no sería la persona que soy.

Agradecimientos

Agradecemos a Dios por ayudarnos a enfrentar las adversidades, y momentos de dificultad durante este proyecto que desde el principio ha sido todo un proceso de aprendizaje.

A nuestras familias, por ofrecernos todo su apoyo y su sacrificio para que nuestras metas y sueños se puedan cumplir.

A la ingeniera Norma Cristina Solarte Vanegas, quien con sus enseñanzas nos ha guiado en el transcurrir de este proyecto de grado como directora, y nos ha dejado enseñanzas muy valiosas para nuestra vida a nivel profesional y personal.

Agradecemos a la Ingeniera Nohora Monsalve, a Rubén, Vicente, Edwin, Ramiro, Mario, Jorge y Sergio. Personal de los laboratorios de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, quienes nos han colaborado durante el desarrollo de este proyecto y sin los cuales tal vez no hubiéramos podido llevarlo a cabo

A las empresas que nos proporcionaron algunos de los materiales utilizados en este proyecto. La empresa Sánchez Construcciones LTDA que nos proporcionó los agregados naturales, y Asfaltart que nos proporcionó el asfalto.

Contenido

Introducción	24
1. Generalidades	26
1.1. Delimitación del Problema	26
1.2. Estado del Arte.....	27
1.3. Objetivos.....	28
1.3.1. Objetivo general	28
1.3.2. Objetivos específicos.....	28
1.4. Alcance	28
2. Marco Teórico	30
2.1. Agregado Natural.....	30
2.2. Cerámica	31
2.3. Asfalto.....	32
2.3.1. Asfaltos naturales	33
2.3.2. Asfalto derivado del petróleo	33
2.3.3. Cementos asfálticos sólidos.....	33
2.3.4. Cementos asfálticos líquidos	33
2.3.5. Emulsiones asfálticas.....	33
2.3.6. Asfaltos modificados	34
2.4. Mezclas Asfálticas	34
2.4.1. Mezcla asfáltica abierta en frío.....	34
2.4.2. Mezcla asfáltica abierta en caliente.....	35

2.4.3. Mezcla asfáltica densa en frío	35
2.4.4. Mezcla asfáltica densa en caliente.....	35
2.4.5. Mezcla asfáltica semidensa en caliente	36
2.4.6. Mezcla asfáltica drenante	36
2.4.7. Mezcla asfáltica discontinua en caliente o Microaglomerados	36
2.4.8. Mezclas tibias	36
2.4.9. Mezclas asfálticas modificadas	37
2.5. Tipos de Pavimentos.....	37
2.5.1. Pavimentos flexibles.....	38
2.5.2. Pavimentos semirrígidos	38
2.5.3. Pavimentos rígidos	38
2.5.4. Pavimentos articulados.....	39
2.6. Estudios Previos Sobre Mezclas Asfálticas Modificadas	39
3. Metodología.....	49
3.1. Caracterización del Agregado Natural y Agregado Cerámico	49
3.1.1. Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino (INV E-213-13). (INVIAS, 2013).....	50
3.1.2. Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 [mm] por medio de la máquina de los Ángeles (INV E-218-13) (INVIAS, 2013)	53
3.1.3. Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión, utilizando el aparato Micro-Deval (INV E-238-13) (INVIAS, 2013)	55

3.1.4. Determinación del valor del 10% de finos (INV E-224-13) (INVIAS, 2013)	57
3.1.5. Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio (INV E-220-13) (INVIAS, 2013)	60
3.1.6. Determinación de la limpieza superficial de las partículas de agregado grueso (INV E-237-13) (INVIAS, 2013).....	63
3.1.7. Determinación del límite líquido de los suelos (INV E-125-13) (INVIAS, 2013)	65
3.1.8. Equivalente de arena de suelos y agregados finos (INV E-133-13) (INVIAS, 2013)	67
3.1.9. Proporción de partículas planas, alargadas o planas y alargadas en agregados gruesos (INV E-240-13)	69
3.1.10. Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso (INV E-227-13)	71
3.1.11. Determinación del contenido de vacíos en agregados finos no compactados (influenciado por la forma de las partículas, la textura superficial y la granulometría) (INV E-239-13).	73
3.1.12. Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino (INV E-222-13)	75
3.1.13. Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso (INV E-223-13)	78
3.2. Caracterización del Asfalto.....	81
3.2.1. Penetración de los materiales bituminosos (INV E-706-13) (INVIAS, 2013).....	81
3.2.2. Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola) (INV E-712-13) (INVIAS, 2013).....	83

3.2.3. Índice de penetración de los cementos asfálticos (INV E-724-13) (INVIAS, 2013).....	84
3.2.4. Determinación de la viscosidad del asfalto empleando un viscosímetro rotacional (INV E-717-13) (INVIAS, 2013).....	86
3.2.5. Ductilidad de los materiales asfálticos (INV E-702-13) (INVIAS, 2013)	88
3.2.6. Puntos de inflamación y de combustión mediante la copa abierta Cleveland (INV E-709-13) (INVIAS, 2013)	89
3.2.7. Densidad de materiales bituminosos sólidos y semisólidos (método del picnómetro) (INV E-707-13) (INVIAS, 2013).....	90
3.3. Diseño de la Mezcla Asfáltica	92
3.3.1. Tipos de mezclas asfálticas	92
3.3.2. Contenido óptimo de asfalto (Diseño preliminar de la mezcla asfáltica por el método Marshall).....	93
3.3.2.1. <i>Gravedad específica Bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados y superficialmente secos (INV E-733-13) (INVIAS, 2013) ...</i>	95
3.3.2.2. <i>Gravedad específica máxima de mezclas asfálticas para pavimentos (INV E-735-13) (INVIAS, 2013).....</i>	96
3.3.2.3. <i>Porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas (INV E-736-13) (INVIAS, 2013)</i>	99
3.3.2.4. <i>Análisis volumétrico de mezclas asfálticas compactadas en caliente (INV E-799-13) (INVIAS, 2013).....</i>	100

3.3.2.5. Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall (INV E-748-13) (INVIAS, 2013)	103
3.3.3. Verificación y Evaluación del Diseño Marshall.....	105
3.3.3.1. Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta (INV E-725-13) (INVIAS, 2013)	105
3.3.3.2. Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA) (AASHTO T324- 04) (AASHTO, 2004).....	108
3.3.3.3. Norma española. Mezclas bituminosas. Método de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 26: Rigidez (UNE-EN 12697-26). Anexo C. (AENOR, 2006).....	110
4. Resultados.....	114
4.1. Caracterización del Agregado Natural y Agregado Cerámico	114
4.1.1. Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino (INV E-213-13) (INVIAS, 2013).....	114
4.1.1.1. Agregado natural.....	114
4.1.1.2. Agregado cerámico.....	117
4.1.2. Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 [mm] por medio de la máquina de los Ángeles (INV E-218-13) (INVIAS, 2013)	120
4.1.3. Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión, utilizando el aparato Micro-Deval (INV E-238-13) (INVIAS, 2013)	120
4.1.4. Determinación del valor del 10% de finos (INV E-224-13) (INVIAS, 2013).....	121
4.1.5. Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio (INV E-220-13) (INVIAS, 2013)	121

4.1.6. Determinación de la limpieza superficial de las partículas de agregado grueso (INV E-237-13) (INVIAS, 2013)	122
4.1.7. Determinación del límite líquido de los suelos (INV E-125-13) (INVIAS, 2013)	122
4.1.8. Equivalente de arena de suelos y agregados finos (INV E-133-13) (INVIAS, 2013)	123
4.1.9. Proporción de partículas planas, alargadas o planas y alargadas en agregados gruesos (INV E-240-13) (INVIAS, 2013)	123
4.1.10. Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso (INV E-227-13) (INVIAS, 2013).....	124
4.1.11. Determinación del contenido de vacíos en agregados finos no compactados (influenciado por la forma de las partículas, la textura superficial y la granulometría) (INV E-239-13) (INVIAS, 2013).....	124
4.1.12. Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino (INV E-222-13) (INVIAS, 2013).....	125
4.1.13. Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso (INV E-223-13) (INVIAS, 2013)	125
4.2. Caracterización del Asfalto.....	126
4.2.1. Penetración de los materiales bituminosos (INV E-706-13) (INVIAS, 2013).....	126
4.2.2. Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola) (INV E-712-13) (INVIAS, 2013).....	127
4.2.3. Índice de penetración de los cementos asfálticos (INV E-724-13) (INVIAS, 2013).....	127

4.2.4. Determinación de la viscosidad del asfalto empleando un viscosímetro rotacional (INV E-717-13) (INVIAS, 2013).....	128
4.2.5. Ductilidad de los materiales asfálticos (INV E-702-13) (INVIAS, 2013)	128
4.2.6. Puntos de inflamación y de combustión mediante la copa abierta Cleveland (INV E-709-13) (INVIAS, 2013).....	128
4.2.7. Densidad de materiales bituminosos sólidos y semisólidos (método del picnómetro) (INV E-707-13) (INVIAS, 2013).....	129
4.3. Diseño de la Mezcla Asfáltica	129
4.3.1. Contenido óptimo de asfalto (Diseño preliminar de la mezcla asfáltica por el método Marshall).....	129
4.3.1.1. <i>Gravedad específica Bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados y superficialmente secos (INV E-733-13) (INVIAS, 2013).</i>	130
4.3.1.2. <i>Gravedad específica máxima de mezclas asfálticas para pavimentos (INV E-735-13) (INVIAS, 2013).</i>	131
4.3.1.3. <i>Porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas (INV E-736-13) (INVIAS, 2013)</i>	131
4.3.1.4. <i>Análisis volumétrico de mezclas asfálticas compactadas en caliente (INV E-799-13) (INVIAS, 2013).</i>	132
4.3.1.5. <i>Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall (INV E-748-13) (INVIAS, 2013)</i>	135
4.3.2. Verificación y Evaluación del Diseño Marshall.....	136

4.3.2.1. <i>Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta (INV E-725-13) (INVIAS, 2013)</i>	136
4.3.2.2. <i>Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA) (AASHTO T324-04) (AASHTO, 2004)</i>	137
4.3.2.3. <i>Norma española. Mezclas bituminosas. Método de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 26: Rigidez (UNE-EN 12697-26). Anexo C. (AENOR, 2006)</i>	139
5. Análisis de Resultados.....	141
5.1. Caracterización del Agregado Natural y Agregado Cerámico	141
5.2. Caracterización del Asfalto.....	145
5.3. Diseño de la Mezcla Asfáltica	146
5.3.1. Contenido óptimo de asfalto (Diseño preliminar de la mezcla asfáltica por el método Marshall).....	146
5.3.1.1. Contenido óptimo de asfalto mezcla asfáltica convencional	146
5.3.1.2. Contenido óptimo de asfalto mezcla asfáltica modificada	151
5.3.2. Verificación y Evaluación del Diseño Marshall.....	156
5.3.2.1. <i>Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta (INV E-725-13) (INVIAS, 2013)</i>	156
5.3.2.2. <i>Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA) (AASHTO T324-04) (AASHTO, 2004)</i>	157
5.3.2.3. <i>Norma española. Mezclas bituminosas. Método de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 26: Rigidez (UNE-EN 12697-26). Anexo C. (AENOR, 2006)</i>	159

6. Conclusiones.....	162
7. Recomendaciones	168
Bibliografía	169
Anexos	178

Listado de Tablas

Tabla 1. Utilizing recycled ceramic aggregates obtained from the industry in the design of open graded wearing course on both laboratory and in situ basis.	39
Tabla 2. Investigation of waste ceramic tile additive in hot mix asphalt using fuzzy logic approach.....	40
Tabla 3. Evaluación de mezclas asfálticas con adición de ceniza como porcentaje del llenante y caucho como porcentaje de asfalto	41
Tabla 4. Análisis comparativo de una mezcla asfáltica convencional y modificada con un 4% de PVC.....	42
Tabla 5. Characteristics of Ceramic Fiber Modified Asphalt Mortar.....	43
Tabla 6. Performance of recycled ceramic waste as aggregates in hot mix asphalt (HMA)....	44
Tabla 7. Application of Recycled Ceramic Aggregates for the Production of Mineral-Asphalt Mixtures... ..	45
Tabla 8. Comportamiento de una mezcla asfáltica densa en caliente modificada con la adición de PVC molido (reciclado)	46
Tabla 9. Análisis de comportamiento dinámico de una mezcla asfáltica en caliente con adición de PVC reciclado	47
Tabla 10. Variación del módulo dinámico de mezclas asfálticas convencionales y modificadas con ceniza empleando agregados pétreos de Rionegro	48
Tabla 11. Requisitos de los Agregados para Mezclas Asfálticas en Caliente.....	49
Tabla 12. Masa Mínima de la Muestra de Agregado Tomada en Campo	51
Tabla 13. Masa Mínima de la Muestra de Agregado Grueso para el Análisis Granulométrico... ..	51

Tabla 14.	Granulometría Muestras de Ensayo Máquina de los Ángeles	54
Tabla 15.	Granulometría de la muestra de ensayo Micro-Deval	56
Tabla 16.	Masa mínima de la muestra ensayada para obtener el valor del 10% de finos.....	58
Tabla 17.	Fracciones de material fino a utilizar en el ensayo de solidez	61
Tabla 18.	Fracción granulométrica de material grueso a utilizar en el ensayo de solidez.....	61
Tabla 19.	Tamices usados para obtener la pérdida de material grueso en el ensayo de solidez.....	62
Tabla 20.	Masa mínima para el ensayo de partículas planas, alargadas o planas y alargadas	69
Tabla 21.	Masa mínima para el ensayo de partículas fracturadas.....	71
Tabla 22.	<i>Granulometría de la muestra del método de prueba A para angularidad de finos.</i>	73
Tabla 23.	Granulometría de la muestra del método de prueba A para angularidad de finos. .	78
Tabla 24.	Especificaciones requeridas para el cemento asfáltico	81
Tabla 25.	<i>Clasificación del cemento asfáltico de acuerdo al índice de penetración.....</i>	85
Tabla 26.	Tipos de mezclas asfálticas en caliente de gradación continua	92
Tabla 27.	Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua.....	93
Tabla 28.	<i>Criterios para el diseño preliminar de mezclas asfálticas en caliente de gradación continua método Marshall</i>	94
Tabla 29.	Cantidad de briquetas por diseño del método Marshall.....	94
Tabla 30.	Requisitos de la verificación del diseño Marshall	105
Tabla 31.	Fórmula de Trabajo Mezcla Convencional.....	116
Tabla 32.	Fórmula de Trabajo Mezcla Asfáltica Modificada	119
Tabla 33.	% Pérdidas Ensayo de Desgaste en la Máquina de Los Ángeles.....	120

Tabla 34.	% Pérdidas Ensayo de Resistencia a la Degradación Por abrasión en el aparato Micro-Deval.....	120
Tabla 35.	Resultados del ensayo de 10% de Finos	121
Tabla 36.	% Pérdidas Ensayo de Solidez frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o magnesio.....	121
Tabla 37.	Coefficiente de limpieza superficial en agregado grueso.....	122
Tabla 38.	Ensayo de Límites.....	122
Tabla 39.	Equivalente de arena.....	123
Tabla 40.	Proporción de partículas planas y alargadas	123
Tabla 41.	Porcentaje de partículas fracturadas.....	124
Tabla 42.	% de vacíos en el agregado fino sin compactar	124
Tabla 43.	Densidades del agregado fino	125
Tabla 44.	Densidades del agregado grueso.....	126
Tabla 45.	Penetración de los materiales bituminosos	126
Tabla 46.	Punto de ablandamiento de los materiales bituminosos	127
Tabla 47.	Índice de penetración en cementos asfálticos	127
Tabla 48.	Viscosidad del asfalto	128
Tabla 49.	Ductilidad de los materiales asfálticos.....	128
Tabla 50.	Puntos de inflamación y combustión	129
Tabla 51.	Densidad del asfalto.....	129
Tabla 52.	Gravedad específica Bulk	130
Tabla 53.	Gravedad específica máxima de mezclas asfálticas.....	131
Tabla 54.	Porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas.....	132

Tabla 55.	Análisis volumétrico de mezcla asfáltica convencional	133
Tabla 56.	Análisis volumétrico de mezcla asfáltica modificada.....	134
Tabla 57.	Porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas.....	135
Tabla 58.	Susceptibilidad al agua utilizando la prueba de tracción indirecta	137
Tabla 59.	Datos Rueda de Hamburgo	138
Tabla 60.	Resultados ensayo módulos resilientes	140
Tabla 61.	Análisis resultados caracterización agregados.....	141
Tabla 62.	Granulometría de los agregados.....	143
Tabla 63.	Análisis resultados caracterización asfalto	145
Tabla 64.	Contenido óptimo de asfalto mezcla asfáltica convencional	148
Tabla 65.	Análisis resultados diseño Marshall preliminar mezcla asfáltica convencional ...	150
Tabla 66.	Contenido óptimo de asfalto mezcla asfáltica modificada	153
Tabla 67.	Análisis resultados diseño Marshall preliminar mezcla asfáltica modificada	154
Tabla 68.	Análisis resultados evaluación de la susceptibilidad al agua.....	157
Tabla 69.	Análisis resultados rueda de Hamburgo	158
Tabla 70.	Análisis resultados ensayo de módulos resilientes	159

Listado de ilustraciones

<i>Ilustración 1.</i>	<i>Serie de tamices para ensayo de granulometría</i>	<i>52</i>
<i>Ilustración 2.</i>	<i>(Izquierda) Máquina de los Ángeles Cerrada Vista de Frente</i>	<i>54</i>
<i>Ilustración 3.</i>	<i>(Derecha) Máquina de los Ángeles Abierta Vista de Frente</i>	<i>54</i>
<i>Ilustración 4.</i>	<i>Molde y Máquina Ensayo Micro-Deval</i>	<i>57</i>
<i>Ilustración 5.</i>	<i>Ensayo de 10% de Finos en Ejecución</i>	<i>59</i>
<i>Ilustración 6.</i>	<i>(Izquierda) Ensayo de Solidez en Agregado Cerámico</i>	<i>63</i>
<i>Ilustración 7.</i>	<i>(Derecha) Ensayo de Solidez en Agregado Natural</i>	<i>63</i>
<i>Ilustración 8.</i>	<i>Lavado de Material para Llevar a Cabo el Ensayo de Limpieza Superficial.</i>	<i>64</i>
<i>Ilustración 9.</i>	<i>Cazuela de Ensayo para Límites</i>	<i>66</i>
<i>Ilustración 10.</i>	<i>Ensayo de Equivalente de Arena en Ejecución</i>	<i>68</i>
<i>Ilustración 11.</i>	<i>Ensayo de Caras Planas, Alargadas o Planas y Alargadas en Ejecución</i>	<i>70</i>
<i>Ilustración 12.</i>	<i>Cuarteo de material para el ensayo de partículas fracturadas.....</i>	<i>72</i>
<i>Ilustración 13.</i>	<i>Ensayo de Angularidad de Finos con Material Cerámico en Ejecución</i>	<i>74</i>
<i>Ilustración 14.</i>	<i>(Izquierda) Ensayo de Densidad de Finos con Agregado Natural</i>	<i>77</i>
<i>Ilustración 15.</i>	<i>(Derecha) Ensayo de Densidad de Finos con Agregado Cerámico.....</i>	<i>77</i>
<i>Ilustración 16.</i>	<i>Ensayo de Densidad de Agregado Grueso</i>	<i>79</i>
<i>Ilustración 17.</i>	<i>Ensayo de penetración en ejecución.</i>	<i>82</i>
<i>Ilustración 18.</i>	<i>Caída de las Esferas en la Lámina de Referencia Punto de Ablandamiento ..</i>	<i>84</i>
<i>Ilustración 19.</i>	<i>Viscosímetro Rotacional.....</i>	<i>87</i>
<i>Ilustración 20.</i>	<i>Inicio del Ensayo de Ductilidad</i>	<i>89</i>
<i>Ilustración 21.</i>	<i>Ejecución ensayo de punto de inflamación y combustión</i>	<i>90</i>
<i>Ilustración 22.</i>	<i>Picnómetro con agua.....</i>	<i>91</i>

<i>Ilustración 23.</i>	<i>Briqueta Sumergida (Determinación de la Densidad Bulk).....</i>	<i>95</i>
<i>Ilustración 24.</i>	<i>Ejecución Ensayo de Determinación de la Gravedad Especifica Máxima</i>	<i>98</i>
<i>Ilustración 25.</i>	<i>Compactador Mecánico Método Marshall.....</i>	<i>104</i>
<i>Ilustración 26.</i>	<i>Aplicación de Carga de Tracción Indirecta en Ejecución del Ensayo de Susceptibilidad al Agua de las Mezclas de Concreto Asfáltico</i>	<i>107</i>
<i>Ilustración 27.</i>	<i>Ensayo de Rueda de Hamburgo en Ejecución.....</i>	<i>110</i>
<i>Ilustración 28.</i>	<i>Montaje ensayo de Módulos Resilientes.....</i>	<i>112</i>

Listado de Gráficas

Gráfica 1.	Granulometría tolva 3/4" agregado natural.....	115
Gráfica 2.	Granulometría tolva 1/2" agregado natural.....	115
Gráfica 3.	Granulometría arena agregado natural.....	116
Gráfica 4.	Granulometría fórmula de trabajo mezcla asfáltica convencional.....	117
Gráfica 5.	Granulometría material grueso de cerámica	118
Gráfica 6.	Granulometría arena de cerámica	118
Gráfica 7.	Granulometría fórmula de trabajo mezcla asfáltica modificada.....	119
Gráfica 8.	Rueda de Hamburgo Mezcla Asfáltica Convencional	137
Gráfica 9.	Rueda de Hamburgo Mezcla Asfáltica Modificada.....	138
Gráfica 10.	Módulos resilientes mezcla asfáltica convencional	139
Gráfica 11.	Módulos resilientes mezcla asfáltica modificada	140
Gráfica 12.	Granulometría fórmula de trabajo mezcla asfáltica convencional con límites de la norma INVIAS.....	143
Gráfica 13.	Granulometría fórmula de trabajo mezcla asfáltica modificada con límites de la norma INVIAS.....	144
Gráfica 14.	Gráfica Estabilidad-Porcentaje de asfalto mezcla asfáltica convencional.....	147
Gráfica 15.	Gráfica Flujo-Porcentaje de asfalto mezcla asfáltica convencional	147
Gráfica 16.	Gráfica Vacíos con aire-Porcentaje de asfalto mezcla asfáltica convencional	148
Gráfica 17.	Gráfica Estabilidad-Porcentaje de asfalto mezcla asfáltica modificada	151
Gráfica 18.	Gráfica Flujo-Porcentaje de asfalto mezcla asfáltica modificada.....	152
Gráfica 19.	Gráfica Vacíos con aire-Porcentaje de asfalto mezcla asfáltica modificada	152

Gráfica 20. Comparación módulos resilientes mezcla asfáltica convencional y mezcla asfáltica modificada con cerámica al 30%	160
---	-----

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: Análisis Comparativo del Comportamiento Mecánico y Dinámico de una Mezcla Asfáltica Convencional y una Modificada con Residuos Cerámicos Reemplazando Agregados Fino y Grueso y Utilizando Agregado de la Región del Pescadero en una Msc-25

AUTOR(ES): Silvia Juliana Triana Nigrinis
David Alonso Grandas Castillo

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): Norma Cristina Solarte Vanegas

RESUMEN

Este proyecto comparó el comportamiento mecánico y dinámico entre una mezcla asfáltica convencional y una mezcla asfáltica modificada con residuos cerámicos al 30%, para niveles de tránsito bajo (NT2). El desarrollo del proyecto se dividió en tres fases, la primera, consistió en la caracterización de los agregados y del asfalto siguiendo las recomendaciones de la Especificación General de Construcción de Carreteras 450 y 410, en lo relacionado a calidad mínima de agregados y asfalto, respectivamente. La segunda fase consistió en la realización del diseño de las mezclas mediante el método Marshall, siguiendo los lineamientos de la Especificación General de Construcción de Carreteras 450. En la fase final se verificó el diseño de las mezclas mediante los ensayos de susceptibilidad al agua mediante tracción indirecta (norma INV E-725), rueda de Hamburgo (norma AASHTO T324-04) y módulos resilientes (norma UNE-EN-12697-26, Anexo C). Las mezclas cumplieron satisfactoriamente los requerimientos del ensayo de susceptibilidad al agua. Aunque las dos mezclas cumplieron satisfactoriamente los requerimientos de deformación plástica, la mezcla modificada tuvo un mejor comportamiento (1.00 mm para mezcla modificada vs. 1.29 para mezcla convencional). La mezcla convencional tuvo un mejor comportamiento en el ensayo de módulo resiliente a las temperaturas de 5°C y 25°C, mientras que a 40° tuvieron un desempeño similar. La experimentación arrojó resultados satisfactorios para los tipos de mezclas. La mezcla asfáltica modificada puede ser usada en proyectos viales de nivel de tránsito bajo donde haya la posibilidad de usar residuos cerámicos. Futuros estudios deben evaluar la viabilidad económica de usar este tipo de mezclas.

PALABRAS CLAVE:

Cerámica, Mezclas Asfálticas Modificadas, Pavimentos, Módulos Resilientes

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: Comparative Analysis of the Mechanical and Dynamic Performance of an Msc-25 Conventional Asphalt Mix and an Msc-25 Modified Asphalt Mix (Ceramic Waste for Fine and Coarse Material), Using Aggregates from the Pescadero Region.

AUTHOR(S): Silvia Juliana Triana Nigrinis
David Alonso Grandas Castillo

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: Norma Cristina Solarte Vanegas

ABSTRACT

This project compared the mechanical and dynamic performance between a conventional and a modified (ceramic waste at 30%) asphalt mix, for low traffic levels (NT2). The development of the project was divided into three phases; the first phase was dedicated to the characterization of the aggregates and the asphalt following the recommendations of the General Construction Specification of Highways 450 and 410, regarding the minimum quality of aggregates and asphalt, respectively. The second phase consisted in carrying out the design of the mixtures using the Marshall method, following the guidelines of the General Road Construction Specification 450. In the final phase, the design of the mixtures was verified by the water susceptibility test by means of indirect traction (INV E-725 Standard), Hamburg wheel (AASHTO standard T324-04) and resilient modules (UNE-EN-12697-26 Standard, Annex C). The mixtures satisfactorily met the requirements of the water susceptibility test. Although the two mixtures satisfactorily fulfilled the requirements of plastic deformation, the modified mixture had a better performance (1.00 mm for modified mixture vs. 1.29 for conventional mixing). The conventional mixture had a better behavior for the resilient modulus test at temperatures of 5°C and 25°C, while performing similarly at 40°C. Experimentation yielded satisfactory results for both types of mixtures. The modified asphalt mix can be used in road projects at low traffic level where there is the possibility of using ceramic waste. Future studies should evaluate the economic feasibility of using this type of mixtures.

KEYWORDS:

Ceramic, Modified Asphalt Mix, Pavements, Resilient Modules

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

Introducción

En la actualidad, la reutilización de materiales clasificados como de desecho o desperdicio está tomando un papel muy importante dentro de las industrias a nivel mundial. Dentro de estas industrias anteriormente mencionadas, se incluye la industria de la construcción, en la cual se llevan algunos años realizando esfuerzos por aprovechar al máximo los recursos con los que se cuentan.

Esto anterior se puede observar en diversos campos de la construcción en los cuales se les da un nuevo uso a diferentes tipos de materiales tal y como se puede ver en (Gómez & Prada, 2015), (Palacio & José, 2016), (Rodríguez, 2014) y (Vides, 2016). Dentro de los cuales se encuentran el caucho de las llantas de los vehículos, la ceniza proveniente de procesos relacionados con la extracción de petróleo y el PVC, además de algunos otros materiales que en épocas anteriores terminaban depositados en basureros o en botaderos de escombros.

En lo que respecta a Colombia, en los últimos años se han hecho esfuerzos importantes en esta materia. Particularmente en el caso de los pavimentos, se están utilizando tramos realizados en pavimentos asfálticos modificados con grano de caucho, lo cual le abre las puertas a las infinitas posibilidades de mejoras que puede llegar a traer el modificar los materiales que componen las mezclas asfálticas. Esto podría considerarse mucho más relevante al juntar un beneficio en las características que definen el comportamiento de la mezcla, con el ahorro de materiales granulares o asfalto procedente de fuentes naturales, lo cual se traduce en ahorros a nivel ambiental y económico.

Por lo tanto, lo que se pretende realizar con este proyecto de grado es llegar a realizar una valoración de un material considerado de desecho como es el residuo o retazo de cerámica al

utilizarlo como alternativa a los agregados naturales con los que tradicionalmente se han fabricado las mezclas asfálticas. Teniendo en cuenta que podría llegar a generar mejoras a nivel de comportamiento e implicaciones económicas y ambientales positivas.

Para este proyecto de grado, el objeto principal es tomar una mezcla asfáltica semidensa del tipo 25 (MSDC-25), tradicionalmente hecha a base de materiales granulares, para este caso serán los obtenidos del río Chicamocha, en el sector conocido como el pescadero, en inmediaciones de los municipios de Aratoca, Cepita y el Área Metropolitana de Bucaramanga. Materiales que van a ser reemplazados en un 30% de su peso total por residuos cerámicos cuyas partículas alcanzan hasta los 12.5 [mm] (1/2”), a partir de lo cual se realizarán los ensayos correspondientes de acuerdo a la normativa vigente del INVIAS para evaluar la factibilidad de su utilización en proyectos con bajos volúmenes de tránsito.

Es importante resaltar que esta investigación se desarrolló de forma conjunta con otros dos proyectos de grado realizados en la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, los cuales contemplan porcentajes de reemplazo de agregados cerámicos del 35% y 40%. Estos proyectos de grado hacen parte de una investigación realizada entre la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) y la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB).

1. Generalidades

1.1. Delimitación del Problema

Esta investigación está enfocada en comparar las propiedades mecánicas y dinámicas que puede alcanzar una mezcla asfáltica modificada con residuos cerámicos con respecto a una mezcla asfáltica convencional del mismo tipo, pretendiendo brindar un aporte en el campo de las mezclas asfálticas modificadas, teniendo como objetivo evaluar la reutilización de materiales considerados RCD (Residuos de construcción y demolición), con el fin de reducir la utilización de recursos naturales en las mezclas asfálticas utilizadas en la construcción de las vías, creadas para solucionar las necesidades de la comunidad en general.

Con el fin de obtener un concepto de viabilidad de la utilización de este tipo de material como modificante de una mezcla asfáltica, se tomó como referencia lo contenido en la Especificación General de Construcción de Carreteras 450 (Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua) (INVIAS, 2013). Dentro de la cual se encuentran los parámetros mínimos que debe cumplir una mezcla para su aprobación tanto a nivel mecánico como a nivel dinámico.

En cuanto a los residuos de construcción y demolición (RCD), estos materiales se han convertido en una problemática nacional. Lo cual se puede evidenciar en la Ley 472 del 2017 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017), en la cual el estado reglamenta las actividades que se realizan alrededor de este tipo de materiales. En donde, además, se indica que solamente en el año 2011 se produjeron alrededor de 22'270.338 Toneladas de RCD en las principales ciudades del país, lo cual preocupa al estado que en pro de velar por lo consignado en los artículos 89 y 90 de la Constitución Política de Colombia (Asamblea Nacional Constituyente, 1991) decide crear disposiciones que le permitan fortalecer la gestión de este tipo de residuos.

Con el fin de desarrollar de esta investigación, se utilizaron las instalaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, puntualmente el edificio K en el cual se encuentran el laboratorio de geotecnia y pavimentos, el laboratorio de resistencia de materiales y el laboratorio de nanotecnología. El desarrollo de esta investigación se dio durante el transcurso del segundo semestre del año 2018 y el primer semestre del año 2019.

1.2. Estado del Arte

De acuerdo a (Silvestre, Medel, García, & Navas, 2013), (Kara & Karacasu, 2017), (Wan, Wu, Xiao, Liu, & Schlangen, 2016) y (Muniandy, Husna Ismail, & Hassim, 2017) la modificación de mezclas asfálticas con cerámica aún se encuentra en su etapa de investigación. Cabe resaltar que han ido realizando comparaciones de sus resultados con lo estipulado por la normativa vigente de sus países, en los cuales cumple ampliamente con los estándares de calidad. Por tal razón, a su parecer este podría ser uno de los temas a tener en cuenta desde ahora y pensando en el futuro, debido al potencial de este material para la modificación de mezclas asfálticas.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

- Comparar el comportamiento mecánico y dinámico entre una mezcla asfáltica convencional y una mezcla asfáltica modificada con residuos cerámicos al 30% reemplazando agregados fino y grueso provenientes del río Chicamocha con el fin de evaluar su aplicabilidad en proyectos con volúmenes bajos de tránsito.

1.3.2. Objetivos específicos

- Recopilar información relacionada con la modificación de asfaltos.
- Identificar y caracterizar los diferentes materiales que componen la mezcla asfáltica a mejorar, con el fin de garantizar las calidades requeridas por la norma INV E-450.
- Encontrar la diferencia en el comportamiento mecánico y dinámico entre la mezcla asfáltica convencional y la modificada con residuos cerámicos.
- Evaluar el uso de los residuos cerámicos como modificante de las mezclas asfálticas dentro de proyectos en vías con bajos volúmenes de tránsito, en una capa intermedia de pavimento a partir de su comportamiento mecánico y dinámico en comparación con una mezcla asfáltica convencional.

1.4. Alcance

Con este proyecto de grado se comparó el comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica convencional del tipo MSC-25 con el de una mezcla asfáltica modificada con cerámica al 30% con el fin de corroborar o descartar el uso de ésta en asfaltos modificados. Estos dos se realizaron utilizando agregado proveniente del río Chicamocha.

Con este fin se llevaron a cabo ensayos correspondientes a la caracterización de los agregados pétreos, los agregados cerámicos y el asfalto. Por otra parte, se realizó todo lo relacionado con la obtención del contenido óptimo de asfalto para la mezcla por medio del método de Marshall. Finalmente, para la evaluación del diseño obtenido anteriormente se llevaron a cabo los ensayos correspondientes a la evaluación del método de Marshall, consignados en la especificación general de construcción de carreteras 450 del INVIAS (INVIAS, 2013), los cuales corresponden a resistencia a la deformación plástica, susceptibilidad al agua y módulos resilientes.

2. Marco Teórico

El estado de las vías incide de forma importante en aspectos relevantes, tanto para la vida del usuario que la transita, como para el estado de cuya buena administración depende la competitividad de las industrias, la seguridad y el bienestar en general. Esto anterior, de acuerdo a (Rondón Quintana, Fernandez, & Fuentes, 2012) “una superficie en mal estado incide en los siguientes costos de operación: combustibles, lubricantes, llantas, reparación y refacciones, depreciación, seguros y tiempo de transporte de las mercancías” (pag.9).

Por tal razón, es importante conocer y tener en cuenta algunos aspectos básicos en lo que respecta a las mezclas asfálticas, como los presentados a continuación.

2.1. Agregado Natural

De acuerdo a (Mallick & El-Korchi, 2013), el agregado no es más que suelo procesado. Cuando estos son de agregado natural, se pueden obtener de ríos o canteras, donde se procesan triturándolas en los tamaños a utilizar, este material obtenido, tendrán las mismas características de su roca de procedencia.

Principalmente, los agregados de origen mineral, poseen una composición química conformada por: silicatos, carbonatos, óxidos, sulfitos y sulfuros.

Por otra parte en (Rondon Quintana & Reyes Lizcano, 2015), dicen que los agregados usados en las mezclas asfálticas, son aquellos que deben tener mejores características, ya que ocupan entre el 88% y el 96% de la masa total de la mezcla asfáltica, soportando y transmitiendo de forma reducida las cargas de los vehículos en las vías a las distintas capas del pavimento.

También mencionan que los agregados pétreos en la producción de mezclas asfálticas están conformados por: gravas (desde 2mm a 6,4cm), arenas (desde 0,075mm a 2mm) y filler o llenante mineral (menores a 0,075mm).

En (Atkins, 2003) afirman que los agregados naturales pueden tener origen en rocas del tipo: ígneas (las cuales son formadas a partir del enfriamiento de material volcánico), sedimentarias (formadas por la sedimentación de químicos o minerales) y metamórficas (las cuales se crean a partir de la mezcla de rocas ígneas y sedimentarias expuestas a grandes temperatura y presiones).

Para el desarrollo de este proyecto de grado se utilizó material proporcionado por la cantera del pescadero, ubicada aproximadamente a 40 Km de la ciudad de Bucaramanga, por la vía que conecta a Bucaramanga con la ciudad de Bogotá. Esa es una de las fuentes más importantes del departamento debido a sus buenas características, las cuales cumplen a cabalidad con lo estipulado en la Especificación General para Construcción de Carreteras 450 (INVIAS, 2013) tal y como se muestra en la caracterización realizada a los agregados en el desarrollo de este proyecto de grado.

2.2. Cerámica

Con el fin de llevar a cabo el presente proyecto de grado, se utilizaron residuos de productos cerámicos procedentes de una de las empresas ubicadas en el departamento de Norte de Santander, específicamente en la ciudad de Cúcuta llamada Cerámica Italia. De acuerdo a lo consignado en la investigación (Cely Illera & Bolívar León, 2015), los productos realizados en la zona que comprende a Cúcuta y sus alrededores poseen propiedades técnicas y estéticas que en circunstancias normales se conservaran a lo largo del tiempo.

Como materia prima para la elaboración de los productos cerámicos que hacen parte del portafolio de las empresas, se utiliza una arcilla de color rojizo y textura plástica obtenida en inmediaciones del municipio de El Zulia. Para la realización de lo que se conoce como cerámica, esta arcilla es sometida a distintos tipos de procesos entre los cuales se encuentran la cocción, en donde el material puede llegar a estar hasta a temperaturas superiores a los 1000°C, lo cual le brinda propiedades como resistencia a la flexión, a la abrasión y le da cierta porosidad, entre otros.

2.3. Asfalto

Según (Reyes Lizcano, 2003), los asfaltos son materiales que pueden ser líquidos, semisólidos o sólidos. Tienen cualidades aglutinantes y propiedades físicas y químicas que permiten ser altamente impermeable, adherente, cohesivo y a su vez soportar grandes esfuerzos instantáneos y recuperarse elásticamente, lo cual lo hace ideal para la producción de mezclas asfálticas. En lo que respecta a los asfaltos, la temperatura ocupa un papel muy importante en su comportamiento. A partir de las variaciones de ésta, se modifican propiedades tales como la viscosidad, lo cual produce cambios en las características generales del asfalto.

Dentro de este proyecto se utilizó asfalto de la zona del Área Metropolitana de Bucaramanga, el cual fue proporcionado por la empresa Asfaltart, con sede ubicada en el municipio de Girón.

De acuerdo a sus características, procedencia u otros aspectos los asfaltos pueden clasificarse en:

2.3.1. Asfaltos naturales

Se crea a partir de procesos naturales, depositándose en rocas porosas. Estos se pueden manifestar en manantiales, lagos o exudaciones en donde se pueden encontrar con algunas concentraciones de materiales externos tales como minerales o agua.

2.3.2. Asfalto derivado del petróleo

Conforman la gran mayoría de asfaltos utilizados hoy en día. Para su obtención, se extraen durante los procesos de refinado del petróleo, por medio de un método denominado destilación directa.

2.3.3. Cementos asfálticos sólidos

Son una combinación de asfaltos refinados y un aceite fluidificante, que lo convierte en el cemento asfáltico ideal para la pavimentación. Además tiene un mejor comportamiento frente al efecto de ácidos, sales y alcoholes.

2.3.4. Cementos asfálticos líquidos

Se crean a partir de la mezcla de una base asfáltica y un fluidificante volátil, lo cual vuelve al cemento asfáltico mucho más fluido, llevándolo a tener penetraciones hasta de 300.

2.3.5. Emulsiones asfálticas

Se configura a partir de la unión de asfalto-agua y un pequeño porcentaje de un agente activador de superficie. Ésta mezcla al ponerse en contacto con el agregado reacciona evaporando o haciendo fluir el agua, lo cual ayuda a que se dé la unión entre las partículas de asfalto con los agregados

2.3.6. Asfaltos modificados

Son asfaltos a los cuales se les añade materiales que mejoran su comportamiento, dándoles una mejor resistencia frente a la acción del tránsito y del clima. Éstos pueden llegar a modificar sus propiedades reológicas, la adherencia, su resistencia al envejecimiento entre otras características.

2.4. Mezclas Asfálticas

De acuerdo a lo consignado en (Rondon Quintana & Reyes Lizcano, 2015) y (Thom, 2014), complementado con la Especificación General para Construcción de Carreteras 450 (INVIAS, 2013) las mezclas asfálticas están compuestas por un ligante asfáltico y agregados pétreos, los cuales deben cumplir con requisitos mínimos de calidad de acuerdo a las normas que lo rijan. A partir de esto se han realizado diferentes variaciones con el fin de cubrir las necesidades y demandas del mercado en cuanto a seguridad, comodidad, estética, durabilidad y capacidad de los pavimentos. Esto anterior se ha derivado en distintos tipos de mezclas asfálticas, las cuales cumplen cada una con una función específica de utilización. En Colombia, generalmente las variables de mezclas asfálticas utilizadas son:

2.4.1. Mezcla asfáltica abierta en frío

Las mezclas asfálticas abiertas en frío o MAF son mezclas asfálticas que se caracterizan por tener una granulometría de agregados pétreos en la cual predomina el material de tamaño grueso, estas pueden llegar a tener tamaños máximos nominales que generalmente van desde 19 [mm] (3/4") hasta 37.5 [mm] (1 1/2"). Esta condición produce asfaltos con altos contenidos de vacíos, ya que como mínimo deben cumplir con un 10% de vacíos. Esto anterior les permite dar mejores condiciones a las vías permitiéndoles desalojar el agua de forma rápida y así evitar el

fenómeno del hidropneumático, mejorar la fricción y disminuir el ruido. Se consideran mezclas frías ya que se pueden construir a temperaturas de hasta 80°C.

2.4.2. Mezcla asfáltica abierta en caliente

Las mezclas asfálticas abiertas en caliente o MAC tienen características muy similares a las MAF mencionadas de forma inmediatamente anterior. Su granulometría también se caracteriza por tener principalmente material de tamaño de partículas grandes, las cuales pueden tener tamaños máximos nominales que van desde 50 [mm] (2") hasta 75 [mm] (3"). Los procesos que involucran la utilización de este tipo de mezclas deben realizarse a temperaturas considerablemente altas las cuales normalmente se encuentran entre 110°C y 120°C.

2.4.3. Mezcla asfáltica densa en frío

Este tipo de mezclas (MDF) se caracteriza por tener una granulometría con variedades de tamaño de partículas, con un tamaño máximo nominal de 37.5 [mm] (1 1/2"), 25 [mm] (1") y 19 [mm] (3/4"). Esta mezcla de diferentes tamaños de materiales aumenta la cantidad de material granular fino permitiendo así la obtención de un pavimento con un menor contenido de vacíos, es decir, menos permeable. Estas características le permiten a este tipo de mezclas mejores comportamientos en lo que respecta a la resistencia y la rigidez, además les proporciona mayor durabilidad a lo largo del tiempo. Así como las MAF, este tipo de mezclas se pueden construir a temperaturas considerablemente bajas (inferiores a 80°C).

2.4.4. Mezcla asfáltica densa en caliente

Las mezclas asfálticas densas en caliente (MDC) tienen conformaciones y características similares a las MDF mencionadas de forma inmediatamente anterior. Según la Especificación General de Construcción de Carreteras 450 (INVIAS, 2013), estas pueden tener materiales de

tamaños máximos nominales de 25 [mm] (1”), 19 [mm] (3/4”) y 10 [mm] (3/8”). Para su fabricación y compactación, estas deben encontrarse en temperaturas cercanas a los 150°C.

2.4.5. Mezcla asfáltica semidensa en caliente

De acuerdo a lo consignado en la Especificación General de Construcción de Carreteras 450 (INVIAS, 2013), este tipo de mezclas asfálticas se compone de una granulometría que se configura como un punto medio entre las mezclas asfálticas abiertas y las mezclas asfálticas densas. Se pueden utilizar para las capas de rodadura, intermedia y base teniendo en cuenta los espesores y características definidas por el INVIAS para los pavimentos.

2.4.6. Mezcla asfáltica drenante

Las mezclas asfálticas drenantes (MD), son mezclas con un contenido de vacíos especialmente alto (entre el 20% y 25%) con el fin de evacuar el agua que llegue a la superficie del pavimento. Este tipo de mezclas es utilizado únicamente en la capa de rodadura de los pavimentos. Su granulometría contiene en su mayoría materiales de tamaño particular grueso.

2.4.7. Mezcla asfáltica discontinua en caliente o Microaglomerados

Este tipo de mezclas (M), se caracteriza por tener una granulometría con predominancia de materiales de tamaño particular pequeño, teniendo unos tamaños máximos nominales de 9.5 [mm] (3/8”) y 8 [mm] (5/16”). Su uso se da dentro de las capas de rodadura de los pavimentos, en las cuales se coloca con espesores bajos, los cuales ayudan a corregir irregularidades y deterioros superficiales.

2.4.8. Mezclas tibias

Las mezclas tibias son aquellas que se mezclan y compactan a temperaturas medias que oscilan entre los 100°C y 140°C. Esto anterior repercute principalmente en la reducción de las

emisiones a la atmosfera y la energía que implica el trabajo a altas temperaturas. Principalmente, sus mejoras son de carácter ambiental permitiéndole a las empresas productoras de asfaltos situarse en locaciones más cercanas a las ciudades y dándoles un ahorro de hasta el 50% en los combustibles.

2.4.9. Mezclas asfálticas modificadas

Las mezclas asfálticas modificadas son aquellas a las que se les adiciona algún tipo de aditivo o material con el fin de conseguir un mejor comportamiento en lo que respecta a la resistencia a la deformación, la rigidez, la fatiga, el envejecimiento, entre otras. El proceso de inclusión de material puede darse de dos formas: en primer lugar está la vía húmeda, la cual se da cuando el aditivo mejorador se le agrega al asfalto asegurándose de que la mezcla sea homogénea y teniendo en cuenta aspectos como el almacenamiento; por otra parte está la vía seca, en la que los materiales mejoradores se incluyen como un porcentaje de los agregados que conforman la mezcla.

2.5. Tipos de Pavimentos

De acuerdo a (Papagiannakis & Masad, 2007), los tipos de pavimentos a utilizarse en las diferentes vías, dependen principalmente de la forma en la que desean transmitir las cargas dentro de sus diferentes capas. Eso anterior, depende de las características propias de cada uno de los tipos de pavimentos, a partir de su conformación y configuración.

A partir de lo anteriormente mencionado, complementado con (Montejo Fonseca, 2002), los tipos de pavimentos principalmente se dividen en:

2.5.1. Pavimentos flexibles

Los pavimentos flexibles se caracterizan por transmitir de forma uniforme las cargas, mientras que las deformaciones son desigualmente transmitidas a las capas inferiores del pavimento. Generalmente, su estructura se compone de subrasante, subbase granular, base granular y carpeta asfáltica (la carpeta asfáltica puede dividirse en 2 o 3 subcapas de acuerdo al diseño) las cuales pueden variar de acuerdo a lo contemplado en el diseño.

2.5.2. Pavimentos semirrígidos

Los pavimentos semirrígidos son una combinación entre los pavimentos de tipo flexible y rígido. Estos se configuran estructuralmente de la misma forma que el pavimento flexible mencionado en el numeral inmediatamente anterior, con la diferencia de que una de sus capas es rigidizada mediante la adición de algún agente tal como la cal, el cemento portland, asfalto, entre otros. Esto anterior pretende mejorar las condiciones mecánicas de la mezcla asfáltica, buscando una mayor calidad de los pavimentos sin que llegar a esta signifique un detrimento económico al proyecto.

2.5.3. Pavimentos rígidos

Los pavimentos rígidos se componen de una subrasante, una subbase (opcional) y una losa de concreto. Sus propiedades dependen de las características de la resistencia de la losa de concreto y sus dimensiones dependen directamente de la calidad de la capa de subbase o subrasante de acuerdo al caso. En este tipo de pavimento los esfuerzos se distribuyen ampliamente debido a la rigidez y propiedades elásticas del material.

2.5.4. Pavimentos articulados

Este tipo de pavimento se basa en la utilización de adoquines o elementos prefabricados para crear una calzada transitable para los vehículos. Su estructura se compone de subrasante, subbase (opcional), capa de arena, adoquines y capa sellante de arena.

2.6. Estudios Previos Sobre Mezclas Asfálticas Modificadas

Tabla 1. Utilizing recycled ceramic aggregates obtained from the industry in the design of open graded wearing course on both laboratory and in situ basis.					
Referencia	Título	Autor (es)	Resumen	Mejora obtenida	Nombre de la revista
(Silvestre, Medel, García, & Navas, 2013)	Utilizing recycled ceramic aggregates obtained from tile industry in the design of open graded wearing course on both laboratory and in situ basis	Ramon Silvestre Esther Medel Alfredo García José Navas	<p>La propuesta de esta investigación se dio a partir de buscar la factibilidad de la utilización de desperdicios de porcelana y gres para la fabricación o producción de agregados para su utilización en mezclas asfálticas densas en caliente. Esto anterior con el fin de disminuir los efectos de los residuos de construcción sobre el ambiente y también reducir la demanda de agregados procedentes de fuentes naturales. Con el fin de avalar el uso de los agregados de origen cerámico, se hicieron en primer lugar las pruebas correspondientes a la caracterización en donde se buscó que estos cumplieran con la normatividad establecida en España. Luego de comprobar que estos cumplían los requerimientos buscaron el porcentaje óptimo de asfalto para cada una de las mezclas (convencional y modificada). Por último, realizaron pruebas de acuerdo a la reglamentación española tales como la densidad bulk, contenido de asfalto, sensibilidad al efecto de la humedad, entre otros. Por último, de acuerdo a los resultados obtenidos en el reemplazo del 30% de los agregados naturales por agregados de origen cerámico pudieron llegar a la conclusión de que es una opción factible para vías de bajo volumen de tráfico, sin embargo, recomiendan tener en cuenta la resistencia a la humedad ya que es un aspecto por mejorar en la mezcla que propusieron en la investigación. También recomiendan seguir con esta investigación utilizando porcentajes diferentes de reemplazo de los agregados cerámicos y otros tipos de desperdicios cerámicos a utilizar.</p>	El reemplazo de los agregados naturales por residuos de cerámica da una mejor resistencia a la deformación plástica.	Elservier Journal-Materials and design, Código ISSN 0261-3069, 2013.

Tabla 2. Investigation of waste ceramic tile additive in hot mix asphalt using fuzzy logic approach

Referencia	Título	Autor (es)	Resumen	Mejora obtenida	Nombre de la revista
(Kara & Karacasu, 2017)	Investigation of waste ceramic tile additive in hot mix asphalt using fuzzy logic approach	Çagdas Kara Murat Karacasu	<p>Esta investigación se desarrolló a partir de la idea de utilizar materiales que se consideran de residuos o de desperdicio para nuevos usos y de esta forma contribuir a una mejor utilización de los recursos naturales bajo el concepto de medio ambiente sostenible. Para el desarrollo de esta investigación, se planteó trabajar reemplazando diferentes porcentajes del peso total de los agregados de la mezcla (0%, 10%, 20%, 30% y 40%), los cuales se mezclarían con diferentes porcentajes de contenido de asfalto (3,5%, 4%, 4,5%, 5%, 5,5%, 6% y 6,5%). De cada una de las combinaciones anteriormente mencionadas se fabricaron 3 briquetas, lo cual arrojó un total de 105 briquetas, las cuales fueron probadas por medio del método de Marshall y la normativa de Turquía para mezclas asfálticas con el fin de encontrar para cada una de estas el contenido óptimo de asfalto. Posteriormente, realizaron 6 briquetas de cada uno de los porcentajes de inclusión de agregado procedente de material cerámico con el contenido óptimo de asfalto encontrado anteriormente, con el fin de aplicar cargas dinámicas y estáticas para medir su deformación. Como resultado de esta investigación pudieron llegar a la conclusión de que la mezcla asfáltica con mejores condiciones para ser utilizada es la que hace la inclusión de un 30% de agregados de origen cerámico ya que cumple con todos los requerimientos de las normas de Turquía para mezclas asfálticas, a excepción del contenido de vacíos, lo cual de acuerdo a la investigación no es tan determinante ya que tuvo un mejor desempeño en las pruebas estáticas, dinámicas y en las propuestas dentro de método de Marshall.</p>	Mejores desempeños en las pruebas estáticas, dinámicas y en los ensayos correspondientes al método de Marshall para las muestras realizadas con inclusión de cerámica en comparación con las muestras convencionales	Elservier Journal- Construction and building materials, ISSN 0950-0618, 2017.

Tabla 3. Evaluación de mezclas asfálticas con adición de ceniza como porcentaje del llenante y caucho como porcentaje de asfalto					
Referencia	Título	Autor (es)	Resumen	Mejora obtenida	Nombre de la revista
(Rodríguez, 2014)	Evaluación de mezclas asfálticas con adición de ceniza como porcentaje del llenante y caucho como porcentaje de asfalto	Marlon Leonardo Rodríguez Sierra	<p>Este proyecto de investigación surgió a partir de la problemática relacionada con la escasez de material de tipo fino para la producción de mezclas asfálticas, los cuales según se señala dentro de esta son muy importantes en aspectos tales como la densidad, impermeabilidad, estabilidad y flujo. Por lo cual, la ceniza que es producida en los procesos de obtención del petróleo podría ser un reemplazo de estos materiales finos. Por otra parte, consideran las llantas usadas como un problema en cuestión de desechos en las ciudades, por lo cual el aprovechar su contenido de caucho podría significar una ayuda al medio ambiente y a su vez generaría mejoras en el comportamiento de las mezclas asfálticas. Para esta investigación se utilizaron 7 tipos diferentes de mezclas asfálticas variando el contenido de asfalto/caucho y la inclusión de ceniza en un porcentaje del peso total del llenante mineral. A partir de estas mezclas asfálticas. Para cada tipo de mezcla se hicieron 12 briquetas (4 por cada contenido de asfalto), fabricando en total 84 briquetas. Estas se ensayaron para poder encontrar su estabilidad, flujo, contenido de asfalto y densidad bulk. De acuerdo a la investigación, debido a que el reemplazo del llenante en un 50% solamente era 3,5 g en una muestra de 1200g su inclusión no era muy representativa, por lo cual el investigador recomienda para próximas investigaciones reemplazar el 100% del llenante. Por otra parte, en la modificación del asfalto con caucho se llegó a la conclusión de que debe manejarse en porcentajes menores al 5% con el fin de que no afecte la estabilidad, ya que en un porcentaje mayor incumpliría con lo propuesto por la normativa colombiana.</p>	Se estimo un aproximado del porcentaje óptimo de contenido de grano de caucho para que este permita obtener las mejores condiciones posibles brindadas por el material.	Trabajo de grado, Universidad Pontificia Bolivariana, 2014

Tabla 4. Análisis comparativo de una mezcla asfáltica convencional y modificada con un 4% de PVC					
Referencia	Título	Autor (es)	Resumen	Mejora obtenida	Nombre de la revista
(Vides, 2016)	Análisis comparativo de una mezcla asfáltica convencional y modificada con un 4% de PVC	Ciro Alfonso Vides Bautista	<p>De acuerdo a esta investigación, las mezclas asfálticas tradicionales tienen un alto costo, por lo cual se deben buscar alternativas que mejoren su comportamiento a lo largo del tiempo y que de preferencia que estas mejoras se obtengan a partir de la utilización de materiales reutilizados. Por esa razón, en este proyecto se buscó utilizar un producto muy utilizado dentro del sector de la construcción y cuyos residuos son llevados a los botaderos de las ciudades como sitio de disposición final. A partir de lo mencionado anteriormente, este trabajo contempla reemplazar el 4% del peso total de los agregados con PVC. Para esto, en primer lugar, se hizo la caracterización de los agregados y el asfalto y su correspondiente comparación con los estándares establecidos en la normatividad colombiana. Luego, con el fin de obtener el contenido óptimo de asfalto se realizaron 7 probetas con un determinado rango de asfalto, a partir de lo cual se escogieron 3 rangos y se hicieron 2 probetas de cada uno con el fin de comparar los resultados con los obtenidos anteriormente. Después de tener el contenido óptimo de asfalto se pasó a la realización de la parte dinámica, la cual se realizó con ayuda de la máquina DTS-30. Para esta práctica se pusieron dos tipos de mezclas asfálticas (5% de asfalto, 4% de PVC y 5% de asfalto, 0% de PVC) a 6 diferentes frecuencias y a 4 temperaturas diferentes. Como conclusión encontraron que el PVC muestra un mejor comportamiento viscoelástico y un mejor comportamiento de las muestras de PVC a bajas temperaturas y a frecuencias altas, por lo tanto, recomiendan la utilización de esta modificación en zonas con bajas temperaturas.</p>	Se llegó a la conclusión de que en el PVC muestra mejores condiciones en zonas con bajas temperaturas con respecto a la mezcla convencional	Trabajo de grado, Universidad Pontificia Bolivariana, 2016

Tabla 5. Characteristics of Ceramic Fiber Modified Asphalt Mortar					
Referencia	Título	Autor (es)	Resumen	Mejora obtenida	Nombre de la revista
(Wan, Wu, Xiao, Liu, & Schlangen, 2016)	Characteristics of Ceramic Fiber Modified Asphalt Mortar	Jiuming Wan Shaopeng Wu Yue Xiao Quantao Liu Erik Schlangen	<p>Esta investigación parte de la idea de utilizar aditivos que mejoren las características iniciales de los asfaltos utilizados para la producción de las mezclas asfálticas. Puntualmente para este caso utilizaron un tipo de fibra de cerámica que posee propiedades que le dan estabilidad a temperaturas relativamente altas y resistencia a esfuerzos externos de vibración mecánica. Para comprobar las prestaciones de la fibra de cerámica utilizaron dos tipos de asfaltos (60/80 y 80/100) los cuales modificaron con diferentes contenidos de fibra cerámica incluyendo un porcentaje del peso total del asfalto (0%, 1%, 2% y 3%). A estas muestras le hicieron pruebas correspondientes a penetración, punto de ablandamiento, ductilidad y viscosidad dinámica. Por otra parte, por medio de un microscopio de fuerza atómica pudieron verificar que la fibra de cerámica se repartió de forma homogénea en el asfalto. Como resultados de las pruebas realizadas se pudo comprobar que la fibra de cerámica hace más fuerte el asfalto, lo cual se puede observar en los ensayos correspondientes a la penetración. También, llegaron a la conclusión de que mejora lo relacionado a la estabilidad de la temperatura, brindándole especialmente a los asfaltos suaves mejores propiedades de resistencia en temperaturas relativamente altas. A su vez, estas mejoras en relación a la temperatura pueden verse en temperaturas entre los 30°C y los 50°C, ya que, según lo investigado, a temperaturas mayores a los 50°C el efecto producido por la fibra cerámica es despreciable.</p>	<p>La modificación del asfalto con la inclusión de fibras cerámicas vuelve el asfalto más fuerte y le brinda una mayor estabilidad térmica</p>	<p>Multidisciplinary Digital Publishing Institute- Materials, código ISSN 1996-1944, 2016.</p>

Tabla 6. Performance of recycled ceramic waste as aggregates in hot mix asphalt (HMA)					
Referencia	Título	Autor (es)	Resumen	Mejora obtenida	Nombre de la revista
(Muniandy, Husna Ismail, & Hassim, 2017)	Performance of recycled ceramic waste as aggregates in hot mix asphalt (HMA)	Ratnasamy Muniandy Dhieyatul Husna Ismail Salihudin Hassim	<p>Esta investigación surgió a partir del interés de los investigadores en buscar una solución factible a un problema que se está presentando en Malasia. Debido al crecimiento de la economía sobre todo en materia de producción de materiales de construcción tales como la cerámica, que es utilizada para pisos, fachadas y algunos otros usos lo cual genera una gran cantidad de residuos que al momento de la realización de esta investigación eran enviados a los botaderos creando problemas en materia ambiental. A partir de esto, se propone la utilización de estos residuos como agregados finos en la producción de mezclas asfálticas en caliente. Con el fin de validar la utilización de estos se realizaron las pruebas estipuladas por la normatividad del país, dentro de las cuales estaba la caracterización de los agregados, la caracterización del asfalto, el diseño por medio del método de Marshall con el fin de hallar el contenido óptimo de asfalto y, por último, los ensayos correspondientes al módulo resiliente. Por tal razón, escogieron utilizar 6 porcentajes de inclusión de agregados cerámicos en las franjas finas de los agregados con origen de granito que son normalmente utilizados para la elaboración de las mezclas asfálticas en caliente (0%, 20% 40%, 60%, 80% y 100%), cada uno de estos porcentajes se probó con contenidos de asfalto entre 4% y 6% en intervalos de 0,5%. A partir de la validación de la calidad de los agregados y el asfalto con la normativa se pasó a buscar el contenido óptimo de asfalto por medio del método de Marshall a lo cual siguió el ensayo de módulos resilientes. Como resultado, evidenciaron que el mejor comportamiento lo tuvo la muestra en las que reemplazaron un 20% del agregado natural por agregado de origen cerámico, en el cual tuvieron mejores resultados tanto en la estabilidad y el flujo propuestos por el método de Marshall como en el estudio del módulo resiliente, además de encontrar que para esta muestra fue para la que se utilizó un menor contenido de asfalto lo cual según la investigación podría ser un factor muy importante a tener en cuenta en lo relacionado a los costos de la producción de mezclas asfálticas.</p>	Mejores resultados en lo que respecta a estabilidad y flujo de Marshall y módulos resilientes en la mezcla asfáltica con inclusión de agregados cerámicos que en la mezcla asfáltica convencional	Journal of Material Cycles and Waste Management, ISSN 1438-4975, 2017.

