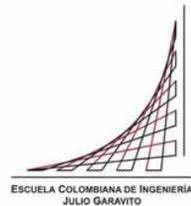


Maestría en Ingeniería Civil

**Ecuaciones constitutivas de módulo resiliente para materiales
tratados con asfalto espumado**

Sandy Jazmín Pardo Herreño

Bogotá D.C., 10 de Agosto de 2018



**Ecuaciones constitutivas de módulo resiliente para materiales
tratados con asfalto espumado**

**Tesis para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil, con
énfasis en Geotecnia**

Sandra Ximena Campagnoli M.

Directora

Bogotá D.C., 10 de Agosto de 2018



La tesis de maestría titulada “Ecuaciones constitutivas de módulo resiliente para materiales tratados con asfalto espumado”, presentada por Sandy Jazmín Pardo Herreño, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia.

Director de la tesis

Sandra Ximena Campagnoli M.

Jurado

Fernando Estrada

Jurado

Oscar Reyes

Bogotá D.C., 10 de Agosto de 2018

Dedicatoria

A todos y cada uno de los integrantes de mi familia, a mi abuelita Luisa López a quien amo y admiro por su valentía, generosidad e infinita sabiduría, “un día quiero ser como tú”, a mi papá por sus enseñanzas y constante apoyo, a mi mamá por ser una mujer sabia y ejemplar, por mostrar que con dedicación y teniendo los objetivos claros, sin importar lo difícil del camino y las lágrimas que representen se puede conseguir lo que se quiere, a mi abuelito Carlos Herreño por ser diferente y enseñarnos que con trabajo y esfuerzo se cambia el mundo. A mi hermanita incondicional y la mejor persona del mundo, a mi tía Janeth mi tercera mamá.

A todos mis compañeros y amigos que estuvieron pendientes en el desarrollo de este trabajo.

Agradecimientos

A la Ingeniera Sandra Campagnoli por su colaboración, apoyo incondicional y por guiarme en el desarrollo de este trabajo.

A la compañía de trabajo Urbanos CTU, a Incoasfaltos y a MPI, por su contribución con los materiales para el desarrollo de este estudio.

A los laboratoristas Marco Contreras y Edgar Contreras por su apoyo en la realización de los ensayos.

Al ingeniero Dairo Puentes, por sus conocimientos y aportes a mi trabajo de grado.

A la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito por brindarme una formación integral, por el acompañamiento durante todo el proceso de aprendizaje y elaboración de este trabajo de grado.

A todas las personas que formaron parte de este trabajo por medio de sus aportes en conocimiento e información.

Resumen

El reciclaje profundo de pavimentos usando cementos asfálticos espumados está ganando mayor aceptación en los trabajos de rehabilitación, ampliación o mejoramiento de las vías del país, debido a que los resultados alcanzados en otros ambientes han demostrado la bondad de la tecnología. Sin embargo, en el momento del diseño de la estructura del pavimento, empleando métodos empírico – mecánicos, se generan interrogantes sobre el valor del Módulo Resiliente – M_r , del material tratado que puede usarse de manera confiable, por lo que se requiere mayor investigación de esta área.

Atendiendo las recomendaciones del Asphalt Academy de Sudáfrica para el diseño de materiales estabilizados con asfalto espumado, se seleccionaron el llenante (Cal, cemento o natural) y la concentración de asfalto óptima en mezclas fabricadas con cuatro proporciones diferentes de Material Granular/RAP: 100/0, 85/15, 70/30 y 50/50, y tres tipos de asfaltos provenientes, dos de ellos, de la refinería de Barrancabermeja y uno de la planta de asfalto de Apiay en Colombia.

Bajo las condiciones, anteriormente definidas, se elaboraron probetas de 100mm de diámetro por 200mm de altura, sobre las cuales se realizaron pruebas tri-axiales, siguiendo la norma INV E- 156 – 13 “Módulo resiliente de suelos y agregados”

Los resultados de los ensayos arrojaron valores de Módulo resiliente, característicos de este tipo de mezclas, variando entre 300 MPa y 737 MPa, a partir de los cuales se analizaron diferentes modelos de comportamiento, considerando el estado de esfuerzos principales (primer invariante de esfuerzos $-\theta$), el esfuerzo desviador $-\sigma_d$ y el esfuerzo cortante octaédrico $-\tau_{oct}$, de tal forma que se puedan usar como indicadores de la variación de la rigidez de los materiales que involucran RAP, tratados con asfalto espumado, como son los obtenidos en procesos de reciclaje profundo de estructuras de pavimento.

Los resultados encontrados indican una mayor dependencia del módulo resiliente del esfuerzo desviador $-\sigma_d$, que del primer invariante de esfuerzo θ , contrario a lo descrito en la mayor parte de la literatura relacionada. Por otro lado, no se logró apreciar una tendencia definida de variación del M_r con el incremento en el RAP, ni con el tipo de asfalto, así como

tampoco con los cambios del tipo de llenante El estudio proporciona una visión del comportamiento del módulo resiliente de las mezclas tratadas con espuma de asfalto ante la aplicación de esfuerzos, así como los resultados de los modelos constitutivos. Esto ayudará a mejorar el procedimiento actual de evaluación y modelación de la rehabilitación de pavimentos. Además, aporta directrices que permitirán a los diseñadores tener órdenes de magnitud del módulo resiliente de este tipo de mezclas.

Para trabajos futuros, se recomienda tener un mayor control en los procesos del laboratorio y en la evaluación de los resultados para los diseños, con el fin de minimizar el número de variables que pueden influir en los resultados.

Palabras clave: Asfalto Espumado, Materiales tratados con asfalto espumado, módulo resiliente, reciclaje de pavimentos.

INDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN	19
1.1	Organización de la Tesis	20
2.	Objetivos	22
2.1	Objetivo general	22
2.2	Objetivos específicos.....	22
3.	MARCO TEÓRICO.....	23
3.1	Antecedentes.....	23
3.2	Marco Conceptual.....	46
3.2.1	Asfalto Espumado	46
3.2.2	Recuperación total de espesores.....	51
3.2.3	Reciclaje en frío	54
3.2.4	Materiales Granulares tratados con asfalto espumado	60
3.2.5	Propiedades de los materiales tratados con asfalto espumado.	61
3.2.6	Granulometría.....	61
3.2.7	Contenido de Finos.....	63
3.2.8	Tracción indirecta	63
3.2.9	Módulo Resiliente.	64
4.	METODOLOGÍA	77
4.1	SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.....	77
	Caracterización de la espuma de asfalto.....	80
4.2	MEZCLAS DE AGREGADOS Y RAP	83
	Densidad seca y contenido de humedad óptima.	85
4.3	SELECCIÓN DE LLENANTE OPTIMO	87
4.4	SELECCIÓN DE ASFALTO ÓPTIMO	88

4.5 FABRICACIÓN DE PROBETAS PARA ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE	89
4.5 ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE.....	89
4.5 DEFINICIÓN DE MÓDELOS	94
5. DISEÑO DE MEZCLAS.....	97
5.1 MEZCLA 100/0	98
5.1.1 ASFALTO 60/70 BARRANCA B1	98
5.1.2 ASFALTO 60/70 BARRANCA B2	99
5.1.3 ASFALTO 60/70 APIAY A1.....	101
5.2 MEZCLA 85/15	104
5.2.1 ASFALTO 60/70 BARRANCA B1	104
5.2.2 ASFALTO 60/70 BARRANCA B2	105
5.2.3 ASFALTO 60/70 APIAY A1.....	107
5.3 MEZCLA 70/30	110
5.3.1 ASFALTO 60/70 BARRANCA B1	110
5.3.2 ASFALTO 60/70 BARRANCA B2	111
5.3.3 ASFALTO 60/70 APIAY A1.....	113
5.4 MEZCLA 50/50	116
5.4.1 ASFALTO 60/70 BARRANCA B1	116
5.4.2 ASFALTO 60/70 BARRANCA B2	117
5.4.3 ASFALTO 60/70 APIAY A1.....	119
5.5 RESUMEN DE DISEÑOS DE FORMULAS DE TRABAJO	122
6. resultados Y análisis	126
6.1 MEZCLA 100/0	127
6.1.1 Módulo Resiliente Asfalto B1.....	127
6.1.2 Módulo Resiliente Asfalto B2.....	128
6.1.3 Módulo Resiliente Asfalto A1	129
6.1.4 Ecuaciones Constitutivas.....	130

6.2	MEZCLA 85/15	135
6.2.1	Módulo Resiliente Asfalto B1	135
6.2.2	Módulo Resiliente Asfalto B2	136
6.2.3	Módulo Resiliente Asfalto A1	136
6.2.4	Ecuaciones Constitutivas.....	137
6.3	MEZCLA 70/30	143
6.3.1	Módulo Resiliente Asfalto B1	143
6.3.2	Módulo Resiliente Asfalto B2	144
6.3.3	Módulo Resiliente Asfalto A1	144
6.3.4	Ecuaciones Constitutivas.....	145
6.4	MEZCLA 50/50	150
6.4.1	Módulo Resiliente Asfalto B1	150
6.4.2	Módulo Resiliente Asfalto B2	151
6.4.3	Módulo Resiliente Asfalto A1	152
6.4.4	Ecuaciones Constitutivas.....	153
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	161
6.1.1	Conclusiones particulares.....	163
6.2	RECOMENDACIONES.....	164
8.	BIBLIOGRAFIA	165
9.	ANEXOS	171
	ANEXO A: DENSIDAD SECA PROCTOR MODIFICADO.....	172
	MEZCLA 100-0:.....	172
	MEZCLA 85-15:.....	173
	MEZCLA 70-30:.....	174
	MEZCLA 50-50:.....	175
10.	ANEXO B: DISEÑO DE MEZCLASObtención de llenante Mezcla 100-00 AF-A1	177
	Obtención de llenante Mezcla 85-15 AF-A1.....	178

Obtención de llenante Mezcla 70-30 AF-A1.....	179
Obtención de llenante Mezcla 50-50 AF-A1.....	180
Obtención de llenante Mezcla 100-0 AF-B1.....	181
Obtención de llenante Mezcla 85-15 AF-B1.....	182
Obtención de llenante Mezcla 70-30 AF-B1.....	183
Obtención de llenante Mezcla 100-0 AF-B2.....	185
Obtención de llenante Mezcla 85-15 AF-B2.....	186
Obtención de llenante Mezcla 70-30 AF-B2.....	187
Obtención de llenante Mezcla 50-50 AF-B2.....	188
Obtención de óptimo de asfalto espumado Mezcla 100-00 AF-A1	189
Obtención de óptimo de asfalto espumado Mezcla 85-15 AF-A1.....	190
Obtención de óptimo de asfalto espumado Mezcla 70-30 AF-A1.....	191
Obtención de óptimo de asfalto espumado Mezcla 50-50 AF-A1.....	192
Obtención de óptimo de asfalto espumado Mezcla 100-0 AF-B1.....	193
Obtención de óptimo de asfalto espumado Mezcla 85-15 AF-B1.....	194
Obtención de óptimo de asfalto espumado Mezcla 70-30 AF-B1.....	195
Obtención de óptimo de asfalto espumado Mezcla 50-50 AF-B1.....	196
Obtención de óptimo de asfalto espumado Mezcla 100-00 AF-B2.....	197
Obtención de óptimo de asfalto espumado Mezcla 85-15 AF-B2.....	198
Obtención de óptimo de asfalto espumado Mezcla 70-30 AF-B2.....	199
Obtención de óptimo de asfalto espumado Mezcla 50-50 AF-B2.....	200
ANEXO C: RESULTADOS DE MÓDULO RESILIENTE.....	201
MÓDULO RESILIENTE Mezcla 100-0 AF-B1 – p1	201
MÓDULO RESILIENTE Mezcla 100-0 AF-B1 – p2	202
MÓDULO RESILIENTE Mezcla 85-15 AF-B1 – p1	203
MÓDULO RESILIENTE Mezcla 85-15 AF-B1 – p2	204
MÓDULO RESILIENTE Mezcla 70-30 AF-B1 – p1	205

MÓDULO RESILIENTE Mezcla 70-30 AF-B1 – p2	206
MÓDULO RESILIENTE Mezcla 50-50 AF-B1 – p1	207
MÓDULO RESILIENTE Mezcla 100-0 AF-B2 – p1	208
MÓDULO RESILIENTE Mezcla 100-0 AF-B2 – p2	209
MÓDULO RESILIENTE Mezcla 85-15 AF-B2 – p1	210
MÓDULO RESILIENTE Mezcla 70-30 AF-B2 – p1	211
MÓDULO RESILIENTE Mezcla 70-30 AF-B2 – p2	212
MÓDULO RESILIENTE Mezcla 50-50 AF-B2 – p1	213
MÓDULO RESILIENTE Mezcla 50-50 AF-B2 – p2	214
MÓDULO RESILIENTE Mezcla 100-0 AF-a1 – p1	215
MÓDULO RESILIENTE Mezcla 100-0 AF-a1 – p2	216
MÓDULO RESILIENTE Mezcla 85-15 AF-a1 – p1	217
MÓDULO RESILIENTE Mezcla 85-15 AF-a1 – p2	218
MÓDULO RESILIENTE Mezcla 70-30 AF-a1 – p1	219
MÓDULO RESILIENTE Mezcla 70-30 AF-a1 – p2	220
MÓDULO RESILIENTE Mezcla 50-50 AF-a1 – p1	221
MÓDULO RESILIENTE Mezcla 50-50 AF-a1 – p2	222

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Cuadro de suelos que pueden ser estabilizados con asfalto espumado.....	26
Tabla 2 Variables y cambios en el estudio realizado por Castedo y Wood.....	29
Tabla 3 Contenido de asfalto espumado	37
Tabla 4 Resultados de k1, k2 y R2 de los diferentes autores para el modelo Mr-θ.....	71
Tabla 5 Resultados de k1, k2, k3 y R² de Santagata para el modelo de Uzan	73
Tabla 6 Resultados de los ensayos de caracterización del material granular	78
Tabla 7 Resultados de los ensayos de caracterización del RAP.....	78
Tabla 8 Clasificación y Penetración por Origen de cemento Asfáltico	79
Tabla 9 Valores mínimos de vida media y relación de expansión.	80
Tabla 10 Resumen de las características de la espuma óptima para asfaltos 60/70.....	83
Tabla 11 parametros de caracterizacion de las mezclas	84
Tabla 12 Densidad seca y porcentaje óptimo de humedad de las mezclas	85
Tabla 13 Presiones de confinamiento	90
Tabla 14 Valores de óptimo teórico recomendado en función de la granulometría.	97
Tabla 15 Parámetros de resistencia (ITS) para definición de llenante óptimo 100/0 B1	98
Tabla 16 Parámetros de resistencia (ITS) para definición de asfalto optimo 100/0 B1	98
Tabla 17 Parámetros de resistencia (ITS) para definición de llenante óptimo 100/0 B2.....	99
Tabla 18 Parámetros de resistencia (ITS) para definición de asfalto optimo 100/0 B2.....	100
Tabla 19 Parámetros de resistencia (ITS) para definición de llenante óptimo 100/0 A1.....	101
Tabla 20 Parámetros de resistencia (ITS) para definición de asfalto optimo 100/0 A1.....	101
Tabla 21 Resumen de resultados mezclas 100/0 con tres tipos de asfalto	102
Tabla 22 Parametros de resistencia (ITS) para definición de llenante óptimo	104
Tabla 23 Parámetros de resistencia (ITS) para definición de asfalto optimo	104
Tabla 24 Parametros de resistencia (ITS) para definición de llenante óptimo 85/15 Asfalto B2	105
Tabla 25 Parámetros de resistencia (ITS) para definición de asfalto optimo 85/15 Asfalto B2	106
Tabla 26 Parametros de resistencia (ITS) para definición de llenante óptimo mezcla 85/15 Asfalto A1.....	107

Tabla 27	Parámetros de resistencia (ITS) para definición de asfalto optimo mezcla 85/15 Asfalto A1.....	107
Tabla 28	Resumen de resultados mezclas 85/15 con tres tipos de asfalto	108
Tabla 29	Parámetros de resistencia (ITS) para definición de llenante óptimo mezcla 70/30 B1	110
Tabla 30	Parámetros de resistencia (ITS) para definición de asfalto optimo mezcla 70/30 B1	110
Tabla 31	Parámetros de resistencia (ITS) para definición de llenante óptimo mezcla 70/30 B2	111
Tabla 32	Parámetros de resistencia (ITS) para definición de asfalto optimo mezcla 70/30 B2	112
Tabla 33	Parámetros de resistencia (ITS) para definición de llenante óptimo mezcla 70/30 A1	113
Tabla 34	Parámetros de resistencia (ITS) para definición de asfalto optimo mezcla 70/30 A1	113
Tabla 35	Resumen de resultados mezclas 70/30 con tres tipos de asfalto	114
Tabla 36	Parametros de resistencia (ITS) para definición de llenante óptimo mezcla 50/50 B1	116
Tabla 37	Parametros de resistencia (ITS) para definición de asfalto optimo mezcla 50/50 B1	116
Tabla 38	Parametros de resistencia (ITS) para definición de llenante óptimo mezcla 50/50 B2	117
Tabla 39	Parametros de resistencia (ITS) para definición de asfalto optimo mezcla 50/50 B2	118
Tabla 40	Parámetros de resistencia (ITS) para definición de llenante óptimo mezcla 50/50 A1	119
Tabla 41	Parametros de resistencia (ITS) para definición de asfalto optimo mezcla 50/50 A1	119
Tabla 42	Resumen de resultados mezclas 50/50 con tres tipos de asfalto	120
Tabla 43	Recopilación de datos para fórmulas de trabajo.....	122
Tabla 44	Módulo resiliente para las diferentes σ_3 en la mezcla 100/0 Asfalto B1.	127
Tabla 45	Módulo resiliente para las diferentes σ_d en la mezcla 100/0 asfalto B2.	128
Tabla 46	Módulo resiliente para las diferentes σ_d en la mezcla 100/0 asfalto A1.	129
Tabla 47	valores de K para las tres ecuaciones constitutivas mezcla 100/0.	132
Tabla 48	Módulo resiliente para las diferentes σ_d en la mezclas 85/15 asfalto B1.	135

Tabla 49 Módulo resiliente para los diferentes σ_d en la mezcla 85/15 asfalto B2.....	136
Tabla 50 Módulo resiliente para los diferentes σ_d en la mezcla 85/15 asfalto A1.....	136
Tabla 51 valores de K para las tres ecuaciones constitutivas mezcla 85/15	139
Tabla 52 Módulo resiliente para los diferentes σ_d en la mezcla 70/30 asfalto B1.....	143
Tabla 53 Módulo resiliente para los diferentes σ_d en la mezcla 70/30 asfalto B2.....	144
Tabla 54 Módulo resiliente para los diferentes σ_d en la mezcla 70/30 asfalto A1.....	144
Tabla 55 valores de K para las tres ecuaciones constitutivas mezcla 70/30	147
Tabla 56 Módulo resiliente para las diferentes σ_d en la mezcla 50/50 asfalto B1.....	150
Tabla 57 Módulo resiliente para las diferentes σ_d en la mezcla 50/50 asfalto B2.....	151
Tabla 58 Módulo resiliente para las diferentes σ_d en la mezcla 50/50 asfalto A1.....	152
Tabla 59 valores de K para las tres ecuaciones constitutivas mezcla 50/50	154

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Equivalencias de espesores (Bowering, 1970).....	25
Figura 2 Influencia de la Temperatura en el ensayo de Estabilidad Hveem.((Jingang, Jenkins, Molenaar, & Shaopeng, 2011)	31
Figura 3 Influencia de la temperatura y el tiempo de curado en el módulo resiliente. (Jingang, Jenkins, Molenaar, & Shaopeng, 2011)	31
Figura 4 Influencia de la temperatura y el tiempo de curado en la resistencia Hveem. (Jingang, Jenkins, Molenaar, & Shaopeng, 2011)	31
Figura 5 Influencia de la temperatura y el tiempo de curado en la Estabilidad Marshall. (Jingang, Jenkins, Molenaar, & Shaopeng, 2011)	32
Figura 6 Comportamiento conceptual de los materiales para pavimentos (S. X. Campagnoli & Puentes, 2016)	47
Figura 7 Características de la espuma (S. X. Campagnoli & Puentes, 2016)	48
Figura 8 Área Bajo curva de decaimiento de la espuma (S. X. Campagnoli & Puentes, 2016)	50
Figura 9 Funcionamiento de la recicladora de pavimento (Wirtgen, 2012)	52
Figura 10 Proceso de Reciclado Manual de Reciclado en Frio (Wirtgen,2012)	57
Figura 11 Típico tren reciclador con mezclador de lechada, Manual de Reciclado en Frio (Wirtgen,2012).	57
Figura 12 Categorías de reciclado, Manual de Reciclado en Frio (Wirtgen,2012).	59
Figura 13 Curva Granulométrica, Manual de Reciclado TG2 (Asphalt Academy,2009).	61
Figura 14 Curva Granulométrica, Manual de Reciclado en frío (Wirtgen,2012).	62
Figura 15 Representación del ensayo de módulo resiliente, http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/viewFile/957/862..	65
Figura 16 Modelo Mr- θ mezcla (25%RAP, 75%MG, 2.5% Espuma de asfalto), (K. J. Jenkins et al., 2007)	69
Figura 17 Modelo Mr- θ mezcla (25%RAP, 75%MG, 2.0% Espuma de asfalto), (K.J. Jenkins & Mulusa, 2008)	69

Figura 18 Modelo Mr- θ mezcla (100%RAP, 2.5%Cemento, 3.5% Espuma de asfalto), (Santagata et al., 2010)	70
Figura 19 Modelo Mr- θ mezcla (20%RAP, 80% MG, 1.0%Cemento, 2.4% Espuma de asfalto), (Kim Jonathan Jenkins, 2013)	70
Figura 20 Modelo Mr- θ mezclas 1,2,3 y 4, (S. X. Campagnoli & Puentes, 2016)	71
Figura 21 Modelo Mr- θ mezcla (50% RAP, 50% material granular, 2.1% de espuma de asfalto), (Ben, 2014).....	76
Figura 22 Modelo Mr- θ mezcla (100% RAP, 2.1% de espuma de asfalto),(Ben, 2014).....	76
Figura 23 Curva Granulometría INVIAS de Base Granular.	77
Figura 24 Viscosidad (Pa*s) Vs. Temperatura para Cemento Asfáltico	80
Figura 25 Curvas granulométrica mezclas de agregado/RAP, Elaboración propia.....	84
Figura 26 Comportamiento de la Densidad seca y porcentaje óptimo de humedad de las mezclas, Elaboración propia.	85
Figura 27 Diagrama para la selección de llenante óptimo, Elaboración Propia	87
Figura 28 Diagrama para la selección de llenante óptimo, Elaboración Propia	88
Figura 29 Resultados de ITS vs % de asfalto 100/0 B1, Elaboración propia.	99
Figura 30 Resultados de ITS vs % de asfalto 100/0 B2, Elaboración propia.	100
Figura 31 Resultados de ITS vs % de asfalto 100/0 A1, Elaboración propia.	102
Figura 32 Resultados de parámetros de resistencia mezcla 100/0 con tres tipos de asfalto, Elaboración propia.	103
Figura 33 Resultados de ITS vs % de asfalto, Elaboración propia.	105
Figura 34 Resultados de ITS vs % de asfalto 85/15 Asfalto B2, Elaboración propia.	106
Figura 35 Resultados de ITS vs % de asfalto mezcla 85/15 Asfalto A1, Elaboración propia.....	108
Figura 36 Resultados de parámetros de resistencia mezcla 85/15 con tres tipos de asfalto, Elaboración propia.	109
Figura 37 Resultados de ITS vs % de asfalto mezcla 70/30 B1, Elaboración propia.....	111
Figura 38 Resultados de ITS vs % de asfalto mezcla 70/30 Asfalto B2, Elaboración propia.....	112
Figura 39 Resultados de ITS vs % de asfalto mezcla 70/30 A1, Elaboración propia.....	113
Figura 40 Resultados de parámetros de resistencia mezcla 70/30 con tres tipos de asfalto, Elaboración propia.	115
Figura 41 Resultados de ITS vs % de asfalto mezcla 50/50 B1, Elaboración propia.....	117
Figura 42 Resultados de ITS vs % de asfalto mezcla 50/50 Asfalto B2, Elaboración propia.....	118

Figura 43 Resultados de ITS vs % de asfalto mezcla 50/50 A1, Elaboración propia.	120
Figura 44 Resultados de parámetros de resistencia mezcla 50/50 con tres tipos de asfalto, Elaboración propia.	121
Figura 45 Parámetros de diseño de mezcla para los diferentes tipos de asfalto.	124
Figura 46 Resultados de MR vs θ para la mezcla 100/0+2.4 ASF B1+ CAL.	130
Figura 47 Resultados de MR vs θ para la mezcla 100/0+ 2.3 ASF B2+CEM.	131
Figura 48 Resultados de MR vs θ para la mezcla 100/0 + 2.3 ASF A1 + CEM.	131
Figura 49 Correlaciones entre el MR de laboratorio y el obtenido mediante las ecuaciones para la mezcla 100/0 con los tres tipos de asfalto.	133
Figura 50 Resultados de MR vs θ para la mezcla 85/15 + 2.3 ASF B1 + CAL.	138
Figura 51 Resultados de MR vs θ para la mezcla 85/15 + 2.5 ASF B2 + CAL.	138
Figura 52 Resultados de MR vs θ para la mezcla 85/15 + 2.8 ASF A1 + CEM.	139
Figura 53 Correlaciones entre el MR de laboratorio y el obtenido mediante las ecuaciones para mezcla 85/15 con los tres tipos de asfalto.	140
Figura 54 Resultados de MR vs θ para la mezcla 70/30 + 2.4 ASF B1 + CEM.	146
Figura 55 Resultados de MR vs θ para la mezcla 70/30 + 2.4 ASF B2 + CEM.	146
Figura 56 Resultados de MR vs θ para la mezcla 70/30 + 2.6 ASF A1 + CAL.	147
Figura 57 Correlaciones entre el MR de laboratorio y el obtenido mediante las ecuaciones para mezcla 70/30 con los tres tipos de asfalto.	148
Figura 58 Resultados de MR vs θ para la mezcla 50/50 + 2.4 ASF B1 + CEM.	153
Figura 59 Resultados de MR vs θ para la mezcla 50/50 + 2.2 ASF B2 + CEM.	153
Figura 60 Resultados de MR vs θ para la mezcla 50/50 + 3.0 ASF A1 + CAL.	154
Figura 61 Correlaciones entre el MR de laboratorio y el obtenido mediante las ecuaciones para mezcla 50/50 con los tres tipos de asfalto.	155
Figura 62 Valores de K1 y K2 para los diferente tipos de mezclas, modelo K- θ	158
Figura 63 Valores de K1, K2 y K3 para los diferente tipos de mezclas, modelo Universal.....	159
Figura 64 Valores de K1, K2 y K3 para los diferente tipos de mezclas, modelo τ Octaedrico.	160

1. INTRODUCCIÓN

La aplicación de nuevas tecnologías en pavimentos y la necesidad de lograr un desarrollo sostenible con materiales reciclados, como por ejemplo, los provenientes del fresado de las capas asfálticas, hacen de los nuevos procesos constructivos una oportunidad tentadora para la disminución de costos de inversión y el aumento de vida útil de las vías en nuestro país.

En Colombia las técnicas de reciclaje en frío, en especial la de recuperación total de espesores – conocida como Full Depth Reclamation (Involucra las capas asfálticas - RAP *Reclaimed Asphalt Pavement*, por sus siglas en inglés y parte de la capa granular) se han venido utilizando desde el comienzo de los años 90. A comienzos de 1992 en Colombia se empezó a intensificar la técnica del reciclaje en frío utilizando emulsiones asfálticas como ligante. Por ende se ha venido ganando experiencia y conocimiento sobre la importancia del reciclado de pavimentos.(Carlos, 2009); sin embargo con los avances de la tecnología también se ha realizado una apuesta para la utilización de espuma de asfalto la cual aún no es muy conocida en nuestro país a pesar de los grandes adelantos documentados a nivel mundial.

En las concesiones, el reciclaje en frío se ha convertido en una técnica muy usada para la rehabilitación de pavimentos existentes y se prevé que se incremente en las denominadas de Cuarta generación - 4G. Dentro de los agentes estabilizadores usados además del cemento y de las emulsiones asfálticas, los asfaltos espumados están ganando mayor aceptación.

Con la implementación y el creciente uso de los materiales que contienen RAP, tratados con asfalto espumado en Colombia, se hace necesario realizar un permanente control de las variables de Diseño para lograr un buen comportamiento de este material, lo que justifica que la presente propuesta tenga por objetivo principal investigar el comportamiento del módulo resiliente de dichos materiales.

Por otro lado, el Centro de Estudios Geotécnicos en los laboratorios de Suelos y Pavimentos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito ha sido pionero en la implementación y estudio de esta tecnología en Colombia, en especial en la caracterización de las espumas de asfalto y en el diseño de las estabilizaciones que se logran con los materiales reciclados.

Debido a que no se han realizado investigaciones formales en este campo en nuestro país, el beneficio más representativo en general del proyecto será la comprensión del comportamiento del módulo resiliente de los materiales granulares con diferentes proporciones de RAP tratados con espumas de asfalto de diferentes procedencias. Para dicha evaluación se utilizara el procedimiento descrito en la norma I.N.V.E-156-13 MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS.

El presente estudio fue desarrollado en su parte preliminar, en conjunto con el trabajo titulado “**Determinación de parámetros de resistencia al corte en materiales estabilizados con asfalto espumado**”, realizado por el ingeniero Dairo Steven Puentes P. para optar también por el grado de Maestría en Ingeniería Civil con énfasis en Geotécnica, de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

1.1 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

El trabajo presentado esta organizado en 7 capítulos descritos a continuación:

Capítulo 1. **INTRODUCCIÓN:** Se presenta un resumen general de lo contenido en el trabajo, el estado actual del problema que permite plantear las preguntas de investigación a las cuales se pretende dar respuesta con el cumplimiento de los objetivos presentados en el presente trabajo y adicionalmente se presenta un breve resumen de la metodología a seguir para el cumplimiento de los objetivos planteados.

Capítulo 2. **OBJETIVOS:** Describe de forma general el alcance del trabajo y los principales objetivos de la investigación.

Capítulo 3. **MARCO TEORICO** Se presenta la revisión bibliográfica de los Materiales Estabilizados con Asfalto Espumado - BSM's Foam en lo referente a las definiciones, historia, comportamientos y características de los materiales, así como una descripción del ensayo triaxial que permite la obtención del módulo resiliente y los diferentes modelos de ecuaciones constitutivas aplicados en la evaluación de la rigidez.

Capítulo 4. **METODOLOGÍA:** Se presenta la metodología y el diseño experimental a seguir. Se hace una descripción de los equipos y materiales a utilizar, la forma de preparación y tipo de mezclas, método de compactación, curado y ensayo de probetas y finalmente, se presenta la descripción de los protocolos de ensayo de laboratorio.

Capítulo **5. DISEÑO DE MEZCLA:** En donde se incluye la caracterización de los materiales junto con la definición del contenido de agua de espumado (FWC), y se presentan los resultados de los ensayos de ITS sobre briquetas tipo Marshall que permitieron obtener los parámetros de mezcla como lo son tipo de llenante (cal, cemento o natural) y contenido de espuma de asfalto. Se muestran todas las tablas y gráficos de los ensayos realizados, sus resultados y respectiva interpretación.

Capítulo **6. RESULTADOS Y ANÁLISIS:** Se presentan los resultados junto con los respectivos análisis de los ensayos de Módulo resiliente realizados sobre las probetas de cada mezcla, fabricada con la fórmula de trabajo establecida en el diseño. En este capítulo se realiza la evaluación de los diferentes modelos de ecuaciones constitutivas y se comparan los modelos de comportamiento, así como los valores del módulo con los obtenidos en las diferentes investigaciones.

Capítulo **7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:** Se presentan las conclusiones divididas en dos secciones; la primera, son conclusiones generales en donde se agrupan las basadas en los resultados ITS, en las propiedades de la espuma de asfalto y el diseño de la mezcla. La segunda, corresponde a las conclusiones particulares basadas en las observaciones sobre los resultados obtenidos de los ensayos triaxiales de módulo resiliente y el análisis de las ecuaciones constitutivas aplicadas para cada una de las mezclas.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Determinar las ecuaciones constitutivas del módulo resiliente de materiales provenientes del reciclaje profundo de pavimentos, tratados con Asfalto Espumado.

2.2 Objetivos específicos

- Evaluar el efecto del RAP sobre el módulo resiliente de las mezclas tratadas con asfalto espumado.
- Implementar la metodología de diseño de mezclas para la conformación de bases estabilizadas con asfalto espumado --de acuerdo con las recomendaciones de la experiencia Sudafricana.
- Evaluar las propiedades de tracción indirecta en las mezclas de base granular+ RAP + Asfalto espumado.
- Implementar la metodología de ensayo de Módulo Resiliente en la máquina dinámica Dynapave de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Analizar la coherencia de los resultados de rigidez obtenidos frente a los esperados de las mezclas tratadas con asfalto espumado cuando se evalúan bajo la acción de cargas dinámicas.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Antecedentes

Las mezclas de materiales tratados con asfalto espumado se han convertido en una de las alternativas más importantes para la construcción y rehabilitación de las vías en el mundo, cuando se requieren granulares con un mayor módulo para el tránsito de vehículos pesados. Es una técnica implementada recientemente en Colombia aproximadamente en 1992 (Carlos, 2009), sin embargo su inicio se registra en 1957 (Orellana, 2002) cuando se realizaron los primeros intentos de espumado del asfalto.

Los materiales tratados con asfalto espumado adquieren mejores cualidades mecánicas, los procesos de instalación son sencillos y adicionalmente estas mezclas se adaptan a las diferentes condiciones topográficas, lo que ha hecho que se conviertan en una solución a varios problemas de la ingeniería de pavimentos desde comienzos de los años 60 hasta nuestros días, colaborando con el desarrollo de la infraestructura vial en todos los países del mundo.

El estudio del asfalto espumado inicia en el año 1956 en la universidad estatal de Iowa, por el profesor Ladis H, Csanyi (Csanyi, 1960), quien utiliza el vapor de agua como un medio para incorporar el agua al asfalto caliente; sin embargo al querer dosificar el vapor de agua en pequeñas cantidades se le presentaron inconvenientes que no puedo resolver.

En 1968, la Mobil Oil Company, quien percibió de forma inmediata los beneficios de la espuma de asfalto, desarrolla un sistema donde el vapor de agua era inyectado directamente en el asfalto por medio de una cámara de expansión, dicho equipo es uno de los usados en la actualidad para producir espuma (Wirtgen, 2004).

Con el desarrollo del equipo y teniendo en cuenta los beneficios del uso de la espuma de asfalto, se inician las investigaciones en los diferentes países del mundo, entre estos se encuentran Australia, Sur África, Nueva Zelanda, Japón y Alemania.