Referencia	Título	Autor (es)	Resumen	Mejora obtenida	Nombre de la revista
(Andrzejuk, Barnat-Hunek, Siddique, Zegardło, & Łagód, 2018)	Application of Recycled Ceramic Aggregates for the Production of Mineral-Asphalt Mixtures	Wojciech Andrzejuk Danuta Barnat-Hunek Rafat Siddique Bartosz Zegardło Grzegorz Łagód	<p>Para esta investigación, decidieron tomar como punto de partida la tendencia de dar nuevos usos a los materiales considerados de desecho que producen las diferentes fabricas o empresas. Puntualmente en este caso decidieron ir a un lugar de deposición de materiales sobrantes de una empresa que se dedica a fabricar elementos sanitarios cerámicos, los cuales con la ayuda de una maquinaria fueron rompiendo hasta obtener partículas del tamaño requerido para su utilización como agregados. A estas partículas les hicieron pruebas como la densidad, densidad bulk, módulo de elasticidad, entre otras y las compararon con los resultados obtenidos por los materiales utilizados tradicionalmente para la elaboración de mezclas asfálticas. Posteriormente con la ayuda de un microscopio electrónico pudieron comparar la microestructura de cada uno de los materiales con el fin de realizar una estimación en lo que respecta a la adhesión de las partículas de los agregados con el asfalto de la mezcla. Para el diseño de la mezcla utilizaron 2 tipos de mezcla con diferentes orígenes de sus agregados, una tenía agregados provenientes de la dolomita y la otra agregados provenientes de granodioritas. Para estas mezclas asfálticas se realizaron los ensayos correspondientes al método de Marshall con el fin de obtener el porcentaje óptimo de asfalto. Posteriormente realizaron una comparación con el microscopio electrónico con el fin de observar la forma en la que se adhirieron las partículas de cada mezcla y el asfalto. De acuerdo a lo realizado pudieron llegar a decir que todas las mezclas tuvieron un comportamiento similar y cumplieron con los estándares propuestos por la normativa propuesta por el sitio de investigación. Por otra parte, todas las mezclas asfálticas tuvieron una buena adhesión partícula-asfalto a excepción de las partículas de granodiorita en donde se pudieron apreciar pequeñas roturas. Las mezclas de control, realizadas con los materiales tradicionales tuvieron un mejor comportamiento en cuanto a la resistencia a la humedad y la tensión indirecta a tracción. Como recomendación, los investigadores dicen que el reemplazo de agregados naturales por agregados cerámicos tiene un buen comportamiento para porcentajes entre el 20% y el 30% en los cuales cumple ampliamente los requerimientos de la especificación técnica</p>	Se encontró un contenido óptimo de cerámica situado entre el 20% y el 30% de reemplazo de los agregados naturales, para los cuales cumplió con las especificaciones técnicas de Polonia	Multidisciplinary Digital Publishing Institute- Materials, código ISSN 1996-1944, 2018.

Tabla 8. Comportamiento de una mezcla asfáltica densa en caliente modificada con la adición de PVC molido (reciclado)					
Referencia	Título	Autor (es)	Resumen	Mejora obtenida	Nombre de la revista
(Gómez & Prada, 2015)	Comportamiento de una mezcla asfáltica densa en caliente modificada con la adición de PVC molido (reciclado)	Sergio Andrés Gómez Fabián Prada Ayala	<p>La investigación propuesta en este proyecto de grado surge a partir de la búsqueda de la utilización de materiales de desperdicio con 2 fines, en primer lugar, evitar que se siga generando contaminación ambiental a partir de los residuos que generamos en las diferentes actividades. Por otra parte, se busca crear una mejor calidad de pavimentos asfálticos buscando alternativas a los materiales que tradicionalmente se han venido utilizando para la elaboración de productos tales como las mezclas asfálticas. Esperando que estos les puedan proporcionar mejores comportamientos, puntualmente para las mezclas asfálticas estos materiales podrían mejorar sus características de estabilidad, durabilidad, cohesión y adherencia los cuales son fundamentales para la evaluación de la calidad de esta tipo de mezclas. Asimismo, se espera que tanto por su costo como por las prestaciones adicionales que pueda brindar, estos nuevos materiales generen beneficios en materia económica. Para esta investigación el primer paso fue la caracterización y comparación con las calidades requeridas por las normas invias tanto de los agregados como del asfalto. A lo cual continuó el ensayo de Marshall por medio del cual obtuvieron el contenido óptimo de asfalto, a través de las mediciones de vacíos, estabilidad, peso específico y flujo. Posteriormente hicieron la caracterización del PVC, y pasaron a comparar por medio del método de Marshall la mezcla asfáltica convencional y dos tipos de mezclas modificadas con PVC (10% y 15% de inclusión de PVC), para los tres casos las mezclas asfálticas se elaboraron con el contenido óptimo de asfalto. Luego de esto, realizaron una comparación de las mismas mezclas asfálticas por medio del ensayo de Roller Compacter. Como resultados obtuvieron que las mezclas asfálticas modificadas con PVC siempre obtuvieron un mejor comportamiento en comparación con las mezclas asfálticas convencionales.</p>	Mejor comportamiento en mezclas asfálticas modificadas con PVC en comparación con las muestras utilizadas para evaluar el comportamiento de la mezcla asfáltica convencional	Trabajo de grado, Universidad Pontificia Bolivariana, 2015

Tabla 9. Análisis de comportamiento dinámico de una mezcla asfáltica en caliente con adición de PVC reciclado					
Referencia	Título	Autor (es)	Resumen	Mejora obtenida	Nombre de la revista
(Castro & Acevedo, 2016)	Análisis de comportamiento dinámico de una mezcla asfáltica en caliente con adición de PVC reciclado	Ludwing Eduardo Castro Sánchez Johan Yesid Acevedo Beltrán	<p>En esta investigación se toma como punto de partida el aprovechamiento de materiales que se consideran de desecho, con el fin de mitigar los impactos ambientales que se han producido a lo largo de los procesos que han tenido lugar en su elaboración y uso primario. Con este fin se busca la validación de su utilización en la elaboración de mezclas asfálticas en caliente. En primer lugar, se realizó la caracterización de los agregados y del asfalto, comparándolo con la normatividad colombiana para verificar la calidad de los materiales a utilizar en el proyecto. Luego, pasaron a la obtención del contenido óptimo de asfalto para la mezcla por medio del método de Marshall y obtuvieron el valor del contenido óptimo de asfalto. En cuanto a la modificación, propusieron reemplazar asfalto por PVC en un porcentaje basado en el porcentaje de asfalto a utilizar, a partir de lo cual se produjeron 4 diferentes losas con diferentes rangos de asfalto y PVC (0% PVC=4,9% Asfalto, 5% PVC=4,7% Asfalto+0,2% PVC, 10% PVC=4,4% Asfalto+0,5% PVC, 15% PVC=4,2% Asfalto+0,7% PVC). Para la fabricación de las losas se utilizó el Roller Compacter y se sacaron los núcleos para realizar las pruebas comparativas. Para la comparación se hicieron los ensayos de gravedad específica, densidad Bulk, porcentaje de vacíos, y por último los de módulos dinámicos. Como resultado del proyecto se llegó a un porcentaje óptimo de 0,2% de inclusión de PVC por medio de los ensayos de gravedad específica, densidad Bulk y porcentaje de vacíos. Mientras que por medio del ensayo de módulos dinámicos se obtuvo un resultado que mostro que el mejor comportamiento de la mezcla se obtiene cuando el contenido de PVC se encuentra entre 0.0% y 0.2%. Como conclusión, recomiendan usar el PVC como máximo en un 5% para que no afecte de manera importante el comportamiento de una mezcla asfáltica, ya que al incluirlo en porcentajes mayores aumenta los vacíos en la mezcla lo cual reduce la vida útil de la mezcla por la infiltración de agua por los poros.</p>	Obtención de un contenido óptimo para las mezclas asfálticas modificadas con PVC con el fin de llegar a conseguir su mejor comportamiento	Trabajo de grado, Universidad Pontificia Bolivariana, 2016

Tabla 10. Variación del módulo dinámico de mezclas asfálticas convencionales y modificadas con ceniza empleando agregados pétreos de Rionegro					
Referencia	Título	Autor (es)	Resumen	Mejora obtenida	Nombre de la revista
(Palacio & José, 2016)	Variación del módulo dinámico de mezclas asfálticas convencionales y modificadas con ceniza empleando agregados pétreos de Rionegro	Jaime Fernando Palacio Pérez José Luis Rodríguez Moya	<p>El planteamiento de este proyecto de investigación surge a partir de dos necesidades que han sido tenidas en cuenta por parte de los investigadores.</p> <p>En primer lugar, se basa en la dificultad para la consecución de agregados de tipo finos en la región, los cuales pueden ser reemplazados a través de la utilización de otro tipo de materiales. Por otra parte, la ceniza es un material que puede considerarse de desecho que se produce en el proceso de obtención de petróleo, por lo cual su uso en la elaboración de mezclas asfálticas podría significar un gran aporte en materia de manejo de residuos. Para validar su utilización la propuesta se basa en la caracterización de los agregados, los asfaltos y la ceniza comparándolo con los estándares propuestos por la normatividad colombiana vigente. Posteriormente el planteamiento pasa por la elaboración de 9 placas de pavimento en el Roller Compacter, con 3 diferentes contenidos de asfalto (4.5%, 5% y 5,5%) y con 3 contenidos de ceniza (0%, 5% y 10%). A partir de estas placas, se extraen los núcleos que se pasan a ensayar por medio de los módulos dinámicos en el equipo DTS-30. Como resultado obtuvieron mejores comportamientos a bajas temperaturas y a frecuencias bajas, también se validó el trabajo de compactación, pues los núcleos de las mismas placas tuvieron resultados muy similares. Se obtuvo un mejor comportamiento en las muestras que tienen adición de ceniza al 5%. Por último, recomiendan seguir con la investigación con el fin de encontrar un porcentaje óptimo de asfalto por medio de este método</p>	Obtención de un contenido de ceniza ideal para la inclusión en las mezclas asfálticas	Trabajo de grado, Universidad Pontificia Bolivariana, 2016

3. Metodología

Como propuesta metodológica, por medio de este proyecto de grado se realizó la evaluación tanto de la mezcla asfáltica convencional como de la modificada a partir de los lineamientos planteados en la norma INV-E 450 (INVIAS, 2013), ya que en esta se encuentran consignados los requerimientos mínimos en lo referente a la calidad de los materiales y de la mezcla asfáltica. Con el fin de cumplir con lo enunciado anteriormente se realizó:

3.1. Caracterización del Agregado Natural y Agregado Cerámico

De acuerdo a la Especificación General para Construcción de Carreteras 450 (INVIAS, 2013) en la siguiente tabla (Tabla 11), los ensayos que determinan la calidad de los agregados son:

Tabla 11. Requisitos de los Agregados para Mezclas Asfálticas en Caliente				
Especificación general de construcción de carreteras 450 (INVIAS, 2013)				
Característica	Norma de ensayo inv	Nivel de transito		
		NT1	NT2	NT3
Dureza, agregado grueso (O)				
Desgaste en la máquina de los Ángeles, máximo (%) - Capa de: rodadura / intermedia / base, 500 revoluciones -Capa de: rodadura / intermedia / base, 100 revoluciones	E-218	25/35/ 5/7/-	25/35/35 5/7/7	25 / 35 / 35 5/7/7
-Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%) - Capa de: rodadura / intermedia / base	E-238		25/30/30	20/25/25
Resistencia mecánica por el método del 10% de finos, capa de: rodadura / intermedia / base - Valor en seco, mínimo (kN) Relación húmedo/seco, mínima (%)	E-224			110/90/75 75/75/75
Coefficiente de pulimiento acelerado para rodadura, mínimo	E-232	0.45	0.45	0.45
Durabilidad (O)				
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, agregados fino y grueso, máximo (%)	E-220	18	18	18
Limpieza, agregado grueso (F)				
Impurezas en agregado grueso, máximo (%)	E-237	0.5	0.5	0.5

<u>Característica</u>	Norma de ensayo inv	Nivel de tránsito		
		NT1	NT2	NT3
<u>Limpieza, gradación combinada (F)</u>				
Equivalente de arena, mínimo (%) (Nota 1)	E-133	50	50	50
Valor de azul de metileno, máximo (Nota 1)	E-235	10	10	10
<u>Geometría de las partículas, agregado grueso (F)</u>				
Partículas planas y alargadas, relación 5:1, máximo (%)	E-240	10	10	10
Caras fracturadas, mínimo (%) - Una cara: rodadura / intermedia / base Dos caras: rodadura / intermedia / base	E-227	75/60/- -/-/-	75/75/60 60/-/-	85/75/60 70/-/-
<u>Geometría de las partículas, agregado fino (F)</u>				
Angularidad de la fracción fina, método A, mínimo (%) - Capa de: rodadura / intermedia / base	E-239	40/35/-	45/40/35	45/40/35

3.1.1. Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino (INV E-213-13). (INVIAS, 2013)

- *Objetivo del ensayo.*

El objetivo de este ensayo es determinar la granulometría de los agregados grueso y fino de un material, es decir, la distribución de tamaños de las partículas de un material por medio del procedimiento de tamizado.

- *Resumen del método.*

La muestra a utilizar en el ensayo se obtuvo de un proceso de cuarteo de material requerido por la tabla presentada a continuación (tabla 12) o en su defecto, a 4 veces el tamaño mínimo requerido para los procedimientos del presente ensayo que se indica en la tabla siguiente a la mencionada anteriormente (tabla 13). Se tuvo en cuenta la mayor de las dos.

Tabla 12. Masa Mínima de la Muestra de Agregado Tomada en Campo		
Normas de ensayo de materiales para carreteras INVIAS sección 200 (artículo 201-13) (INVIAS, 2013)		
<u>Tamaño del agregado</u>	<u>Masa mínima de la muestra de campo^bkg (lb)</u>	<u>Volumen de la muestra de campo litros (galones)</u>
Agregado fino		
2.36 mm (No.8)	10 (22)	8 (2)
4.75 mm (No.4)	10 (22)	8 (2)
Agregado grueso		
9.5 mm (3/8")	10 (22)	8 (2)
12.5 mm (½")	15 (35)	12 (3)
19.0 mm (¾")	25 (55)	20 (5)
25.0 mm (1")	50 (110)	40 (10)
37.5 mm (1½")	75 (165)	60 (15)
50.0 mm (2")	100(250)	80 (21)
63.0 mm (2½")	125(275)	100(26)
75.0 mm (3")	150(330)	120(32)
90.0 mm (3½")	175(385)	140(37)
NOTA: Las casillas resaltadas en amarillo fueron las franjas utilizadas para el ensayo		

La masa del agregado fino fue de 1000 [g] tanto para el material de origen natural como para el material cerámico. De la misma forma, la muestra de agregados gruesos tuvo una masa inicial de 5000 [g] cumpliendo con lo consignado en la siguiente tabla (tabla 13). Cabe resaltar que estas masas corresponden al material después de haberlo secado en el horno.

Tabla 13. Masa Mínima de la Muestra de Agregado Grueso para el Análisis Granulométrico	
Normas de ensayo de materiales para carreteras INVIAS sección 200 (artículo 213-13) (INVIAS, 2013)	
<u>Tamaño máximo nominal tamices con aberturas cuadradas, mm (pulgada)</u>	<u>Masa mínima de la muestra de ensayo, kg (lb)</u>
9.5 (3/8)	1 (2)
12.5 (½)	2 (4)
19.0 (¾)	5 (11)
25.0 (1)	10 (22)
37.5 (1½)	15 (33)
50.0 (2)	20 (44)
63.0 (2½)	5 (77)
75.0 (3)	60 (130)
90.0 (3½)	100 (220)
100.0 (4)	150 (330)
125.0 (5)	300 (660)
NOTA: Las casillas resaltadas en amarillo fueron las franjas utilizadas para el ensayo	

Posteriormente, se seleccionaron los tamices a utilizar, y se armaron ordenándolos de mayor apertura a menor apertura de malla de forma descendente, como se puede observar en la ilustración 1.

Luego de realizar el montaje de los tamices se colocó la muestra en su interior y se pasó al proceso de vibrado manual.

Por último, se determinó la masa de la muestra resultante de cada uno de los tamices y se registró como el peso retenido de la franja en cuestión.



*Ilustración 1. Serie de tamices para ensayo de granulometría
Fuente: Propia*

- *Cálculos.*
 - Porcentaje retenido en cada fracción

$$\% \text{ Retenido} = \frac{\text{Masa retenida}}{\text{Masa total de la muestra ensayada}}$$

- Porcentaje retenido acumulado

$\% \text{ Retenido Acumulado}_{\text{inicial}} = \% \text{ Retenido en el primer tamiz que retuvo material}$

$\% \text{ Retenido Acumulado} = \% \text{ Retenido tamiz anterior} + \% \text{ Retenido en el tamiz}$

- Porcentaje que pasa

$\% \text{ Pasa} = 100 - \% \text{ Retenido Acumulado}$

3.1.2. Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 [mm] por medio de la máquina de los Ángeles (INV E-218-13) (INVIAS, 2013)

- *Objetivo del ensayo*

Este ensayo se basa en la degradación de un material granular con una granulometría definida con el fin de obtener un indicador de la calidad relativa de los agregados. Para llevar a cabo este ensayo se utilizó la máquina de los ángeles, la cual crea los efectos de impacto y trituración que se le aplican por ciertos ciclos a los agregados. A partir de este desgaste provocado al material granular se realizó la medición correspondiente a la degradación materializado como un porcentaje de pérdida. En las ilustraciones 2 y 3 mostradas a continuación se muestra la máquina utilizada para la ejecución de este ensayo (Máquina de Los Ángeles).



Ilustración 2. (Izquierda) Máquina de los Ángeles Cerrada Vista de Frente

Fuente: Propia

Ilustración 3. (Derecha) Máquina de los Ángeles Abierta Vista de Frente

Fuente: Propia

- *Resumen del método*

Para la preparación de la mezcla tuvo en cuenta la siguiente tabla (tabla 14), de la cual se escogió la granulometría más parecida a la encontrada en el material a ensayar. A partir de esta escogencia se creó una muestra con las masas especificadas.

Tabla 14. Granulometría Muestras de Ensayo Máquina de los Ángeles					
Normas de ensayo de materiales para carreteras INVIAS sección 200 (artículo 218-13) (INVIAS, 2013)					
Tamaños de tamiz		Masas de las diferentes fracciones, g			
Pasa tamiz	Retenido en tamiz	Granulometrías			
		A	B	C	D
37.5 (1½")	25.0 (1")				
25.0 (1")	19.0 (¾")	1250 ± 10			
19.0 (¾")	12.5 (½")	1250 ± 10			
12.5 (½")	9.5 (⅜")	1250 ± 10	2500 ± 10		
9.5 (⅜")	6.3 (¼")	1250 ± 10	2500 ± 10	2500 ± 10	
6.3 (¼")	4.75 (No. 4)			2500 ± 10	
4.75 (No.4)	2.36 (No. 8)				5000 ± 10
Total		5000±10	5000±10	5000±10	5000 ±10

NOTA: La columna indicada en amarillo fue la franja utilizada para el ensayo

Después de verificar que la máquina estuviera limpia y de pesar la muestra inicial, esta se introdujo junto con la carga abrasiva (esferas metálicas). Posteriormente se encendió la máquina poniéndola en funcionamiento a velocidad constante (30 a 33 RPM) hasta completar los ciclos especificados en el método (500 Revoluciones).

Luego, la muestra se retiró de la máquina y se pasó por un tamiz de abertura mayor a 1.70 [mm] (Tamiz No.12). La fracción que pasó se lavó en el tamiz de 1.70 [mm] (Tamiz No.12), y lo que quedó en el tamiz se secó en el horno.

Por último, lo que quedó de la muestra original con un tamaño de partícula superior o igual a 1.70 [mm] se pesó y se registró como la masa seca después de realizado el ensayo.

- *Cálculos*

$$\%Pérdidas = \frac{P1 - P2}{P1} * 100$$

Donde:

$P1$ = Masa seca antes del ensayo

$P2$ = Masa seca después del ensayo

3.1.3. Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión, utilizando el aparato Micro-Deval (INV E-238-13) (INVIAS, 2013)

- *Objetivo del ensayo*

Este ensayo es una medida de la resistencia a la abrasión y de la durabilidad de los agregados pétreos. Con este objetivo se determinó la pérdida por abrasión de agregados gruesos en presencia de agua y de una carga abrasiva producida por unas esferas de acero.

- *Resumen del método*

Para este caso la muestra se conformó por material entre los tamices de 19 [mm] (¾") y de 9.5 [mm] (3/8") como lo indica la tabla mostrada a continuación (tabla 15).

Tabla 15. Granulometría de la muestra de ensayo Micro-Deval		
Normas de ensayo de materiales para carreteras INVIAS sección 200 (artículo 238-13) (INVIAS, 2013)		
<u>Pasa tamiz</u>	<u>Retenido en el tamiz</u>	<u>Masa</u>
19.0 mm	16.0 mm	375 g
16.0 mm	12.5 mm	375 g
12.5 mm	9.5 mm	750 g

La masa de la muestra con la configuración anteriormente mencionada se colocó en un recipiente junto con 2 [L] de agua durante por lo menos 1 hora.

Se colocó la muestra en el recipiente de Micro-Deval con 5000 [g] de esferas de acero y el agua mencionada en el punto anterior, tal y como se puede observar en la ilustración 4. Luego, se montó el recipiente en la máquina y se procedió a encenderla, poniéndola a rotar hasta que completó las 1200 revoluciones.

Al terminar la cantidad de revoluciones se colocó el material en una serie de tamices integrada por el tamiz de 4.75 [mm] (No. 4) y el tamiz de 1.18 [mm] (No. 16) lavándolo hasta que el agua de lavado salió totalmente limpia.

Después de mezclar el material que quedó en los tamices del anterior punto, se retiraron las esferas metálicas que quedaron en la muestra y se colocó en el horno. Finalmente, se pesó la muestra seca y se registró el dato como la masa seca después del ensayo.



Ilustración 4. Molde y Máquina Ensayo Micro-Deval
Fuente: Propia

- *Cálculos*

$$\text{Porcentaje de pérdidas} = \frac{A - B}{A} \times 100$$

Donde:

A = Masa seca antes del ensayo B = Masa seca después del ensayo

3.1.4. Determinación del valor del 10% de finos (INV E-224-13) (INVIAS, 2013)

- *Objetivo del ensayo*

Este ensayo tiene como objetivo realizar la evaluación del agregado grueso al aplastamiento, aplicándole una carga de compresión a un material de tamaño 2.36 [mm] (No.8).

- *Resumen del método*

De acuerdo tamaño máximo de la granulometría se toma la masa correspondiente de acuerdo a la siguiente tabla (tabla 16), buscando que la cantidad de material sea suficiente para poder elaborar 6 especímenes de ensayo.

Tabla 16. Masa mínima de la muestra ensayada para obtener el valor del 10% de finos	
Normas de ensayo de materiales para carreteras INVIAS sección 200 (artículo 224-13) (INVIAS, 2013)	
Granulometría	Masa mínima de la muestra, Kg ^A
Agregado todo uno, tamaño máximo 40 mm	60
Agregado todo uno, tamaño máximo 20 mm	45
Agregado gradado, 37.5 mm a 4.75 mm (1 ½" a No. 4)	40
Agregado gradado, 19.0 mm a 4.75 mm (¾" a No. 4)	25
Agregado gradado, 12.5 mm a 4.75 mm (½" a No. 4)	15
NOTA: Las casillas resaltadas en amarillo fueron las franjas utilizadas para el ensayo	

El material utilizado en este ensayo se tamizo por medio de los tamices de 12.7 [mm] (½") y 9.5 [mm] (3/8"). Dejando para utilizar en este solamente el material que quedo retenido en el tamiz de 9.5 [mm] (3/8")

- Ensayo en condición seca:

Después de haber separado el material necesario para poder llenar el molde de ensayo a una altura de aproximada a 100 [mm], este se colocó en el horno por un lapso de aproximadamente 2 horas para que se seicara.

Luego de haber esperado que se llevara a cabo proceso de secado, se sacó el material del horno y cuando el material se encontró a una temperatura manejable se pasó a desarrollar el ensayo.

- Ensayo en condición húmeda:

Para la preparación del material, éste se dejó sumergido durante aproximadamente 24 horas. Luego de que transcurrió este tiempo de saturación se sacó el material del agua, se secó superficialmente y de forma inmediata se comenzó a desarrollar el ensayo.

- Aplicación de la carga:

Se colocó el material en el cilindro de ensayo en tres capas, las cuales se compactaron dándole 25 golpes con una varilla a cada una. Luego de la compactación, se enraso el material en el molde de forma que quede una superficie uniforme para la aplicación de la fuerza.

Se comenzó a aplicar la carga para llegar a una penetración de 20 [mm] en un lapso de aproximadamente 10 minutos, lapso dentro del cual se obtuvo la imagen correspondiente a la ilustración 5. Al término de este periodo de tiempo y de haber cumplido la profundidad de penetración esperada se tomó el registro la carga aplicada por la máquina.

Al término de la aplicación de la carga se procedió a retirar el material del molde de ensayo. En el caso de los especímenes secos, estos se tamizaron inmediatamente después de retirarlos de la máquina por el tamiz No.8, registrando la masa retenida en el tamiz (M2) y la que pasa (M3). Por otra parte, los especímenes húmedos se retiraron de los moldes y se pasaron al horno para el proceso de secado, luego del cual se realizó el tamizado de la misma forma que a los especímenes ensayados en seco.



Ilustración 5. Ensayo de 10% de Finos en Ejecución
Fuente: Propia

- *Cálculos*
 - Fuerza para producir 10% de finos.

$$F = \frac{14 * F}{m + 4}$$

Donde:

$$F = \text{Fuerza máxima [KN]}$$

$$m = \text{Porcentaje de finos} = \frac{M_2}{M_1} * 100$$

- Promedio de los dos resultados del ensayo

$$\bar{F} = \frac{F_1 + F_2}{2}$$

Donde:

$$F_1 = \text{Fuerza para producir 10\% de finos en el ensayo 1}$$

$$F_2 = \text{Fuerza para producir 10\% de finos en el ensayo 2}$$

* Este resultado debe aproximarse de acuerdo a los rangos contemplados en la norma.

3.1.5. Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio (INV E-220-13) (INVIAS, 2013)

- *Objetivo del ensayo*

El objetivo de este ensayo es determinar la resistencia de los agregados frente a las condiciones atmosféricas y/o climáticas a las que va a estar enfrentado en usos como la producción de concretos o mezclas asfálticas.

- *Resumen del método*

En primer lugar, se dejó reposar la solución a utilizar para este ensayo durante 48 horas antes del primer uso. Esa se constituyó por aproximadamente 7 [Kg] de sal y 10 [L] de agua, con lo cual se buscó que la solución tuviera una densidad entre 1.154 [g/cm³] y 1.171 [g/cm³].

Las muestras de agregado fino y grueso se configuraron de acuerdo a las siguientes tablas (tabla 17 y tabla 18) teniendo en cuenta las franjas granulométricas y las masas mínimas tenidas en cuenta para el desarrollo del ensayo.

Tabla 17. Fracciones de material fino a utilizar en el ensayo de solidez	
Normas de ensayo de materiales para carreteras INVIAS sección 200 (artículo 220-13) (INVIAS, 2013)	
Agregado Fino	
Pasa Tamiz	Retenido en Tamiz
600 μ m (No. 30)	300 μ m (No. 50)
1.18 mm (No. 16)	600 μ m (No. 30)
2.36 mm (No. 8)	1.18 mm (No. 16)
4.75 mm (No. 4)	2.36 mm (No. 8)
9.5 mm (3/8")	4.75 mm (No. 4)
NOTA: Para todas las franjas de esta tabla se utilizaron 100g como masa de ensayo	

Tabla 18. Fracción granulométrica de material grueso a utilizar en el ensayo de solidez		
Normas de ensayo de materiales para carreteras INVIAS sección 200 (artículo 220-13) (INVIAS, 2013)		
Agregado Grueso		
Tamices	Masa (g)	Composición del material
de 4.75 mm a 9.5 mm (No. 4 a 3/8")	300 \pm 5	
de 9.5 mm a 19.0 mm (3/8" a 3/4")	1000 \pm 10	de 9.5 mm a 12.5 mm (3/8" a 1/2") 330 \pm 5 g
		de 12.5 mm a 19.0 mm (1/2" a 3/4") 670 \pm 10 g
de 19.0 mm a 37.5 mm (3/4" a 1 1/2")	1500 \pm 50	de 19.0 mm a 25.0 mm (3/4" a 1") 500 \pm 30 g
		de 25.0 mm a 37.5 mm (1" a 1 1/2") 1000 \pm 50 g
de 37.5 mm a 63 mm (1 1/2" a 2 1/2")	5000 \pm 300	de 37.5 mm a 50 mm (1 1/2" a 2") 2000 \pm 200 g
		de 50 mm a 63 mm (2" a 2 1/2") 3000 \pm 300 g
de 63 mm a 75 mm (2 1/2" a 3")	7000 \pm 1000	
de 75 mm a 90 mm (3" a 3 1/2")	7000 \pm 1000	
de 90 mm a 100 mm (3 1/2" a 4")	7000 \pm 1000	
NOTA: Las casillas resaltadas en amarillo fueron las franjas utilizadas para el ensayo		

Las franjas a ensayar se lavaron antes de comenzar los ciclos de ensayo. En el caso de las franjas de material fino, este se lavó con la ayuda del tamiz de 300 μm (No.50). Por otra parte, el material grueso se lavó para retirar el polvo o terrones que tenía en su superficie.

Para cada uno de los ciclos el material cumplió aproximadamente 16 horas sumergido, después de lo cual se pasó al proceso de secado. Cuando el material estuvo seco se volvió a sumergir en la solución anteriormente mencionada, revisando en cada uno de los ciclos que esta tuviera la densidad propuesta en el ensayo. En total se realizaron 5 ciclos. En la ilustración 6 y 7 se pueden observar las muestras de agregado natural y cerámico de forma correspondiente, después del secado del quinto ciclo de ensayo.

Al final de los ciclos, se lavaron todas las franjas retirándoles cualquier tipo de residuo de solución que quedó luego del proceso de secado. Después de constatar con el cloruro de calcio la limpieza del material ensayado este se pasó al horno para secarlo.

Luego de haber tenido el material seco, se tamizó la porción gruesa por medio de los tamices señalados en la siguiente tabla (tabla 19). En el caso del material fino, se tamizó por el mismo tamiz que se realizó el proceso de selección inicialmente.

Tabla 19. Tamices usados para obtener la pérdida de material grueso en el ensayo de solidez	
Normas de ensayo de materiales para carreteras INVIAS sección 200 (artículo 220-13) (INVIAS, 2013)	
Tamaño del Agregado	Tamiz Empleado para Determinar la Pérdida
100 mm - 90 mm (4" - 3 1/2")	75 mm (3")
90 mm - 75 mm (3 1/2" - 3")	63 mm (2 1/2")
75 mm - 63 mm (3" - 2 1/2")	50 mm (2")
63 mm - 37.5 mm (2 1/2" - 1 1/2")	31.5 mm (1 1/4")
37.5 mm - 19.0 mm (1 1/2" - 3/4")	16.0 mm (5/8")
19.0 mm - 9.5 mm (3/4" - 3/8")	8.0 mm (5/16")
9.5 mm - 4.75 mm (3/8" - No. 4)	4.00 mm (No. 5)

La masa del material retenido en los tamices anteriormente descritos se registra como el peso retenido para cada franja granulométrica.



Ilustración 6. (Izquierda) Ensayo de Solidez en Agregado Cerámico

Fuente: Propia

Ilustración 7. (Derecha) Ensayo de Solidez en Agregado Natural

Fuente: Propia

- *Cálculos*

$$\% \text{ Perdidas} = \left(\frac{\text{Masa inicial} - \text{Masa retenida}}{\text{Masa inicial}} \right) * 100$$

3.1.6. Determinación de la limpieza superficial de las partículas de agregado grueso (INV E-237-13) (INVIAS, 2013)

- *Objetivo del ensayo*

El objetivo de este ensayo es determinar la limpieza superficial de los agregados de tamaño mayor a 4.75 [mm] utilizados en la construcción de carreteras.

- *Resumen del método*

Para realizar este ensayo se alistaron aproximadamente 4 [Kg] de material. El cual se dividió en dos muestras de exactamente la misma masa para la realización de este ensayo.

- Muestra de humedad:

Esta muestra se pesó al comienzo del desarrollo de la práctica y se registró esta masa como masa húmeda (Mh). Luego de esto, se pasó al horno, de donde se sacó cuando estuvo completamente seca. La masa de la muestra seca se registró como masa seca (Ms).

- Muestra de ensayo:

Con esta muestra se desarrolló el ensayo como tal, para este fin en primer lugar se lavó con ayuda de los tamices de 4.75 [mm] (Tamiz No.4) y de 500 μm (Tamiz No.35) como se puede observar en la ilustración 8. Cuando se terminó el lavado, el material se pasó al horno.

Cuando el material este totalmente seco se vuelve a pasar por los tamices mencionados anteriormente y luego del proceso de tamizado se pesa y esta masa se registra como masa seca de ensayo (m).



*Ilustración 8. Lavado de Material para Llevar a Cabo el Ensayo de Limpieza Superficial.
Fuente: Propia*

- *Cálculos*

$$\text{Humedad} = w = \frac{M_h - M_s}{M_s}$$

$$\text{Masa seca de la masa de ensayo} = M_{se} = \frac{M_{he}}{1 + w}$$

$$\text{Impurezas de la porción de ensayo} = I = M_{se} - m$$

$$\text{Coeficiente de limpieza superficial} = \frac{I}{M_{se}} \times 100$$

3.1.7. Determinación del límite líquido de los suelos (INV E-125-13)

(INVIAS, 2013)

- *Objetivo del ensayo*

Este ensayo tiene como objetivo determinar el límite líquido de materiales con muestras de tamaño menor a 425 μm (Tamiz No.40).

- *Resumen del método*

Para la obtención del espécimen de ensayo se obtuvo una muestra de aproximadamente 200 [g] de material que paso a través del tamiz de 425 μm (Tamiz No.40).

Luego de tener lista la muestra mencionada anteriormente, se le agrego agua, se montó en la cazuela de la máquina de ensayo de límite líquido, la cual se puede observar en la ilustración 9.

Se puso a funcionar la máquina de ensayo buscando llegar hasta el punto del límite líquido.



Ilustración 9. Cazuela de Ensayo para Límites

Fuente: Propia

- *Cálculos*

$$\text{Contenido de agua} = \frac{\text{Masa del agua}}{\text{Masa del suelo pesado al horno}} * 100$$

$$LL = W_N \times \left[\frac{N}{25} \right]^{0.121}$$

Donde:

LL = Límite líquido

W_N = Contenido de agua

N = Número de golpes para que la ranura cierre

3.1.8. Equivalente de arena de suelos y agregados finos (INV E-133-13)

(INVIAS, 2013)

- *Objetivo del ensayo*

Este ensayo tiene como objetivo identificar las partículas de arena y materiales deseables y también los polvos y finos arcillosos o plásticos indeseables presentes en suelos o agregados finos de tamaño de partícula menor a 4.75 [mm] (Tamiz No.4).

- *Resumen del método*

Para la obtención de la muestra se obtuvieron al menos 1500 [g] de material cuyo tamaño de partículas fue menor a 4.75 [mm] (Tamiz No.4). Es decir, para la ejecución de este ensayo se utilizó solamente material que se seleccionó pasándolo por el tamiz No.4 por medio de un proceso de vibrado manual.

Se humedeció la muestra para evitar la segregación o la pérdida de finos en el procedimiento de cuarteo. Este proceso de cuarteo se tuvo que repetir hasta que se obtuvo la cantidad de material necesario.

Se secó el material en el horno y posteriormente se dejó enfriar a temperatura ambiente. Posteriormente, se agregó una solución de cloruro de calcio en el cilindro graduado hasta una altura de 4”.

Luego, se vertió el espécimen de ensayo en el cilindro graduado con la ayuda de un embudo. Se golpeó levemente el fondo del cilindro con el fin de liberar las burbujas de aire y remojar la muestra. Dejando el cilindro en reposo durante 10 minutos después de haber completado este procedimiento.

Se colocó el cilindro adecuadamente tapado en el agitador mecánico durante 45 segundos, como se puede observar en la ilustración 10. Después, se retiró el cilindro de la máquina y se ubicó sobre una superficie plana en forma vertical. Se retiró el tapón.

Posteriormente, se pasó a la irrigación. Este procedimiento consistió en irrigar solución de cloruro de calcio al cilindro, de forma que pudiera impulsar el material fino hacia arriba separándolo de las partículas gruesas de arena. Hasta que la lectura del volumen de solución y material granular marcó 15”.

Se dejó en reposo el cilindro durante 20 minutos a partir del retiro del tubo irrigador. Después del tiempo de espera de la sedimentación, se tomó la lectura de la suspensión arcillosa, la cual se denomina Lectura de Arcilla

Para la lectura de la arena se llevó el dispositivo medidor hasta que tocó la arena teniendo cuidado de que no tocara las paredes del cilindro. Se tomó la medida del indicador y se le restaron 10”, esta medición corresponde a la Lectura de arena.



Ilustración 10. Ensayo de Equivalente de Arena en Ejecución
Fuente: Propia

- *Cálculos*

$$EA = \frac{\text{Lectura de arena}}{\text{Lectura de arcilla}} \times 100$$

*El resultado de la fórmula anterior se debe aproximar al entero superior

3.1.9. Proporción de partículas planas, alargadas o planas y alargadas en agregados gruesos (INV E-240-13) (INVIAS, 2013)

- *Objetivo del ensayo:*

Esta norma indica la metodología para determinar por medio de su morfología el porcentaje de caras planas, alargadas o planas y alargadas del agregado grueso.

- *Resumen del método*

Para el desarrollo del ensayo la muestra debe cumplir con lo estipulado en la siguiente tabla (tabla 20):

Tabla 20. Masa mínima para el ensayo de partículas planas, alargadas o planas y alargadas			
Normas de ensayo de materiales para carreteras INVIAS sección 200 (artículo 240-13) (INVIAS, 2013)			
Tamaño Máximo Nominal (Tamices de Aperturas Cuadradas)		Masa Mínima para el Ensayo	
Mm	Pulgadas	Kg	Lb
9.5	3/8	1	2
12.5	1/2	2	4
1	3/4	5	11
25	1	10	22
37.5	1 1/2	15	33
50	2	20	44
63	2 1/2	35	77
75	3	60	130
90	3 1/2	100	220
100	4	150	330
112	4 1/2	200	440
125	5	300	660
150	6	500	1100

NOTA: Las casillas resaltadas en amarillo fueron las franjas utilizadas para el ensayo

Para la realización de este ensayo se tomó en cuenta el procedimiento por medio del conteo de partículas. Este tiene en cuenta que las franjas granulométricas a ensayar deben cumplir con participar por lo menos en un 10% del total de la granulometría del material.

Luego de comprobar la condición anteriormente mencionada se pasa a la selección de aproximadamente 100 partículas de cada una de las franjas tenidas en cuenta para la realización del ensayo.

Posteriormente se pasa a la revisión de las partículas tenidas en cuenta para la realización del ensayo, como se puede observar en la ilustración 11. Con el fin de identificar las partículas denominadas como planas y alargadas del material se empleó el método B, con el calibrador en una relación 5:1 como lo determina la Especificación General de Construcción de Carreteras 450 (INVIAS, 2013).



Ilustración 11. Ensayo de Caras Planas, Alargadas o Planas y Alargadas en Ejecución

Fuente: Propia

- *Cálculos*

$$\% \text{Partículas planas y alargadas} = \left(\frac{\# \text{Partículas planas y alargadas}}{\# \text{Partículas muestra de ensayo}} \right) * 100$$

3.1.10. Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso (INV E-227-13) (INVIAS, 2013)

- *Objetivo del ensayo*

Esta norma muestra como determinar el porcentaje de partículas fracturadas que tiene el agregado grueso. Esto contribuye a la maximización de la resistencia al corte incrementando la fricción entre partículas de agregados.

- *Resumen del método*

Para la preparación de la muestra fue necesaria la separación de partículas de distintos tamaños por medio del tamizado de acuerdo a la norma INV E-213 (INVIAS, 2013).

Posteriormente, se redujo la muestra por cuarteo según la norma INV E-202 (INVIAS, 2013) tal y como se puede observar en la ilustración 12, con el fin de obtener el tamaño de muestra correcto. Este cumplió con que la partícula de mayor tamaño no puede exceder el 1% del peso total de la muestra. Por otra parte, debe cumplir con el tamaño indicado por la tabla que se encuentra a continuación (tabla 21).

Tabla 21. Masa mínima para el ensayo de partículas fracturadas.	
Normas de ensayo de materiales para carreteras INVIAS sección 200 (artículo 227-13) (INVIAS, 2013)	
Tamaño Máximo Nominal (mm-Pulg)	Masa Mínima de la Muestra (g-Lb aprox)
9.50 (3/8)	200 (0.5)
12.5 (½)	500 (1.0)
19.0 (¾)	1500 (3.0)
25.0 (1)	3000 (6.5)
37.5 (1 ½)	7500 (16.5)
50.0 (2)	15 000 (33.0)
63.0 (2 ½)	30 000 (66.0)
75.0 (3)	60 000 (132.0)
90.0 (3 ½)	90 000 (198.0)
NOTA: Las casillas resaltadas en amarillo fueron las franjas utilizadas para el ensayo	

Se inspeccionó cada partícula para corroborar que cumpliera con el criterio de fractura, es decir, que la fractura sea de al menos un cuarto de la mayor sección transversal. Luego, se clasificó la muestra en dos grupos usando un separador; las que cumplieran con el criterio de caras fracturadas y las que no cumplieron el criterio.



Ilustración 12. Cuarteo de material para el ensayo de partículas fracturadas
Fuente: Propia

- *Cálculos*

$$P = \frac{F}{F + N} * 100$$

Donde:

P= Porcentaje de partículas con caras fracturadas.

F= Masa o número de partículas fracturadas

N= Masa o número de partículas en la categoría de no fracturadas que no cumplen el criterio de partículas fracturadas.

3.1.11. Determinación del contenido de vacíos en agregados finos no compactados (influenciado por la forma de las partículas, la textura superficial y la granulometría) (INV E-239-13) (INVIAS, 2013)

- *Objetivo del ensayo*

Por medio de este ensayo se determina el contenido de vacíos presentes en una muestra de agregados finos no compactados. Es un indicador de la forma de las partículas, a partir del cual se puede obtener información relacionada con el comportamiento del agregado al momento de ser utilizado en el proyecto a realizar.

- *Resumen del método*

Para la realización de este ensayo, el procedimiento comenzó por pesar y posteriormente mezclar las cantidades de agregado fino seco como se enuncia en la siguiente tabla (tabla 22).

<i>Tabla 22. Granulometría de la muestra del método de prueba A para angularidad de finos.</i>	
Normas de ensayo de materiales para carreteras INVIAS sección 200 (artículo 239-13) (INVIAS, 2013)	
<u>Fracción de Tamaño Individual</u>	<u>Masa (g)</u>
2.36 mm (No. 8) a 1.18 mm (No. 16)	44
1.18 mm (No. 16) a 600 μm (No. 30)	57
600 μm (No. 30) a 300 μm (No. 50)	71
300 μm (No. 50) a 150 μm (No. 100)	17
Total	190

Luego, se debe mezclar la muestra hasta que se vea homogénea, para pasar a verterla en el recipiente cilíndrico mientras se tapa la parte inferior del embudo con el dedo para evitar que el material pase.

Posteriormente, se debe retirar el dedo para permitir el paso de la muestra por medio del embudo como se puede ver en la ilustración 13. Una vez toda la muestra haya pasado por el

embudo, se debe retirar el material sobrante al cilindro de volumen conocido, evitando realizar cualquier tipo de acción que contribuya con la compactación de la muestra.

Pesar la muestra en el cilindro de volumen conocido. Acto seguido, se debe devolver el material contenido en el cilindro a la bandeja. Repetir el ensayo



Ilustración 13. Ensayo de Angularidad de Finos con Material Cerámico en Ejecución

Fuente: Propia

- *Cálculos*
 - Porcentaje de vacíos en el agregado fino sin compactar

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

Donde:

V : Volumen del medidor cilíndrico

F : Masa neta del agregado fino en el medidor

G : Densidad relativa seca (gravedad específica) *del agregado fino*

U : Porcentaje de vacíos en el agregado fino sin *compactar*

- Promedio de los ensayos

$$U_s = \frac{U_1 + U_2}{2}$$

Donde:

$U_s =$ Promedio de los ensayos

$U_1 =$ Ensayo 1

$U_2 =$ Ensayo 2

3.1.12. Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino (INV E-222-13) (INVIAS, 2013)

- *Objetivo del ensayo*

El objetivo de esta norma es indicar el proceso por el cual se determina la densidad promedio de una muestra ya sea en condición seca al horno (SH), o en condición saturada y superficialmente seca (SSS)

- *Resumen del método*

Se preparó previamente la muestra secándola en el horno a 110°C, hasta que estuvo a una temperatura que se pueda manejar, momento en el que se le agregó agua hasta que quedó sumergida por un lapso de 24 h.

Posteriormente, se vertió el agua con mucho cuidado para evitar la pérdida del material fino y se extendió sobre una superficie que no poseía propiedades absorbentes.

Una vez el material estuvo extendido uniformemente, se comenzó a secar con aire tibio revolviéndolo constantemente para que llegara a la condición de saturado y superficialmente seco (SSS).

El procedimiento anterior inicialmente se probó de forma visual y se inició la prueba del cono, con su diámetro mayor en una superficie plana sin propiedades absorbentes. Se agregó el material hasta rebosar, amontonando el excedente en la parte superior con apoyo de la mano que sostiene el molde; en seguida se continuó aplicando 25 golpes con la varilla dejándola caer por gravedad, sin ninguna fuerza adicional desde una altura de 5mm desde la superficie del agregado.

Una vez realizados los 25 golpes, se retiró el material excedente, se limpió al rededor del cono y se levantó verticalmente. Este procedimiento se repitió hasta que muestra alcanzó la condición de saturada superficialmente seca (SSS).

Después de que muestra alcanzó la condición de saturada superficialmente seca (SSS), se llenó parcialmente el picnómetro con agua. En seguida, se agregaron en él 500g del agregado fino saturado superficialmente seco (SSS) y se agitó el picnómetro para eliminar las burbujas de aire visibles durante aproximadamente 20 minutos.

Tras eliminar las burbujas se ajustó la temperatura del picnómetro a 23°C y se determinó la masa total (muestra agua y recipiente) tal y como se muestra en las ilustraciones 14 y 15. Luego se removió el agregado fino y se secó en el horno a una temperatura constante de 110°C, se dejó enfriar y se determinó su masa.



Ilustración 14. (Izquierda) Ensayo de Densidad de Finos con Agregado Natural

Fuente: Propia

Ilustración 15. (Derecha) Ensayo de Densidad de Finos con Agregado Cerámico

Fuente: Propia

- *Cálculos*

$$\text{Gravedad específica}(SH) = \frac{A}{B + S - C}$$

$$\text{Gravedad específica}(SSS) = \frac{S}{B + S - C}$$

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

$$\text{Densidad SH (Kg/m}^3) = \frac{997.5A}{B + S - C}$$

$$\text{Densidad SSS (Kg/m}^3) = \frac{997.5S}{B + S - C}$$

$$\text{Densidad aparente (Kg/m}^3) = \frac{997.5A}{B + A - C}$$

$$\text{Absorción, \%} = \frac{S - A}{A} * 100$$

Donde:

A: Masa al aire de a muestra sec al horno [g].

B: Masa del picnometro aforado lleno de agua [g].

C: Masa total del picnometra aforao cn la muestra y lleno de agua [g].

S: Masa de la muestra saturada y superficialmente seca [g].

3.1.13. Densidad, densidad relativa (gravedad especifica) y absorción del agregado grueso (INV E-223-13) (INVIAS, 2013)

- *Objetivo del ensayo*

Esta norma describe los procedimientos de ensayo para encontrar los valores correspondientes a la densidad relativa (gravedad especifica), absorción del agregado grueso, densidad seca al horno (SH), saturada y saturada superficialmente seca (SSS) del agregado con tamaño mayor a 4.75 [mm] (Tamiz No.4).

- *Resumen del método*

Se retiró todo el material que se encontraba por debajo del tamaño de partícula de 4.75 [mm] (Tamiz No.4) tamizando en seco. El material restante se lavó con el fin de retirar los finos que se encontraban adheridos a la superficie de las partículas gruesas.

La siguiente tabla (tabla 23), muestra las cantidades mínimas que debe tener la muestra para la realización del ensayo.

<i>Tabla 23. Granulometría de la muestra del método de prueba A para angularidad de finos.</i>			
Normas de ensayo de materiales para carreteras INVIAS sección 200 (artículo 223-13) (INVIAS, 2013)			
Tamaño Máximo Nominal		Masa Mínima de la Muestra de Ensayo	
Mm	Pulgadas	G	Lb
12.5	½	2	4.4
19	¾	3	6.6
25	1	4	8.8
37.5	1 ½	5	11
50	2	8	18
63	2 ½	12	26
75	3	18	40
90	3 ½	25	55
100	4	40	88
125	5	75	165

NOTA: Las casillas resaltadas en amarillo fueron las franjas utilizadas para el ensayo

Se secó la muestra en el horno hasta que tuvo masa constante, luego se dejó enfriar a temperatura ambiente por un lapso de 2 horas. Luego se sumergió en agua a temperatura ambiente por un período de 24 horas.

Después, se secó la muestra con un paño hasta que se eliminó el agua visible superficialmente. Cuando se encontró superficialmente seca la muestra se toma la masa, la cual corresponde al valor de la masa en condición saturada superficialmente seca (SSS).

Se colocó la muestra en la canastilla metálica como se puede observar en la siguiente ilustración (ilustración 16) y se determinó su masa, esta es la masa de la muestra saturada aparente. Se tuvo mucho cuidado con el aire, ya que podía quedar atrapado en las partículas de la mezcla, por lo cual se agitó la canastilla.

Se secó la muestra en el horno por un lapso de 2 horas, luego, se sacó del horno y se dejó enfriar hasta que estuviera manejable. Posteriormente se pesó y se determinó la masa de la muestra seca al horno (SH).



Ilustración 16. Ensayo de Densidad de Agregado Grueso
Fuente: Propia

- *Cálculos*
 - Densidad relativa (gravedad específica)

$$\text{Densidad relativa (SH)} = \frac{A}{(B - C)}$$

$$\text{Densidad relativa (SSS)} = \frac{B}{(B - C)}$$

$$\text{Densidad relativa aparente} = \frac{A}{(A - C)}$$

- Densidad

$$\text{Densidad (SH) [Kg/m}^3] = \frac{997.5 \times A}{(B - C)}$$

$$\text{Densidad (SSS) [Kg/m}^3] = \frac{997.5 \times B}{(B - C)}$$

$$\text{Densidad aparente [Kg/m}^3] = \frac{997.5 \times A}{(A - C)}$$

- Absorción

$$\text{Absorción [\%]} = \frac{B - A}{A} \times 100$$

Donde:

A = Masa al aire de la muestra seca al horno [SH]

B = Masa al aire de la muestra saturada y superficialmente seca (SSS)

C = Masa aparente de la muestra saturada en agua

3.2. Caracterización del Asfalto

De acuerdo a lo especificado en el capítulo 4 de las Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras en su Artículo 410 (INVIAS, 2013), los criterios de calidad para el cemento asfáltico se pueden observar en la siguiente tabla (tabla 24).

Tabla 24. Especificaciones requeridas para el cemento asfáltico							
Especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS capítulo 4 (artículo 410-13) (INVIAS, 2013)							
Característica	Norma de ensayo INV	Grado de penetración					
		40-50		60-70		80-100	
		ÍN	ÁX	ÍN	ÁX	ÍN	ÁX
Penetración (25° C, 100 g, 5 s), 0.1 mm	E-706	40	50	60	70	80	100
Punto de ablandamiento °C	E-712	52	58	48	54	45	52
Índice de penetración	E-724	-1.2	0.6	-1.2	0.6	-1.2	0.6
Viscosidad absoluta (60°C), P	E-716 o E-717	2000		1500		1000	
Ductilidad (25° C, 5cm/min), cm	E-702	80		100		100	
Solubilidad en tricloroetileno, %	E-713	99		99		99	
Contenido de agua, %	E-704		0.2		0.2		0.2
Punto de inflamación mediante copa abierta de Cleveland, °C	E-709	240		230		230	
Contenido de parafinas, %	E-718		3		3		3

3.2.1. Penetración de los materiales bituminosos (INV E-706-13)

(INVIAS, 2013)

- *Objetivo del ensayo*

El objetivo de esta norma es la determinación de la consistencia del material sólido o semisólido del cual su principal componente es asfalto.

- *Resumen del método*

Para el desarrollo de este ensayo se alistó una muestra que tuvo al menos el 120% de la altura esperada como resultado. El asfalto se calentó y colocó en el molde utilizado para llevar a cabo el ensayo evitando la formación de burbujas de aire.

El equipo se encontraba calibrado, nivelado, limpio, seco y con sus medidores en cero para poder llevar a cabo el ensayo. Luego de haber comprobado que se cumplieran las condiciones anteriormente mencionadas, se pasó a ubicar la muestra en el penetrómetro.

Se ubicó la aguja de tal manera que quedó sobre la superficie de la muestra, tocándola sin hacerle ningún tipo de presión o penetración que afectara las condiciones requeridas para el inicio del ensayo.

Se soltó la aguja del penetrometro, liberándola durante aproximadamente 60 [s] como se puede observar en la ilustración 17. Después de pasado este tiempo se consignó la distancia penetrada por la aguja en la muestra. Este procedimiento se repitió 3 veces, separando cada medición aproximadamente 1 [cm] entre sí y de las paredes del molde.



Ilustración 17. Ensayo de penetración en ejecución.

Fuente: Propia

- *Cálculos*

El resultado de este ensayo es el promedio de las penetraciones realizadas en el material.

3.2.2. Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola) (INV E-712-13) (INVIAS, 2013)

- *Objetivo del ensayo*

Esta especificación determina el punto de ablandamiento entre 30°C y 157°C.

Determinando el momento en el cual el asfalto pasa de un estado totalmente sólido a uno que se encuentra dentro del intervalo de cambio de estado sólido a líquido, denominado punto de ablandamiento.

- *Resumen del método*

Para iniciar el procedimiento se calentó la muestra por menos de 2 h a una temperatura menor a 160°, agitándola, evitando la formación de burbujas y así lograr una temperatura uniforme en toda la muestra.

Se calentaron los anillos de latón a la misma temperatura de la muestra y se colocaron sobre la placa con antiadherente. Se vierte en ellos el asfalto. Después de tener el asfalto montado en los moldes utilizados para la realización de este ensayo, se dejaron secar aproximadamente 30 minutos a temperatura ambiente. Luego de esperar este tiempo, se enrasó el anillo de forma que su altura coincidiera con la de la muestra de asfalto que contenía.

El montaje de los aparatos se realizó en la campana del laboratorio, colocando los anillos con los especímenes, las guías y los termómetros. Posteriormente se colocaron las dos bolas con pinzas en el fondo del baño para que adquirieran la misma temperatura.

Se colocó el conjunto en agua con hielo para avanzar y mantener durante 15 minutos la temperatura inicial. En seguida se ubicaron las bolas cuidadosamente en los anillos y se inició el calentamiento de manera constante elevando aproximadamente $5^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$.

Se consignó la temperatura de cada anillo y bola cuando ésta tocó el fondo de la placa como se puede ver en la ilustración 18, en donde se encontró el punto de ablandamiento del asfalto objeto del ensayo.



Ilustración 18. Caída de las Esferas en la Lámina de Referencia Punto de Ablandamiento
Fuente: Propia

3.2.3. Índice de penetración de los cementos asfálticos (INV E-724-13) **(INVIAS, 2013)**

- *Objetivo del ensayo*

Esta norma describe el procedimiento para hallar el valor del índice de penetración (IP).

Partiendo de los resultados obtenidos del ensayo de penetración y el ensayo de punto de

ablandamiento con anillo y bola. Proporciona un criterio de la susceptibilidad térmica y el comportamiento reológico del asfalto.

- *Resumen del método*

Para realizar el cálculo del índice de penetración se utilizaron las siguientes formulas, a partir de la cual se evalúa el resultado de acuerdo a lo consignado en la siguiente tabla (tabla 25)

$$P = \frac{20 - 10f}{1 + f}$$

En donde:

$$f = \frac{500 \times \log \left[\frac{800}{P} \right]}{T_{AB} - 25}$$

Donde:

T_{AB} = Punto de ablandamiento [°C]

P = Penetración em 0.1 [mm] a 25°C

NOTA: El resultado de índice de penetración debe redondearse a la primera cifra decimal

<i>Tabla 25. Clasificación del cemento asfáltico de acuerdo al índice de penetración.</i>	
Normas de ensayo de materiales para carreteras INVIAS sección 700 (artículo 724-13) (INVIAS, 2013)	
Clasificación del Cemento Asfáltico	
<u>Rango de valores</u>	<u>Características</u>
IP > 1	Poca susceptibilidad a la temperatura presenta cierta elasticidad. Se denomina tipo gel o soplado
IP < -1	Alta susceptibilidad a la temperatura, ricos en resinas y con comportamientos viscosos
1 > IP > -1	Características intermedias entre los dos tipos anteriores, son los que generalmente se utilizan para los proyectos relacionados con la construcción de carretera

3.2.4. Determinación de la viscosidad del asfalto empleando un viscosímetro rotacional (INV E-717-13) (INVIAS, 2013)

- *Objetivo del ensayo*

El objetivo de la realización de este ensayo es medir la viscosidad de un ligante asfáltico entre 60°C hasta más de 200°C.

- *Resumen del método*

La muestra se preparó calentándola hasta que su consistencia fuera adecuada para ser vertido. Se tuvo que leer y comprender la información contenida en el manual de instrucciones del viscosímetro rotacional. (Gutierrez & García, 2016)

Posteriormente se encendió el viscosímetro y la unidad de control de temperatura, se precalentó el soporte de las capsulas, las cápsulas y el vástago.

En seguida, se ajustó la unidad de control de temperatura y del ligante asfáltico a la temperatura de ensayo (60°C). Una vez la unidad de control térmico indicó que alcanzó la temperatura deseada, se retiró de ella el soporte de las cápsulas y se adicionó a ésta el asfalto.

Con ayuda de las pinzas se retiró la cápsula con la muestra caliente de su soporte, y se colocó en el contenedor térmico como se puede ver en la ilustración 19, alineando el contenedor térmico con el viscosímetro. Luego, se retiró del horno el vástago y se colocó en la parte inferior del viscosímetro. Una vez acoplado el vástago, se bajó suavemente de modo que penetró en la muestra.

Se ajustó la velocidad de rotación y el lector para que indicara la viscosidad en pascales–segundo. Se dejó reposar la muestra a la temperatura deseada durante de 15 minutos. En este

tiempo se puso a rotar el vástago y se fue observando la viscosidad esperando a que la lectura se estabilizara para poder realizar las mediciones.

Se registró el valor de la viscosidad. Por último, se retiró la cápsula del contenedor térmico utilizando las pinzas de extracción y se desechó la muestra. Se dejó enfriar la cápsula y luego se limpió con un solvente apropiado de manera que no quedaron residuos.

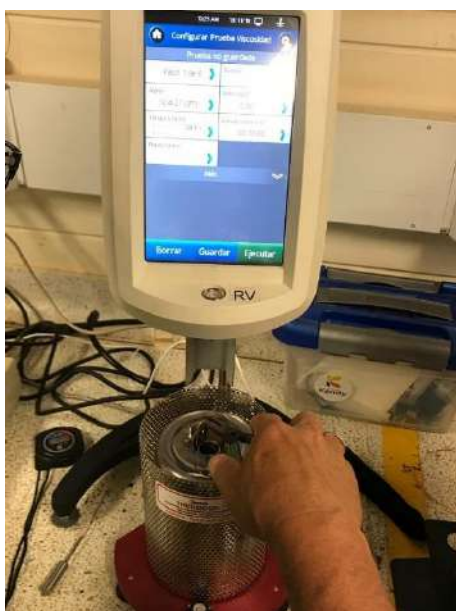


Ilustración 19. Viscosímetro Rotacional
Fuente: Propia

- *Cálculos*

$$\text{Promedio de las mediciones} = \frac{V_1 + V_2 + V_3}{3}$$

3.2.5. Ductilidad de los materiales asfálticos (INV E-702-13) (INVIAS, 2013)

- *Objetivo del ensayo*

Este ensayo determina la ductilidad de los materiales asfálticos de consistencia sólida y semisólida, midiendo la elongación de la probeta a partir de las condiciones propuestas en la norma. Se considera que la ductilidad de un asfalto está relacionada con sus propiedades adhesivas y su comportamiento en el servicio.

- *Resumen del método*

Se ensambló el molde sobre una placa de bronce. Luego, se calentó el asfalto hasta que se encontró lo suficientemente fluido para verterlo en el molde. A continuación, se vertió el asfalto en el molde con cuidado, teniendo en cuenta no desordenar las piezas que componen el molde y evitando la inclusión de aire dentro de la muestra.

Posteriormente, se dejó enfriar el conjunto molde-muestra aproximadamente 40 minutos. Después de pasado este lapso, se colocó en un baño a la temperatura de ensayo otros 40 minutos.

Luego, se retiró la muestra con el molde del baño y se enrasó con una espátula. Posteriormente, se colocó de nuevo la muestra y el molde en el baño de agua por 95 minutos. Después de que pasó el tiempo, se retiró el molde y se dejó solamente la muestra de asfalto.

Se puso la muestra en el ductilometro y se encendió como se puede ver en la ilustración 20, cuando la muestra se rompió se registró la longitud de la rotura.



Ilustración 20. Inicio del Ensayo de Ductilidad

Fuente: Propia

3.2.6. Puntos de inflamación y de combustión mediante la copa abierta

Cleveland (INV E-709-13) (INVIAS, 2013)

- *Objetivo del ensayo*

Esta norma describe el procedimiento para determinar los puntos de inflamación y combustión entre 79°C y 400°C.

- *Resumen del método*

Se alistaron 70 [ml] para cada ensayo. Estas se calentaron a una temperatura de aproximadamente 56°C por debajo del punto de inflamación esperado. Luego, se pasó al llenado de la copa hasta el tope, sin exceder en la cantidad, manteniendo la limpieza de la copa y cuidando que las burbujas de aire salieran de la muestra.

Posteriormente, se encendió la llama y se calentó la muestra, como se puede observar en la ilustración 21. Cuando se estuvo aproximadamente a 28°C de llegar al punto de inflamación esperado se comenzó a hacer el barrido con la llama de ensayo.

En el instante en que la llama produjo un destello se tomó la temperatura correspondiente al punto de inflamación. Para hallar el punto de combustión se tuvo que seguir calentando la muestra y probando con la llama de ensayo, hasta que la llama producida por la muestra llegó a durar 5 segundos de forma sostenida.



Ilustración 21. Ejecución ensayo de punto de inflamación y combustión
Fuente: Propia

3.2.7. Densidad de materiales bituminosos sólidos y semisólidos (método del picnómetro) (INV E-707-13) (INVIAS, 2013)

- *Objetivo del ensayo*

El objetivo de esta especificación es determinar la densidad y la densidad relativa de materiales bituminosos semisólidos, cementos asfálticos con un picnómetro.

- *Resumen del método*

La muestra se preparó calentándola máximo a 55°C, hasta que su consistencia fue adecuada para ser vertida revolviéndola para que tuviera temperatura uniforme.

Se vertió una cantidad de muestra dentro del picnómetro, limpio y seco y previamente calentado y se llenó hasta tres cuartos de su capacidad. Se tuvo que evitar que el material se pusiera en contacto con las paredes del picnómetro por encima del nivel final y evitar la inclusión de burbujas. Se dejó enfriar la muestra hasta la temperatura ambiente durante un período de 40 minutos y se determinó la masa con el tapón puesto.

Se llenó el picnómetro que contenía el asfalto con agua fresca a la temperatura de ensayo, colocando flojo el tapón en el picnómetro. Observando que no se encontraran burbujas de aire en el picnómetro y se colocó el picnómetro en el vaso de precipitados y se ajusta el tapón. Luego se mantuvo el picnómetro dentro del baño de agua durante un período de 40 minutos y se sacó el picnómetro del baño. Finalmente se secó y se determinó su masa como se puede observar en la siguiente ilustración (ilustración 22).



Ilustración 22. Picnómetro con agua

Fuente: Propia

- *Cálculos*
 - Densidad Relativa

$$\text{Densidad Relativa} = \frac{(C - A)}{[(B - A) - (D - C)]}$$

Donde:

A: Masa del picnómetro

B: Masa del picnómetro lleno de agua

C: Masa del picnómetro parcialmente lleno con asfalto

D: Masa del picnómetro con asfalto y agua

- Densidad

$$\text{Densidad} = \text{Densidad Relativa} \times W_T$$

Donde:

W_T: Densidad del agua

3.3. Diseño de la Mezcla Asfáltica

3.3.1. Tipos de mezclas asfálticas

De acuerdo a la Especificación General de Construcción de Carreteras 450, Mezclas Asfálticas en Caliente de Gradación Continúa (Concreto Asfáltico) (INVIAS, 2013), las mezclas asfálticas pueden ser (tabla 26):

Tabla 26. Tipos de mezclas asfálticas en caliente de gradación continua	
Especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS capítulo 4 (artículo 450-13) (INVIAS, 2013)	
<u>Tipo</u>	<u>Denominación</u>
<u>Por Tipo de Granulometrías</u>	
Mezclas Densas	MDC
Mezclas Semidensas	MSC
Mezclas gruesas	MGC
<u>Mezclas Especiales</u>	
Mezclas de Alto Módulo	MAM
NOTA: Las casillas resaltadas en amarillo corresponden a las utilizadas para el desarrollo del proyecto	

A partir de la tabla anteriormente mencionada (tabla 26), dentro de la misma especificación se da la granulometría indicada para cada tipo de mezcla asfáltica mencionada, como se puede ver en la tabla enunciada a continuación (tabla 27).

Tabla 27. Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua											
Especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS capítulo 4 (artículo 450-13) (INVIAS, 2013)											
Tipo De Mezcla	Tamiz (mm / us Standard)										
	7.5	25.0	19.0	12.5	9.5	4.75	2.00	0.425	0.180	0.075	
	1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 80	No. 200	
	% Pasa										
Semidensa	MSC-25		100	80-95	65-80	55-70	40-55	4-38	9-20	6-12	3-7
	MSC-19			100	80-95	65-80	40-55	4-38	9-20	6-12	3-7

NOTA: Las casillas resaltadas en amarillo corresponden a las utilizadas para el desarrollo del proyecto

3.3.2. Contenido óptimo de asfalto (Diseño preliminar de la mezcla asfáltica por el método Marshall)

De acuerdo a lo estipulado en la Especificación General para la Construcción de Carreteras 450 (INVIAS, 2013), las calidades de aceptación para el diseño preliminar de una mezcla asfáltica por medio del método de Marshall son las enunciadas en la siguiente tabla (tabla 28).

Tabla 28. Criterios para el diseño preliminar de mezclas asfálticas en caliente de gradación continua método Marshall						
Especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS capítulo 4 (artículo 450-13) (INVIAS, 2013)						
CARACTERÍSTICA	NORMA ENSAYO INV	MEZCLAS DENSAS, SEMIDENSAS Y GRUESAS			MEZCLA DE ALTO MÓDULO	
		CATEGORÍA DE TRÁNSITO				
		T1	NT2	NT3		
Compactación (golpes/cara)	E-748 (E-800) (Nota 1)	50	75 (112)	75 (112)	75	
Estabilidad mínima (N)		5,000	7,500 (16,875)	9,000 (33,750)	15,000	
Flujo(mm) (Nota 2)		2.0 a 4.0	2.0 a 4.0 (3.0 a 6.0)	2.0 a 3.5 (3.0 a 5.3)	2.0 a 3.0	
Relación Estabilidad / Flujo (kN/mm)		2.0 a 4.0	3.0 a 5.0 (4.5 a 7.5)	3.0 a 6.0 (4.5 a 9.0)	-	
Vacíos con aire (Va), % (Nota 3)	Rodadura	E-736 O E-799	3.0 a 5.0	3.0 a 5.0	4.0 a 6.0	NA
	Intermedia		4.0 a 8.0	4.0 a 7.0	4.0 a 7.0	4.0 a 6.0
	Base		NA	5.0 a 8.0	5.0 a 8.0	4.0 a 6.0
Vacíos en los agregados minerales (VAM), % Mínimo	T. Máx. 38 mm	E-799	13.0			-
	T. Máx. 25 mm		14.0			14.0
	T. Máx. 19 mm		15.0			-
	T. Máx. 10 mm		16.0			-
Vacíos llenos de asfalto (VFA), %	E-799	65 a 80	65 a 78	65 a 75	63 a 75	
Relación Llenante / Ligante efectivo, en peso	E-799	0.8 a 1.2			1.2 a 1.4	

Para el desarrollo del proyecto se realizaron como mínimo 18 briquetas para cada uno de los diseños tenidos en cuenta (Convencional y modificado), las cuales estuvieron repartidas en los intervalos tal y como se muestra en la siguiente tabla (tabla 29)

Tabla 29. Cantidad de briquetas por diseño del método Marshall		
Fuente: Propia		
% Asfalto	Cantidad de probetas por intervalo de diseño	
	Convencional	Modificado
3.5%	3	3
4%	3	3
4.5%	3	3
5%	3	3
5.5%	3	3
6%	3	3
6.5%	3	0
TOTAL	21	18

3.3.2.1. Gravedad específica Bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados y superficialmente secos (INV E-733-13) (INVIAS, 2013)

- *Objetivo del ensayo*

Este ensayo determina de la gravedad específica Bulk y la densidad de especímenes de mezclas asfálticas compactadas.

- *Resumen*

Con la muestra seca y fría se determinó su masa, registrándola como masa seca del espécimen en el aire (A).

Posteriormente, para determinar la masa del espécimen saturado, se sumergió en agua a 25 °C durante 3 minutos. Al final del tiempo anteriormente mencionado, se tomó el dato de la masa del espécimen sumergido y se registró como masa del espécimen sumergido (C).

En seguida, se sacó la muestra del agua y se secó rápidamente su superficie con una toalla. Se realizó la determinación de la masa y se registró como la masa del espécimen en condición saturada superficialmente seca (SSS).



Ilustración 23. Briqueita Sumergida (Determinación de la Densidad Bulk)

Fuente: Propia

- *Cálculos*

$$\text{Gravedad específica Bulk} = \frac{A}{B - C}$$

Donde:

A: Masa del espécimen seco en el aire, [g]

B – C: Masa del volumen de agua correspondiente al volumen del espécimen a 25°C, [g]

B: Masa en el aire del espécimen saturado y superficialmente seco (SSS), [g]

C: Masa del espécimen sumergido en agua, [g].

$$\text{Gravedad específica Bulk} = \frac{A}{B - C}$$

997.0 =Densidad del agua a 25° C en kg/m³ (0.9970 g/cm³).

Densidad = Gravedad específica Bulk * 997.0

3.3.2.2. Gravedad específica máxima de mezclas asfálticas para pavimentos (INV E-735-13) (INVIAS, 2013)

- *Objetivo del ensayo*

El objetivo de este ensayo es determinar la gravedad específica máxima para mezclas asfálticas a 25°C.

- *Resumen del método*

En primer lugar, se calibró el matraz a utilizar en el ensayo. Este procedimiento se llevó a cabo llenándolo con agua a 25°C, masa que se registró como masa del matraz lleno con agua a 25°C (D).

Posteriormente, se puso la mezcla en el horno para que se separara. Cuando estuvo a una temperatura que permitió la separación de las partículas de la mezcla esta se comenzaron a

separar, teniendo cuidado de que no quedaran grumos de material fino o de fracturar las partículas gruesas de la mezcla asfáltica.

Cuando se tuvo la muestra separada y lista para el procedimiento del ensayo, se pasó a colocarla en el matraz anteriormente calibrado. Cabe resaltar que este tenía que estar totalmente seco, y se debe tener su masa o tener la balanza tarada con su peso para poder obtener el registro de la masa exacta de mezcla asfáltica que va a utilizarse para realizar el ensayo. Esta masa se registró como masa en el aire de la muestra seca (A).

Luego, se agregó agua al matraz de forma que la muestra quedó totalmente sumergida. A partir de esto, se comenzó el procedimiento de la remoción del aire que quedó atrapado dentro de las partículas de la muestra de la mezcla asfáltica por medio de la aplicación de vacío y la agitación del matraz.

Por último, se agregó el agua necesaria para dejar el matraz lleno a la misma medida que se realizó la calibración, teniendo cuidado con la temperatura a la cual se tenía que encontrar el contenido del matraz (25°C). En el momento que se encuentre a 25°C se toma la masa, la cual se registra como masa del matraz con agua y muestra (E).

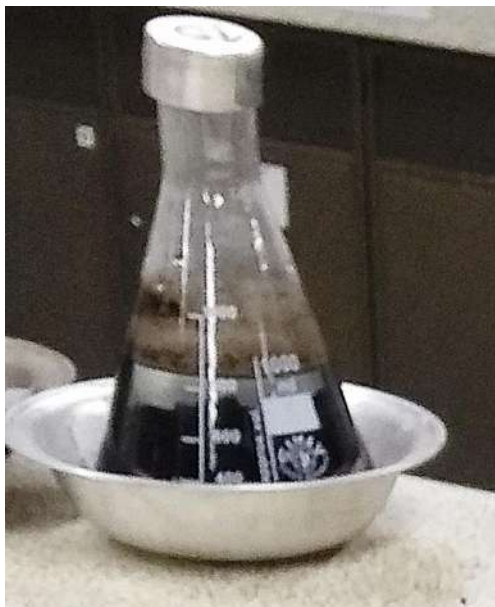


Ilustración 24. Ejecución Ensayo de Determinación de la Gravedad Específica Máxima
Fuente: Propia

- *Cálculos*

$$G_{mm} = \frac{A}{A + D - E}$$

Donde:

G_{mm}: Gravedad específica máxima de la muestra

A: Masa en el aire de la muestra seca [g]

D: Masa del frasco lleno con agua a 25°C [g]

E: Masa del frasco con agua y muestra a 25°C [g]

3.3.2.3. Porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas (INV E-736-13) (INVIAS, 2013)

- *Objetivo del ensayo*

El objetivo de este ensayo es determinar el porcentaje de vacíos ocupados por el aire en mezclas asfálticas densas y abiertas compactadas.

- *Resumen del método*

En primer lugar, se determinó la gravedad específica bulk de la mezcla compactada, mediante el procedimiento descrito en la norma INV E- 733 (INVIAS, 2013).

En seguida, se determinó la gravedad específica máxima sobre la mezcla asfáltica por medio del procedimiento enunciado en la INV E-735 (INVIAS, 2013).

A partir de los datos mencionados anteriormente, se procede a realizar los cálculos correspondientes a esta norma.

- *Cálculos*

$$V_a = \left[1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \right] * 100$$

Donde:

V_a : Porcentaje de vacíos con aire en la mezcla compactada[%].

G_{mm} : Gravedad específica máxima [g/cm³].

G_{mb} : Gravedad específica bulk de espécimen compactado [g/cm³].

3.3.2.4. *Análisis volumétrico de mezclas asfálticas compactadas en caliente (INV E-799-13) (INVIAS, 2013)*

- *Objetivo del ensayo*

Esta norma provee los métodos para realizar el análisis volumétrico de muestras compactadas en caliente.

- *Resumen del ensayo*

Se hallaron las masas del cemento asfáltico y agregados empleados con sus debidos porcentajes, cuyos valores sumados fueron el 100%.

Posteriormente se hallaron las gravedades específicas Bulk del agregado fino y grueso que fueron utilizados para la realización de la mezcla asfáltica. También se halló la gravedad específica del asfalto.

Finalmente se calculó la gravedad específica Bulk, de la mezcla combinada con el agregado (G_{sb}).

Después, se midió la gravedad específica máxima y la gravedad específica Bulk de la mezcla. A partir de esto, se calculó la gravedad específica efectiva del agregado pétreo (G_{se}).

Luego, se halló el peso absorbido como porcentaje de la masa de la mezcla (P_{ba}). De igual forma, se calculó el contenido de asfalto efectivo en porcentaje (P_{be}). También, se calculó el porcentaje de vacíos entre las partículas de agregado mineral respecto al volumen total del espécimen compactado (V_{AM}). Por otra parte, se calculó el porcentaje de vacíos de aire respecto al volumen total del espécimen compactado (V_a). Después, se realizó el cálculo del porcentaje de vacíos llenos de ligante asfáltico (V_{FA}). Finalmente, se halló la relación de llenante sobre ligante efectivo.

- *Cálculos*
 - G_{sb} : Gravedad específica bulk del agregado combinado

$$G_{sb} = \frac{P1 + P2 + \dots + Pn}{\frac{P1}{G1} + \frac{P2}{G2} + \dots + \frac{Pn}{Gn}}$$

Donde:

G_{sb} : Gravedad específica Bulk del agregado combinado

$P1, P2, Pn$: Porcentajes individuales de distintos agregados que intervienen en el agregado combinado.

$G1, G2, Gn$: Gravedades específicas Bulk de las fracciones del agregado.

- G_{se} : Gravedad específica efectiva del agregado combinado.

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}$$

Donde:

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

G_{mm} : Gravedad específica máxima de la mezcla.

P_{mm} : Porcentaje de masa de la mezcla total suelta =100.

G_b : Gravedad específica del cemento asfáltico.

P_b : Porcentaje del cemento asfáltico en la mezcla

- P_{ba} : Peso absorbido como porcentaje de la masa de la mezcla

$$P_{ba} = 100 \left[\frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} \times G_{sb}} \right] \times G_b$$

- P_{be} : Contenido de asfalto efectivo en porcentaje

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba}}{100} \times P_s$$

- *VAM*: Vacíos entre las partículas de agregado mineral respecto al volumen total del espécimen compactado

$$VAM = 100 - \frac{G_{mb}}{G_{sb}} \times P_s$$

Donde:

G_{mb} : Gravedad específica bulk de la mezcla compactada.

G_{sb} : Gravedad específica bulk del agregado combinado.

P_s : Porcentaje de agregado en la mezcla.

- V_a : Vacíos con aire

$$V_a = 100 \times \left[\frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \right]$$

Donde:

G_{mm} : Gravedad específica máxima de la mezcla

G_{mb} : Gravedad específica bulk de la mezcla compactada.

- *VFA*: Porcentaje de vacíos llenos de ligante asfáltico

$$VFA = 100 \times \left[\frac{VAM - V_a}{VAM} \right]$$

Donde:

VAM: Vacíos en el agregado mineral en la probeta compactada.

V_a : Vacíos con aire en la probeta compactada.

- Relación llenante sobre ligante efectivo

$$\frac{\text{Llenante}}{\text{Ligante efectivo}} = \frac{P_{0.075}}{P_{be}}$$

Donde:

P_{be} : Contenido de asfalto efectivo en porcentaje

$P_{0.075}$: Porcentaje del agregado que pasa el tamiz #200

3.3.2.5. Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall (INV E-748-13) (INVIAS, 2013)

- *Objetivo del ensayo*

Describir el procedimiento para determinar la resistencia a la deformación plástica de especímenes en el aparato Marshall. Aporta datos relacionados con la elaboración y comprobación de la mezcla asfáltica tales como como la estabilidad y el flujo.

- *Resumen del método*

Se prepararon probetas con diferentes contenidos de asfalto que variaron entre sí, intervalos de 0.5%. A partir de esto, se pudieron realizar curvas que indicaron el contenido óptimo de asfalto. Se realizaron 3 probetas por cada contenido de asfalto, las cuales pesaron aproximadamente 1200 [g] cada una.

Antes de realizar la mezcla, los agregados se dejaron secando a una temperatura de 110°C por un lapso de 24 horas. El cemento asfáltico estaba a una temperatura de aproximadamente 150 [°C] donde presentaba una viscosidad óptima para el mezclado, y de aproximadamente 180 [°C] para el proceso de compactación.

Las probetas se elaboraron cada una por separado. Atendiendo las indicaciones y sugerencias propuestas por la norma. Los moldes de las probetas se calentaron a una temperatura de 150°C, después se ensamblaron y se colocó en su fondo un papel filtro para evitar que la muestra se desperdiciara durante el proceso de compactación.

Luego de vaciar la mezcla en el molde, se pasó al proceso de compactación, para el cual se colocó el conjunto de mezcla-molde en el pedestal de compactación del martillo mecánico.

Este le dio 75 golpes por cada cara a la muestra para compactarla, como se puede observar en la ilustración 25.

Se retiraron el collar y la placa del molde. Luego se esperó hasta el otro día mientras la muestra se enfrió para poder pasar a retirarla del molde y pasarla a una superficie lisa. Luego de cumplir como mínimo con las 24 h después de compactada, se determinó la gravedad específica Bulk y se midió la altura y diámetro de cada una de las probetas.

El ensayo de estabilidad y flujo se realizó como mínimo después de que pasaron 24 horas después de la compactación de la muestra. Para realizar este procedimiento se colocó la muestra al baño maría a una temperatura de 60°C durante aproximadamente 35 minutos.

Se retiró la muestra del agua y se colocó en estado superficialmente seco en la máquina de ensayo de forma centrada. A partir de esto, se aplicó la carga a la probeta con la prensa a una tasa de deformación constante de 50 [mm/min] hasta que alcanzó la carga máxima y comenzó a bajar, es decir, falló. Se consignaron los valores correspondientes al flujo y a la estabilidad.



Ilustración 25. Compactador Mecánico Método Marshall

Fuente: Propia

3.3.3. Verificación y Evaluación del Diseño Marshall

De acuerdo a lo estipulado en la Especificación General para la Construcción de Carreteras 450 (INVIAS, 2013), las mostradas en la siguiente tabla (tabla 30) son las calidades de aceptación para el diseño de una mezcla asfáltica por medio del método de Marshall:

Tabla 30. Requisitos de la verificación del diseño Marshall			
Especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS capítulo 4 (artículo 450-13) (INVIAS, 2013)			
PROPIEDAD	NORMA DE ENSAYO INV	VALOR	APLICABILIDAD
Adherencia: Resistencia retenida, % mínimo	E-725	80	Todas las mezclas
Resistencia a la deformación plástica: velocidad máxima de deformación en el intervalo de 105 a 120 minutos, $\mu\text{m}/\text{min}$. - Temperatura media anual del aire > 24°C - Temperatura media anual del aire < 24°C	E-756	15 20	- Tránsito NT3: para capas de rodadura e intermedia - Mezclas de alto módulo
Módulo resiliente, Mpa - Mezclas de alto módulo compactadas con 75 golpes por cara, valor mínimo a 20° C - Otras mezclas	E -749	10,000	- Mezclas de alto módulo - Opcional para otras mezclas, según documentos del proyecto

3.3.3.1. Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta (INV E-725-13) (INVIAS, 2013)

- *Objetivo del ensayo*

Establecer un procedimiento para preparar y probar especímenes de concreto asfáltico para realizar la medición de su resistencia a la tracción indirecta con el fin de evaluar su comportamiento en condiciones de humedad.

- *Resumen del método*

Para llevar a cabo este ensayo se realizaron 8 briquetas tipo Marshall, las cuales tuvieron que cumplir con un porcentaje de vacíos con aire entre el 6% y el 8%. Después de verificar las condiciones de vacíos con aire correspondientes a lo indicado en la norma, las 8 briquetas se dividieron en dos grupos cuyos valores promedio de vacíos con aire fueron similares.

- Acondicionamiento para el grupo húmedo

El subgrupo es saturado, llegó a un porcentaje de saturación que se encontró entre el 55% y el 80%, como se indica en la norma. Después de haber llegado a este porcentaje de saturación, se pasó el grupo de especímenes a un baño maría a 60°C durante aproximadamente 24 horas.

Al finalizar el tiempo del baño mencionado anteriormente, se les ajustó la temperatura a los especímenes colocándolos en un baño de agua a aproximadamente 25°C durante 1 hora. Se determinó el grado de saturación de los especímenes y el cambio volumétrico al terminar el periodo de acondicionamiento de la temperatura.

- Acondicionamiento para el grupo seco:

Para poder realizar el ensayo al grupo seco, se le ajustó la temperatura colocándolo en un baño de agua a 25°C durante aproximadamente 20 minutos.

- Desarrollo del ensayo:

Para realizar la aplicación de la carga a los especímenes se utilizó el mismo equipo con el que anteriormente se aplicó la carga a las muestras correspondientes al ensayo de estabilidad y flujo de Marshall. La única diferencia es que la carga no se aplicó por medio del molde de ese ensayo, sino que se utilizaron unas especies de platinas que le hicieron un corte de forma transversal a las probetas, montaje que puede verse en la ilustración 26. Se registra la carga

máxima aplicada por el equipo para realizar los cálculos correspondientes al ensayo, registrándola como carga máxima (P).

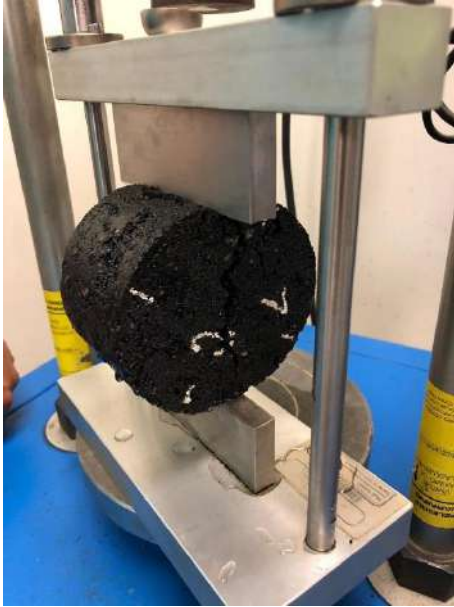


Ilustración 26. Aplicación de Carga de Tracción Indirecta en Ejecución del Ensayo de Susceptibilidad al Agua de las Mezclas de Concreto Asfáltico

Fuente: Propia

- *Cálculos*
 - Volumen de agua absorbida (V_{wa})

$$V_{wa} = \text{Masa SSS} - \text{Masa seca al aire}$$

Donde:

Masa SSS: Masa del espécimen saurado y superficialmente seco

Masa seca al aire: Masa del espécimen seco al aire (INV E – 733)

- Volumen de vacíos con aire del espécimen (V_A)

$$V_A = \frac{\% \text{ Vacíos con aire} \times \text{Volumen del espécimen}}{100}$$

- Grado de saturación

$$\% \text{ Saturación} = \frac{V_{wa}}{V_A} \times 100$$

- Resistencia a la tensión (R_T)

$$R_T = \frac{2000 \times P}{\pi \times t \times D}$$

Donde

R_T : Resistencia a la tensión [kPa]

P : Carga máxima [P]

t : Altura del espécimen inmediatamente antes de la prueba [mm]

D : Diámetro del espécimen [mm]

- Relación de resistencias a tensión (RRT)

$$RRT = \left[\frac{R_{TH}}{R_{TS}} \right] \times 100$$

Donde:

RRT : Relación de resistencias a la tensión [%]

R_{TH} : Resistencia promedio a la tensión grupo humedo

R_{TS} : Resistencia promedio a la tensión grupo seco

3.3.3.2. Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA) (AASHTO T324-04) (AASHTO, 2004)

- *Objetivo del ensayo*

Este ensayo tiene como objetivo evaluar aspectos tales como la estructura, la rigidez y el daño por humedad del pavimento. Esto anterior, dado a partir de la medición de la deformación en condiciones determinadas de temperatura, a lo largo de las pasadas realizadas por la máquina de ensayo.

- *Resumen del método*

Para la realización de este ensayo se utilizaron muestras compactadas en el compactador giratorio, con una masa de aproximadamente 5800 [g]. Una vez la muestra se encontró lista, con sus debidos cortes, se ubicó en el molde teniendo cuidado de que quedara bien nivelada y totalmente dentro del mismo, este proceso se desarrolló con arena muy fina para que cubriera cualquier hendidura que alterara el normal desarrollo del ensayo.

Se escogió someter la muestra a una temperatura de 40°C, para lo cual se realizó un proceso de pre-acondicionamiento a la muestra durante 30 minutos. Antes de dar inicio al ensayo se configuro la máquina para que pasaran 4 veces la rueda sobre la muestra para ajustarla, con el fin de que cuando se iniciaran las 20000 pasadas no hubiese grandes deformaciones al inicio del ensayo por posible inestabilidad de la muestra.

La frecuencia de pasadas por minuto fue de 50, lo que indica que el ensayo tuvo una duración aproximada de 6h, 39min y 36 s, lo cual sumado al tiempo de pre-acondicionamiento, da un tiempo total del ensayo aproximado de 7h, 9 min y 36 s. En la ilustración mostrada a continuación (ilustración 27), se puede observar la máquina de Rueda de Hamburgo durante la ejecución del ensayo.

Una vez terminado el ensayo, se extrajeron los datos obtenidos del ensayo mediante una USB, se retiró el molde de la máquina y observó el ahuellamiento que sufrió la muestra. Luego de esto se retiran las muestras del molde de la máquina y se retira cualquier residuo dejado al realizar en ensayo. Finalmente se limpió la maquina drenando el agua con sedimentos.



*Ilustración 27. Ensayo de Rueda de Hamburgo en Ejecución
Fuente: Propia*

- *Cálculos*
 - Pendiente e intersección de la primera zona estable de la gráfica: Deformación Vs.

#De pasadas

- Pendiente e intersección de la segunda zona estable de la gráfica: Deformación

Vs. #De pasadas

3.3.3.3. Norma española. Mezclas bituminosas. Método de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 26: Rigidez (UNE-EN 12697-26). Anexo C. (AENOR, 2006)

- *Objetivo del ensayo*

El objeto de esta norma es tener una guía en lo relacionado con el comportamiento de las mezclas asfálticas en una diferente gama de condiciones de temperatura. Específicamente dentro del Anexo C, estas se determinan a partir de un ensayo de tracción indirecta, por medio del cual se establece el módulo para la mezcla asfáltica

- *Resumen del método*

Para la realización de este ensayo se prepararon las muestras con un espesor de aproximadamente 50 [mm], y con un diámetro aproximado de 100 [mm]. Estos se fabricaron en el compactador giratorio y posteriormente se cortaron con la ayuda de una sierra especializada para este tipo de cortes.

Posteriormente, se tomaron las dimensiones de cada una de las muestras obtenidas a partir del procedimiento anterior y se les dibujaron dos diámetros distanciados 90° entre sí.

Luego de esto, se pasó al procedimiento de acondicionamiento de las muestras de ensayo. Para este fin, se dejaron las muestras como mínimo 4 horas dentro de la cámara del equipo DTS-30 a la temperatura de ensayo estimada. En este proyecto se utilizaron temperaturas de 5°C , 25°C y 40°C .

Al terminar el acondicionamiento de las muestras de ensayo, se pasó al montaje de la muestra en las platinas de ensayo colocándola por uno de sus diámetros. Al mismo tiempo de la colocación de las platinas, se montó el dispositivo medidor de deformaciones.

En lo que concierne al ensayo de medición de la rigidez, luego de tener la muestra montada y a la temperatura de ensayo determinada se le aplicaron los impulsos de carga de acondicionamiento. Al finalizar los impulsos de acondicionamiento se aplicaron 5 ciclos de carga para la realización del ensayo. Este procedimiento se realizó para cada uno de los diámetros de las muestras ensayadas, es decir, dos ensayos por muestra.



Ilustración 28. Montaje ensayo de Módulos Resilientes
Fuente: Propia

- *Cálculos*
 - *Modulo de rigidez*

$$S_m = \frac{F x (v + 0,27)}{(z x h)}$$

Donde:

S_m = Módulo de Rigidez medido [MPa]

F = Valor máximo de carga aplicada [N]

$z =$ *Amplitud de la deformación horizontal [mm]*

$h =$ *Espesor medio de la probeta [mm]*

$\nu =$ *Coefficiente de Poisson*

- Ajuste del módulo de rigidez de acuerdo al factor de forma

$$S'_m = S_m \times (1 - 0.322 \times (\log(S_m) - 1.82) \times (0.60 - k))$$

Donde:

$S_m =$ *Módulo de Rigidez medido [MPa]*

$S'_m =$ *Módulo de Rigidez ajustado a un factor de forma de 0.60 [MPa]*

$k =$ *Factor de superficie de carga medido*

4. Resultados

4.1. Caracterización del Agregado Natural y Agregado Cerámico

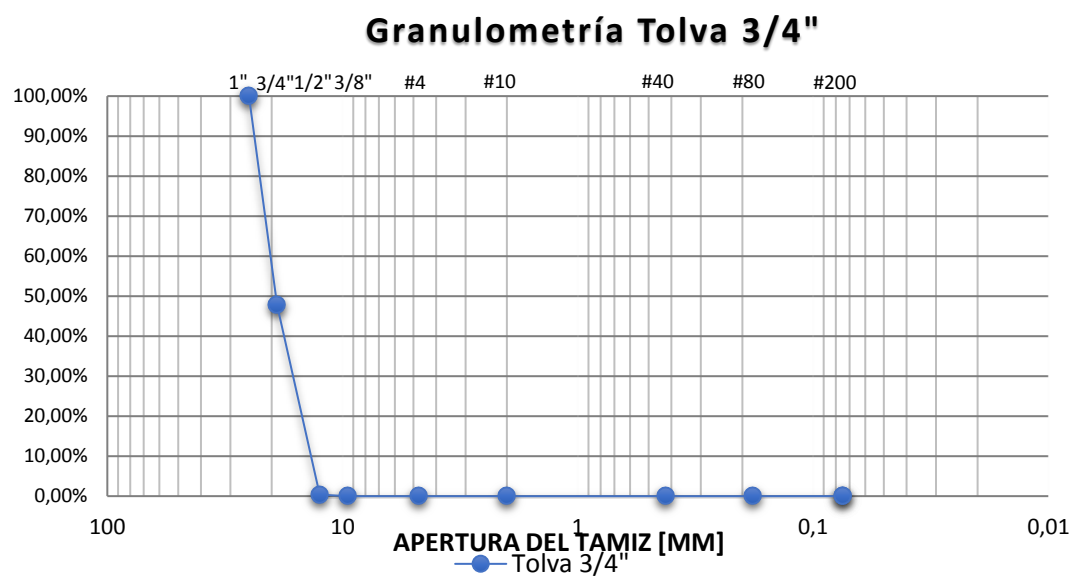
4.1.1. Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino (INV E-213-13) (INVIAS, 2013)

Para realizar el análisis granulométrico de los agregados tenidos en cuenta dentro de este proyecto de grado, estos se analizaron por tolvas, de acuerdo a lo contemplado para el manejo del material dentro de la cantera en el caso del agregado natural, y de acuerdo al tamaño del material en el caso del agregado cerámico. Todo el procedimiento desarrollado para la realización de este ensayo se dio a partir de lo contemplado en la Norma de Ensayo de Materiales para carreteras INV E-213-13 (INVIAS, 2013). A partir de lo anteriormente mencionado, los resultados fueron:

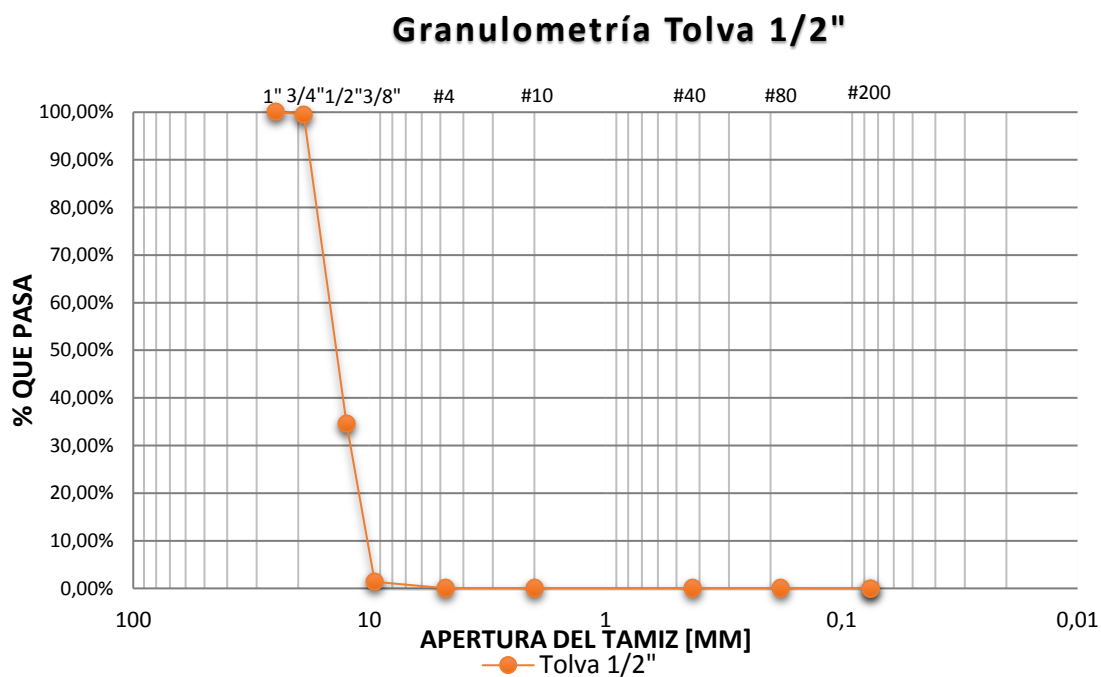
4.1.1.1. *Agregado natural*

Para la realización de este proyecto de grado, el agregado natural se clasificó en las mismas tolvas que se utilizan internamente en la cantera. Por tal razón la granulometría de los agregados de origen natural corresponde a lo mostrado en las siguientes gráficas (gráfica 1, 2 y 3).

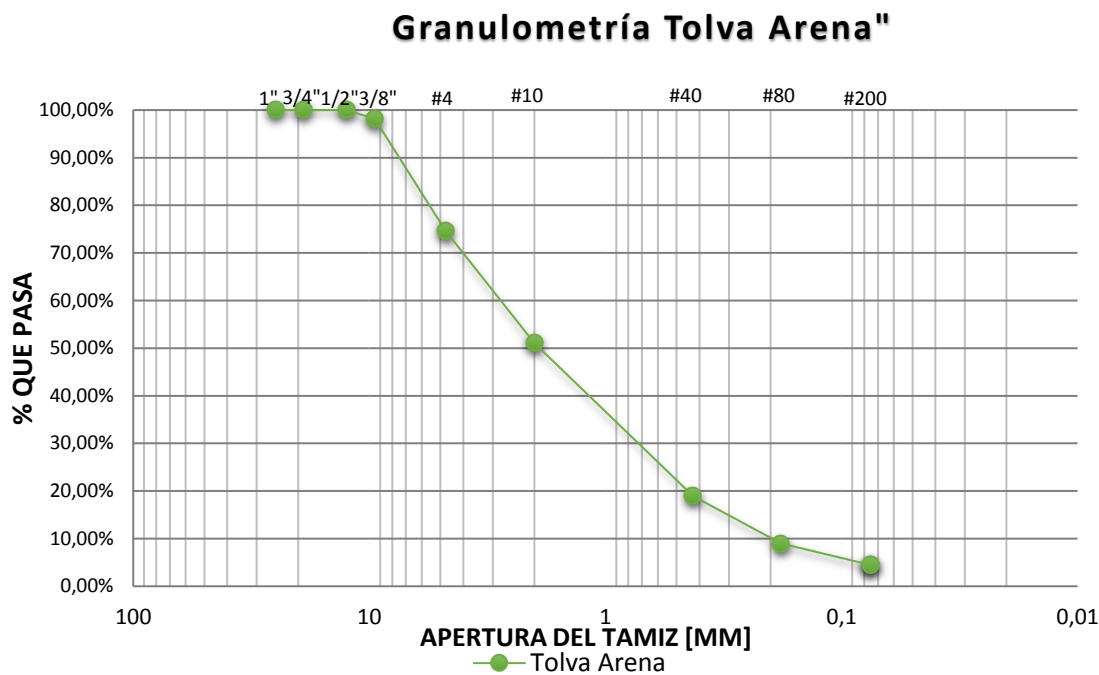
Los datos y cálculos completos de los ensayos de granulometría para las tolvas de 3/4", 1/2" y de arenas se consignan en los anexos 1, 2 y 3 de forma correspondiente.



Gráfica 1. Granulometría tolva 3/4" agregado natural



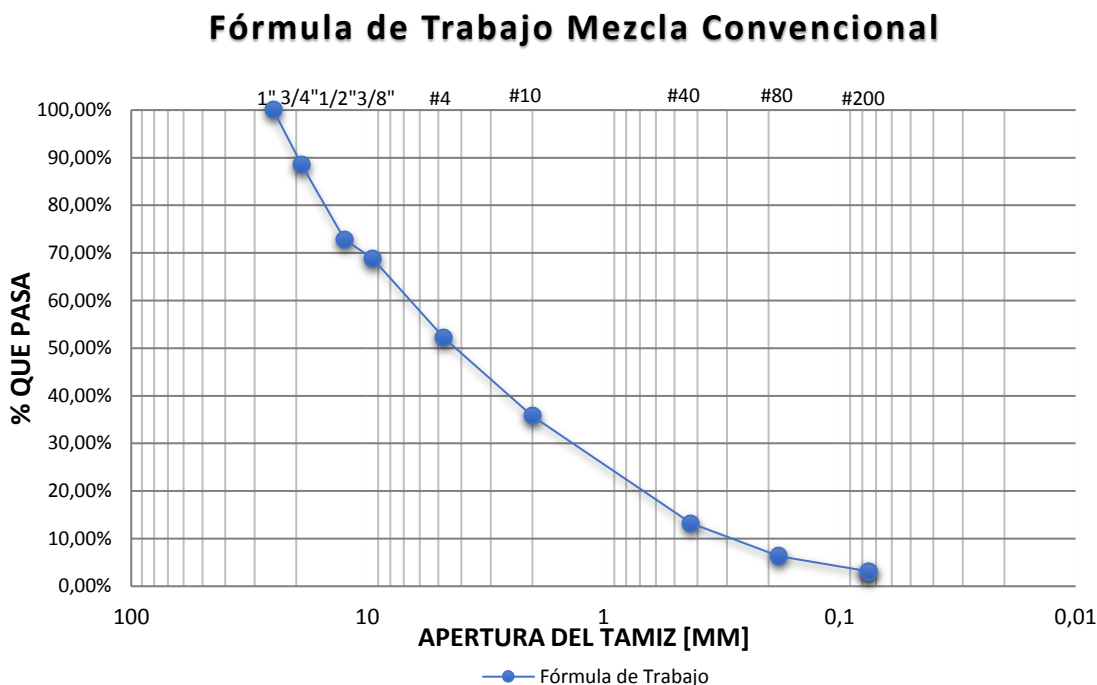
Gráfica 2. Granulometría tolva 1/2" agregado natural



Gráfica 3. Granulometría arena agregado natural

A partir de las granulometrías de los materiales mostradas anteriormente, se realizó una fórmula de trabajo que permitiera cumplir los límites establecidos por la Especificación General de Construcción de Carreteras 450 (INVIAS, 2013). Para este fin se utilizaron los porcentajes de cada tolva mostrados en la siguiente tabla (tabla 31), los cuales dieron como resultado la granulometría de la fórmula de trabajo consignada en la gráfica 4. Los cálculos realizados para la obtención de lo consignado en la gráfica granulométrica de la fórmula de trabajo de la mezcla asfáltica convencional se registran en el anexo 4.

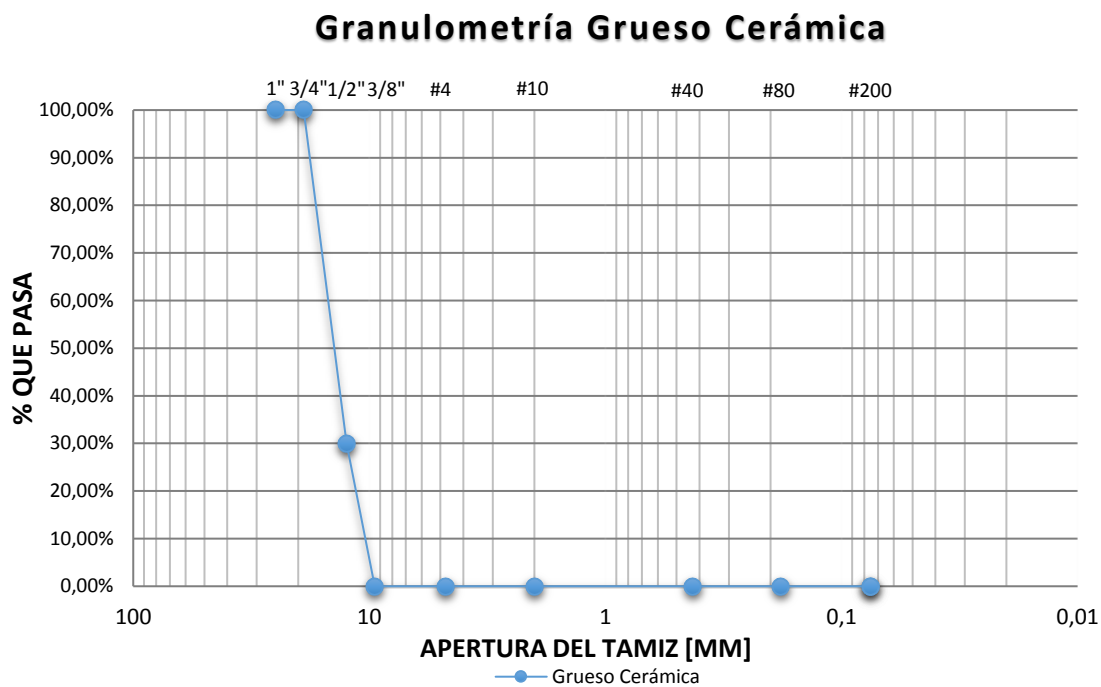
Tabla 31. Fórmula de Trabajo Mezcla Convencional	
Fuente: Propia	
Tolva 3/4"	22%
Tolva 1/2"	8%
Tolva Arenas	70%



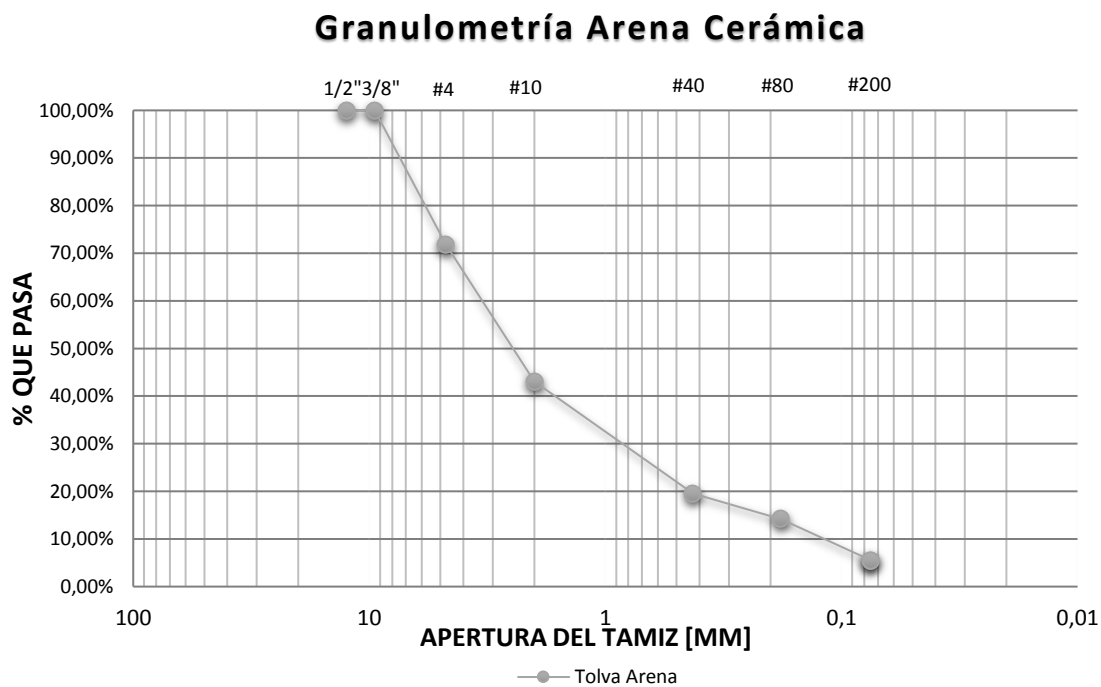
Gráfica 4. Granulometría fórmula de trabajo mezcla asfáltica convencional

4.1.1.2. Agregado cerámico

En lo que respecta a la granulometría del material cerámico, para la obtención de los tamaños de material necesarios para el desarrollo de este proyecto, se utilizó la máquina de Los Ángeles, colocándola a funcionar en periodos de 500 y 200 ciclos de acuerdo al tamaño de material requerido. Es decir, para materiales gruesos (3/8" hacia arriba) se utilizaron 200 ciclos, mientras que para materiales finos (3/8" hacia abajo) la máquina se puso a funcionar durante 500 ciclos hasta obtener la granulometría requerida. A partir de lo mencionado anteriormente, se configuraron dos diferentes granulometrías de material cerámico, cuyas gráficas granulométricas se muestran en las gráficas siguientes (grafica 5 y 6). Los cálculos y datos de los ensayos de granulometría realizados al material fino y grueso de origen cerámico se consignan en los anexos 5 y 6 de forma correspondiente.



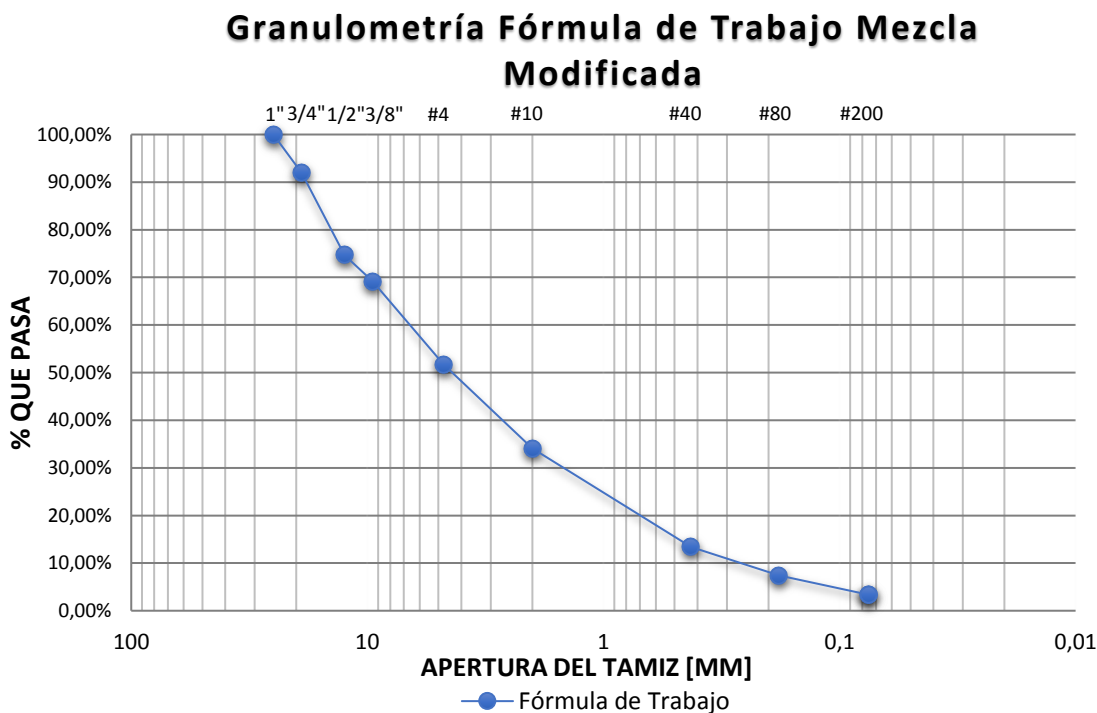
Gráfica 5. Granulometría material grueso de cerámica



Gráfica 6. Granulometría arena de cerámica

A partir de la unión de los materiales cerámicos mostrados anteriormente (gráfica 5 y 6), y las tolvas de material de origen natural (gráfica 1, 2 y 3), teniendo en cuenta los porcentajes de participación mostrados en la tabla 32, la cual determina la fórmula de trabajo de la mezcla asfáltica modificada, se crea la granulometría mostrada en la gráfica 7. Los cálculos y datos correspondientes a la fórmula de trabajo de la mezcla asfáltica modificada se encuentran consignados en el anexo 7.

Tabla 32. Fórmula de Trabajo Mezcla Asfáltica Modificada	
Fuente: Propia	
Agregado Natural	
Tolva 3/4"	15.4%
Tolva 1/2"	5.6%
Tolva Arenas	49%
Agregado Cerámico	
Tolva material grueso	9%
Tolva Arenas	21%



Gráfica 7. Granulometría fórmula de trabajo mezcla asfáltica modificada

4.1.2. Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 [mm] por medio de la máquina de los Ángeles (INV E-218-13) (INVIAS, 2013)

Para la realización de este ensayo se tuvo en cuenta el procedimiento descrito en la Norma de Ensayo de Materiales para Carreteras INV E-218-13 (INVIAS, 2013). Los porcentajes de pérdidas del material natural y del material de origen cerámico se encuentran consignados en la siguiente tabla (tabla 23), cuyos cálculos y datos completos se consignan en el Anexo 8.

Tabla 33.% Pérdidas Ensayo de Desgaste en la Máquina de Los Ángeles	
Fuente: Propia	
Agregado Natural	Agregado Cerámico
25.38%	27%

4.1.3. Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión, utilizando el aparato Micro-Deval (INV E-238-13) (INVIAS, 2013)

El ensayo de Resistencia del Agregado Grueso a la Degradación por Abrasión, Utilizando el Aparato de Micro-Deval se realizó de acuerdo a lo planteado en la norma INV E-238-13 (INVIAS, 2013) obteniendo los resultados mostrados a continuación (tabla 24). Esto anterior se consigna en el Anexo 9 junto con los demás datos recopilados en el desarrollo del ensayo.

Tabla 34.% Pérdidas Ensayo de Resistencia a la Degradación Por abrasión en el aparato Micro-Deval	
Fuente: Propia	
Agregado Natural	Agregado Cerámico
6.91 %	8 %

4.1.4. Determinación del valor del 10% de finos (INV E-224-13) (INVIAS, 2013)

En lo que respecta al ensayo de 10% de finos, se tuvieron en cuenta las disposiciones y recomendaciones contenidas en la Norma de Ensayo de Materiales de Carreteras INV E-224-13 (INVIAS, 2013). Dando como resultado lo mostrado en la siguiente tabla (tabla 24), lo cual se complementa con el Anexo 10 en donde se pueden encontrar todos los datos relacionados a la ejecución de este ensayo.

Tabla 35. Resultados del ensayo de 10% de Finos			
Fuente: Propia			
Agregado Natural		Agregado Cerámico	
Muestra Húmeda [kN]	Muestra Seca [kN]	Muestra Húmeda [kN]	Muestra Seca [kN]
140	210	260	280
Relación Húmedo/Seco		Relación Húmedo/Seco	
67%		93%	

4.1.5. Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio (INV E-220-13) (INVIAS, 2013)

Para realizar el ensayo de solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o magnesio se siguió lo consignado dentro de la Norma de Ensayo de Materiales para Carreteras INV E-220-13 (INVIAS, 2013). Los resultados de la ejecución de este ensayo se muestran a continuación (tabla 26) y la información completa del ensayo se encuentra en el presente documento dentro del contenido del Anexo 11.

Tabla 36. % Pérdidas Ensayo de Solidez frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o magnesio	
Fuente: Propia	
Agregado Natural	Agregado Cerámico
5.41 %	10.54 %

4.1.6. Determinación de la limpieza superficial de las partículas de agregado grueso (INV E-237-13) (INVIAS, 2013)

Como referencia para la realización del ensayo correspondiente a la Determinación de la Limpieza Superficial de las Partículas de agregado grueso se tomó la Norma de Ensayo de Materiales para Carreteras INV E-237-13 (INVIAS, 2013). Los resultados de la realización de este ensayo se muestran a continuación (tabla 27), complementándose con el Anexo 12 donde se encuentran consignados los demás datos de este.

Tabla 37. Coeficiente de limpieza superficial en agregado grueso	
Fuente: Propia	
Agregado Natural	Agregado Cerámico
0.41 %	0.2 %

4.1.7. Determinación del límite líquido de los suelos (INV E-125-13) (INVIAS, 2013)

Con el fin de realizar la Determinación del Límite Líquido de los Suelos se tomó en cuenta lo consignado en la Norma de Ensayo de Materiales para Carreteras INV E-125-13 (INVIAS, 2013), obteniendo los resultados que se muestran en la siguiente tabla (tabla 38). La información complementaria de este ensayo se consigna en el anexo 13 del presente documento.

Tabla 38. Ensayo de Límites	
Fuente: Propia	
Material de origen natural	
Límite Líquido	Límite Plástico
No hay Límite	No hay Límite
Material de origen cerámico	
Límite Líquido	Límite Plástico
No hay Límite	No hay Límite

**4.1.8. Equivalente de arena de suelos y agregados finos (INV E-133-13)
(INVIAS, 2013)**

Para lo que tuvo que ver con la realización del ensayo correspondiente al Equivalente de Arena de Suelos y Agregados Finos, se tuvo en cuenta lo consignado en la Norma de Ensayo de Materiales para Carreteras INV E-133-13 (INVIAS, 2013). Esto anterior dio lugar a los resultados mostrados en la siguiente tabla (tabla 39), los datos recopilados y los cálculos realizados para llevar a cabo este ensayo se consignan en el anexo 14.

Tabla 39. Equivalente de arena	
Fuente: Propia	
Agregado Natural	Agregado Cerámico
66	86

**4.1.9. Proporción de partículas planas, alargadas o planas y alargadas
en agregados gruesos (INV E-240-13) (INVIAS, 2013)**

Con el fin de encontrar la proporción de partículas planas y alargadas en una relación de 1:5, se tomaron en cuenta las recomendaciones y disposiciones que se consignan en la Norma de Ensayo de Materiales para Carreteras INV E-240-13 (INVIAS, 2013). Siguiendo la norma mencionada anteriormente, se llegó a los resultados mostrados en la siguiente tabla (tabla 40). La información recopilada para la realización de este ensayo y sus cálculos se encuentran en el anexo 15.

Tabla 40. Proporción de partículas planas y alargadas	
Fuente: Propia	
Agregado Natural	Agregado Cerámico
1.25 %	0.5 %

4.1.10. Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso (INV E-227-13) (INVIAS, 2013)

En lo que respecta a la obtención del porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso, se tuvo en cuenta la Norma de Ensayo de Materiales para Carreteras INV E-227-13 (INVIAS, 2013) para su realización. Los resultados derivados de este ensayo se pueden observar en la tabla presentada a continuación (tabla 41). Los datos completos correspondientes a este ensayo se consignan en el anexo 16 del presente documento.

Tabla 41. Porcentaje de partículas fracturadas	
Fuente: Propia	
Agregado Natural	Agregado Cerámico
94.67 %	100 %

4.1.11. Determinación del contenido de vacíos en agregados finos no compactados (influenciado por la forma de las partículas, la textura superficial y la granulometría) (INV E-239-13) (INVIAS, 2013)

Para la determinación del contenido de vacíos en agregados finos no compactados, o más comúnmente conocido como angularidad de finos, se tuvo en cuenta lo consignado en la Norma de Ensayo de Materiales para Carreteras INV E.239-13 (INVIAS, 2013). Los resultados de este ensayo se listan en la tabla mostrada a continuación (tabla 42), lo cual se complementa con la información presentada en el anexo 17 del presente documento para dar todos los datos y cálculos realizados.

Tabla 42. % de vacíos en el agregado fino sin compactar	
Fuente: Propia	
Agregado Natural	Agregado Cerámico
42.92 %	36.62 %

4.1.12. Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino (INV E-222-13) (INVIAS, 2013)

Con el fin de obtener los datos correspondientes a la densidad, densidad relativa y absorción del agregado fino se tuvo en cuenta lo consignado en la Norma de Ensayo de Materiales para Carreteras INV E-222-13 (INVIAS, 2013). Los resultados de este ensayo se pueden observar en la tabla mostrada a continuación (tabla 42), y los datos del desarrollo completo del ensayo se encuentran consignados en el anexo 18 del presente documento.

Tabla 43. Densidades del agregado fino					
Fuente: Propia					
Agregado Natural			Agregado Cerámico		
Densidad Relativa (SH)	-	2.55	Densidad Relativa (SH)	-	1.88
Densidad Relativa (SSS)	-	2.6	Densidad Relativa (SSS)	-	2.06
Densidad Relativa Aparente	-	2.7	Densidad Relativa Aparente	-	2.28
Densidad (SH)	Kg/m ³	2539.47	Densidad (SH)	Kg/m ³	1880.06
Densidad (SSS)	Kg/m ³	2597.66	Densidad (SSS)	Kg/m ³	2052.47
Densidad Aparente	Kg/m ³	2696.78	Densidad Aparente	Kg/m ³	2272.91
Absorción	%	2.29	Absorción	%	9.17

4.1.13. Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso (INV E-223-13) (INVIAS, 2013)

Para la obtención de los datos de densidad, densidad relativa y absorción del agregado grueso se tomaron en cuenta todos los procedimientos descritos en la Norma de Ensayo de Materiales para Carreteras INV E-223-13 (INVIAS, 2013). El ensayo realizado a las muestras obtenidas de los dos orígenes de materiales contemplados para el desarrollo de este proyecto (material natural y cerámico), dio como resultado los datos mostrados en la siguiente tabla (tabla

44). Estos datos se complementan con el contenido del anexo 19 para mostrar la recopilación de datos completa tenida en cuenta dentro de la ejecución del ensayo.

Tabla 44. Densidades del agregado grueso					
Fuente: Propia					
Agregado Natural			Agregado Cerámico		
Densidad Relativa (SH)	-	2.59	Densidad Relativa (SH)	-	2.04
Densidad Relativa (SSS)	-	2.61	Densidad Relativa (SSS)	-	2.2
Densidad Relativa Aparente	-	2.63	Densidad Relativa Aparente	-	2.42
Densidad (SH)	Kg/m3	2583.45	Densidad (SH)	Kg/m3	2038.63
Densidad (SSS)	Kg/m3	2599.91	Densidad (SSS)	Kg/m3	2194.65
Densidad Aparente	Kg/m3	2626.81	Densidad Aparente	Kg/m3	2416.61
Absorción	%	0.637	Absorción	%	7.65

4.2. Caracterización del Asfalto

4.2.1. Penetración de los materiales bituminosos (INV E-706-13)

(INVIAS, 2013)

El ensayo de penetración de los materiales bituminosos se llevó a cabo teniendo en cuenta el procedimiento descrito en la Norma de Ensayo de Materiales para carreteras INV E-706-13 (INVIAS, 2013). Su resultado se muestra en la siguiente tabla (tabla 45), y la recopilación completa de la toma de datos de este ensayo se registra en el anexo 20 del presente documento.

Tabla 45. Penetración de los materiales bituminosos	
Fuente: Propia	
Penetración [mm]	63.5

4.2.2. Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola) (INV E-712-13) (INVIAS, 2013)

Con el fin de establecer el punto de ablandamiento de materiales bituminosos se tomaron en cuenta el procedimiento y las recomendaciones consignadas en la Norma de Ensayo de Materiales para Carreteras INV E-712-13 (INVIAS, 2013). Los resultados se muestran en la tabla presentada a continuación (tabla 46) y los datos del ensayo se encuentran consignados en el anexo 21.

Tabla 46. Punto de ablandamiento de los materiales bituminosos	
Fuente: Propia	
Puno de ablandamiento [°C]	60

4.2.3. Índice de penetración de los cementos asfálticos (INV E-724-13) (INVIAS, 2013)

El índice de penetración se calcula a partir de lo consignado en la Norma de Ensayo de Materiales para Carreteras INV E-724-13 (INVIAS, 2013). Este cálculo se da a partir de los resultados de los ensayos de penetración y de punto de ablandamiento descritos anteriormente en los numerales 4.2.1 y 4.2.2 de forma correspondiente, de acuerdo a las fórmulas descritas anteriormente para este ensayo en el numeral 3.2.3. Su resultado se muestra en la siguiente tabla (tabla 47).

Tabla 47. Índice de penetración en cementos asfálticos	
Fuente: Propia	
Índice de penetración	1.66

4.2.4. Determinación de la viscosidad del asfalto empleando un viscosímetro rotacional (INV E-717-13) (INVIAS, 2013)

Con el objeto de determinar la viscosidad del asfalto empleando un viscosímetro rotacional, se tuvo en cuenta la Norma de Ensayo de Materiales para Carreteras INV E-717-13 (INVIAS, 2013) y el manual del equipo (Gutierrez & García, 2016). El resultado de este ensayo se muestra en la tabla mostrada a continuación (tabla 48) y la información completa del ensayo se encuentra consignada en el anexo 22.

Tabla 48. Viscosidad del asfalto	
Fuente: Propia	
Viscosidad a 60°C [P]	4334.8

4.2.5. Ductilidad de los materiales asfálticos (INV E-702-13) (INVIAS, 2013)

En lo que respecta a la determinación de la ductilidad del asfalto, se tuvieron en cuenta los parámetros consignados en la Norma de Ensayo de Materiales para Carreteras INV E-702-13 (INVIAS, 2013). La siguiente tabla (tabla 49) muestra el resultado obtenido para este ensayo.