En 1970, Bowering y C.I. Martin en su estudio *“Full Text Foamed Bitumen Production and Application of Mixtures Evaluation and Performance of Pavements”*, realizan una revisión

de la tecnología empleada en la producción de espuma y los procedimientos de ejecución de los ensayos.

En lo que a producción de espuma se refiere, el sistema desarrollado por la empresa Mobil, es uno de los mejores ya que controla la producción de vapor de tal forma que no altera las propiedades y la calidad del asfalto a diferencia de otros sistemas desarrollados.

Bowering y C.I Martin (1970), mencionan que una buena espuma es aquella que tiene una expansión de 10 a 15 veces el volumen del asfalto caliente inicial, la cual es producida por aproximadamente el 1 o el 2% de inyección de agua. Por otro lado, en lo que a vida media se refiere, una buena espuma es la que demora entre 2 o 3 minutos para tener la mitad del volumen original.

Otro aspecto evaluado en la investigación de Bowering y Martin fue la incidencia de la expansión del asfalto en el comportamiento de la mezcla, para esto se realizaron pruebas con material tratado y material sin tratar, de lo que se obtuvo que las propiedades más afectadas son la estabilidad, cohesión e hinchamiento.

El hinchamiento presento variaciones hasta de 6 veces siendo inferior el resultado obtenido para los asfaltos con baja expansión y superior los de alta expansión.

En lo que a procedimientos de laboratorio se refiere, se encontró que la evaluación en el sitio del tratamiento es muy importante, por lo que se determinaron los parámetros de resistencia a la deformación bajo la acción de cargas verticales a diferentes rangos de temperatura.

La evaluación de esto se realizó con varias pruebas con contenidos de humedad cercanos al óptimo de compactación, utilizando el martillo de amasado y curando las probetas al horno por tres días a 60°C para posteriormente realizar el ensayo; esta práctica pretendía simular la perdida de humedad de la mezcla durante la etapa de construcción y determinar la ganancia de resistencia.

Es importante mencionar que con la evolución de la metodología esta temperatura de curados para las probetas es de 40°C

Otro resultado encontrado en la investigación es que la combinación de la espuma de asfalto con el agregado mostro que forma puentes estables con los finos produciendo de esta manera una mezcla homogénea y estable, esto debido a que el asfalto cubre los finos primero, por lo que se genera una diferencia considerable con los procesos de estabilización realizados con emulsión asfáltica.

Adicionalmente se demostró que con porcentajes superiores al 1.5% las mezclas son mejores estructuralmente y esto se le ha atribuido al mortero que forma el tratamiento con asfalto espumado, que no se da en el realizado con emulsión asfáltica.

Por otro lado en la investigación de Bowering y Martin se hace énfasis en que el punto ideal en el cual se debe realizar el sello de la capa de material tratado es cuando este haya perdido entre el 20% y el 25% de la humedad de compactación.

Además, en el estudio se determinan las equivalencias de espesores cuando se usan diferentes métodos de estabilización.



Figura 1 Equivalencias de espesores (Bowering, 1970)

Con los resultados de las equivalencias obtenidos es fácilmente perceptible que las estabilizaciones con asfalto espumado resultan más económicas que con otros materiales.

En el año 1978 Abel (Abel, 1979) en la Universidad Estatal de Colorado, analiza la viscosidad de la espuma de asfalto con aditivos promotores de adherencia, agentes espumantes y concluyo lo siguiente:

- Los asfaltos que contienen siliconas tienen reducida la capacidad de formación de espuma.
- Los asfaltos espumados con viscosidades bajas presentan más manejabilidad y relaciones de expansión y vidas medias más altas, que los asfaltos con viscosidades altas.
Sin embargo, el uso de asfaltos de alta viscosidad muestra como resultado mayor recubrimiento de los agregados.
- Agentes promotores de adherencia intensifican la capacidad espumante de los asfaltos.
- La formación de espuma aceptable sólo se logró a temperaturas superiores a 149°C.

Por otro lado en 1979 en el sureste de África, Acott (Acott S.M., 1979), presento una tabla elaborada por Bowering y Martin, en donde se relacionan los tipos de suelos que pueden ser estabilizados con asfalto espumado (ver Tabla 1).

Tabla 1 Cuadro de suelos que pueden ser estabilizados con asfalto espumado.

Grupo de suelo	Comportamiento con el asfalto espumado	Rango asfalto espumado óptimo	Comentario
GW	Bueno	2.0 - 2.5	Mezclas permeables, útiles fracciones trituradas.
GW-GC	Bueno	2.0 - 4.5	Mezclas permeables, útiles fracciones trituradas.
GW-GM	Bueno	2.0 - 4.5	Mezclas permeables, útiles fracciones trituradas.

Grupo de suelo	Comportamiento con el asfalto espumado	Rango asfalto espumado óptimo	Comentario
GP-GC	Bueno	2.5 - 3.0	Baja permeabilidad, útiles fracciones trituradas.
GC	Pobre	4.0 - 6.0	Impermeables, contenido de asfalto crítico.
SW	Regular	4.0 - 5.0	Necesitan adición de filler o material pasa N°200.
SW-SM	Bueno	2.5 - 4.0	
SP-SM	Pobre	3.0 - 4.5	Necesitan un asfalto de alta viscosidad, y adición de material pasa N°200
SP	Regular	2.5 - 5.0	En ocasiones necesitan adición de filler o material pasa N°200.
SM	Bueno	2.5 - 4.5	
SM-SC	Bueno	4.0	
SC	Regular	4.0 - 6.1	Son pobres para formar espumar espuma
	Bueno	3.0 - 4.0	Cuando tiene limo son buenas para formar espuma

Fuente:(Ruckel, Acott, & Bowering, 1983)

Lee en 1980 (Lee, 1981), en su estudio proporciona evidencia experimental que sugiere que la pérdida de humedad no era un requisito previo para el aumento de la resistencia en las mezclas de asfalto espumado. Cualquiera que sea el caso, un procedimiento de diseño de mezclas de laboratorio se necesitaría para simular el proceso de curado de campo con el fin de correlacionar las propiedades de las mezclas preparadas en laboratorio con los de las mezclas de campo.

Puesto que el curado de mezclas de asfalto espumado se produce en el campo durante varios meses, no es práctico para reproducir las condiciones reales de campo de curado en el laboratorio. Se requiere un proceso de curado acelerado de laboratorio, en el que las características de ganancia de resistencia pueden ser correlacionadas con el comportamiento de campo, especialmente con las resistencias iniciales, intermedias y finales obtenidas. Esta caracterización es especialmente importante cuando se requiere el análisis de capacidad estructural, basado en los valores de resistencia, medida en un laboratorio.

Brennen y otros por su parte en 1980 (Brennan, 1981) en la Universidad de Purdue reportaron propiedades similares. En este se miden y comparan la relación de expansión y la vida media de asfaltos producidos en Indiana, y se determinó que, están principalmente afectados por; la cantidad de espuma producida, la cantidad de agua agregada y la temperatura del asfalto.

El resultado de esta investigación fue la selección de asfaltos con relaciones de expansión de 20 y vida media de aproximadamente 30 segundos.

Lee en 1981 (Muthen, 1998) muestra que no existen variaciones considerables en la resistencia al corte de las mezclas producidas con diferentes porcentajes de espumas. Esto está probablemente relacionado con el hecho de que gran parte de la resistencia al corte de mezclas de asfalto espumado se debe a la interacción entre partículas en lugar de agregar la cohesión ligante.

Mientras tanto en Texas Litte, Button y EPPS (Little, Button, & Epps, 1983) realizaron un estudio sobre cuatro tipos de arena y una grava silíceas, con las que se produjeron mezclas, y se determinó la resistencia, la fatiga, la estabilidad de cada una y de igual forma la susceptibilidad al agua y a la temperatura, para esta investigación se utilizó asfalto AC-10 de Petrofina American Texas, también un agente espumante producido por Continental Oil Company.

Resultados de la evaluación estructural:

Se determinaron los módulos resilientes, fatiga y estabilidad Hveem. Los módulos resilientes miden el comportamiento elástico de la capa, la fatiga determina los criterios de falla, y la estabilidad evalúa la habilidad de la mezcla para resistir esfuerzos.

De estos resultados se concluyó lo siguiente:

- El asfalto espumado es una alternativa económica para la estabilización de capas del pavimento si se usan diseños y procesos constructivos adecuados.
- Las mezclas con asfalto espumado tienen mayor resistencia a los esfuerzos verticales que el material suelto.
- Las muestras de laboratorio son altamente susceptibles al deterioro por humedad.
- Las muestras presentan una pequeña resistencia a la fatiga.

- Las estabilizaciones con asfalto espumado en sitio pueden ser satisfactorias y se disminuyen espesores.

En Estados Unidos en el año 1984, Humberto Castedo y Lenard Wood (Castedo Franco, L. H. Wood, 1983), realizaron una investigación cuyo objetivo principal era hacer una guía para el diseño de mezcla con asfalto espumado. Para esta investigación el asfalto usado fue AC-20 producido en Indiana, con una penetración de 42 (1/10mm) y la viscosidad cinemática fue la siguiente:

- 150°C - 229 cst.
- 147°C - 126 cst.
- 170°C - 72 cst.

La relación de expansión de este asfalto es de 12 y su vida media es de 13, adicionándole un 2% de agua en peso de asfalto, la temperatura del asfalto fue de 160°C.

Las materias primas utilizadas como agregado fueron; arena, grava triturada y roca machacada. Se realizaron varias pruebas tomando como variables y combinaciones lo que se muestra en la tabla 2.

Tabla 2 Variables y cambios en el estudio realizado por Castedo y Wood

Variable	Cambios
Contenido de asfalto	2
Contenido de agua de la mezcla	3
Temperatura de la mezcla	3
Temperatura del ensayo	2
Tiempo de Curado	

Fuente:(Castedo Franco, L. H. Wood, 1983)

Las probetas se fabricaron con los cuatro agregados y con el asfalto espumado, para la primera mezcla se adiciono una cantidad de agua inicial, y se realizaron tres mezcla a tres temperaturas diferentes 10°C, 22°C y 38°C y se ensayaron a dos temperaturas diferentes 22°C y 10°C, el proceso de curado se realizó igual para las dos por 1,3 y 7 días.

Con el fin de que las mezclas no sufrieran procesos de deformación permanente con el paso del tráfico, se hizo necesario que el peso unitario fuera alto. Por otro lado, se determinó la importancia de que la mezcla tenga un cierto porcentaje de vacíos, esto para que tenga un mejor drenaje y el curado sea rápido.

Los resultados de la investigación mostraron lo siguiente:

- La temperatura de mezcla del ensayo influye en la resistencia de la mezcla, ya que, a mayor temperatura, mayor cubrimiento de los agregados por lo tanto mayor resistencia.
- En el caso de la grava se evidencio que el comportamiento del módulo resiliente es inversamente proporcional a la temperatura, esto quiere decir que a temperaturas bajas se obtienen módulos altos. Por otro lado el tiempo de curado en las gravas es directamente proporcional a la resistencia a la deformación plástica, a mayor tiempo de curado mayor módulo resiliente.
- La mayor estabilidad de la mezcla se obtuvo cuando se adiciono el 1% de agua a la mezcla.
- Cuando se utilizó material reciclado se obtuvo que la estabilidad máxima analizada con el método Marshall se presentó con el 0.5% de agua en un curado de 7 días.
- El contenido de asfalto afecta de forma directa el módulo resiliente de la mezcla, es decir que a medida que aumenta el porcentaje de asfalto disminuye el módulo resiliente.

Los resultados de los diferentes ensayos realizados a cada una de las mezclas demostraron que los efectos del agua en este tipo de tratamiento son bastante fuertes.

Cuando las muestras se dejan curar únicamente por 1 día los valores de módulo resiliente son bajos y los efectos del agua son bastante influyentes, por otro lado los resultados de módulos obtenidos del curado de probetas de 3 a 7 días puede variar aproximadamente al 70%.

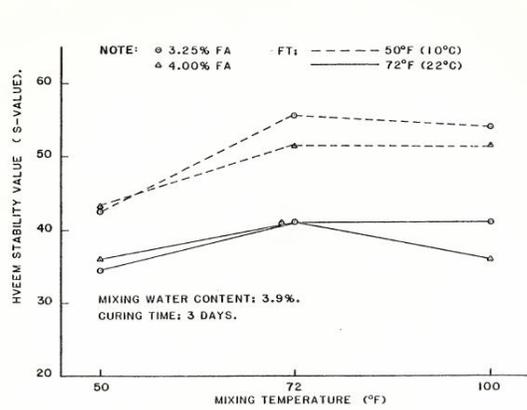


Figura 2 Influencia de la Temperatura en el ensayo de Estabilidad Hveem. (Jingang, Jenkins, Molenaar, & Shaopeng, 2011)

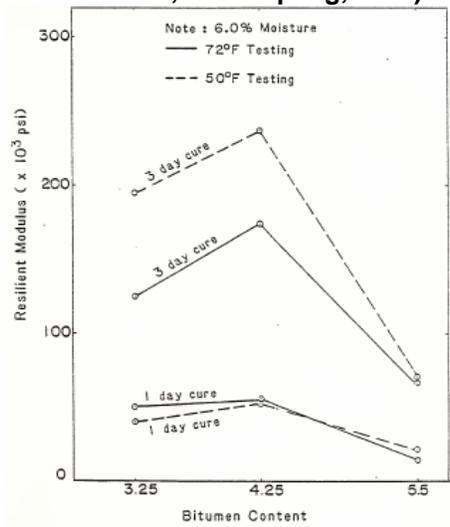


Figura 3 Influencia de la temperatura y el tiempo de curado en el módulo resiliente. (Jingang, Jenkins, Molenaar, & Shaopeng, 2011)

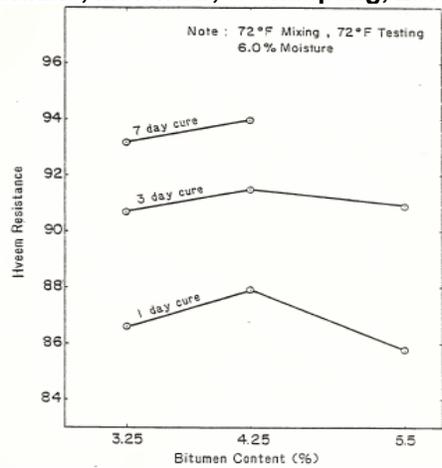


Figura 4 Influencia de la temperatura y el tiempo de curado en la resistencia Hveem. (Jingang, Jenkins, Molenaar, & Shaopeng, 2011)

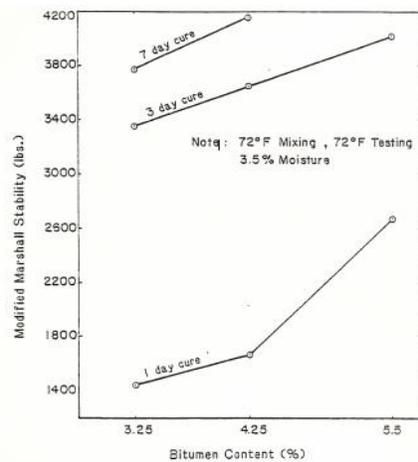


Figura 5 Influencia de la temperatura y el tiempo de curado en la Estabilidad Marshall. (Jingang, Jenkins, Molenaar, & Shaopeng, 2011)

En 1982 Ruckel (Ruckel, Acott, & Bowering, 1982) demuestra que el contenido de material que pasa el tamiz N° 200 del agregado es una consideración importante y debe ser preferiblemente por encima del 5 por ciento. La capacidad de asfalto espumado para mezclar selectivamente con estas partículas (menores de 0,075 mm) ha sido bien documentada.

El material de mezcla resultante (mezcla de asfalto y finos), que tiene una viscosidad significativamente mayor que el asfalto, actúa como un mortero entre los agregados gruesos y por lo tanto aumenta la resistencia de la mezcla. Sin embargo, la relación entre el contenido de finos y contenido de asfalto es crítica porque el exceso de betún en el mortero tenderán a actuar como un lubricante y genera la pérdida de resistencia y estabilidad.

Por otro lado también recomienda que se realicen pruebas de relación humedad – densidad, ya que la insuficiencia de agua reduce la trabajabilidad de la mezcla debido a que la dispersión es mínima y se aglomera el material, mientras que el exceso de agua se traduce en mayores tiempos de curado, menor resistencia y baja densidad de la mezcla compactada y poco recubrimiento de los agregados. El contenido de humedad óptimo varía, dependiendo de la propiedad de la mezcla que se está optimizando (resistencia, densidad, absorción de agua, hinchazón).

Acott y Myburg en el año 1983 (Acott & Myburgh, 1983) presentaron los resultados obtenidos de la evaluación estructural de dos caminos de prueba construidos en 1977 en

Sur África, usando asfalto espumado. Las vías evaluadas se mencionan a continuación así como sus características.

Camino en Kleinvei:

Localización: Cape Town Sur África

Longitud: 0.6 Km.

Esta vía se construye con una mezcla de 3% de asfalto, se realiza la estabilización en sitio con 15 cm de profundidad, para la construcción se utilizó un tractor lento, una pulvimixer y un tanque de asfalto de 10000L. El dispensador de asfalto espumado se colocó directamente sobre la pulvimixer.

En el proceso de compactación se utilizó un compactador neumático, y dos meses después se extendió una capa de slurry y se permitió el paso vehicular a tráfico residencial.

Camino en Chamdor:

Localización: Chamdor cerca de Johannesburgo.

Longitud: 0.2 Km.

Esta vía se constituye con el 4% de asfalto espumado mezclado con arenas, en planta, en una profundidad de 15cm; se combinaron *tres tipos de arena; de mina, de rio y de material aluvial*, el material se colocó en el sitio y se compacto con tres pasadas de llanta.

Los resultados de este estudio mostraron lo siguiente:

- Análisis de Tráfico.

Se encontró que el tráfico para Kleinvei, incrementaba año a año, esto debido a la aparición de vehículos pesados, con el aumento de la construcción de viviendas en el sector.

Chamdor se sometió desde el inicio al tráfico de vehículos pesados, razón por la cual en el año de 1978 se instaló una carpeta asfáltica de 5cm.

- Análisis de las deflexiones.

Las deflexiones en todas las secciones analizadas decrecen significativamente en los cinco años de evaluación, debido a la consolidación de las capas.

Se concluye que las arenas por no poseer una buena capacidad de empaquetamiento no son buenas para la producción de mezclas tratadas con asfalto espumado, ya sea en planta o en sitio.

La baja estabilidad de las mezclas es un factor crítico, sin embargo esta directamente influenciado por el tiempo de curado.

El camino de Kleinvei muestra un comportamiento aceptable una vez culminados los 5 años de evaluación estructural.

La vía de Chamdor no permitió que se pudiera realizar el seguimiento, debido a su temprano deterioro.

En el año 1999 , Brennen, Tia, Alschaeffl y Wood, en Indiana (Brennen, Tia, Altschaeffl, & Wood, 1999) realizaron un estudio, con el fin de determinar los siguientes parámetros de las mezclas con asfaltos espumados.

- Determinar las características de espumado de los asfaltos comúnmente usados.
- Comportamiento de tres de esos asfaltos para hacer reciclado usando compactación giratoria y estabilidad y compactación Marshall.
- Evaluar los efectos de curado y humedad de sobre la estabilidad de la mezcla.

Con esos objetivos se realizó el estudio, y al analizar los resultados se obtuvo lo siguiente:

- Al aumentar la temperatura desde 149°C a 177°C aumenta la relación de expansión, pero disminuye la vida media.
- Al incrementar el contenido de agua de 1.5% a 2.5% aumenta la expansión, pero decrece la vida media.
- Una temperatura de 163°C y un 2% de agua son los parámetros recomendados para obtener las mejores condiciones del asfalto espumado.
- El mejor asfalto para espumar fue uno identificado como AC-20 con una penetración de 42(1/10mm), el segundo fue el AP-4 con penetración de 69 (1/10mm) y el tercero fue el AC-25 CON 185 (1/10mm).

En cuanto al comportamiento de la mezcla se identificó, lo siguiente:

- Es necesario secar el material reciclado, a 60°C por lo menos por una hora.
- La compactación giratoria con una presión de 1.38 MPa y 20 rev produce densidades de 2.25 g/cm³. La compactación con martillo Marshall produce densidades de 2.0 g/cm³.
- La máxima estabilidad se obtuvo con un 0.5% de AP-4 y fue de 2720 Kg.
- Los flujos obtenidos entre el método giratorio y el Marshall varían considerablemente, el obtenido por el giratorio fue de 10-17 y el otro de 16-34.
- La máxima resistencia coincidió en los dos ensayos 102.000 lb/pg².
- 75 golpes con el martillo Marshall no son suficientes para lograr la compactación.
- La estabilidad Marshall obtenida es inferior después de haberlo sometido a inmersión.

Por otro lado en países de Latinoamérica también se han generado avances importantes en el estudio de los tratamientos con asfalto espumado.

En el caso de Colombia, la Escuela Colombiana de Ingeniería que ha sido pionera en el desarrollo investigativo de esta área, a partir de la adquisición de la planta para la producción de asfaltos espumados con un convenio realizado con la empresa Wirtgen GmbH de Alemania, se realizó en el año 1997 la investigación EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE ESPUMADO DE LOS ASFALTOS COLOMBIANOS para la Empresa Colombiana de petróleos Ecopetrol, a través del Instituto Colombiano del Petróleo. Con los resultados de esta investigación se determinó parámetros claves en la producción de espuma de asfalto, entre esos la temperatura.

Otro aporte realizado por la investigación en la cual se compararon los diferentes asfaltos producidos por las refinerías de Colombia (Barrancabermeja, Apiay, Cartagena y Refinare), fue que el asfalto de Apiay presenta un excelente comportamiento en lo que a producción de espuma se refiere, esto debido a que muestra buena relación de expansión y buenos resultados de vida media; sin embargo se aclaró que debido al poco control en la producción del mismo no se garantizaban las condiciones para todos los lotes(S. Campagnoli, 1998).

En Sudáfrica en el año 1998 Muthen (Muthen, 1998) presento un estudio realizado para SABITA Ltd & CSIR Transportek en Petroria, donde establecieron un modelo para realizar diseños de mezcla con asfalto espumado.

Motivado por la difícil situación económica del país. El hecho de trabajar con agregados húmedos y fríos y reducir las cantidades de asfalto a utilizar logrando una buena cohesión entre los materiales, además de presentar buenos resultados de resistencia a la fatiga y a la humedad. Muthen se dedica a estandarizar y normalizar esta tecnología en Sudáfrica.

Adicionalmente a este trabajo en la investigación se resaltaron las ventajas de trabajar con asfalto espumado.

- El asfalto espumado incrementa la resistencia y reduce la susceptibilidad a la humedad de los materiales granulares. Las características de resistencia de las mezclas con asfalto espumado alcanzan a los materiales cementados, pero la diferencia es que con asfalto espumado trabajan como pavimentos flexibles, resistentes a la fatiga.
- El tratamiento con asfalto espumado admite una gran gama de materiales
- Reduce costos por transporte
- Conserva la energía, ya que lo único que se calienta es el asfalto, los agregados no.
- Es amigable con el medio ambiente ya que no se generan gases volátiles durante el proceso.
- Las mezclas con asfalto espumado pueden ser almacenadas y permiten ser reutilizadas.
- Las capas tratadas con asfalto espumado pueden ser construidas en cualquier tipo de clima (caliente o frío) y las lluvias ligeras no afectan la trabajabilidad de los materiales.

Los resultados de parametrización de este estudio mostraron los siguientes aspectos básicos para la selección de materiales, y las proporciones adecuadas a utilizar para elegir la combinación perfecta para la realización de la mezcla:

- Valores óptimos en las propiedades de laboratorio.
- Requerimientos estructurales y funcionales de la mezcla en servicio.

- Retención de las propiedades ingenieriles bajo condiciones de temperatura, humedad y condiciones de carga.

En cuanto a las propiedades del cemento asfáltico se analizan las características físicas del asfalto, así como las del espumado.

Para determinar el contenido óptimo de asfalto en las mezclas tratadas con asfalto espumado no es tan sencillo como en las mezclas en caliente. El rango de contenido de asfalto óptimo se puede limitar por la pérdida en estabilidad de la mezcla y por la susceptibilidad al agua. Es por esta razón que para el diseño de estas mezclas se tiene en cuenta la relación entre el contenido de asfalto y el de finos, por ejemplo, la viscosidad del mortero formado por los finos y el ligante juega un papel importante en la estabilidad de la mezcla, tal y como lo menciona Ruckel et al (Ruckel et al., 1982) ver Tabla 3.

Tabla 3 Contenido de asfalto espumado

% Pasa tamiz 4.75	% Pasa Tamiz 0.075mm	% Asfalto espumado
< 50 (Gravas)	3 – 5	3.0
	5 – 7.5	3.5
	7.5 – 10	4.0
	>10	4.5
> 50 (Arenas)	3 – 5	3.5
	5 – 7.5	4.0
	7.5 – 10	4.5
	>10	5.0

Fuente: (Ruckel et al., 1982)

Siguiendo con las investigaciones realizadas en los países latinoamericanos en el año 2002 Guillermo Thenoux Z (Thenoux & Jamet, 2002), en Chile desarrollo una investigación del comportamiento de la tracción indirecta en tres tipos de mezclas realizadas con tres porcentajes diferentes de RAP, de los que se concluyó lo siguiente:

Las mezclas con asfalto espumado se han transformado en una excelente alternativa para la estabilización de capas estructurales en los pavimentos, debido principalmente a su buen comportamiento, facilidad de construcción, compatibilidad con un amplio rango de tipos de

agregados y ventajas energéticas. Sin embargo, como toda nueva tecnología aún quedan aspectos por investigar y acumular experiencia.

Los criterios empleados actualmente para la caracterización del asfalto espumado, corresponden al volumen que puede alcanzar la espuma (Razón de Expansión) y al tiempo disponible para el mezclado antes del colapso de la espuma (Vida Media). Ambos criterios son ampliamente reconocidos como los más importantes en el proceso de producción de la espuma, sin embargo, la forma en que son medidos no permite la obtención de valores precisos, sino más bien órdenes de magnitud. Por esta razón se propone investigar nuevas formas para medir estas propiedades y de este modo obtener una caracterización más precisa de la espuma y su habilidad para mezclarse con los agregados.

El criterio empleado actualmente para obtener el contenido óptimo de asfalto de una mezcla con asfalto espumado, corresponde a la optimización de sus propiedades mecánicas, dentro de las cuales la tracción indirecta se presenta como la propiedad más empleada. El ensayo de módulo resiliente puede ser utilizado en la selección del contenido óptimo de asfalto, pero su uso está más bien dirigido a caracterizar el comportamiento de la mezcla en servicio.

En un proyecto de reciclado en frío de pavimentos asfálticos, especialmente del tipo profundo (Thenoux y García, 1999), el espesor del concreto asfáltico existente en la estructura de pavimento varía considerablemente a lo largo del camino, lo que genera distintas proporciones entre la cantidad de concreto asfáltico recuperado (RAP) y la cantidad de material granular extraído. Por este motivo se recomienda un análisis de sensibilidad del contenido óptimo de asfalto de la mezcla y sus propiedades mecánicas en función de la cantidad de RAP incorporado.

Otros estudios como los realizados por el Laboratorio nacional de materiales y modelos estructurales, Costa Rica en el año 2011, (Badilla, Ávila, & Duarte, 2011) quienes realizaron el monitoreo de las características mecánicas (Resistencia al corte, rigidez y tránsito), en campo de estos materiales en el tramo ubicado sobre la ruta 224 de Costa Rica (Tramo: Entrada de Ujarras – Represa Cachi). Como parte del proyecto se evaluó el aumento de la vida útil de la carretera (reducción de actividades de mantenimiento), concluyeron que los

materiales tratados con asfalto espumado tienen varias ventajas y además limitaciones que se describen a continuación.

- Aumenta la resistencia al corte y reduce la susceptibilidad a la humedad del material granular.
- La resistencia de la base se aproxima a la de materiales tratados con cemento mientras que mantiene flexibilidad, siendo relativamente resistente a la fatiga.
- El reciclaje del material existente permite conservar materiales vírgenes y energía, así como reducir costos de acarreo.
- Todo el procedimiento se realiza en sitio y por lo tanto es más rápido que otros métodos de rehabilitación.
- El asfalto espumado puede compactarse inmediatamente, y puede soportar tráfico casi inmediatamente después de la compactación.
- Más costoso que otros métodos de estabilización (cal, cenizas volantes).
- Los métodos de diseño son relativamente nuevos, ya que se ha dado una rápida evolución de la tecnología asociada con la estabilización con asfalto espumado.
- Se requiere de equipo especializado.

En la universidad del salvador en el año 2014, Guerrero Abrego, Oscar Willian, Martínez Rodríguez, Orlando Ernesto, Portillo Revelo, Jessica María, (GUERRERO ABREGO, MARTÍNEZ RODRÍGUEZ, & PORTILLO REVELO, 2014) realizaron una investigación de la estabilización de una carpeta asfáltica fresada, acopiada en plantel Zacatillo, ubicado en Zacatecoluca departamento de La Paz, propiedad de Constructora DISA S.A de C.V.

Donde para estabilizar el material reciclado, se partió de un diseño elaborado bajo la técnica de estabilización con emulsión CSS-1H, donde posteriormente el ligante fue sustituido por asfalto espumado producido por la planta asfáltica propiedad de constructora DISA S.A de C.V y mezclado en una batidora industrial (MODAMAX PM-20BCE trabajándose con 161 revoluciones por minuto).

El diseño se realizó únicamente a nivel de laboratorio y se utilizó la metodología del Manual de Reciclado en Frío Wirtgen. Se trabajó la estabilización con asfalto espumado únicamente con material compuesto 100% de RAP.

De este estudio se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- El ensayo de determinación en laboratorio de las características de suelos según AASHTO T180-10, realizado al RAP, da como resultado 6.8% de humedad óptima, de igual forma se realizó el mismo ensayo al material pero agregando diferentes porcentajes de emulsión asfáltica CSS1-h, obteniendo resultados similares de humedad óptima en ambos, comprobando lo que indica en Manual de Reciclado en Frío Wirtgen, 2004.
- Al material RAP, se le realizó el análisis por tamizado de agregado grueso y fino, según la norma AASHTO T27-11, dando como resultado una deficiencia en finos del material pasante de la malla #200, obteniendo un valor de 2.2%, con esa cantidad no se cumple con el porcentaje mínimo del 5% de finos que especifica el Manual en Frío Wirtgen, 2004. Ante esto se agregó material pasante de la malla N° 200 obteniendo así un total de finos de 5.91%.
- Se realizó una gama de briquetas con diferentes porcentajes de emulsión asfáltica, según el Manual de Reciclado en Frio Wirtgen el valor mínimo aceptado para asfalto es aquel que aplicando el Método de Prueba Estándar para la Resistencia de Mezclas Asfálticas Compactadas al daño Inducido por la Humedad AASHTO T 283-07, tenga una relación de TSR mayor del 60%, siendo para este trabajo un porcentaje de 3.5% con un valor de TSR de 63.07%.
- El asfalto espumado fue producido con un asfalto AC-30 el cual fue calentado a 160°C, inyectándosele 3% de agua para generar la vida media de 8 segundos y razón de expansión de 12 veces, valores que cumplen con lo estipulado en el Manual de Reciclado en Frio Wirtgen, 2004.

- Para el 2.5% de asfalto espumado se obtuvieron un promedio de vacíos de 7.6 según los ensayos de gravedad específica teórica máxima y densidad de mezclas bituminosas de pavimentación según AASHTO T 209-12 y densidad BULK por geometría, valor que se asemeja a mezclas asfálticas en caliente con contenidos bajos de asfalto, en donde los vacíos son similares.
- Se trabajó con un 2.5% de asfalto espumado, pero según el ensayo de extracción cuantitativa de Ligante Asfáltico de Mezclas Asfálticas en Caliente bajo la norma AASHTO T 164-13, se obtuvo un 5.32% de contenido de asfalto en la mezcla realizada, del cual 3% es el asfalto residual del RAP y 2.32% el asfalto espumado agregado, las pérdidas reportadas resultan por que la regulación del flujo se hizo de manera manual.
- Se realizó el ensayo Método de Prueba Estándar para la Resistencia de Mezclas Asfálticas Compactadas al Daño Inducido por la Humedad bajo la norma AASHTO T 283-07 a las briquetas de material estabilizado con asfalto espumado, reportando un TSR de 67.42%, cumpliendo así con una relación de TSR mayor del 60%, por lo tanto se comprueba que es mínima la susceptibilidad por humedad en el material estabilizado con asfalto espumado.

En el año 2011, Rodrigo Andrés Faundez Carvajal, en la Universidad De Chile, (Andrés, 2011) pretende dar un paso más en el conocimiento del uso de la tecnología del asfalto espumado, estudiando la deflectometría de impacto sobre un pavimento construido con base reciclada y comparando los resultados con una base tradicional, para ello se realizaron las siguientes actividades.

Determinar en forma empírica, mediante el análisis de deflexiones registradas en un tramo de prueba, valores representativos del coeficiente estructural de una base reciclada, tratada con asfalto espumado y dar una predicción del periodo de vida útil para los distintos subtramos que componen el tramo de prueba, según método de diseño AASHTO-93.

- Estudiar las deflexiones medidas en el tramo de prueba, realizando retrocálculo mediante métodos mecanicistas y AASHTO.
- Estimar un coeficiente estructural para realizar diseño AASHTO y determinar mediante retrocálculo mecanicista valores de módulo elástico, que sean representativos del pavimento del tramo de prueba.
- Estimar los ejes equivalentes que han transitado por el tramo de prueba y realizar una proyección de estos, prediciendo la vida útil de la estructura.

Como conclusión del estudio, se propone un coeficiente estructural de 0,20 para futuros diseños empíricos en que se utilice asfalto espumado. El texto en que se basa esta investigación, “Foamed Asphalt Stabilized Base in Reclaimed Asphalt Pavement: A Promising Technology for Midwestern Roads”, señala que bajo condiciones similares de construcción, se estima el coeficiente estructural en 0,18 para la base espumada, lo que es 10% menor a lo obtenido en el presente trabajo.

El efecto de la diferencia entre los coeficientes, anteriormente señalada, se le atribuye entre otros factores, a las características de la subrasante utilizada en el tramo de prueba, ya que ésta posee un módulo elástico promedio de 820 Mpa, lo que es mayor a la utilizada en el documento guía, que sólo tiene 130 Mpa.

Otro punto considerado en este trabajo y que no fue incluido en el texto guía, se refiere al módulo elástico representativo para el asfalto espumado, el que se puede acotar a valores entre 890 y 2.500 Mpa, dependiendo del método utilizado para el análisis, siendo 1.480 Mpa aquel que se ajustó más a la realidad del pavimento. Los resultados coinciden con valores determinados anteriormente en laboratorio

En cuanto a la validez del diseño de pavimentos con bases espumadas, hay que tener presente que son dos los mecanismos principales de pérdida de serviciabilidad, que se intentan controlar en la metodología empírica AASHTO (y también en las mecanicistas): fatiga y exceso de deformación permanente.