Tabla 49. Ductilidad de los materiales asfálticos	
Fuente: Propia	
Longitud ductilometro [cm]	128

4.2.6. Puntos de inflamación y de combustión mediante la copa abierta Cleveland (INV E-709-13) (INVIAS, 2013)

El desarrollo de este ensayo se realizó basándose en el contenido de la Norma de Ensayo de Materiales para Carreteras INV E-709-13 (INVIAS, 2013). Los resultados se enuncian en la tabla mostrada a continuación (tabla 50).

Tabla 50. Puntos de inflamación y combustión	
Fuente: Propia	
Punto de inflamación [°C]	280
Punto de combustión [°C]	340

4.2.7. Densidad de materiales bituminosos sólidos y semisólidos (método del picnómetro) (INV E-707-13) (INVIAS, 2013)

Con el fin de hallar la densidad del asfalto, se siguió el procedimiento descrito en la Norma de Ensayo de Materiales para Carreteras INV E-707-13 (INVIAS, 2013). Como resultado se obtuvo lo que se muestra en la siguiente tabla (tabla 51), dato que se complementa con la información completa del ensayo consignada en el anexo 23 de este documento.

Tabla 51. Densidad del asfalto	
Fuente: Propia	
Densidad [g/cm ³]	0.998

4.3. Diseño de la Mezcla Asfáltica

4.3.1. Contenido óptimo de asfalto (Diseño preliminar de la mezcla asfáltica por el método Marshall)

El contenido óptimo de asfalto de las mezclas tenidas en cuenta dentro del desarrollo de este proyecto de grado, se determinaron de acuerdo a los parámetros establecidos por las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras en su capítulo 4, artículo 450: “Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua” (INVIAS, 2013). Buscando cumplir con la tabla de parámetros mínimos de calidad del diseño preliminar del método de Marshall, mostrada anteriormente (tabla 28), para lo cual se realizaron los siguientes ensayos y cálculos.

4.3.1.1. Gravedad específica Bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados y superficialmente secos (INV E-733-13) (INVIAS, 2013)

El desarrollo de esta determinación se realizó teniendo en cuenta los procedimientos y cálculos consignados en la Norma de Ensayo de Materiales para Carreteras INV E-733-13 (INVIAS, 2013). A partir de los cuales se pudieron obtener los resultados mostrados en la tabla presentada a continuación (tabla 52). Los datos que dieron lugar a los resultados obtenidos se encuentran consignados en el anexo 24 del presente documento.

Tabla 52. Gravedad específica Bulk			
Fuente: Propia			
Mezcla Asfáltica Convencional		Mezcla Asfáltica Modificada	
% De Asfalto	Gravedad Especifica Bulk (Gmb)	% De Asfalto	Gravedad Especifica Bulk (Gmb)
3.5	2.236	3.5	2.236
3.5	2.147	3.5	2.147
3.5	2.196	3.5	2.196
4	2.189	4	2.189
4	2.206	4	2.206
4	2.203	4	2.203
4.5	2.223	4.5	2.223
4.5	2.232	4.5	2.232
4.5	2.228	4.5	2.228
5	2.233	5	2.233
5	2.248	5	2.248
5	2.232	5	2.232
5.5	2.283	5.5	2.283
5.5	2.27	5.5	2.27
5.5	2.268	5.5	2.268
6	2.273	6	2.273
6	2.272	6	2.272
6	2.308	6	2.308
6.5	2.33	-	-
6.5	2.292	-	-
6.5	2.308	-	-

NOTA: Las casillas resaltadas en gris hacen referencia a las briquetas descartadas dentro de los cálculos correspondientes a la determinación del porcentaje óptimo de asfalto

**4.3.1.2. Gravedad específica máxima de mezclas asfálticas para pavimentos
(INV E-735-13) (INVIAS, 2013)**

Con el fin de obtener la gravedad específica máxima para cada uno de los porcentajes utilizadas en el diseño preliminar de las mezclas asfálticas, se siguieron las determinaciones dadas por medio de la Norma de Ensayo de Materiales para Carreteras INV E-735-13 (INVIAS, 2013). Los resultados de este ensayo se pueden observar en la siguiente tabla (tabla 53), y los datos tomados para la realización de los cálculos a partir de los cuales se obtuvieron estos se encuentran en el anexo 25 de este documento.

Tabla 53. Gravedad específica máxima de mezclas asfálticas			
Fuente: Propia			
Mezcla Asfáltica Convencional		Mezcla Asfáltica Modificada	
% De Asfalto	Gravedad Especifica Bulk (Gmb)	% De Asfalto	Gravedad Especifica Bulk (Gmb)
3.5	2.5117	3.5	2.3968
4	2.5319	4	2.3373
4.5	2.4677	4.5	2.3164
5	2.4655	5	2.3185
5.5	2.4685	5.5	2.3256
6	2.4045	6	2.3115
6.5	2.3545	-	-

4.3.1.3. Porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas (INV E-736-13) (INVIAS, 2013)

Con el fin de establecer el porcentaje de vacíos con aire presente en cada uno de los especímenes utilizados para la realización del diseño preliminar de las mezclas asfálticas tenidas en cuenta para el desarrollo de este proyecto, se tomaron en cuenta las pautas dadas en la Norma de Ensayo de Materiales para Carreteras INV E-736-13 (INVIAS, 2013). Los resultados obtenidos a partir del procedimiento llevado a cabo se pueden observar en la tabla mostrada a continuación (tabla 54), complementados con los datos recopilados en la ejecución de este ensayo, los cuales se encuentran consignados en el anexo 26 de este documento.

Tabla 54. Porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas			
Fuente: Propia			
Mezcla Asfáltica Convencional		Mezcla Asfáltica Modificada	
% De Asfalto	% Vacíos con aire (Va)	% De Asfalto	% Vacíos con aire (Va)
3.5	10.977	3.5	13.916
3.5	14.521	3.5	13.834
3.5	12.57	3.5	13.047
4	13.543	4	9.924
4	12.872	4	9.798
4	12.99	4	11.09
4.5	9.915	4.5	7.725
4.5	9.551	4.5	7.873
4.5	9.713	4.5	7.464
5	9.431	5	7.88
5	8.822	5	7.471
5	9.471	5	8.04
5.5	7.515	5.5	6.367
5.5	8.042	5.5	6.442
5.5	8.123	5.5	7.658
6	5.467	6	5.392
6	5.509	6	6.087
6	4.012	6	5.628
6.5	1.042	-	-
6.5	2.656	-	-
6.5	1.976	-	-

NOTA: Las casillas resaltadas en gris hacen referencia a las briquetas descartadas dentro de los cálculos correspondientes a la determinación del porcentaje óptimo de asfalto

4.3.1.4. Análisis volumétrico de mezclas asfálticas compactadas en caliente

(INV E-799-13) (INVIAS, 2013)

El procedimiento seguido para la realización del análisis volumétrico de las mezclas asfálticas tenidas en cuenta para el desarrollo del diseño por medio del método de Marshall se dio a partir de las consideraciones proporcionadas por la Norma de Ensayo de Materiales para Carreteras INV E-799-13 (INVIAS, 2013). De acuerdo a los cálculos considerados por la norma mencionada anteriormente, los resultados fueron los mostrados en las siguientes tablas (tabla 55 y 56) y los datos completos se encuentran consignados en el anexo 27 del presente documento.

Tabla 55. Análisis volumétrico de mezcla asfáltica convencional							
Fuente: Propia							
Mezcla Asfáltica Convencional							
% Asfalto	Gravedad Especifica del Agregado Gse	% Asfalto Absorbido (Pba)	Contenido de asfalto efectivo (Pbe)	Vacios entre partículas (VAM)	Vacios de aire (Va)	Vacios llenos de ligante asfáltico (VFA)	Relación Llenante/ Ligante efectivo
3.5	2.658	1.404	2.145	15.779	10.977	30.433	1.45
3.5	2.658	1.404	2.145	19.131	14.521	24.097	1.45
3.5	2.658	1.404	2.145	17.286	12.57	27.282	1.45
4	2.701	2.06	2.022	17.977	13.543	24.665	1.54
4	2.701	2.06	2.022	17.34	12.872	25.767	1.54
4	2.701	2.06	2.022	17.452	12.99	25.567	1.54
4.5	2.651	1.315	3.244	17.136	9.915	42.139	0.96
4.5	2.651	1.315	3.244	16.801	9.551	43.152	0.96
4.5	2.651	1.315	3.244	16.95	9.713	42.696	0.96
5	2.672	1.606	3.474	17.199	9.431	45.165	0.9
5	2.672	1.606	3.474	16.643	8.822	46.993	0.9
5	2.672	1.606	3.474	17.237	9.471	45.054	0.9
5.5	2.7	1.989	3.62	15.791	7.515	52.41	0.86
5.5	2.7	1.989	3.62	16.27	8.042	50.572	0.86
5.5	2.7	1.989	3.62	16.344	8.123	50.3	0.86
6	2.642	1.177	4.894	16.603	5.467	67.072	0.64
6	2.642	1.177	4.894	16.64	5.509	66.893	0.64
6	2.642	1.177	4.894	15.319	4.012	73.81	0.64
6.5	2.6	0.568	5.969	14.967	1.042	93.038	0.52
6.5	2.6	0.568	5.969	16.354	2.656	83.759	0.52
6.5	2.6	0.568	5.969	15.77	1.976	87.47	0.52

Tabla 56. Análisis volumétrico de mezcla asfáltica modificada

Fuente: Propia							
Mezcla Asfáltica Modificada							
% Asfalto	Gravedad Especifica del Agregado Gse	% Asfalto Absorbido (Pba)	Contenido de asfalto efectivo (Pbe)	Vacíos entre partículas (VAM)	Vacíos de aire (Va)	Vacíos llenos de ligante asfáltico (VFA)	Relación Llenante/Ligante efectivo
3.5	2.525	2.551	1.038	16.061	13.916	13.358	3.22
3.5	2.525	2.551	1.038	15.981	13.833	13.4354	3.22
3.5	2.525	2.551	1.038	15.214	13.047	14.245	3.22
4	2.476	1.769	2.302	14.791	9.924	32.906	1.45
4	2.476	1.769	2.302	14.672	9.798	33.219	1.45
4	2.476	1.769	2.302	15.894	11.09	30.224	1.45
4.5	2.47	1.671	2.904	13.943	7.725	44.593	1.15
4.5	2.47	1.671	2.904	14.081	7.873	44.087	1.15
4.5	2.47	1.671	2.904	13.699	7.464	45.515	1.15
5	2.492	2.028	3.073	14.462	7.88	45.512	1.09
5	2.492	2.028	3.073	14.082	7.471	46.948	1.09
5	2.492	2.028	3.073	14.61	8.04	44.968	1.09
5.5	2.521	2.489	3.148	13.246	6.367	51.934	1.06
5.5	2.521	2.489	3.148	13.316	6.442	51.622	1.06
5.5	2.521	2.489	3.148	14.443	7.658	46.976	1.06
6	2.523	2.52	3.631	13.338	5.392	59.574	0.92
6	2.523	2.52	3.631	13.975	6.087	56.44	0.92
6	2.523	2.52	3.631	13.554	5.627	58.481	0.92

NOTA: Las casillas resaltadas en gris hacen referencia a las briquetas descartadas dentro de los cálculos correspondientes a la determinación del porcentaje óptimo de asfalto

4.3.1.5. Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall (INV E-748-13) (INVIAS, 2013)

El procedimiento para obtener la estabilidad y flujo Marshall se realizó teniendo en cuenta los parámetros, recomendaciones, observaciones y demás anotaciones que conforman el contenido de la Norma de Ensayo de Materiales para Carreteras INV E-748-13 (INVIAS, 2013). Sus resultados se muestran en la tabla mostrada a continuación (tabla 57) y en el anexo 28.

Tabla 57. Porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas							
Fuente: Propia							
Mezcla Asfáltica Convencional				Mezcla Asfáltica Modificada			
% Asfalto	Estabilidad corregida [KN]	Flujo [mm]	Relación Estabilidad / Flujo	% Asfalto	Estabilidad corregida [KN]	Flujo [mm]	Relación Estabilidad / Flujo
3.5	12.306	3.562	3.45	3.5	6.955	2.561	2.716
3.5	11.543	3.066	3.76	3.5	5.215	2.945	1.771
3.5	13.58	3.337	4.07	3.5	10.575	3.724	2.84
4	13.118	2.525	5.2	4	11.9	3.383	3.518
4	12.236	2.998	4.08	4	11.105	3.447	3.222
4	12.166	3.335	3.65	4	11.31	3.33	3.396
4.5	15.498	3.105	4.99	4.5	13.58	3.864	3.514
4.5	16.681	3.296	5.06	4.5	12.06	3.917	3.079
4.5	16.058	4.004	4.01	4.5	12.805	2.935	4.363
5	16.555	3.389	4.88	5	13.75	3.656	3.761
5	16.856	3.263	5.17	5	13.27	3.696	3.59
5	17.15	3.323	5.16	5	13.6105	2.92	4.661
5.5	17.15	3.47	4.94	5.5	14.215	3.399	4.182
5.5	18.886	3.666	5.15	5.5	14.38	3.616	3.977
5.5	18.599	3.336	5.58	5.5	13.855	3.028	4.576
6	19.18	3.138	6.11	6	16.25	3.839	4.233
6	17.507	3.804	4.6	6	14.295	3.08	4.641
6	18.739	3.804	4.93	6	15.4	2.997	5.138
6.5	13.559	3.517	3.86	-	-	-	-
6.5	11.662	4.438	2.63	-	-	-	-
6.5	11.858	3.371	3.52	-	-	-	-

NOTA: Las casillas resaltadas en gris hacen referencia a las briquetas descartadas dentro de los cálculos correspondientes a la determinación del porcentaje óptimo de asfalto

4.3.2. Verificación y Evaluación del Diseño Marshall

Después de haber logrado llegar a tener las condiciones adecuadas de las mezclas asfálticas para que estas pudieran cumplir con los parámetros establecidos para el diseño preliminar del diseño del método Marshall, se procedió a la verificación y evaluación del diseño. Esto anterior se da cumpliendo con lo que se propone en las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras en su capítulo 4, artículo 450: “Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua” (INVIAS, 2013), en la tabla 450-11, la cual se encuentra consignada en este documento en el numeral 3.3.3 (tabla 30). En esta tabla se enuncian los requerimientos en lo que respecta a la verificación y evaluación del diseño, con el fin de establecer su aceptación. A continuación se mostrarán los resultados obtenidos para los ensayos de verificación llevados a cabo.

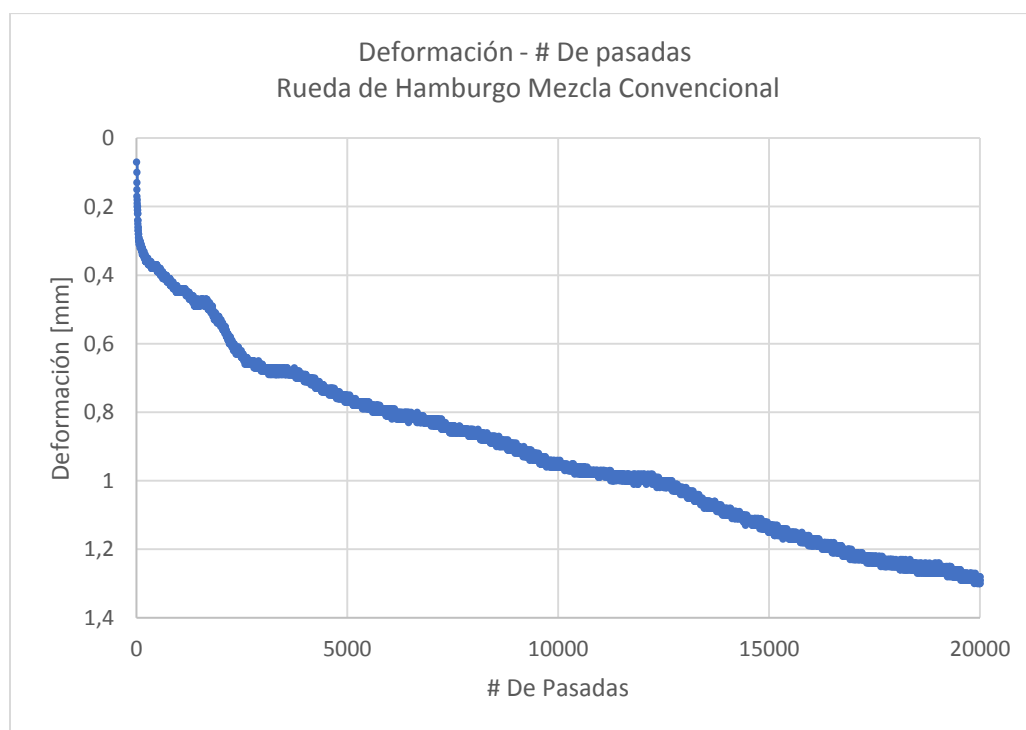
4.3.2.1. Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta (INV E-725-13) (INVIAS, 2013)

Para efectos de evaluar la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas tenidas en cuenta para este proyecto al aplicarles una carga de tracción indirecta, se tuvo en cuenta el procedimiento descrito en la Norma de Ensayo de Materiales para Carreteras INV E-725-13 (INVIAS, 2013). Los resultados obtenidos se pueden ver en la tabla mostrada a continuación (tabla 58), la cual se complementa con el contenido del anexo 29 del presente documento, en donde se encuentra la información completa de este ensayo.

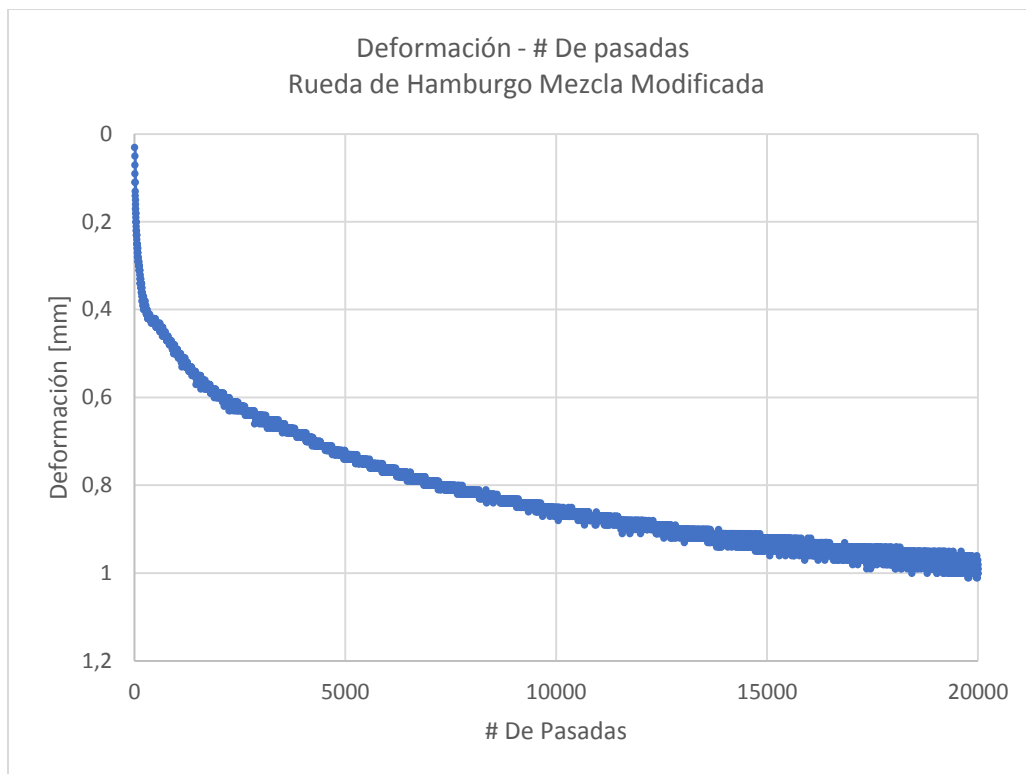
Tabla 58. Susceptibilidad al agua utilizando la prueba de tracción indirecta			
Fuente: Propia			
Mezcla Asfáltica Convencional		Mezcla Asfáltica Modificada	
Resistencia promedio grupo húmedo [kPa]	Resistencia promedio grupo seco [kPa]	Resistencia promedio grupo húmedo [kPa]	Resistencia promedio grupo seco [kPa]
1081.092	1338.851	903.745	1117.191
Relación Resistencias a Tensión		Relación Resistencias a Tensión	
80.75 %		80.89 %	

4.3.2.2. Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA) (AASHTO T324-04) (AASHTO, 2004)

Con el fin de determinar la resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas, se realizó un ensayo propuesto por la AASHTO (AASHTO, 2004), como se menciona en el numeral 3.3.3.2 del presente documento. Los resultados de este ensayo se muestran en las siguientes gráficas (gráfica 8 y 9), acompañados de la tabla que también se puede ver a continuación (tabla 59).



Gráfica 8. Rueda de Hamburgo Mezcla Asfáltica Convencional

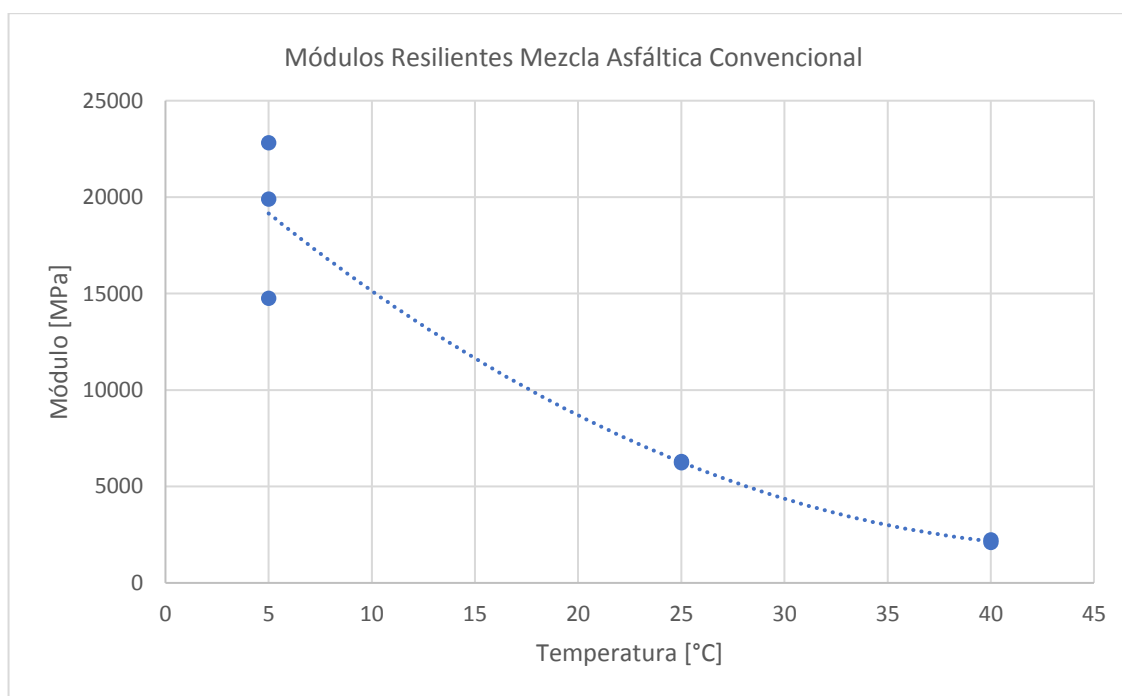


Gráfica 9. Rueda de Hamburgo Mezcla Asfáltica Modificada

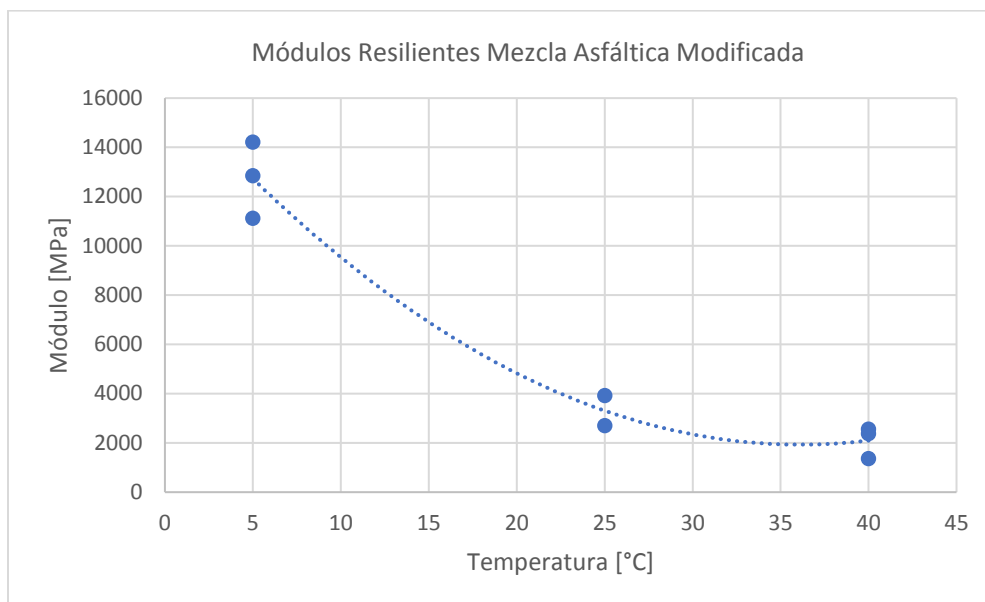
Tabla 59. Datos Rueda de Hamburgo			
Fuente: Propia			
Mezcla Asfáltica Convencional		Mezcla Asfáltica Modificada	
# De pasadas totales	20.000	# De pasadas totales	20.000
Temperatura de Ensayo [°C]	40	Temperatura de Ensayo [°C]	40
Deformación Máxima [mm]	1.29	Deformación Máxima [mm]	1

4.3.2.3. Norma española. Mezclas bituminosas. Método de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 26: Rigidez (UNE-EN 12697-26). Anexo C. (AENOR, 2006)

En lo que respecta a la determinación de los módulos de la mezcla asfáltica, correspondiente al ensayo dinámico, se implementó lo consignado en la normativa española por medio de la Asociación Española de Normalización y Certificación, quienes en el apartado 26: Rigidez - Anexo C dan las pautas para la realización del ensayo correspondiente a la determinación de los módulos resilientes por medio de la aplicación de una carga de tracción indirecta. A continuación se presentan la tabla (tabla 60) y las gráficas (gráfica 10 y 11) con los resultados de este ensayo, la información completa de la toma de datos del ensayo se puede observar en el anexo 30 del presente documento.



Gráfica 10. Módulos resilientes mezcla asfáltica convencional



Gráfica 11. Módulos resilientes mezcla asfáltica modificada

Tabla 60. Resultados ensayo módulos resilientes			
Fuente: Propia			
Mezcla Asfáltica Convencional		Mezcla Asfáltica Modificada	
Temperatura [°C]	Módulo [MPa]	Temperatura [°C]	Módulo [MPa]
5	14754	5	12848.5
5	22813.5	5	11125
5	19896	5	14215
25	-	25	-
25	6225.5	25	3921.5
25	6303.5	25	2698.5
40	-	40	2555.5
40	2228.5	40	2375.5
40	2097	40	1357.5

NOTA: Las tres casillas señaladas con un guion (-) hacen referencia a descartes hechos por condiciones dadas dentro de la realización del ensayo.

Muestras convencionales
 25°C - 1: La briqueeta tuvo un resultado muy diferente al de las otras dos otras muestras de ensayo.
 40°C - 1: En el momento del ensayo la briqueeta se rompió

Muestra modificada
 25°C - 1: La briqueeta tuvo un resultado muy diferente al de las otras dos otras muestras de ensayo.

5. Análisis de Resultados

5.1. Caracterización del Agregado Natural y Agregado Cerámico

En lo que respecta a la caracterización de los agregados a utilizar en las mezclas asfálticas tenidas en cuenta en este proyecto, estos deben cumplir con la características mínimas contempladas por la normativa vigente. Esto anterior se menciona dentro del numeral 3.1 del presente documento, en el cual se muestra la tabla dada por las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras en su capítulo 4, artículo 450: “Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua” (INVIAS, 2013) (tabla 11). A continuación, se muestra la tabla (tabla 61) con la comparación entre los requisitos mínimos en cuanto a la calidad de los materiales, y los resultados obtenidos para estos enunciados dentro del numeral 4.1.

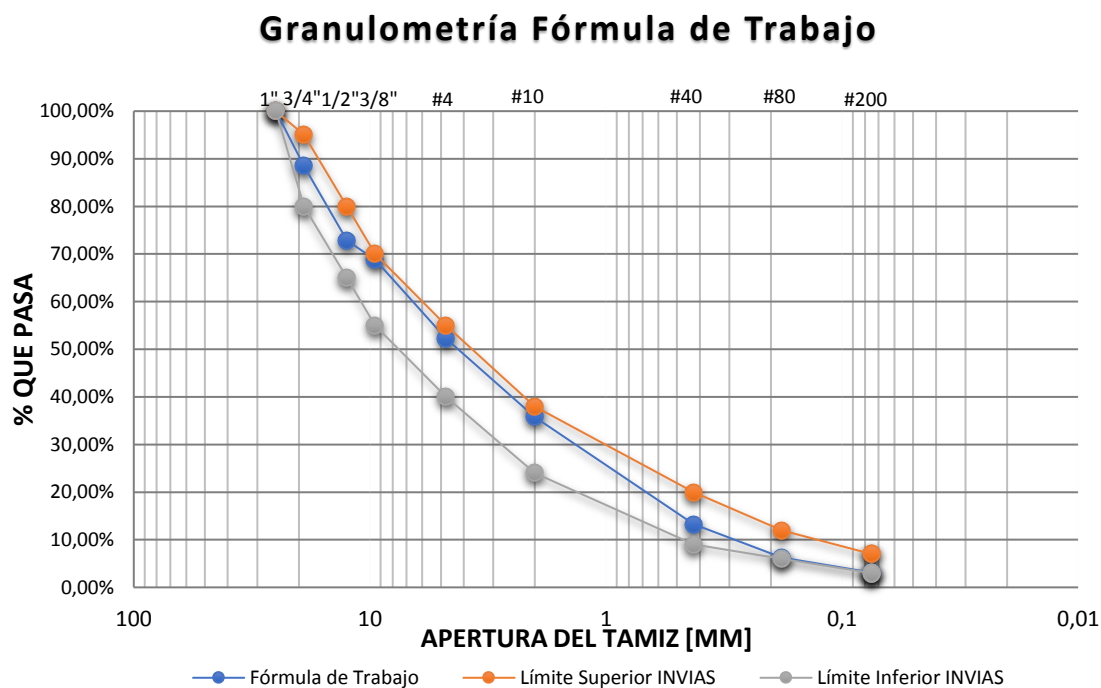
Tabla 61. Análisis resultados caracterización agregados			
Fuente: Propia			
Ensayo (Unidad)	Límite propuesto por la norma (Capa intermedia NT2)	Agregado Natural	Agregado Cerámico
Resistencia a la degradación en la máquina de Los Ángeles (%Pérdidas)	Máximo 35%	25,38%	27%
Resistencia a la degradación en el aparato Micro-Deval (%Perdidas)	Máximo 30%	6,91%	8%
Determinación del valor del 10% de finos (NT3 intermedia)	Valor en seco mínimo (KN) 90	210 KN	280 KN
Para NT2 no hay requisitos para el 10% de finos	Relación Húmedo/Seco mínima (%) 75	67%	93%
Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio (%Perdidas)	Máximo 18%	5,41%	10,54%
Limpieza superficial en el agregado (coeficiente de limpieza superficial)	Máximo 0.5%	0,41	0,2
Límite líquido de los suelos	No debe presentar	No hay límite	No hay límite

Ensayo (Unidad)	Límite propuesto por la norma (Capa intermedia NT2)	Agregado Natural	Agregado Cerámico
Equivalente de arena (Equivalente de Arena)	Mínimo 50%	66	86
Proporción de partículas planas y alargadas relación 1:5 (%)	Máximo 10%	1.25%	0.5%
Caras fracturadas (%)	Mínimo 75%	94,67%	100%
Angularidad de finos (Porcentaje de vacíos sin compactar)	Mínimo 40%	42,92%	36,62

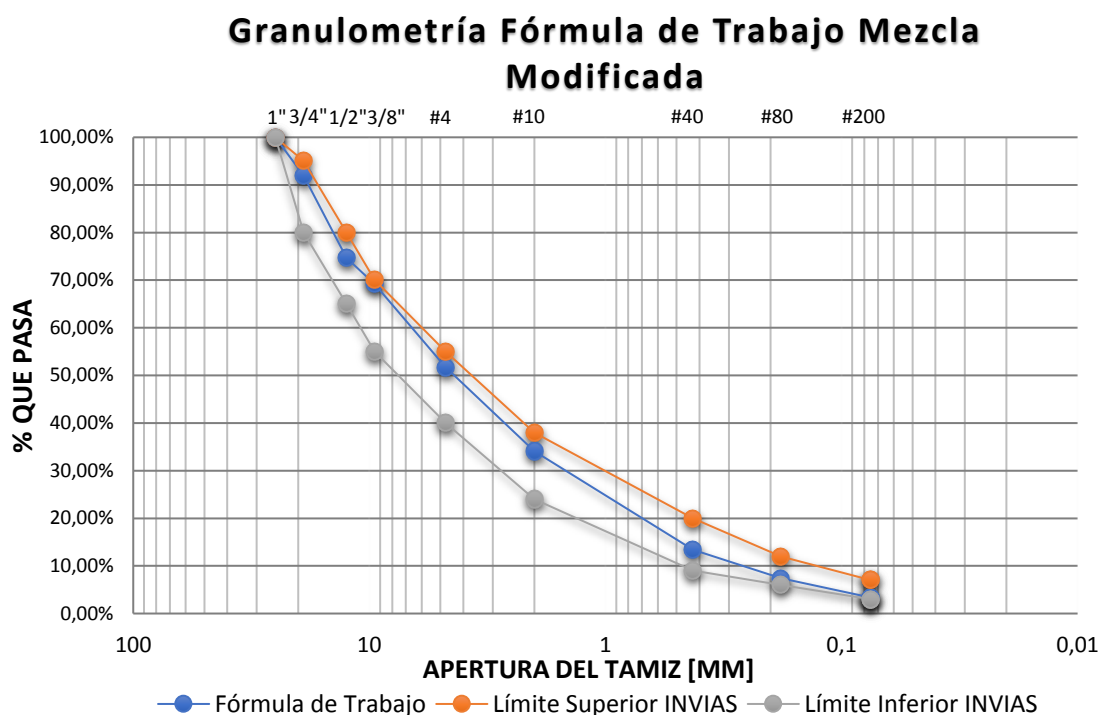
De acuerdo a lo anteriormente mencionado, los agregados tienen unas buenas características que les permiten ser utilizados para la producción de mezclas asfálticas. En primer lugar, el agregado de origen natural cumple con todos los criterios de la tabla anterior (tabla 61), a excepción del 10% de finos, el cual tiene los límites especificados para un nivel de tránsito NT3, al no tener ningún tipo de restricción para el nivel de tránsito NT2 (utilizado dentro de este proyecto). Por otra parte, el material cerámico cumple con los requisitos dados anteriormente, menos el que corresponde a la angularidad de finos, en donde por un margen mínimo (3,38% aproximadamente) queda ligeramente por fuera del rango requerido.

En lo que respecta a las granulometrías de las fórmulas de trabajo utilizadas, se compararon con los límites establecidos por la Especificación General de Construcción de Carreteras en su capítulo 4, artículo 450: “Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua” (INVIAS, 2013), consignados en la tabla 27 del numeral 3.3.1 del presente documento. Su comparación se puede ver en las gráficas 12 y 13 y la tabla 62 mostradas a continuación.

Tabla 62. Granulometría de los agregados				
Fuente: Propia				
Tamiz (Apertura en [mm])	Límites Norma		% Pasa Fórmula de Trabajo Agregado Natural	% Pasa Fórmula de Trabajo Agregado Cerámico
	Límite inferior	Límite Superior		
1" (25)	100%	100%	100.00%	100.00%
3/4" (19)	80%	95%	88.46%	91.92%
1/2" (12.5)	65%	80%	72.85%	74.69%
3/8" (9.5)	55%	70%	68.82%	69.17%
No.4 (4.75)	40%	55%	52.24%	51.67%
No.10 (2)	24%	38%	35.73%	34.05%
No.40 (0.425)	9%	20%	13.26%	13.39%
No.80 (0.18)	6%	12%	6.29%	7.37%
No.200 (0.075)	3%	7%	3.12%	3.34%
Fondo (0)	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%



Gráfica 12. Granulometría fórmula de trabajo mezcla asfáltica convencional con límites de la norma INVIAS



Gráfica 13. Granulometría fórmula de trabajo mezcla asfáltica modificada con límites de la norma INVIAS

De acuerdo a la tabla (tabla 62) y las gráficas (gráfica 12 y 13) mostradas anteriormente, tanto la fórmula de trabajo de la mezcla asfáltica convencional, como la mezcla asfáltica modificada, se encuentran dentro de los límites establecidos por la Especificación General de Construcción de Carreteras en su capítulo 4, artículo 450: “Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua” (INVIAS, 2013) para el tipo de mezcla utilizado dentro del proyecto (MSC-25).

5.2. Caracterización del Asfalto

La caracterización del asfalto se realizó partiendo de las condiciones mínimas de calidad requeridas por la Especificación General de Construcción de Carreteras en su capítulo 4, artículo 410: “Suministro de cemento asfáltico”, dentro de la tabla 410-1, que se puede encontrar dentro del numeral 3.2 en la tabla 24. En la siguiente tabla (tabla 63), se muestran los requerimientos mínimos de calidad mencionados en la tabla nombrada anteriormente (tabla 24), junto a los resultados de la caracterización del asfalto consignados dentro del numeral 4.2.

Tabla 63. Análisis resultados caracterización asfalto		
Fuente: Propia		
Ensayo (Unidad)	Límite propuesto por la norma (Asfalto 60-70)	Resultados caracterización
Penetración (mm)	Entre 60 y 70	63.5
Punto de ablandamiento (°C)	Entre 48 y 54	60
Índice de penetración	Entre -1.2 y 0.6	1.66
Viscosidad Absoluta a 60°C [P]	Mínimo 1500	4334.8
Ductilidad [cm]	Mínimo 100	128
Punto de inflamación [°C]	Mínimo 230	280

De acuerdo a lo observado en la tabla anterior (tabla 63), el asfalto presenta unas buenas condiciones para su utilización dentro de las mezclas asfálticas en todos los criterios tenidos en cuenta por la normativa mencionada anteriormente. Esto anterior con excepción del punto de ablandamiento, el cual se encuentra en una temperatura ligeramente alta en comparación con el criterio manejado por la norma y a partir del cual se realiza el cálculo del índice de penetración, que de forma consecuente sale del rango propuesto por la normativa.

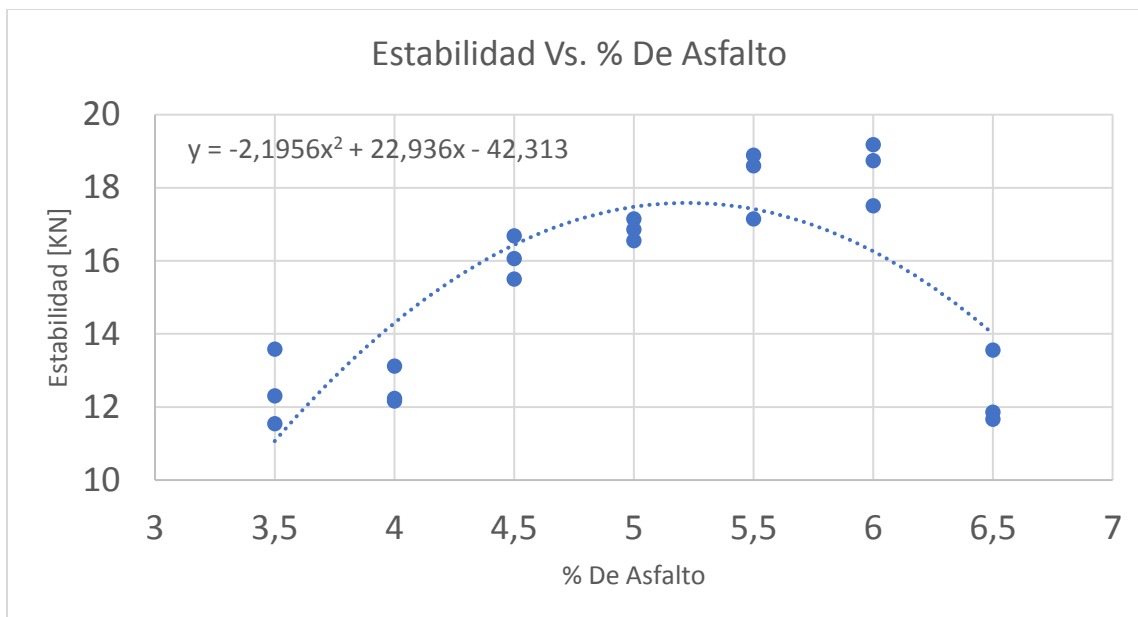
5.3. Diseño de la Mezcla Asfáltica

5.3.1. Contenido óptimo de asfalto (Diseño preliminar de la mezcla asfáltica por el método Marshall)

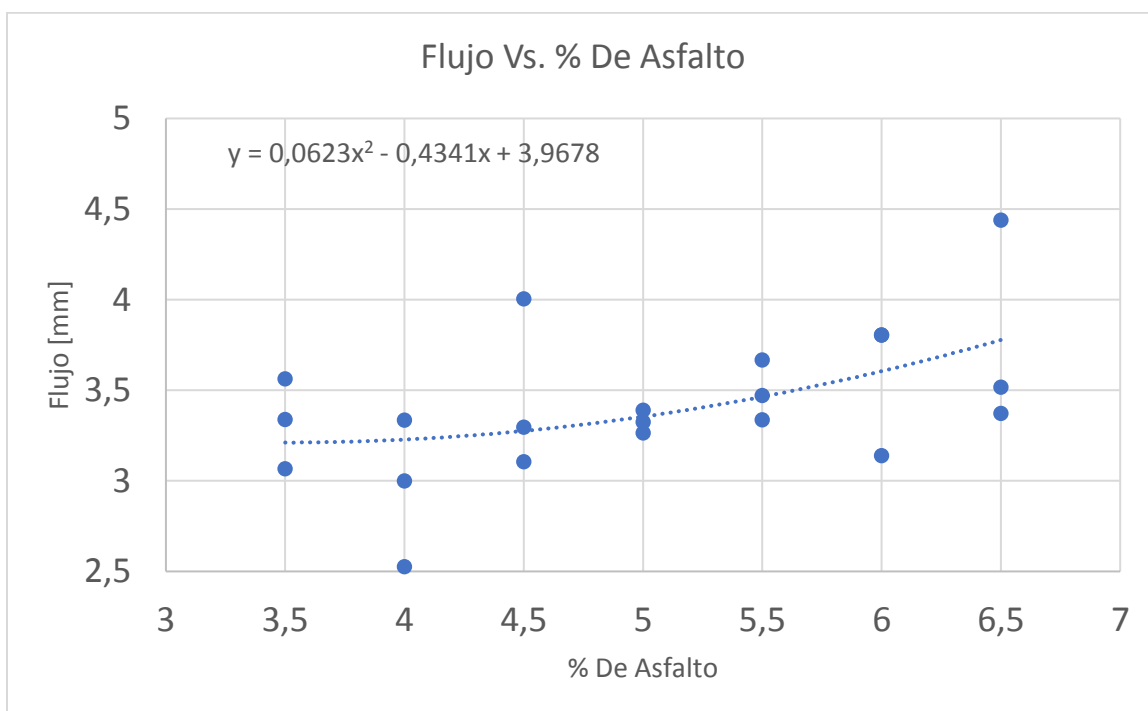
A partir de los resultados obtenidos para los diseños Marshall realizados para cada una de las mezclas asfálticas (mezcla asfáltica convencional y modificada), los cuales se pueden observar en los numerales contenidos dentro del numeral 4.3.1 se escogió el porcentaje óptimo de asfalto para cada una de las mezclas de la siguiente forma:

5.3.1.1. Contenido óptimo de asfalto mezcla asfáltica convencional

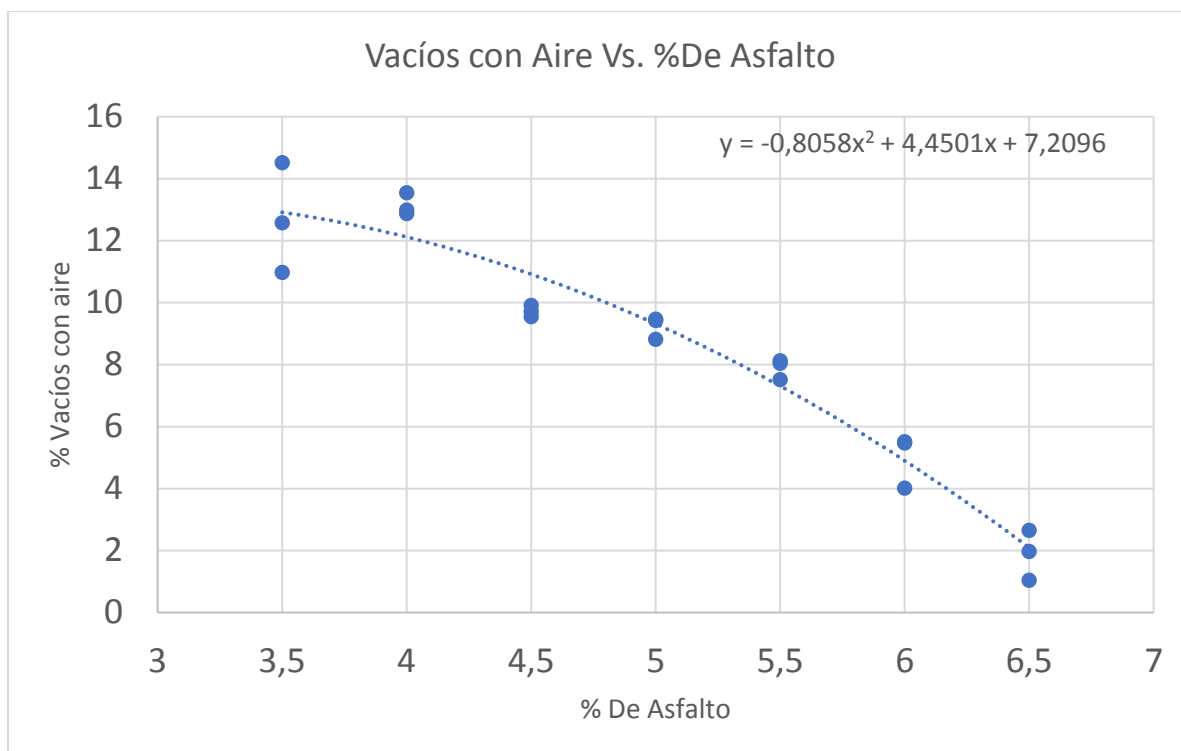
Con el fin de establecer el contenido óptimo de asfalto de la mezcla asfáltica convencional se analizaron los resultados de estabilidad, flujo y porcentaje de vacíos mostrados en las siguientes graficas (gráficas 14, 15 y 16 de forma correspondiente). A partir de la tendencia obtenida de las gráficas mencionadas anteriormente, se realizó el cálculo de la proyección de comportamiento de la mezcla asfáltica. Esto permitió realizar la escogencia del porcentaje óptimo para el diseño preliminar del método de Marshall, como se puede observar en la tabla mostrada a continuación (tabla 64).



Gráfica 14. Gráfica Estabilidad-Porcentaje de asfalto mezcla asfáltica convencional



Gráfica 15. Gráfica Flujo-Porcentaje de asfalto mezcla asfáltica convencional



Gráfica 16. Gráfica Vacíos con aire- Porcentaje de asfalto mezcla asfáltica convencional

Tabla 64. Contenido óptimo de asfalto mezcla asfáltica convencional					
Fuente: Propia					
Estabilidad		Flujo		Vacíos con aire	
Ecuación		Ecuación		Ecuación	
$y = -2.1956x^2 + 22.936x - 42.313$		$y = 0.0623x^2 - 0.4341x + 3.9678$		$y = -0.8058x^2 + 4.4501x + 7.2096$	
% Asfalto	Estabilidad [KN]	% Asfalto	Flujo [mm]	% Asfalto	Vacíos con aire [%]
3.5	11.067	3.5	3.212	3.5	12.914
3.6	11.802	3.6	3.212	3.6	12.787
3.7	12.492	3.7	3.215	3.7	12.644
3.8	13.139	3.8	3.218	3.8	12.484
3.9	13.742	3.9	3.222	3.9	12.309
4	14.301	4	3.228	4	12.117
4.1	14.817	4.1	3.235	4.1	11.91
4.2	15.288	4.2	3.244	4.2	11.686
4.3	15.715	4.3	3.253	4.3	11.446
4.4	16.099	4.4	3.264	4.4	11.19
4.5	16.438	4.5	3.276	4.5	10.918
4.6	16.734	4.6	3.289	4.6	10.629
4.7	16.985	4.7	3.304	4.7	10.325
4.8	17.193	4.8	3.32	4.8	10.004
4.9	17.357	4.9	3.337	4.9	9.668
5	17.477	5	3.355	5	9.315

Estabilidad		Flujo		Vacíos con aire	
Ecuación $y = -2.1956x^2 + 22.936x - 42.313$		Ecuación $y = 0.0623x^2 - 0.4341x + 3.9678$		Ecuación $y = -0.8058x^2 + 4.4501x + 7.2096$	
% Asfalto	Estabilidad [KN]	% Asfalto	Flujo [mm]	% Asfalto	Vacíos con aire [%]
5.1	17.553	5.1	3.374	5.1	8.946
5.2	17.585	5.2	3.395	5.2	8.561
5.3	17.573	5.3	3.417	5.3	8.16
5.4	17.518	5.4	3.44	5.4	7.743
5.5	17.418	5.5	3.465	5.5	7.31
5.6	17.275	5.6	3.491	5.6	6.86
5.7	17.087	5.7	3.518	5.7	6.395
5.8	16.856	5.8	3.546	5.8	5.913
5.9	16.581	5.9	3.575	5.9	5.415
6	16.261	6	3.606	6	4.901
6.1	15.898	6.1	3.638	6.1	4.371
6.2	15.491	6.2	3.671	6.2	3.825
6.3	15.04	6.3	3.706	6.3	3.263
6.4	14.546	6.4	3.741	6.4	2.685
6.5	14.007	6.5	3.778	6.5	2.09
Contenido óptimo de asfalto				5.6 %	
NOTA 1: Las casillas seleccionadas en amarillo hacen referencia a los porcentajes óptimos de asfalto de cada uno de los aspectos evaluados para su elección (estabilidad, flujo y vacíos con aire)					
NOTA 2: La franja seleccionada en color rojo señala el porcentaje óptimo de asfalto escogido para la mezcla asfáltica					

En la tabla mostrada de forma inmediatamente anterior (tabla 64), se puede observar la forma en la cual se realizó la determinación del porcentaje óptimo de asfalto para la mezcla asfáltica convencional. La escogencia de este se dio dejándolo dentro de un intervalo que permitiera maximizar y/o cumplir con las condiciones de estabilidad, flujo y porcentaje de vacíos con aire, buscando obtener el mejor comportamiento posible para la mezcla asfáltica convencional contemplada dentro de este proyecto, para lo cual se tomó el 5,6% de asfalto.

En la siguiente tabla (tabla 65), se puede observar una comparación entre las características aproximadas del porcentaje óptimo, y los requerimientos mínimos dados por la Especificación General de Construcción de Carreteras en su capítulo 4, artículo 450: “Mezclas

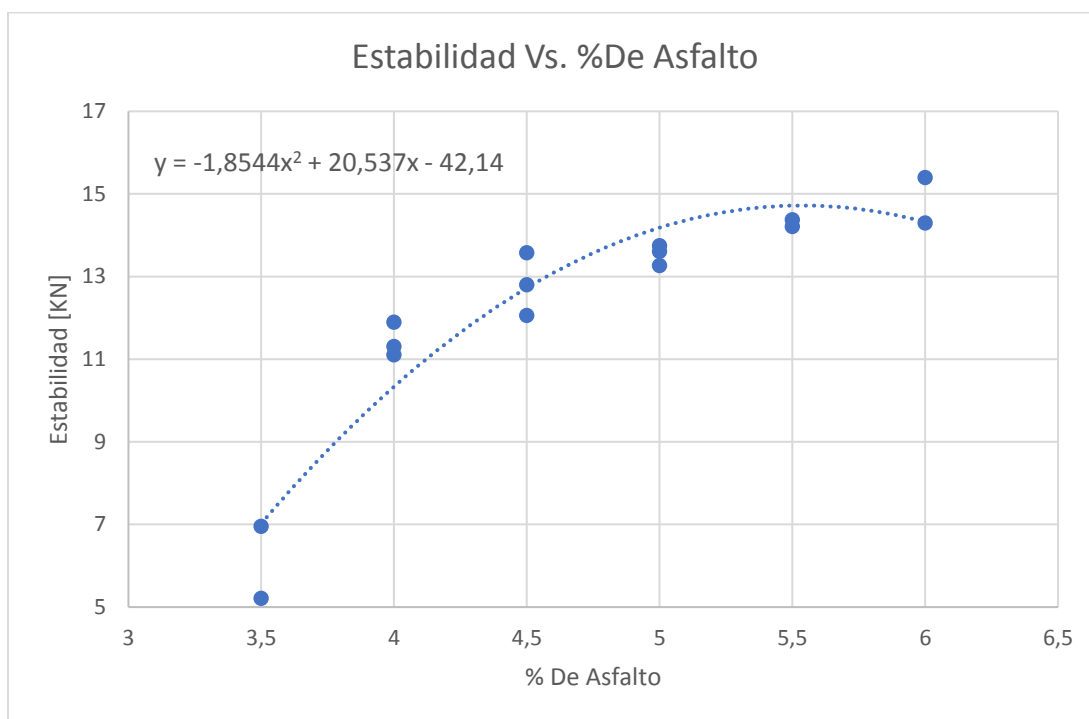
asfálticas en caliente de gradación continua” (INVIAS, 2013), en su tabla 450-10. Esta tabla (tabla 28) se puede encontrar en el numeral 3.3.2 del presente documento.

Tabla 65. Análisis resultados diseño Marshall preliminar mezcla asfáltica convencional			
Fuente: Propia			
Característica (Unidad)	Límite propuesto por la norma (NT2 capa intermedia)	Resultados diseño Marshall	
		% Asfalto	
		5.5 %	6 %
Compactación (golpes/cara)	75	75	
Estabilidad mínima (N)	7500	17418	16261
Flujo (mm)	2 a 4	3.465	3.606
Relación estabilidad / flujo	3 a 5	5.026	4.509
Vacíos con aire (%)	4 a 7	7.31	4.901
Vacíos en los agregados minerales (%) (T.Max 19 [mm])	Mínimo 15%	16.135	16.187
Vacíos llenos de asfalto (%)	65 a 78	51.094	69.258
Relación llenante / ligante efectivo en peso	0.8 a 1.2	0.86	0.64

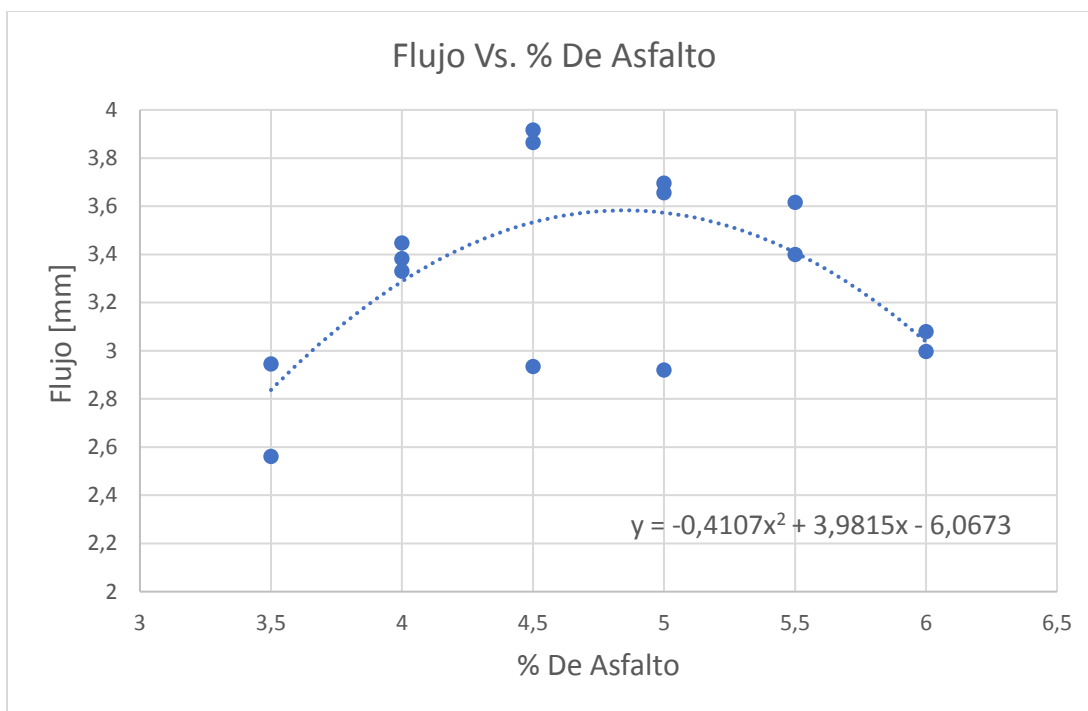
De acuerdo a la información consignada en la tabla inmediatamente anterior (tabla 65), el porcentaje óptimo escogido para la realización de la mezcla asfáltica convencional se encuentra dentro de los rangos establecidos por la Especificación General de Construcción de Carreteras en su capítulo 4, artículo 450: “Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua” (INVIAS, 2013). En los vacíos llenos de asfalto el 5,5% de asfalto no se encuentra dentro del límite, sin embargo, la tendencia entre los dos rangos de la tabla lo lleva hacia los límites de la norma, lo cual dejaría la mezcla con el contenido óptimo de asfalto dentro del rango o en un valor muy cercano a este. Por lo tanto, en lo que concierne al diseño preliminar por el método de Marshall, el porcentaje seleccionado como óptimo para esta mezcla asfáltica cumple con las condiciones requeridas por la norma para su aceptación.

5.3.1.2. Contenido óptimo de asfalto mezcla asfáltica modificada

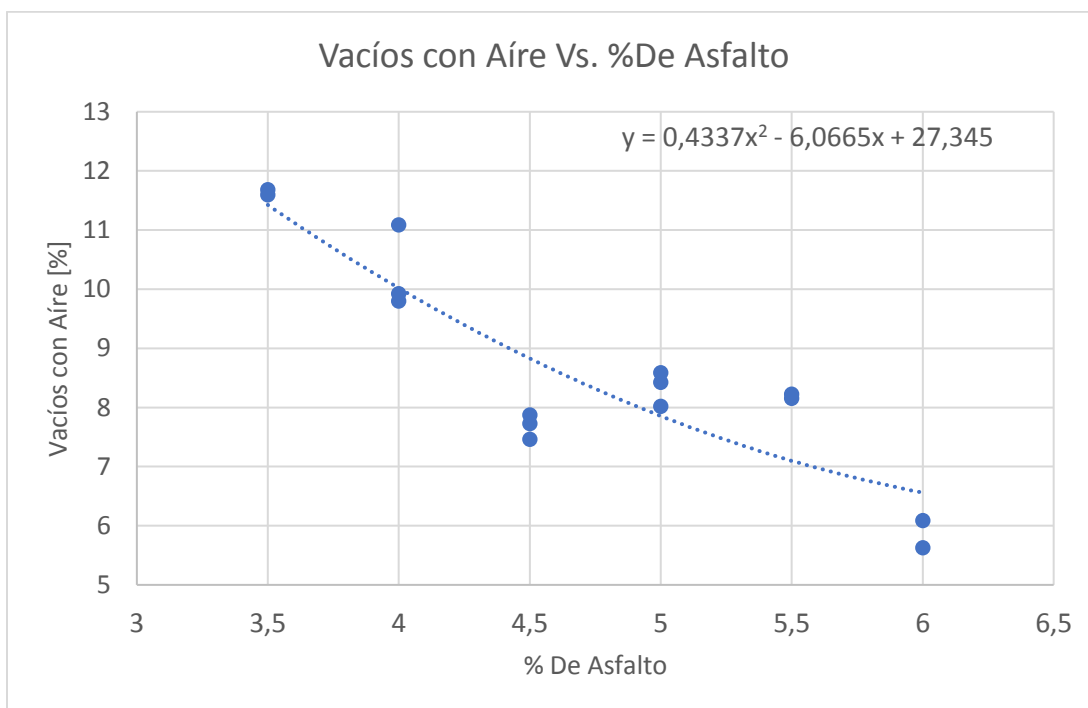
De la misma forma en la que se realizó la determinación del porcentaje óptimo de la mezcla asfáltica convencional, se obtuvo el de la mezcla asfáltica modificada. Esto se llevó a cabo evaluando el comportamiento de la mezcla en lo que respecta a la estabilidad, el flujo y el porcentaje de vacíos, lo cual puede observarse en las gráficas (gráficas 17, 18 y 19) y la tabla (tabla 66) presentadas a continuación. Con las tendencias de comportamiento de la mezcla asfáltica en las gráficas mencionadas anteriormente, se realizó la estimación que se encuentra consignada en la tabla (tabla 66), a partir de la cual se escogió el porcentaje óptimo a utilizar.