La fatiga ocurre en las capas ligadas, y para el caso de estructuras flexibles, se presenta cuando se generan valores altos de deformación por tracción en la zona inferior de la capa. Este tipo de deformación, es asociado a la respuesta que presenta la estructura cuando se mueven las cargas vehiculares.

La deformación permanente es la deformación vertical residual que se va acumulando debido al paso de los vehículos, la cual puede generar fallas estructurales o funcionales en el pavimento.

En el caso particular del tramo de prueba, el diseño ha sido determinado por la buena calidad de la subrasante utilizada, la que ha visto mermado su valor efectivo, pasando de módulos elásticos sobre los 600 Mpa, medidos en el retrocálculo, a un valor de entrada en el diseño de 200 Mpa.

En Sudáfrica las investigaciones han sido lideradas por Jenkins; quien en el desarrollo de sus diferentes estudios desde el año 1999 hasta la fecha han realizado diferentes aportes, como los siguientes;

En la investigación realizada en el año 1999, Jenkins demuestra que el uso de asfalto espumado en la producción de mezcla asfáltica reduce los tiempos de apertura al tráfico; esto teniendo en cuenta que una vez compactado el material se puede permitir el tránsito vehicular sobre el mismo, por otro lado, también demuestra que los parámetros de vida media y de expansión del asfalto son muy dependientes de la cantidad de agua adicionada (Jenkins, 1999).

Otro de los aportes realizados por la investigación de Jenkins, (Jenkins, 1999), es que el índice de espumado, que es el que permite calificar la estabilidad de la espuma en segundos; se determina como el área bajo la curva de la relación de expansión vs el tiempo, y para esto propone seis diferentes ecuaciones o formas de calcularla como por ejemplo:

Ecuación 1 Índice de espumado

$$FI = \frac{-HL}{lm^2} \times \left(4 - ERm - \left(\frac{4}{ERm} \right) \right) + \left(\frac{1+c}{2c} \right) \times ERm \times t_s$$

Fuente: (Andrés, 2011)

Donde:

FI= Índice de Espumado en segundos.

ERm= Relación de Expansión Máxima medida luego de que se termina la descarga de la espuma.

HL= Vida Media en Segundos.

t= Tiempo en segundos medido desde el momento en que se termina la descarga de la espuma.

C = Relación entre ERm/ ERa.

En el año 2000 Jenkins (Andrés, 2011).continua con sus aportes y en su publicación “Mix design considerations for cold and half-warm bituminous mixes with emphasis on foamed bitumen.”; realiza los siguientes aportes:

- El asfalto espumado puede mezclarse con una gran variedad materiales mientras se encuentra en su etapa meta-estable; es decir antes de decaimiento total de la espuma y de esta manera ser de gran aporte en la construcción de carreteras.
- Cuando un asfalto es espumado no se alteran ninguna de sus propiedades químicas.
- Las mezclas tratadas con asfalto espumado se pueden almacenar siempre y cuando se garanticen las condiciones de humedad.
- Los materiales que se van a tratar con asfalto espumado, no necesitan de procesos de calentamiento y con el tratamiento se puede reducir la susceptibilidad al agua del material.
- Otro de los aportes importantes de esta investigación es que Jenkins plantea que materiales con elevada plasticidad presentan respuestas pobres a los tratamientos con asfalto espumado, así como los que poseen altos contenidos de arcillas, por lo que deben ser tratados previo al espumado. Se recomienda que la plasticidad

máxima que debe presentar un material sea de 12, cuando se desee tratar con asfalto espumado.

Los artículos publicados entre el año 2011 y 2015 por Jenkins y Collings realizaron otros aportes importantes en el estudio de los tratamientos con asfalto espumado como:

Las mezclas tratadas con asfalto espumado son consideradas como materiales no continuos o débilmente ligados con asfalto cuyo comportamiento es similar al de los materiales granulares no ligados, pero que poseen un mayor grado de cohesión y menor de afectación por la humedad (Collings & Jenkins, 2011).

El asfalto utilizado como ligante se adiciona al material granular en proporciones que comúnmente son menores al 3% lo que incrementa significativamente la cohesión (Dave Collings & Jenkins, 2011, p.2).

Comúnmente se usan en Suráfrica cantidades de asfalto inferiores al 3% y de llenante activo hasta del 1%. Sin embargo, en países como Australia o Nueva Zelanda los contenidos de asfalto y llenante llegan a ser superiores y varían en función del comportamiento deseado (Lynch & Jenkins, 2013, p.2).

Como resultado de la similitud entre los BSMs y los materiales granulares, el mecanismo de falla predominante es el de deformación permanente bajo cargas (Collings & Jenkins, 2011; Wirtgen GmbH, 2012, Collings & Jenkins, 2011, p.13), sin embargo, a contenidos de asfalto mayores al 3% el mecanismo de falla que se presenta es el de agrietamiento por fatiga. Es importante resaltar que la deformación permanente no implica que el material no falle por agrietamiento, ésta falla se da cuando se exceden esfuerzos sobre el material (Collings & Jenkins, 2011).

La caracterización del mecanismo de falla de deformación permanente se realiza principalmente por el parámetro denominado módulo resiliente obtenido mediante ensayo triaxial (Jenkins & Collings, 2015, pg.2; Mathaniya Twagira, 2010).

3.2 Marco Conceptual

3.2.1 Asfalto Espumado

El asfalto espumado o ligante expandido es producido mediante un proceso mecánico en el cual se inyecta, con ayuda de aire presurizado, una cantidad pequeña de agua (entre 1 % y 4 % sobre el peso de ligante) al asfalto caliente (140 °C a 180 °C) dentro de una cámara de expansión, lo que genera instantáneamente el efecto de espuma en el asfalto. El efecto de espuma se produce en el momento que las pequeñas gotas de agua fría entran en contacto con el asfalto caliente, lo que ocasiona transferencia de energía entre el asfalto y el agua que eleva la temperatura del agua a más de 100°C y la evapora instantáneamente, se crean burbujas de vapor que se encapsulan dentro del asfalto (Transporte, 2011).

Es importante mencionar que para realizar las mezclas con asfalto espumado se debe incorporar los materiales mientras el asfalto se encuentre en estado de espuma con el fin de que la combinación del mismo con las partículas finas sea homogénea para que se produzca la aglutinación y la dispersión del asfalto. El resultado de este proceso es una pasta de llenante y asfalto que actúa como cementante entre las partículas gruesas.

En la Figura 6 propuesta en la metodología TG2, se muestra el comportamiento conceptual de los diferentes materiales y como las mezclas tratadas con asfalto espumado tienen las propiedades de incrementar la resistencia y a su vez aumentar la flexibilidad de un material.

Jenkins y Collings en el manual de metodología TG2 en el año 2009; describen a las mezclas con asfalto espumado; por su capacidad de aumentar la flexibilidad y la resistencia de los materiales granulares, esto teniendo en cuenta que la espuma de asfalto envuelve las partículas más finas que los conforman y generan puentes de contacto entre sus partículas (Ruckel et al., 1983).

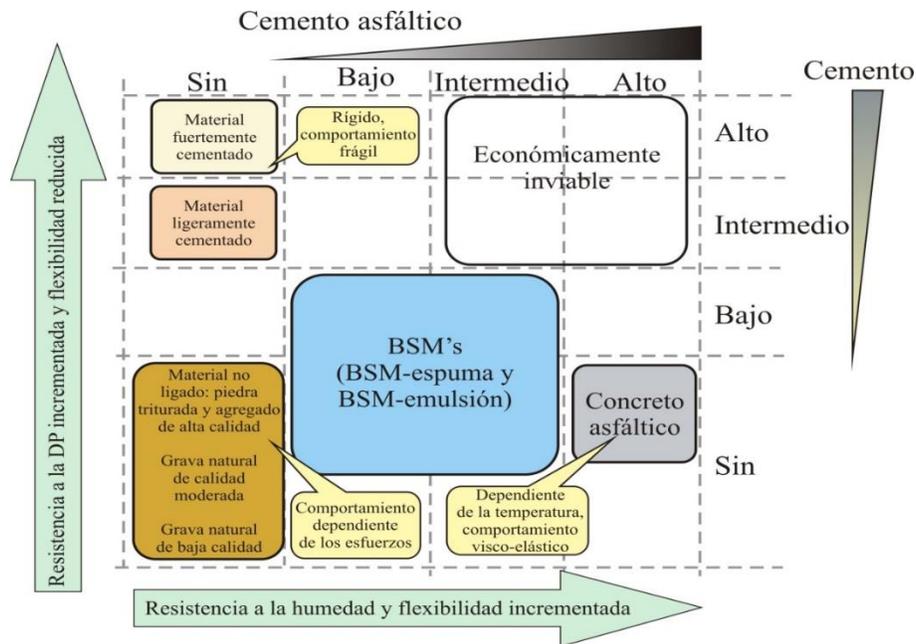


Figura 6 Comportamiento conceptual de los materiales para pavimentos (S. X. Campagnoli & Puentes, 2016)

Propiedades del asfalto espumado

El asfalto espumado se caracteriza por poseer dos propiedades principales determinadas de forma empírica:

- Razón de expansión (ER): es la razón entre el volumen de asfalto espumado y el volumen del asfalto original. La razón de expansión indica la trabajabilidad de la espuma, y su capacidad de cubrimiento y mezclado con los agregados
- Vida Media (HL): Es el tiempo, en segundos, que tarda la espuma en reducir su volumen a la mitad del volumen expandido. La vida media es un indicador de la estabilidad de la espuma y entrega una idea del tiempo disponible para mezclar el asfalto espumado con los agregados antes de que colapse la espuma).

Las propiedades del asfalto espumado no son medidas exactas son ordenes de magnitud; por lo que Macarrone en 1994 propone que lo recomendable para que la razón de expansión sea buena es que varíe entre 8 y 15 y que la vida media sea al menos de 15; por otro lado Muthen (Muthen, 1998), menciona que la relación debe estar entre 10 y 12; mientras que la guía sudafricana en el 2002 (Asphalt Academy TG2, 2002), establece

valores de 7 y 7 para relación de expansión y vida media; finalmente la academia del asfalto (Asphalt Academy TG2, 2009) y la guía de Wirtgen (Wirtgen, 2012) sugieren un promedio de 8 a 6 respectivamente para ER y HL; sin embargo esto depende bastante de la temperatura del agregado.

Es importante mencionar que los valores de vida media y de razón de expansión se encuentra directamente influenciados por la cantidad de agua adicionada y el tipo de asfalto usado; como se muestra en la Figura 7 a medida que se aumenta el contenido de agua se aumenta la razón de expansión y disminuye la vida media (Academy, 2009; He & Wong, 2006; Kim J. Jenkins, 1999; Lesueur et al., 2004; Wirtgen GmbH, 2012), por lo que como se muestra en el manual de la metodología sudafricana es importante encontrar un equilibrio entre los dos parámetros para determinar cuál de las características debe primar a la hora de realizar la mezcla.

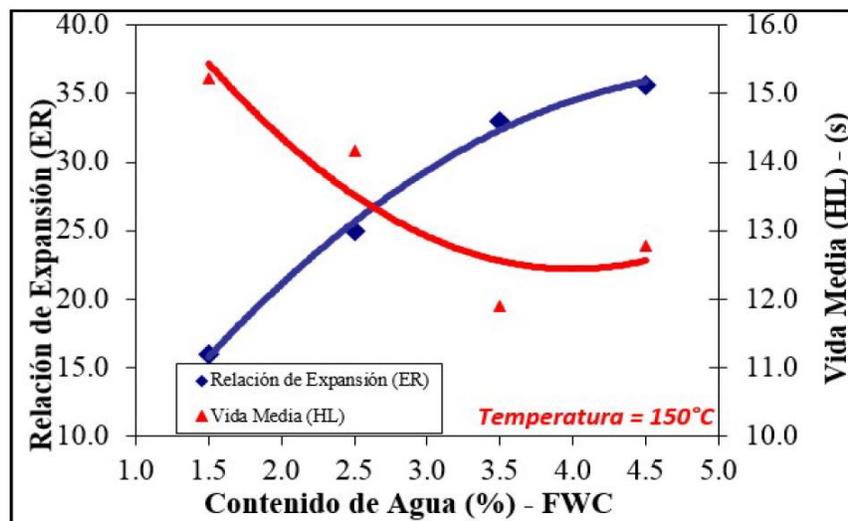


Figura 7 Características de la espuma (S. X. Campagnoli & Puentes, 2016)

La vida media determina el tiempo para permitir que las partículas finas del agregado interactúen y formen una mezcla homogénea; y la razón de expansión representa la habilidad de la espuma para realizar un buen cubrimiento de los agregados.

Varios factores influyen en las propiedades del asfalto espumado, entre estos los siguientes:

- Dosis de agua inyectada: el agua influye directamente en el crecimiento de la expansión y en la reducción de la vida media del asfalto espumado.
- Temperatura del asfalto: la mayoría de los asfalto mejoran sus propiedades de espumado al aumentar la temperatura, se estima que espumas aceptables se consiguen en temperaturas sobre 149°C (Abel, 1979) .
- Presión: esta variable afecta directamente la razón de expansión y la vida media cuando existen presiones bajas (menores a 3 bares) en la cámara de expansión.
- Agentes antiespumantes: algunos agentes tales como compuestos de silicona, en el asfalto virgen.
- Viscosidad del asfalto: aun en ningún documento se encuentra relación directa entre la viscosidad del asfalto y sus propiedades de espumado.
- Tamaño del recipiente: en el laboratorio el tamaño del recipiente afecta las mediciones de las propiedades.

La dosis de agua inyectada y la temperatura del asfalto son los dos factores principales que influyen en las propiedades en el proceso de espumado, esto debido a que a mayores temperaturas de espumado y mayor cantidad de agua la razón de expansión aumenta; sin embargo la vida media tiende a disminuir.

Es importante mencionar que para determinar el mejor espumado, siendo este el que optimiza la vida media y la razón de expansión se debe realizar un gráfico en el cual se representen estas dos propiedades, con las diferentes cantidades de agua y las distintas temperaturas.

- Índice de Espumado (FI)

El índice de espumado (FI), está dado en segundos, y es el que permite medir la estabilidad de la espuma siendo un indicativo de energía (Jenkins, 1999), ya que representa el área bajo la curva de la razón de expansión vs el tiempo de decaimiento de la espuma.

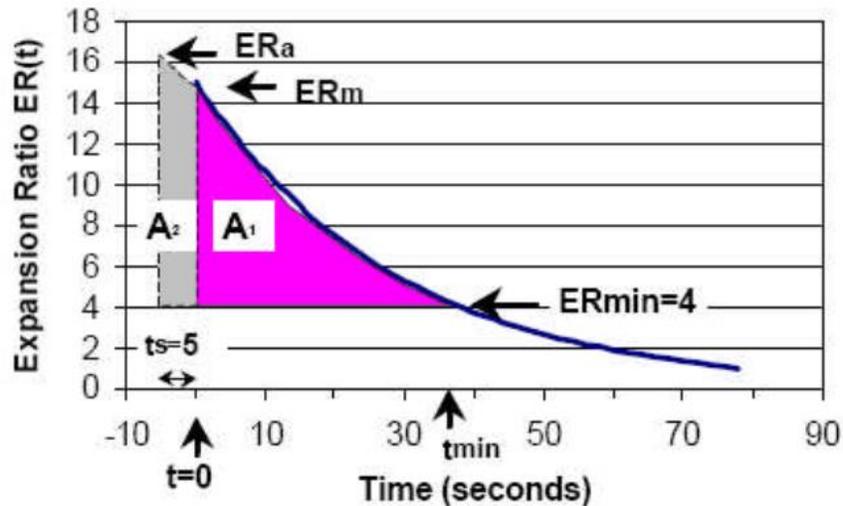


Figura 8 Área Bajo curva de decaimiento de la espuma (S. X. Campagnoli & Puentes, 2016)

Por otro lado es un indicativo del contenido óptimo de agua, y determina si es necesario la adición de aditivos a los asfaltos utilizados, Jenkins en su tesis doctoral sugiere que para mezclas asfálticas en frío el valor mínimo de índice de espuma debe ser de 164 segundos (Jenkins, 1999).

Por otro lado según lo propuesto por el manual de Wirtgen el índice de espuma es bastante útil cuando se quieren optimizar las propiedades de espuma en campo (Wirtgen, 2002); sin embargo debido a que la razón de expansión y la vida media no son propiedades que se relacionen de manera lineal, Sunarjono en el 2008 recomienda que esta propiedad puede ser más aprovechada cuando se realizan investigaciones de laboratorio (Sunarjono, 2008).

- Distribución de Tamaños de Burbujas (BSD)

La distribución de los tamaños de las burbujas está ligada a la capacidad de la espuma de dar manejabilidad y trabajabilidad a la mezcla, adicionalmente el poder de cubrir al agregado durante el proceso.

Ozturk asegura que a medida de que los tamaños de las burbujas aumentan, se produce una mayor interacción entre los agregados y el asfalto (Ozturk, 2013), por otro lado también afirma que cuando las burbujas son pequeñas su tiempo de colapso es menor que el de las de gran tamaño.

Si las burbujas son de tamaño pequeño la vida media de la espuma aumenta y garantiza que la trabajabilidad sea más duradera y se facilite el proceso de compactación.

Por otro lado en investigaciones posteriores se comprobó que el valor de la distribución de las burbujas es directamente proporcional al contenido de agua y a la razón de expansión, por lo que cuando aumenta la BSD aumenta la ER (Hailesilassie, Hugener, & Partl, 2015).

- Índice de Área Superficial (SAI).

El índice de área superficial; como su nombre lo indica es el parámetro que permite determinar el área superficial generada por la espuma de asfalto y la influencia de la misma en el cubrimiento de los agregados.

La disminución de esta área representa un menor cubrimiento de las partículas de agregado, está relacionado a su vez con el tamaño de las burbujas; es decir que valores altos de SAI menores tamaños de burbujas, lo que garantiza mayores tiempos de trabajabilidad y manejabilidad y mejores resultados en el proceso de compactación (Newcomb et al., 2015; Ozturk, 2013).

Este parámetro es medido mediante adquisición y procesamiento de imágenes digitales durante el proceso de espumado mediante técnicas de no contacto. Como ventaja sobre los demás parámetros, se tiene que éste es el único que no depende de las dimensiones de recipiente que contiene la espuma de asfalto. (Ozturk, 2013) .

3.2.2 Recuperación total de espesores

Consiste en la disgregación de las capas de pavimento asfáltico y bases granulares existentes y subyacentes, con ayuda de la recicladora o fresadora capaz de disgregar el material procedente de las capas que conforman el paquete estructural del pavimento que ya han estado en servicio: materiales que han perdido algunas de sus propiedades iniciales

por el uso o envejecimiento (cohesión, textura, composición, geometría,...) pero que tienen el potencial de ser reutilizados para integrar nuevas capas.

En la Figura 9 se presenta el funcionamiento del tambor de la fresadora cortando la estructura de pavimento.

La recuperación total de espesores realizada en sitio, garantiza que no se generen costos adicionales de transporte de materiales y de disposición de escombros, por lo que el tráfico de volquetas se reduce generando desperdicios bajos, concluyendo esto en ahorro de dinero y aportando al medio ambiente.



Figura 9 Funcionamiento de la recicladora de pavimento (Wirtgen, 2012)

Por otro lado el proceso de recuperación de espesores aporta en la construcción de las nuevas vías, esto debido a que el material tratado que será empleado como base granular tendrá mejores propiedades, como por ejemplo ser más resistente a la humedad que la base original, que resulta en una vida larga y de bajo mantenimiento.

Ventajas de la conservación de un material

En los proyectos de construcción de vías generalmente se desperdicia el material que conforma la misma cuando este material es quitado para ser reemplazado por uno nuevo, lo que demuestra que la conservación de este material puede ser beneficioso tanto económica como estratégicamente.

Por otra parte debido al crecimiento de los países y el desarrollo de la infraestructura, en algunos lugares en los cuales se llevan a cabo megaproyectos se encuentran algunas

limitaciones por la carencia de materiales de buena calidad para la construcción de vías, lo que hace de la utilización de materiales de asfalto viejos y bases granulares deterioradas una oportunidad para obtener materiales que cumplan con las especificaciones de construcción en los diferentes países.

Finalmente es importante mencionar que el ahorro en el transporte de materiales y en la disposición de escombros es representativo ya que estas actividades no se llevarían a cabo con la recuperación total de espesores.

Secuencia de construcción típica del proceso de recuperación total de espesores

- Investigar el pavimento existente: Este proceso se realiza con el fin de optimizar los resultados finales y consiste en investigar la estructura del pavimento existente, enfocándose fundamentalmente en los materiales que lo conforman, realizando pruebas de laboratorio a los mismos, adicionalmente determinar la competitividad, y de esta manera realizar diseños adecuados y dosificaciones para el diseño de la mezcla.
- Plan de operación para garantizar un trabajo bien coordinado: se debe garantizar que los procesos de mezcla, curado y las operaciones de pavimentación sean secuenciales esto con el fin de no generar interrupciones considerables en el tráfico y para abarcar la mayor cantidad de material de recuperación profunda. es recomendable instalar el material de rodadura sobre la base, esto ya que a pesar de que este material puede soportar el paso de tránsito de una semana también puede sufrir daños por el paso de los vehículos.
- Pulverización: se debe realizar la pulverización de la profundidad deseada a recuperar, se debe tener en cuenta que el tamaño de las partículas varía con la especificación sin embargo el tamaño máximo del agregado es de 2". En esta etapa se puede optar por agregar agua con el fin de evitar la generación y propagación de partículas de polvo.

- Conformar el pavimento pulverizado: esta actividad se realiza con ayuda de una motoniveladora y un rodillo pata de cabra, los cuales sirven para preparar la base granular para recibir el agente estabilizador.
- Inyección del asfalto espumado: se extiende el asfalto espumado sobre el material en vía, según las cantidades especificadas en el diseño.
- Compactación y nivelación final: la compactación de suelo se utiliza para recompactar la mezcla recuperada. Las motoniveladoras en tándem se pueden usar para lograr la compactación deseada, una vez se consigue la nivelación fina inicial se debe garantizar que la superficie quede lisa y lista para poner capa encima (Association, 2008)

3.2.3 Reciclaje en frío

El reciclado en frío es la mezcla homogénea, convenientemente extendida y compactada, del material resultante del fresado de una o más capas de un firme existente en un espesor comprendido entre seis (6) y doce centímetros (12cm), asfalto espumado, emulsión bituminosa, agua y eventualmente, aditivos. Todo el proceso de ejecución de esta unidad de obra se realizará a temperatura ambiente (PROAS, 2016).

Los procesos de reciclado en frío se pueden hacer de dos formas, en planta o in-situ. En planta el reciclado se hace mediante el traslado del material recuperado producto del fresado a un centro de acopio, donde el material se trabaja con una mezcladora continua. En sitio el reciclado se logra utilizando la máquina de reciclado móvil, lo que hace de este proceso más económico que el proceso en planta teniendo en cuenta que los costos de acarreo son los que representan la mayor inversión en un proyecto.

La decisión de que método utilizar depende de varios factores, entre ellos están los siguientes: (Wirgten, 2012)

- Tipo de construcción: el proceso en planta habitualmente cuando los materiales recuperados se van a utilizar en la construcción de un nuevo pavimento asfáltico y adicionalmente en el refuerzo de un pavimento existente.

- El material recuperado en sitio va a ser reciclado y requiere de unas especificaciones especiales. Esto se hace cuando el material de la capa superior va a ser reciclado y se requiere un proceso de selección y pre-tratamiento (por ejemplo para reducir el tamaño de la capa asfáltica).

Teniendo en cuenta estas dos condiciones fundamentales se decide qué proceso será el más adecuado a emplear en cada uno de los proyectos.

Con la llegada de recicladoras potentes que pueden rehabilitar los pavimentos de forma económica, el tratamiento de materiales en sitio se ha ido impulsando de forma exponencial, por otro lado teniendo en cuenta las condiciones del pavimento a nivel mundial esta tecnología es cada vez más aplicada comparada con los métodos convencionales de reconstrucción y es muy utilizada para la rehabilitación de pavimentos.

Reciclado en planta

El tratamiento en planta es una alternativa que debe ser contemplada siempre y cuando se requiera realizar un control de calidad especial del agregado virgen, o el material que se va a espumar será guardado en un centro de acopio y será utilizado posteriormente.

El tratamiento en planta permanece siempre como una opción que debería ser considerada cuando el reciclado tiene aplicación, particularmente en aquellos proyectos que requieren una mezcla de materiales vírgenes a ser tratados, y también cuando son tratados con asfalto espumado y luego almacenados en acopios para su uso posterior.

Los principales beneficios del reciclado en planta versus el reciclado in situ son:

– Control de los materiales de entrada:

El reciclado en planta tiene la ventaja de clasificar y caracterizar el material que será utilizado en la producción de mezcla espumada, y de esta manera realizar un producto final específico el mezclar distintos tipos de agregados. Los materiales de entrada pueden ser acopiados y se pueden realizar cambios y ajustes en los diseños de la mezcla cada vez que sea necesario.

– Calidad de mezclado:

Se facilita realizar modificaciones en la operación de mezclado variando los tiempos del material dentro de la cámara, para cambiar la calidad de la mezcla.

– Posibilidades de acopiar el material.

En la producción de material tratado con asfalto espumado se presenta la particularidad de que este puede ser almacenado para ser utilizado cuando se requiera, evitando de esta manera la dependencia de la producción de la mezcla y la colocación de la misma.

Reciclado en Sitio.

Con el paso del tiempo y los avances tecnológicos las máquinas para la producción de reciclaje en frío son cada vez más eficientes. En la actualidad existen equipos capaces de fresar y estabilizar cualquier tipo de suelo. Estas recicladoras son diseñadas especialmente para alcanzar la recuperación de espesores grandes de materiales, son máquinas grandes y potentes, las cuales pueden estar montadas sobre ruedas o sobre orugas.

El elemento más importante de una máquina recicladora es el rotor fresador –, mezclador equipado con un gran número de puntas, especialmente diseñadas para este proceso. El tambor normalmente rota y pulveriza el material del pavimento existente, como se ilustra en la Figura 10

A medida que la máquina avanza con el tambor rotando, el agua de un tanque acoplado a la recicladora se llena mediante mangueras dentro de la cámara de mezclado de la recicladora. El flujo de agua es medido con precisión mediante un micro procesador controlado por un sistema de bombeo, mientras que el tambor mezcla el agua con el material reciclado para alcanzar el contenido necesario de humedad. De esta forma es posible conseguir altos niveles de compactación. Agentes estabilizadores líquidos, como lechada cemento / agua o emulsión asfáltica, tanto en forma separada como combinadas, pueden ser introducidas directamente a la cámara de mezclado de una forma similar. Además, el asfalto espumado puede ser inyectado dentro de la cámara de mezclado mediante una barra aspersora especialmente diseñada.

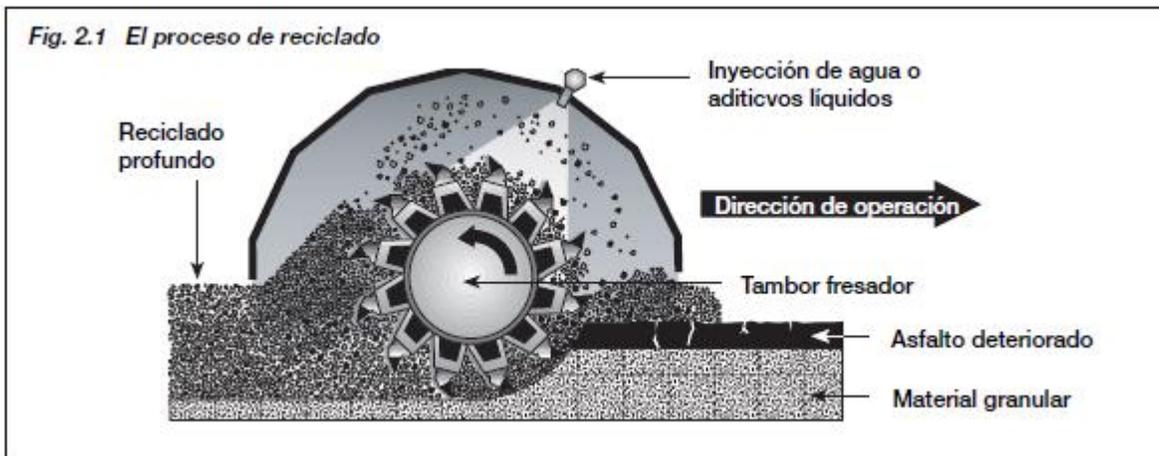


Figura 10 Proceso de Reciclado Manual de Reciclado en Frio (Wirtgen, 2012)

Agentes estabilizadores poderosos, como la cal hidratada o cemento, son normalmente repartidos en la superficie del pavimento existente, delante de la recicladora. La recicladora pasa trabajando sobre el estabilizador en polvo, mezclando a éste con el material recuperado, para luego inyectarle agua, todo en una sola pasada.

– Trenes de Reciclado:

Los trenes de reciclado pueden ser configurados de acuerdo a las necesidades de los diferentes proyectos, y dependiendo del agente estabilizador a utilizar. En cada caso la maquina recicladora ejerce la tracción del tren de reciclado empujando o tirando del equipo que está conectado a la misma mediante barras de empuje o lanzas.



Figura 11 Típico tren reciclador con mezclador de lechada, Manual de Reciclado en Frio (Wirtgen, 2012).

Cuando la emulsión o el asfalto espumado se aplican junto con la lechada de cemento se configura un tren de reciclado formado por un tanque suministrador de asfalto empujado

delante del mezclador de lechada, como se muestra en la Figura 11. En los casos donde el cemento se esparce como polvo sobre la superficie del camino delante del tren de reciclado, el tanque de asfalto se acopla directamente a la recicladora y el tanque de agua es empujado, liderando el tren de reciclado. Alternativamente, el cemento puede ser esparcido sobre el pavimento existente delante de la recicladora, sustituyendo el mezclador de lechada por un tanque de agua.

El material que sale de la recicladora recibe la compactación inicial del rodillo pesado vibratorio para alcanzar una densidad uniforme en todo el material. Posteriormente el material se perfila con una motoniveladora antes de ser finalmente compactado utilizando un compactador neumático y un rodillo vibratorio.

Aplicaciones de reciclado en frío

El reciclado en frío es un proceso con múltiples aspectos que puede satisfacer muchas necesidades en el mantenimiento y rehabilitación en la infraestructura vial. Dependiendo en si el material es tratado o no con un agente ligante, se pueden identificar dos categorías de reciclado en frío. Luego, como un segundo grupo de clasificación, cada categoría (con o sin agente ligante) puede ser a su vez categorizada por el tipo de tratamiento que el material recibe. Este sistema de clasificación primaria y secundaria es mostrado en la

. Es importante mencionar que la palabra de abreviación “RAP” se refiere a “Recycled Asphalt Pavement” (Pavimento Asfáltico Recuperado), un término comúnmente utilizado en todo el mundo para el material asfáltico fresado.

Las distintas categorías se presentan en la Figura 12, 100% de reciclado con RAP, estabilización de material granular y/o RAP, modificación mecánica, recompactación y pulverización.

Fig. 2.4 Categorías de reciclado

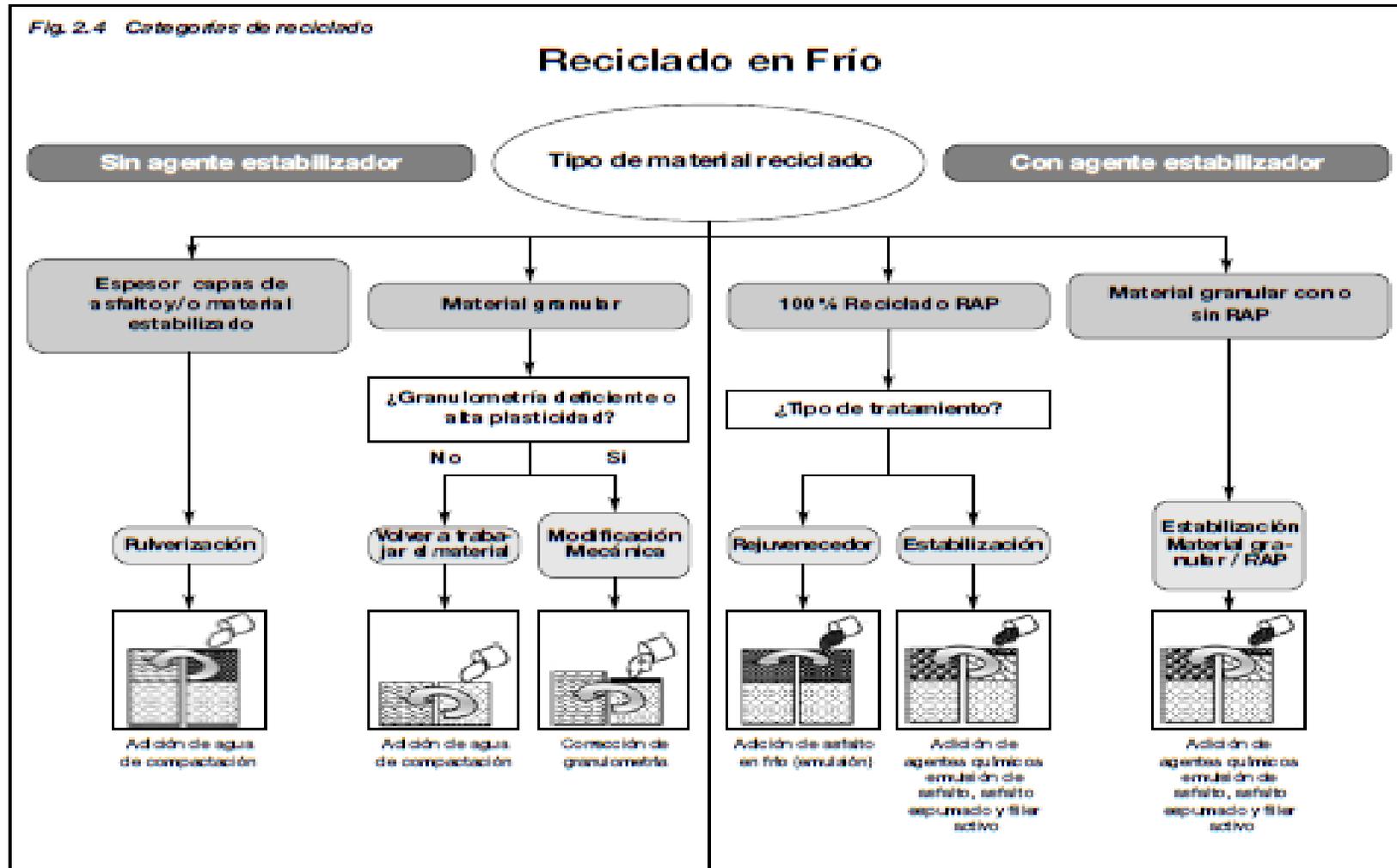


Figura 12 Categorías de reciclado, Manual de Reciclado en Frio (Wirtgen, 2012).