Gráfica 17. Gráfica Estabilidad-Porcentaje de asfalto mezcla asfáltica modificada



Gráfica 18. Gráfica Flujo-Porcentaje de asfalto mezcla asfáltica modificada



Gráfica 19. Gráfica Vacíos con aire-Porcentaje de asfalto mezcla asfáltica modificada

Tabla 66. Contenido óptimo de asfalto mezcla asfáltica modificada					
Fuente: Propia					
Estabilidad		Flujo		Vacíos con aire	
Ecuación		Ecuación		Ecuación	
$y = -2.1956x^2 + 22.936x - 42.313$		$y = 0.0623x^2 - 0.4341x + 3.9678$		$y = -0.8058x^2 + 4.4501x + 7.2096$	
% Asfalto	Estabilidad [KN]	% Asfalto	Flujo [mm]	% Asfalto	Vacíos con aire [%]
3.5	7.023	3.5	2.837	3.5	11.425
3.6	7.76	3.6	2.943	3.6	11.126
3.7	8.46	3.7	3.042	3.7	10.836
3.8	9.123	3.8	3.132	3.8	10.555
3.9	9.749	3.9	3.214	3.9	10.282
4	10.338	4	3.288	4	10.018
4.1	10.889	4.1	3.353	4.1	9.763
4.2	11.404	4.2	3.41	4.2	9.516
4.3	11.881	4.3	3.459	4.3	9.278
4.4	12.322	4.4	3.5	4.4	9.049
4.5	12.725	4.5	3.533	4.5	8.828
4.6	13.091	4.6	3.557	4.6	8.616
4.7	13.42	4.7	3.573	4.7	8.413
4.8	13.712	4.8	3.581	4.8	8.218
4.9	13.967	4.9	3.581	4.9	8.032
5	14.185	5	3.573	5	7.855
5.1	14.366	5.1	3.556	5.1	7.686
5.2	14.509	5.2	3.531	5.2	7.526
5.3	14.616	5.3	3.498	5.3	7.375
5.4	14.685	5.4	3.457	5.4	7.233
5.5	14.718	5.5	3.407	5.5	7.099
5.6	14.713	5.6	3.35	5.6	6.973
5.7	14.671	5.7	3.284	5.7	6.857
5.8	14.593	5.8	3.209	5.8	6.749
5.9	14.477	5.9	3.127	5.9	6.65
6	14.324	6	3.037	6	6.559
Contenido óptimo de asfalto				5.8 %	
NOTA 1: Las casillas seleccionadas en amarillo hacen referencia a los porcentajes óptimos de asfalto de cada uno de los aspectos evaluados para su elección (estabilidad, flujo y vacíos con aire)					
NOTA 2: La franja seleccionada en color rojo señala el porcentaje óptimo de asfalto escogido para la mezcla asfáltica					

En la tabla mostrada de forma inmediatamente anterior (tabla 66) se puede observar lo relacionado con las consideraciones que se tomaron en cuenta para la elección del contenido óptimo de asfalto de la mezcla asfáltica modificada. Este porcentaje se obtuvo a partir de la escogencia individual de los intervalos que permitieran que el óptimo se estableciera dentro de

un punto que permitiera garantizar las mejores características de la mezcla. Para este caso, se escogió el 5,8% como el óptimo.

A partir de la escogencia del contenido óptimo de asfalto para la mezcla asfáltica modificada, se realizó su evaluación con respecto a las características mínimas de calidad dadas por la Especificación General de Construcción de Carreteras en su capítulo 4, artículo 450: “Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua” (INVIAS, 2013) en su tabla 450-10. El contenido de esta tabla se encuentra en el numeral 3.3.2 del presente documento, en la tabla 24. A continuación se muestra la comparación entre las calidades requeridas y los rangos del método de Marshall dentro de los cuales se encuentra el porcentaje óptimo de asfalto.

Tabla 67. Análisis resultados diseño Marshall preliminar mezcla asfáltica modificada			
Fuente: Propia			
Característica (Unidad)	Límite propuesto por la norma (NT2 capa intermedia)	Resultados diseño Marshall	
		% Asfalto	
		5.5 %	6 %
Compactación (golpes/cara)	75	75	
Estabilidad mínima (N)	7500	14718	14324
Flujo (mm)	2 a 4	3.407	3.037
Relación estabilidad / flujo	3 a 5	4.32	4,72
Vacíos con aire (%)	4 a 7	7,099	6,559
Vacíos en los agregados minerales (%) (T.Max 19 [mm])	Mínimo 15%	13,281	13,765
Vacíos llenos de asfalto (%)	65 a 78	51.778	57.461
Relación llenante / ligante efectivo en peso	0.8 a 1.2	1,06	0,92

De acuerdo a la tabla mostrada anteriormente (tabla 67), la mezcla asfáltica modificada con cerámica al 30% cumple en su mayoría con los criterios establecidos para las mezclas asfálticas convencionales de la Especificación General de Construcción de Carreteras en su capítulo 4, artículo 450: “Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua” (INVIAS, 2013). Los vacíos llenos de asfalto están ligeramente bajos en relación con los requerimientos de la norma, lo cual puede darse a partir de la alta absorción del material de origen cerámico, tal y

como se puede observar en las tablas de resultados de las densidades de los agregados (tablas 43 y 44), en los numerales 4.1.12 y 4.1.13 de este documento. De igual manera, el porcentaje de vacíos en los agregados minerales se encuentra un poco por debajo del rango, lo cual se traduce en una mezcla asfáltica más densa en relación con la mezcla asfáltica convencional mencionada en el numeral inmediatamente anterior (5.3.1.2). Cabe resaltar, que los aspectos más relevantes a tener en cuenta dentro del diseño preliminar, tales como son la estabilidad, el flujo y el porcentaje de vacíos cumplen adecuadamente con los requerimientos de la norma, siendo un indicador de la aceptable calidad de la mezcla asfáltica

Es importante tener en cuenta que los criterios establecidos por la Especificación General de Construcción de Carreteras en su capítulo 4, artículo 450: “Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua” (INVIAS, 2013), en su tabla 450-10 (tabla 28 del presente documento) se dan para mezclas asfálticas convencionales. De acuerdo a lo anteriormente mencionado, la cerámica como modificante de las mezclas asfálticas no tiene criterios diferenciados establecidos para las calidades requeridas en el diseño Marshall dentro de las normas del INVIAS, lo cual sería importante teniendo en cuenta la diferencia entre las características del agregado natural y el agregado cerámico, como se puede observar en la caracterización de estos (numeral 4.1 del presente agregado). Sin embargo, como se puede observar en la tabla anterior (tabla 67), la mezcla asfáltica modificada con el 30% de cerámica tiene unas condiciones que le permiten entrar en los rangos de la norma, o en su defecto, estar muy cerca a cumplirlos.

5.3.2. Verificación y Evaluación del Diseño Marshall

A partir de la determinación del contenido óptimo de asfalto de cada una de las mezclas asfálticas tenidas en cuenta dentro del desarrollo de este proyecto de grado (mezcla asfáltica convencional y mezcla asfáltica modificada), se realizó la verificación y evaluación del diseño Marshall partiendo de los criterios establecidos por la Especificación General de Construcción de Carreteras en su capítulo 4, artículo 450: “Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua” (INVIAS, 2013) en su tabla 450-11. Estos se encuentran en la tabla (tabla 30) mostrada en el numeral 3.3.3 y su utilización permite tener una estimación de lo que será su comportamiento en servicio y en general la calidad de la mezcla asfáltica diseñada por medio del método de Marshall.

5.3.2.1. Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta (INV E-725-13) (INVIAS, 2013)

En lo que respecta a la evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico, este ensayo puede llegar a generar el rechazo de un diseño de mezcla asfáltica en caso de que sus resultados no sean satisfactorios. Esto anterior, se da a partir de lo consignado en la normativa mencionada anteriormente en el numeral 5.3.2, la cual contiene el rango mínimo requerido para este ensayo. En la siguiente tabla (tabla 68) se puede observar la comparación de los requisitos de la normativa mencionada anteriormente con los resultados correspondientes a los ensayos de evaluación de susceptibilidad al agua para las mezclas asfálticas tenidas en cuenta dentro de este proyecto de grado.

Tabla 68. Análisis resultados evaluación de la susceptibilidad al agua			
Fuente: Propia			
Propiedad	Límite dado por la especificación 450	Mezcla asfáltica convencional	Mezcla asfáltica modificada
Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta (Relación resistencias a tensión [%])	Mínimo 80%	80.75%	80.89%

De acuerdo a lo mencionado en la tabla anterior (tabla 68), las dos mezclas asfálticas tenidas en cuenta dentro de este proyecto de grado cumplen con los requisitos mínimos requeridos por la Especificación General de Construcción de Carreteras en su capítulo 4, artículo 450: “Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua” (INVIAS, 2013). Por otra parte, dentro de esta tabla se puede observar que las dos mezclas asfálticas tienen condiciones muy similares en lo que respecta a la susceptibilidad al agua.

5.3.2.2. Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA) (AASHTO T324-04) (AASHTO, 2004)

Con el fin de realizar una evaluación de la deformación plástica que sufrirán las mezclas asfálticas tenidas en cuenta para el desarrollo de este proyecto (mezcla asfáltica convencional y mezcla asfáltica modificada), se tomaron en cuenta los estándares dados dentro de la norma AASHTO T324-04 (AASHTO, 2004), mencionados en el presente documento dentro del numeral 3.3.3.2. En la tabla mostrada a continuación (tabla 69), se muestran los resultados del ensayo de Rueda de Hamburgo tanto para la mezcla asfáltica convencional como para la mezcla

asfáltica modificada con el 30% de cerámica, y su comparación con los criterios de la norma.

Los resultados de este ensayo pueden generar la no aceptación de un diseño de mezcla asfáltica en caso de que estos se consideren insatisfactorios.

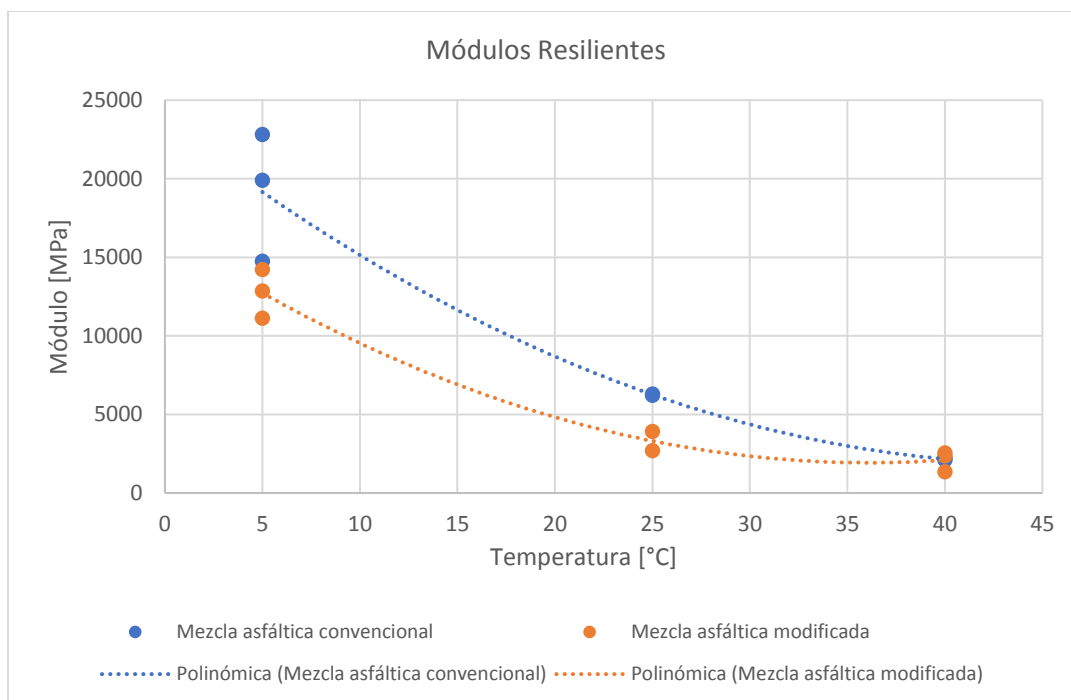
Tabla 69. Análisis resultados rueda de Hamburgo			
Fuente: Propia			
Propiedad	Límite dado por la norma AASHTO T324-04	Mezcla asfáltica convencional	Mezcla asfáltica modificada
Resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas (Deformación [mm])	Máximo 2.9 [mm]	1.29 [mm]	1 [mm]

Como se puede observar en la tabla dispuesta de forma inmediatamente anterior (tabla 69), los resultados del ensayo de Rueda de Hamburgo cumplieron con los estándares mínimos dados por la norma AASHTO T324-04 (AASHTO, 2004). Al comparar los resultados de la mezcla asfáltica convencional con los de la mezcla asfáltica modificada con una inclusión de cerámica al 30%, esta última mostro un mejor comportamiento ya que solamente llego a 1 [mm] de deformación, en contraste con la mezcla asfáltica convencional que tuvo una deformación máxima de 1.29 [mm] después de haber realizado las 20.000 pasadas. Cabe resaltar que estos resultados se encuentran lejos del límite máximo establecido por la norma, lo cual indica un muy buen comportamiento de los diseños de mezcla asfáltica.

5.3.2.3. Norma española. Mezclas bituminosas. Método de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 26: Rigidez (UNE-EN 12697-26). Anexo C. (AENOR, 2006)

En lo relacionado con la realización del ensayo de módulos resilientes, en la norma UNE-EN-12697-26 Anexo C (AENOR, 2006), no se encuentran límites definidos para los resultados obtenidos. Por tal razón, se considera que la realización de este ensayo da un indicador del comportamiento de las mezclas asfálticas tenidas en cuenta dentro del proyecto de grado a diferentes temperaturas de trabajo (ensayo dinámico). Es importante tener en cuenta que por no tener límites o rangos definidos, de este ensayo no depende la aceptación de los diseños de mezcla asfáltica. Los resultados de este ensayo, y la comparación entre la mezcla asfáltica convencional y la mezcla asfáltica modificada con el 30% de cerámica se presentan en la tabla (tabla 70) y grafica (gráfica 20) siguientes.

Tabla 70. Análisis resultados ensayo de módulos resilientes				
Fuente: Propia				
Propiedad	Límite dado por la norma UNE-EN-12697-26	Temperatura [°C]	Mezcla asfáltica convencional	Mezcla asfáltica modificada
Módulos Resilientes (MPa)	No hay límites	5	14754	12848.5
		5	22813.5	11125
		5	19896	14215
		25	-	-
		25	6225.5	3921.5
		25	6303.5	2698.5
		40	-	2555.5
		40	2228.5	2375.5
		40	2097	1357.5
<p>NOTA: Las tres casillas señaladas con un guion (-) hacen referencia a descartes hechos por condiciones dadas dentro de la realización del ensayo.</p> <p>Muestras convencionales 25°C - 1: La briqueta tuvo un resultado muy diferente al de las otras dos otras muestras de ensayo. 40°C - 1: En el momento del ensayo la briqueta se rompió</p> <p>Muestra modificada 25°C - 1: La briqueta tuvo un resultado muy diferente al de las otras dos otras muestras de ensayo.</p>				



Gráfica 20. Comparación módulos resilientes mezcla asfáltica convencional y mezcla asfáltica modificada con cerámica al 30%

De acuerdo a la tabla (tabla 70) y la gráfica (gráfica 20) mostradas anteriormente, la mezcla asfáltica convencional tiene un mejor desempeño notoriamente en los intervalos de 5°C y 25°C. La tendencia muestra un incremento que se da de forma diferenciada para cada uno de los diseños entre los dos puntos de temperatura mencionados, indicando que a menor temperatura, la mezcla asfáltica convencional tiene un mejor comportamiento en comparación a la mezcla asfáltica modificada. Por otra parte, se puede observar que las dos mezclas asfálticas tienen resultados muy cercanos en la temperatura de 40°C, lo cual muestra una tendencia del diseño modificado con cerámica a estabilizar las propiedades de la muestra en los diferentes intervalos de temperaturas.

A pesar de que hubo diferencias entre los resultados de los dos diseños tenidos en cuenta dentro de este proyecto (mezcla asfáltica convencional y mezcla asfáltica modificada con

cerámica al 30%), la diferencia máxima entre estos se ubicó en los 5°C de temperatura y en promedio fue del 33.8%. Esto anterior indica que de acuerdo al ensayo de módulos resilientes, en el punto de diferencia más alto entre el desempeño de la mezcla asfáltica convencional y la mezcla asfáltica modificada con cerámica, esta podría llegar a trabajar hasta a aproximadamente 2/3 de la capacidad total brindada por una mezcla tradicional. Mientras que en el escenario en el que las dos mezclas se encuentran dentro de desempeños similares (40°C), la mezcla asfáltica modificada puede llegar a tener en promedio el 97% de la capacidad conseguida por la mezcla asfáltica convencional.

6. Conclusiones

- La recopilación de información relacionada con la inclusión de cerámica en mezclas asfálticas, junto a la investigación presentada en este documento, dan un punto de partida en lo que tiene que ver con las mejoras que las características del material cerámico pueden brindarles a los asfaltos. Esto anterior, junto a la recopilación de información de los trabajos realizados en la Universidad Pontificia Bolivariana, en los cuales también trabajaron con modificantes de mezclas asfálticas, abre las puertas a la inclusión de materiales que normalmente son considerados como desperdicios, dándoles un nuevo uso y de forma consecuente logrando maximizar el aprovechamiento de los recursos.

- Dentro de la información recopilada para la realización de este proyecto, se podría decir que el artículo más similar en lo que respecta a la metodología de trabajo es el que se titula “Utilizing recycled ceramic aggregates obtained from tile industry in the design of open graded wearing course on both laboratory and in situ basis” (Silvestre, Medel, García, & Navas, 2013). Esto anterior se da a partir de que en este trabajan con una modificación de cerámica similar a la propuesta dentro de este proyecto, pero en su caso la comparan con la normativa española. Este antecedente se considera de gran importancia ya que los resultados obtenidos tienen bastantes puntos en común con los que se obtuvieron en la realización de este proyecto, tales como el mayor porcentaje de asfalto obtenido del diseño Marshall para la mezcla asfáltica modificada que para la mezcla asfáltica convencional, el mejor comportamiento de la mezcla con inclusión de cerámica en el ensayo de determinación de la resistencia a la deformación plástica, entre otros.

- Como se puede ver en los artículos tenidos en cuenta dentro del numeral 2.6 del presente documento (Andrzejuk, Barnat-Hunek, Siddique, Zegardlo, & Lagod, 2018), (Kara &

Karacasu, 2017), (Muniandy, Husna Ismail, & Hassim, 2017), (Kara & Karacasu, 2017) y (Silvestre, Medel, García, & Navas, 2013), la inclusión de la cerámica como modificador de las mezclas asfálticas es un tema que viene tomando cierta relevancia dentro de investigaciones realizadas en todo el mundo. A lo cual se le suman otros artículos como (Awoyera, Ndambuki, Akinmusuru, & Omole, 2016), en donde utilizan la cerámica como reemplazante del agregado natural dentro de una mezcla de concreto. A partir de esto, se puede observar la relevancia que ha venido tomando la utilización de la cerámica como material modificante, y en general la intención de la academia por invertir sus esfuerzos en la búsqueda de la reducción del consumo de recursos naturales.

- En lo que respecta a la calidad de los agregados utilizados dentro de este proyecto de grado, tanto los materiales de origen natural (suministrado por Sánchez Construcciones LTDA) como los de origen cerámico (suministrado por la empresa cerámica Italia), mostraron unas características adecuadas para su utilización dentro de las mezclas asfálticas. Este es uno de los aspectos considerados más importantes al implementar la utilización de un material nuevo como es la cerámica, sobre todo dentro de una mezcla asfáltica, ya que los requisitos de calidad de los agregados utilizados en estas son considerablemente altos de acuerdo a la normativa vigente (Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras en su capítulo 4, artículo 450: “Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua” (INVIAS, 2013)).

- Es importante resaltar la forma en la que se realizó la determinación de las fórmulas de trabajo utilizadas para este proyecto de grado. Estas se realizaron manejando el material por medio de tolvas, tal y como se hace en las plantas de asfalto cuando se realiza el proceso de fabricación de las mezclas asfálticas. Lo anterior se dio a partir de la búsqueda de que lo que se realiza dentro del laboratorio pueda ser realizado de una forma similar en la práctica, es decir,

teniendo en cuenta que este proyecto de grado tuviera la mayor aplicabilidad posible. Esto se dio, clasificando el material de las misma forma en la que lo realiza la empresa que lo suministró, en el caso del material de origen natural (tolvas de arenas, $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{4}$ "). Mientras que en el caso del agregado cerámico, este se clasifico buscando crear tolvas similares a las utilizadas para clasificar el agregado natural (tolva de arenas y tolva de gruesos), teniendo en cuenta que el material cerámico solamente se encontraba desde el tamaño de partícula de 0 [mm] (fondo), hasta el tamaño de partícula de 12.5 [mm] ($\frac{1}{2}$ ").

- El cemento asfáltico utilizado dentro de este proyecto fue suministrado por la empresa Asfaltart. De igual manera que los agregados, el asfalto también se sometió a los ensayos de caracterización considerados por la normativa dada por la Especificación General para Construcción de Carreteras en su Artículo 410: “Suministro de cemento asfáltico” (INVIAS, 2013). De acuerdo a los resultados obtenidos y los criterios establecidos por la norma anteriormente mencionada, el asfalto cumple con las calidades mínimas de aceptación para su utilización en las mezclas asfálticas planteadas en este proyecto de grado (capa intermedia de un pavimento con un tránsito del tipo NT2).

- Para encontrar los porcentajes óptimos de las dos mezclas asfálticas tenidas en cuenta dentro de este proyecto de grado, se utilizó la metodología denominada método de Marshall. Por medio de esta, se pudo establecer que en los porcentajes de 5.6% para la mezcla asfáltica convencional y 5.8% para la mezcla asfáltica modificada cumplía con todos los requerimientos de calidad consignados en la Especificación General de Construcción de Carreteras en su capítulo 4, artículo 450: “Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua” (INVIAS, 2013)). El aumento en el porcentaje de asfalto requerido por la mezcla asfáltica modificada contrasta con el resultado de la absorción de la cerámica, el cual es muy superior al de los

agregados de origen natural, tal y como se puede observar en los numerales 4.1.12 y 4.1.13 del presente documento.

- El primero de los ensayos que realiza un análisis del comportamiento de la mezcla asfáltica aplicados dentro de este proyecto es el de Estabilidad y Flujo Marshall (INVE-748-13) (INVIAS, 2013). Este procedimiento de evaluación mecánico de las mezclas permitió establecer que tanto la mezcla asfáltica convencional, como la modificada obtuvieron resultados similares ubicados dentro del rango de flujo propuesto por la Especificación General de Construcción de Carreteras en su capítulo 4, artículo 450: “Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua” (INVIAS, 2013)), encontrándose entre 2[mm] y 4[mm]. La estabilidad también estuvo dentro de los límites de la norma, con mejores resultados para la mezcla asfáltica convencional (hasta 19.18 [KN]) que para la mezcla asfáltica modificada (hasta 14.38 [KN]), lo cual se traduce en una mejor capacidad en lo que respecta a la resistencia de la mezcla tradicional frente a cargas aplicadas sobre ella.

- La realización del ensayo de susceptibilidad al agua también se consideró un ensayo de evaluación mecánica de las mezclas asfálticas. De acuerdo a la Especificación General de Construcción de Carreteras en su capítulo 4, artículo 450: “Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua” (INVIAS, 2013)), el valor mínimo esperado para este ensayo se encuentra en un 80%. Como se puede observar en los numerales 4.3.2.1 y 5.3.2.1 del presente documento, ambas mezclas cumplen con este requisito, teniendo en ambos casos un comportamiento muy similar en lo relacionado con la afectación generada por la humedad al desempeño de la mezcla.

- Por medio del ensayo conocido como Rueda de Hamburgo, se realizó la evaluación de la resistencia a la deformación plástica de los dos diseños planteados en este proyecto. Con este fin, este fue realizado a condiciones constantes de temperatura (40°C) y velocidad de pasadas (50 pasadas por minuto) (ensayo de tipo mecánico), llegando hasta el número de pasadas determinado por el ensayo de la norma AASHTO T324-04 (AASHTO, 2004) (20.000 pasadas). Como resultado de este, la mezcla asfáltica con inclusión de cerámica reporto un mejor comportamiento frente a la deformación plástica, ya que solamente tuvo 1[mm] de deformación total promedio, mientras que la mezcla asfáltica convencional llego hasta 1.29 [mm] de deformación total promedio. Haciendo claridad de que en ambos casos cumplieron con el límite máximo consignado en la norma mencionada anteriormente (máximo 2.9[mm]).

- El ensayo utilizado para realizar las mediciones correspondientes a las características dinámicas de las mezclas asfálticas convencional y modificada fue el denominado Ensayo de Módulos Resilientes. Este se realizó a partir de las condiciones indicadas en la normativa española UNE-EN-12697-26 Anexo C (AENOR, 2006). Se realizaron mediciones de módulos a briquetas realizadas a partir de la consecución de núcleos fabricados en el compactador giratorio, las cuales se ensayaron a temperaturas de 5°C, 25°C y 40°C. En la realización de las mediciones se descartó la primera biqueta de la mezcla asfáltica convencional ensayada a 40°C debido a que fallo, mientras que las dos primeras briquetas ensayadas a 25°C para ambos diseños tuvieron que ser descartadas porque su comportamiento estaba desviado con respecto a las otras dos muestras ensayadas a esta temperatura. Los resultados de este ensayo no ningún tipo de límite o rango a cumplir dentro de la norma, sus resultados son indicadores de comportamiento. Tal y como se puede observar en la gráfica 20 y la tabla 70 del presente documento, la mezcla asfáltica convencional tuvo un mejor comportamiento a 5°C y 25°C, mientras que a una temperatura de

40°C su comportamiento fue muy similar. Cabe resaltar que, como se puede observar en la gráfica y la tabla mencionadas anteriormente, las mezclas asfálticas tuvieron sus mejores desempeños a temperaturas bajas, lo cual lleva a recomendar que sean utilizadas preferiblemente en sitios fríos.

- De acuerdo a las evaluaciones realizadas anteriormente y a los resultados obtenidos a lo largo de la realización de este proyecto, tanto la mezcla asfáltica convencional como la mezcla asfáltica modificada cumplen con los criterios dados por la normativa mencionada en cada uno de los numerales del presente documento. Es decir, el reemplazo de un 30% de agregados naturales por agregados de origen cerámico da lugar a una mezcla asfáltica del tipo MSC-25 que se puede utilizar en una capa intermedia de un pavimento asfáltico con un tránsito de tipo NT2.

7. Recomendaciones

- Con el fin de mejorar las condiciones de los ensayos realizados tanto por los tesisistas, como por la propia universidad, se recomienda que las máquinas de ensayo cuyo funcionamiento vaya ligado a mantener una temperatura pudieran encontrarse en un ambiente en el cual se pudiera controlar su temperatura ambiental.

- Es recomendable crear un mecanismo que permita dar cierta formación a los tesisistas que ingresan al laboratorio del funcionamiento de las herramientas y equipos que pueden manipular. Esto anterior con el fin de tener el máximo aprovechamiento de la infraestructura de la universidad, y al mismo tiempo garantizar su adecuada utilización.

- Para la realización de proyectos relacionados con la temática de pavimentos asfálticos el primordial darles un adecuado manejo a las temperaturas de las muestras. Sobre todo en los procesos de mezclado compactación se deben garantizar las temperaturas, con el fin de tener un método con garantías de reproducibilidad y también con los resultados esperados.

- Se recomienda el establecimiento de un lugar adecuado para que los tesisistas puedan guardar las muestras utilizadas en el laboratorio de pavimentos, el cual permita que estas queden ordenadas y adecuadamente almacenadas.

- Se debe tener cuidado con las muestras del ensayo de módulos resilientes que se ensayan a 40°C ya que de acuerdo a la norma tomada para el desarrollo de este ensayo dentro del presente documento se advierte que en algunos casos dentro de esta temperatura la mezcla asfáltica ensayada puede destruirse.

Bibliografía

AASHTO. (2004). *Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA) T 324 - 04*. EE.UU: AASHTO.

AENOR. (2006). Anexo C: Ensayo de Tracción Indirecta Sobre Probetas Cilíndricas . En AENOR, *MEZCLAS BITUMINOSAS: Métodos de Ensayo para Mezcla Bituminosa en Caliente Parte 26: Rigidez* (págs. 28-36). Madrid, España: AENOR.

Andrzejuk, W., Barnat-Hunek, D., Siddique, R., Zegardlo, B., & Lagod, G. (2018). *Application of Recycled Ceramic Aggregates for the Production of Mineral-Asphalt Mixtures*. Basel, Suiza: Multidisciplinary Digital Publishing Institute-Materials.

Asamblea Nacional Constituyente. (1991). *Constitución Política de Colombia*. Bogotá.

Atkings, H. (2003). *Highway Materials, Soilds, and Concretes- Fourth Edition*. New Jersey: Prentise Hall.

Awoyera, P., Ndambuki, J., Akinmusuru, J., & Omole, D. (2016). Characerization of ceramic waste aggegate concrete. *HBRC Journal*, 1-6.

Castro, L., & Acevedo, J. (2016). *Análisis de comportamiento dinámico de una mezcla asfáltica en caliente con adición de PVC reciclado*. Floridablanca: Universidad Pontificia Bolivariana.

Cely Illera, L., & Bolivar León, R. (2015). Materia Prima para la Industria Cerámica de Norte de Santander. II. Evaluación del Comportamiento Térmico y su Incidencia en las Propieddades Tecnológicas. *Respuestas*, 84-94.

Gómez, S., & Prada, F. (2015). *Comportamiento de una mezcla asfáltica densa en caliente modificada con la adición de PVC molido (reciclado)*. Floridablanca: Universidad Pontificia Bolivariana.

Gutierrez, S., & García, R. (2016). *Elaboración de un manual de usuario para el equipo marco de análisis de pavimentos modificados viscosímetro de Brookfield de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga*. Floridablanca: Universidad Pontificia Bolivariana.

Herrera, C. (2016). *Elaboración de un manual de uso para el equipo marco de carga dinámico de pavimentos flexibles DTS-30 de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga*. Floridablanca: Universidad Pontificia Bolivariana.

INVIAS. (2013). Artículo 410 - Suministro de Cemento Asfáltico. En INVIAS, *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras Capítulo 4 - Pavimentos Asfálticos* (págs. 43-49). Colombia: INVIAS.

INVIAS. (2013). Artículo E - 125 Determinación del Límite Líquido de los Suelos. En INVIAS, *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Sección 100 - Suelos* (págs. 207-226). Colombia: INVIAS.

INVIAS. (2013). Artículo E - 133 Equivalente de Arena y Agregados Finos. En INVIAS, *Normas de Ensayo de Materiales Para Carreteras Sección 100 - Suelos* (págs. 297-318). Colombia: INVIAS.

INVIAS. (2013). Artículo E - 201 Muestreo de Agregados para Construcción de Carreteras. En INVIAS, *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Sección 200 - Agregados Pétreos* (págs. 5-15). Colombia: INVIAS.

INVIAS. (2013). Artículo E - 202 Reducción de Muestras de Agregados por Cuarteo. En INVIAS, *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Sección 200 - Agregados Pétreos* (págs. 17-24). Colombia: INVIAS.

INVIAS. (2013). Artículo E - 213 Análisis Granulométrico de los Agregados Grueso y Fino. En INVIAS, *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Sección 200 - Agregados Pétreos* (págs. 33-43). Colombia: INVIAS.

INVIAS. (2013). Artículo E - 218 Resistencia a la Degradación de los Agregados de Tamaños Menores de 37.5 [mm] (1 1/2") por Medio de la Máquina de los Ángeles. En INVIAS, *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Sección 200 - Agregados Pétreos* (págs. 75-82). Colombia: INVIAS.

INVIAS. (2013). Artículo E - 220 Solidez de los Agregados Frente a la Acción de Soluciones de Sulfato de Sodio o de Magnesio. En INVIAS, *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Sección 200 - Agregados Pétreos* (págs. 89-100). Colombia: INVIAS.

INVIAS. (2013). Artículo E - 222 Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica) y Absorción del Agregado Fino. En INVIAS, *Normas de Ensayo de Materiales Para Carreteras Sección 200 - Agregados Pétreos* (págs. 107-123). Colombia: INVIAS.

INVIAS. (2013). Artículo E - 223 Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica) y Absorción del Agregado Grueso. En INVIAS, *Normas de Ensayo de Materiales Para Carreteras Sección 200 - Agregados Pétreos* (págs. 125-139). Colombia: INVIAS.

INVIAS. (2013). Artículo E - 224 Determinación del Valor del 10% de Finos. En INVIAS, *Normas de Ensayo de Materiales de Carreteras Sección 200 - Agregados Pétreos* (págs. 141-154). Colombia: INVIAS.

INVIAS. (2013). Artículo E - 227 Porcentaje de Partículas Fracturadas en un Agregado Grueso. En INVIAS, *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Sección 200 - Agregados Pétreos* (págs. 159-166). Colombia: INVIAS.

INVIAS. (2013). Artículo E - 237 Determinación de la Limpieza Superficial de las Partículas de Agregado Grueso. En INVIAS, *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Sección 200 - Agregados Pétreos* (págs. 251-253). Colombia: INVIAS.

INVIAS. (2013). Artículo E - 238 Determinación de la Resistencia del Agregado Grueso a la Degradación por Abrasión, Utilizando el Aparato Micro-Deval. En INVIAS, *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Sección 200 - Agregados Pétreos* (págs. 255-264). Colombia: INVIAS.

INVIAS. (2013). Artículo E - 239 Determinación del Contenido de Vacíos en Agregados Finos No Compactados (Influenciado por la Forma de las Partículas, la Textura Superficial y la Granulometría). En INVIAS, *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Sección 200 - Agregados Pétreos* (págs. 265-276). Colombia: INVIAS.

INVIAS. (2013). Artículo E - 240 Proporción de Partículas Planas, Alargadas o Planas y Alargadas en Agregados Gruesos. En INVIAS, *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Sección 200 - Agregados Pétreos* (págs. 277-284). Colombia: INVIAS.

INVIAS. (2013). Artículo E - 702 Ductilidad de los Materiales Asfálticos . En INVIAS, *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Secciones 700 y 800 (primera parte) - Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos (Primera Parte)* (págs. 17-23). Colombia: INVIAS.

INVIAS. (2013). Artículo E - 706 Penetración de los Materiales Bituminosos. En INVIAS, *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Secciones 700 y 800 (primera parte) - Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos (Primera Parte)* (págs. 47-55). Colombia: INVIAS.

INVIAS. (2013). Artículo E - 707 Densidad de Materiales Bituminosos Sólidos y Semisólidos (Método del Picnómetro). En INVIAS, *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Secciones 700 y 800 (primera parte) - Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos (Primera Parte)* (págs. 57-63). Colombia: INVIAS.

INVIAS. (2013). Artículo E - 709 Puntos de Inflamación y de Combustión Mediante la Copa Abierta Cleveland. En INVIAS, *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Secciones 700 y 800 (primera parte) - Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos (Primera Parte)* (págs. 69-87). Colombia: INVIAS.

INVIAS. (2013). Artículo E - 712 Punto de Ablandamiento de Materiales Bituminosos (Aparato de Anillo y Bola). En INVIAS, *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Secciones 700 y 800 (primera parte) - Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos (Primera Parte)* (págs. 105-113). Colombia: INVIAS.

INVIAS. (2013). Artículo E - 717 Determinación de la Viscosidad del Asfalto Empleando un Viscosímetro Rotacional. En INVIAS, *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras*

Secciones 700 y 800 (primera parte) - Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos (Primera Parte) (págs. 173-179). Colombia: INVIAS.

INVIAS. (2013). Artículo E - 724 Índice de Penetración de los Cementos Asfálticos. En INVIAS, *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Secciones 700 y 800 (primera parte) - Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos (Primera Parte)* (págs. 251-252). Colombia: INVIAS.

INVIAS. (2013). Artículo E - 725 Evaluación de la Susceptibilidad al Agua de las Mezclas de Concreto Asfáltico Utilizando la Prueba de Tracción Indirecta. En INVIAS, *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Secciones 700 y 800 (primera parte) - Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos (Primera Parte)* (págs. 253-265). Colombia: INVIAS.

INVIAS. (2013). Artículo E - 733 Gravedad Específica Bulk y Densidad de Mezclas Asfálticas Compactadas No Absorbentes Empleando Especímenes Saturados y Superficialmente Secos. En INVIAS, *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Secciones 700 y 800 (primera parte) - Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos (Primera Parte)* (págs. 351-358). Colombia: INVIAS.

INVIAS. (2013). Artículo E - 735 Gravedad Específica Máxima de Mezclas Asfálticas para Pavimentos. En INVIAS, *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Secciones 700 y 800 (primera parte) - Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos (Primera Parte)* (págs. 369-381). Colombia: INVIAS.

INVIAS. (2013). Artículo E - 736 Porcentaje de Vacíos con Aire en Mezclas Asfálticas Compactadas Densas y Abiertas. En INVIAS, *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras*

Secciones 700 y 800 (primera parte) - Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos (Primera Parte) (págs. 383-387). Colombia: INVIAS.

INVIAS. (2013). Artículo E - 748 Estabilidad y Flujo de Mezclas Asfálticas en Caliente Empleando el Equipo Marshall. En INVIAS, *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Secciones 700 y 800 (primera parte) - Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos (Primera Parte)* (págs. 473-492). Colombia: INVIAS.

INVIAS. (2013). Artículo E - 799 Análisis Volumétrico de Mezclas Asfálticas Compactadas en Caliente. En INVIAS, *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras Secciones 700 y 800 (segunda parte) - Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos (Segunda Parte)* (págs. 361-369). Colombia: INVIAS.

INVIAS. (2013). Artículo 450 - Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (concreto asfáltico). En INVIAS, *Especificaciones generales de construcción de carreteras capítulo 4 - Pavimentos Asfálticos* (págs. 235-281). Colombia: INVIAS.

Kara, C., & Karacasu, M. (2017). Investigation of waste ceramic tile additive in hot mix asphalt using fuzzy logic approach. *Elsevier- Construction and building materials*, 141(1), 598-607.

Mallick, R. B., & El-Korchi, T. (2013). *Pavement Engineering Principles and Practice*. Boca Raton, FL: Taylor and Francis Group.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (28 de Febrero de 2017). *Normativa: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Obtenido de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible: <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/3a-RESOLUCION-472-DE-2017.pdf>

Montejo Fonseca, A. (2002). *Ingeniería de Pavimentos para carreteras*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.

Muniandy, R., Husna Ismail, D., & Hassim, S. (2017). Performance of recycled ceramic waste as aggregates in hot mix asphalt (HMA). *CrossMark*, 20(1), 844-849.

Palacio, J., & José, R. (2016). *Variación del módulo dinámico de mezclas asfálticas convencionales y modificadas con ceniza empleando agregados petreos de Rionegro*. Floridablanca: Universidad Pontificia Bolivariana.

Papagiannakis, A., & Masad, E. (2007). *Pavement Design and Materials*. New Jersey: John Wiley & Sons .

Reyes Lizcano, F. A. (2003). *Diseño Racional de Pavimentos*. Bogotá: Centro Editorial Colombiano y Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

Rodríguez, M. (2014). *Evaluación de mezclas asfálticas con adición de ceniza como porcentaje del llenante y caucho como porcentaje de asfalto*. Floridablanca: Universidad Pontificia Bolivariana.

Rondon Quintana, H. A., & Reyes Lizcano, F. A. (2015). *Pavimentos: Materiales, Construcción y Diseño*. Bogotá: ECOE Ediciones.

Rondón Quintana, H. A., Fernandez, W. D., & Fuentes, L. (2012). *Evaluación de Pavimentos Flexibles: Generalidades*. Saarbrücken: Academia Española.

Silvestre, R., Medel, E., García, A., & Navas, J. (2013). Utilizing recycled ceramic aggregates obtained from tile industry in the design of open graded wearing course on both laboratory and in situ basis. *Elsevier Journal- Materials and Design*, 50(1), 471-478.

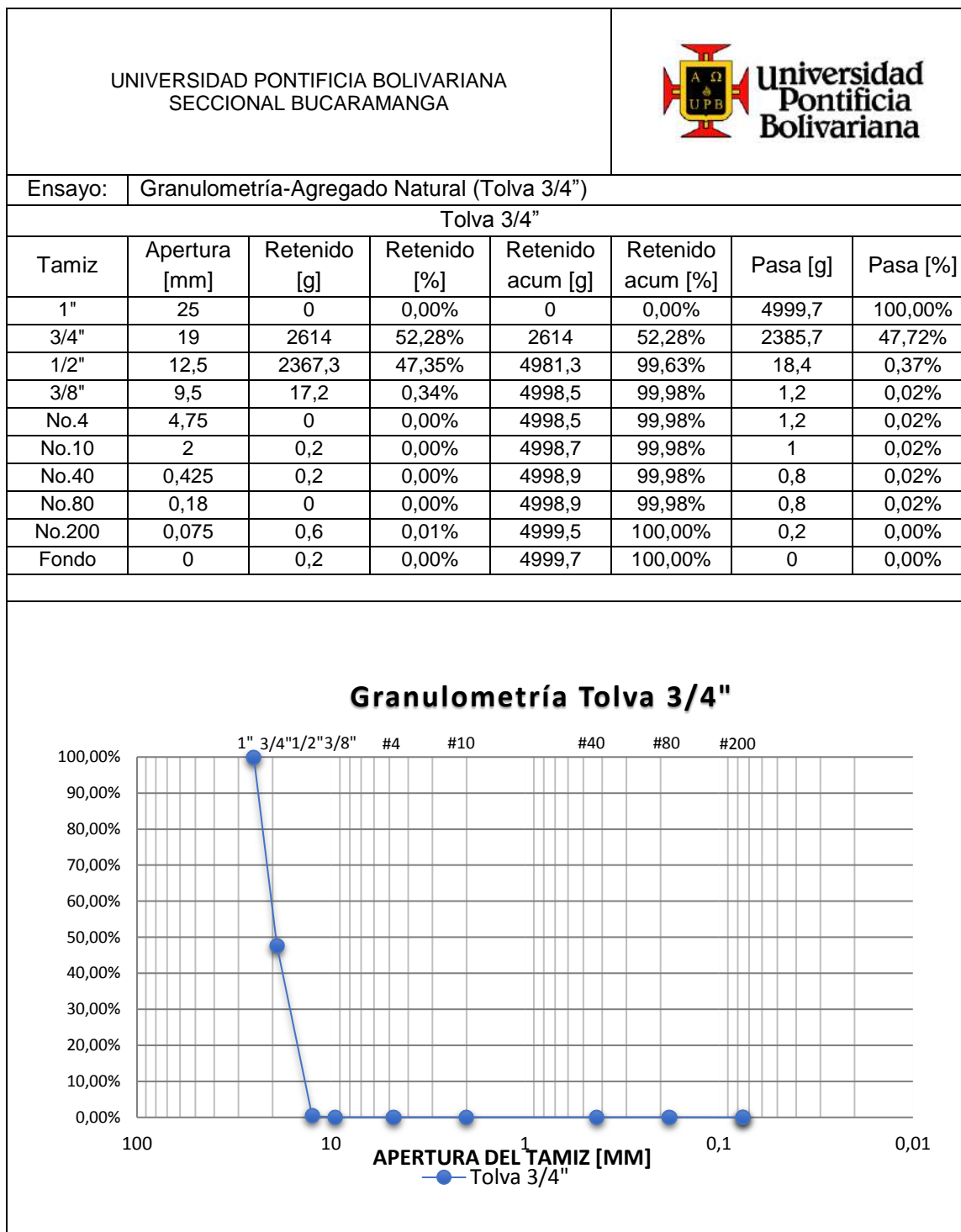
Thom, N. (2014). *Principles of Pavement Engineering*. Westminster, London: ICE.

Vides, C. (2016). *Analisis comparativo de una mezcla asfaltica convencional y modificada con un 4% de PVC*. Floridablanca: Universidad Pontificia Bolivariana.

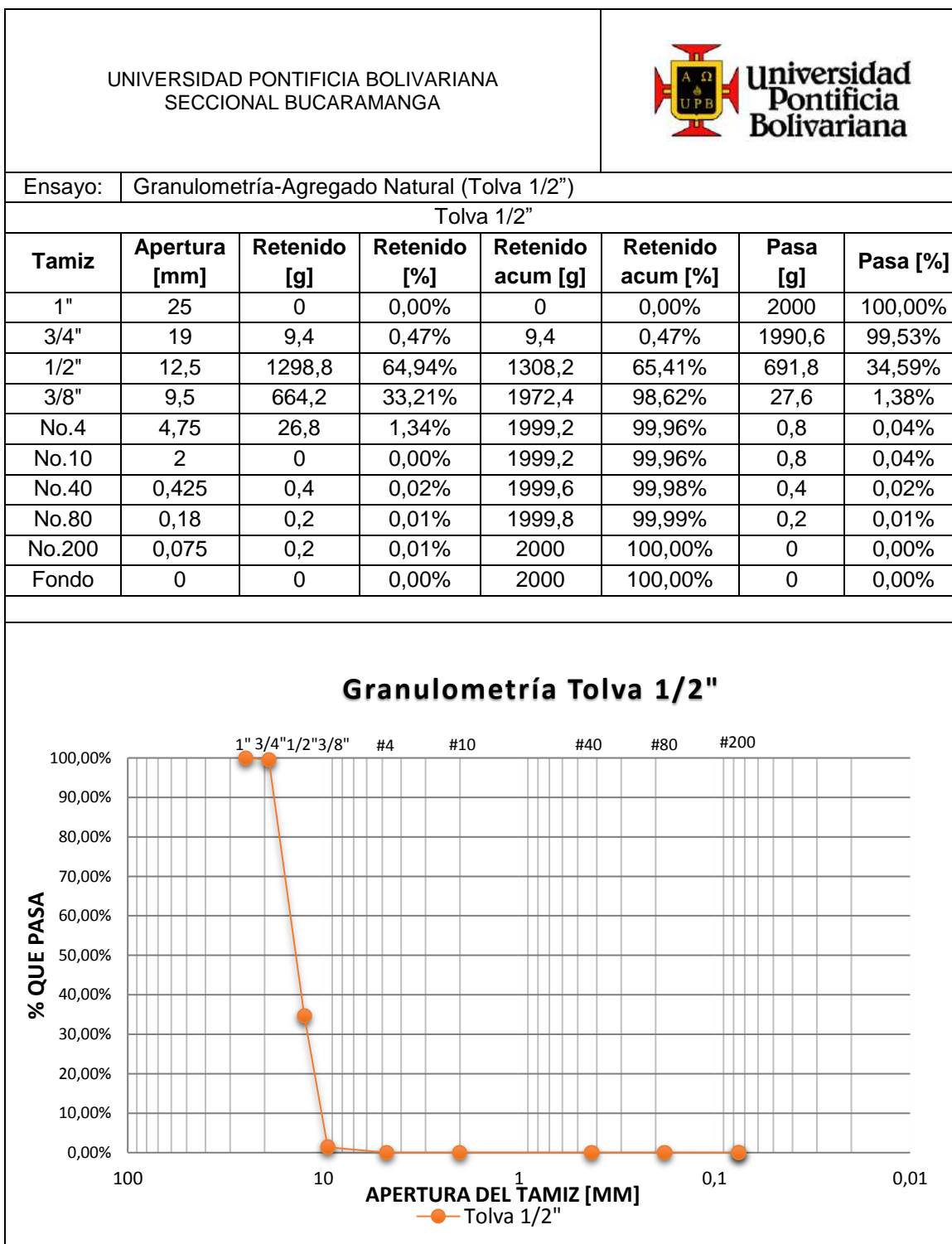
Wan, J., Wu, S., Xiao, Y., Liu, Q., & Schlangen, E. (2016). Characteristics of Ceramic Fiber Modified Asphalt Mortar. *MDPI-Materials*, 9(9), 788.

Anexos

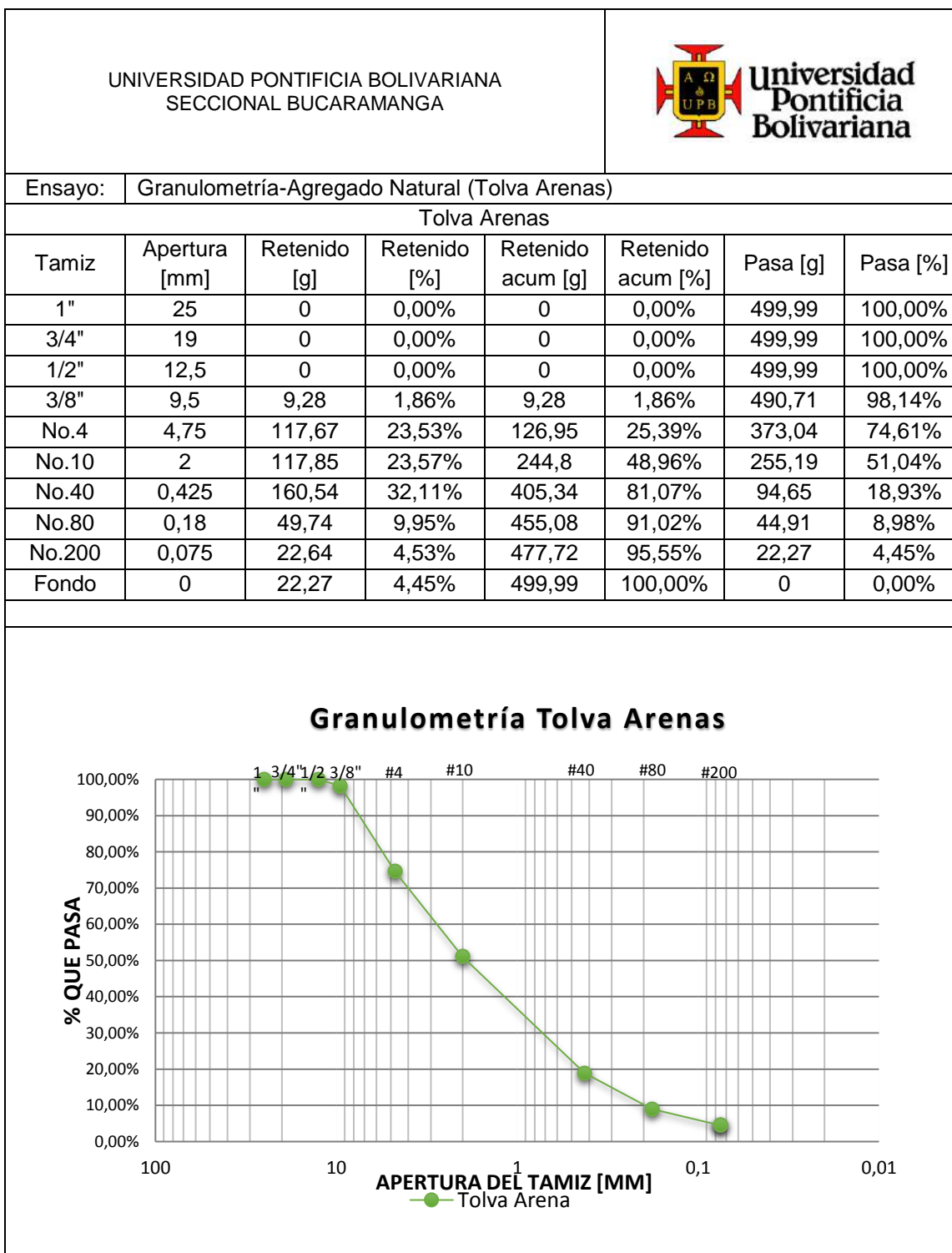
Anexo 1. Análisis granulométrico de los agregados naturales, tolva de 3/4".



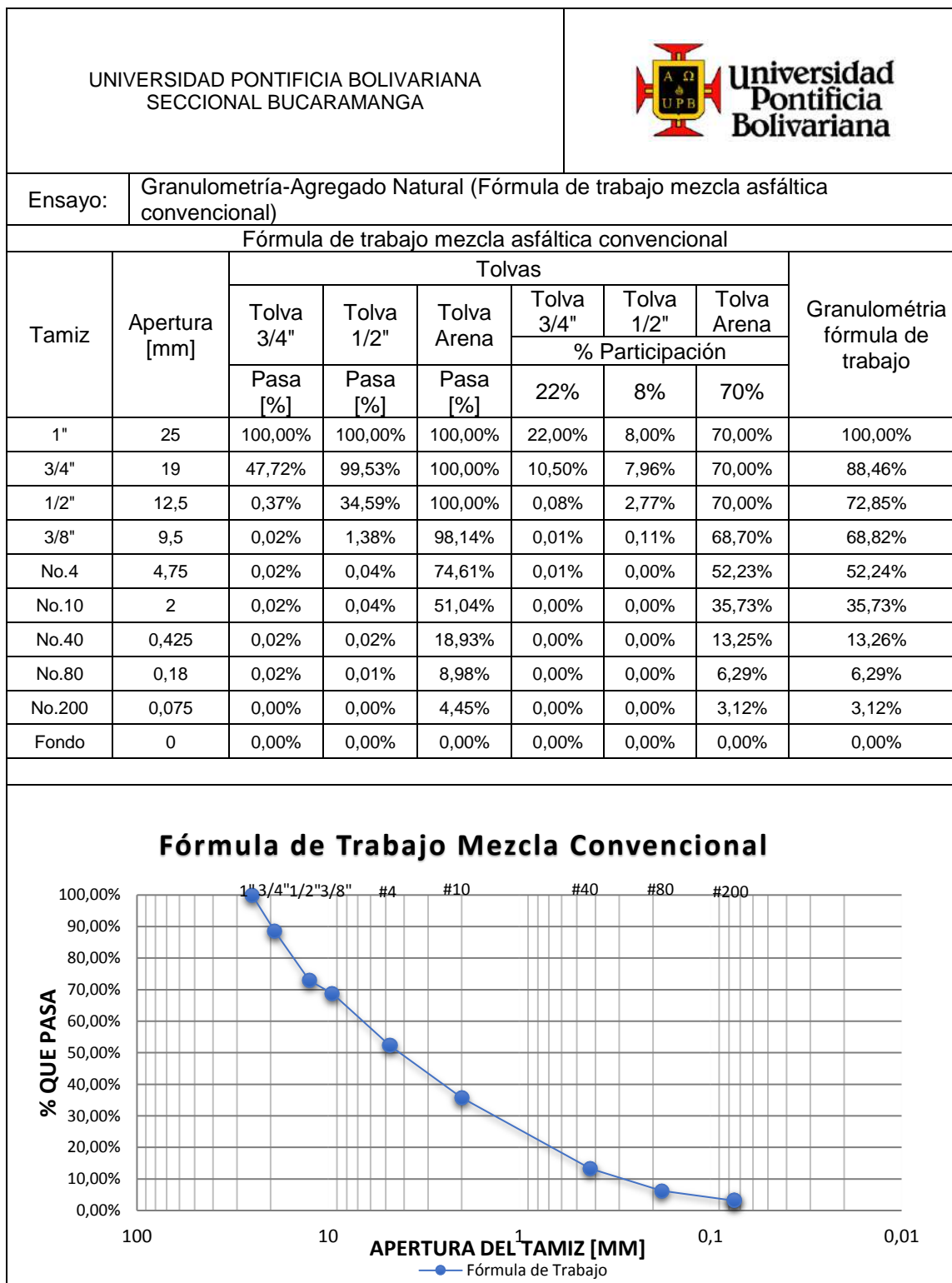
Anexo 2. Análisis granulométrico de los agregados naturales, tolva de 1/2".



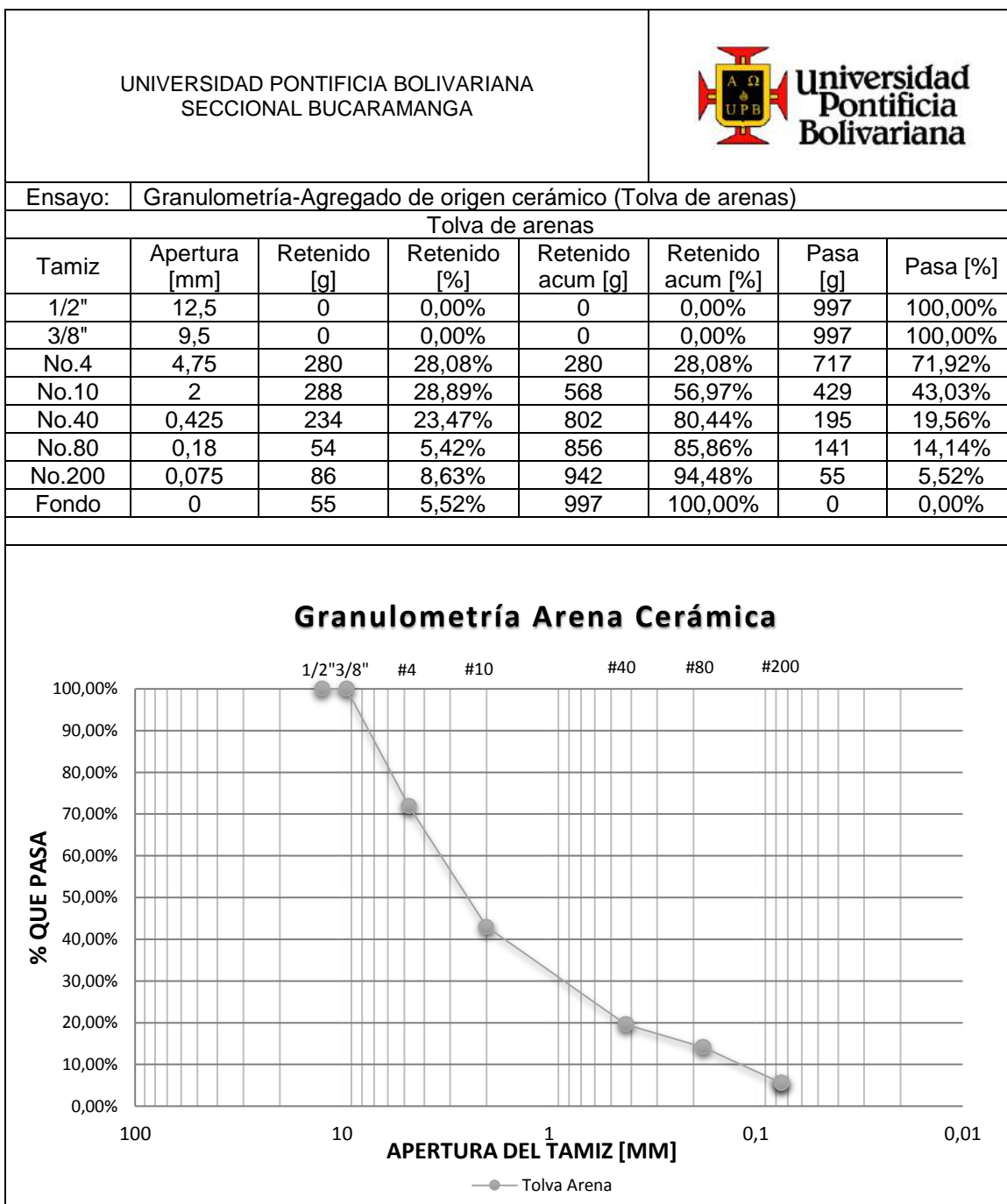
Anexo 3. Análisis granulométrico de los agregados naturales, tolva de arenas.



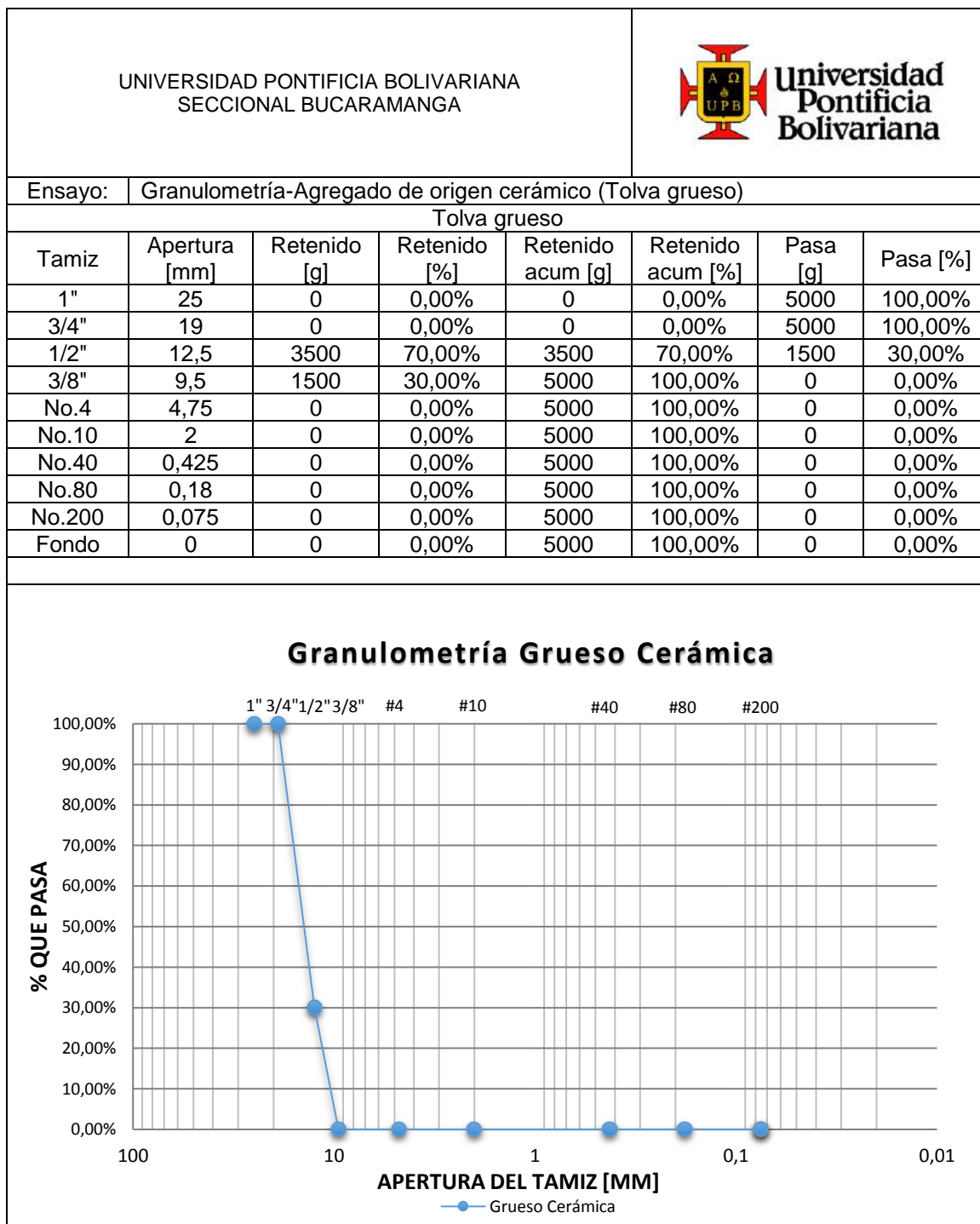
Anexo 4. Análisis granulométrico de los agregados naturales, fórmula de trabajo mezcla asfáltica convencional.



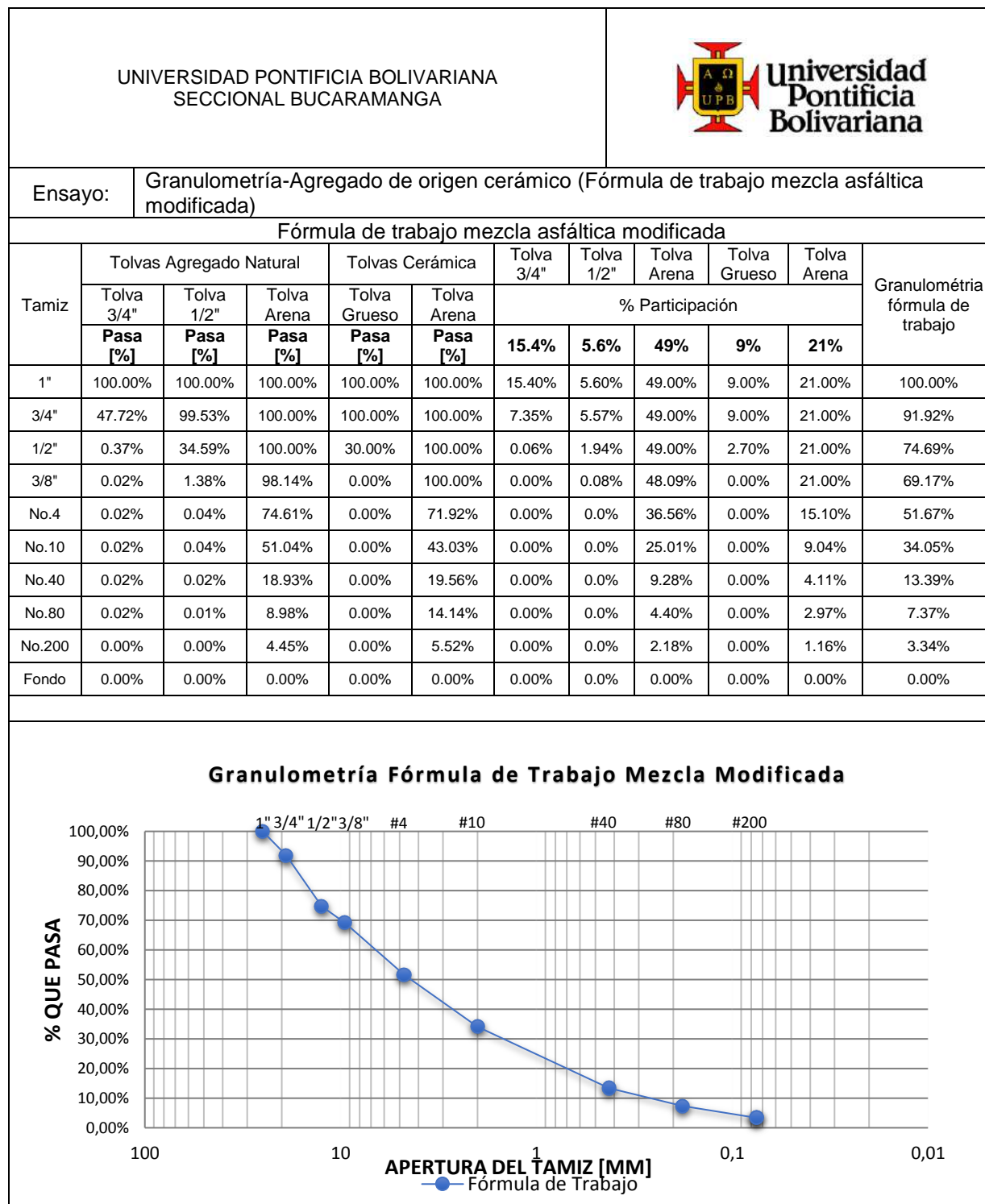
Anexo 5. Análisis granulométrico de los agregados de origen cerámico, tolva de arenas.




Anexo 6. Análisis granulométrico de los agregados de origen cerámico, tolva de material grueso.




Anexo 7. Análisis granulométrico de los agregados de origen cerámico, fórmula de trabajo mezcla asfáltica modificada.



Anexo 8. Ensayo de desgaste en la máquina de Los Ángeles.


UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA			 Universidad Pontificia Bolivariana		
Ensayo:	Desgaste en la máquina de Los Ángeles				
Resultados					
Agregado natural			Agregado cerámico		
Masa inicial	5000	[g]	Masa inicial	5007	[g]
Masa final	3651	[g]	Masa final	3736	[g]
Pérdidas	27%	%	Pérdidas	25,38%	%

Anexo 9. Ensayo de resistencia a la degradación Por abrasión en el aparato Micro-Deval.


UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA			 Universidad Pontificia Bolivariana		
Ensayo:	Resistencia a la degradación Por abrasión en el aparato Micro-Deval				
Resultados					
Agregado natural			Agregado cerámico		
Masa inicial	1500	[g]	Masa inicial	1500	[g]
Masa final	1401	[g]	Masa final	1380	[g]
Pérdidas	6,91	%	Pérdidas	8	%

Anexo 10. Ensayo de determinación del 10% de finos.

Anexo 10.1. Ensayo de determinación del 10% de finos material de origen natural.


UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA					
Ensayo:	Determinación del 10% de finos material de origen natural.				
Resultados					
Muestra		M 1 -Húmeda	M 1 -Seca	M 2 -Húmeda	M 2 -Seca
Concepto	Unidades				
Tiempo	[min]	10	10	10	10
Deformación	[mm]	20	20	20	20
Carga	[KN]	137.78	213.23	128.2	208.28
Peso fallado	[g]	2677.4	2668	2740.2	2668.2
Peso tamiz #8 retenido	[g]	2397	2403.8	2442	2397
Peso del material pasante	[g]	257	262.6	264	269.6
M	[%]	9.60	9.84	9.63	10.10
F	[KN]	141.83	215.70	131.68	206.80
Pérdidas	[%]	9.60%	9.84%	9.63%	10.10%
10% Finos Seco [KN]		211.250	10% Finos Húmedo [KN]		136.755
10% Finos Seco [KN] (redondeado)		210	10% Finos Húmedo [KN] (redondeado)		140
Relación Húmedo/Seco [%]			67%		

Anexo 10.2. Ensayo de determinación del 10% de finos material de origen cerámico.


UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA		 Universidad Pontificia Bolivariana			
Ensayo:	Determinación del 10% de finos material de origen cerámico.				
Resultados					
Muestra		M 1 -Húmeda	M 1 -Seca	M 2 -Húmeda	M 2 -Seca
Concepto	Unidades				
Tiempo	[min]	10	10	10	10
Deformación	[mm]	20	20	20	20
Carga	[KN]	297.281	311.89	297.562	309.078
Peso fallado	[g]	2445	2283	2479	2298
Peso tamiz #8 retenido	[g]	2155.5	2023	2184	2037
Peso del material pasante	[g]	289.5	260	295	261
M	[%]	11.84	11.39	11.90	11.36
F	[KN]	262.75	283.72	262.00	281.71
Pérdidas	[%]	11.84%	11.39%	11.90%	11.36%
10% Finos Seco [KN]		282.715	10% Finos Húmedo [KN]		262.375
10% Finos Seco [KN] (redondeado)		280	10% Finos Húmedo [KN] (redondeado)		260
Relación Húmedo/Seco [%]			93 %		

Anexo 11. Ensayo de solidez frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o magnesio.

Anexo 11.1. Ensayo de solidez frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o magnesio agregados de origen natural

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA		 Universidad Pontificia Bolivariana	
Ensayo:	Solidez frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o magnesio agregados de origen natural		
Resultados			
Fracción	Masa inicial [g]	Retenido en tamiz [g]	Pérdidas [%]
#50	100	79	21.00%
#30	100	87.4	12.60%
#16	100	94.8	5.20%
#8	100	96.2	3.80%
#4	300	299	0.33%
3/8"	330	329.6	0.12%
1/2"	670	669.2	0.12%
3/4"	500	499.4	0.12%
Promedio de pérdidas [%]			5,41%

Anexo 11.2. Ensayo de solidez frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o magnesio agregados de origen cerámico

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA		 Universidad Pontificia Bolivariana	
Ensayo:	Solidez frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o magnesio agregados de origen cerámico		
Resultados			
Fracción	Masa inicial [g]	Retenido en tamiz [g]	Pérdidas [%]
#50	100	55.8	44.20%
#30	100	82.6	17.40%
#16	100	94.4	5.60%
#8	100	93.8	6.20%
#4	300	299.6	0.13%
3/8"	330	329.4	0.18%
1/2"	670	669.6	0.06%
Promedio de pérdidas [%]			10,54%


Anexo 12. Ensayo de determinación de la limpieza superficial del agregado grueso.

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA		 Universidad Pontificia Bolivariana	
Ensayo:	Determinación de la limpieza superficial del agregado grueso		
Resultados			
Agregado natural		Agregado cerámico	
Masa humedad [g]	2639	Masa humedad [g]	1998
Masa seca [g]	2635	Masa seca [g]	1991
Humedad [%]	0.15%	Humedad [%]	0.35 %
Masa húmeda de ensayo [g]	2693	Masa húmeda de ensayo [g]	1998
Masa seca de ensayo [g]	2693.001518	Masa seca de ensayo [g]	1998.00352
Impurezas	11.00151803	Impurezas	4.00351582
Masa seca retenida en tamiz #35 [g]	2682	Masa seca retenida en tamiz #35 [g]	1994
Coeficiente de limpieza superficial	0.41%	Coeficiente de limpieza superficial	0.20%


Anexo 13. Ensayo de determinación del límite líquido de los suelos.

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA		 Universidad Pontificia Bolivariana	
Ensayo:	Determinación de la limpieza superficial del agregado grueso		
Resultados			
Agregado natural		Agregado cerámico	
Límite líquido	No hay límite	Límite líquido	No hay límite
Límite plástico	No hay límite	Límite plástico	No hay límite
Resultado ensayo		Resultado ensayo	
			


Anexo 14. Ensayo de equivalente de arena de suelos y agregados finos.

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA				 Universidad Pontificia Bolivariana		
Ensayo:	Equivalente de arena de suelos y agregados finos					
Resultados						
Agregado natural				Agregado cerámico		
# Muestra DATO	1	2	3	# Muestra DATO	1	2
Lectura de Arena	2.5	3.2	3.1	Lectura de Arena	3.2	3.1
Lectura de Arcilla	4.7	4.5	4.4	Lectura de Arcilla	3.7	3.7
Equivalente de Arena (EA)	54.00	72.00	71.00	Equivalente de Arena (EA)	87.00	84.00
Equivalente de Arena promedio	66			Equivalente de Arena promedio	86	


Anexo 15. Ensayo de proporción de partículas planas, alargadas o planas y alargadas en agregados gruesos.

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA				 Universidad Pontificia Bolivariana	
Ensayo:		Proporción de partículas planas, alargadas o planas y alargadas en agregados gruesos.			
Resultados					
Agregado natural				Agregado cerámico	
Tolva 1/2"		Tolva 3/4"		Tolva grueso	
Muestra ensayada		Muestra ensayada		Muestra ensayada	
3/4"	2614	1/2"	1298.8	1/2"	3500
1/2"	2367.3	3/8"	664.2	3/8"	1500
Partículas ensayadas		Partículas ensayadas		Partículas ensayadas	
3/4"	100	1/2"	100	1/2"	100
1/2"	100	3/8"	100	3/8"	100
Partículas Planas y Alargadas		Partículas Planas y Alargadas		Partículas Planas y Alargadas	
3/4"	1	1/2"	1	1/2"	1
1/2"	1	3/8"	2	3/8"	0
% Partículas Planas y Alargadas		% Partículas Planas y Alargadas		% Partículas Planas y Alargadas	
3/4"	1%	1/2"	1%	1/2"	1%
1/2"	1%	3/8"	2%	3/8"	0%
Índice Global		1.25%		Índice Global 0.5%	


Anexo 16. Ensayo de porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso.

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA			 Universidad Pontificia Bolivariana	
Ensayo:	Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso			
Resultados				
Agregado natural			Agregado cerámico	
Tolva 1/2"			<p>La preparación de este material se realizó a partir de fragmentos grandes de lozas, las cuales se pusieron en la máquina de Los Ángeles para llegar a los tamaños utilizados dentro de este proyecto. Por tal razón, se considera que todas las partículas del agregado están fracturadas.</p>	
Descripción	Unidad	Dato		
Masa de partículas fracturadas	[g]	2471		
Masa de partículas no fracturadas	[g]	137		
Partículas fracturadas	[%]	94.75%		
Tolva 3/4"				
Masa de partículas fracturadas	[g]	2207		
Masa de partículas no fracturadas	[g]	126		
Partículas fracturadas	[%]	94.60%		
PROMEDIO				
94.67%				

Anexo 17. Ensayo de angularidad de finos.

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA				 Universidad Pontificia Bolivariana	
Ensayo:		Angularidad de finos			
Resultados					
Agregado natural			Agregado cerámico		
Altura del medidor cilíndrico [cm]	9.08		Altura del medidor cilíndrico [cm]	9.084	
Diámetro del medidor cilíndrico [cm]	3.883		Diámetro del medidor cilíndrico [cm]	3.894	
Volumen del medidor cilíndrico [cm ³]	107.53		Volumen del medidor cilíndrico [cm ³]	108.183	
Masa del molde [g]	319		Masa del molde [g]	318.8	
# Ensayo	1	2	# Ensayo	1	2
Masa del molde + agregado [g]	475.4	475.6	Masa del molde + agregado [g]	447.8	447.6
Masa del agregado en el medidor [g]	156.4	156.6	Masa del agregado en el medidor [g]	129	128.8
Densidad relativa seca	2.55	2.55	Densidad relativa seca	1.88	1.88
Vacios en el agregado fino sin compactar [%]	42.96	42.89	Vacios en el agregado fino sin compactar [%]	36.57	36.67
PROMEDIO		42.925 %	PROMEDIO		36.62


Anexo 18. Ensayo de densidad del agregado fino.

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA		 Universidad Pontificia Bolivariana	
Ensayo:	Densidad del agregado fino		
Resultados			
Agregado natural		Agregado cerámico	
Peso superficialmente seco [g]	500	Peso superficialmente seco [g]	500
Peso superficialmente seco [Kg]	0.5	Peso superficialmente seco [Kg]	0.5
Picnómetro con agua [g]	693	Picnómetro con agua [g]	690
Picnómetro con agua [Kg]	0.693	Picnómetro con agua [Kg]	0.69
Picnómetro con agua y muestra [g]	1001	Picnómetro con agua y muestra [g]	947
Picnómetro con agua y muestra [Kg]	1.001	Picnómetro con agua y muestra [Kg]	0.947
Peso muestra seca A [g]	488.8	Peso muestra seca A [g]	458
Peso muestra seca A [Kg]	0.4888	Peso muestra seca A [Kg]	0.458
DENSIDAD RELATIVA (SH)	2.55	DENSIDAD RELATIVA (SH)	1.88
DENSIDAD RELATIVA (SSS)	2.6	DENSIDAD RELATIVA (SSS)	2.06
DENSIDAD RELATIVA APARENTE	2.7	DENSIDAD RELATIVA APARENTE	2.28
DENSIDAD (SH) [Kg/m ³]	2539.47	DENSIDAD (SH) [Kg/m ³]	1880.06
DENSIDAD (SSS) [Kg/m ³]	2597.66	DENSIDAD (SSS) [Kg/m ³]	2052.47
DENSIDAD APARENTE [Kg/m ³]	2696.78	DENSIDAD APARENTE [Kg/m ³]	2272.91
ABSORCIÓN [%]	2.29	ABSORCIÓN [%]	9.17


Anexo 19. Ensayo de densidad del agregado grueso.

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA		 Universidad Pontificia Bolivariana	
Ensayo:	Densidad del agregado grueso		
Resultados			
Agregado natural		Agregado cerámico	
Masa muestra saturada en agua [g]	1849	Masa muestra saturada en agua [g]	1619
Masa muestra saturada en agua [Kg]	1.849	Masa muestra saturada en agua [Kg]	1.619
Masa muestra sss [g]	3000	Masa muestra sss [g]	2968
Masa muestra sss [Kg]	3	Masa muestra sss [Kg]	2.968
Peso muestra seca A [g]	2981	Peso muestra seca A [g]	2757
Peso muestra seca A [Kg]	2.981	Peso muestra seca A [Kg]	2.757
DENSIDAD RELATIVA (SH)	2.59	DENSIDAD RELATIVA (SH)	2.04
DENSIDAD RELATIVA (SSS)	2.61	DENSIDAD RELATIVA (SSS)	2.2
DENSIDAD RELATIVA APARENTE	2.63	DENSIDAD RELATIVA APARENTE	2.42
DENSIDAD (SH) [Kg/m ³]	2583.45	DENSIDAD (SH) [Kg/m ³]	2038.63
DENSIDAD (SSS) [Kg/m ³]	2599.91	DENSIDAD (SSS) [Kg/m ³]	2194.65
DENSIDAD APARENTE [Kg/m ³]	2626.81	DENSIDAD APARENTE [Kg/m ³]	2416.61
ABSORCIÓN [%]	0.637%	ABSORCIÓN [%]	7.653%


Anexo 20. Ensayo de penetración de los materiales bituminosos.

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA		 Universidad Pontificia Bolivariana
Ensayo:	Penetración de los materiales bituminosos	
Resultados		
# De ensayo	Penetración [mm]	
1	61	
2	64	
3	66	
4	63	
Penetración promedio	63.5	

Anexo 21. Ensayo de punto de ablandamiento de materiales bituminosos.

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA		 Universidad Pontificia Bolivariana
Ensayo:	Punto de ablandamiento de materiales bituminosos	
Resultados		
# De ensayo	Penetración [°C]	
Bola 1	58	
Bola 2	62	
Temperatura promedio	60	


Anexo 22. Ensayo de determinación de la viscosidad del asfalto empleando un viscosímetro rotacional.

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA				 Universidad Pontificia Bolivariana			
Ensayo:	Determinación de la viscosidad del asfalto empleando un viscosímetro rotacional						
Resultados							
# De ensayo	Velocidad de. Giro [rpm]	Torque [%]	Temperatura [°C]	Unidades		Promedio	
				cP	Pa.s	Pa*s	P
1	0.56	97.2	59.8	433929	433.929	433.482	4334.82
2	0.56	97.1	59.6	433482	433.482		
3	0.56	97	59.6	433036	433.036		

Anexo 23. Densidad del asfalto.

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA		 Universidad Pontificia Bolivariana	
Ensayo:	Densidad del asfalto		
Resultados			
Masa muestra 1 [g]		9.6	
Volumen desplazado muestra 1 [ml]		10	
Densidad muestra 1 [g/cm ³]		0.96	
Masa muestra 2 [g]		8.3	
Volumen desplazado muestra 2 [ml]		8	
Densidad muestra 2 [g/cm ³]		1.038	
Densidad promedio [g/cm ³]		0.998	


Anexo 24. Gravedad específica Bulk.

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA					 Universidad Pontificia Bolivariana				
Ensayo:		Gravedad específica Bulk							
Resultados									
Mezcla asfáltica convencional					Mezcla asfáltica modificada				
% Asfalto	Peso en el aire [g]	Peso en el agua [g]	Peso húmedo [g]	Gravedad Bulk (Gmb)	% Asfalto	Peso en el aire [g]	Peso en el agua [g]	Peso húmedo [g]	Gravedad Bulk (Gmb)
3.5	1165.4	653.4	1174.5	2.236	3.5	1037.4	541	1043.8	2.063
3.5	1155.5	628.8	1167.1	2.147	3.5	1045.2	543.7	1049.8	2.065
3.5	1165.6	648	1178.9	2.196	3.5	1061	560	1069.1	2.084
4	1159.1	641.6	1171	2.189	4	1071	572.6	1081.3	2.105
4	1163.2	645.5	1172.9	2.206	4	1068.7	567.5	1074.4	2.108
4	1149.1	636.5	1158	2.203	4	1066.9	564.6	1078	2.078
4.5	1164.9	650.3	1174.3	2.223	4.5	1074.5	579.8	1082.5	2.137
4.5	1164.9	650.2	1172.2	2.232	4.5	1074.7	580.7	1084.3	2.134
4.5	1159.5	646.3	1166.7	2.228	4.5	1073.9	581.3	1082.3	2.144
5	1151.1	641.8	1157.3	2.233	5	1074.5	581.1	1084.2	2.136
5	1165.6	652.8	1171.2	2.248	5	1064.9	577.9	1074.3	2.145
5	1164.6	649.1	1170.9	2.232	5	1070.5	579.7	1081.8	2.132
5.5	1163	657.7	1167.2	2.283	5.5	1071.8	585.6	1077.8	2.178
5.5	1166.8	657.5	1171.6	2.27	5.5	1061.8	581	1069	2.176
5.5	1143.9	646.7	1151	2.268	5.5	1068.4	577	1074.5	2.148
6	1151.4	658	1164.6	2.273	6	1069.8	585.1	1074.3	2.187
6	1150.2	649.6	1155.8	2.272	6	1069.1	580	1072.5	2.171
6	1170.6	665.5	1172.7	2.308	6	1071.5	585	1076.2	2.181
6.5	1161.9	664.4	1163.1	2.33	-	-	-	-	-
6.5	1153.8	655.6	1159.1	2.292	-	-	-	-	-
6.5	1161.6	660.5	1163.8	2.308	-	-	-	-	-


NOTA: Las casillas seleccionadas en gris fueron las briquetas descartadas al realizar el análisis del diseño Marshall

Anexo 25. Gravedad específica máxima de mezclas asfálticas para pavimentos.

Anexo 25.1 Gravedad específica máxima de mezclas asfálticas para pavimentos (mezcla asfáltica convencional).

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA		 Universidad Pontificia Bolivariana						
Ensayo:	Gravedad específica máxima de mezclas asfálticas para pavimentos (mezcla asfáltica convencional)							
Resultados								
% Asfalto	3.5%	4%	4.5%	5%	5.5%	5.6%	6%	6.5%
Concepto								
Masa matraz vacío [g]	-	-	-	-	299.96	299.96	-	299.96
Masa matraz + muestra [g]	-	-	-	-	1132.86	1126.46	-	981.15
Masa muestra seca [g]	1020.38	982.597	842.977	898.377	832.9	826.5	899.837	681.19
Masa matraz lleno con agua a 25°C [g]	1312.27	1312.27	1312.27	1312.27	1261.56	1261.56	1312.27	1261.56
Masa matraz con agua y mezcla [g]	1926.4	1906.78	1813.64	1846.27	1757.05	1754.42	1837.87	1653.44
Gmm [g/cm ³]	2.512	2.532	2.468	2.465	2.468	2.477	2.404	2.354

Anexo 25.2 Gravedad específica máxima de mezclas asfálticas para pavimentos (mezcla asfáltica modificada).

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA		 Universidad Pontificia Bolivariana					
Ensayo:	Gravedad específica máxima de mezclas asfálticas para pavimentos (mezcla asfáltica modificada)						
Resultados							
% Asfalto	3.5%	4%	4.5%	5%	5.5%	5.8%	6%
Concepto							
Masa matraz vacío [g]	319.68	319.68	344.01	333.73	344.01	319.68	299.96
Masa matraz + muestra [g]	1243.06	1309.09	1189.36	1282.51	1180.24	1190.5	1270.2
Masa muestra seca [g]	923.38	989.41	845.35	948.78	836.23	870.82	970.24
Masa matraz lleno con agua a 25°C [g]	1294.5	1294.5	1279.48	1270.83	1279.48	1294.5	1261.56
Masa matraz con agua y mezcla [g]	1832.62	1860.6	1759.89	1810.38	1756.14	1794.71	1812.05
Gmm [g/cm ³]	2.397	2.337	2.316	2.318	2.326	2.35	2.311


Anexo 26. Porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA							
Ensayo:		Porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas					
Resultados							
Mezcla asfáltica convencional				Mezcla asfáltica modificada			
% Asfalto	Gravedad específica máxima [g/cm ³]	Gravedad específica bulk	Porcentaje de vacíos con aire [%]	% Asfalto	Gravedad específica máxima [g/cm ³]	Gravedad específica bulk	Porcentaje de vacíos con aire [%]
3.5	2.512	2.236	10.977	3.5	2.397	2.063	13.916
3.5	2.512	2.147	14.521	3.5	2.397	2.065	13.834
3.5	2.512	2.196	12.57	3.5	2.397	2.084	13.047
4	2.532	2.189	13.543	4	2.337	2.105	9.924
4	2.532	2.206	12.872	4	2.337	2.108	9.798
4	2.532	2.203	12.99	4	2.337	2.078	11.09
4.5	2.468	2.223	9.915	4.5	2.316	2.137	7.725
4.5	2.468	2.232	9.551	4.5	2.316	2.134	7.873
4.5	2.468	2.228	9.713	4.5	2.316	2.144	7.464
5	2.466	2.233	9.431	5	2.318	2.136	7.88
5	2.466	2.248	8.822	5	2.318	2.145	7.471
5	2.466	2.232	9.471	5	2.318	2.132	8.04
5.5	2.469	2.283	7.515	5.5	2.326	2.178	6.367
5.5	2.469	2.27	8.042	5.5	2.326	2.176	6.442
5.5	2.469	2.268	8.123	5.5	2.326	2.148	7.658
6	2.404	2.273	5.467	6	2.311	2.187	5.392
6	2.404	2.272	5.509	6	2.311	2.171	6.087
6	2.404	2.308	4.012	6	2.311	2.181	5.628
6.5	2.355	2.33	1.042	-	-	-	-
6.5	2.355	2.292	2.656	-	-	-	-
6.5	2.355	2.308	1.976	-	-	-	-


NOTA: Las casillas seleccionadas en gris fueron las briquetas descartadas al realizar el análisis del diseño Marshall

Anexo 27. Análisis volumétrico de mezclas asfálticas compactadas en caliente.

Anexo 27.1. Análisis volumétrico de mezclas asfálticas compactadas en caliente (mezcla asfáltica convencional)

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA									
Ensayo:		Análisis volumétrico de mezclas asfálticas compactadas en caliente (mezcla asfáltica convencional)							
Resultados									
Densidad Asfalto [g/cm3]		0.99875							
Densidad agregado fino [g/cm3]		2.55							
% Agregado fino en la mezcla [%]		70 %							
Densidad grueso [g/cm3]		2.59							
% Agregado grueso en la mezcla [%]		30%							
Gsb (Gravedad específica Bulk agregado combinado en la mezcla) [g/cm3]		2.562							
% Asfalto	% Agregados	Gmm	Gravedad Bulk (Gmb)	Gravedad específica efectiva del agregado (Gse)	% Asfalto Absorbido (Pba)	Contenido de asfalto efectivo (Pbe)	Vacios entre partículas (VAM)	Vacios llenos de ligante asfáltico (VFA)	Relación Lienante/Ligante efectivo
3.5	96.5	2.512	2.236	2.658	1.404	2.145	15.779	30.433	1.45
3.5	96.5	2.512	2.147	2.658	1.404	2.145	19.131	24.097	1.45
3.5	96.5	2.512	2.196	2.658	1.404	2.145	17.286	27.282	1.45
4	96	2.532	2.189	2.705	2.06	2.022	17.977	24.665	1.54
4	96	2.532	2.206	2.705	2.06	2.022	17.34	25.767	1.54
4	96	2.532	2.203	2.705	2.06	2.022	17.452	25.567	1.54
4.5	95.5	2.468	2.223	2.651	1.315	3.244	17.136	42.139	0.96
4.5	95.5	2.468	2.232	2.651	1.315	3.244	16.801	43.152	0.96
4.5	95.5	2.468	2.228	2.651	1.315	3.244	16.95	42.696	0.96
5	95	2.466	2.233	2.672	1.606	3.474	17.199	45.165	0.9
5	95	2.466	2.248	2.672	1.606	3.474	16.643	46.993	0.9
5	95	2.466	2.232	2.672	1.606	3.474	17.237	45.054	0.9
5.5	94.5	2.469	2.283	2.7	1.989	3.62	15.791	52.41	0.86
5.5	94.5	2.469	2.27	2.7	1.989	3.62	16.27	50.572	0.86
5.5	94.5	2.469	2.268	2.7	1.989	3.62	16.344	50.3	0.86
6	94	2.404	2.273	2.642	1.177	4.894	16.603	67.072	0.64
6	94	2.404	2.272	2.642	1.177	4.894	16.64	66.893	0.64
6	94	2.404	2.308	2.642	1.177	4.894	15.319	73.81	0.64
6.5	93.5	2.355	2.33	2.6	0.568	5.969	14.967	93.038	0.52
6.5	93.5	2.355	2.292	2.6	0.568	5.969	16.354	83.759	0.52
6.5	93.5	2.355	2.308	2.6	0.568	5.969	15.77	87.47	0.52

Anexo 27.1. Análisis volumétrico de mezclas asfálticas compactadas en caliente (mezcla asfáltica modificada)

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA				 Universidad Pontificia Bolivariana					
Ensayo:		Análisis volumétrico de mezclas asfálticas compactadas en caliente (mezcla asfáltica modificada)							
Resultados									
Densidad Asfalto [g/cm ³]						0.99875			
Densidad agregado fino [g/cm ³]		Agregado Natural		2.55		Agregado Cerámico		1.88	
% Agregado fino en la mezcla [%]		Agregado Natural		49		Agregado Cerámico		21	
Densidad grueso [g/cm ³]		Agregado Natural		2.59		Agregado Cerámico		2.04	
% Agregado grueso en la mezcla [%]		Agregado Natural		21		Agregado Cerámico		9	
Gsb (Gravedad específica Bulk agregado combinado en la mezcla) [g/cm ³]						2.372			
% Asfalto	% Agregados	Gmm	Gravedad Bulk (Gmb)	Gravedad específica efectiva del agregado (Gse)	% Asfalto Absorbido (Pba)	Contenido de asfalto efectivo (Pbe)	Vacios entre partículas (VAM)	Vacios llenos de ligante asfáltico (VFA)	Relación Llenante/Ligante efectivo
3.5	96.5	2.397	2.063	2.525	2.551	1.038	16.061	13.355	3.22
3.5	96.5	2.397	2.065	2.525	2.551	1.038	15.981	13.435	3.22
3.5	96.5	2.397	2.084	2.525	2.551	1.038	15.214	14.243	3.22
4	96	2.337	2.105	2.476	1.769	2.302	14.791	32.905	1.45
4	96	2.337	2.108	2.476	1.769	2.302	14.672	33.22	1.45
4	96	2.337	2.078	2.476	1.769	2.302	15.894	30.225	1.45
4.5	95.5	2.316	2.137	2.47	1.671	2.904	13.943	44.596	1.15
4.5	95.5	2.316	2.134	2.47	1.671	2.904	14.081	44.088	1.15
4.5	95.5	2.316	2.144	2.47	1.671	2.904	13.699	45.514	1.15
5	95	2.318	2.136	2.492	2.028	3.073	14.462	45.512	1.09
5	95	2.318	2.145	2.492	2.028	3.073	14.082	46.946	1.09
5	95	2.318	2.132	2.492	2.028	3.073	14.61	44.969	1.09
5.5	94.5	2.326	2.178	2.521	2.489	3.148	13.246	51.933	1.06
5.5	94.5	2.326	2.176	2.521	2.489	3.148	13.316	51.622	1.06
5.5	94.5	2.326	2.148	2.521	2.489	3.148	14.443	46.978	1.06
6	94	2.311	2.187	2.523	2.52	3.631	13.338	59.574	0.92
6	94	2.311	2.171	2.523	2.52	3.631	13.975	56.444	0.92
6	94	2.311	2.181	2.523	2.52	3.631	13.554	58.477	0.92

NOTA: Las casillas seleccionadas en gris fueron las briquetas descartadas al realizar el análisis del diseño Marshall

Anexo 28. Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall.

Anexo 28.1 Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall mezclas asfáltica convencional

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA				 Universidad Pontificia Bolivariana		
Ensayo:		Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall mezclas asfáltica convencional				
Resultados						
% Asfalto	Altura promedio [mm]	Diámetro promedio [mm]	Corrección	Fuerza máxima [KN]	Estabilidad corregida [KN]	Flujo [mm]
3.5	65.66	101.44	0.9596	12.887	12.306	3.562
3.5	68.18	101.62	0.9061	12.74	11.543	3.066
3.5	67.91	101.65	0.9112	14.903	13.58	3.337
4	67.29	101.51	0.9229	14.231	13.118	2.525
4	67.78	101.61	0.9136	13.391	12.236	2.998
4	67.13	101.43	0.925	13.139	12.166	3.335
4.5	66.35	101.59	0.9109	16.464	15.498	3.105
4.5	66	101.42	0.9478	17.598	16.681	3.296
4.5	66.57	101.32	0.9367	16.765	16.058	4.004
5	64.98	101.8	0.9885	17.094	16.555	3.389
5	64.74	102.29	0.9733	17.318	16.856	3.263
5	65.91	101.56	0.9796	18.06	17.15	3.323
5.5	64.28	101.58	0.983	17.444	17.15	3.47
5.5	64.96	101.36	0.9688	19.495	18.886	3.666
5.5	63.87	101.51	0.9918	18.746	18.599	3.336
6	64.11	102.12	0.986	19.439	19.18	3.138
6	64.9	101.25	0.97	18.046	17.507	3.804
6	63.67	101.8	0.9962	18.809	18.739	3.804
6.5	61.92	101.83	1.03687	13.076	13.559	3.517
6.5	64.64	100.7	0.97544	11.956	11.662	4.438
6.5	63.57	101.47	0.99844	11.879	11.858	3.371

Anexo 28.1 Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato


Marshall mezclas asfáltica modificada


UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA						
Ensayo:	Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall mezclas asfáltica convencional					
Resultados						
% Asfalto	Altura promedio [mm]	Diámetro promedio [mm]	Corrección	Fuerza máxima [KN]	Estabilidad corregida [KN]	Flujo [mm]
3.5	64.01	101.46	0.98817	7.04	6.955	2.561
3.5	65.08	101.1	0.96633	5.4	5.215	2.945
3.5	65.22	101.17	0.96347	10.975	10.575	3.724
4	64.21	101.38	0.98453	12.085	11.9	3.383
4	64.93	101.34	0.96941	11.46	11.105	3.447
4	63.75	102.18	0.99448	11.375	11.31	3.33
4.5	63.95	101.07	0.99012	13.715	13.58	3.864
4.5	65.26	101.48	0.96266	12.525	12.06	3.917
4.5	63.76	101	0.99426	12.88	12.805	2.935
5	64.04	101.35	0.98817	13.915	13.75	3.656
5	63.89	101.73	0.99143	13.385	13.27	3.696
5	64.18	101.73	0.98517	13.83	13.6105	2.92
5.5	62.87	101.41	0.98817	14.385	14.215	3.399
5.5	62.08	101.28	1.03296	13.925	14.38	3.616
5.5	63.54	101.33	0.99911	13.87	13.855	3.028
6	62.08	101.62	1.03296	15.73	16.25	3.839
6	62.89	101.5	1.01380	14.1	14.295	3.08
6	62.3	101.74	1.02790	14.98	15.4	2.997

NOTA: Las casillas seleccionadas en gris fueron las briquetas descartadas al realizar el análisis del diseño Marshall

Anexo 29. Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta.


Anexo 29.1. Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta (mezcla asfáltica convencional).

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA								
Ensayo:		Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta (mezcla asfáltica convencional) Parte 1						
Resultados								
Briqueta	1	2	3	4	5	6	7	8
%Asfalto	5.6%		5.6%	5.6%		5.6%	5.6%	5.6%
Peso en el aire [g]	1157.2		1143.8	1170.3		1169.6	1166.6	1164.50
Peso en el agua [g]	655.5		648.4	662.3		660.2	658.3	659.50
Peso húmedo [g]	1161.4		1148.4	1172.5		1172.5	1165.4	1169.5
Gravedad específica Bulk (Gmb)	2.287		2.288	2.294		2.283	2.30	2.283
Gmm [g/cm ³]	2.477		2.477	2.477		2.477	2.477	2.477
Vacios con aire [%]	7.66%		7.65%	7.40%		7.84%	7.13%	7.83%
Altura [cm]	6.475		6.725	6.436		6.403	6.426	6.525
Diámetro [cm]	10.125		10.1	10.128		10.201	10.14	10.1
Volumen espécimen [cm ³]	521.338		538.797	518.505		523.31	518.927	522.773
Volumen de vacíos [cm ³]	39.947		41.243	38.390		41.021	37.013	40.917
Masa espécimen húmedo [g]	1161.4		1148.4	1196		1199	1196	1169.5
Agua absorbida [g]	4.2		4.6	25.7		29.4	29.4	5
Grado de saturación [%]	10.514		11.153	66.944		71.670	79.432	12.220

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA		 Universidad Pontificia Bolivariana						
Ensayo:	Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta (mezcla asfáltica convencional) Parte 2							
Resultados								
Sección exclusiva para grupo húmedo								
Briqueta	1	2	3	4	5	6	7	8
Masa espécimen húmedo [g]				1201.3		1199.6	1199.4	
Agua absorbida [g]				31		30	32.8	
Grado de saturación [%]				80.749		73.133	88.618	
Altura [cm]				63.86		63.51	64.06	
Diámetro [cm]				101.37		101.75	101.39	
Volumen espécimen [cm ³]				515.392		516.417	517.21	
Cambio volumétrico [%]				0.600%		1.317%	0.331%	
Resistencia a la tensión indirecta								
Briqueta	1	2	3	4	5	6	7	8
Carga máxima [KN]	13.83		13.56	11.555		9.368	12.08	14.52
Resistencia a la tensión indirecta [kPa]	1342.974		1270.943	1136.349		922.891	1184.036	1402.636
Promedios								
Promedio húmedo				Promedio seco				
1081.092				1338.851				
Relación resistencias a tensión								
80.748								


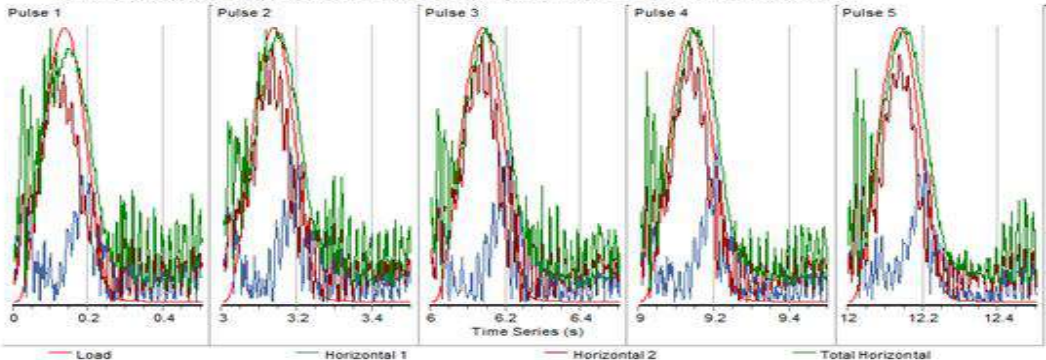
Anexo 29.1. Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta (mezcla asfáltica modificada).

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA								
Ensayo:	Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta (mezcla asfáltica modificada) Parte 1							
Resultados								
Briqueta	1	2	3	4	5	6	7	8
%Asfalto	5.8%	5.8%	5.8%	5.8%	5.8%	5.8%	5.8%	5.8%
Peso en el aire [g]	1071.9	1066.9	1082.5	1063.1	1060.7	1073.2	1072.9	1074
Peso en el agua [g]	594.8	594.4	596.9	582.6	576.7	585.5	588.9	586.1
Peso húmedo [g]	1088.6	1080.2	1097.6	1072.1	1066.2	1080.6	1083.1	1078.8
Gravedad específica Bulk (Gmb)	2.171	2.196	2.162	2.172	2.167	2.168	2.171	2.180
Gmm [g/cm ³]	2.350	2.350	2.350	2.350	2.350	2.350	2.350	2.350
Vacíos con aire [%]	7.617%	6.534%	7.989%	7.571%	7.779%	7.748%	7.606%	7.229%
Altura [cm]	6.310	6.150	6.390	6.230	6.180	6.290	6.330	6.200
Diámetro [cm]	10.140	10.150	10.130	10.150	10.120	10.100	10.120	10.160
Volumen espécimen [cm ³]	509.560	497.619	515.003	504.092	497.095	503.945	509.160	502.654
Volumen de vacíos [cm ³]	38.813	32.513	41.144	38.163	38.670	39.045	38.725	36.339
Masa espécimen húmedo [g]	1093.800	1080.200	1097.600	1084.800	1066.200	1080.600	1096.600	1098.900
Agua absorbida [g]	21.900	13.300	15.100	21.700	5.500	7.400	23.700	24.900
Grado de saturación [%]	56.424	40.907	36.700	56.862	14.223	18.953	61.201	68.522

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA				 Universidad Pontificia Bolivariana				
Ensayo:		Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta (mezcla asfáltica convencional) Parte 2						
Resultados								
Sección exclusiva para grupo húmedo								
Briqueta	1	2	3	4	5	6	7	8
Masa espécimen húmedo [g]	1105.200			1097.500			1106.700	1109.000
Agua absorbida [g]	33.300			34.400			33.800	35.000
Grado de saturación [%]	85.795			90.140			87.282	96.316
Altura [cm]	62.490			68.410			62.680	61.810
Diámetro [cm]	101.350			101.520			101.030	101.490
Volumen espécimen [cm ³]	504.136			553.749			502.481	500.029
Cambio volumétrico [%]	1.064%			-9.851%			1.312%	0.522%
Resistencia a la tensión indirecta								
Briqueta	1	2	3	4	5	6	7	8
Carga máxima [KN]	8.762	11.020	12.340	9.001	10.010	11.100	8.591	10.302
Resistencia a la tensión indirecta [kPa]	880.743	1123.882	1213.626	825.087	1018.932	1112.323	863.663	1045.489
Promedios								
Promedio húmedo				Promedio seco				
903.746				1117.191				
Relación resistencias a tensión								
80.894								

Anexo 30. Ensayo de módulos resilientes.

Anexo 30.1. Ensayo de módulos resilientes (mezcla asfáltica convencional).

<p>UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA</p>																																																																																																											
<p>Ensayo:</p>	<p>Ensayo de módulos resilientes (mezcla asfáltica convencional) a 5°C. Muestra 1 Lado A</p>																																																																																																										
<p>Resultados</p>																																																																																																											
<p>Dbcomm</p> <p><u>General Information</u></p> <p>Project name: mezcla asfaltica MSC 25 CONVENCIONAL Operator name: Edwin Rangel Data file: C:\Users\Administrador\Desktop\mezclas asfalticas\5* CMF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C MSC 25 35% 3-2.tld Test standards: EN12697-26C Module type: Universal Test Module Version: 2.1.8.4 Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio IDT 5 Pulse Modulus test Method file: C:\Pavetest\Testlab-Methods\Methods\UPB Bucar\21May18\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C.mtf</p>  <p><u>Test Data</u></p> <p>Test Date and Time: Jue., ene. 24 2019, 3:23 PM</p> <p>Total Pulses: 10 Actuator Displacement (mm): -20.50 Load (N): 53.10 Horizontal LVDT 1 (mm): -0.00104 Horizontal LVDT 2 (mm): 0.00138 Core Temperature (°C): 5.5 Surface Temperature (°C): 5.3</p> <table border="1" data-bbox="332 1396 1299 1596"> <thead> <tr> <th>Seq: 1</th> <th>Cycle</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>Mean</th> <th>SD</th> <th>CV %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Stiffness modulus (MPa)</td> <td></td> <td>16392</td> <td>14967</td> <td>15014</td> <td>15073</td> <td>16120</td> <td>15513</td> <td>613</td> <td>3.95</td> </tr> <tr> <td>Adjusted stiffness modulus (MPa)</td> <td></td> <td>15264</td> <td>13929</td> <td>13993</td> <td>14153</td> <td>15044</td> <td>14477</td> <td>562</td> <td>3.88</td> </tr> <tr> <td>Peak loading force (N)</td> <td></td> <td>4647</td> <td>4650</td> <td>5144</td> <td>5491</td> <td>5698</td> <td>5126</td> <td>428</td> <td>8.35</td> </tr> <tr> <td>Load rise time (ms)</td> <td></td> <td>124.0</td> <td>120.0</td> <td>124.0</td> <td>126.0</td> <td>124.0</td> <td>123.6</td> <td>2.0</td> <td>1.59</td> </tr> <tr> <td>Load area factor</td> <td></td> <td>0.511</td> <td>0.509</td> <td>0.510</td> <td>0.520</td> <td>0.513</td> <td>0.513</td> <td>0.004</td> <td>0.75</td> </tr> <tr> <td>Peak horizontal deformation (µm)</td> <td></td> <td>3.52</td> <td>3.86</td> <td>4.26</td> <td>4.53</td> <td>4.39</td> <td>4.11</td> <td>0.37</td> <td>8.98</td> </tr> <tr> <td>Horizontal deformation 1 (µm)</td> <td></td> <td>1.52</td> <td>1.78</td> <td>1.94</td> <td>2.17</td> <td>1.86</td> <td>1.86</td> <td>0.21</td> <td>11.43</td> </tr> <tr> <td>Horizontal deformation 2 (µm)</td> <td></td> <td>2.00</td> <td>2.08</td> <td>2.32</td> <td>2.35</td> <td>2.53</td> <td>2.26</td> <td>0.19</td> <td>8.51</td> </tr> <tr> <td>Seating force (N)</td> <td></td> <td>48.5</td> <td>52.0</td> <td>51.0</td> <td>51.3</td> <td>53.1</td> <td>51.2</td> <td>1.5</td> <td>2.95</td> </tr> </tbody> </table> <p><u>Input Parameters</u></p> <p>Gauge length(0=dia) (mm): 0.00 Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1 Target temperature (°C): 25.0</p> <p><u>Loading Parameters</u></p> <p>Target Dc deformation (µm): 5.000 Retries: 10</p> <table border="1" data-bbox="332 1680 722 1732"> <tbody> <tr> <td>Seq (Seq 0 = conditioning)</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Loading Cycles</td> <td>5</td> <td>5</td> </tr> </tbody> </table> <p>Page: 1 of 1 Printed 24/01/2019 3:25:49 p.m.</p>		Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV %	Stiffness modulus (MPa)		16392	14967	15014	15073	16120	15513	613	3.95	Adjusted stiffness modulus (MPa)		15264	13929	13993	14153	15044	14477	562	3.88	Peak loading force (N)		4647	4650	5144	5491	5698	5126	428	8.35	Load rise time (ms)		124.0	120.0	124.0	126.0	124.0	123.6	2.0	1.59	Load area factor		0.511	0.509	0.510	0.520	0.513	0.513	0.004	0.75	Peak horizontal deformation (µm)		3.52	3.86	4.26	4.53	4.39	4.11	0.37	8.98	Horizontal deformation 1 (µm)		1.52	1.78	1.94	2.17	1.86	1.86	0.21	11.43	Horizontal deformation 2 (µm)		2.00	2.08	2.32	2.35	2.53	2.26	0.19	8.51	Seating force (N)		48.5	52.0	51.0	51.3	53.1	51.2	1.5	2.95	Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1	Loading Cycles	5	5
Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV %																																																																																																		
Stiffness modulus (MPa)		16392	14967	15014	15073	16120	15513	613	3.95																																																																																																		
Adjusted stiffness modulus (MPa)		15264	13929	13993	14153	15044	14477	562	3.88																																																																																																		
Peak loading force (N)		4647	4650	5144	5491	5698	5126	428	8.35																																																																																																		
Load rise time (ms)		124.0	120.0	124.0	126.0	124.0	123.6	2.0	1.59																																																																																																		
Load area factor		0.511	0.509	0.510	0.520	0.513	0.513	0.004	0.75																																																																																																		
Peak horizontal deformation (µm)		3.52	3.86	4.26	4.53	4.39	4.11	0.37	8.98																																																																																																		
Horizontal deformation 1 (µm)		1.52	1.78	1.94	2.17	1.86	1.86	0.21	11.43																																																																																																		
Horizontal deformation 2 (µm)		2.00	2.08	2.32	2.35	2.53	2.26	0.19	8.51																																																																																																		
Seating force (N)		48.5	52.0	51.0	51.3	53.1	51.2	1.5	2.95																																																																																																		
Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1																																																																																																									
Loading Cycles	5	5																																																																																																									

UNIVERSIDAD PONTIFICIA
BOLIVARIANA
SECCIONAL BUCARAMANGA



Ensayo:

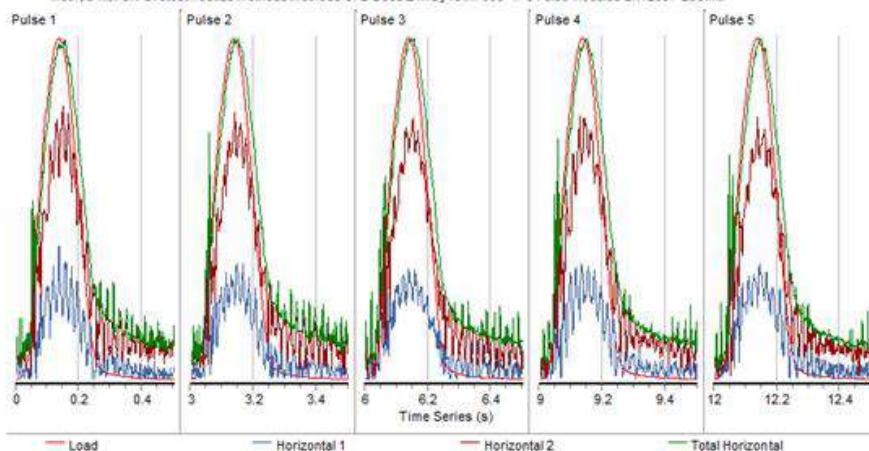
Ensayo de módulos resilientes (mezcla asfáltica convencional) a 5°C. Muestra 1 Lado B

Resultados

Dbcomm

General Information

Project name: mezcla asfáltica MSC 25 CONVENCIONAL
Operator name: Edwin Rangel
Data file: C:\Users\Administrador\Desktop\mezclas asfálticas\25°C\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C MSC 25 CONV 2-1(1).tif
Test standards: EN12697-26C Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio
Module type: Universal Test Module IDT 5 Pulse Modulus test
Version: 2.1.8.4
Method file: C:\Pavetest\Testlab-Methods-Methods UPB Buca\21May18\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C.mtf



Test Data

Test Date and Time: jue., ene. 24 2019, 3:54 PM

Total Pulses: 10 Actuator Displacement (mm): -16.45 Load (N): 49.21
Horizontal LVDT 1 (mm): 0.00024 Horizontal LVDT 2 (mm): 0.00028 Core Temperature (°C): 5.6
Surface Temperature (°C): 5.3

Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)		16503	15545	16769	15379	16678	16175	590	3.65
Adjusted stiffness modulus (MPa)		15377	14387	15540	14336	15514	15031	550	3.66
Peak loading force (N)		6667	6673	6665	6596	6611	6642	32	0.48
Load rise time (ms)		122.0	120.0	120.0	118.0	120.0	120.0	1.3	1.05
Load area factor		0.512	0.502	0.505	0.511	0.510	0.508	0.004	0.70
Peak horizontal deformation (µm)		5.02	5.33	4.94	5.33	4.93	5.11	0.18	3.60
Horizontal deformation 1 (µm)		1.60	2.08	1.94	2.25	1.83	1.94	0.22	11.33
Horizontal deformation 2 (µm)		3.42	3.25	3.00	3.08	3.10	3.17	0.15	4.73
Seating force (N)		49.4	50.1	49.2	49.2	49.2	49.4	0.4	0.72

Input Parameters

Gauge length(0=dia) (mm): 0.00 Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1 Target temperature (°C): 25.0

Loading Parameters

Target Deformation (µm): 5.000 Retries: 10

Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1
Loading Cycles	5	5

UNIVERSIDAD PONTIFICIA
BOLIVARIANA
SECCIONAL BUCARAMANGA



Ensayo:

Ensayo de módulos resilientes (mezcla asfáltica convencional) a 5°C. Muestra 2 Lado A

Resultados

Dbcomm

General Information

Project name: mezcla asfáltica MSC 25 CONVENCIONAL

Operator name: Edwin Rangel

Data file:

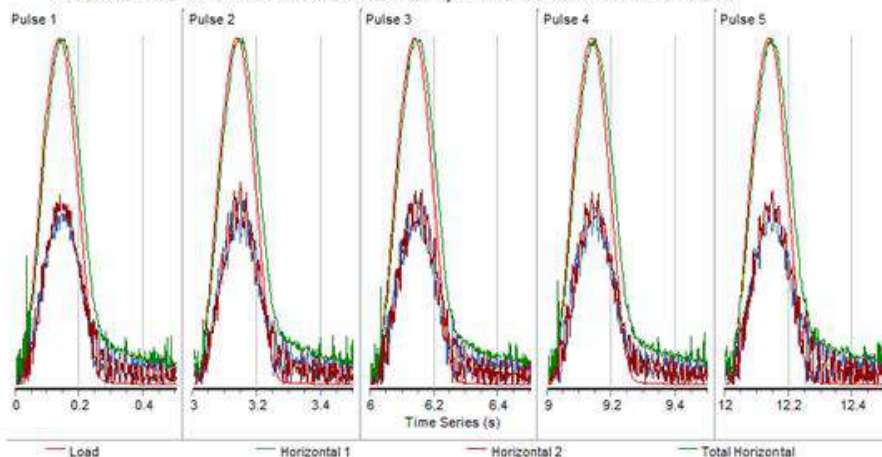
Test standards: EN12697-26C

Module type: Universal Test Module

Version: 2.1.8.4

Method file: C:\Pavetest\Testlab\Methods\Methods UPB Bucar\21May18\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C.mtf

Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio
IDT 5 Pulse Modulus test



Test Data

Test Date and Time: vie., ene. 25 2019, 11:03 AM

Total Pulses: 10

Actuator Displacement (mm): -38.93

Load (N): 50.81

Horizontal LVDT 1 (mm): -0.00014

Horizontal LVDT 2 (mm): -0.00002

Core Temperature (°C): 5.4

Surface Temperature (°C): 5.6

Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)		24847	22993	23496	24017	24071	23885	620	2.60
Adjusted stiffness modulus (MPa)		23204	21453	21798	22532	22470	22291	611	2.74
Peak loading force (N)		7268	7267	7334	7329	7329	7305	31	0.42
Load rise time (ms)		124.0	122.0	124.0	126.0	126.0	124.4	1.5	1.20
Load area factor		0.520	0.518	0.512	0.525	0.519	0.519	0.004	0.80
Peak horizontal deformation (µm)		4.67	5.05	4.98	4.87	4.86	4.89	0.13	2.63
Horizontal deformation 1 (µm)		2.27	2.33	2.46	2.11	2.32	2.30	0.11	4.89
Horizontal deformation 2 (µm)		2.40	2.71	2.53	2.76	2.54	2.59	0.13	5.16
Seating force (N)		48.3	49.9	49.4	52.0	50.8	50.1	1.2	2.48

Input Parameters

Gauge length(0=dia) (mm): 0.00

Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1

Target temperature (°C): 25.0

Loading Parameters

Target Deformation (µm): 5.000

Retries: 10

Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1
Loading Cycles	5	5

UNIVERSIDAD PONTIFICIA
BOLIVARIANA
SECCIONAL BUCARAMANGA



Ensayo:

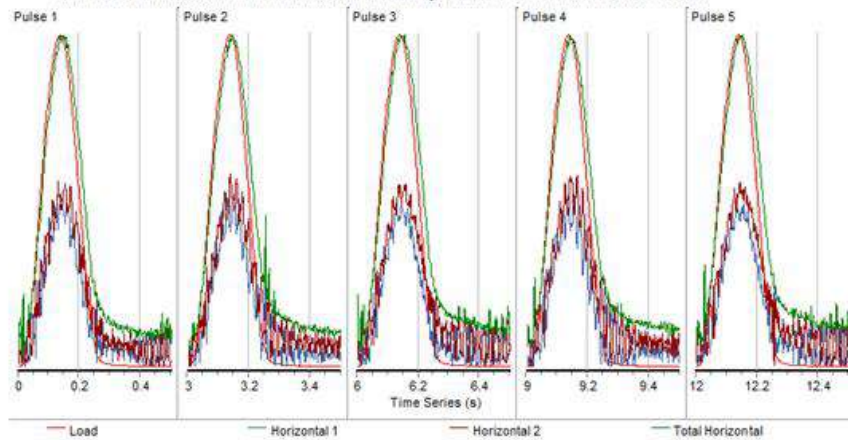
Ensayo de módulos resilientes (mezcla asfáltica convencional) a 5°C. Muestra 2 Lado B

Resultados

Dbcomm

General Information

Project name: mezcla asfáltica MSC 25 CONVENCIONAL
 Operator name: Edwin Rangel
 Data file: C:\Users\Administrador\Desktop\mezclas asfálticas\5° CMF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C MSC 25 CONV 2-2(1).td
 Test standards: EN12697-26C Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio: IDT 5 Pulse Modulus test
 Module type: Universal Test Module Version: 2.1.8.4
 Method file: C:\Pavetest\Testlab\Methods\Methods\UPB Bucal\21May18\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C.mff



Test Data

Test Date and Time: vie., ene. 25 2019, 3:41 PM

Total Pulses: 10 Actuator Displacement (mm): -29.85 Load (N): 48.52
 Horizontal LVDT 1 (mm): -0.00055 Horizontal LVDT 2 (mm): 0.00003 Core Temperature (°C): 5.4
 Surface Temperature (°C): 5.2

Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)		25179	24751	25392	24396	25654	25074	450	1.79
Adjusted stiffness modulus (MPa)		23458	23014	23650	22684	23874	23336	432	1.85
Peak loading force (N)		7367	7375	7433	7483	7547	7441	68	0.91
Load rise time (ms)		126.0	122.0	126.0	122.0	122.0	123.6	2.0	1.59
Load area factor		0.518	0.515	0.518	0.515	0.517	0.516	0.001	0.21
Peak horizontal deformation (µm)		4.67	4.76	4.67	4.90	4.70	4.74	0.08	1.79
Horizontal deformation 1 (µm)		2.46	2.40	2.33	2.14	1.89	2.24	0.21	9.20
Horizontal deformation 2 (µm)		2.21	2.36	2.34	2.75	2.81	2.49	0.24	9.59
Seating force (N)		52.9	50.8	50.1	47.4	48.5	49.9	1.9	3.79

Input Parameters


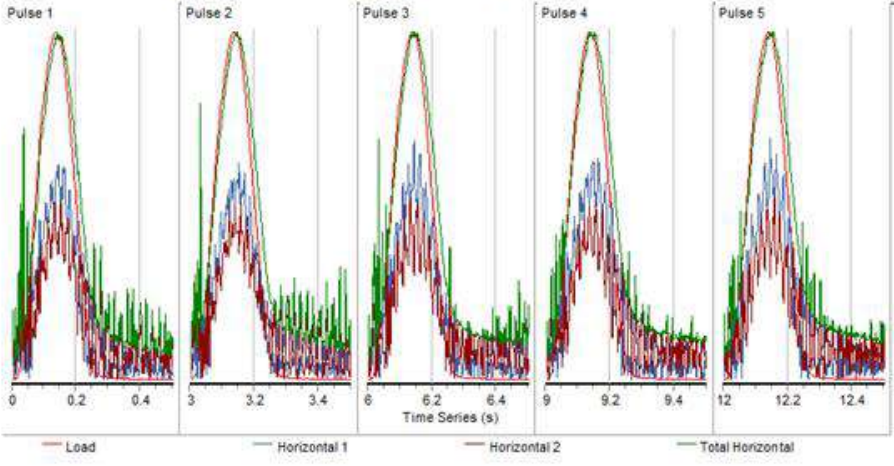

Gauge length(0=dia) (mm): 0.00 Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1 Target temperature (°C): 25.0


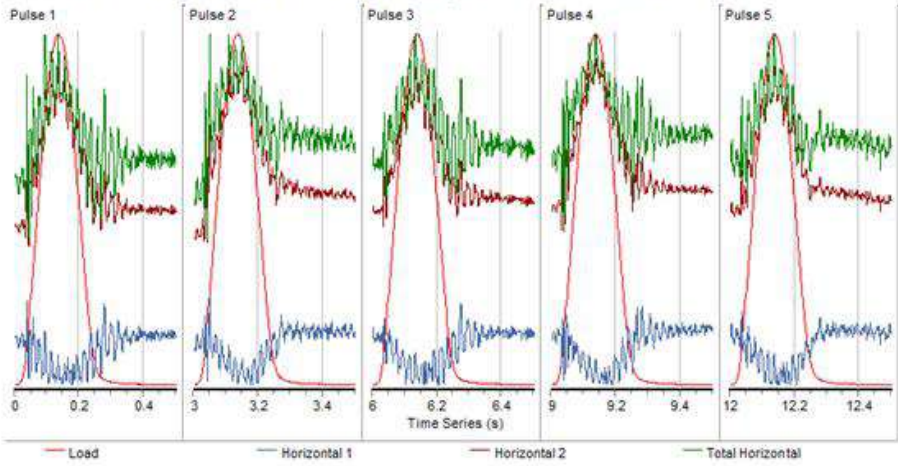
Loading Parameters


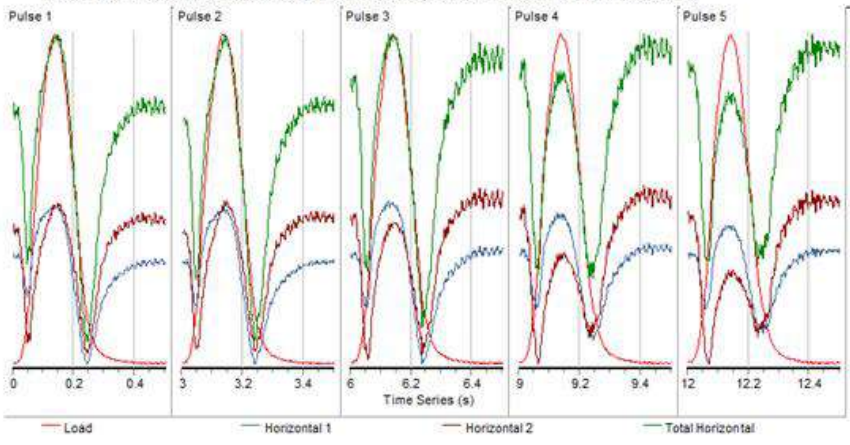
Target Deformation (µm): 5.000

Retries: 10

Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1
Loading Cycles	5	5

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA		 Universidad Pontificia Bolivariana																																																																																																					
Ensayo:	Ensayo de módulos resilientes (mezcla asfáltica convencional) a 5°C. Muestra 3 Lado A																																																																																																						
Resultados																																																																																																							
<p>Dbcomm</p> <p><u>General Information</u></p> <p>Project name: mezcla asfáltica MSC 25 CONVENCIONAL Operator name: Edwin Rangel Data file: C:\Users\Administrador\Desktop\mezclas asfálticas\5° CMF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C MSC 25 CONV 2-2(2).td Test standards: EN12697-26C Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio Module type: Universal Test Module IDT 5 Pulse Modulus test Version: 2.1.8.4 Method file: C:\Pavetest\Testlab-Methods-Methods UPB Buca\21May18\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C.mtf</p>																																																																																																							
																																																																																																							