3.2.4 Materiales Granulares tratados con asfalto espumado

Gran variedad de materiales pueden ser tratados con asfalto espumado; desde arenas, gravas, hasta mezclas de base granular con RAP. Tanto materiales granulares seleccionados como marginales, vírgenes o reciclados, han sido utilizados de forma satisfactoria. Sin embargo, es importante establecer límites de tolerancia requerida en los agregados (Mulusa, 2009. p.5),.

Desde los años 70 se registraron las primeras experiencias con BSM, principalmente en Sudáfrica, utilizando como material ligante el asfalto de emulsiones catiónicas, algunos de los manuales que existen son los siguientes:

- 1972: The use of bitumen emulsions in construction and maintenance of roads.
- 1993: SABITA Manual 14: GEMS - The design and use of granular emulsion mixes.
- 1999: SABITA Manual 21 ETB, the design and use of emulsion- treated bases.

La implementación del método y la realización de las guías fue motivada por Adrian Bergh, ya que utilizó emulsiones asfálticas para la rehabilitación de vías en Suráfrica con comprobado éxito, sin embargo, y a pesar de que los beneficios en el uso de emulsiones fue demostrado en diferentes proyectos, se encontraron bastantes problemas de aplicación de la técnica , por lo que hacía el año 1994, debido al desarrollo tecnológico en asfalto espumado, se inició en Suráfrica la implementación de los BSM – FA como técnica de rehabilitación (Dave Collings & Jenkins, 2011, p.3).

En los años 90 principios de los 2000, se desarrolla una guía para la aplicación de materiales bituminosos que incluye asfalto espumado FA - manual TG 2: The design and use of foamed bitumen treated materials cuya segunda edición de 2009 es la actualmente utilizada. Ésta edición retira información que causaba confusión en la técnica de estabilización y unifica en una sola filosofía de diseño al asfalto espumado con las emulsiones asfálticas (Dave Collings & Jenkins, 2011, p.5). Guías diferentes a la sudafricana se tienen en: 2006: Guide to Pavement Technology Part 4D: Stabilised Materials; 2008: La guía de Queensland Department of Transport y Main Roads Method TMR, ambas de origen australiano (Leek & Jameson, 2011, p.2) y 2009: Caltrans guidelines for Cold mix design del estado de California, Estados Unidos (Chandra, Veeraragavan, &

Krishnan, 2013). Mención especial tiene el manual alemán 2012: Wirtgen Cold Recycling Technology basado en el manual TG2 sudafricano.

3.2.5 Propiedades de los materiales tratados con asfalto espumado.

3.2.6 Granulometría

La mayoría de autores coinciden en que el tamaño y la distribución de las partículas, se encuentra directamente relacionada con la capacidad que tiene un material para empaquetarse o acomodarse de forma correcta, por lo que las guías tanto sudafricana como alemana plantean franjas en los que deben encajar los tamaños del material a utilizar como se muestra a continuación.

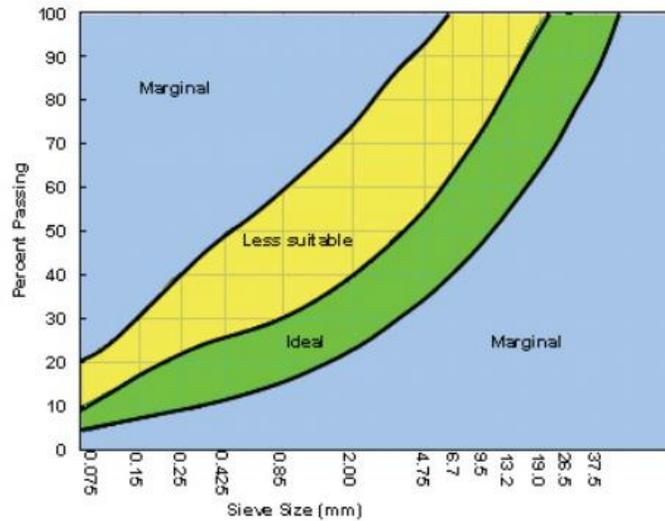


Figura 13 Curva Granulométrica, Manual de Reciclado TG2 (Asphalt Academy, 2009).

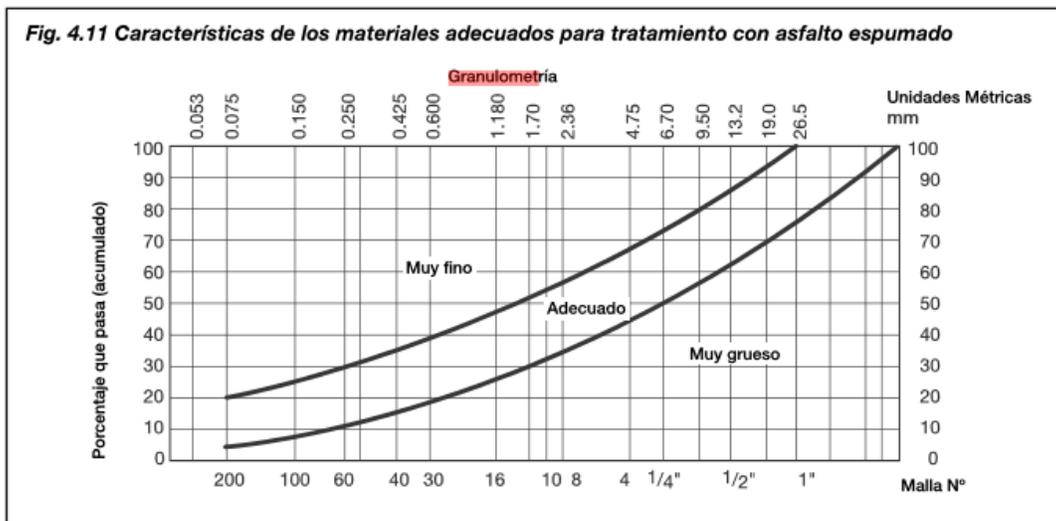


Figura 14 Curva Granulométrica, Manual de Reciclado en frío (Wirtgen, 2012).

Como se muestra en la Figura 13 y Figura 14 las franjas son muy distintas en cada una de las metodologías, siendo la del manual Wirtgen más exigente en cuanto a la distribución de las partículas dentro de la mezcla y la de la metodología TG2 menos estricta, lo que permite el uso de mayor tipo de materiales.

Por otro lado; con el ensayo de granulometría también se evalúa el porcentaje que pasa el tamiz N°200 el cual es mínimo el 5%, según lo recomendado por Wirtgen y de 4% para la guía sudafricana TG2, y el máximo de 20% para ambas metodologías

En el desarrollo de una investigación del año 2015 se ha confirmado que la variación en la granulometría genera grandes cambios en el comportamiento de la mezcla (Grenfell, Pasetto, Lo Presti, & D. Airey, 2015). la investigación mostró que el coeficiente de variación entre las granulometrías obtenidas en campo y las de laboratorio puede ser hasta del 21% por lo que no se puede garantizar que las pruebas realizadas al material muestren resultados similares, por otro lado también se identificó que a mayor tamaño de la partícula, mayor dispersión en los resultados.

3.2.7 Contenido de Finos

Los materiales que son pobres en finos no se mezclan de forma adecuada con el asfalto espumado, por lo que uno de los requisitos mínimos para que un material se pueda someter al proceso de espumado es que contenga por lo menos un 5% de porcentaje pasa el tamiz #200 (Wirtgen, 2012).

Cuando el material no tiene la cantidad adecuada de finos el asfalto espumado no se dispersa en forma apropiada y tiende a formar lo que se conoce en el material reciclado como “filamentos” de asfalto (aglomeraciones de material fino con asfalto), los que varían de tamaño dependiendo de la escasez de finos. Un porcentaje de finos muy bajo producirá largos filamentos, lo que en la mezcla actuara como lubricante y producirán una disminución en la resistencia y en la estabilidad del material.

3.2.8 Tracción indirecta

El ensayo ITS se utiliza como una medida indirecta de la resistencia a la tracción y la flexibilidad de la BSM para reflejar las características de flexión del material. Aunque esta prueba no produce resultados altamente repetibles, es el método más económico para investigar la eficacia del betún. Además, se dispone de antecedentes de datos históricos (Asphalt Academy, 2009).

Para determinar la resistencia al corte de los materiales existen diferentes métodos, de los cuales la prueba a tracción indirecta es una de las más comunes. En virtud de los tamaños de partícula agregados usados en BSM, un tamaño de muestra de 150 mm de diámetro proporciona los resultados más confiables para determinar la resistencia al corte de estos materiales (Writgen, 2004).

Sin embargo, es práctica común por el tamaño máximo de los agregados usar probetas de 100mm. Por lo que la Universidad de Stellenbosch (para propósitos de investigación) desarrollo una máquina que es capaz de probar especímenes de 300 mm de diámetro y 600 mm de altura (Glatz y Jenkins, 2007).

Los especímenes de 100 mm de diámetro se usan en niveles básicos de diseño para indicar el contenido óptimo de asfalto, la necesidad de una llenante activo y, si de requerirse el llenante activo, a qué contenido. Los especímenes de 150 mm se usan para refinar el

contenido óptimo de asfalto y proporcionan confianza adicional para el sistema de clasificación de materiales.

Los especímenes de 100 mm de diámetro y 63 mm de alto se curan durante 72 horas a 40°C para alcanzar una masa constante. ITS_{seco} Los valores son determinados a partir de estos especímenes. Los resultados obtenidos después de sumergir estos especímenes durante 24 horas a 25 ° C se denominan $ITS_{húmedo}$.

La relación de los resultados de ITS_{seco} e $ITS_{húmedo}$ se expresa como un porcentaje, es la resistencia a la tracción retenida (TSR).

Según la metodología del TG2, los resultados de TSR son útiles para identificar materiales problemáticos. Si el TSR es inferior al 50%, se recomienda utilizar el llenante activo. Cuando un material tiene un TSR inferior al 50%, y el ITS_{dry} supera los 400 kPa, es probable que el material contenga arcillas y el asfalto sea ineficaz. En esta situación, el material requiere probablemente un pretratamiento

3.2.9 Módulo Resiliente.

El módulo resiliente (M_R) de un material granular ensayado bajo cargas dinámicas o repetidas se define, como la relación entre el esfuerzo desviador (σ_d) y la deformación unitaria recuperada (ϵ_r), tal como se muestra en la siguiente expresión:

Ecuación 2 Módulo Resiliente

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r}$$

En la Figura 15 se muestra el estado de esfuerzos al que son sometidas las muestras de ensayo.

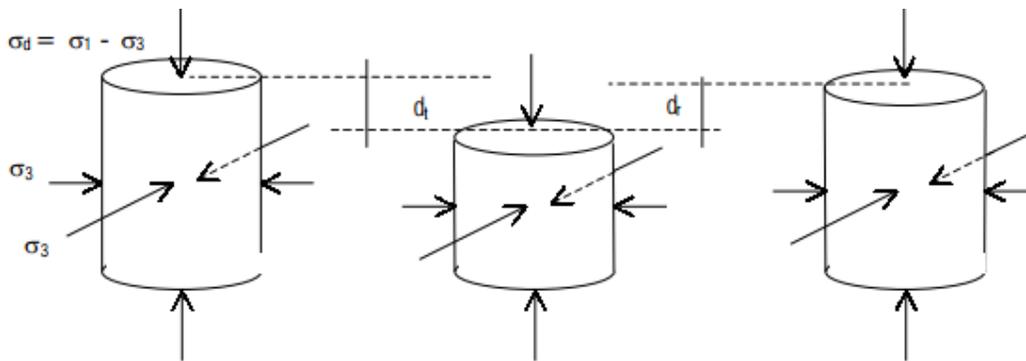


Figura 15 Representación del ensayo de módulo resiliente,

<http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/viewFile/957/862>

Donde:

σ_3 : Esfuerzo de confinamiento, esfuerzo principal menor

σ_1 : Esfuerzo axial, esfuerzo principal mayor

$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$: Esfuerzo desviador

d_t : Deformación total

d_r : Deformación recuperada

$d_t - d_r$: Deformación remanente

En conclusión, la reacción de un material cuando la carga es retirada, es recuperar parte de la deformación inducida; la capacidad de recuperación de dicho material es lo que comúnmente se denomina la resiliencia de los materiales. La relación entre el esfuerzo desviador y la correspondiente deformación unitaria recuperada se denomina módulo resiliente (Vidal & Osorio, 2002).

El módulo resiliente se determina en el laboratorio para materiales granulares con el ensayo de la norma INV E-156-2013, módulo resiliente de suelos y agregados, la cual se realiza a probetas de 150mm de diámetro por 300mm de altura; se aplica un esfuerzo axial cíclico, repetido, de magnitud, duración de (0.1 s) y frecuencias fijas, a un espécimen cilíndrico de ensayo, debidamente preparado y acondicionado. Durante y entre las aplicaciones del esfuerzo dinámico desviador, el espécimen está sometido a un esfuerzo estático en su contorno, proporcionando por medio de una cámara de presión triaxial. Se mide la

deformación axial total resiliente (recuperable) de respuesta del espécimen y se calcula el módulo resiliente relacionando el esfuerzo axial desviador con la deformación unitaria axial, resultante (INVIAS, 2013).

La evaluación del módulo resiliente para mezclas tratadas con espuma de asfalto mediante el ensayo de triaxial se ha realizado en varias investigaciones; uno de los pioneros en este tipo de evaluaciones fue Jenkins en el año 2007; quien obtuvo valores de módulo que varían entre 150MPa y 350 MPa, para una mezcla 25% RAP, 75% Material Granular, 2% espuma de asfalto y 1% de cemento, el incremento se genera con el aumento de la presión de confinamiento (K. J. Jenkins, Long, & Ebels, 2007))

Por otra parte, en el año 2008 Ebels en su investigación encuentra valores de módulo resiliente para material granular tratado con asfalto espumado mediante el ensayo de triaxial con valores que varían entre 896 MPa y 1107 MPa para una mezcla 25% RAP, 75% material granular 2% espuma de asfalto (K.J. Jenkins & Mulusa, 2008), en el año 2009 Gonzales en su trabajo muestra que los valores varían entre 372 MPa y 488 MPa la mezcla es 75% RAP, 25% material Granular, 3% espuma de asfalto (Gonzalez, 2009), Santagata por su parte encontró resultados que oscilan entre 290 MPa y 894 MPa la mezcla es 100% RAP, 2.5% de cemento y 3.5% de espuma de asfalto (Santagata, Chiappinelli, Riviera, & Baglieri, 2010).

En el año 2013 Jenkins en la pruebas realizadas para determinar la influencia de la densidad y la saturación en la evaluación del módulo resiliente encuentra resultados de módulo para material granular tratado con asfalto espumado que varían entre 336 MPa y 737 MPa, mezcla de 20% RAP, 80% material granular, 1% de cemento, 2.4% de asfalto, (Kim Jonathan Jenkins, 2013). En el año 2014 Mateo DalBen realiza pruebas a una mezcla de 50% RAP, 50% material granular, 2.1% de espuma de asfalto y 1% de cemento y obtiene resultados de módulo resiliente que varían entre 300MPa y 700 MPa (Ben, 2014).

Por otro lado en el año 2016 Campagnoli y Puentes reportaron resultados de módulo resiliente para las mezclas fresado de capas asfálticas (RAP) y de bases estabilizadas con emulsión asfáltica (BE) subyacentes, existentes en el pavimento, y a un material granular de aporte, proveniente de dos fuentes. Las proporciones de RAP, BE, AP1 o AP2, dadas como porcentaje de peso seco de la mezcla son: M1- (21%, 64%, 15%¹), M2 - (21%, 64%, 15%²), M3 - (38%, 47%, 15%¹) y M4 - (55%, 30%, 15%¹) con una espuma de asfalto

promedio de 2.4% y 1% de cal, con valores que oscilan entre 167MPa y 837MPa (S. X. Campagnoli & Puentes, 2016)

Con el fin de caracterizar el comportamiento del módulo resiliente, es decir obtener las ecuaciones constitutivas de las mezclas tratadas con espuma de asfalto, autores como Jenkins, Gonzalez, Van entre otros, aplican algunos modelos desarrollados para materiales granulares. Material granular tratado con asfalto espumado. A continuación se muestran los modelos más aplicados para esta evaluación.

Modelo K- θ

Es una descripción práctica no lineal del módulo elástico obtenido bajo cargas repetidas aplicadas al material granular. En este modelo el módulo elástico se expresa en función de la suma de las tensiones, representada por la siguiente ecuación:

Ecuación 3 Modelo K- θ

$$M_r = K_1 \theta^{K_2}$$

Fuente: (Hicks and Monismith, 1971)

Donde,

θ = Suma de los esfuerzos principales ($\sigma_1 + 2\sigma_3$).

k_1 y k_2 = Parámetros de regresión.

Las constantes del material k_1 y k_2 dependen de la densidad, el contenido de humedad, la granulometría, el contenido de finos, el grado de compactación, entre otras propiedades físicas del material del ensayo.

En la ingeniería de pavimentos el modelo M_r - θ , debido a su simplicidad, es uno de los más utilizados para predecir el Módulo Resiliente de materiales elásticos no lineales. El modelo, descrito por primera vez por Seed et al. (1962, citado Uthus, 2007) es una función de potencia no lineal dependiente de la invariante de esfuerzos. Sweere (1990) sin embargo afirma que Brown y Pell (1967), a través de pruebas de carga de pulso en un pavimento instrumentado construido en un pozo de prueba, obtuvieron valores de rigidez. Al trazar los

valores obtenidos en una escala logarítmica doble, en relación con el estado de Esfuerzos aplicado θ (suma de las principales tensiones), se encontró una relación en lineal recta. Este método de representación de la relación rigidez-tensión de los materiales granulares se ha convertido en un estándar utilizado en la ingeniería de pavimentos.

Aunque el modelo $M_r-\theta$ con bastante precisión se ajusta a los datos probados en materiales granulares, no deja de tener inconvenientes en materiales ligados o semi - ligados como los materiales estabilizados con asfalto espumado. La literatura para materiales granulares o no ligados (Uzan, 1985, van Niekerk, 2002, Jenkins, 2002, Uthas, 2007 y Araya, 2011), afirman que el modelo no tiene en cuenta la influencia del esfuerzo desviador σ_d , sobre las propiedades resilientes y, además asume una relación de Poisson (ν_r) constante. Jenkins en sus investigaciones afirma que el modelo que mejor se ajusta al comportamiento de las mezclas tratadas con asfalto espumado es el $K-\theta$; no obstante en su investigación realizada en el año 2012, con Tyllon encontraron que el modelo mostraba resultados de R^2 de 0.50 y 0.57, para mezclas 20% RAP, 80% material granular, 2% de cemento, 2.4% de espuma de asfalto y % de limo.

Para la evaluación del módulo resiliente en mezclas estabilizadas con asfalto espumado autores como (Jenkins 2000, Ebels 2008, Ben 2014, Gonzalez 2009, Santagata 2010, Fu 2009, Van 2015, Campagnoli y Puentes 2017, aplicaron el modelo $M_r-\theta$ y encontraron diferentes resultados de k_1 , k_2 y R^2 los cuales se muestran en la Tabla 4.

Jenkins en el año 2007, encontró que el modelo $K-\theta$ representa de forma ajustada el comportamiento del módulo resiliente de los materiales tratados con espuma de asfalto como se muestra en la Figura 16, obteniendo en su investigación valores de R^2 de 0.86 y 0.94.

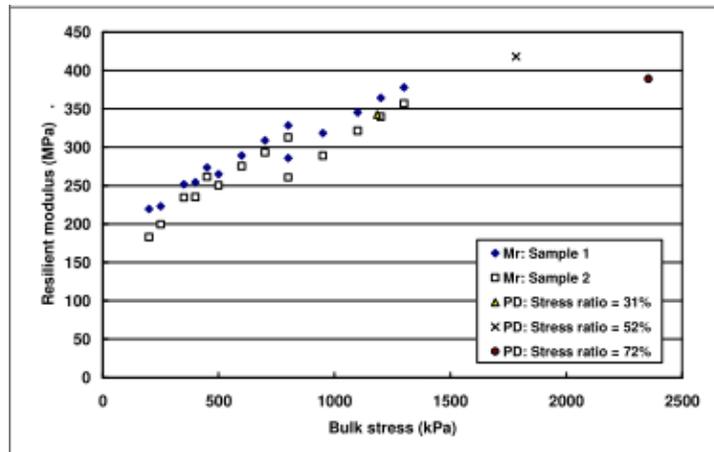


Figura 16 Modelo Mr- θ mezcla (25%RAP, 75%MG, 2.5% Espuma de asfalto), (K. J. Jenkins et al., 2007)

En el año 2008 Ebels en su investigación encontró que el modelo K- θ en sus muestras ensayadas no representa de forma adecuada el comportamiento del módulo resilientes, mostrando valores de R² de 0 y 0.15, Ebels atribuye este comportamiento a la influencia del esfuerzo desviador, la cual no está contemplada en este modelo (K.J. Jenkins & Mulusa, 2008) (Ver Figura 17).

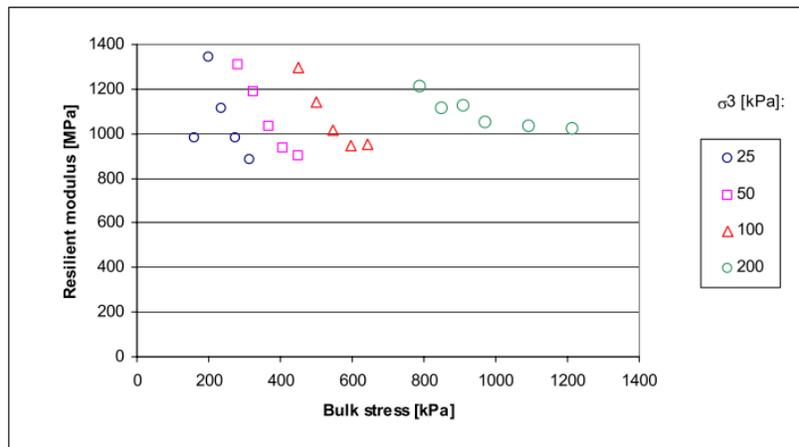


Figura 17 Modelo Mr- θ mezcla (25%RAP, 75%MG, 2.0% Espuma de asfalto), (K.J. Jenkins & Mulusa, 2008)

Santagata en el 2010, encuentra en sus especímenes ensayados de mezcla 100%RAP, 2.5% de cemento y 3.5% de espuma de asfalto que el modelo se ajusta de forma adecuada a la evaluación de rigidez de la mezcla, mostrando valores de R² de 1, como se muestra en la Figura 18.

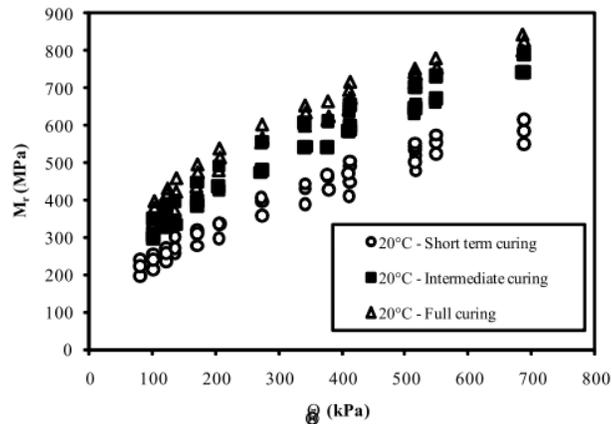


Figura 18 Modelo M_r - θ mezcla (100%RAP, 2.5%Cemento, 3.5% Espuma de asfalto), (Santagata et al., 2010)

Jenkins por su parte en la investigación realizada en el año 2013 encuentra que el modelo no es descriptivo para todos los materiales tratados con espuma de asfalto, mostrando resultados de R^2 de 0.35 y esto se lo atribuyen al aumento del módulo elástico ante las mismas presiones de confinamiento (ver Figura 19).

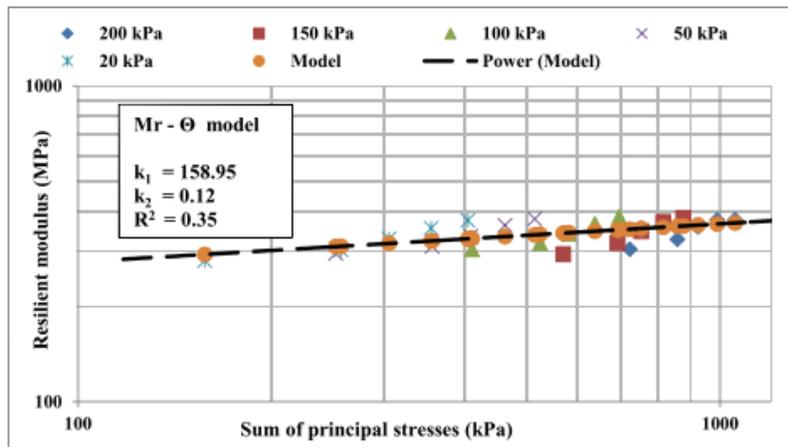


Figura 19 Modelo M_r - θ mezcla (20%RAP, 80% MG, 1.0%Cemento, 2.4% Espuma de asfalto), (Kim Jonathan Jenkins, 2013)

Campagnoli y Puentes en su trabajo de investigación realizado en el año 2016, encontraron valores de R^2 entre 0.97 y 1 para el modelo K - θ , lo que muestra que este modelo se ajusta de forma adecuada a la descripción del comportamiento de las mezclas evaluadas. Las proporciones de RAP, BE, AP1 o AP2, dadas como porcentaje de peso seco de la mezcla

son: M1- (21%, 64%, 15%1), M2 - (21%, 64%,15%2), M3 - (38%, 47%,15%1) y M4 - (55%, 30%,15%1) con una espuma de asfalto promedio de 2.4% y 1% de cal (S. X. Campagnoli & Puentes, 2016).

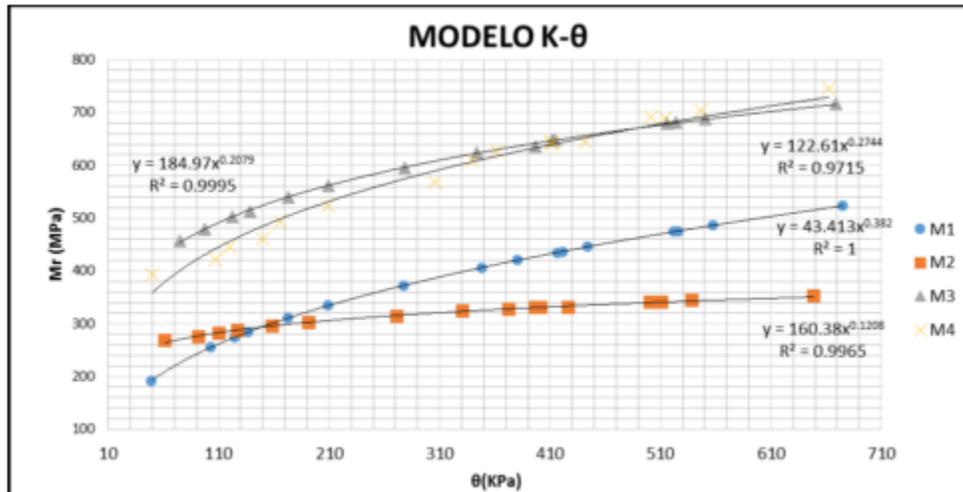


Figura 20 Modelo M_r - θ mezclas 1,2,3 y 4, (S. X. Campagnoli & Puentes, 2016)

Tabla 4 Resultados de k_1 , k_2 y R^2 de los diferentes autores para el modelo M_r - θ

Tipo de Material		k_1	k_2	R^2	Referencia
% RAP	25	48	0,33	0,86	(K. J. Jenkins et al., 2007)
% MG	75				
% CEMENTO	0				
% ESPUMA	2,5				
% RAP	25	974,29	0,01	0	(K.J. Jenkins & Mulusa, 2008)
% MG	75				
% CEMENTO	0				
% ESPUMA	2,0				
% RAP	100	877	0,46	0,99	(Santagata et al., 2010)
% MG	0				
% CEMENTO	2,5				
% ESPUMA	3,5				
% RAP	20	94,86	0,26	0,72	(Kim Jonathan Jenkins, 2013)
% MG	80				
% CEMENTO	1,0				
% ESPUMA	2,4				
		158,95	0,12	0,35	
		153,11	0,22	0,79	

Tipo de Material		k1	k2	R ²	Referencia
M1	NOTA 1	43.4	0.38	1	(S. X. Campagnoli & Puentes, 2016)
M2		160.3	0.126	0.99	
M3		184.9	0.211	0.99	
M4		122.6	0.305	0.97	

MG: Material Granular NOTA 1: Las proporciones de RAP, BE, AP1 o AP2, dadas como porcentaje de peso seco de la mezcla son: M1- (21%, 64%, 15%¹), M2 - (21%, 64%,15%²), M3 - (38%, 47%,15%¹) y M4 - (55%, 30%,15%¹) con una espuma de asfalto promedio de 2.4% y 1% de cal.

Con los resultados obtenidos de R² por los diferentes autores como se muestra en la Tabla 4, estos calificaron el modelo en la mayoría de los casos como una representación adecuada para la obtención del módulo resiliente en las mezclas tratadas con espuma de asfalto; no obstante Ebels 2008 no encuentra una correlación adecuada con la aplicación de esta fórmula; por lo que recomienda tener cuidado en la aplicación de la misma para el cálculo del Módulo Resiliente.

Modelo de Uzan

Uzan en un intento de mejorar las deficiencias del modelo Mr-θ, desarrolló un nuevo modelo no lineal, basado en el modelo Mr-θ pero que incorporó el efecto del esfuerzo desviador, por lo que propuso el modelo que se representa en la Ecuación 4.

Ecuación 4 Modelo Uzan

$$M_r = K_1 \theta^{k_2} \sigma d^{k_3}$$

Fuente: (Uzan, 1985)

Donde,

σd= Esfuerzo desviador (σ1-σ3).

θ = Suma de los esfuerzos principales (σ1 + 2σ3).

k1, k2 y k3= Parámetros de regresión.

En este modelo, Uzan especificó que el Módulo Resiliente de una capa granular no es solamente una función del invariante de esfuerzos (θ), sino también de la magnitud de la deformación cortante inducida principalmente por el esfuerzo cortante o por el esfuerzo desviador (Uzan, 1985).

Para el análisis del comportamiento del módulo resiliente en el material granular tratado con asfalto espumado autores como Santagata 2010, adopta el modelo de Uzan con el fin de incluir el efecto del esfuerzo desviador en los resultados del Mr, Tabla 5.

Por otro lado en la investigación del año 2016 realizada por Campagnoli y Puentes, encontraron que el modelo se ajusta bastante a la modelación de la rigidez de las mezclas tratadas con espuma de asfalto, esto debido a que obtuvieron resultados de R2 que varían entre 0.94 y 0.97, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5 Resultados de k1, k2, k3 y R² de Santagata para el modelo de Uzan

Tipo de Material		k1	k2	k3	R ²	Referencia
		649	0,5	-0,06	0,994	
		620	0,57	-0,08	0,997	
		728	0,54	-0,04	0,995	
% RAP	100	913	0,47	0,02	0,993	(Santagata et al., 2010)
% MG	0	916	0,41	0,04	0,996	
% CEMENTO	2,5	931	0,42	-0,002	0,997	
% ESPUMA	3,5	956	0,45	-0,004	0,983	
		975	0,38	0,0003	0,964	
		999	0,37	0,04	0,983	
		57.7	0.01	0.401	0.979	
M1	NOTA 1	147.9	0.01	0.157	0.940	Campagnoli & Puentes, 2016)
M2		169.5	0.001	0.278	0.964	
M3		106.3	0.001	0.371	0.977	
M4						

NOTA 1: Las proporciones de RAP, BE, AP1 o AP2, dadas como porcentaje de peso seco de la mezcla son: M1- (21%, 64%, 15%¹), M2 - (21%, 64%, 15%²), M3 - (38%, 47%, 15%¹) y M4 - (55%, 30%, 15%¹) con una espuma de asfalto promedio de 2.4% y 1% de cal.

Fuente: Elaboración Propia

Modelo τ octaédrico

Un planteamiento llevado a cabo, más tarde, por Uzan para el análisis en tres dimensiones (3-D) consiste en sustituir el esfuerzo desviador efectivo por la

Octaédrica (Uzan, 1992):

Ecuación 5 Modelo Uzan

$$M_r = K_1 P_0 \left(\frac{\theta}{P_0} \right)^{K_2} \left(\frac{\tau_{OCT}}{P_0} + 1 \right)^{K_3}$$

Fuente: (Uzan, 1992)

Donde,

θ = Suma de los esfuerzos principales ($\sigma_1 + 2\sigma_3$).

P_0 = Presión atmosférica 100kPa

$$\tau_{OCT} = \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_d$$

k_1 , k_2 y k_3 = Parámetros de regresión.

En este caso, empleó un esfuerzo de referencia p_0 de 100 kPa, igual a la presión atmosférica. En el modelo de Uzan se mantiene constante la relación de Poisson.

Para la evaluación del módulo resiliente de las mezclas tratadas con espuma de asfalto Fu y Jones en el año 2009 aplican este modelo obteniendo valores de k_1 entre 4.600, k_2 entre 0.15 y 0.31 y R^2 de 0.72 a 0.96, para mezclas con 25% material granular, 75% RAP y 3% de espuma de asfalto y concluyen que este modelo si aplica de forma correcta para la evaluación de módulo resiliente en materiales semiligados al obtener valores de R^2 superiores al 70% (Fu, Jones, Harvey, & Bukhari, 2009).

Por su parte Campagnoli y Puentes, aplicaron este modelo a las mezclas M1, M2, M3, y M4, mencionadas en el análisis del modelo K- θ y de Uzan e identificaron que el modelo aporta valores de R^2 entre 0.94 y 0.97 (S. X. Campagnoli & Puentes, 2016) .

Modelo DalBen 2014

En la investigación realizada por DalBen en el año 2014, determino dos ecuaciones constitutivas para la evaluación del módulo resiliente en las mezclas de RAP y material granular tratadas con espuma de asfalto y encontró que las mezclas con un contenido de RAP inferior al 50% presentan un comportamiento de correlación más lineal frente a las que tienen mayor contenido de RAP .; no obstante cuando los contenidos de RAP superan el

50% su comportamiento es más impredecible por lo que recomienda utilizar dos ecuaciones diferentes (Ben, 2014).

Para un porcentaje de RAP $\leq 50\%$

$$Mr = \left(k_2 870 e^{-\left(\frac{\%RA}{100}\right)} + \theta k_1 \right) + \left(-4(T - T_{ref}) \right)$$

Donde:

Mr= Módulo resiliente (MPa)

RAP = concentración de Pavimento recuperado

θ = Suma de los esfuerzos principales ($\sigma_1 + 2\sigma_3$).

T= Temperatura de ensayo (K)

T_{ref} = 298.15K (25°C)

k1, k2 = coeficientes.