<p><u>Test Data</u></p> <p>Test Date and Time: vie., ene. 25 2019, 4:19 PM</p> <p>Total Pulses: 10 Actuator Displacement (mm): -25.75 Load (N): 49.67 Horizontal LVDT 1 (mm): -0.00023 Horizontal LVDT 2 (mm): -0.00012 Core Temperature (°C): 5.5 Surface Temperature (°C): 5.3</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Seq: 1</th> <th>Cycle</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>Mean</th> <th>SD</th> <th>CV%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Stiffness modulus (MPa)</td> <td></td> <td>23417</td> <td>23498</td> <td>21815</td> <td>23312</td> <td>21348</td> <td>22678</td> <td>909</td> <td>4.01</td> </tr> <tr> <td>Adjusted stiffness modulus (MPa)</td> <td></td> <td>21806</td> <td>21906</td> <td>20456</td> <td>21877</td> <td>20015</td> <td>21212</td> <td>810</td> <td>3.82</td> </tr> <tr> <td>Peak loading force (N)</td> <td></td> <td>7939</td> <td>7947</td> <td>8138</td> <td>8333</td> <td>8406</td> <td>8152</td> <td>192</td> <td>2.36</td> </tr> <tr> <td>Load rise time (ms)</td> <td></td> <td>126.0</td> <td>122.0</td> <td>124.0</td> <td>124.0</td> <td>124.0</td> <td>124.0</td> <td>1.3</td> <td>1.02</td> </tr> <tr> <td>Load area factor</td> <td></td> <td>0.516</td> <td>0.518</td> <td>0.523</td> <td>0.525</td> <td>0.523</td> <td>0.521</td> <td>0.003</td> <td>0.65</td> </tr> <tr> <td>Peak horizontal deformation (µm)</td> <td></td> <td>4.26</td> <td>4.25</td> <td>4.69</td> <td>4.49</td> <td>4.95</td> <td>4.53</td> <td>0.27</td> <td>5.86</td> </tr> <tr> <td>Horizontal deformation 1 (µm)</td> <td></td> <td>2.21</td> <td>2.48</td> <td>3.35</td> <td>2.69</td> <td>3.03</td> <td>2.75</td> <td>0.40</td> <td>14.57</td> </tr> <tr> <td>Horizontal deformation 2 (µm)</td> <td></td> <td>2.04</td> <td>1.77</td> <td>1.33</td> <td>1.80</td> <td>1.92</td> <td>1.77</td> <td>0.24</td> <td>13.51</td> </tr> <tr> <td>Seating force (N)</td> <td></td> <td>47.8</td> <td>49.0</td> <td>53.3</td> <td>51.3</td> <td>49.7</td> <td>50.2</td> <td>1.9</td> <td>3.81</td> </tr> </tbody> </table>				Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%	Stiffness modulus (MPa)		23417	23498	21815	23312	21348	22678	909	4.01	Adjusted stiffness modulus (MPa)		21806	21906	20456	21877	20015	21212	810	3.82	Peak loading force (N)		7939	7947	8138	8333	8406	8152	192	2.36	Load rise time (ms)		126.0	122.0	124.0	124.0	124.0	124.0	1.3	1.02	Load area factor		0.516	0.518	0.523	0.525	0.523	0.521	0.003	0.65	Peak horizontal deformation (µm)		4.26	4.25	4.69	4.49	4.95	4.53	0.27	5.86	Horizontal deformation 1 (µm)		2.21	2.48	3.35	2.69	3.03	2.75	0.40	14.57	Horizontal deformation 2 (µm)		2.04	1.77	1.33	1.80	1.92	1.77	0.24	13.51	Seating force (N)		47.8	49.0	53.3	51.3	49.7	50.2	1.9	3.81
Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%																																																																																														
Stiffness modulus (MPa)		23417	23498	21815	23312	21348	22678	909	4.01																																																																																														
Adjusted stiffness modulus (MPa)		21806	21906	20456	21877	20015	21212	810	3.82																																																																																														
Peak loading force (N)		7939	7947	8138	8333	8406	8152	192	2.36																																																																																														
Load rise time (ms)		126.0	122.0	124.0	124.0	124.0	124.0	1.3	1.02																																																																																														
Load area factor		0.516	0.518	0.523	0.525	0.523	0.521	0.003	0.65																																																																																														
Peak horizontal deformation (µm)		4.26	4.25	4.69	4.49	4.95	4.53	0.27	5.86																																																																																														
Horizontal deformation 1 (µm)		2.21	2.48	3.35	2.69	3.03	2.75	0.40	14.57																																																																																														
Horizontal deformation 2 (µm)		2.04	1.77	1.33	1.80	1.92	1.77	0.24	13.51																																																																																														
Seating force (N)		47.8	49.0	53.3	51.3	49.7	50.2	1.9	3.81																																																																																														
<p><u>Input Parameters</u></p> <p>Gauge length(0=dia) (mm): 0.00 Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1 Target temperature (°C): 25.0</p>																																																																																																							
<p><u>Loading Parameters</u></p> <p>Target Deformation (µm): 5.000 Retries: 10</p> <table border="1"> <tr> <td>Seq (Seq 0 = conditioning)</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Loading Cycles</td> <td>5</td> <td>5</td> </tr> </table>				Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1	Loading Cycles	5	5																																																																																														
Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1																																																																																																					
Loading Cycles	5	5																																																																																																					
Page: 1 of 1		Printed 25/01/2019 4:20:43 p. m. 																																																																																																					

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA																																																																																																																									
Ensayo:	Ensayo de módulos resilientes (mezcla asfáltica convencional) a 5°C. Muestra 3 Lado B																																																																																																																								
Resultados																																																																																																																									
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>Dbcomm</p> <p><u>General Information</u></p> <p>Project name: mezcla asfáltica MSC 25 CONVENCIONAL Operator name: Edwin Rangel Data file: C:\Users\Administrador\Desktop\mezclas asfálticas\5' CMF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C MSC 25 CONV 2-3(1).tld Test standards: EN12697-26C Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio Module type: Universal Test Module IDT 5 Pulse Modulus test Version: 2.1.8.4 Method file: C:\Pavetest\Testlab-Methods-Methods UPB Bucal\21May18MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C.mtf</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">  </div> <p style="font-size: small; text-align: center;"> — Load — Horizontal 1 — Horizontal 2 — Total Horizontal </p> </div>																																																																																																																									
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p><u>Test Data</u></p> <p>Test Date and Time: vie., ene. 25 2019, 4:49 PM</p> <table style="width: 100%; font-size: x-small;"> <tr> <td>Total Pulses: 10</td> <td>Actuator Displacement (mm): -20.58</td> <td>Load (N): 50.13</td> </tr> <tr> <td>Horizontal LVDT 1 (mm): 0.00117</td> <td>Horizontal LVDT 2 (mm): -0.00356</td> <td>Core Temperature (°C): 5.6</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Surface Temperature (°C): 5.3</td> </tr> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; font-size: x-small;"> <thead> <tr> <th>Seq: 1</th> <th>Cycle</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>Mean</th> <th>SD</th> <th>CV%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Stiffness modulus (MPa)</td> <td></td> <td>19566</td> <td>19788</td> <td>19425</td> <td>20626</td> <td>19782</td> <td>19838</td> <td>417</td> <td>2.10</td> </tr> <tr> <td>Adjusted stiffness modulus (MPa)</td> <td></td> <td>18276</td> <td>18580</td> <td>18154</td> <td>19352</td> <td>18540</td> <td>18580</td> <td>418</td> <td>2.25</td> </tr> <tr> <td>Peak loading force (N)</td> <td></td> <td>6950</td> <td>6950</td> <td>7087</td> <td>7242</td> <td>7345</td> <td>7115</td> <td>158</td> <td>2.21</td> </tr> <tr> <td>Load rise time (ms)</td> <td></td> <td>120.0</td> <td>122.0</td> <td>120.0</td> <td>122.0</td> <td>118.0</td> <td>120.4</td> <td>1.5</td> <td>1.24</td> </tr> <tr> <td>Load area factor</td> <td></td> <td>0.517</td> <td>0.523</td> <td>0.518</td> <td>0.523</td> <td>0.521</td> <td>0.521</td> <td>0.003</td> <td>0.51</td> </tr> <tr> <td>Peak horizontal deformation (µm)</td> <td></td> <td>4.46</td> <td>4.41</td> <td>4.58</td> <td>4.41</td> <td>4.66</td> <td>4.51</td> <td>0.10</td> <td>2.24</td> </tr> <tr> <td>Horizontal deformation 1 (µm)</td> <td></td> <td>1.45</td> <td>1.05</td> <td>1.58</td> <td>1.47</td> <td>1.49</td> <td>1.41</td> <td>0.18</td> <td>13.02</td> </tr> <tr> <td>Horizontal deformation 2 (µm)</td> <td></td> <td>3.01</td> <td>3.36</td> <td>3.00</td> <td>2.94</td> <td>3.17</td> <td>3.10</td> <td>0.15</td> <td>4.89</td> </tr> <tr> <td>Seating force (N)</td> <td></td> <td>49.4</td> <td>49.9</td> <td>49.7</td> <td>49.0</td> <td>50.1</td> <td>49.6</td> <td>0.4</td> <td>0.79</td> </tr> </tbody> </table> <p><u>Input Parameters</u></p> <table style="width: 100%; font-size: x-small;"> <tr> <td>Gauge length(0=dia) (mm): 0.00</td> <td>Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1</td> <td>Target temperature (°C): 25.0</td> </tr> </table> <p><u>Loading Parameters</u></p> <table style="width: 100%; font-size: x-small;"> <tr> <td>Target Deformation (µm): 5.000</td> <td>Retries: 10</td> </tr> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; font-size: x-small;"> <tr> <td>Seq (Seq 0 = conditioning)</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Loading Cycles</td> <td>5</td> <td>5</td> </tr> </table> </div>		Total Pulses: 10	Actuator Displacement (mm): -20.58	Load (N): 50.13	Horizontal LVDT 1 (mm): 0.00117	Horizontal LVDT 2 (mm): -0.00356	Core Temperature (°C): 5.6	Surface Temperature (°C): 5.3			Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%	Stiffness modulus (MPa)		19566	19788	19425	20626	19782	19838	417	2.10	Adjusted stiffness modulus (MPa)		18276	18580	18154	19352	18540	18580	418	2.25	Peak loading force (N)		6950	6950	7087	7242	7345	7115	158	2.21	Load rise time (ms)		120.0	122.0	120.0	122.0	118.0	120.4	1.5	1.24	Load area factor		0.517	0.523	0.518	0.523	0.521	0.521	0.003	0.51	Peak horizontal deformation (µm)		4.46	4.41	4.58	4.41	4.66	4.51	0.10	2.24	Horizontal deformation 1 (µm)		1.45	1.05	1.58	1.47	1.49	1.41	0.18	13.02	Horizontal deformation 2 (µm)		3.01	3.36	3.00	2.94	3.17	3.10	0.15	4.89	Seating force (N)		49.4	49.9	49.7	49.0	50.1	49.6	0.4	0.79	Gauge length(0=dia) (mm): 0.00	Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1	Target temperature (°C): 25.0	Target Deformation (µm): 5.000	Retries: 10	Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1	Loading Cycles	5	5
Total Pulses: 10	Actuator Displacement (mm): -20.58	Load (N): 50.13																																																																																																																							
Horizontal LVDT 1 (mm): 0.00117	Horizontal LVDT 2 (mm): -0.00356	Core Temperature (°C): 5.6																																																																																																																							
Surface Temperature (°C): 5.3																																																																																																																									
Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%																																																																																																																
Stiffness modulus (MPa)		19566	19788	19425	20626	19782	19838	417	2.10																																																																																																																
Adjusted stiffness modulus (MPa)		18276	18580	18154	19352	18540	18580	418	2.25																																																																																																																
Peak loading force (N)		6950	6950	7087	7242	7345	7115	158	2.21																																																																																																																
Load rise time (ms)		120.0	122.0	120.0	122.0	118.0	120.4	1.5	1.24																																																																																																																
Load area factor		0.517	0.523	0.518	0.523	0.521	0.521	0.003	0.51																																																																																																																
Peak horizontal deformation (µm)		4.46	4.41	4.58	4.41	4.66	4.51	0.10	2.24																																																																																																																
Horizontal deformation 1 (µm)		1.45	1.05	1.58	1.47	1.49	1.41	0.18	13.02																																																																																																																
Horizontal deformation 2 (µm)		3.01	3.36	3.00	2.94	3.17	3.10	0.15	4.89																																																																																																																
Seating force (N)		49.4	49.9	49.7	49.0	50.1	49.6	0.4	0.79																																																																																																																
Gauge length(0=dia) (mm): 0.00	Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1	Target temperature (°C): 25.0																																																																																																																							
Target Deformation (µm): 5.000	Retries: 10																																																																																																																								
Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1																																																																																																																							
Loading Cycles	5	5																																																																																																																							
Page: 1 of 1 Printed 25/01/2019 4:51:18 p.m.																																																																																																																									

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA																																																																																																											
Ensayo:	Ensayo de módulos resilientes (mezcla asfáltica convencional) a 25°C. Muestra 1 Lado A																																																																																																										
Resultados																																																																																																											
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>Dbcomm</p> <p><u>General Information</u></p> <p>Project name: mezcla asfáltica MSC 25 convencional Operator name: Edwin Rangel Data file: C:\Users\Administrador\Desktop\mezclas asfálticas\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C MSC 25 RAP 4-2.tid Test standards: EN12697-26C Module type: Universal Test Module Version: 2.1.8.4 Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio IDT 5 Pulse Modulus test Method file: C:\Pavetest\Teststab\Methods\Methods UPB_Buca\21May18\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C.mtf</p> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 10px;">  </div> <hr/> <p>Test Data</p> <p>Test Date and Time: mar., ene. 22 2019, 4:35 PM</p> <p style="text-align: center;"> Total Pulses: 10 Actuator Displacement (mm): -30.28 Load (N): 49.44 Horizontal LVDT 1 (mm): 0.00361 Horizontal LVDT 2 (mm): -0.00526 Core Temperature (°C): 25.2 Surface Temperature (°C): 25.2 </p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>Seq: 1</th> <th>Cycle</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>Mean</th> <th>SD</th> <th>CV %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Stiffness modulus (MPa)</td> <td></td> <td>2552</td> <td>2561</td> <td>2423</td> <td>2297</td> <td>2200</td> <td>2406</td> <td>141</td> <td>5.88</td> </tr> <tr> <td>Adjusted stiffness modulus (MPa)</td> <td></td> <td>2412</td> <td>2433</td> <td>2265</td> <td>2110</td> <td>2023</td> <td>2249</td> <td>162</td> <td>7.19</td> </tr> <tr> <td>Peak loading force (N)</td> <td></td> <td>1333</td> <td>1330</td> <td>1070</td> <td>811</td> <td>715</td> <td>1052</td> <td>256</td> <td>24.36</td> </tr> <tr> <td>Load rise time (ms)</td> <td></td> <td>122.0</td> <td>120.0</td> <td>120.0</td> <td>120.0</td> <td>124.0</td> <td>121.2</td> <td>1.6</td> <td>1.32</td> </tr> <tr> <td>Load area factor</td> <td></td> <td>0.492</td> <td>0.502</td> <td>0.471</td> <td>0.436</td> <td>0.436</td> <td>0.468</td> <td>0.028</td> <td>5.88</td> </tr> <tr> <td>Peak horizontal deformation (µm)</td> <td></td> <td>6.44</td> <td>6.41</td> <td>5.45</td> <td>4.35</td> <td>4.01</td> <td>5.33</td> <td>1.01</td> <td>18.95</td> </tr> <tr> <td>Horizontal deformation 1 (µm)</td> <td></td> <td>5.24</td> <td>4.94</td> <td>4.38</td> <td>3.46</td> <td>2.95</td> <td>4.20</td> <td>0.87</td> <td>20.73</td> </tr> <tr> <td>Horizontal deformation 2 (µm)</td> <td></td> <td>1.20</td> <td>1.46</td> <td>1.06</td> <td>0.89</td> <td>1.06</td> <td>1.13</td> <td>0.19</td> <td>16.75</td> </tr> <tr> <td>Seating force (N)</td> <td></td> <td>50.4</td> <td>48.3</td> <td>50.1</td> <td>48.3</td> <td>49.4</td> <td>49.3</td> <td>0.9</td> <td>1.78</td> </tr> </tbody> </table> <hr/> <p>Input Parameters</p> <p style="text-align: center;"> Gauge length(0=dia) (mm): 0.00 Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1 Target temperature (°C): 25.0 </p> <p>Loading Parameters</p> <p style="text-align: center;">Target Deformation (µm): 5.000 Retries: 10</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>Seq (Seq 0 = conditioning)</th> <th>0</th> <th>1</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Loading Cycles</td> <td>5</td> <td>5</td> </tr> </tbody> </table>		Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV %	Stiffness modulus (MPa)		2552	2561	2423	2297	2200	2406	141	5.88	Adjusted stiffness modulus (MPa)		2412	2433	2265	2110	2023	2249	162	7.19	Peak loading force (N)		1333	1330	1070	811	715	1052	256	24.36	Load rise time (ms)		122.0	120.0	120.0	120.0	124.0	121.2	1.6	1.32	Load area factor		0.492	0.502	0.471	0.436	0.436	0.468	0.028	5.88	Peak horizontal deformation (µm)		6.44	6.41	5.45	4.35	4.01	5.33	1.01	18.95	Horizontal deformation 1 (µm)		5.24	4.94	4.38	3.46	2.95	4.20	0.87	20.73	Horizontal deformation 2 (µm)		1.20	1.46	1.06	0.89	1.06	1.13	0.19	16.75	Seating force (N)		50.4	48.3	50.1	48.3	49.4	49.3	0.9	1.78	Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1	Loading Cycles	5	5
Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV %																																																																																																		
Stiffness modulus (MPa)		2552	2561	2423	2297	2200	2406	141	5.88																																																																																																		
Adjusted stiffness modulus (MPa)		2412	2433	2265	2110	2023	2249	162	7.19																																																																																																		
Peak loading force (N)		1333	1330	1070	811	715	1052	256	24.36																																																																																																		
Load rise time (ms)		122.0	120.0	120.0	120.0	124.0	121.2	1.6	1.32																																																																																																		
Load area factor		0.492	0.502	0.471	0.436	0.436	0.468	0.028	5.88																																																																																																		
Peak horizontal deformation (µm)		6.44	6.41	5.45	4.35	4.01	5.33	1.01	18.95																																																																																																		
Horizontal deformation 1 (µm)		5.24	4.94	4.38	3.46	2.95	4.20	0.87	20.73																																																																																																		
Horizontal deformation 2 (µm)		1.20	1.46	1.06	0.89	1.06	1.13	0.19	16.75																																																																																																		
Seating force (N)		50.4	48.3	50.1	48.3	49.4	49.3	0.9	1.78																																																																																																		
Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1																																																																																																									
Loading Cycles	5	5																																																																																																									
Page: 1 of 1 Printed 22/01/2019 4:37:45 p.m.																																																																																																											

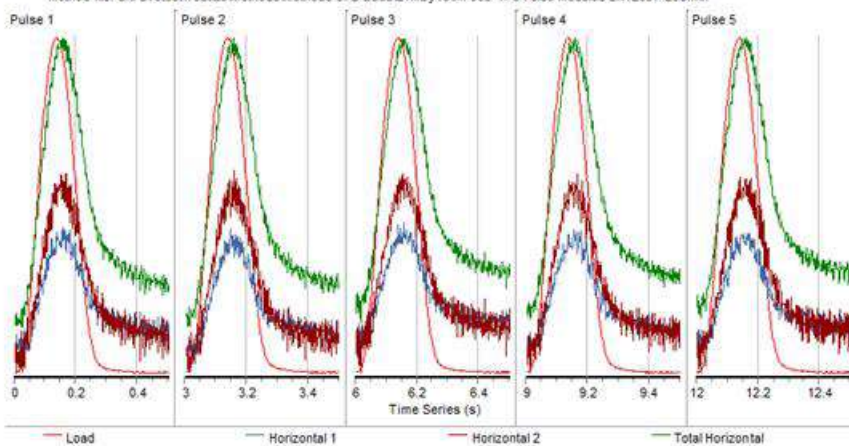
Ensayo:	Ensayo de módulos resilientes (mezcla asfáltica convencional) a 25°C. Muestra 1 Lado B
----------------	--

Resultados

Dbcomm

General Information

Project name: mezcla asfáltica MSC 25 convencional
 Operator name: Edwin Rangel
 Data file: C:\Users\Administrador\Desktop\mezclas asfálticas\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C MSC 25 CONV 4-1(1).td
 Test standards: EN12697-26C Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio DT 5.Pulse Modulus test
 Module type: Universal Test Module Version: 2.1.8.4
 Method file: C:\Pavetest\Testlab\Methods\Methods UPB Bucar\21May16\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C.mtf



Test Data

Test Date and Time: mar., ene. 22 2019, 4:44 PM

Total Pulses: 10 Actuator Displacement (mm): -27.17 Load (N): 49.90
 Horizontal LVDT 1 (mm): -0.00084 Horizontal LVDT 2 (mm): -0.00079 Core Temperature (°C): 25.1
 Surface Temperature (°C): 25.1

Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)		4556	4490	4466	4571	4773	4571	108	2.37
Adjusted stiffness modulus (MPa)		4283	4195	4211	4346	4473	4302	101	2.35
Peak loading force (N)		1791	1795	1832	1848	1836	1821	23	1.26
Load rise time (ms)		122.0	124.0	124.0	126.0	122.0	123.6	1.5	1.21
Load area factor		0.499	0.489	0.503	0.517	0.495	0.501	0.010	1.92
Peak horizontal deformation (µm)		4.85	4.93	5.06	4.99	4.74	4.91	0.11	2.23
Horizontal deformation 1 (µm)		1.75	1.97	1.83	1.95	1.73	1.85	0.10	5.34
Horizontal deformation 2 (µm)		3.10	2.96	3.23	3.04	3.02	3.07	0.09	2.91
Seating force (N)		53.3	52.0	51.5	50.1	49.9	51.4	1.3	2.45

Input Parameters

Gauge length(0=dia) (mm): 0.00 Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1 Target temperature (°C): 25.0

Loading Parameters

Target Deformation (µm): 5.000 Retries: 10

Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1
Loading Cycles	5	5

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
SECCIONAL BUCARAMANGA



Ensayo:

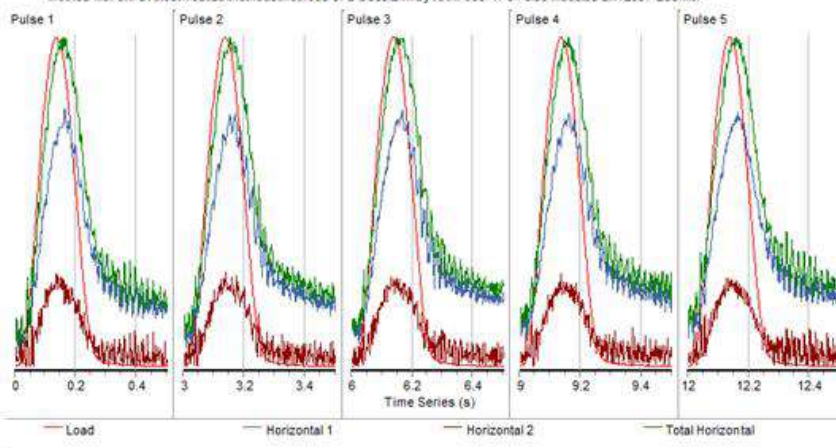
Ensayo de módulos resilientes (mezcla asfáltica convencional)
a 25°C. Muestra 2 Lado A

Resultados

Dbcomm

General Information

Project name: mezcla asfatica MSC 25
Operator name: Edwin Rangel
Data file: C:\Users\Administrador\Desktop\mezclas asfaticas\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C MSC 25 CONV 1-1(2).ttd
Test standards: EN12697-26C Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio
Module type: Universal Test Module IDT 5 Pulse Modulus test
Version: 2.1.8.4
Method file: C:\Pavetest\Testlab-Methods-Methods\UPB_Buca\21May18\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C.mtf



Test Data

Test Date and Time: lun., ene. 21 2019, 12:01 PM

Total Pulses: 10 Actuator Displacement (mm): -21.91 Load (N): 50.81
Horizontal LVDT 1 (mm): -0.00086 Horizontal LVDT 2 (mm): -0.00013 Core Temperature (°C): 24.5
Surface Temperature (°C): 24.5

Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)		7485	7718	7831	8050	7404	7697	234	3.04
Adjusted stiffness modulus (MPa)		7054	7302	7377	7547	7000	7256	204	2.81
Peak loading force (N)		3270	3274	3197	3149	3147	3208	56	1.74
Load rise time (ms)		124.0	124.0	124.0	122.0	122.0	123.2	1.0	0.80
Load area factor		0.513	0.519	0.513	0.507	0.517	0.514	0.004	0.82
Peak horizontal deformation (µm)		5.36	5.21	5.01	4.80	5.22	5.12	0.19	3.80
Horizontal deformation 1 (µm)		3.80	3.56	3.65	3.54	3.46	3.60	0.12	3.24
Horizontal deformation 2 (µm)		1.56	1.65	1.36	1.26	1.76	1.52	0.18	11.98
Seating force (N)		49.7	48.3	50.1	48.8	50.8	49.5	0.9	1.84

Input Parameters


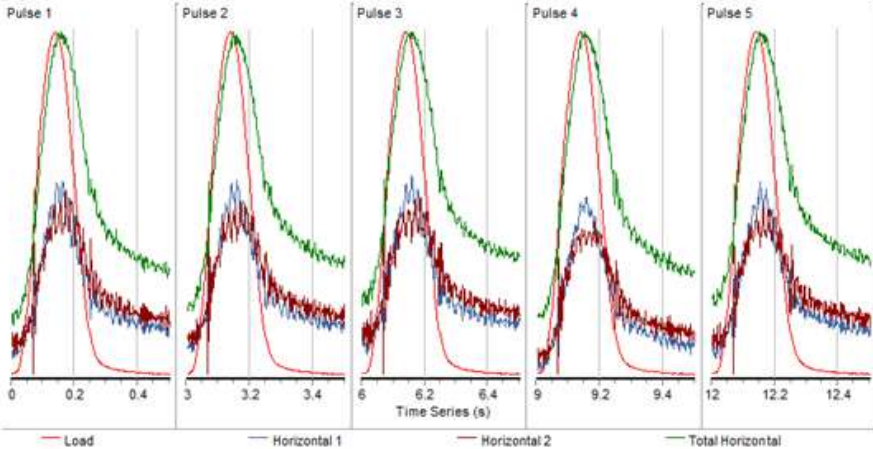
Gauge length(0=dia) (mm): 0.00 Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1 Target temperature (°C): 25.0


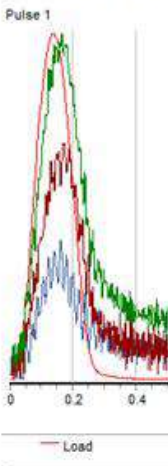
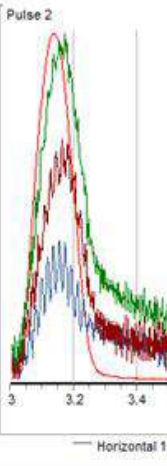
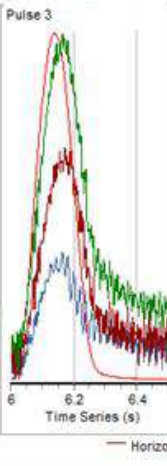
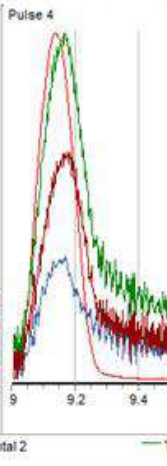
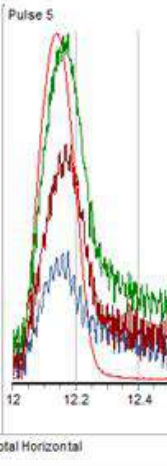

Loading Parameters

Target Deformation (µm): 5.000

Retries: 10

Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1
Loading Cycles	5	5

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA																																																																																																					
Ensayo:	Ensayo de módulos resilientes (mezcla asfáltica convencional) a 25°C. Muestra 2 Lado B																																																																																																				
Resultados																																																																																																					
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>Dbcomm</p> <p><u>General Information</u></p> <p>Project name: mezcla asfaltica MSC 25 Operator name: Edwin Rangel Data file: C:\Users\Administrador\Desktop\mezclas asfalticas\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C MSC 25 CONV 1-2(1).td Test standards: EN12697-26C Module type: Universal Test Module Version: 2.1.8.4 Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio IDT 5 Pulse Modulus test Method file: C:\Pavetest\Testlab\Methods\Methods UPB Buca\21May18\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C.mtf</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">  </div> </div>																																																																																																					
<p>Test Data</p> <p>Test Date and Time: lun., ene. 21 2019, 2:56 PM</p> <p style="text-align: center;"> Total Pulses: 10 Actuator Displacement (mm): -22.17 Load (N): 50.81 Horizontal LVDT 1 (mm): -0.00071 Horizontal LVDT 2 (mm): -0.00118 Core Temperature (°C): 25.2 Surface Temperature (°C): 25.2 </p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>Seq: 1</th> <th>Cycle</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>Mean</th> <th>SD</th> <th>CV%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Stiffness modulus (MPa)</td> <td></td> <td>5498</td> <td>5615</td> <td>5411</td> <td>5667</td> <td>5542</td> <td>5195</td> <td>89</td> <td>1.61</td> </tr> <tr> <td>Adjusted stiffness modulus (MPa)</td> <td></td> <td>5178</td> <td>5265</td> <td>5046</td> <td>5262</td> <td>5222</td> <td>5195</td> <td>81</td> <td>1.55</td> </tr> <tr> <td>Peak loading force (N)</td> <td></td> <td>2218</td> <td>2221</td> <td>2232</td> <td>2267</td> <td>2249</td> <td>2237</td> <td>18</td> <td>0.82</td> </tr> <tr> <td>Load rise time (ms)</td> <td></td> <td>122.0</td> <td>120.0</td> <td>118.0</td> <td>122.0</td> <td>120.0</td> <td>120.4</td> <td>1.5</td> <td>1.24</td> </tr> <tr> <td>Load area factor</td> <td></td> <td>0.506</td> <td>0.500</td> <td>0.491</td> <td>0.485</td> <td>0.507</td> <td>0.498</td> <td>0.008</td> <td>1.69</td> </tr> <tr> <td>Peak horizontal deformation (µm)</td> <td></td> <td>4.95</td> <td>4.85</td> <td>5.06</td> <td>4.91</td> <td>4.98</td> <td>4.95</td> <td>0.07</td> <td>1.41</td> </tr> <tr> <td>Horizontal deformation 1 (µm)</td> <td></td> <td>2.67</td> <td>2.66</td> <td>2.81</td> <td>2.76</td> <td>2.82</td> <td>2.74</td> <td>0.07</td> <td>2.51</td> </tr> <tr> <td>Horizontal deformation 2 (µm)</td> <td></td> <td>2.29</td> <td>2.20</td> <td>2.25</td> <td>2.15</td> <td>2.17</td> <td>2.21</td> <td>0.05</td> <td>2.32</td> </tr> <tr> <td>Seating force (N)</td> <td></td> <td>49.9</td> <td>49.0</td> <td>51.0</td> <td>48.3</td> <td>50.8</td> <td>49.8</td> <td>1.0</td> <td>2.11</td> </tr> </tbody> </table>		Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%	Stiffness modulus (MPa)		5498	5615	5411	5667	5542	5195	89	1.61	Adjusted stiffness modulus (MPa)		5178	5265	5046	5262	5222	5195	81	1.55	Peak loading force (N)		2218	2221	2232	2267	2249	2237	18	0.82	Load rise time (ms)		122.0	120.0	118.0	122.0	120.0	120.4	1.5	1.24	Load area factor		0.506	0.500	0.491	0.485	0.507	0.498	0.008	1.69	Peak horizontal deformation (µm)		4.95	4.85	5.06	4.91	4.98	4.95	0.07	1.41	Horizontal deformation 1 (µm)		2.67	2.66	2.81	2.76	2.82	2.74	0.07	2.51	Horizontal deformation 2 (µm)		2.29	2.20	2.25	2.15	2.17	2.21	0.05	2.32	Seating force (N)		49.9	49.0	51.0	48.3	50.8	49.8	1.0	2.11
Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%																																																																																												
Stiffness modulus (MPa)		5498	5615	5411	5667	5542	5195	89	1.61																																																																																												
Adjusted stiffness modulus (MPa)		5178	5265	5046	5262	5222	5195	81	1.55																																																																																												
Peak loading force (N)		2218	2221	2232	2267	2249	2237	18	0.82																																																																																												
Load rise time (ms)		122.0	120.0	118.0	122.0	120.0	120.4	1.5	1.24																																																																																												
Load area factor		0.506	0.500	0.491	0.485	0.507	0.498	0.008	1.69																																																																																												
Peak horizontal deformation (µm)		4.95	4.85	5.06	4.91	4.98	4.95	0.07	1.41																																																																																												
Horizontal deformation 1 (µm)		2.67	2.66	2.81	2.76	2.82	2.74	0.07	2.51																																																																																												
Horizontal deformation 2 (µm)		2.29	2.20	2.25	2.15	2.17	2.21	0.05	2.32																																																																																												
Seating force (N)		49.9	49.0	51.0	48.3	50.8	49.8	1.0	2.11																																																																																												
<p>Input Parameters</p> <p style="text-align: center;"> Gauge length(0=dia) (mm): 0.00 Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1 Target temperature (°C): 25.0 </p> <p>Loading Parameters</p> <p style="text-align: center;"> Target Deformation (µm): 5.000 Retries: 10 </p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>Seq (Seq 0 = conditioning)</th> <th>0</th> <th>1</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Loading Cycles</td> <td>5</td> <td>5</td> </tr> </tbody> </table>		Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1	Loading Cycles	5	5																																																																																														
Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1																																																																																																			
Loading Cycles	5	5																																																																																																			
Page: 1 of 1 Printed 21/01/2019 3:00:03 p.m. Acti IraC																																																																																																					

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA	 Universidad Pontificia Bolivariana																																																																																																										
Ensayo:	Ensayo de módulos resilientes (mezcla asfáltica convencional) a 25°C. Muestra 3 Lado A																																																																																																										
Resultados																																																																																																											
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>Dbcomm</p> <p><u>General information</u></p> <p>Project name: mezcla asfaltica MSC 25 Operator name: Edwin Rangel Data file: C:\Users\Administrador\Desktop\mezclas asfalticas\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C MSC 25 CONV 1-2(2).tid</p> <p>Test standards: EN12697-26C Module type: Universal Test Module Version: 2.1.8.4 Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio: 0.3 IDT 5 Pulse Modulus test Method file: C:\Pavetest\Testlab-Methods-Methods UPB Bucal21May18\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C.mtf</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>Pulse 1</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Pulse 2</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Pulse 3</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Pulse 4</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Pulse 5</p> </div> </div> <p style="font-size: small; text-align: center;">Time Series (s)</p> <p style="font-size: x-small; text-align: center;"> — Load — Horizontal 1 — Horizontal 2 — Total Horizontal </p> </div>																																																																																																											
<p>Test Data</p> <p>Test Date and Time: lun., ene. 21 2019, 3:08 PM</p> <p>Total Pulses: 10 Actuator Displacement (mm): -17.88 Load (N): 49.21 Horizontal LVDT 1 (mm): -0.00055 Horizontal LVDT 2 (mm): -0.00032 Core Temperature (°C): 25.2 Surface Temperature (°C): 24.9</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; font-size: x-small;"> <thead> <tr> <th>Seq: 1</th> <th>Cycle</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>Mean</th> <th>SD</th> <th>CV%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Stiffness modulus (MPa)</td> <td></td> <td>7388</td> <td>7187</td> <td>7419</td> <td>7566</td> <td>7561</td> <td>7424</td> <td>139</td> <td>1.87</td> </tr> <tr> <td>Adjusted stiffness modulus (MPa)</td> <td></td> <td>6963</td> <td>6781</td> <td>6947</td> <td>7147</td> <td>7112</td> <td>6990</td> <td>131</td> <td>1.88</td> </tr> <tr> <td>Peak loading force (N)</td> <td></td> <td>3157</td> <td>3161</td> <td>3106</td> <td>3019</td> <td>2987</td> <td>3086</td> <td>71</td> <td>2.31</td> </tr> <tr> <td>Load rise time (ms)</td> <td></td> <td>122.0</td> <td>124.0</td> <td>122.0</td> <td>124.0</td> <td>124.0</td> <td>123.2</td> <td>1.0</td> <td>0.80</td> </tr> <tr> <td>Load area factor</td> <td></td> <td>0.513</td> <td>0.514</td> <td>0.504</td> <td>0.516</td> <td>0.511</td> <td>0.511</td> <td>0.004</td> <td>0.86</td> </tr> <tr> <td>Peak horizontal deformation (µm)</td> <td></td> <td>5.25</td> <td>5.40</td> <td>5.14</td> <td>4.90</td> <td>4.85</td> <td>5.11</td> <td>0.21</td> <td>4.07</td> </tr> <tr> <td>Horizontal deformation 1 (µm)</td> <td></td> <td>1.84</td> <td>2.08</td> <td>1.52</td> <td>1.76</td> <td>1.50</td> <td>1.74</td> <td>0.22</td> <td>12.39</td> </tr> <tr> <td>Horizontal deformation 2 (µm)</td> <td></td> <td>3.41</td> <td>3.32</td> <td>3.62</td> <td>3.14</td> <td>3.35</td> <td>3.37</td> <td>0.15</td> <td>4.58</td> </tr> <tr> <td>Seating force (N)</td> <td></td> <td>48.3</td> <td>52.4</td> <td>49.9</td> <td>49.7</td> <td>49.2</td> <td>49.9</td> <td>1.4</td> <td>2.75</td> </tr> </tbody> </table> <p>Input Parameters</p> <p>Gauge length(0=dia) (mm): 0.00 Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1 Target temperature (°C): 25.0</p> <p>Loading Parameters</p> <p>Target Deformation (µm): 5.000 Retries: 10</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; font-size: x-small;"> <thead> <tr> <th>Seq (Seq 0 = conditioning)</th> <th>0</th> <th>1</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Loading Cycles</td> <td>5</td> <td>5</td> </tr> </tbody> </table>		Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%	Stiffness modulus (MPa)		7388	7187	7419	7566	7561	7424	139	1.87	Adjusted stiffness modulus (MPa)		6963	6781	6947	7147	7112	6990	131	1.88	Peak loading force (N)		3157	3161	3106	3019	2987	3086	71	2.31	Load rise time (ms)		122.0	124.0	122.0	124.0	124.0	123.2	1.0	0.80	Load area factor		0.513	0.514	0.504	0.516	0.511	0.511	0.004	0.86	Peak horizontal deformation (µm)		5.25	5.40	5.14	4.90	4.85	5.11	0.21	4.07	Horizontal deformation 1 (µm)		1.84	2.08	1.52	1.76	1.50	1.74	0.22	12.39	Horizontal deformation 2 (µm)		3.41	3.32	3.62	3.14	3.35	3.37	0.15	4.58	Seating force (N)		48.3	52.4	49.9	49.7	49.2	49.9	1.4	2.75	Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1	Loading Cycles	5	5
Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%																																																																																																		
Stiffness modulus (MPa)		7388	7187	7419	7566	7561	7424	139	1.87																																																																																																		
Adjusted stiffness modulus (MPa)		6963	6781	6947	7147	7112	6990	131	1.88																																																																																																		
Peak loading force (N)		3157	3161	3106	3019	2987	3086	71	2.31																																																																																																		
Load rise time (ms)		122.0	124.0	122.0	124.0	124.0	123.2	1.0	0.80																																																																																																		
Load area factor		0.513	0.514	0.504	0.516	0.511	0.511	0.004	0.86																																																																																																		
Peak horizontal deformation (µm)		5.25	5.40	5.14	4.90	4.85	5.11	0.21	4.07																																																																																																		
Horizontal deformation 1 (µm)		1.84	2.08	1.52	1.76	1.50	1.74	0.22	12.39																																																																																																		
Horizontal deformation 2 (µm)		3.41	3.32	3.62	3.14	3.35	3.37	0.15	4.58																																																																																																		
Seating force (N)		48.3	52.4	49.9	49.7	49.2	49.9	1.4	2.75																																																																																																		
Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1																																																																																																									
Loading Cycles	5	5																																																																																																									
Page: 1 of 1 Printed 21/01/2019 3:11:55 p.m. 																																																																																																											

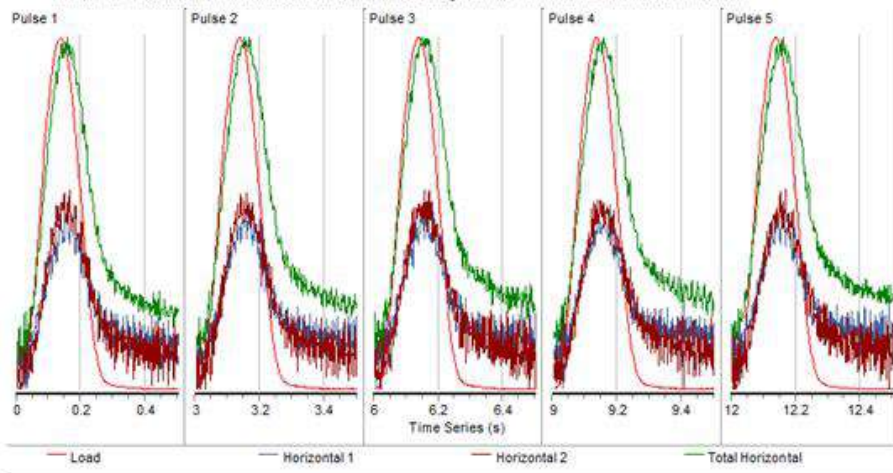
Ensayo: Ensayo de módulos resilientes (mezcla asfáltica convencional) a 25°C. Muestra 3 Lado B

Resultados

Dbcomm

General information

Project name: mezcla asfáltica MSC 25
 Operator name: Edwin Rangel
 Data file: C:\Users\Administrador\Desktop\mezclas asfálticas\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C MSC 25 CONV 1-3(1).tdf
 Test standards: EN12697-26C Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio
 Module type: Universal Test Module DT 5 Pulse Modulus test
 Version: 2.1.8.4
 Method file: C:\Pavetest\Testlab\Methods\Methods\UPB Bucal21May18\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C.rtf



Test Data

Test Date and Time: lun., ene. 21 2019, 3:26 PM

Total Pulses: 10 Actuator Displacement (mm): -15.70 Load (N): 51.04
 Horizontal LVDT 1 (mm): -0.00011 Horizontal LVDT 2 (mm): -0.00076 Core Temperature (°C): 24.9
 Surface Temperature (°C): 24.6

Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)		5951	5979	6067	6007	5723	5945	117	1.98
Adjusted stiffness modulus (MPa)		5640	5657	5732	5671	5386	5617	120	2.13
Peak loading force (N)		2474	2478	2453	2431	2439	2455	19	0.76
Load rise time (ms)		120.0	120.0	124.0	118.0	118.0	120.0	2.2	1.83
Load area factor		0.517	0.515	0.513	0.511	0.505	0.512	0.004	0.76
Peak horizontal deformation (µm)		5.10	5.09	4.96	4.97	5.23	5.07	0.10	1.97
Horizontal deformation 1 (µm)		1.92	2.31	2.16	1.89	2.28	2.11	0.18	8.36
Horizontal deformation 2 (µm)		3.18	2.78	2.81	3.08	2.95	2.96	0.16	5.26
Seating force (N)		50.8	49.7	49.4	48.8	51.0	49.9	0.9	1.72



Input Parameters

Gauge length(0=dia) (mm): 0.00 Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1 Target temperature (°C): 25.0

Loading Parameters

Target Deformation (µm): 5.000 Retries: 10

Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1
Loading Cycles	5	5

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA	 Universidad Pontificia Bolivariana
Ensayo:	Ensayo de módulos resilientes (mezcla asfáltica convencional) a 40°C. Muestra 1 .DESCARTE
Resultados	
	

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
SECCIONAL BUCARAMANGA



Ensayo:

Ensayo de módulos resilientes (mezcla asfáltica convencional)
a 40°C. Muestra 2 Lado A

Resultados

Dbcomm

General Information

Project name: mezcla asfáltica MSC 25 CONVENCIONAL

Operator name: Edwin Rangel

Data file:

Test standards: EN12697-26C

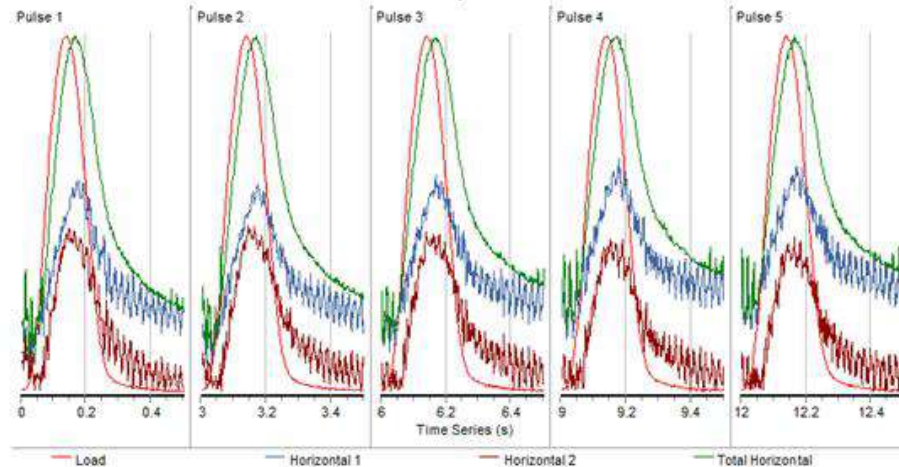
Module type: Universal Test Module

Version: 2.1.8.4

Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio

IDT 5 Pulse Modulus test

Method file: C:\Pavetest\Testlab-Methods\Methods UPB Bucal21May18\MF003-IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C.mtf



Test Data

Test Date and Time: lun., feb. 4 2019, 2:52 PM

Total Pulses: 10

Actuator Displacement (mm): 1.57

Load (N): 50.81

Horizontal LVDT 1 (mm): -0.00276

Horizontal LVDT 2 (mm): -0.00065

Core Temperature (°C): 40.4

Surface Temperature (°C): 40.9

Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)		2781	2779	2765	2698	2755	2756	31	1.11
Adjusted stiffness modulus (MPa)		2580	2592	2565	2512	2577	2565	28	1.09
Peak loading force (N)		1309	1315	1146	967	934	1134	162	14.28
Load rise time (ms)		124.0	122.0	120.0	126.0	126.0	123.6	2.3	1.89
Load area factor		0.461	0.471	0.461	0.468	0.476	0.468	0.006	1.25
Peak horizontal deformation (µm)		5.86	5.89	5.16	4.47	4.22	5.12	0.69	13.48
Horizontal deformation 1 (µm)		2.56	3.02	2.21	2.18	1.86	2.36	0.39	16.69
Horizontal deformation 2 (µm)		3.31	2.87	2.95	2.29	2.37	2.76	0.38	13.83
Seating force (N)		49.9	50.1	49.0	49.9	50.8	49.9	0.6	1.17

Input Parameters

Gauge length(0=dia) (mm): 0.00

Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1

Target temperature (°C): 25.0

Loading Parameters

Target Deformation (µm): 5.000

Retries: 10

Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1
Loading Cycles	5	5

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
SECCIONAL BUCARAMANGA



Ensayo:

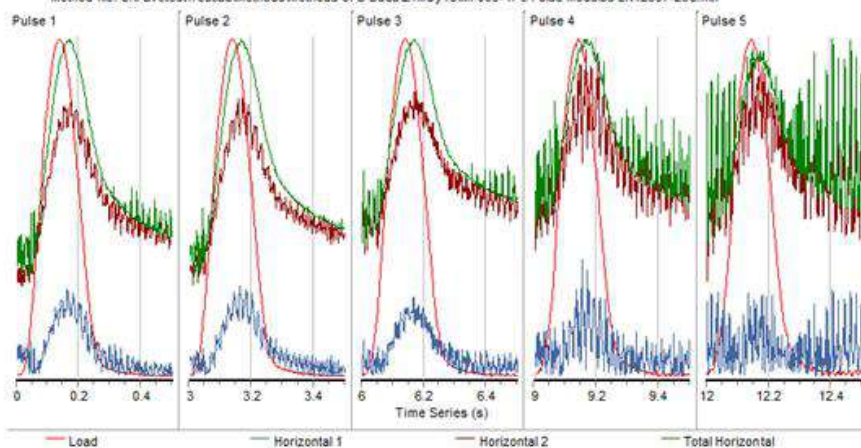
Ensayo de módulos resilientes (mezcla asfáltica convencional)
a 40°C. Muestra 2 Lado B

Resultados

Dbcomm

General Information

Project name: mezcla asfáltica MSC 25 CONVENCIONAL
Operator name: Edwin Rangel
Data file: C:\Users\Administrador\Desktop\mezclas asfálticas\40°C\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C MSC 25 CONV 3-2(1).tif
Test standards: EN12697-26C Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio
Module type: Universal Test Module DT 5 Pulse Modulus test
Version: 2.1.8.4
Method file: C:\Pavetest\Testlab\Methods\Methods UPB Bucar\21May18\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C.mtf



Test Data

Test Date and Time: lun., feb. 4 2019, 3:59 PM

Total Pulses: 10 Actuator Displacement (mm): 6.48 Load (N): 51.50
Horizontal LVDT 1 (mm): 0.00042 Horizontal LVDT 2 (mm): -0.00362 Core Temperature (°C): 40.5
Surface Temperature (°C): 40.4

Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)		2168	2093	2149	1731	1964	2021	162	8.01
Adjusted stiffness modulus (MPa)		2054	1989	1997	1608	1815	1892	163	8.63
Peak loading force (N)		1475	1478	1001	505	345	961	473	49.27
Load rise time (ms)		120.0	126.0	126.0	126.0	124.0	124.4	2.3	1.87
Load area factor		0.492	0.497	0.454	0.444	0.440	0.466	0.024	5.17
Peak horizontal deformation (µm)		8.47	8.79	5.80	3.63	2.19	5.78	2.60	45.02
Horizontal deformation 1 (µm)		3.20	3.11	2.33	1.62	1.52	2.36	0.71	30.10
Horizontal deformation 2 (µm)		5.27	5.68	3.47	2.01	0.66	3.42	1.90	55.65
Seating force (N)		48.8	47.6	52.4	49.2	51.5	49.9	1.8	3.58

Input Parameters

Gauge length(0=dia) (mm): 0.00 Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1 Target temperature (°C): 25.0

Loading Parameters

Target Deformation (µm): 5.000

Retries: 10

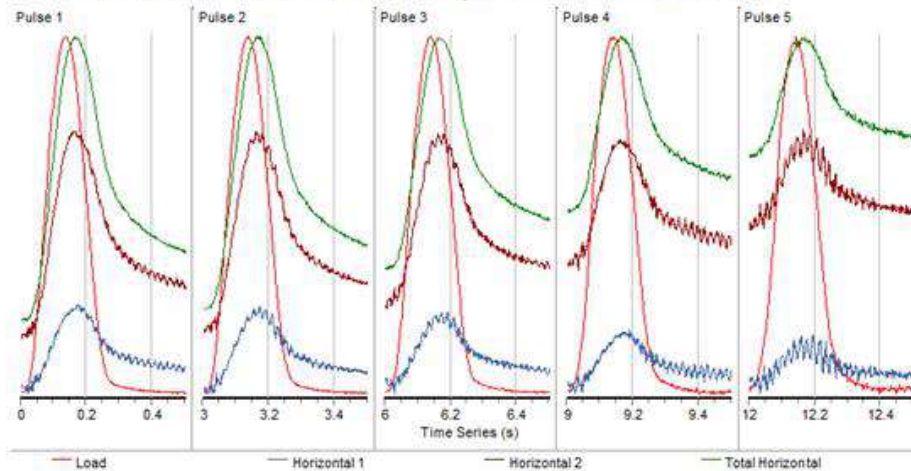
Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1
Loading Cycles	5	5

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA	
Ensayo:	Ensayo de módulos resilientes (mezcla asfáltica convencional) a 40°C. Muestra 3 Lado A
Resultados	

Dbcomm

General Information

Project name: mezcla asfaltica MSC 25 CONVENCIONAL
 Operator name: Edwin Rangel
 Data file:
 Test standards: EN12697-26C
 Module type: Universal Test Module
 Version: 2.1.8.4
 Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio
 IDT 5 Pulse Modulus test
 Method file: C:\Pavetest\Testlab-Methods-Methods UPB Bucar21May18\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C.mtf



Test Data

Test Date and Time: mar., feb. 5 2019, 3:35 PM

Total Pulses: 10 Actuator Displacement (mm): -38.47 Load (N): 49.90
 Horizontal LVDT 1 (mm): -0.00080 Horizontal LVDT 2 (mm): -0.00433 Core Temperature (°C): 40.0
 Surface Temperature (°C): 40.4

Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)		2365	2305	2342	2512	2313	2368	75	3.19
Adjusted stiffness modulus (MPa)		2248	2198	2177	2345	2133	2220	73	3.27
Peak loading force (N)		1858	1863	1293	708	398	1224	594	48.53
Load rise time (ms)		118.0	122.0	122.0	130.0	132.0	124.8	5.3	4.25
Load area factor		0.501	0.507	0.459	0.469	0.443	0.476	0.024	5.13
Peak horizontal deformation (µm)		9.81	10.10	6.90	3.52	2.15	6.50	3.22	49.60
Horizontal deformation 1 (µm)		2.75	2.96	2.07	1.07	0.69	1.91	0.90	47.13
Horizontal deformation 2 (µm)		7.07	7.13	4.83	2.45	1.46	4.59	2.32	50.67
Seating force (N)		50.4	51.0	49.2	48.8	49.9	49.9	0.8	1.63

Input Parameters


Gauge length(0=dia) (mm): 0.00 Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1 Target temperature (°C): 25.0

Loading Parameters

Target Deformation (µm): 5.000 Retries: 10

Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1
Loading Cycles	5	5

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
SECCIONAL BUCARAMANGA



**Universidad
Pontificia
Bolivariana**

Ensayo:

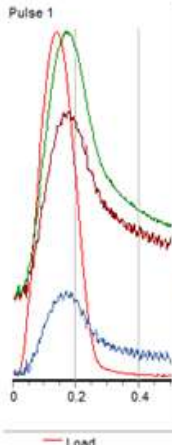
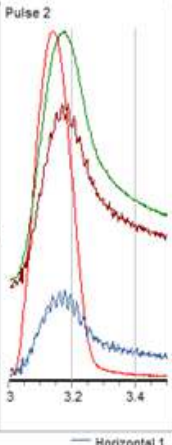
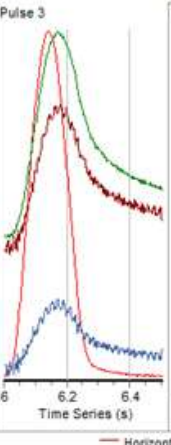
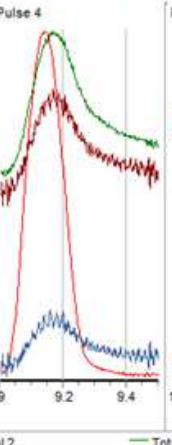

Ensayo de módulos resilientes (mezcla asfáltica convencional) a 40°C. Muestra 3 Lado B

Resultados

Dbcomm

General Information

Project name: mezcla asfaltica MSC 25 CONVENCIONAL
 Operator name: Edwin Rangel
 Data file: C:\Users\Administrador\Desktop\mezclas asfalticas\40\CMF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C MSC 25 CONV 3-3(1).td
 Test standards: EN12697-26C
 Module type: Universal Test Module
 Version: 2.1.8.4
 Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio
 IDT 5 Pulse Modulus test
 Method file: C:\Pavetest\Testlab\Methods\Methods UPB Bucar\21May18\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C.mtf

Time Series (s)

— Load — Horizontal 1 — Horizontal 2 — Total Horizontal

Test Data

Test Date and Time: mar., feb. 5 2019, 4:13 PM

Total Pulses: 10 Actuator Displacement (mm): -32.95 Load (N): 50.35
 Horizontal LVDT 1 (mm): -0.00105 Horizontal LVDT 2 (mm): -0.00600 Core Temperature (°C): 39.9
 Surface Temperature (°C): 39.9

Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)		2234	2117	2189	2136	1797	2095	154	7.37
Adjusted stiffness modulus (MPa)		2120	2024	2056	1998	1671	1974	157	7.95
Peak loading force (N)		2031	2031	1385	713	296	1291	697	53.98
Load rise time (ms)		124.0	122.0	124.0	132.0	132.0	126.8	4.3	3.40
Load area factor		0.496	0.509	0.476	0.466	0.448	0.479	0.022	4.53
Peak horizontal deformation (µm)		11.36	11.99	7.90	4.17	2.06	7.49	3.90	51.99
Horizontal deformation 1 (µm)		3.61	3.76	2.45	1.51	0.60	2.38	1.21	50.93
Horizontal deformation 2 (µm)		7.75	8.23	5.46	2.66	1.46	5.11	2.69	52.57
Seating force (N)		49.9	50.8	47.4	50.4	50.4	49.8	1.2	2.46

Input Parameters


Gauge length(0=dia) (mm): 0.00 Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1 Target temperature (°C): 25.0

Loading Parameters


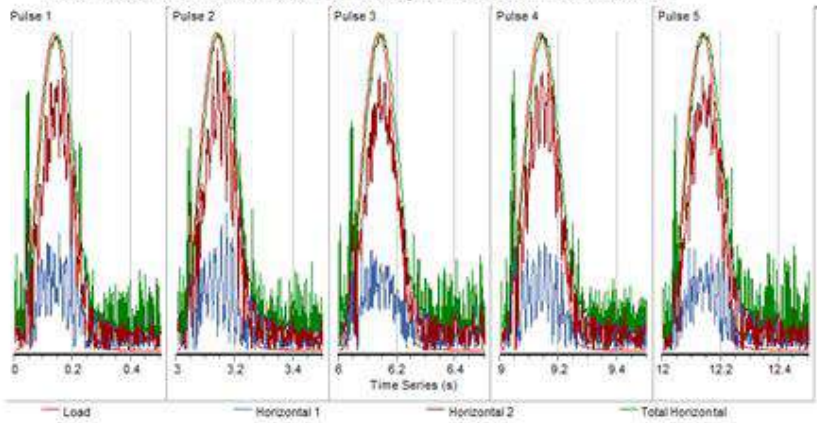

Target Deformation (µm): 5.000 Retries: 10

Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1
Loading Cycles	5	5


Page: 1 of 1

Printed 05/02/2019 4:16:09 p.m. 

Anexo 30.2. Ensayo de módulos resilientes (mezcla asfáltica modificada).