Para un porcentaje de RAP $> 50\%$

$$Mr = \left(-\left(\frac{T - T_0}{10}\right)\left(\frac{\%RA}{100}\right) + \theta k_1 \right) + \left(k_2 e^{\left(\left(\frac{\%RA-50}{100}\right)(-0.034)(T - T_{ref})\right)} \right)$$

Donde:

Mr= Módulo resiliente (MPa)

θ = Suma de los esfuerzos principales ($\sigma_1 + 2\sigma_3$).

T= Temperatura de ensayo (K)

T_0 = 273.15K

T_{ref} = 298.15K (25°C)

k1, k2 = coeficientes.

Los resultados obtenidos con este modelo de acuerdo con la evaluación realizada por Mateo DalBen, fueron de R2 entre 0.98, en la mezcla de 50% RAP, 50% material granular, 2.1% de espuma de asfalto y en la mezcla 100%RAP y 2.1% de espuma el valor de R2 obtenido fue de 0.96 con la ecuación que le aplica.

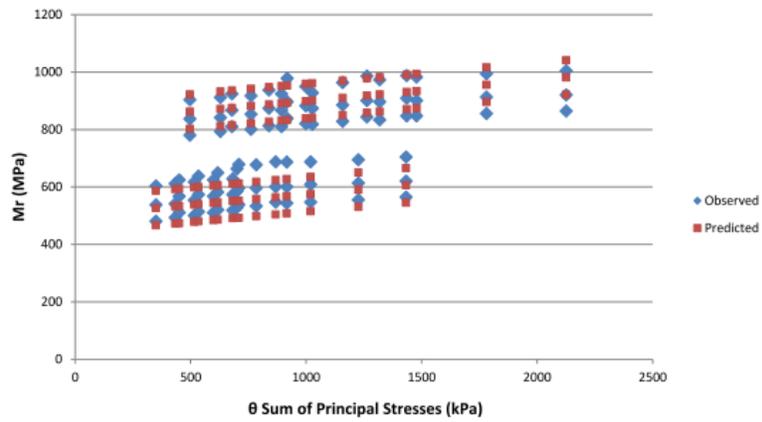


Figura 21 Modelo Mr-θ mezcla (50% RAP, 50% material granular, 2.1% de espuma de asfalto), (Ben, 2014)

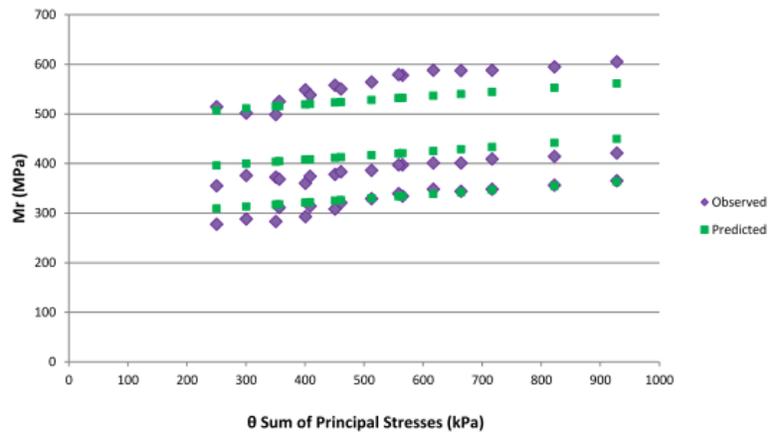


Figura 22 Modelo Mr-θ mezcla (100% RAP, 2.1% de espuma de asfalto),(Ben, 2014)

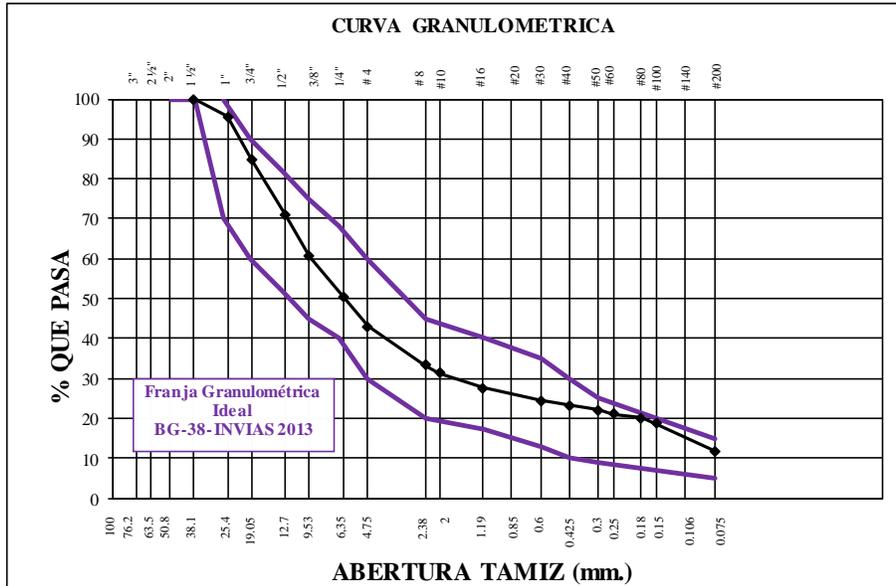
4. METODOLOGÍA

4.1 SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

Material Granular:

El material es proveniente de la cordillera oriental (Departamento de Cundinamarca), de la formación Guadalupe que son rocas areniscas duras de la era terciaria; las cuales son sometidas a procesos de trituración terciarios, con el fin de obtener los tamaños de partículas adecuados para cumplir con las especificaciones de la Norma INVIAS 2013; como se observa en la Figura 23.

Figura 23 Curva Granulometría INVIAS de Base Granular.



Fuente: Elaboración propia

Según la caracterización suministrada por la planta la base granular no plástica cumple con los parámetros de la especificación del Instituto Nacional de Vías INVIAS 2013 (Artículo 330) tabla 330-2.

Con el fin de corroborar las características de la base granular se realizaron en el laboratorio de la Escuela Colombiana de Ingeniería los resultados se muestran en la Tabla 6

Tabla 6 Resultados de los ensayos de caracterización del material granular

Ensayo	Norma INV -2013	Resultado
Limite líquido e índice de plasticidad	125/126	NL -NP
Equivalente de Arena	133	22
Desgaste en máquina de los ángeles	218	22
Índices de forma	230	23
Porcentaje de caras fracturadas	227	94%

Fuente: Elaboración propia

RAP

El RAP utilizado para la preparación de las mezclas es proveniente del reprocesamiento de capas asfálticas de pavimentos de la ciudad de Bogotá; para la caracterización de este material se realizaron los siguientes ensayos, ver Tabla 7, de acuerdo a las normas INVIAS del año 2013.

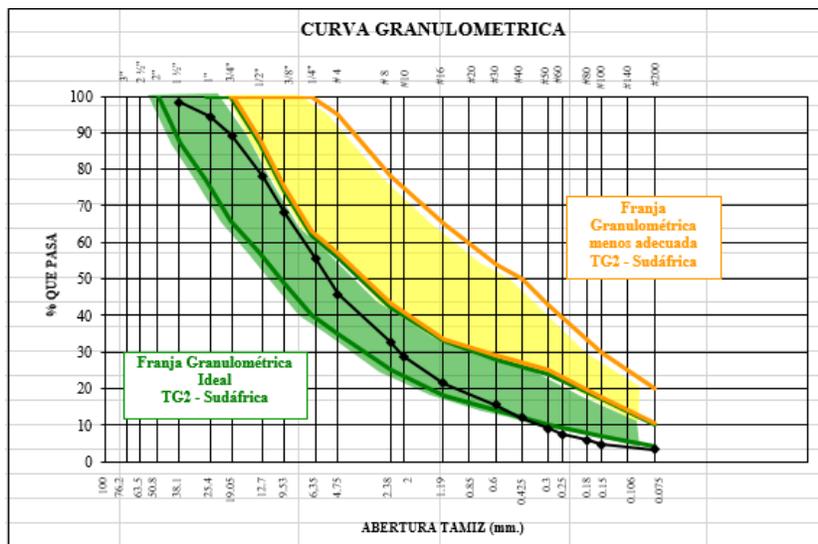


Tabla 7 Resultados de los ensayos de caracterización del RAP

Ensayo	Norma INV -2013	Resultado
Tamaño máximo de la Partículas	123	25%
Material Pasa Tamiz #4 (4.75mm)	123	45%
Material Pasa Tamiz #200 (0.075 mm)	123	4%

Ensayo	Norma INV -2013	Resultado
Índice de Plasticidad	125/126	NP
Desgaste Maquina de los ángeles	218	18%
Índices De Alargamiento Y Aplanamiento	230	25%

Fuente: Elaboración propia

Cementos Asfálticos

El asfalto utilizado es 60/70 de las refinerías de Barrancabermeja y Apiay, Colombia, y cumple con las especificaciones propuestas por el Instituto Nacional de Vías INVIAS en su versión del año 2013. En la Tabla 8 se muestra una descripción de los ensayos realizados para cada uno de los tipos de asfalto

Tabla 8 Clasificación y Penetración por Origen de cemento Asfáltico

Clasificación Por Penetración	Proveedor	Nomenclatura	Penetración (25°C, 100g. 5s)0.1mm
60/70	1	A1	69
60/70	1	B1	62
60/70	2	B2	66

Fuente: Elaboración propia

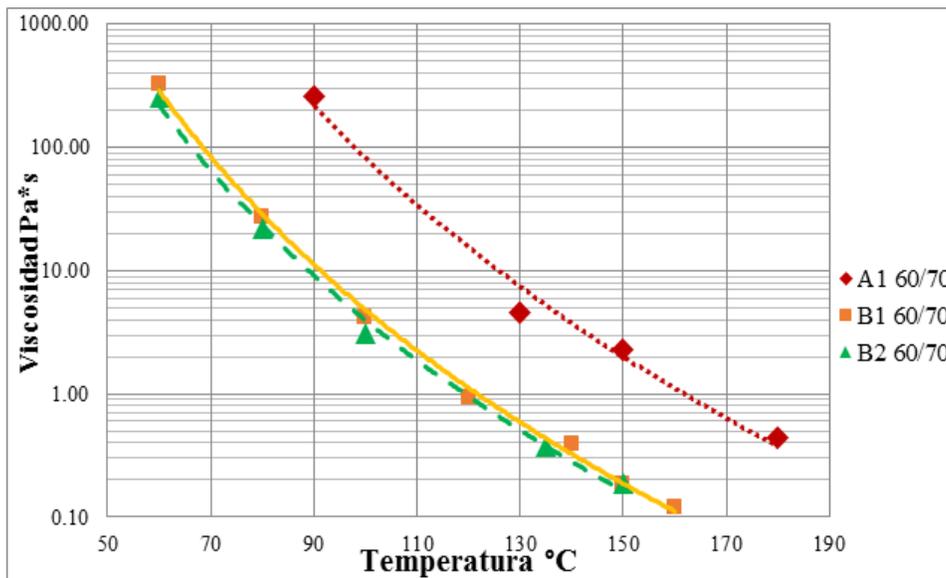


Figura 24 Viscosidad (Pa*s) Vs. Temperatura para Cemento Asfáltico

Como se observa en la gráfica los asfaltos B1 y B2 tienen el mismo origen pero fueron suministrados por diferente proveedor, tienen igual viscosidad, el mismo comportamiento de este parámetro con la temperatura y son menos viscosos que el asfalto A1 de origen diferente.

Caracterización de la espuma de asfalto.

Caracterizar la espuma es determinante en la elaboración de las mezclas estabilizadas con espuma de asfalto; establecer la mejor relación entre la razón de expansión y la vida media de cada uno de los asfaltos es la clave para garantizar el buen comportamiento de la espuma, esto con el fin de mejorar la manejabilidad y la trabajabilidad de la mezcla, como lo presenta la metodología sudafricana.

Para establecer el porcentaje de agua óptimo y la temperatura ideal a la que cada uno de los asfaltos evaluados presentan mejores valores de vida media y razón de expansión se realizaron pruebas de espuma a distintas temperaturas con diferentes contenidos de agua; para la evaluación de estos se utilizaron los valores mínimos requeridos por la metodología TG-2, para agregados a temperaturas de 10°C a 25°C (Ver [Tabla 9](#)).

Tabla 9 Valores mínimos de vida media y relación de expansión.

Temperatura de los agregados	10°C a 25°C	Más de 25°C
Razón de Expansión (tiempo)	10	8
Vida Media (seg.)	6	6

Fuente: (Asphalt Institute, 2009)

La espuma de asfalto se produjo en la máquina de espumado del laboratorio Wirtgen ubicada en el centro de estudios geotécnicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, como se muestra en la foto 1.

Esta planta móvil de espuma ha sido desarrollada para producir pequeñas cantidades de espuma de asfalto en condiciones de laboratorio (Wirtgen, 2010). El asfalto espumado se mezcló junto con agregados en el mezclador de molino de doble eje WLM 30. Este mezclador tiene la capacidad de 30 kg; sin embargo, se realizaron mezclas de 10kg.

Foto 1 Maquina de laboratorio para producción de espuma de asfalto



Para la caracterización de la espuma de asfalto se realizaron variaciones de las temperaturas del asfalto entre 140°C y 170°C y en las concentraciones de agua desde 2.0% con incrementos de 0.5% hasta alcanzar el 4.0%. Una vez realizadas las pruebas de espumado a cada uno de los asfaltos se determinaron las temperaturas y el porcentaje óptimo de agua para garantizar los parámetros de vida media y relación de expansión como se muestra a continuación.

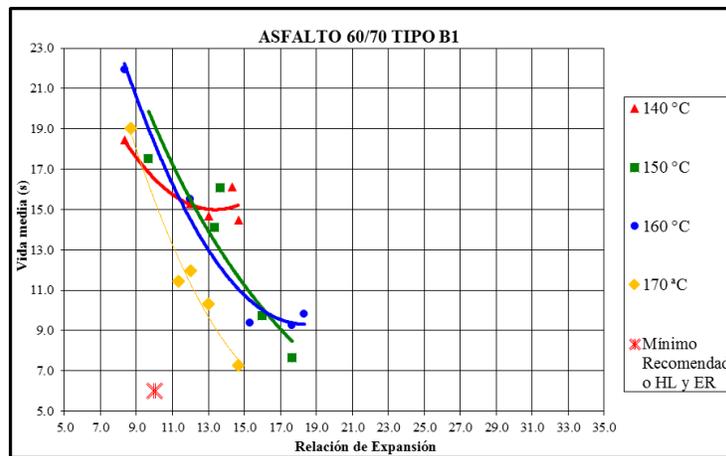


Ilustración 1 Caracterización de espuma Asfalto Barrancabermeja 60/70 (B1),_Elaboración Propia

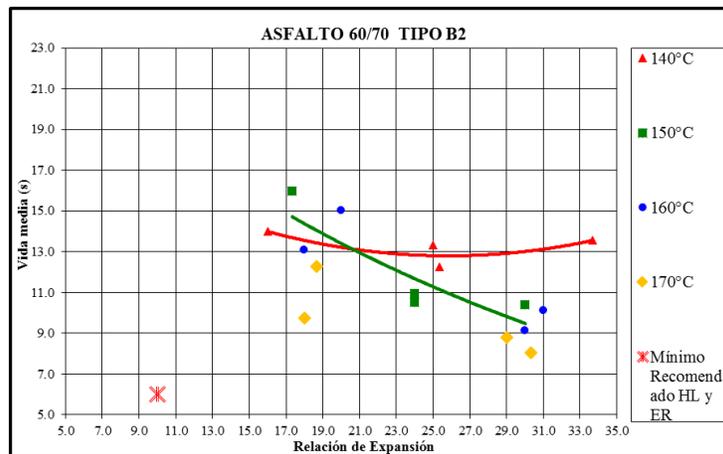


Ilustración 2 Caracterización de espuma Asfalto Barrancabermeja 60/70 (B2), Elaboración Propia

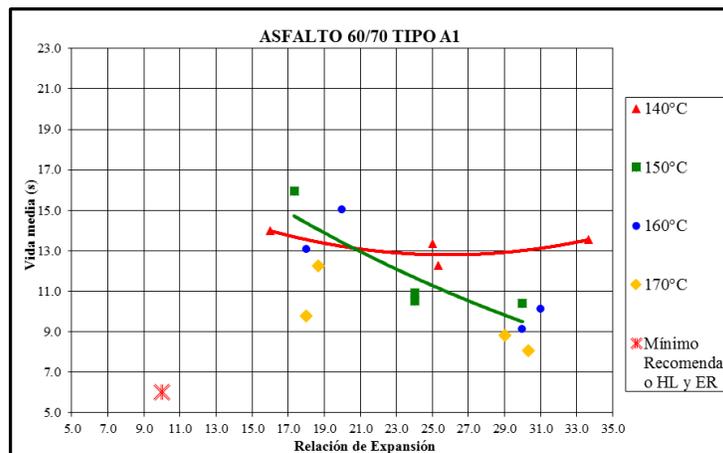


Ilustración 3 Caracterización de espuma Asfalto Apiay 60/70 (A1). Fuente: Elaboración Propia

Con los resultados obtenidos se determinó que todos los porcentajes de agua y de temperatura cumplen con los parámetros mínimos de evaluación de vida media (6) y de razón de expansión (10), para el asfalto de B2 y A1; sin embargo, para el asfalto B1, los valores de vida media y de razón de expansión con 2.0% de agua no cumplen con dichos valores.

Una vez analizados los resultados, y teniendo en cuenta las recomendaciones de diferentes autores como Abel en 1979, quien demostró que la mayoría de los asfalto mejoran sus

propiedades de espumado al aumentar la temperatura, se estima que espumas aceptables se consiguen en temperaturas sobre 149°C (Abel, 1979),

Los resultados de razón de expansión variaron entre 8.3 y 18.3 mientras que los resultados de vida media mostraron valores entre 7.3s y 21.9s, cumpliendo de esta manera con los requisitos especificados por el Instituto de asfalto en el manual del TG2.

En la Tabla 10 se muestra el resumen de los resultados obtenidos de las características del asfalto a utilizar en el presente estudio, en el que se seleccionó una temperatura optima de 160°C y 2.5% de concentración de agua, teniendo en cuenta que con estas condiciones la espuma de asfalto presentaba un buen comportamiento de manejabilidad y trabajabilidad y adicionalmente cumple con los parámetros de aceptación propuestos por la metodología

Tabla 10 Resumen de las características de la espuma óptima para asfaltos 60/70.

Tipo de Asfalto	Temperatura (°C)	Concentración de agua FWC	Razón de expansión (ER)	Vida media (HL) s.
B1	160	2.5	12.0	15.5
B2	160	2.5	18.0	13.1
A1	160	2.5	34.0	12.9

Fuente: Elaboración Propia

4.2 MEZCLAS DE AGREGADOS Y RAP

Para el estudio realizaron cuatro diferentes combinaciones de agregados en las siguientes proporciones Material granular/RAP (100/0%, 85/15%, 70/30% y 50/50%)

Una vez realizadas las combinaciones de los agregados se procede a determinar la granulometría combinada y a comparar con la franja granulométrica propuesta por la metodología del instituto del asfalto en el manual TG2, como se muestra a continuación (ver Figura 25). Esta forma de preparación de las muestras, no resulta recomendable, porque se introducen variables de la granulometría que inciden en los resultados obtenidos, difíciles de cuantificar y restringen el análisis de los mismos. Las consecuencias de esto, se pueden ver más adelante en las curvas granulométricas y de compactación – relación humedad – peso unitario seco, que lógicamente tendrán efecto en los diseños de las mezclas con asfalto espumado y en los parámetros de módulo resiliente, que son el objeto del estudio.

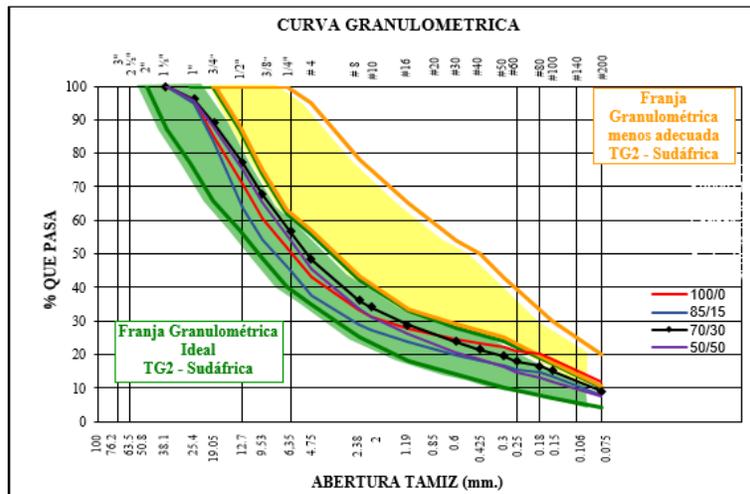


Figura 25 Curvas granulométrica mezclas de agregado/RAP, Elaboración propia.

Como se muestra en la Figura 25 todas las combinaciones de materiales muestran un buen comportamiento cuando se comparan con la granulometría requerida por la metodología TG2; no obstante, la combinación 100/0 muestra una tendencia más fina mientras que la combinación 70/30 muestra una curva más gruesa, lo cual puede estar influenciado por el método de mezcla de las proporciones ya que no se realizó tamiz a tamiz.

Con el ensayo también se determina el contenido de material que pasa el tamiz N° 200 y el tamiz N° 4 con el fin de determinar el porcentaje óptimo de asfalto inicial para la escogencia de filler; en la Tabla 11 que se muestra a continuación se presenta un resumen de los parámetros de caracterización, para cada una de las mezclas. Adicionalmente se presentan los resultados de plasticidad del material.

Tabla 11 parámetros de caracterización de las mezclas

Tipo de mezcla	Pasa tamiz N°4 (%)	Pasa Tamiz N°200 (%)	Índice de plasticidad
100/0	43	11.8	NP
85/15	38	7.8	NP
70/30	48	9.0	NP
50/50	46	7.5	NP

Fuente: Elaboración propia.

Densidad seca y contenido de humedad óptima.

La densidad seca y el contenido de humedad óptima para compactación fue determinado con el ensayo de Relación – humedad peso unitario seco en los suelos (ensayo modificado de compactación) INVIAS 142/13.

Los resultados obtenidos para cada tipo de mezcla se muestran a continuación en la

Tabla 12 Densidad seca y porcentaje óptimo de humedad de las mezclas

Tipo de mezcla	Humedad óptima (%)	Densidad Seca (kN/m ³)
100/0	8,4	20,05
85/15	7,6	20,50
70/30	8,2	22,45
50/50	7,2	22,25

Fuente: Elaboración propia.

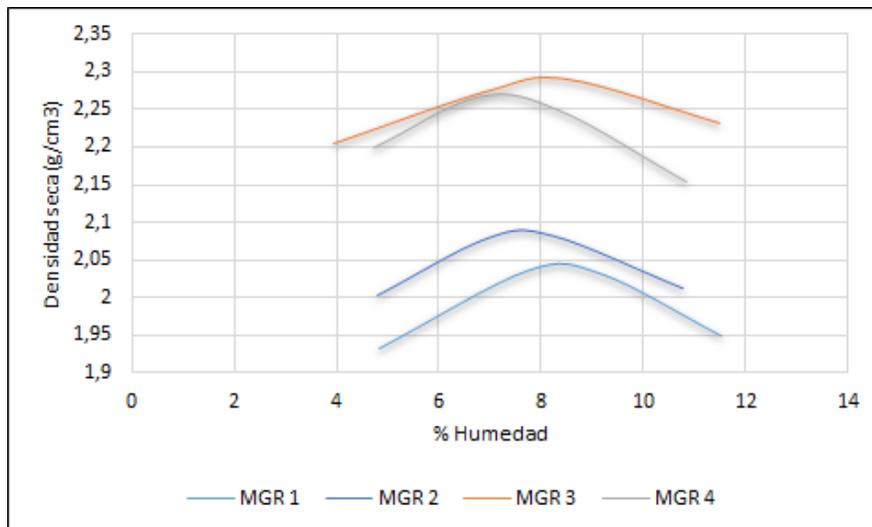


Figura 26 Comportamiento de la Densidad seca y porcentaje óptimo de humedad de las mezclas, Elaboración propia.

La Figura 26 Comportamiento de la Densidad seca y porcentaje óptimo de humedad de las mezclas, muestra que con el incremento de la proporción del RAP, la densidad de la mezcla

aumenta; sin embargo para la mezcla 70/30 el comportamiento se altera mostrando una variación atípica con respecto a las otras mezclas.

Por otro lado, la humedad juega un papel muy importante en la elaboración de las mezclas tratadas con espuma de asfalto; por lo que en este caso se evidencia que el porcentaje óptimo de humedad aumenta con el contenido de finos.

La densidad máxima seca de la mezcla 100/0 fue la más baja de las densidades obtenidas en cada una de las combinaciones de materiales; esto puede ser debido a que el contenido de finos disminuye con el aumento de la proporción de RAP.

4.3 SELECCIÓN DE LLENANTE ÓPTIMO

Siguiendo con la metodología propuesta por el TG2 para diseños de vías con **tránsitos bajos nivel 1** (Asphalt Academy, 2009); una vez determinada la temperatura de la espuma y la cantidad de agua necesaria para la obtención de los resultados óptimos de vida media y de razón de expansión; así como las condiciones de densidad seca y humedad óptima del material se procedió a realizar la masa para la elaboración de la mezcla y la selección del llenante óptimo mediante el ensayo de tracción indirecta.

La selección de llenante óptimo se realiza mediante la evaluación de tres tipos de filler; en este caso cemento, cal y el natural, comparando los resultados de los ensayos de tracción indirecta seca, húmeda y la resistencia conservada, en la Figura 27 se muestra el diagrama de flujo para la selección.

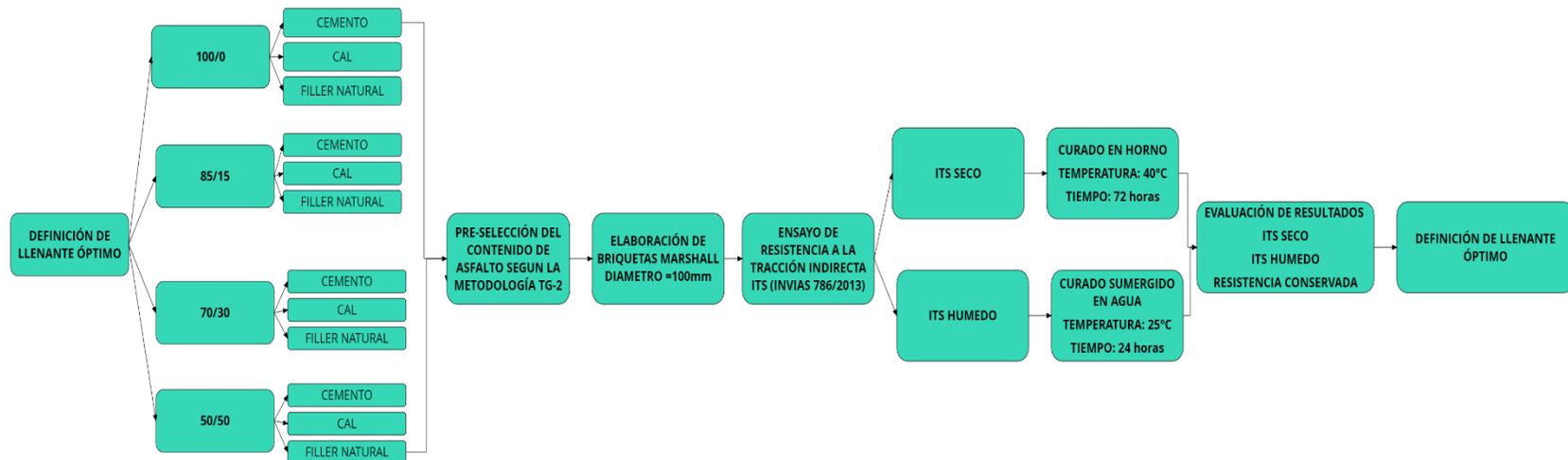


Figura 27 Diagrama para la selección de llenante óptimo, Elaboración Propia

4.4 SELECCIÓN DE ASFALTO ÓPTIMO

La selección de asfalto óptimo se determina mediante la evaluación de las resistencias a tracción indirecta secas y húmedas de cuatro diferentes porcentajes de asfaltos: en este caso el porcentaje inicial es el recomendado por la metodología TG-2 basado en el % de material que pasa el tamiz #200, y los demás corresponden a -0.2%, +0.2%, y +0.4% del porcentaje inicial, en la Figura 28 se muestra el proceso de obtención del porcentaje óptimo de asfalto.

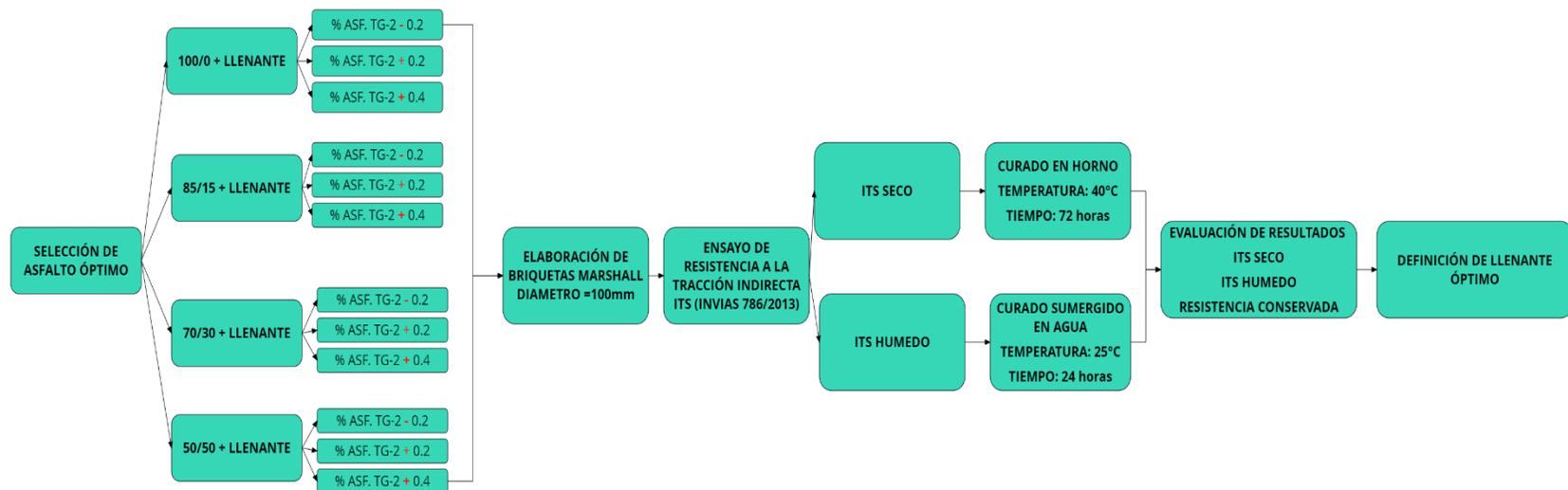


Figura 28 Diagrama para la selección de llenante óptimo, Elaboración Propia

4.5 FABRICACIÓN DE PROBETAS PARA ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE

La fabricación de las probetas para determinar el Módulo resiliente se realizó de acuerdo con lo especificado en la norma INVIAS 156 del 2013, el diámetro de los especímenes fue de 100mm y la altura 200mm (Ver foto 2).

Foto 2 Fabricación de briquetas para módulo resiliente.



Fuente: Elaboración Propia

La compactación de las probetas se realizó con un equipo vibratorio de acuerdo con lo recomendado por la metodología del TG2.

Para la conformación de una de las capas que forman una probeta de ensayo; primero se pesó la masa correcta de material para alcanzar mínimo el 90% de la densidad máxima del proctor modificado, se introdujo este material en el molde partido, se distribuyeron las partículas con una espátula, se compacto el material durante 45 segundos, se escarifico y se procedió a realizar la siguiente capa. Cada briqueta se compone de cinco capas.

Para el curado de las probetas de módulo resiliente se utilizó un horno de temperatura controlada a 40°C durante 72 horas.

4.5 ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE

Se realizaron pruebas de módulo resiliente para cada una de las mezclas de evaluación (12 mezclas, con tres tipos de asfalto), de acuerdo con lo especificado en la norma INVIAS 156/2013, sin control de temperatura.

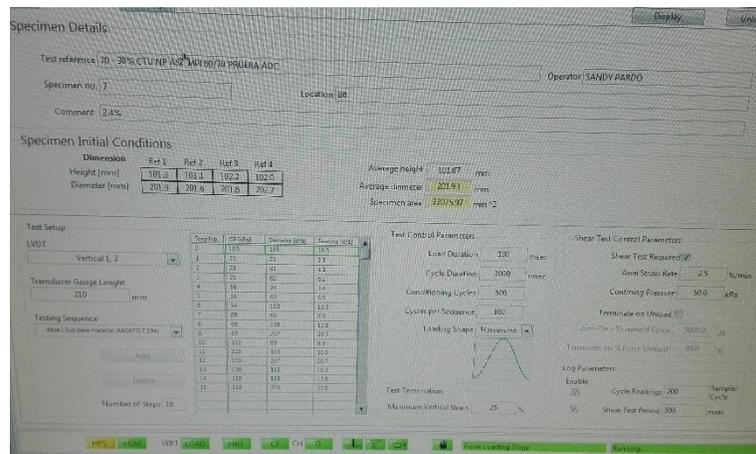
Las presiones de confinamiento se muestran en la Tabla 13 y fueron las mismas para todas las muestras, se usaron las establecidas para materiales de base y subbase de la norma INVIAS 156/2013 tabla 156-2.

Tabla 13 Presiones de confinamiento

SECUENCIA N°	PRESIÓN DE CÁMARA $\Sigma 3$		ESFUERZO AXIAL MÁXIMO $\Sigma M \text{ÁX}$		ESFUERZO CÍCLICO $\Sigma \text{CICLICO}$		ESFUERZO CÍCLICO 0.1 $\Sigma M \text{ÁX}$		NÚMERO DE APLICACIONES DE CARGA
	kPa	lbf/pg2	kPa	lbf/pg2	kPa	lbf/pg2	kPa	lbf/pg2	
0	103,4	15	103,4	15	93,1	13,5	10,3	1,5	500-1000
1	20,7	3	20,7	3	18,6	2,7	2,1	3,0	100
2	20,7	3	41,4	6	37,3	5,4	4,1	6,0	100
3	20,7	3	62,1	9	55,9	8,1	6,2	9,0	100
4	34,5	5	34,5	5	31,0	4,5	3,5	5,0	100
5	34,5	5	68,9	10	62,0	9,0	6,9	1,0	100
6	34,5	5	103,4	15	93,1	13,5	10,3	1,5	100
7	68,9	10	38,9	10	62,0	9,0	6,9	1,0	100
8	68,9	10	137,9	20	124,4	18,0	13,8	2,0	100
9	68,9	10	206,8	30	186,1	27,0	20,7	3,0	100
10	103,4	15	68,9	10	62,0	9,0	6,9	1,0	100
11	103,4	15	103,4	15	93,1	13,5	10,3	1,5	100
12	103,4	15	206,8	30	186,1	27,0	20,7	3,0	100
13	137,9	20	103,4	15	93,1	13,5	10,3	1,5	100
14	137,9	20	137,9	20	124,1	18,0	13,8	2,0	100
15	137,9	20	275,8	40	248,2	36,0	27,6	4,0	100

Fuente: Tabla 156-2 NORMA 156 (INVIAS, 2013)

Ilustración 4 Ajustes del ensayo de módulo resiliente



Fuente: Software Dynapave Expansión.

En la presente investigación se analizó un conjunto de veinticuatro especímenes que representan las doce mezclas de espuma BSM (dos por mezcla). Para ejecutar la prueba, se cubrió la muestra con una membrana de látex alrededor con el objetivo de crear la configuración de prueba triaxial monotónica o dinámica y reducir la influencia de los vacíos de aire presentes en la Mezclas de espuma BSM (Ver foto 3).

Foto 3 Montaje de la muestra para ensayo de módulo resiliente.



Fuente: Elaboración Propia

La etapa inicial, denominada etapa de acondicionamiento, consistió en 500 ciclos de carga y descarga. Para las fases de carga subsiguientes después del acondicionamiento, se aplicaron 100 ciclos de carga y descarga a los especímenes, usando un pulso de carga que en 0,1s seguido por un período de reposo de 0,9s. La presión de confinamiento real y el esfuerzo desviador estaban de acuerdo con la normativa de ensayo. Si en cualquier momento la deformación permanente total de la muestra excedió el 5%, se detuvo el ensayo y se informaron los resultados. Se registró la deformación media recuperada para cada uno de los deformímetros. Los datos se muestrearon a una velocidad de 200 Hz.

Durante todas estas pruebas los datos se registraron en un sistema de adquisición de datos analógicos Dynapave expansion y los ensayos se realizaron utilizando un programa DYNAPAVE EXPANTION desarrollado por la empresa Dynapave. El programa fue capaz de configurar diferentes pulsos de carga con diferentes tiempos de carga y descarga. En todos los ensayos se llevó a cabo la misma configuración de carga 0,1s y de reposo 0,9s.

Después de la prueba, los calibradores externos y la membrana se retiraron de todos los especímenes. En ninguno de los casos la muestra fallo durante la prueba. Durante las

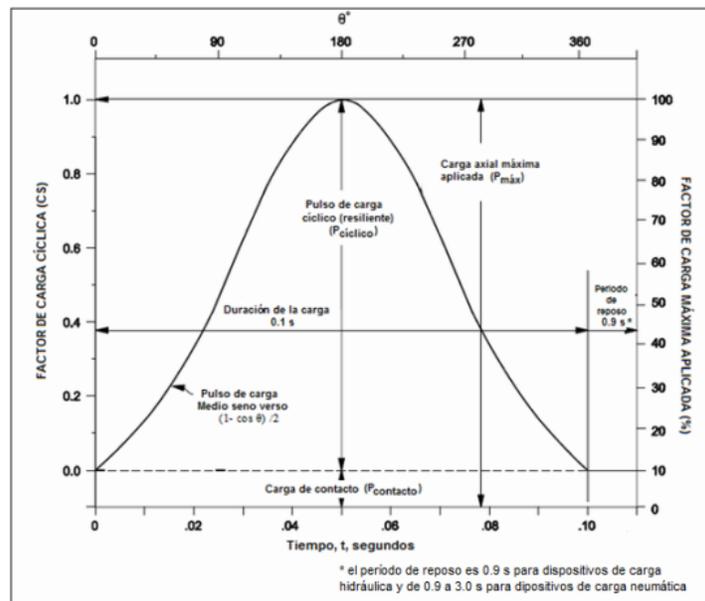
pruebas dinámicas para módulo resiliente se midió la respuesta de la muestra a diferentes niveles de carga y presiones de confinamiento.

Con el fin de evitar sobrecargas de la máquina y los especímenes se limitaron los excesos de deformación a máximo el 25%.

Para la realización de los ensayos se tomaron en cuenta los parámetros de la norma INVIAS 156/2013:

- Forma de carga de medio seno verso o Harversine:- Forma requerida para el pulso de carga. El pulso es de forma: $(1 - \cos \theta) / 2$, como se muestra en la Ilustración 5.

Ilustración 5 Definición grafica de los pulsos de carga



Fuente: Norma 156/2013 (INVIAS, 2013).

- Carga axial máxima aplicada ($P_{máx}$) – Carga total aplicada a la muestra. Incluye la carga de contacto y la carga cíclica (resiliente).

$$P_{máx} = P_{contacto} + P_{cíclica}$$

- Carga de contacto ($P_{contacto}$) – Carga total aplicada a la muestra para mantener un contacto positivo entre ella y la platina cabezal.

$$P_{\text{contacto}} = 0.1 P_{\text{máx}}$$

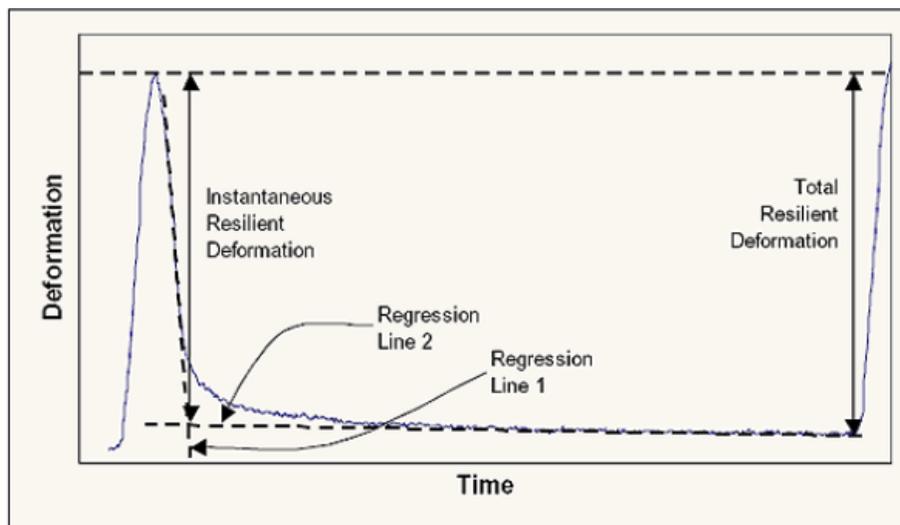
- Carga Cíclica (Carga Resiliente, P cíclico): carga aplicada a un espécimen de prueba que se utiliza para calcular el módulo elástico.

$$P_{\text{ciclico}} = P_{\text{máx}} - P_{\text{contacto}}$$

Módulo Resiliente Instantáneo: Es determinado a partir de las gráficas de tiempo de deformación (tanto horizontales como verticales) usando la deformación elástica instantánea, obtenida de la manera indicada en la Ilustración 6 y descrita en el presente documento.

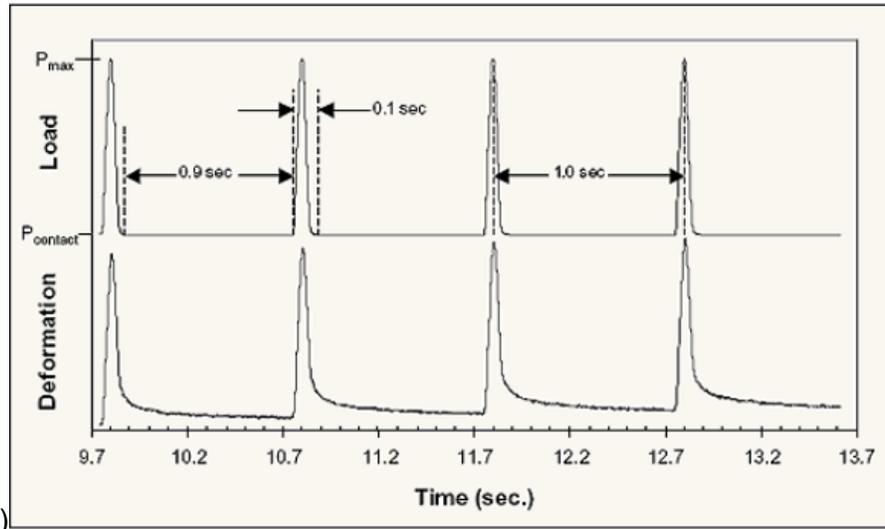
Para cada ciclo, se utilizan dos líneas de regresión para determinar las deformaciones instantánea y total. El rango para la línea de regresión 1 comienza en el punto 5 después del valor máximo de deformación y termina en el punto 17 después de la deformación máxima (13 puntos en total). El rango para la línea de regresión 2 incluye los últimos 299 puntos del ciclo y el primer punto del ciclo siguiente. Para cada ciclo, la deformación instantánea se calcula restando el valor de deformación en la intersección de las líneas de regresión 1 y 2 de la deformación máxima. En Ilustración 6 se muestra un gráfico típico de deformación versus tiempo para la prueba de módulo resiliente.

Ilustración 6 Deformación resiliente instantánea y total



Fuente: (Dal, 2014)

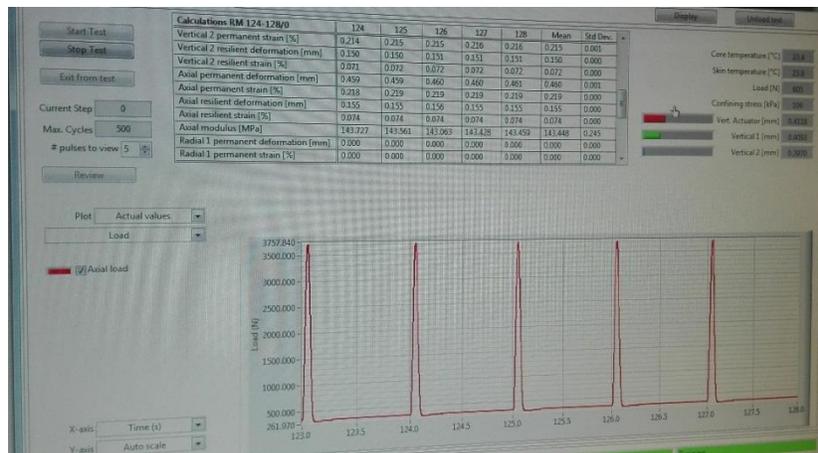
Ilustración 7 Resultado típico de ensayo de módulo resiliente.



Fuente: (Dal, 2014)

Módulo Resiliente Total: determinado a partir de las gráficas de tiempo - deformación usando la deformación elástica total, obtenida de la manera indicada en la Ilustración 8 y descrita en el presente documento. Para cada ciclo, la deformación total se calcula por el valor de deformación de la línea de regresión 2 en el primer punto del siguiente ciclo desde la deformación máxima. Este valor incluye tanto la deformación recuperable instantánea como la deformación recuperable continuada dependiente del tiempo durante la porción de período de reposo de un ciclo.

Ilustración 8 Resultado típico de ensayo de módulo resiliente.



Fuente: Software Dynapave Expantion.

4.5 DEFINICIÓN DE MÓDELOS

Para la evaluación y obtención de las ecuaciones constitutivas de las mezclas ensayadas se usarán los siguientes modelos:

Modelo K- θ

Modelo comúnmente usado en la ingeniería de pavimentos y en la evaluación de mezclas tratadas con asfalto espumado para determinar los resultados de módulo resiliente a partir del invariante de esfuerzos.

Ecuación 6 Modelo K- θ

$$M_r = K_1 \theta^{K_2}$$

Fuente: (Hicks and Monismith, 1971)

Donde,

θ = Suma de los esfuerzos principales ($\sigma_1 + 2\sigma_3$).

k_1 y k_2 = Parámetros de regresión.

Modelo Uzan

El segundo modelo de evaluación incorpora el efecto del esfuerzo desviador, por lo que hace importante la consideración de este parámetro en la evaluación.

Ecuación 7 Modelo Uzan

$$M_r = K_1 \theta^{K_2} \sigma_d^{K_3}$$

Fuente: (Uzan, 1985)

Donde,

σ_d = Esfuerzo desviador ($\sigma_1 - \sigma_3$).

θ = Suma de los esfuerzos principales ($\sigma_1 + 2\sigma_3$).

k_1 , k_2 y k_3 = Parámetros de regresión.

Modelo τ octaédrico

El tercer modelo a evaluar, consiste en sustituir el esfuerzo desviador efectivo por la tensión efectiva tangencial octaédrica.

Ecuación 8 Modelo Uzan

$$M_r = K_1 P_0 \left(\frac{\theta}{P_0} \right)^{K_2} \left(\frac{\tau_{OCT}}{P_0} + 1 \right)^{K_3}$$

Fuente: (Uzan, 1992)

Modelo Ben 2014.

El cuarto modelo de investigación tiene en cuenta la influencia del RAP en la correlación del módulo resiliente y el invariante de esfuerzos; por lo que es importante evaluar si esto si caracteriza las mezclas evaluadas.

Este modelo no será utilizado en el análisis de las mezclas del presente estudio, debido a que no se garantizaron las condiciones de temperatura requeridas.

Modelo Mr - σ_d

El modelo Mr – σ_d será analizado con el fin de determinar la influencia del esfuerzo desviador en las mezclas tratadas con asfalto espumado.

Ecuación 9 Modelo Mr- σ_d

$$M_r = K_1 \sigma_d^{K_2}$$

Fuente:(Moossazadeh & Witczak, 1981)

Donde,

σ_d = Esfuerzo desviador.

k1 y k2 = Parámetros de regresión.

5. DISEÑO DE MEZCLAS

El presente capítulo fue desarrollado en conjunto con el estudio realizado por parte del ingeniero Dairo Steven Puentes titulado “**Determinación de parámetros de resistencia al corte en materiales estabilizados con asfalto espumado**”.

La obtención de las fórmulas de trabajo se realizó mediante los ensayos de tracción indirecta y resistencia conservada obtenidos sobre briquetas tipo Marshall, elaboradas con diferentes proporciones de Granular y RAP y concentraciones de asfalto inyectado en forma de espuma, a partir de los cuales se seleccionaron el tipo de llenante y la concentración óptima de asfalto para elaborar las probetas de 100mm x 200mm sobre las cuales se realizaron ensayos de módulo resiliente (Mr).

En la Tabla 14 se indican, para cada concentración de Material Granular - RAP, las proporciones de fino (Pasa Tamiz No. 200) y de arena (Pasa Tamiz No. 4) de acuerdo a los cuales se establecieron los contenidos óptimos teóricos de asfalto de acuerdo con la guía de diseño Wirtgen GmbH, (2012).

Tabla 14 Valores de óptimo teórico recomendado en función de la granulometría.

GRANULAR – RAP	100-0	85-15	70-30	50-50
MATERIAL PASA TAMIZ #4 (4.75mm)	43%	38%	48%	46%
MATERIAL PASA TAMIZ #200 (0.075 mm)	11.8%	7.8%	9.0%	7.5%
ÓPTIMO DE ASFALTO ESPUMADO RECOMENDADO (%)	2.6	2.4	2.4	2.4

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se presentan y analizan los resultados para cada proporción de Granular/RAP con los diferentes asfaltos utilizados y la incidencia del tipo de asfalto en el comportamiento de los parámetros de resistencia al corte. Al finalizar el capítulo se presenta una comparación de los parámetros analizados en función de las proporciones de granular/RAP en cada mezcla.

5.1 MEZCLA 100/0

5.1.1 ASFALTO 60/70 BARRANCA B1

Definición de llenante

Optimo Teórico: 2.6%

% Real de asfalto Inyectada: 2.4%

Tabla 15 Parámetros de resistencia (ITS) para definición de llenante óptimo 100/0 B1

Llenante	ITS Seco (KPa)	ITS Húmedo (Kpa)	Resistencia
			Conservada (%)
CAL	260	160	61
CEMENTO	199	122	27
FILLER	411	199	41

Fuente: Elaboración propia.

Definición del contenido óptimo de asfalto

Llenante Optimo: CAL 1.0%

Optimo Teórico: 2.4%±2

Tabla 16 Parámetros de resistencia (ITS) para definición de asfalto optimo 100/0 B1

Contenido de Asfalto (%)	ITS Seco (KPa)	ITS Húmedo (Kpa)	Resistencia
			Conservada (%)
2.3	246	102	42
2.4	260	160	61
2.5	204	82	40
2.8	227	73	32

Fuente: Elaboración propia.

NOTA: Las variaciones de los porcentajes teoricos de asfalto cambian debido a que al momento de realizar la extracción se determina el porcentaje real contenido en la mezcla y es el que aparece en el reporte.

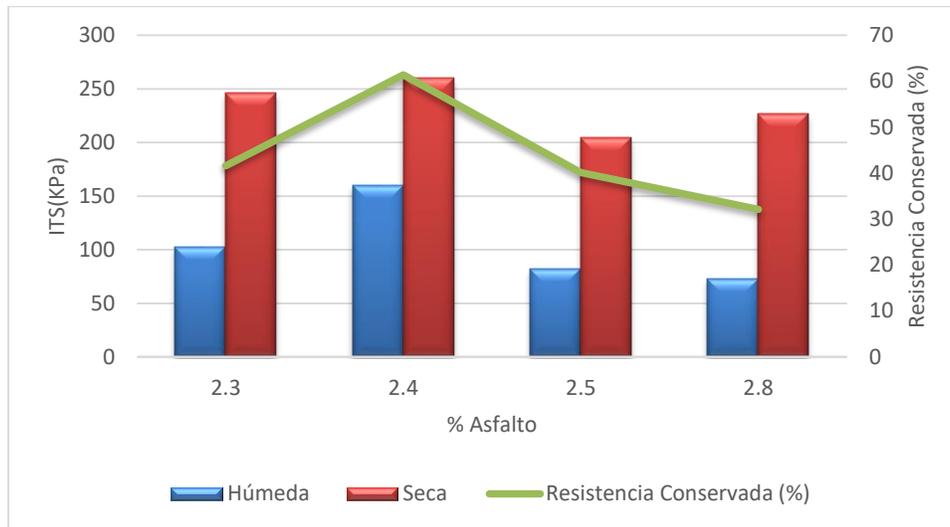


Figura 29 Resultados de ITS vs % de asfalto 100/0 B1, Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos se determino que el llenante optimo para este tipo de mezcla es la CAL; por otro lado tambien se identifica que los resultados de resistencia conservada son mas altos para un contenido de asfalto de 2.4%, por lo que se escoje este como el contenido optimo para la fabricación de las probetas de módulo resiliente.

5.1.2 ASFALTO 60/70 BARRANCA B2

Definición de llenante

Optimo Teórico: 2.6%

% Real de asfalto Inyectada: 2.6%

Tabla 17 Parámetros de resistencia (ITS) para definición de llenante óptimo 100/0 B2

Llenante	ITS Seco (KPa)	ITS Húmedo (Kpa)	Resistencia Conservada (%)
CAL	256	72	28
CEMENTO	355	182	51
FILLER	315	0	0

Fuente: Elaboración propia.

Definición del contenido óptimo de asfalto

Llenante Optimo: CEMENTO 1.0%

Optimo Teórico: 2.6%±2

Tabla 18 Parámetros de resistencia (ITS) para definición de asfalto optimo 100/0 B2

Contenido de Asfalto (%)	ITS Seco (KPa)	ITS Húmedo (Kpa)	Resistencia Conservada (%)
2.3	283	146	52
2.6	355	182	51
2.7	283	110	34
2.9	282	126	45

Fuente: Elaboración propia.

NOTA: Las variaciones de los porcentajes teoricos de asfalto cambian debido a que al momento de realizar la extracción se determina el porcentaje real contenido en la mezcla y es el que aparece en el reporte

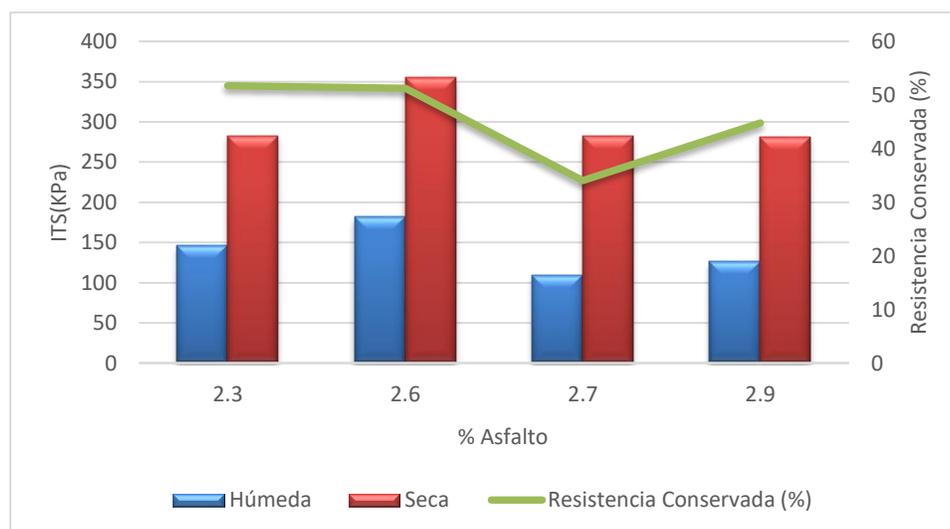


Figura 30 Resultados de ITS vs % de asfalto 100/0 B2, Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos se determino que el llenante optimo para este tipo de mezcla es el CEMENTO; por otro lado tambien se identifica que los resultados de resistencia conservada son mas altos para un contenido de asfalto de 2.3%, por lo que se escoje este como el contenido optimo para la fabricación de las probetas de módulo resiliente.

Es importante mencionar que tambien se pudo elegir el 2.6% como optimo de asfalto, ya que cumple con los parametros de ITS, y resistencia conservada planteados por la metodología TG2.

5.1.3 ASFALTO 60/70 APIAY A1

Definición de llenante

Optimo Teórico: 2.6%

% Real de asfalto Inyectada: 2.5%

Tabla 19 Parámetros de resistencia (ITS) para definición de llenante óptimo 100/0 A1

Llenante	ITS Seco (KPa)	ITS Húmedo (Kpa)	Resistencia Conservada (%)
CAL	330	126	38
CEMENTO	500	252	50
FILLER	324	28	9

Fuente: Elaboración propia.

Definición del contenido óptimo de asfalto

Llenante Optimo: CEMENTO 1.0%

Optimo Teórico: 2.5%±2

Tabla 20 Parámetros de resistencia (ITS) para definición de asfalto optimo 100/0 A1

Contenido de Asfalto (%)	ITS Seco (KPa)	ITS Húmedo (Kpa)	Resistencia Conservada (%)
2.3	292	9	1
2.5	500	252	50
2.7	290	144	49
2.9	356	221	62

Fuente: Elaboración propia.

NOTA: Las variaciones de los porcentajes teoricos de asfalto cambian debido a que al momento de realizar la extracción se determina el porcentaje real contenido en la mezcla y es el que aparece en el reporte

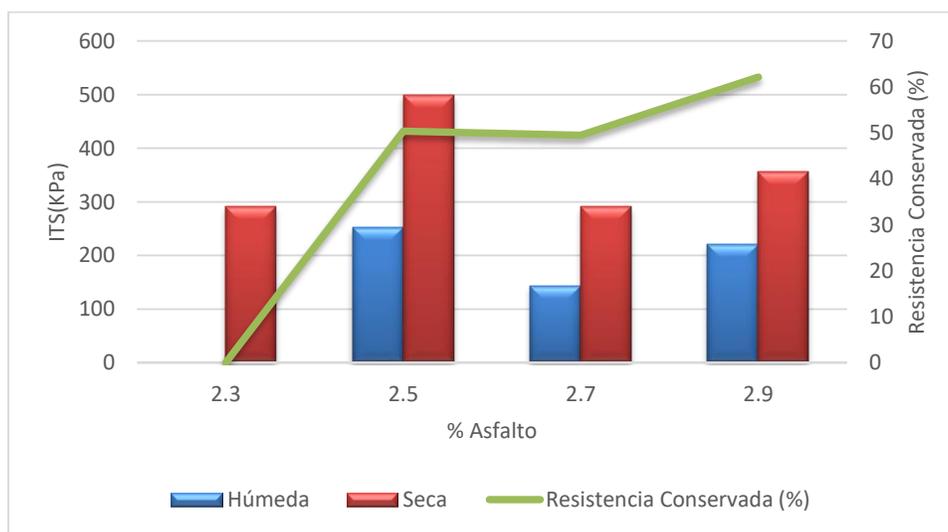


Figura 31 Resultados de ITS vs % de asfalto 100/0 A1, Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos se determino que el llenante optimo para este tipo de mezcla es el CEMENTO; por otro lado tambien se identifica que los resultados de resistencia conservada son mas altos para un contenido de asfalto de 2.9%, por lo que se escoje este como el contenido optimo para la fabricación de las probetas de módulo resiliente.

La mezcla 100/0 mostro valores de resistencia que varian entre 160KPa y 356 KPa; siendo las mezcla con asfalto A1 la que mostraron mayor resistencia y la de asfalto B1 la de menor, tanto en seco como en humedo; no obstante es importante mencionar que la resistencia conservada para las mezclas con asfalto B1 y A1 es similar (ver Tabla 21).

Tabla 21 Resumen de resultados mezclas 100/0 con tres tipos de asfalto

ASFALTO	B1	B2	A1
Llenante (1%)	CAL	CEMENTO	CEMENTO
% Asfalto óptimo	2,4	2,3	2,9
Resistencia Húmeda (KPa)	160	182	221
Resistencia Seca (KPa)	260	355	356
Resistencia Conservada (%)	61	51	62

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte la mezcla realizada con asfalto B2, tal y como se evidencia en la Figura 32 muestra valores de resistencia cercanos a los obtenidos en la mezcla con el asfalto A1; sin embargo el porcentaje de asfalto inyectado a la mezcla es menor del tipo B2 con respecto al inyectado del tipo A1.

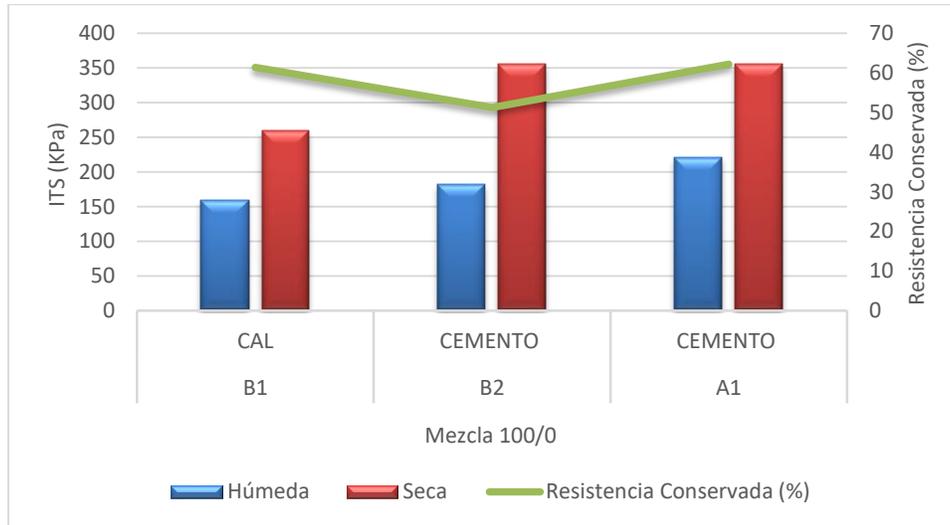


Figura 32 Resultados de parámetros de resistencia mezcla 100/0 con tres tipos de asfalto, Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos de resistencia y de acuerdo con lo establecido por la metodología del TG2; podemos concluir que las mezclas 100/0 con los tres tipos de asfalto clasifican como BMS1, para niveles de tránsito 1.

Los resultados de resistencia muestran que las mezclas en las cuales se usó cemento como llenante, presentaron resultados más altos, que la mezcla que se elaboró con cal. Por otro lado y como era de esperarse la mezcla realizada con mayor cantidad de asfalto mostró una mayor resistencia a la tracción indirecta en húmedo (ver Tabla 21).

5.2 MEZCLA 85/15

5.2.1 ASFALTO 60/70 BARRANCA B1

Definición de llenante

Optimo Teórico: 2.4%

% Real de asfalto Inyectada: 2.3%

Tabla 22 Parámetros de resistencia (ITS) para definición de llenante óptima

Llenante	ITS Seco (KPa)	ITS Húmedo (Kpa)	Resistencia
			Conservada (%)
CAL	211	178	84
CEMENTO	207	112	54
FILLER	523	62	12

Fuente: Elaboración propia.

Definición del contenido óptimo de asfalto

Llenante Optimo: CAL 1.0%

Optimo Teórico: 2.3%±2

Tabla 23 Parámetros de resistencia (ITS) para definición de asfalto optimo

Contenido de Asfalto (%)	ITS Seco (KPa)	ITS Húmedo (Kpa)	Resistencia
			Conservada (%)
2.5	260	138	31
2.3	211	178	84
2.7	245	133	55
3.0	245	71	30

Fuente: Elaboración propia.

NOTA: Las variaciones de los porcentajes teoricos de asfalto cambian debido a que al momento de realizar la extracción se determina el porcentaje real contenido en la mezcla y es el que aparece en el reporte

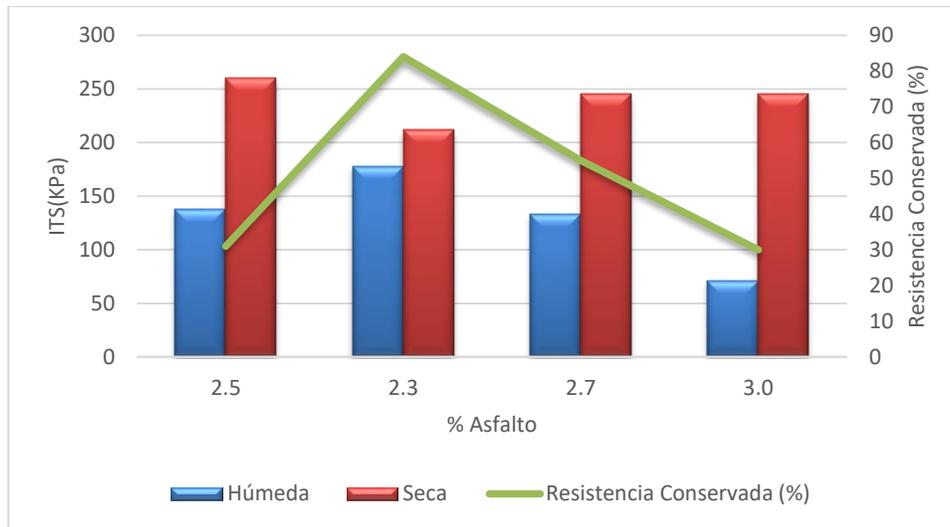


Figura 33 Resultados de ITS vs % de asfalto, Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos se determinó que el llenante óptimo para este tipo de mezcla es la CAL; por otro lado también se identifica que los resultados de resistencia conservada son más altos para un contenido de asfalto de 2.3%, por lo que se escoge este como el contenido óptimo para la fabricación de las probetas de módulo resiliente.

5.2.2 ASFALTO 60/70 BARRANCA B2

Definición de llenante

Óptimo Teórico: 2.4%

% Real de asfalto Inyectada: 2.4%

Tabla 24 Parámetros de resistencia (ITS) para definición de llenante óptimo 85/15 Asfalto B2

Llenante	ITS Seco (KPa)	ITS Húmedo (Kpa)	Resistencia Conservada (%)
CAL	287	149	52
CEMENTO	357	113	32
FILLER	268	0	0

Fuente: Elaboración propia.

Definición del contenido óptimo de asfalto

Llenante Optimo: CAL 1.0%

Optimo Teórico: 2.4%±2

Tabla 25 Parámetros de resistencia (ITS) para definición de asfalto optimo 85/15 Asfalto B2

Contenido de Asfalto (%)	ITS Seco (KPa)	ITS Húmedo (Kpa)	Resistencia Conservada (%)
2.2	393	164	42
2.4	287	149	52
2.5	319	177	56
2.8	436	183	42

Fuente: Elaboración propia.

NOTA: Las variaciones de los porcentajes teoricos de asfalto cambian debido a que al momento de realizar la extracción se determina el porcentaje real contenido en la mezcla y es el que aparece en el reporte

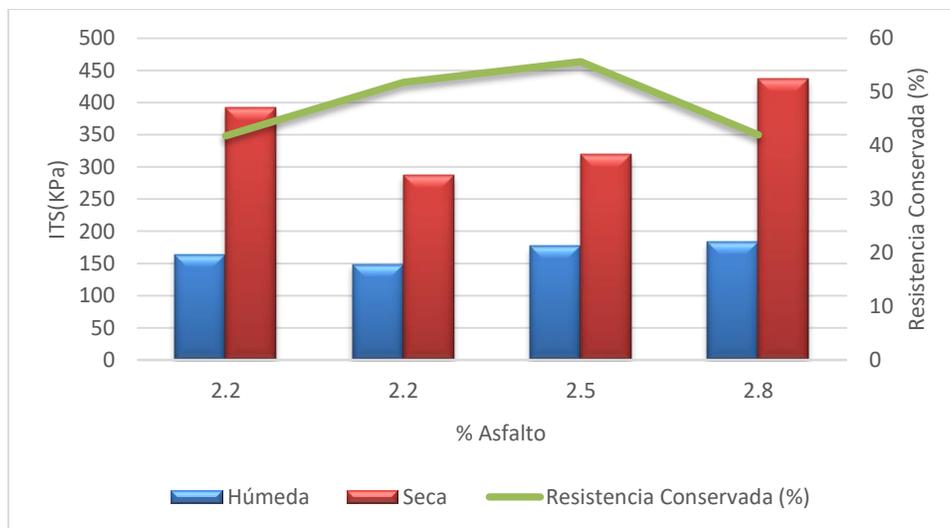


Figura 34 Resultados de ITS vs % de asfalto 85/15 Asfalto B2, Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos se determino que el llenante optimo para este tipo de mezcla es la CAL; por otro lado tambien se identifica que los resultados de resistencia conservada son mas altos para un contenido de asfalto de 2.5%, por lo que se escoje este como el contenido optimo para la fabricación de las probetas de módulo resiliente.

Es importante mencionar que tambien se pudo elegir el 2.5% como optimo de asfalto, ya que cumple con los parametros de ITS, y resistencia conservada planteados por la metodología TG2.

5.2.3 ASFALTO 60/70 APIAY A1

Definición de llenante

Optimo Teórico: 2.4%

% Real de asfalto Inyectada: 2.6%

**Tabla 26 Parámetros de resistencia (ITS) para definición de llenante óptimo mezcla 85/15
Asfalto A1**

Llenante	ITS Seco (KPa)	ITS Húmedo (Kpa)	Resistencia
			Conservada (%)
CAL	296	111	37
CEMENTO	477	203	42
FILLER	425	45	11

Fuente: Elaboración propia.