<p>UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA</p>																																																																																																					
<p>Ensayo:</p>	<p>Ensayo de módulos resilientes (mezcla asfáltica modificada) a 5°C. Muestra 1 Lado A</p>																																																																																																				
<p>Resultados</p>																																																																																																					
<p>Dbcomm</p> <p><u>General Information</u></p> <p>Project name: mezcla asfaltica MSC 25 30% CERAMICA Operator name: Eswin Rangel Data file: C:\Users\Administrador\Desktop\mezclas asfalticas\5°C\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C MSC 25 40% 3-2.ttd Test standards: EN12697-26C Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio Module type: Universal Test Module IDT 5 Pulse Modulus test Version: 2.1.8.4 Method file: C:\Pavetest\Testlab\Methods\Methods\UPB Bucar\21May18\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C.mtf</p> 																																																																																																					
<p><u>Test Data</u></p> <p>Test Date and Time: jue., ene. 31 2019, 2:56 PM</p> <p>Total Pulses: 10 Actuator Displacement (mm): -42.89 Load (N): 49.90 Horizontal LVDT 1 (mm): 0.00064 Horizontal LVDT 2 (mm): -0.00026 Core Temperature (°C): 4.8 Surface Temperature (°C): 5.2</p>																																																																																																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Seq: 1</th> <th>Cycle</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>Mean</th> <th>SD</th> <th>CV %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Stiffness modulus (MPa)</td> <td></td> <td>12909</td> <td>12561</td> <td>13223</td> <td>12737</td> <td>13813</td> <td>13049</td> <td>440</td> <td>3.37</td> </tr> <tr> <td>Adjusted stiffness modulus (MPa)</td> <td></td> <td>12144</td> <td>11797</td> <td>12353</td> <td>11959</td> <td>12940</td> <td>12238</td> <td>397</td> <td>3.24</td> </tr> <tr> <td>Peak loading force (N)</td> <td></td> <td>4897</td> <td>4901</td> <td>4978</td> <td>5015</td> <td>5099</td> <td>4978</td> <td>76</td> <td>1.52</td> </tr> <tr> <td>Load rise time (ms)</td> <td></td> <td>122.0</td> <td>122.0</td> <td>120.0</td> <td>122.0</td> <td>124.0</td> <td>122.0</td> <td>1.3</td> <td>1.04</td> </tr> <tr> <td>Load area factor</td> <td></td> <td>0.520</td> <td>0.517</td> <td>0.511</td> <td>0.517</td> <td>0.515</td> <td>0.516</td> <td>0.003</td> <td>0.54</td> </tr> <tr> <td>Peak horizontal deformation (µm)</td> <td></td> <td>4.70</td> <td>4.84</td> <td>4.67</td> <td>4.88</td> <td>4.58</td> <td>4.73</td> <td>0.11</td> <td>2.37</td> </tr> <tr> <td>Horizontal deformation 1 (µm)</td> <td></td> <td>1.27</td> <td>1.08</td> <td>1.28</td> <td>1.63</td> <td>1.53</td> <td>1.36</td> <td>0.19</td> <td>14.33</td> </tr> <tr> <td>Horizontal deformation 2 (µm)</td> <td></td> <td>3.43</td> <td>3.75</td> <td>3.38</td> <td>3.26</td> <td>3.04</td> <td>3.37</td> <td>0.23</td> <td>6.89</td> </tr> <tr> <td>Seating force (N)</td> <td></td> <td>49.9</td> <td>49.0</td> <td>47.8</td> <td>50.1</td> <td>49.9</td> <td>49.3</td> <td>0.9</td> <td>1.73</td> </tr> </tbody> </table>		Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV %	Stiffness modulus (MPa)		12909	12561	13223	12737	13813	13049	440	3.37	Adjusted stiffness modulus (MPa)		12144	11797	12353	11959	12940	12238	397	3.24	Peak loading force (N)		4897	4901	4978	5015	5099	4978	76	1.52	Load rise time (ms)		122.0	122.0	120.0	122.0	124.0	122.0	1.3	1.04	Load area factor		0.520	0.517	0.511	0.517	0.515	0.516	0.003	0.54	Peak horizontal deformation (µm)		4.70	4.84	4.67	4.88	4.58	4.73	0.11	2.37	Horizontal deformation 1 (µm)		1.27	1.08	1.28	1.63	1.53	1.36	0.19	14.33	Horizontal deformation 2 (µm)		3.43	3.75	3.38	3.26	3.04	3.37	0.23	6.89	Seating force (N)		49.9	49.0	47.8	50.1	49.9	49.3	0.9	1.73
Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV %																																																																																												
Stiffness modulus (MPa)		12909	12561	13223	12737	13813	13049	440	3.37																																																																																												
Adjusted stiffness modulus (MPa)		12144	11797	12353	11959	12940	12238	397	3.24																																																																																												
Peak loading force (N)		4897	4901	4978	5015	5099	4978	76	1.52																																																																																												
Load rise time (ms)		122.0	122.0	120.0	122.0	124.0	122.0	1.3	1.04																																																																																												
Load area factor		0.520	0.517	0.511	0.517	0.515	0.516	0.003	0.54																																																																																												
Peak horizontal deformation (µm)		4.70	4.84	4.67	4.88	4.58	4.73	0.11	2.37																																																																																												
Horizontal deformation 1 (µm)		1.27	1.08	1.28	1.63	1.53	1.36	0.19	14.33																																																																																												
Horizontal deformation 2 (µm)		3.43	3.75	3.38	3.26	3.04	3.37	0.23	6.89																																																																																												
Seating force (N)		49.9	49.0	47.8	50.1	49.9	49.3	0.9	1.73																																																																																												
<p><u>Input Parameters</u></p> <p>Gauge length(0=dia) (mm): 0.00 Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1 Target temperature (°C): 25.0</p>																																																																																																					
<p><u>Loading Parameters</u></p> <p>Target Deformation (µm): 5.000 Retries: 10</p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Seq 0 = conditioning</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Loading Cycles</td> <td>5</td> <td>5</td> </tr> </tbody> </table>		Seq 0 = conditioning	0	1	Loading Cycles	5	5																																																																																														
Seq 0 = conditioning	0	1																																																																																																			
Loading Cycles	5	5																																																																																																			
<p style="text-align: center;">Page: 1 of 1 Printed 31/01/2019 3:02:18 p.m. </p>																																																																																																					

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
SECCIONAL BUCARAMANGA



**Universidad
Pontificia
Bolivariana**

Ensayo: Ensayo de módulos resilientes (mezcla asfáltica modificada) a 5°C. Muestra 1 Lado B

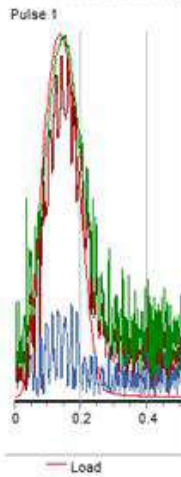
Resultados

Dbcomm

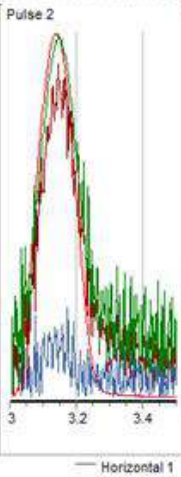
General Information

Project name: mezcla asfáltica MSC 25 30% CERAMICA
 Operator name: Edwin Rangel
 Data file: C:\Users\Administrador\Desktop\mezclas asfálticas\5 CMF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C MSC 25 30% 1-1 (1).td
 Test standards: EN12697-26C
 Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio
 Module type: Universal Test Module
 Version: 2.1.8.4
 Method file: C:\Pavetest\Testlab\Methods\Methods UPB Bucal21May18\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C.mtf

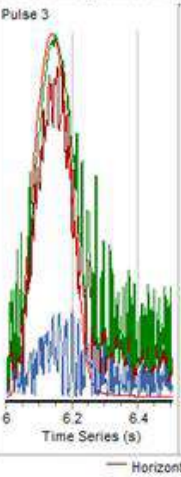
Pulse 1



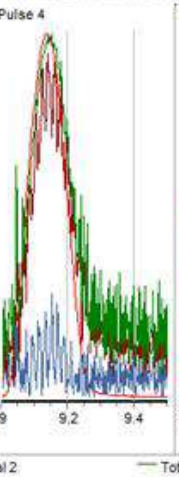
Pulse 2



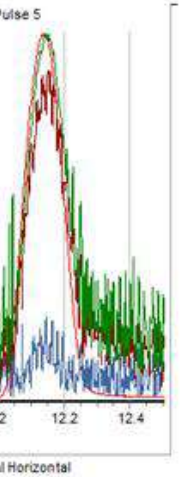
Pulse 3



Pulse 4



Pulse 5



Time Series (s)

— Load — Horizontal 1 — Horizontal 2 — Total Horizontal

Test Data

Test Date and Time: jue., ene. 31 2019, 3:24 PM

Total Pulses: 10

Actuator Displacement (mm): -36.05

Load (N): 51.96

Horizontal LVDT 1 (mm): 0.00036

Horizontal LVDT 2 (mm): -0.00087

Core Temperature (°C): 5.3

Surface Temperature (°C): 5.3

Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)		14205	14548	14656	13776	15007	14438	419	2.90
Adjusted stiffness modulus (MPa)		13229	13606	13643	12808	14008	13459	408	3.03
Peak loading force (N)		5739	5740	5740	5770	5803	5758	25	0.44
Load rise time (ms)		120.0	124.0	122.0	122.0	120.0	121.6	1.5	1.23
Load area factor		0.509	0.514	0.508	0.506	0.512	0.510	0.003	0.57
Peak horizontal deformation (µm)		5.01	4.89	4.86	5.19	4.79	4.95	0.14	2.85
Horizontal deformation 1 (µm)		0.98	1.21	1.43	1.36	1.48	1.29	0.18	14.12
Horizontal deformation 2 (µm)		4.03	3.68	3.42	3.83	3.31	3.66	0.26	7.18
Seating force (N)		49.2	50.6	49.9	46.9	52.0	49.7	1.7	3.35

Input Parameters

Gauge length(0=dia) (mm): 0.00

Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1

Target temperature (°C): 25.0

Loading Parameters

Target Deformation (µm): 5.000

Retries: 10

Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1
Loading Cycles	5	5

Page: 1 of 1

Printed 31/01/2019 3:26:46 p.m.

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
SECCIONAL BUCARAMANGA



Ensayo:

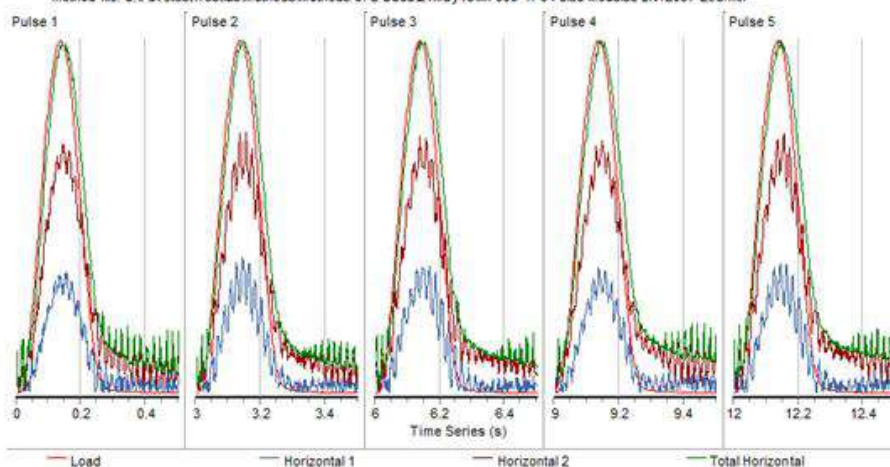
Ensayo de módulos resilientes (mezcla asfáltica modificada) a 5°C. Muestra 2 Lado A

Resultados

Dbcomm

General Information

Project name: mezcla asfaltica MSC 25 30% CERAMICA
Operator name: Edwin Rangel
Data file: C:\Users\Administrador\Desktop\mezclas asfalticas\5°C\CMF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C MSC 25 30% 1-1 (2).td
Test standards: EN12697-26C Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio
Module type: Universal Test Module IDT 5 Pulse Modulus test
Version: 2.1.8.4
Method file: C:\Pavetest\Testlab\Methods\Methods\UPB Bucu\21May18\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C.mtf



Test Data

Test Date and Time: jue., ene. 31 2019, 4:01 PM

Total Pulses: 10 Actuator Displacement (mm): -14.52 Load (N): 51.27
Horizontal LVDT 1 (mm): 0.00037 Horizontal LVDT 2 (mm): -0.00186 Core Temperature (°C): 5.0
Surface Temperature (°C): 4.6

Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)		13576	12593	13119	13075	12835	13040	328	2.51
Adjusted stiffness modulus (MPa)		12796	11868	12376	12283	12082	12281	311	2.53
Peak loading force (N)		5769	5776	5740	5616	5542	5689	93	1.64
Load rise time (ms)		120.0	120.0	124.0	120.0	122.0	121.2	1.6	1.32
Load area factor		0.523	0.522	0.523	0.518	0.520	0.521	0.002	0.36
Peak horizontal deformation (µm)		5.18	5.59	5.34	5.24	5.27	5.32	0.14	2.70
Horizontal deformation 1 (µm)		2.00	2.26	1.99	1.83	2.07	2.03	0.14	6.77
Horizontal deformation 2 (µm)		3.19	3.33	3.34	3.40	3.20	3.29	0.09	2.58
Seating force (N)		52.4	49.9	50.6	49.7	51.3	50.8	1.0	1.96

Input Parameters

Gauge length(0=dia) (mm): 0.00 Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1 Target temperature (°C): 25.0


Loading Parameters

Target Deformation (µm): 5.000

Retries: 10

Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1
Loading Cycles	5	5

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
SECCIONAL BUCARAMANGA



**Universidad
Pontificia
Bolivariana**

Ensayo:

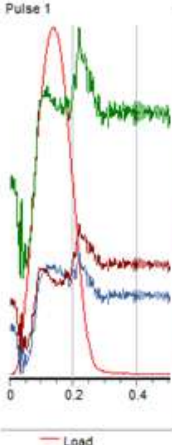
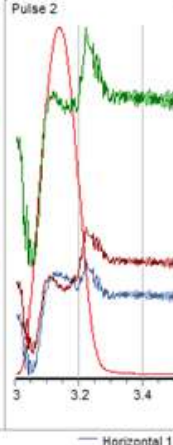
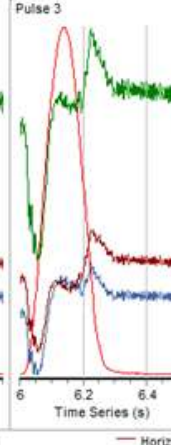
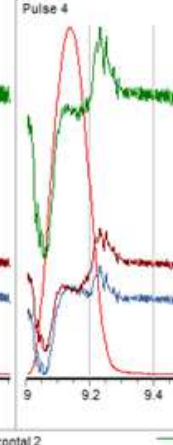
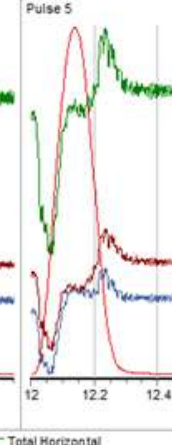
Ensayo de módulos resilientes (mezcla asfáltica modificada) a 5°C. Muestra 2 Lado B

Resultados

Dbcomm

General Information

Project name: mezcla asfáltica MSC 25 30% CERAMICA.
 Operator name: Edwin Rangel
 Data file: C:\Users\Administrador\Desktop\mezclas asfálticas\5°C\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C MSC 25 30% 2-1 (1).td
 Test standards: EN12697-26C Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio: IT 5 Pulse Modulus test
 Module type: Universal Test Module Version: 2.1.8.4
 Method file: C:\Pavetest\Testlab-Methods-Methods UPB Buca\21May18\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C.mtf

Time Series (s)

— Load — Horizontal 1 — Horizontal 2 — Total Horizontal

Test Data

Test Date and Time: jue., ene. 31 2019, 4:22 PM

Total Pulses: 10 Actuator Displacement (mm): -7.00 Load (N): 48.75
 Horizontal LVDT 1 (mm): -0.00853 Horizontal LVDT 2 (mm): 0.01074 Core Temperature (°C): 5.0
 Surface Temperature (°C): 5.0

Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV %
Stiffness modulus (MPa)		11118	11280	10850	10212	9765	10645	571	5.37
Adjusted stiffness modulus (MPa)		10411	10541	10189	9578	9124	9969	536	5.38
Peak loading force (N)		5710	5714	5473	5248	5022	5433	269	4.94
Load rise time (ms)		124.0	124.0	124.0	124.0	122.0	123.6	0.8	0.65
Load area factor		0.511	0.509	0.515	0.512	0.506	0.511	0.003	0.56
Peak horizontal deformation (µm)		6.26	6.18	6.15	6.27	6.27	6.23	0.05	0.82
Horizontal deformation 1 (µm)		3.78	2.79	2.25	2.15	2.07	2.61	0.64	24.43
Horizontal deformation 2 (µm)		2.49	3.39	3.90	4.12	4.20	3.62	0.63	17.50
Seating force (N)		51.3	50.1	51.3	50.4	48.8	50.4	0.9	1.84

Input Parameters

Gauge length(0=dia) (mm): 0.00 Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1 Target temperature (°C): 25.0

Loading Parameters

Target Deformation (µm): 5.000 Retries: 10

Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1
Loading Cycles	5	5

Page: 1 of 1

Printed 31/01/2019 4:24:59 p.m. Acti

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
SECCIONAL BUCARAMANGA



Ensayo:

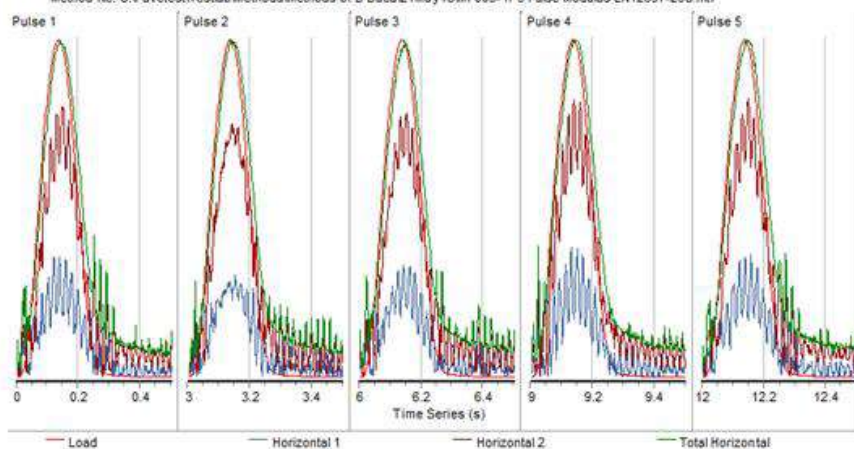
Ensayo de módulos resilientes (mezcla asfáltica modificada) a 5°C. Muestra 3 Lado A

Resultados

Dbcomm

General Information

Project name: mezcla asfáltica MSC 25 30% CERAMICA
Operator name: Edwin Rangel
Data file: C:\Users\Administrador\Desktop\mezclas asfálticas\5°CMF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C MSC 25 30% 2-1 (2).td
Test standards: EN12697-26C Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio
Module type: Universal Test Module IDT 5 Pulse Modulus test
Version: 2.1.8.4
Method file: C:\Pavetest\Testlab\Methods\Methods UPB Bucal211May18\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C.rtf



Test Data

Test Date and Time: jue., ene. 31 2019, 4:35 PM

Total Pulses: 10 Actuator Displacement (mm): 5.48 Load (N): 49.44
Horizontal LVDT 1 (mm): -0.00006 Horizontal LVDT 2 (mm): -0.00072 Core Temperature (°C): 5.4
Surface Temperature (°C): 5.1

Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)		15186	16860	15647	14662	14758	15423	799	5.18
Adjusted stiffness modulus (MPa)		14259	15782	14591	13830	13772	14447	732	5.06
Peak loading force (N)		6072	6075	6078	6212	6245	6137	76	1.24
Load rise time (ms)		122.0	122.0	122.0	124.0	122.0	122.4	0.8	0.65
Load area factor		0.520	0.518	0.512	0.525	0.512	0.517	0.005	0.97
Peak horizontal deformation (µm)		4.99	4.50	4.85	5.29	5.28	4.98	0.30	5.93
Horizontal deformation 1 (µm)		1.75	1.30	1.63	1.53	1.84	1.61	0.19	11.75
Horizontal deformation 2 (µm)		3.24	3.20	3.22	3.76	3.44	3.37	0.21	6.31
Seating force (N)		53.3	49.9	52.4	50.8	49.4	51.2	1.5	2.89

Input Parameters

Gauge length(0=dia) (mm): 0.00 Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1 Target temperature (°C): 25.0

Loading Parameters

Target Deformation (µm): 5.000

Retries: 10

Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1
Loading Cycles	5	5

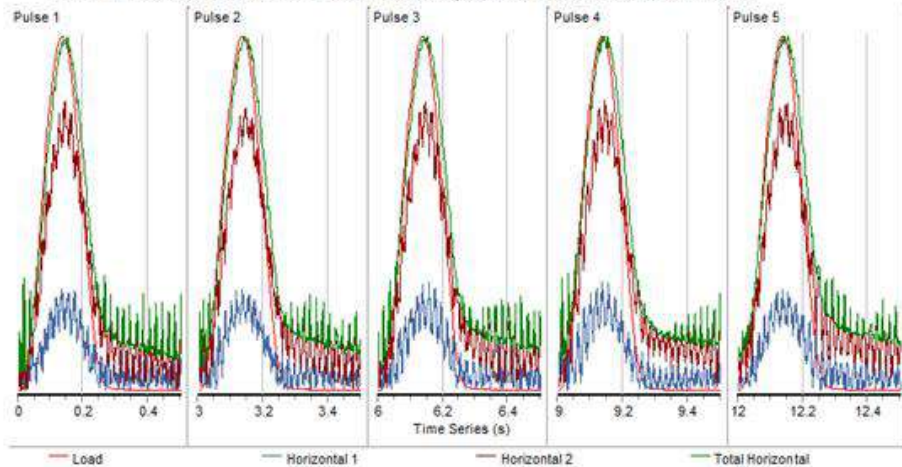
Ensayo:	Ensayo de módulos resilientes (mezcla asfáltica modificada) a 5°C. Muestra 3 Lado B
---------	---

Resultados

Dbcomm

General Information

Project name: mezcla asfáltica MSC 25 30% CERAMICA
 Operator name: Edwin Rangel
 Data file: C:\Users\Administrador\Desktop\mezclas asfálticas\5°CMF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C MSC 25 30% 3-1 (1).td
 Test standards: EN12697-26C Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio DT 5 Pulse Modulus test
 Module type: Universal Test Module
 Version: 2.1.8.4
 Method file: C:\Pavetest\Testlab-Methods-Methods UPB Bucar21May18\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C.mtf



Test Data

Test Date and Time: jue., ene. 31 2019, 4:53 PM

Total Pulses: 10 Actuator Displacement (mm): 17.53 Load (N): 51.04
 Horizontal LVDT 1 (mm): -0.00004 Horizontal LVDT 2 (mm): -0.00070 Core Temperature (°C): 4.6
 Surface Temperature (°C): 4.9

Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV %
Stiffness modulus (MPa)		14837	15141	14843	14674	15101	14919	176	1.18
Adjusted stiffness modulus (MPa)		13971	14185	13886	13752	14119	13983	156	1.12
Peak loading force (N)		5891	5895	5907	5940	5949	5916	24	0.40
Load rise time (ms)		126.0	124.0	124.0	124.0	124.0	124.4	0.8	0.64
Load area factor		0.523	0.517	0.515	0.517	0.514	0.517	0.003	0.58
Peak horizontal deformation (µm)		4.96	4.86	4.97	5.05	4.92	4.95	0.06	1.28
Horizontal deformation 1 (µm)		1.85	1.73	1.27	1.31	1.40	1.51	0.24	15.55
Horizontal deformation 2 (µm)		3.11	3.12	3.70	3.74	3.52	3.44	0.27	7.97
Seating force (N)		51.5	51.3	49.2	48.8	51.0	50.4	1.1	2.26

Input Parameters

Gauge length(0=dia) (mm): 0.00 Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1 Target temperature (°C): 25.0

Loading Parameters

Target Deformation (µm): 5.000 Retries: 10

Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1
Loading Cycles	5	5

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
SECCIONAL BUCARAMANGA



Ensayo:

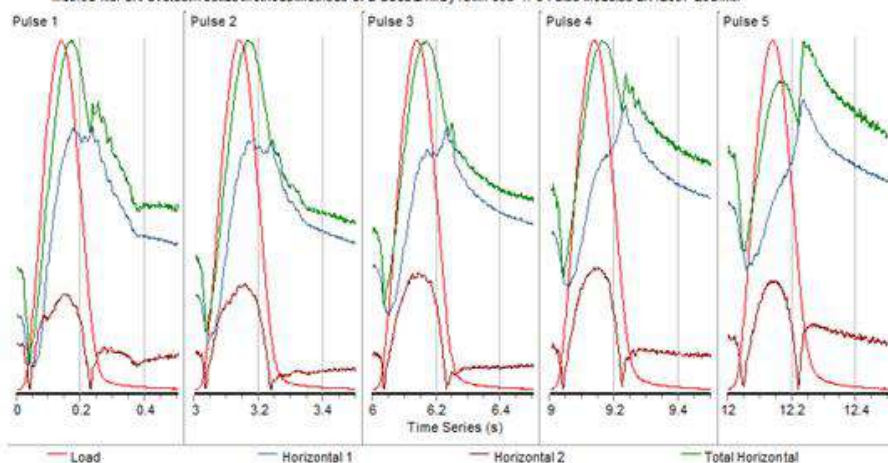
Ensayo de módulos resilientes (mezcla asfáltica modificada) a 25°C. Muestra 1 Lado A

Resultados

Dbcomm

General information

Project name: mezcla asfaltica MSC 25 30% CERAMICA
Operator name: Edwin Rangel
Data file: C:\Users\Administrador\Desktop\mezclas asfalticas\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C MSC 25 CONV 1-3(2).td
Test standards: EN12697-26C Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio
Module type: Universal Test Module IDT 5 Pulse Modulus test
Version: 2.1.8.4
Method file: C:\Pavetest\Testlab\Methods\Methods UPB Buc\21May18\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C.mtf



Test Data

Test Date and Time: lun., ene. 21 2019, 3:38 PM

Total Pulses: 10 Actuator Displacement (mm): -11.82 Load (N): 50.35
Horizontal LVDT 1 (mm): -0.02059 Horizontal LVDT 2 (mm): -0.00807 Core Temperature (°C): 25.0
Surface Temperature (°C): 25.1

Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV %
Stiffness modulus (MPa)		2068	2023	1858	1706	1490	1829	213	11.62
Adjusted stiffness modulus (MPa)		1977	1941	1775	1630	1423	1749	205	11.72
Peak loading force (N)		4838	4881	3948	2978	2028	3735	1101	29.48
Load rise time (ms)		124.0	124.0	122.0	118.0	126.0	122.8	2.7	2.21
Load area factor		0.509	0.516	0.504	0.501	0.497	0.505	0.006	1.24
Peak horizontal deformation (µm)		28.68	29.58	26.06	21.40	16.69	24.48	4.82	19.69
Horizontal deformation 1 (µm)		16.12	15.49	12.46	9.40	6.57	12.01	3.62	30.17
Horizontal deformation 2 (µm)		12.56	14.09	13.59	11.99	10.13	12.47	1.39	11.11
Seating force (N)		51.0	49.9	49.2	50.4	50.4	50.2	0.6	1.20

Input Parameters

Gauge length(0=dia) (mm): 0.00 Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1 Target temperature (°C): 25.0


Loading Parameters

Target Deformation (µm): 5.000

Retries: 10

Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1
Loading Cycles	5	5

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
SECCIONAL BUCARAMANGA



**Universidad
Pontificia
Bolivariana**

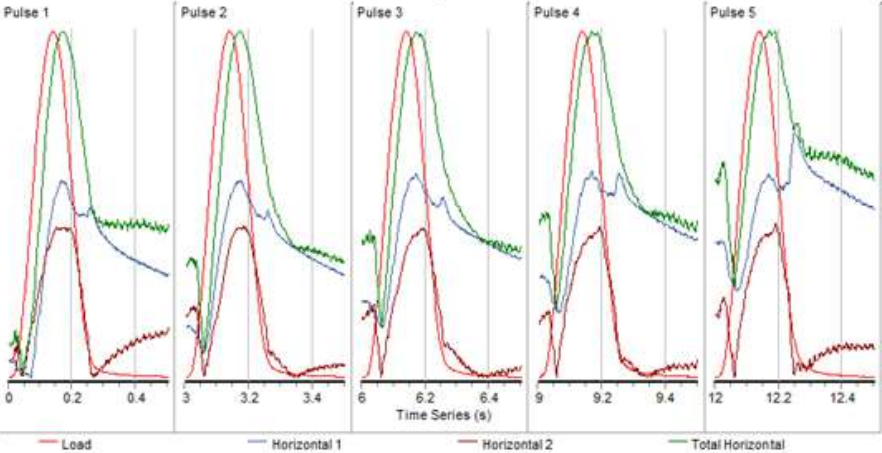
Ensayo: Ensayo de módulos resilientes (mezcla asfáltica modificada) a 25°C. Muestra 1 Lado B

Resultados

Dbcomm

General Information

Project name: mezcla asfáltica MSC 25 30% CERAMICA
 Operator name: Edwin Rangel
 Data file: C:\Users\Administrador\Desktop\mezclas asfálticas\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C MSC 25 30% 1-1(1).tid
 Test standards: EN12697-26C Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio
 Module type: Universal Test Module IDT 5 Pulse Modulus test
 Version: 2.1.8.4
 Method file: C:\Pavetest\Testlab-Methods-Methods UPB Bucal21May18\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C.mtf



Test Data

Test Date and Time: lun., ene. 21 2019, 3:51 PM

Total Pulses: 10 Actuator Displacement (mm): -9.35 Load (N): 51.04
 Horizontal LVDT 1 (mm): -0.01143 Horizontal LVDT 2 (mm): 0.00086 Core Temperature (°C): 25.1
 Surface Temperature (°C): 24.8

Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV %
Stiffness modulus (MPa)		1964	1548	1520	1562	1446	1608	182	11.34
Adjusted stiffness modulus (MPa)		1890	1491	1454	1491	1382	1541	179	11.60
Peak loading force (N)		6080	6137	5176	4138	3104	4927	1166	23.68
Load rise time (ms)		126.0	122.0	120.0	122.0	122.0	122.4	2.0	1.60
Load area factor		0.521	0.516	0.501	0.497	0.497	0.506	0.010	1.98
Peak horizontal deformation (µm)		37.96	48.60	41.75	32.48	26.32	37.42	7.64	20.41
Horizontal deformation 1 (µm)		19.60	19.73	15.85	10.96	9.01	15.03	4.39	29.21
Horizontal deformation 2 (µm)		18.36	28.87	25.90	21.51	17.30	22.39	4.41	19.69
Seating force (N)		48.5	50.1	50.8	48.8	51.0	49.9	1.0	2.08

Input Parameters


Gauge length(0=dia) (mm): 0.00 Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1 Target temperature (°C): 25.0

Loading Parameters

Target Deformation (µm): 5.000 Retries: 10

Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1
Loading Cycles	5	5

Page: 1 of 1

Printed 21/01/2019 3:53:52 p.m. 

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
SECCIONAL BUCARAMANGA



Ensayo:

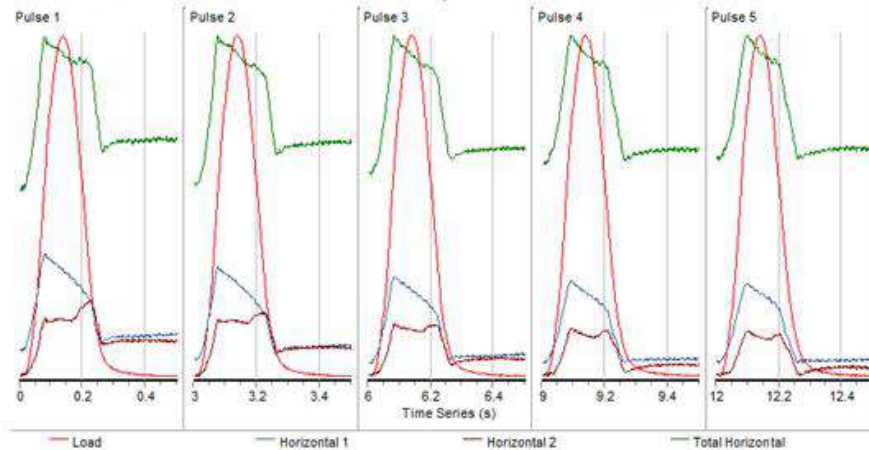
Ensayo de módulos resilientes (mezcla asfáltica modificada) a 25°C. Muestra 2 Lado A

Resultados

Dbcomm

General Information

Project name: mezcla asfaltica MSC 25 30% CERAMICA
Operator name: Edwin Rangel
Data file: C:\Users\Administrador\Desktop\mezclas asfalticas\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C MSC 25 30% 1-1(2).tdf
Test standards: EN12697-26C Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio
Module type: Universal Test Module IDT 5 Pulse Modulus test
Version: 2.1.8.4
Method file: C:\Pavetest\Testlab\Methods\Methods UPB Buc\21May18\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C.mtf



Test Data

Test Date and Time: lun., ene. 21 2019, 4:00 PM

Total Pulses: 10 Actuator Displacement (mm): -6.17 Load (N): 49.67
Horizontal LVDT 1 (mm): 0.02845 Horizontal LVDT 2 (mm): -0.02777 Core Temperature (°C): 25.1
Surface Temperature (°C): 25.0

Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)		4090	4440	4520	3957	3644	4130	321	7.77
Adjusted stiffness modulus (MPa)		3850	4187	4255	3683	3388	3873	322	8.31
Peak loading force (N)		2604	2606	2181	1820	1631	2168	398	18.34
Load rise time (ms)		122.0	122.0	122.0	118.0	122.0	121.2	1.6	1.32
Load area factor		0.498	0.504	0.501	0.479	0.474	0.491	0.012	2.46
Peak horizontal deformation (µm)		7.86	7.24	5.95	5.67	5.52	6.45	0.93	14.40
Horizontal deformation 1 (µm)		0.09	0.13	0.20	0.15	0.12	0.14	0.04	26.27
Horizontal deformation 2 (µm)		7.77	7.11	5.76	5.53	5.41	6.31	0.95	15.03
Seating force (N)		48.3	49.2	49.7	49.9	49.7	49.3	0.6	1.16

Input Parameters

Gauge length(0=dia) (mm): 0.00 Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1 Target temperature (°C): 25.0


Loading Parameters

Target Deformation (µm): 5.000

Retries: 10

Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1
Loading Cycles	5	5

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
SECCIONAL BUCARAMANGA



**Universidad
Pontificia
Bolivariana**

Ensayo:

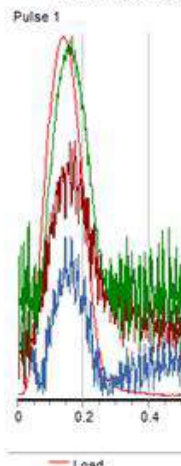
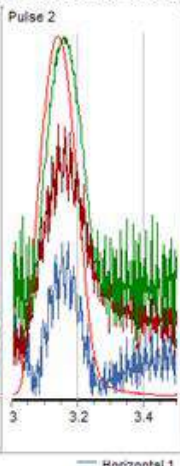
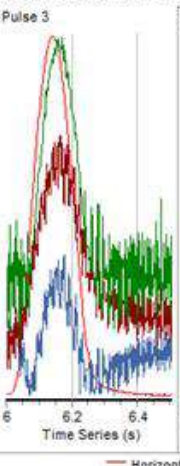
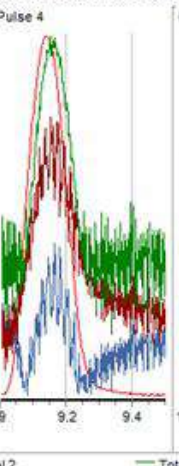
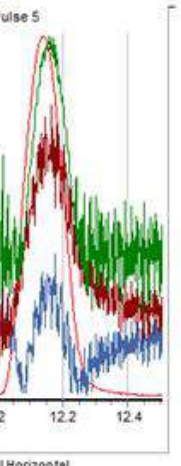
Ensayo de módulos resilientes (mezcla asfáltica modificada) a 25°C. Muestra 2 Lado B

Resultados

Dbcomm

General Information

Project name: mezcla asfáltica MSC 25 30% CERAMICA
 Operator name: Edwin Rangel
 Data file: C:\Users\Administrador\Desktop\mezclas asfalticas\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C MSC 25 30% 1-2(1).td
 Test standards: EN12697-26C Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio
 Module type: Universal Test Module IDT 5 Pulse Modulus test
 Version: 2.1.8.4
 Method file: C:\Pavetest\Testlab\Methods\Methods UPB Bucal21May18\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C.mtf

Time Series (s)

— Load — Horizontal 1 — Horizontal 2 — Total Horizontal

Test Data

Test Date and Time: lun., ene. 21 2019, 4:08 PM

Total Pulses: 10 Actuator Displacement (mm): -4.50 Load (N): 51.27
 Horizontal LVDT 1 (mm): 0.00166 Horizontal LVDT 2 (mm): -0.00094 Core Temperature (°C): 25.1
 Surface Temperature (°C): 24.9

Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV %
Stiffness modulus (MPa)		4301	4365	4393	4089	4124	4254	125	2.93
Adjusted stiffness modulus (MPa)		4031	4006	4115	3830	3866	3970	106	2.68
Peak loading force (N)		1797	1800	1764	1742	1754	1772	23	1.31
Load rise time (ms)		122.0	122.0	120.0	120.0	124.0	121.6	1.5	1.23
Load area factor		0.493	0.460	0.492	0.490	0.492	0.485	0.013	2.66
Peak horizontal deformation (µm)		5.16	5.09	4.96	5.26	5.25	5.14	0.11	2.17
Horizontal deformation 1 (µm)		2.33	2.53	2.45	2.65	2.84	2.56	0.18	6.84
Horizontal deformation 2 (µm)		2.83	2.56	2.51	2.61	2.41	2.58	0.14	5.40
Seating force (N)		50.4	49.0	48.1	51.3	51.3	50.0	1.3	2.55


Input Parameters


Gauge length(0=dia) (mm): 0.00 Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1 Target temperature (°C): 25.0

Loading Parameters

Target Deformation (µm): 5.000 Retries: 10

Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1
Loading Cycles	5	5

Page: 1 of 1 Printed 21/01/2019 4:11:08 p.m. 

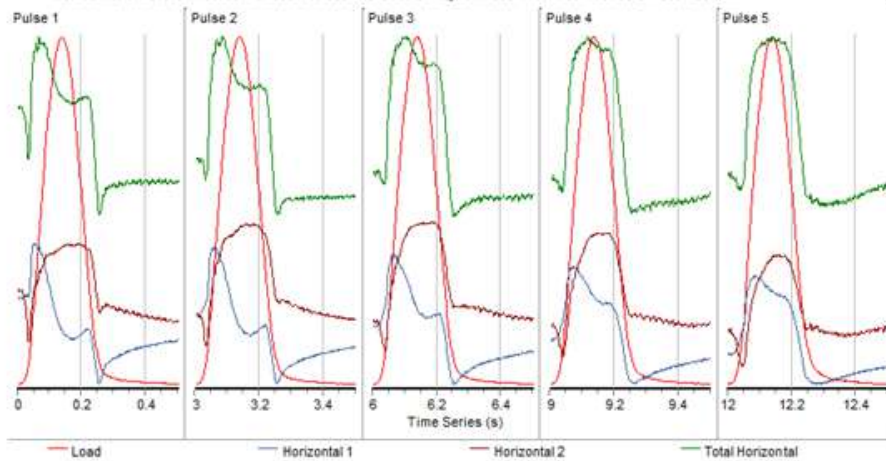
UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA	 Universidad Pontificia Bolivariana
Ensayo:	Ensayo de módulos resilientes (mezcla asfáltica modificada) a 25°C. Muestra 3 Lado A

Resultados

Dbcomm

General Information

Project name: mezcla asfáltica MSC 25 30% CERAMICA
 Operator name: Edwin Rangel
 Data file: C:\Users\Administrador\Desktop\mezclas asfálticas\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C MSC 25 30% 1-2(2).tid
 Test standards: EN12697-26C Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio
 Module type: Universal Test Module DT 5 Pulse Modulus test
 Version: 2.1.8.4
 Method file: C:\Pavetest\Testlab\Methods\Methods\UPB Bucal21May18\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C.mtf



Test Data

Test Date and Time: lun., ene. 21 2019, 4:23 PM

Total Pulses: 10 Actuator Displacement (mm): -0.74 Load (N): 50.35
 Horizontal LVDT 1 (mm): 0.03696 Horizontal LVDT 2 (mm): -0.04375 Core Temperature (°C): 25.0
 Surface Temperature (°C): 25.0

Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV %
Stiffness modulus (MPa)		3231	2742	2437	2321	2383	2623	337	12.85
Adjusted stiffness modulus (MPa)		3089	2611	2325	2207	2260	2499	327	13.07
Peak loading force (N)		4991	5027	4189	3283	2389	3976	1018	25.60
Load rise time (ms)		120.0	120.0	118.0	120.0	120.0	119.6	0.8	0.67
Load area factor		0.519	0.509	0.509	0.501	0.497	0.507	0.007	1.47
Peak horizontal deformation (µm)		19.13	22.71	21.29	17.51	12.42	18.61	3.57	19.19
Horizontal deformation 1 (µm)		12.25	9.92	7.85	5.61	3.38	7.80	3.12	39.98
Horizontal deformation 2 (µm)		6.88	12.78	13.43	11.90	9.04	10.81	2.47	22.88
Seating force (N)		50.4	50.8	50.4	50.6	50.4	50.5	0.2	0.36

Input Parameters

Gauge length(0=dia) (mm): 0.00 Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1 Target temperature (°C): 25.0

Loading Parameters

Target Deformation (µm): 5.000

Retries: 10

Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1
Loading Cycles	5	5

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
SECCIONAL BUCARAMANGA



Ensayo:

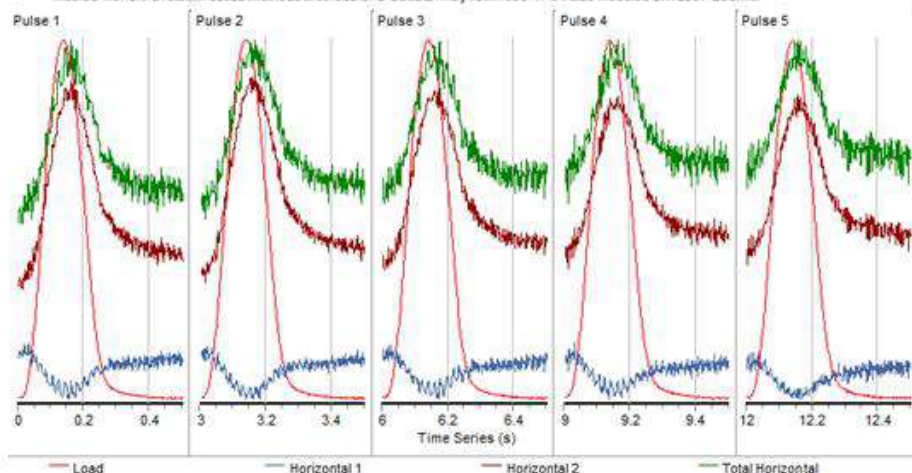
Ensayo de módulos resilientes (mezcla asfáltica modificada) a 25°C. Muestra 3 Lado B

Resultados

Dbcomm

General Information

Project name: mezcla asfáltica MSC 25 30% CERAMICA
Operator name: Edwin Rangel
Data file: C:\Users\Administrador\Desktop\mezclas asfálticas\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C MSC 25 30% 1-3(1).tdf
Test standards: EN12697-26C Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio
Module type: Universal Test Module IDT 5 Pulse Modulus test
Version: 2.1.8.4
Method file: C:\Pavetest\Testlab-Methods-Methods UPB Buca\21May18\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C.mtf



Test Data

Test Date and Time: lun., ene. 21 2019, 4:36 PM

Total Pulses: 10 Actuator Displacement (mm): 7.93 Load (N): 51.96
Horizontal LVDT 1 (mm): -0.00055 Horizontal LVDT 2 (mm): -0.00353 Core Temperature (°C): 25.0
Surface Temperature (°C): 25.0

Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)		3076	3022	3082	3086	3133	3080	35	1.15
Adjusted stiffness modulus (MPa)		2913	2860	2866	2903	2950	2898	33	1.13
Peak loading force (N)		1522	1521	1310	1079	1019	1290	212	16.45
Load rise time (ms)		124.0	124.0	124.0	128.0	122.0	124.4	2.0	1.58
Load area factor		0.501	0.500	0.470	0.490	0.491	0.490	0.011	2.28
Peak horizontal deformation (µm)		6.13	6.23	5.27	4.33	4.03	5.20	0.90	17.34
Horizontal deformation 1 (µm)		0.99	0.84	0.95	0.81	0.66	0.85	0.12	13.57
Horizontal deformation 2 (µm)		5.14	5.40	4.32	3.52	3.37	4.35	0.82	18.89
Seating force (N)		49.4	51.0	49.4	49.7	52.0	50.3	1.0	2.02

Input Parameters

Gauge length(0=dia) (mm): 0.00 Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1 Target temperature (°C): 25.0

Loading Parameters

Target Deformation (µm): 5.000

Retries: 10

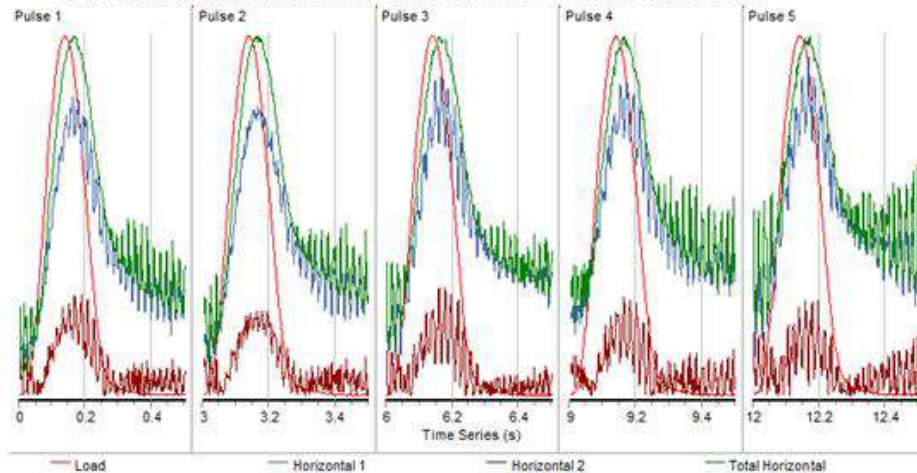
Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1
Loading Cycles	5	5

Resultados

Dbcomm

General information

Project name: mezcla asfáltica MSC 25 + 30% CERAMICA
 Operator name: Edwin Rangel
 Data file: C:\Users\Administrador\Desktop\mezclas asfalticas\40°C\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C MSC 25 CONV 3-3(2).td
 Test standards: EN12697-26C
 Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio DT 5 Pulse Modulus test
 Module type: Universal Test Module
 Version: 2.1.8.4
 Method file: C:\Pavetest\Testlab-Methods-Methods\UPB Bucaramanga\21May16\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C.mtf



Test Data

Test Date and Time: mar., feb. 5 2019, 4:47 PM

Total Pulses: 10 Actuator Displacement (mm): -13.84 Load (N): 51.27
 Horizontal LVDT 1 (mm): -0.00247 Horizontal LVDT 2 (mm): 0.00030 Core Temperature (°C): 39.7
 Surface Temperature (°C): 40.0

Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV %
Stiffness modulus (MPa)		2768	3019	2584	2704	2566	2728	164	6.00
Adjusted stiffness modulus (MPa)		2571	2856	2418	2522	2366	2547	171	6.70
Peak loading force (N)		1447	1450	1178	989	849	1182	241	20.36
Load rise time (ms)		122.0	126.0	126.0	128.0	124.0	125.2	2.0	1.63
Load area factor		0.463	0.498	0.475	0.470	0.448	0.471	0.016	3.50
Peak horizontal deformation (µm)		6.51	5.98	5.67	4.55	4.12	5.36	0.89	16.64
Horizontal deformation 1 (µm)		4.06	4.57	3.52	3.15	2.62	3.58	0.68	18.99
Horizontal deformation 2 (µm)		2.45	1.40	2.16	1.40	1.50	1.78	0.44	24.52
Seating force (N)		47.8	51.3	47.6	50.1	51.3	49.6	1.6	3.24

Input Parameters

Gauge length(0=dia) (mm): 0.00 Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1 Target temperature (°C): 25.0

Loading Parameters

Target Deformation (µm): 5.000 Retries: 10

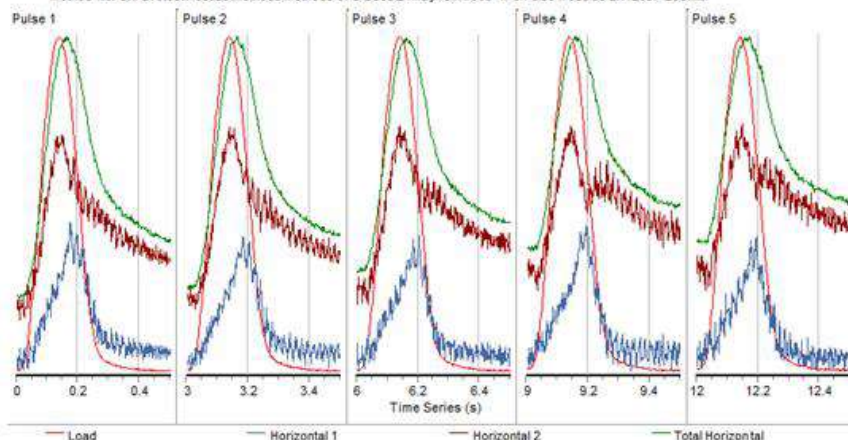
Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1
Loading Cycles	5	5

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA	
Ensayo:	Ensayo de módulos resilientes (mezcla asfáltica modificada) a 40°C. Muestra 1 Lado B
Resultados	

Dbcomm

General Information

Project name: mezcla asfáltica MSC 25 + 30% CERAMICA
 Operator name: Edwin Rangel
 Data file: C:\Users\Administrador\Desktop\mezclas asfálticas\40\CMF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C MSC 25 30% 3-1 (1).tid
 Test standards: EN12697-26C Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio: 0.25
 Module type: Universal Test Module DT 5 Pulse Modulus test
 Version: 2.1.8.4
 Method file: C:\Pavetest\Testlab-Methods-Methods UPB Bucal\21May18\WF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C.mtf



Test Data

Test Date and Time: mar., feb. 5 2019, 4:57 PM

Total Pulses: 10 Actuator Displacement (mm): -9.61 Load (N): 51.96
 Horizontal LVDT 1 (mm): -0.00035 Horizontal LVDT 2 (mm): -0.00215 Core Temperature (°C): 39.7
 Surface Temperature (°C): 40.2

Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)		2806	2786	2715	2665	2727	2740	51	1.86
Adjusted stiffness modulus (MPa)		2674	2597	2560	2469	2521	2564	69	2.71
Peak loading force (N)		1389	1392	1174	949	868	1154	217	18.83
Load rise time (ms)		126.0	122.0	124.0	128.0	124.0	124.8	2.0	1.63
Load area factor		0.510	0.471	0.490	0.458	0.455	0.477	0.021	4.36
Peak horizontal deformation (µm)		6.16	6.22	5.38	4.43	3.96	5.23	0.91	17.35
Horizontal deformation 1 (µm)		2.83	2.52	2.28	2.30	1.95	2.38	0.29	12.19
Horizontal deformation 2 (µm)		3.34	3.70	3.11	2.13	2.01	2.86	0.67	23.42
Seating force (N)		53.3	48.1	49.4	50.1	52.0	50.6	1.9	3.68

Input Parameters

Gauge length(0=dia) (mm): 0.00 Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1 Target temperature (°C): 25.0

Loading Parameters

Target Deformation (µm): 5.000

Retries: 10

Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1
Loading Cycles	5	5

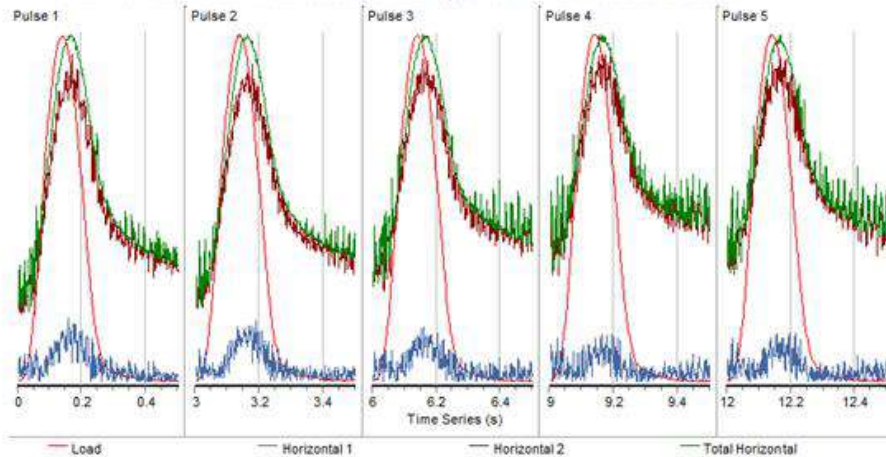
Ensayo:	Ensayo de módulos resilientes (mezcla asfáltica modificada) a 40°C. Muestra 2 Lado A
---------	--

Resultados

Dbcomm

General Information

Project name: mezcla asfatica MSC 25 + 30% CERAMICA
 Operator name: Edwin Rangel
 Data file: C:\Users\Administrador\Desktop\mezclas asfaticas\40°C\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C MSC 25 30% 3-1 (2).tid
 Test standards: EN12697-26C Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio IDT 5 Pulse Modulus test
 Module type: Universal Test Module
 Version: 2.1.8.4
 Method file: C:\Pavetest\Testlab\Methods\Methods\UPB Bucal21May18\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C.mtf



Test Data

Test Date and Time: mar., feb. 5 2019, 5:13 PM

Total Pulses: 10 Actuator Displacement (mm): -5.31 Load (N): 48.75
 Horizontal LVDT 1 (mm): 0.00043 Horizontal LVDT 2 (mm): -0.00333 Core Temperature (°C): 40.4
 Surface Temperature (°C): 40.6

Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)		2405	2518	2541	2527	2542	2506	52	2.06
Adjusted stiffness modulus (MPa)		2274	2345	2370	2387	2368	2349	40	1.70
Peak loading force (N)		1204	1207	981	797	855	1009	171	16.97
Load rise time (ms)		124.0	122.0	126.0	130.0	124.0	125.2	2.7	2.17
Load area factor		0.492	0.465	0.468	0.492	0.466	0.476	0.012	2.62
Peak horizontal deformation (µm)		6.19	5.93	4.77	3.90	4.16	4.99	0.92	18.45
Horizontal deformation 1 (µm)		1.31	1.43	1.11	1.19	1.30	1.27	0.11	8.69
Horizontal deformation 2 (µm)		4.88	4.49	3.66	2.72	2.86	3.72	0.86	23.09
Seating force (N)		49.9	50.6	49.0	51.5	48.8	49.9	1.0	2.04

Input Parameters

Gauge length(0=dia) (mm): 0.00 Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1 Target temperature (°C): 25.0

Loading Parameters

Target Deformation (µm): 5.000 Retries: 10

Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1
Loading Cycles	5	5

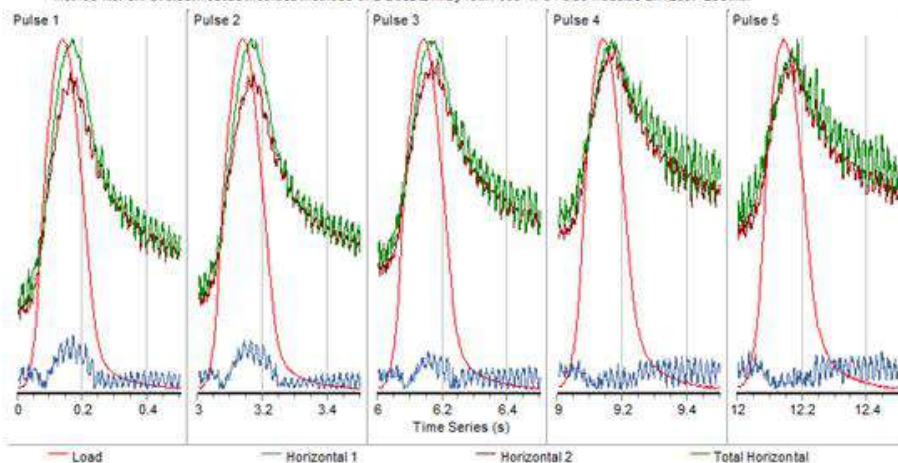
Ensayo:	Ensayo de módulos resilientes (mezcla asfáltica modificada) a 40°C. Muestra 2 Lado B
---------	--

Resultados

Dbcomm

General Information

Project name: mezcla asfaltica MSC 25 + 30% CERAMICA
 Operator name: Edwin Rangel
 Data file: C:\Users\Administrador\Desktop\mezclas asfalticas\40°C\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C MSC 25 30% 3-2 (1).tdf
 Test standards: EN12697-26C
 Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio: 0.25
 Module type: Universal Test Module
 IDT 5 Pulse Modulus test
 Version: 2.1.8.4
 Method file: C:\Pavetest\Testlab\Methods\Methods UPB Bucal\21May18\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C.mtf



Test Data

Test Date and Time: mar., feb. 5 2019, 5:26 PM

Total Pulses: 10 Actuator Displacement (mm): -1.31 Load (N): 51.04
 Horizontal LVDT 1 (mm): 0.00089 Horizontal LVDT 2 (mm): -0.00395 Core Temperature (°C): 40.3
 Surface Temperature (°C): 40.3

Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)		2578	2633	2609	2708	2597	2625	45	1.71
Adjusted stiffness modulus (MPa)		2375	2466	2392	2434	2342	2402	44	1.82
Peak loading force (N)		1460	1463	1129	809	734	1119	310	27.67
Load rise time (ms)		118.0	120.0	124.0	120.0	126.0	121.6	2.9	2.42
Load area factor		0.446	0.477	0.438	0.405	0.409	0.435	0.026	6.05
Peak horizontal deformation (µm)		7.00	6.87	5.35	3.69	3.49	5.28	1.50	28.35
Horizontal deformation 1 (µm)		1.55	1.48	1.14	0.63	0.76	1.11	0.37	33.10
Horizontal deformation 2 (µm)		5.46	5.39	4.21	3.06	2.73	4.17	1.14	27.22
Seating force (N)		48.3	50.8	50.1	50.4	51.0	50.1	1.0	1.94

Input Parameters

Gauge length(0=dia) (mm): 0.00 Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1 Target temperature (°C): 25.0

Loading Parameters

Target Deformation (µm): 5.000

Retries: 10

Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1
Loading Cycles	5	5

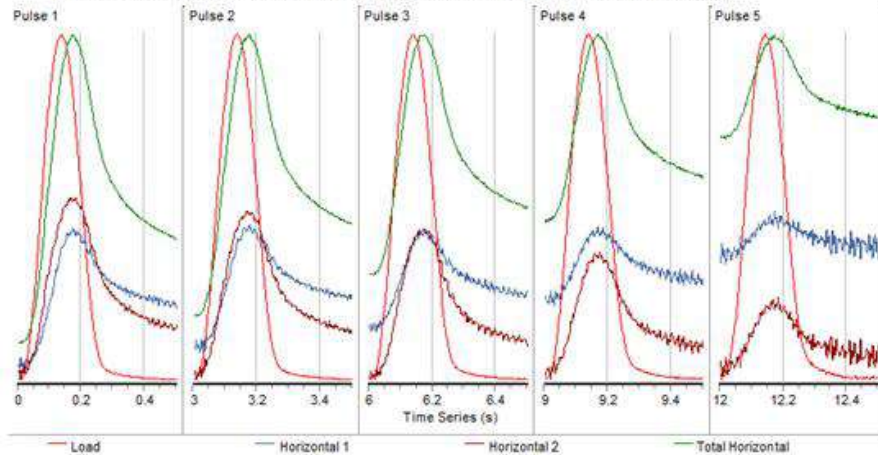
Ensayo:	Ensayo de módulos resilientes (mezcla asfáltica modificada) a 40°C. Muestra 3 Lado A
---------	--

Resultados

Dbcomm

General Information

Project name: mezcla asfáltica MSC 25 + 30% CERAMICA
 Operator name: Edwin Rangel
 Data file:
 Test standards: EN12697-26C
 Module type: Universal Test Module
 Version: 2.1.8.4
 Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio
 IDT 5 Pulse Modulus test
 Method file: C:\Pavetest\Testlab-Methods-Methods UPB Bucal21May18\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C.mtf



Test Data

Test Date and Time: mié., feb. 6 2019, 2:17 PM
 Total Pulses: 10 Actuator Displacement (mm): -32.58 Load (N): 51.50
 Horizontal LVDT 1 (mm): -0.00789 Horizontal LVDT 2 (mm): -0.00559 Core Temperature (°C): 40.0
 Surface Temperature (°C): 40.2

Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)		1657	1578	1612	1680	1665	1639	38	2.31
Adjusted stiffness modulus (MPa)		1588	1511	1535	1591	1560	1557	31	1.99
Peak loading force (N)		3029	3046	2187	1302	516	2016	988	48.99
Load rise time (ms)		124.0	124.0	124.0	124.0	138.0	126.8	5.6	4.42
Load area factor		0.508	0.504	0.493	0.483	0.460	0.490	0.017	3.49
Peak horizontal deformation (µm)		23.82	25.15	17.69	10.10	4.04	16.16	8.07	49.94
Horizontal deformation 1 (µm)		10.62	10.80	6.94	3.92	1.62	6.78	3.63	53.52
Horizontal deformation 2 (µm)		13.20	14.35	10.75	6.18	2.42	9.38	4.47	47.64
Seating force (N)		50.8	50.1	50.4	50.1	51.5	50.6	0.5	1.03

Input Parameters

Gauge length(0=dia) (mm): 0.00 Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1 Target temperature (°C): 25.0

Loading Parameters

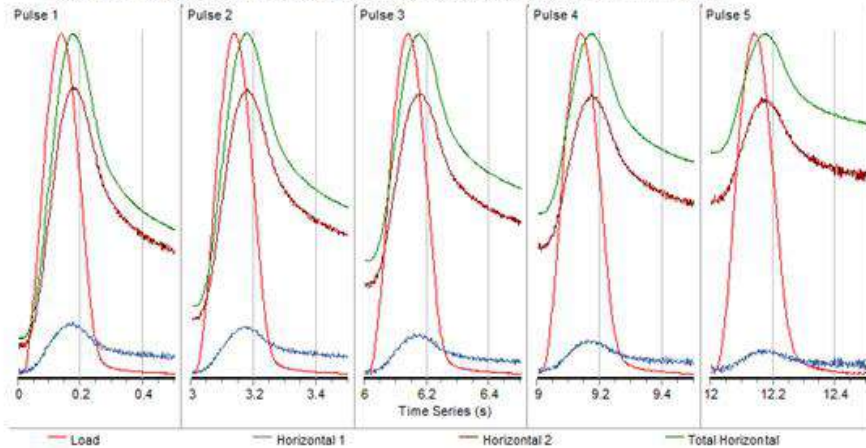
Target Deformation (µm): 5.000		Retries: 10	
Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1	
Loading Cycles	5	5	

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA	
Ensayo:	Ensayo de módulos resilientes (mezcla asfáltica modificada) a 40°C. Muestra 3 Lado B
Resultados	

Dbcomm

General Information

Project name: mezcla asfáltica MSC 25 + 30% CERAMICA
 Operator name: Edwin Rangel
 Data file: C:\Users\Administrador\Desktop\mezclas asfálticas\40°C\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C MSC 25 30 % 3-3 (1).td
 Test standards: EN12697-26C Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio
 Module type: Universal Test Module IDT 5 Pulse Modulus test
 Version: 2.1.6.4
 Method file: C:\Pavetest\Testlab-Methods-Methods UPB Bucal21May18\MF003- IT 5 Pulse Modulus EN12697-26C.mtf



Test Data

Test Date and Time: mié., feb. 6 2019, 2:25 PM

Total Pulses: 10 Actuator Displacement (mm): -28.83 Load (N): 51.27
 Horizontal LVDT 1 (mm): -0.00472 Horizontal LVDT 2 (mm): -0.02260 Core Temperature (°C): 39.7
 Surface Temperature (°C): 39.9

Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV %
Stiffness modulus (MPa)		1251	1160	1172	1199	1258	1208	40	3.31
Adjusted stiffness modulus (MPa)		1205	1118	1127	1149	1192	1158	35	3.00
Peak loading force (N)		3878	3904	2962	1990	1055	2758	1105	40.05
Load rise time (ms)		120.0	124.0	124.0	124.0	126.0	123.6	2.0	1.59
Load area factor		0.509	0.508	0.503	0.497	0.473	0.498	0.013	2.65
Peak horizontal deformation (µm)		40.39	43.85	32.93	21.63	10.93	29.95	12.18	40.69
Horizontal deformation 1 (µm)		6.68	7.29	5.71	3.84	1.84	5.07	1.99	39.33
Horizontal deformation 2 (µm)		33.71	36.56	27.22	17.79	9.09	24.87	10.19	40.98
Seating force (N)		50.4	50.6	50.6	49.7	51.3	50.5	0.5	1.02

Input Parameters

Gauge length(0=dia) (mm): 0.00 Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1 Target temperature (°C): 25.0

Loading Parameters

Target Deformation (µm): 5.000 Retries: 10

Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1
Loading Cycles	5	5