Definición del contenido óptimo de asfalto

Llenante Optimo: CEMENTO 1.0%

Optimo Teórico: 2.6%±2

**Tabla 27 Parámetros de resistencia (ITS) para definición de asfalto optimo mezcla 85/15
Asfalto A1**

Contenido de Asfalto (%)	ITS Seco (KPa)	ITS Húmedo (Kpa)	Resistencia
			Conservada (%)
2.4	368	196	54
2.6	477	203	42
2.8	352	219	62
3.0	312	177	57

Fuente: Elaboración propia.

NOTA: Las variaciones de los porcentajes teoricos de asfalto cambian debido a que al momento de realizar la extracción se determina el porcentaje real contenido en la mezcla y es el que aparece en el reporte

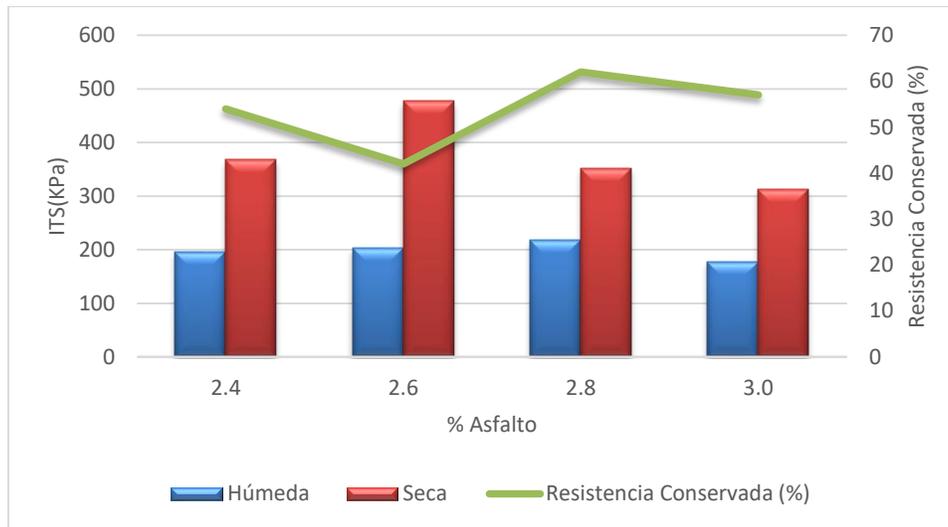


Figura 35 Resultados de ITS vs % de asfalto mezcla 85/15 Asfalto A1, Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos se determinó que el llenante óptimo para este tipo de mezcla es el CEMENTO; por otro lado también se identifica que los resultados de resistencia conservada son más altos para un contenido de asfalto de 2.8%, por lo que se escoge este como el contenido óptimo para la fabricación de las probetas de módulo resiliente.

La mezcla 85/15 mostró valores de resistencia que varían entre 177 KPa y 352 KPa; siendo la mezcla con asfalto A1 la que mostraron mayor resistencia y la de asfalto B1 la de menor, tanto en seco como en húmedo; no obstante es importante mencionar que la resistencia conservada para las mezclas con asfalto B1 es de 84%, mientras que para la realizada con asfalto A1 es de 62% (ver Tabla 28).

Tabla 28 Resumen de resultados mezclas 85/15 con tres tipos de asfalto

ASFALTO	B1	B2	A1
Llenante (1%)	CAL	CAL	CEMENTO
% Asfalto	2,3	2,5	2,8
ITS Resistencia Húmeda (KPa)	178	177	219
ITS Resistencia Seca (KPa)	211	319	352
Resistencia Conservada (%)	84	56	62

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte la mezcla realizada con asfalto B2, tal y como se evidencia en la Figura 32 muestra valores de resistencia cercanos a los obtenidos en la mezcla con el asfalto A1; sin

embargo el porcentaje de asfalto inyectado a la mezcla es menor del tipo B2 con respecto al inyectado del tipo A1.

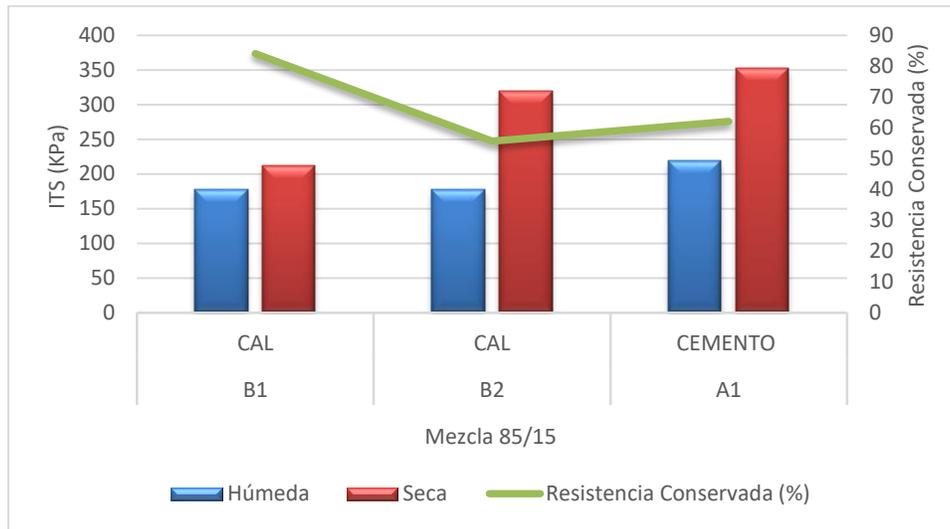


Figura 36 Resultados de parámetros de resistencia mezcla 85/15 con tres tipos de asfalto, Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos de resistencia y de acuerdo con lo establecido por la metodología del TG2; podemos concluir que las mezclas 85/15 con los tres tipos de asfalto clasifican como BMS1, para niveles de tránsito 1.

Los resultados de resistencia muestran que la mezcla en la cual se usó cemento como llenante, presentó mejores resultados, que las mezclas que se elaboraron con cal.

Los valores de ITS húmedo y seco de las mezclas 85/15 con respecto a las mezclas 100/0 no muestran variaciones representativas, por lo que se puede considerar que los resultados de resistencia a la tracción indirecta de las mezclas con espuma de asfalto no dependen del tipo de llenante utilizado en su fabricación.

Por otro lado así como en la mezcla 100/0 también se observa que los resultados más altos de resistencia a la tracción indirecta son los mostrados por la combinación con asfalto A1, esto teniendo en cuenta que esta es la que contiene mayor porcentaje de asfalto inyectado (2.8%).

5.3 MEZCLA 70/30

5.3.1 ASFALTO 60/70 BARRANCA B1

Definición de llenante

Optimo Teórico: 2.4%

% Real de asfalto Inyectada: 2.6%

Tabla 29 Parámetros de resistencia (ITS) para definición de llenante óptimo mezcla 70/30 B1

Llenante	ITS Seco (KPa)	ITS Húmedo (Kpa)	Resistencia
			Conservada (%)
CAL	272	169	62
CEMENTO	283	183	65
FILLER	325	27	8

Fuente: Elaboración propia.

Definición del contenido óptimo de asfalto

Llenante Optimo: CEMENTO 1.0%

Optimo Teórico: 2.6%±2

Tabla 30 Parámetros de resistencia (ITS) para definición de asfalto optimo mezcla 70/30 B1

Contenido de Asfalto (%)	ITS Seco (KPa)	ITS Húmedo (Kpa)	Resistencia
			Conservada (%)
2.2	265	124	47
2.4	283	183	65
2.6	321	191	60
3.0	330	158	48

Fuente: Elaboración propia.

NOTA: Las variaciones de los porcentajes teoricos de asfalto cambian debido a que al momento de realizar la extracción se determina el porcentaje real contenido en la mezcla y es el que aparece en el reporte

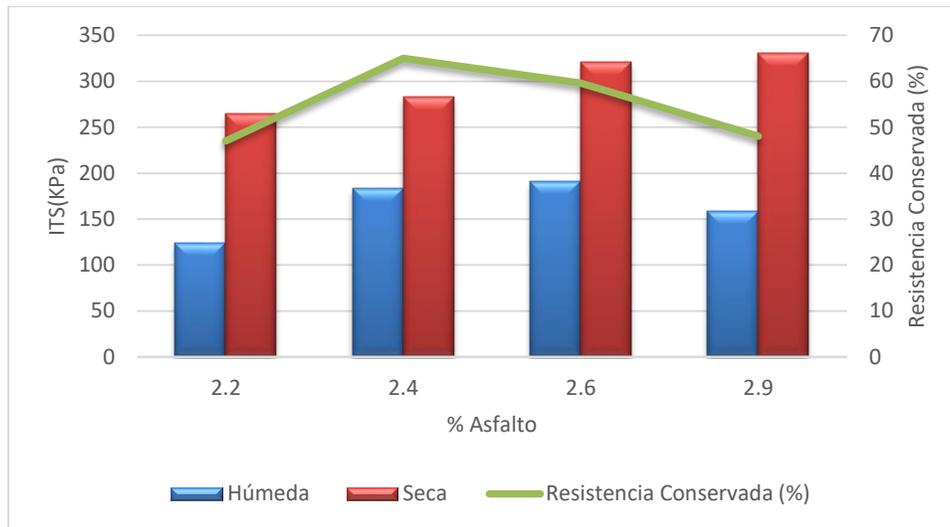


Figura 37 Resultados de ITS vs % de asfalto mezcla 70/30 B1, Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos se determinó que el llenante óptimo para este tipo de mezcla es la CEMENTO; por otro lado también se identifica que los resultados de resistencia conservada son más altos para un contenido de asfalto de 2.4%, por lo que se escoge este como el contenido óptimo para la fabricación de las probetas de módulo resiliente.

5.3.2 ASFALTO 60/70 BARRANCA B2

Definición de llenante

Óptimo Teórico: 2.4%

% Real de asfalto Inyectada: 2.4%

Tabla 31 Parámetros de resistencia (ITS) para definición de llenante óptimo mezcla 70/30 B2

Llenante	ITS Seco (KPa)	ITS Húmedo (Kpa)	Resistencia Conservada (%)
CAL	299	185	62
CEMENTO	309	208	67
FILLER	353	31	9

Fuente: Elaboración propia.

Definición del contenido óptimo de asfalto

Llenante Optimo: CEMENTO 1.0%

Optimo Teórico: 2.4%±2

Tabla 32 Parámetros de resistencia (ITS) para definición de asfalto optimo mezcla 70/30 B2

Contenido de Asfalto (%)	ITS Seco (KPa)	ITS Húmedo (Kpa)	Resistencia Conservada (%)
2.2	201	68	34
2.4	309	208	67
2.6	146	56	39
2.8	192	30	15

Fuente: Elaboración propia.

NOTA: Las variaciones de los porcentajes teoricos de asfalto cambian debido a que al momento de realizar la extracción se determina el porcentaje real contenido en la mezcla y es el que aparece en el reporte

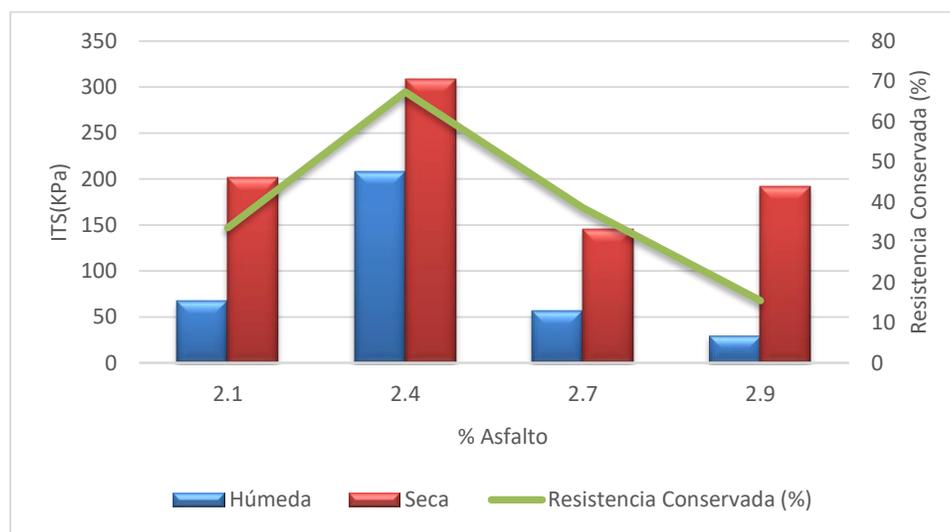


Figura 38 Resultados de ITS vs % de asfalto mezcla 70/30 Asfalto B2, Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos se determino que el llenante optimo para este tipo de mezcla es el CEMENTO; por otro lado tambien se identifica que los resultados de resistencia conservada son mas altos para un contenido de asfalto de 2.4%, por lo que se escoje este como el contenido optimo para la fabricación de las probetas de módulo resiliente.

5.3.3 ASFALTO 60/70 APIAY A1

Definición de llenante

Optimo Teórico: 2.4%

% Real de asfalto Inyectada: 2.6%

Tabla 33 Parámetros de resistencia (ITS) para definición de llenante óptimo mezcla 70/30 A1

Llenante	ITS Seco (KPa)	ITS Húmedo (Kpa)	Resistencia
			Conservada (%)
CAL	160	66	41
CEMENTO	164	60	36
FILLER	252	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Definición del contenido óptimo de asfalto

Llenante Optimo: CAL 1.0%

Optimo Teórico: 2.6%±2

Tabla 34 Parámetros de resistencia (ITS) para definición de asfalto optimo mezcla 70/30 A1

Contenido de Asfalto (%)	ITS Seco (KPa)	ITS Húmedo (Kpa)	Resistencia
			Conservada (%)
2.4	201	68	34
2.6	160	66	41
2.8	188	55	29
3.0	194	55	28

Fuente: Elaboración propia.

NOTA: Las variaciones de los porcentajes teoricos de asfalto cambian debido a que al momento de realizar la extracción se determina el porcentaje real contenido en la mezcla y es el que aparece en el reporte

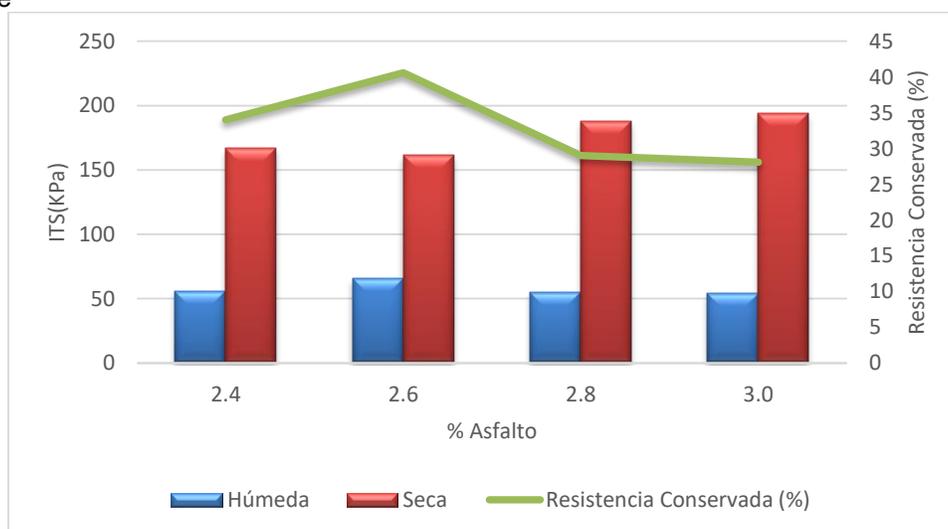


Figura 39 Resultados de ITS vs % de asfalto mezcla 70/30 A1, Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos se determino que el llenante optimo para este tipo de mezcla es la CAL; por otro lado tambien se identifica que los resultados de resistencia conservada son mas altos para un contenido de asfalto de 2.4%, por lo que se escoje este como el contenido optimo para la fabricación de las probetas de módulo resiliente.

Es importante mencionar que ninguna de las mezclas cumple con los valores de resistencia minimos propuestos por la metodologia TG2, para la selección de optimo de asfalto para BMS1, y clasifica en la tabla de la metodología sudafricana como BMS3; por lo que se realizo la mezcla para ensayo de módulo resiliente.

La mezcla 70/30 contrario a las anteriores mezclas, presento valores de resistencia que varian entre 65KPa y 309 KPa; siendo las mezcla con asfalto A1 la que mostraron menores resistencias a la tracción indirecta y la de asfalto B2 la de mayor tanto en seco como en humedo; no obstante es importante mencionar que la resistencia conservada para las mezclas con asfalto B2 es de 67%, mientras que para la realizada con asfalto A1 es de 41%, lo que es un indicador de no cumplimiento de este parametro; por lo que se debio descartar; no obstante se evaluo (ver Tabla 28).

Tabla 35 Resumen de resultados mezclas 70/30 con tres tipos de asfalto

ASFALTO	B1	B2	A1
Llenante	CEMENTO	CEMENTO	CAL
% Asfalto	2,4	2,4	2,6
Resistencia Húmeda (KPa)	183	208	65
Resistencia Seca (KPa)	283	309	161
Resistencia Conservada (%)	65	67	41

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte la mezcla realizada con asfalto B1, tal y como se evidencia en la Figura 32 muestra valores de resistencia cercanos a los obtenidos en la mezcla con el asfalto B2; sin embargo el porcentaje de asfalto inyectado a la mezcla de los tres tipos de asfalto es muy cercano.

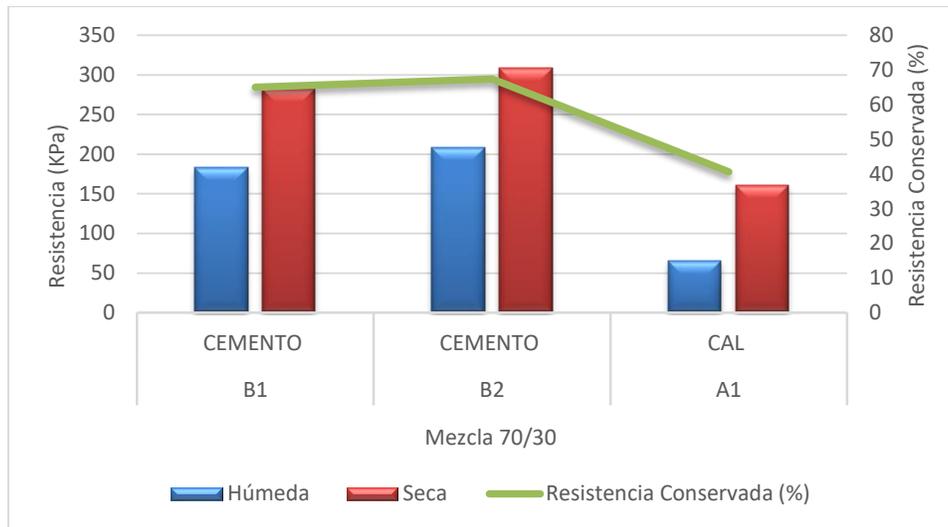


Figura 40 Resultados de parámetros de resistencia mezcla 70/30 con tres tipos de asfalto, Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos de resistencia y de acuerdo con lo establecido por la metodología del TG2; se determinó que las mezclas 70/30 con los tres tipos de asfalto clasifican como BMS1, para niveles de tránsito 1, las realizadas con asfaltos B1 y B2; por su parte las mezclas con asfalto A1 clasifican como BMS3.

Al igual que las mezclas anteriores, los resultados de resistencia muestran que la mezcla en la cual se usó cemento como llenante, presentó mejores resultados, que las mezclas que se elaboraron con cal.

Los valores de ITS húmedo y seco de las mezclas 70/30 con respecto a las mezclas 100/0 y 85/15 presentan variaciones representativas, por lo que se puede considerar que los resultados de resistencia a la tracción indirecta de las mezclas con espuma de asfalto pueden ser dependientes del contenido de RAP de la mezcla a medida que se va incrementando.

5.4 MEZCLA 50/50

5.4.1 ASFALTO 60/70 BARRANCA B1

Definición de llenante

Optimo Teórico: 2.4%

% Real de asfalto Inyectada: 2.4%

Tabla 36 Parametros de resistencia (ITS) para definición de llenante óptimo mezcla 50/50 B1

Llenante	ITS Seco (KPa)	ITS Húmedo (Kpa)	Resistencia
			Conservada (%)
CAL	252	158	63
CEMENTO	272	172	63
FILLER	303	25	8

Fuente: Elaboración propia.

Definición del contenido óptimo de asfalto

Llenante Optimo: CEMENTO 1.0%

Optimo Teórico: 2.4%±2

Tabla 37 Parametros de resistencia (ITS) para definición de asfalto optimo mezcla 50/50 B1

Contenido de Asfalto (%)	ITS Seco (KPa)	ITS Húmedo (Kpa)	Resistencia
			Conservada (%)
2.2	391	213	54
2.4	272	172	65
2.6	499	186	37
2.8	455	174	38

Fuente: Elaboración propia.

NOTA: Las variaciones de los porcentajes teoricos de asfalto cambian debido a que al momento de realizar la extracción se determina el porcentaje real contenido en la mezcla y es el que aparece en el reporte

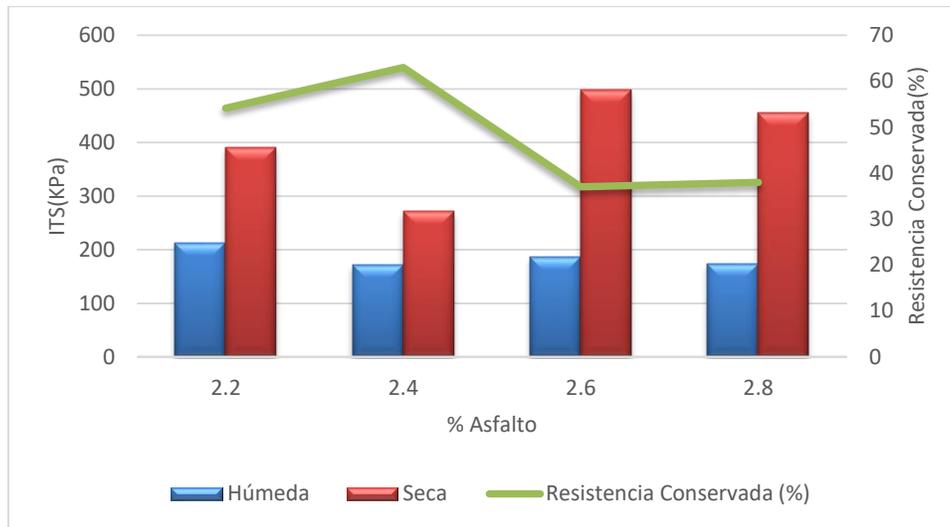


Figura 41 Resultados de ITS vs % de asfalto mezcla 50/50 B1, Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos se determinó que el llenante óptimo para este tipo de mezcla es el CEMENTO; por otro lado también se identifica que los resultados de resistencia conservada son más altos para un contenido de asfalto de 2.4%, por lo que se escoge este como el contenido óptimo para la fabricación de las probetas de módulo resiliente.

Es importante mencionar que el 2.2% de asfalto también cumple con los requisitos de la metodología para la selección del contenido óptimo de asfalto; no obstante el valor de la resistencia conservada, es más alto para el 2.4%, por lo que se seleccionó este.

5.4.2 ASFALTO 60/70 BARRANCA B2

Definición de llenante

Óptimo Teórico: 2.4%

% Real de asfalto Inyectada: 2.4%

Tabla 38 Parámetros de resistencia (ITS) para definición de llenante óptimo mezcla 50/50 B2

Llenante	ITS Seco (KPa)	ITS Húmedo (Kpa)	Resistencia Conservada (%)
CAL	346	115	33
CEMENTO	369	130	35
FILLER	341	20	6

Fuente: Elaboración propia.

Definición del contenido óptimo de asfalto

Llenante Optimo: CEMENTO 1.0%

Optimo Teórico: 2.4%±2

Tabla 39 Parámetros de resistencia (ITS) para definición de asfalto optimo mezcla 50/50 B2

Contenido de Asfalto (%)	ITS Seco (KPa)	ITS Húmedo (Kpa)	Resistencia Conservada (%)
2.2	169	83	50
2.4	369	130	35
2.6	201	74	37
2.8	190	71	37

Fuente: Elaboración propia.

NOTA: Las variaciones de los porcentajes teoricos de asfalto cambian debido a que al momento de realizar la extracción se determina el porcentaje real contenido en la mezcla y es el que aparece en el reporte

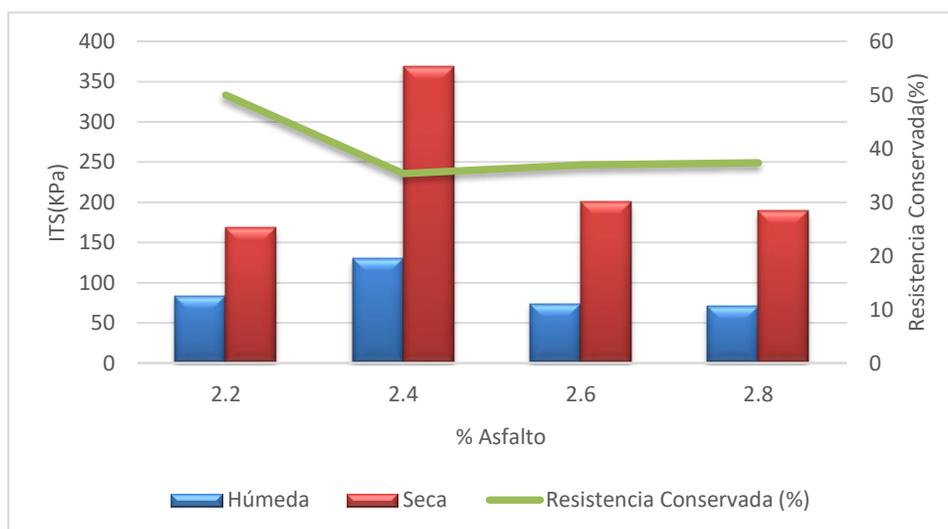


Figura 42 Resultados de ITS vs % de asfalto mezcla 50/50 Asfalto B2, Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos se determino que el llenante optimo para este tipo de mezcla es el CEMENTO; por otro lado tambien se identifica que los resultados de resistencia conservada son mas altos para un contenido de asfalto de 2.2%, por lo que se escoje este como el contenido optimo para la fabricación de las probetas de módulo resiliente.

5.4.3 ASFALTO 60/70 APIAY A1

Definición de llenante

Optimo Teórico: 2.4%

% Real de asfalto Inyectada: 2.6%

Tabla 40 Parámetros de resistencia (ITS) para definición de llenante óptimo mezcla 50/50 A1

Llenante	ITS Seco (KPa)	ITS Húmedo (Kpa)	Resistencia
			Conservada (%)
CAL	166	64	38
CEMENTO	211	67	35
FILLER	245	6	2

Fuente: Elaboración propia.

Definición del contenido óptimo de asfalto

Llenante Optimo: CAL 1.0%

Optimo Teórico: 2.6%±2

Tabla 41 Parámetros de resistencia (ITS) para definición de asfalto optimo mezcla 50/50 A1

Contenido de Asfalto	Resistencia		
(%)	ITS Seco (KPa)	ITS Húmedo (Kpa)	Conservada (%)
2.4	166	64	38
2.6	220	67	31
2.8	171	75	44
3.0	162	86	53

Fuente: Elaboración propia.

NOTA: Las variaciones de los porcentajes teoricos de asfalto cambian debido a que al momento de realizar la extracción se determina el porcentaje real contenido en la mezcla y es el que aparece en el reporte

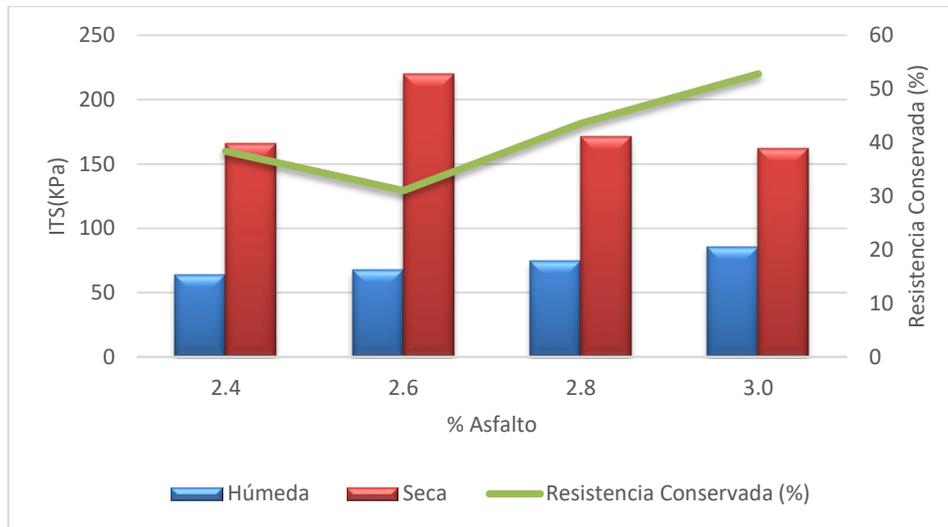


Figura 43 Resultados de ITS vs % de asfalto mezcla 50/50 A1, Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos se determinó que el llenante óptimo para este tipo de mezcla es la CAL; por otro lado también se identifica que los resultados de resistencia conservada son más altos para un contenido de asfalto de 3.0%, por lo que se escoge este como el contenido óptimo para la fabricación de las probetas de módulo resiliente.

La mezcla 50/50 al igual que la mezcla 70/30, presentó valores de resistencia que varían entre 86 KPa y 272 KPa; siendo la mezcla con asfalto A1 la que mostraron menores resistencias a la tracción indirecta y la de asfalto B1 la de mayor tanto en seco como en húmedo; no obstante es importante mencionar que la resistencia conservada para las mezclas con asfalto B2 es de 50%, mientras que para la realizada con asfalto A1 es de 53%, lo que es un indicador de no cumplimiento de este parámetro; por lo que se debió descartar; no obstante se evaluó (ver Tabla 28).

Tabla 42 Resumen de resultados mezclas 50/50 con tres tipos de asfalto

ASFALTO	B1	B2	A1
Llenante	<i>CEMENTO</i>	<i>CEMENTO</i>	<i>CAL</i>
% Asfalto	2,4	2,2	3
Resistencia Húmeda (KPa)	172	83	86
Resistencia Seca (KPa)	272	169	162
Resistencia Conservada (%)	65	50	53

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte la mezcla realizada con asfalto B2, tal y como se evidencia en la Figura 44 muestra valores de resistencia cercanos a los obtenidos en la mezcla con el asfalto B1; sin embargo el porcentaje del asfalto A1 es bastante alto con respecto a los otros dos tipos.

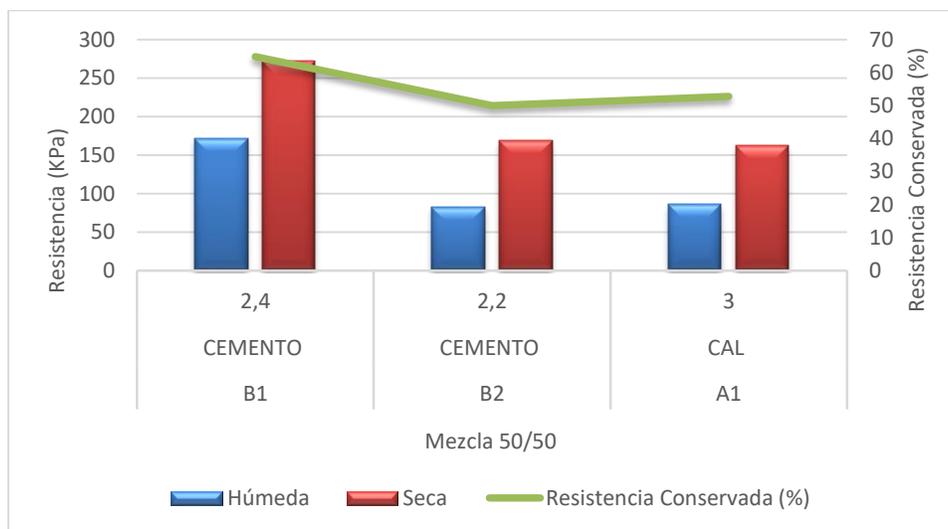


Figura 44 Resultados de parámetros de resistencia mezcla 50/50 con tres tipos de asfalto, Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos de resistencia y de acuerdo con lo establecido por la metodología del TG2; se determinó que las mezclas 70/30 con los tres tipos de asfalto clasifican como BMS1, para niveles de tránsito 1, las realizadas con asfaltos A1 y B2 de tipo BMS3; por su parte las mezclas con asfalto B1 clasifican como BMS1.

Al igual que las mezclas anteriores, los resultados de resistencia muestran que la mezcla en la cual se usó cemento como llenante, presentó mejores resultados, que las mezclas que se elaboraron con cal.

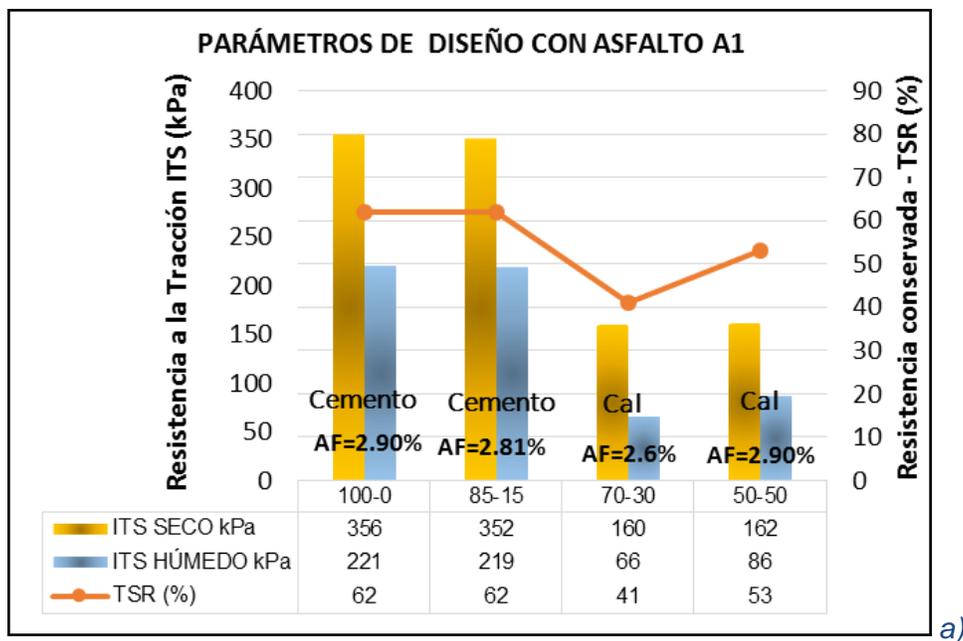
Los valores de ITS húmedo y seco de las mezclas 50/50 con respecto a las mezclas 100/0, 85/15 Y 70/30 presentan variaciones representativas, por lo que se puede considerar que los resultados de resistencia a la tracción indirecta de las mezclas con espuma de asfalto pueden ser dependientes del contenido de RAP de la mezcla a medida que se va incrementando.

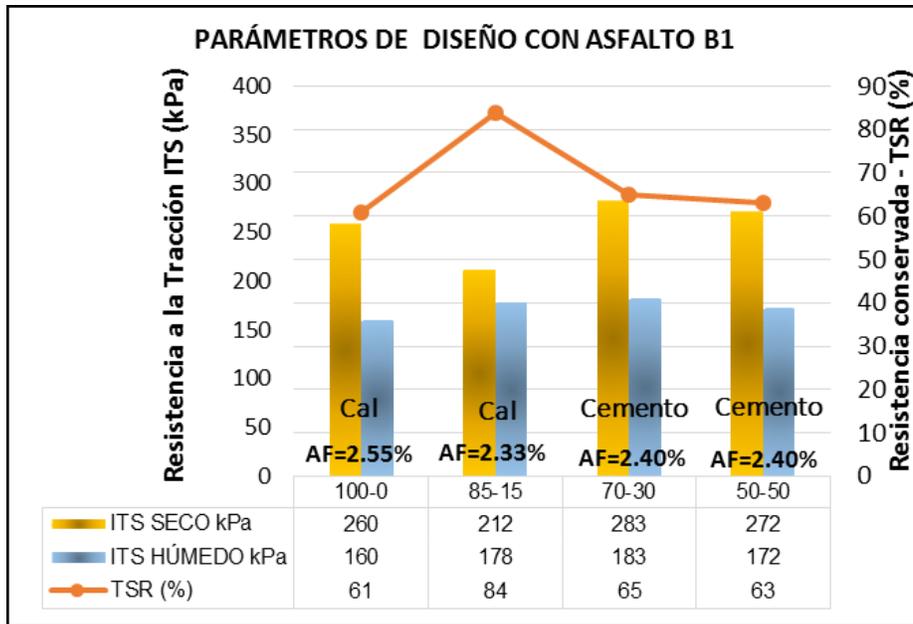
5.5 RESUMEN DE DISEÑOS DE FORMULAS DE TRABAJO

A continuación, se presentan los resultados de los parámetros de diseño de mezcla para las diferentes proporciones Granular –RAP.

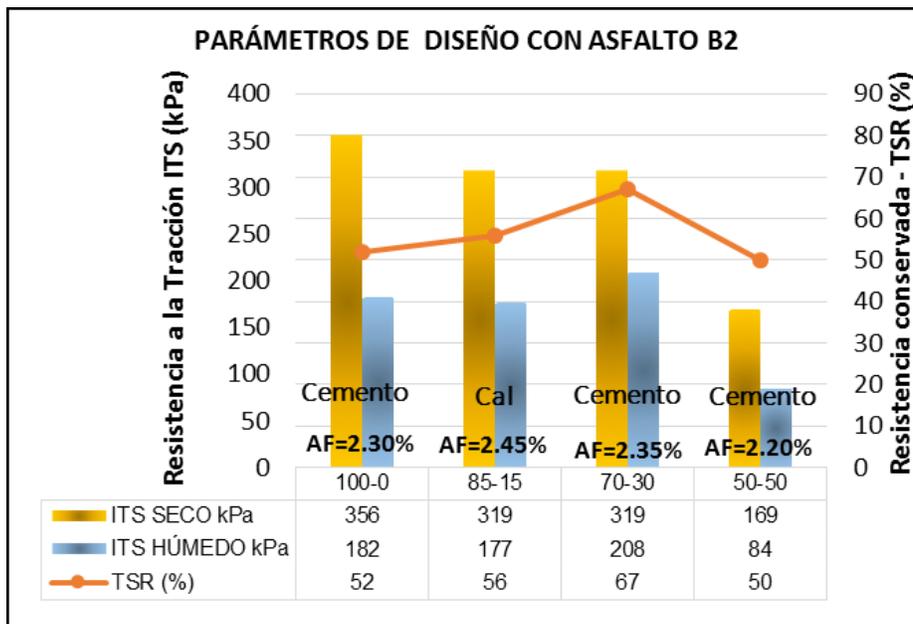
Tipo de Asfalto	100-0			85-15			70-30			50-50		
	LL (%)	CAE (%)	TSR (%)	LL (%)	CAE (%)	TSR (%)	LL (%)	CAE (%)	TSR (%)	LL (%)	CAE (%)	TSR (%)
A1	Ce	2.90	62	Ce	2.81	62	C	2.60	41	C	2.90	44
B1	C	2.55	61	C	2.30	84	Ce	2.40	65	Ce	2.40	63
B2	Ce	2.30	52	C	2.45	56	Ce	2.35	67	Ce	2.20	50

Tabla 43 Recopilación de datos para fórmulas de trabajo

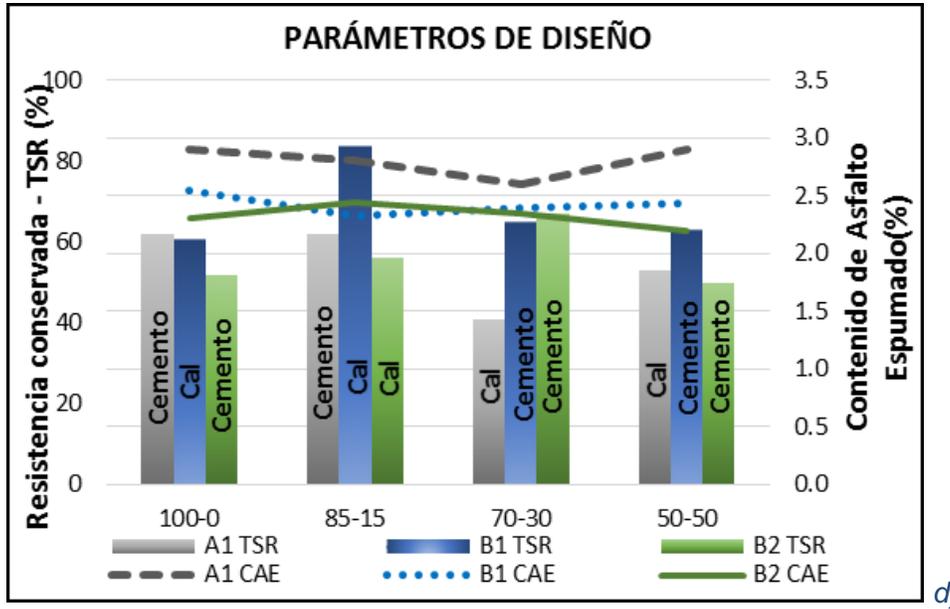




b)



c)



Figuran 45 Parámetros de diseño de mezcla para los diferentes tipos de asfalto.

La Figuran 45 resume los parámetros de diseño para todas las mezclas analizadas y permite observar que los mayores contenidos de asfalto espumado se presentaron para todas las mezclas con el tipo de asfalto A, siendo este el que mayor variación en contenido presentó en las mezclas.

Los valores para la resistencia en seco de las mezclas con asfalto A1 variaron entre 162 kPa y 356 kPa con contenidos de asfalto espumado de 2.6% a 2.9%, siendo los que mayor variación presentaron de todas las mezclas y tipos de asfalto. Esto se podría explicar por la variación la llenante utilizada y la cantidad de asfalto espumado inyectado. Sin embargo, la gráfica 4.5 b) de las mezclas con asfalto tipo B1 se observa que también se fabricaron con diferente llenante y el rango de ITS en seco obtenido fue de 212 kPa a 283 kPa con contenidos de asfalto de 2.33% a 2.55%, rangos inferiores a las mezclas con asfalto A1, por lo que se puede inferir que la variación está más influenciada por el contenido de asfalto utilizado que por el llenante usado. Se observa lo mismo para los demás parámetros y tipos de asfalto espumado.

La Figuran 45 permite observar que las mezclas con una misma llenante y contenido de asfalto presentan valores de resistencia en seco y húmedo, así como de TSR muy similares independientemente de la proporción de RAP en la mezcla

No se observa una relación directa entre los contenidos de asfalto espumado y los valores de resistencia conservada.

Se observa que en las mezclas con algún contenido de RAP el tipo de llenante utilizado está influenciado por el tipo de asfalto utilizado, siendo las mezclas con el asfalto tipo A1 las que presentaron las variaciones más claras. Esto podría explicarse al observar las diferencias entre los asfaltos vistos en el capítulo 3 así como posible influencia del asfalto envejecido del RAP.

Con excepción de la mezcla 70-30, todas en las que se usó el asfalto tipo B2, presentaron las resistencias conservadas más bajas.

Los valores de resistencia más elevadas se presentaron en las mezclas con asfalto espumado B1.

Los valores de resistencia en seco más elevados, se obtuvieron en las mezclas con asfalto B2, las cuales a su vez presentaron una disminución con el aumento del contenido de RAP.

En general, los valores de resistencia en seco más elevados se presentaron en las mezclas con cemento a excepción de la mezcla 50-50 con asfalto espumado B2 en donde se tiene un contenido de AF bajo en comparación a los demás tipos de asfalto.

Se observa que los valores de resistencia en seco y TSR están influenciados por el contenido de asfalto y el tipo de llenante.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la prueba triaxial dinámica el módulo elasticidad se mide en diferentes niveles de presiones de confinamiento y verticales, para determinar el módulo resiliente en función de la condición de esfuerzos a los que está sometido en el terreno.

Como se indicó en el capítulo 4 el ensayo se realizó para cada una de las mezclas propuestas; 100/0, 85/15, 70/30, 50/50 con los asfaltos B1, B2, y A1, con el porcentaje de asfalto óptimo y el llenante obtenido en la fase de diseño; se ejecutó el ensayo bajo la norma de ensayo INV-E 156/2013 en probetas de 100mm x 200mm, compactadas al 90% de la densidad máxima del proctor por método vibratorio.

Las probetas se ensayaron aplicando presiones relativamente bajas creando bajas tensiones para que no se exceda el rango elástico de los materiales. Se supone que, dentro de este rango elástico, el historial de esfuerzos no afecta la respuesta del material. Las pruebas triaxiales dinámicas se usan para determinar tanto el módulo resiliente como el comportamiento de deformación permanente de los materiales.

Con los resultados de módulo resiliente se evaluó el comportamiento de la rigidez y la dependencia de la misma en función del estado de esfuerzos al que esté sometido, para esto se evaluaron tres modelos principales, el modelo K- θ , el modelo Uzan y el modelo T octaédrico, modelos aplicados en la evaluación del comportamiento de mezclas no ligadas, pero que han sido utilizados en la evaluación de las mezclas semi-ligadas con muy buenos resultados de correlación y valores de R^2 .

A continuación se muestran los resultados obtenidos para cada una de las mezclas evaluadas:

6.1 MEZCLA 100/0

6.1.1 Módulo Resiliente Asfalto B1.

Llenante Optimo: CAL 1.0%

Contenido de Asfalto Espumado: 2.4%

Tabla 44 Módulo resiliente para las diferentes σ_3 en la mezcla 100/0 Asfalto B1.

Presión de confinamiento (KPA)	ΣD (ESFUERZO DESVIADOR)	 MR (MPa)	 Mr (MPa)
20	21	297	177
21	41	369	209
21	62	462	264
34	34	319	210
34	68	480	289
34	104	555	353
69	68	437	282
69	138	586	395
69	207	629	476
103	68	334	294
103	104	428	351
103	207	634	508
138	104	405	340
138	138	492	422
138	255	509	346

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de módulo resiliente varían entre 177 MPa y 634 MPa con las diferentes presiones de confinamiento, lo cuales son valores que se encuentran en el rango de los obtenidos en los diferentes estudios para este tipo de mezclas.

6.1.2 Módulo Resiliente Asfalto B2.

Llenante Optimo: CEMENTO 1.0%

Llenante óptimo: 2.3%

Tabla 45 Módulo resiliente para las diferentes σ_d en la mezcla 100/0 asfalto B2.

Presión de confinamiento (KPa)	σ_d (esfuerzo desviador)	 Mr (MPa)	 Mr (MPa)
20	23	211	211
21	47	244	198
21	71	283	222
34	39	230	197
34	79	284	235
34	116	316	291
69	79	293	233
69	155	352	304
69	232	416	323
103	78	252	207
103	116	298	242
103	232	421	334
138	116	275	250
138	155	346	291
138	310	378	365

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de Mr varían entre 197 MPa y 421 MPa con las diferentes presiones de confinamiento, lo cuales son valores que se encuentran en el rango de resultados mostrados en la literatura para este tipo de materiales.

6.1.3 Módulo Resiliente Asfalto A1

Llenante Optimo: CEMENTO 1.0%

Llenante óptimo: 2.9%

Tabla 46 Módulo resiliente para las diferentes σ_d en la mezcla 100/0 asfalto A1.

Presión de confinamiento (KPa)	σ_d (esfuerzo desviador)	 Mr (MPa)	 Mr (MPa)
20	20	108	145
21	41	145	205
21	62	183	267
34	34	128	179
34	68	195	288
34	103	258	370
69	68	178	266
69	138	291	413
69	207	358	484
103	68	158	225
103	103	210	310
103	207	351	527
138	104	196	313
138	138	245	413
138	255	260	377

Fuente: Elaboración propia.

Los valores de módulo para esta mezcla están en un rango de 108 KPa y 358 KPa con las diferentes presiones de confinamiento, lo cuales son valores que se encuentran en el rango de los obtenidos en los diferentes estudios para este tipo de mezclas.

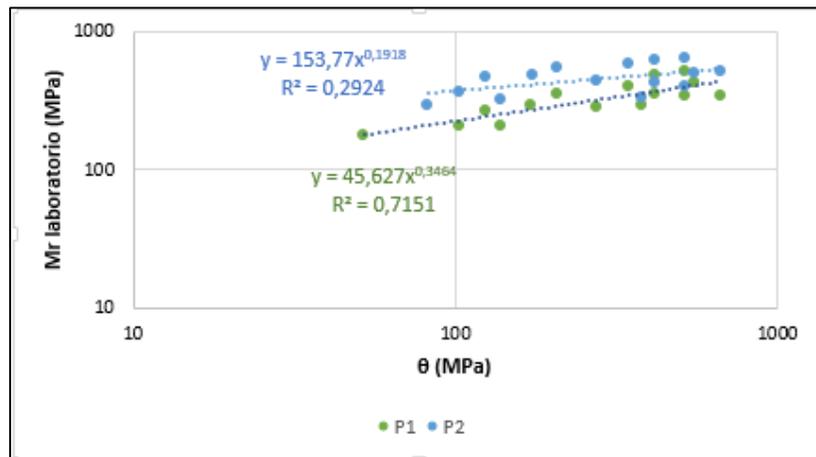
Los resultados de Mr en las mezclas 100/0 mostraron que los módulos obtenidos con el asfalto B1 son los más altos seguidos de los obtenidos por el A1, lo que nos permite interpretar que la procedencia 1 es la que mejor comportamiento muestra en cuanto a lo que rigidez se refiere para un material 100% granular, mientras que el asfalto B2 muestra resultados más bajos.

6.1.4 Ecuaciones Constitutivas

Por medio del análisis estadístico del ensayo de módulo resiliente y la aplicación de la metodología de las diferencias cuadráticas se obtuvieron los valores de K1, K2 y K3 para cada uno de los modelos propuestos en el capítulo 4.

El primer modelo analizado es el K- θ , el cual relaciona la dependencia del módulo resiliente con el invariante de esfuerzos, por lo que a partir la gráfica y la correlación del mismo se pueden obtener los valores de K1 y K2 para la ecuación.

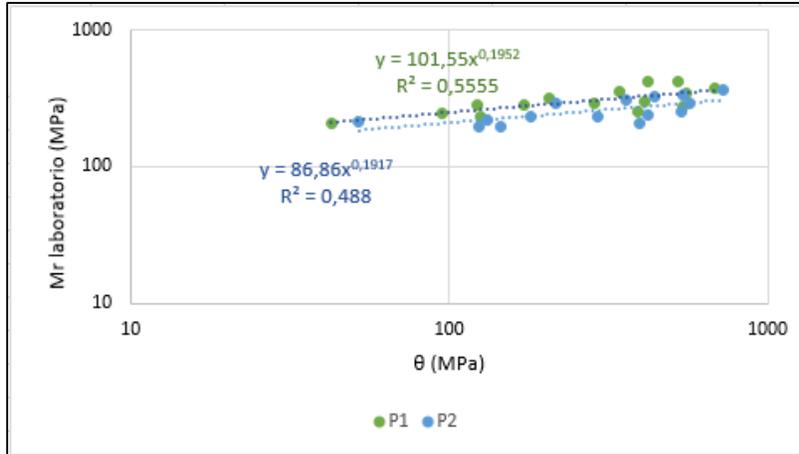
Figura 46 Resultados de MR vs θ para la mezcla 100/0+2.4 ASF B1+ CAL.



Fuente: Elaboración propia.

Para la mezcla 100/0 con 2.4% de asfalto B1 se obtuvieron resultados de K1 de 51.43 y 153.77 y de k2 de 0.32 y 0.19 para la P1 (Probeta 1) y P2 (Probeta 2) respectivamente, con valores de R2= 0.71 y 0.29 lo que indica que la rigidez de esta mezcla no es muy dispareja en las dos probetas evaluadas; esto ya que la probeta 2 tiene módulos más altos pero correlación entre módulo e invariante de esfuerzos más baja y la probeta 1 con módulos de menor magnitud pero con una dependencia mayor del invariante de esfuerzos θ .

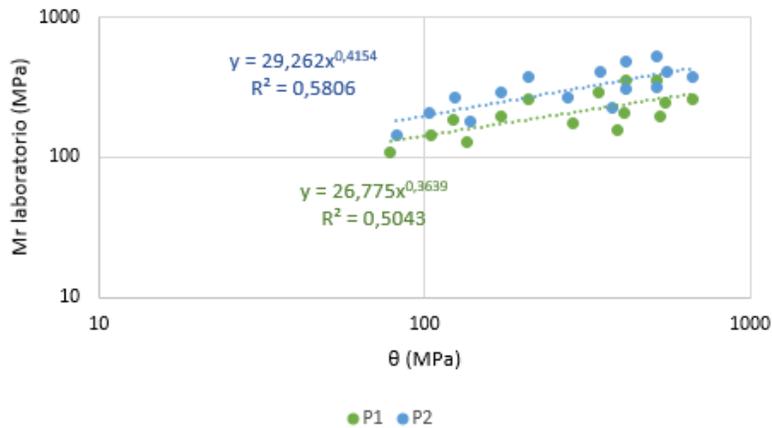
Figura 47 Resultados de MR vs θ para la mezcla 100/0+ 2.3 ASF B2+CEM.



Fuente: Elaboración propia.

Para la mezcla 100/0 con 2.3% de asfalto B2 se obtuvieron resultados de K1 de 101.55 y 86.86 y de K2 de 0.195 y 0.191, con valores de R2= 0.55 y 0.48 para P1 y P2 respectivamente lo que indica que la rigidez de esta mezcla no es completamente dependiente del invariante de esfuerzos y que los valores de los módulos son muy cercanos para las dos muestras por lo que los valores de k1 y k2 son muy cercanos.

Figura 48 Resultados de MR vs θ para la mezcla 100/0 + 2.3 ASF A1 + CEM.



Fuente: Elaboración propia.

La mezcla de material granular con un 2.9% de espuma de asfalto tipo A1 muestra una correlación entre el módulo resiliente y el invariante de esfuerzos con valores de R² de 0.41 y 0.36, un valor de K1 de 26.77 y 29.26 y de K2 0.36 y 0.41 evidenciando de esta manera una dependencia baja entre las dos variables, los resultados muestran que el

comportamiento de las probetas es muy similar por lo que sus tendencias son paralelas y con resultados de módulos similares.

Con los resultados obtenidos de K2 del modelo K- θ para las mezclas 100/0 se identifica que las combinaciones con los asfaltos B1 y A1 que son de la misma procedencia, tienen mayor dependencia del invariante de esfuerzos; mientras que el asfalto B2 da un resultado más bajo, lo que representa una menor dependencia del mismo.

Para la obtención de los valores de R², de los modelos Uzan y τ Octaédrico se realizó la comparación de los resultados de Mr obtenidos en laboratorio vs. Los obtenidos con la aplicación de la ecuación. En la Tabla 47, se presenta el resumen de los valores de K1, K2, K3 y R² para los tres tipos de asfalto y para las tres ecuaciones.

Tabla 47 valores de K para las tres ecuaciones constitutivas mezcla 100/0.

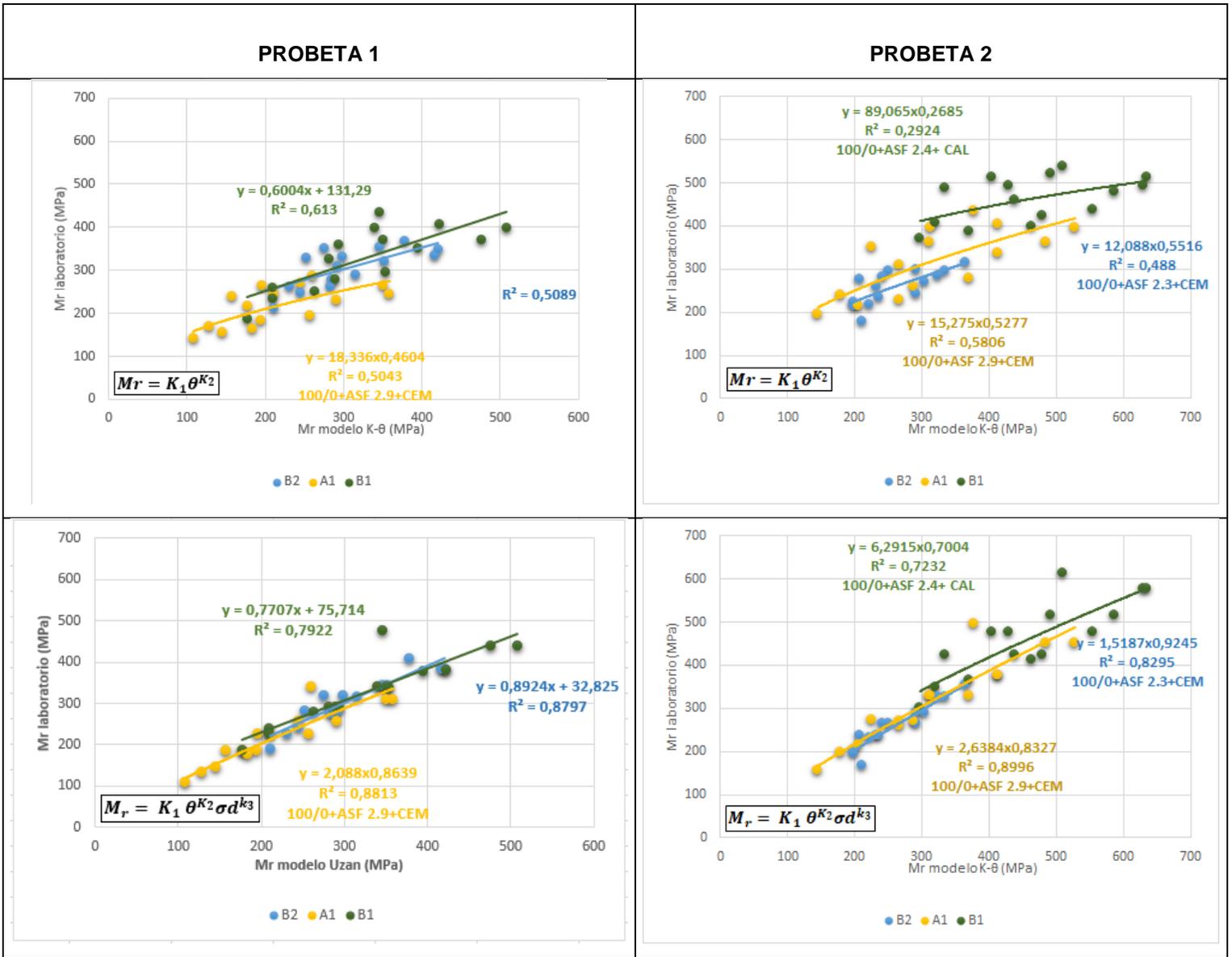
Ecuación	Probeta	B1				B2				A1			
		K1	K2	K3	R ²	K1	K2	K3	R ²	K1	K2	K3	R ²
$M_r = K_1 \theta^{K_2}$	P1	171,24	0,18	-	0,29	99,63	0,2	-	0,55	26,77	0,36	-	0,50
	P2	51,43	0,32	-	0,71	86,86	0,19	-	0,48	29,26	0,41	-	0,58
$M_r = K_1 \theta^{K_2} \sigma d^{K_3}$	P1	130,17	0,00	0,28	0,72	89,47	0,00	0,27	0,72	26,66	0,00	0,46	0,88
	P2	59,13	0,01	0,37	0,87	67,36	0,00	0,29	0,83	39,32	0,00	0,45	0,89
$M_r = K_1 P_0 \left(\frac{\theta}{P_0}\right)^{K_2} \left(\frac{\sigma_{Oct}}{P_0} + 1\right)^{K_3}$	P1	3,18	0,00	0,61	0,66	2,08	0,00	0,62	0,67	1,19	0,00	0,95	0,83
	P2	2,04	0,12	0,56	0,82	1,71	0,00	0,61	0,90	1,75	0,00	0,95	0,82

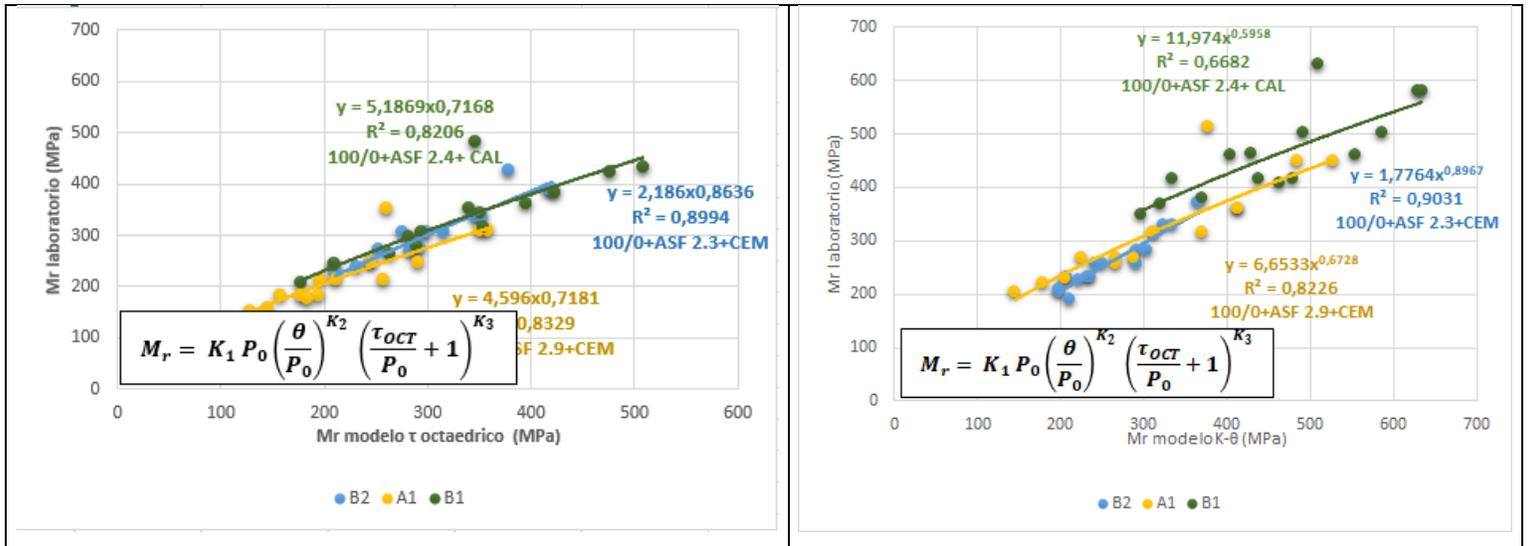
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 49 se grafican los tres modelos y los resultados de Mr de laboratorio vs. Mr modelado.

Los valores de módulo más altos para la mezcla 100/0 son los obtenidos con el asfalto B1 para las diferentes presiones de confinamiento; seguidos por los obtenidos con el asfalto de B2; mientras que los resultados más bajos son los presentados por el asfalto A1.

Figura 49 Correlaciones entre el MR de laboratorio y el obtenido mediante las ecuaciones para la mezcla 100/0 con los tres tipos de asfalto.





Fuente: Elaboración propia.

La fórmula de trabajo utilizada con el asfalto tipo A1 fue la que arrojo resultados de contenido óptimo de bitumen más alto (2.9%); y valores de módulo resiliente más bajo, lo que se le puede atribuir a que es el asfalto más viscoso y que su habilidad para producir espuma es bastante amplia, lo que genera que soporte mayores deformaciones, por lo que la rigidez se reduce y en consecuencia los valores de módulo resiliente también.

En la Figura 49 se observa que el modelo que mejor ajusta los datos de los ensayos es el uzan, con valores de R^2 que oscilan entre 0.72 y 0.89 lo que muestra que los materiales semiligados al igual que los materiales no ligados son dependientes del esfuerzo desviador.

El modelo k-θ no representa de forma significativa el comportamiento de las mezcla 100/0 por lo que los valores de R^2 para este modelo son de 0.71 y 0.29 para la mezcla con asfalto B1 mostrando una dispersión alta entre los resultados obtenidos, de 0.55 y 0.48 para las mezclas con asfalto B2 y de 0.50 y 0.58 para las mezclas con asfalto de la refinería de A1.

Teniendo en cuenta los resultados de las correlaciones de los diferentes modelos se determina que las mezclas no son dependientes directamente el estado de esfuerzos; pero si del esfuerzo desviador, esto porque el modelo K-θ muestra valores de R^2 bajos, mientras que los modelos que incluyen el desviador muestran resultados de R^2 altos.

Como se observa en la Tabla 47 los resultados de K2 para los modelos Uzan y τ octaédrico son de cero (0), lo que indica que el término que incluye el invariante de esfuerzos se convierte en una constante con valor de uno (1) descartando la influencia del invariante de esfuerzo en la ecuación.

Con los resultados de k_3 para los modelos Uzan y τ octaédrico podemos determinar que la las mezclas realizadas con asfaltos de procedencia 1 muestran resultados de 0.28 para el asfalto B1 y de 0.27 para el B2; mientras que el asfalto B2 es de 0.46, lo que representa una mayor dependencia del esfuerzo desviador, lo que es ratificado con el análisis del modelo octaédrico

Comparando los resultados de K_2 en cada una de las mezclas podemos concluir que los valores de k_2 mas altos son los obtenidos con el asfalto A1, lo que nos lleva a inferir que es la mezcla que mayor influencia tiene del esfuerzo desviador y esto es corroborado con los resultados de R_2 , ya que son los más altos.

6.2 MEZCLA 85/15

6.2.1 Módulo Resiliente Asfalto B1.

Llenante Optimo: CAL 1.0%

Llenante óptimo: 2.3%

Tabla 48 Módulo resiliente para las diferentes σ_d en la mezclas 85/15 asfalto B1.

Presión de confinamiento (KPa)	σ_d (esfuerzo desviador)	 Mr (MPa)	 Mr (MPa)
20	21	212	306
21	41	274	391
21	62	315	489
34	34	229	335
34	68	323	505
34	104	374	589
69	68	286	454
69	138	407	618
69	207	458	671
103	68	239	350
103	104	299	450
103	207	468	672
138	104	283	427
138	138	353	520
138	255	367	501

Los valores de módulo para esta mezcla están en un rango de 212 KPa y 672 KPa con las diferentes presiones de confinamiento, los cuales son valores que se encuentran en el rango de los obtenidos en los diferentes estudios para este tipo de mezclas.

6.2.2 Módulo Resiliente Asfalto B2.

Llenante Optimo: CAL 1.0%

Llenante óptimo: 2.5%

Tabla 49 Módulo resiliente para los diferentes σ_d en la mezcla 85/15 asfalto B2.

Presión de confinamiento (KPa)	σ_d (esfuerzo desviador)	 Mr (MPa)
20	23	123
21	47	150
21	71	192
34	39	165
34	79	214
34	116	274
69	79	278
69	155	307
69	232	295
103	78	221
103	116	243
103	232	309
138	116	247
138	155	288
138	310	217

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de módulo resiliente varían entre 123 KPa y 377 KPa con las diferentes presiones de confinamiento, lo cuales son valores bajos comparados con los obtenidos en los diferentes estudios para este tipo de mezclas.

6.2.3 Módulo Resiliente Asfalto A1.

Llenante Optimo: CEMENTO 1.0%

Llenante óptimo: 2.8%

Tabla 50 Módulo resiliente para los diferentes σ_d en la mezcla 85/15 asfalto A1.

Presión de confinamiento (KPa)	σ_d (esfuerzo desviador)	 Mr (MPa)	 Mr (MPa)
20	20	249	279
21	41	349	395
21	62	434	485

Presión de confinamiento (KPa)	σ (esfuerzo desviador)	 Mr (MPa)	 Mr (MPa)
34	34	305	340
34	68	453	498
34	103	523	586
69	68	394	457
69	138	562	633
69	207	641	718
103	68	311	347
103	103	419	478
103	207	641	737
138	104	381	440
138	138	480	563
138	255	474	499

Fuente: Elaboración propia.

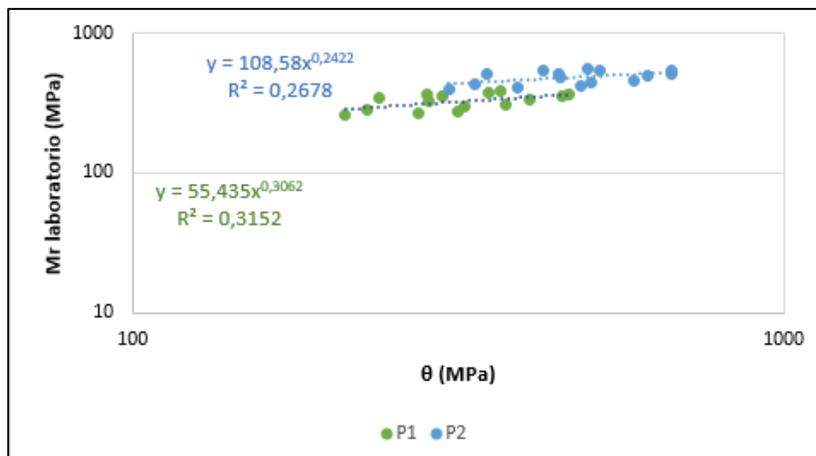
Los resultados de Mr varían entre 249 KPa y 737 KPa con las diferentes presiones de confinamiento, lo cuales son valores que se encuentran en el rango de los obtenidos en los diferentes estudios para este tipo de mezclas.

6.2.4 Ecuaciones Constitutivas

Por medio del análisis estadístico del ensayo de módulo resiliente y la aplicación de la metodología de las diferencias cuadráticas se obtuvieron los valores de K1, K2 y K3 para cada uno de los modelos propuestos en el capítulo 4.

El primer modelo analizado es el K- θ , el cual relaciona la dependencia del módulo resiliente con el invariante de esfuerzos, por lo que a partir la gráfica y la correlación del mismo se pueden obtener los valores de K1 y K2 para la ecuación.

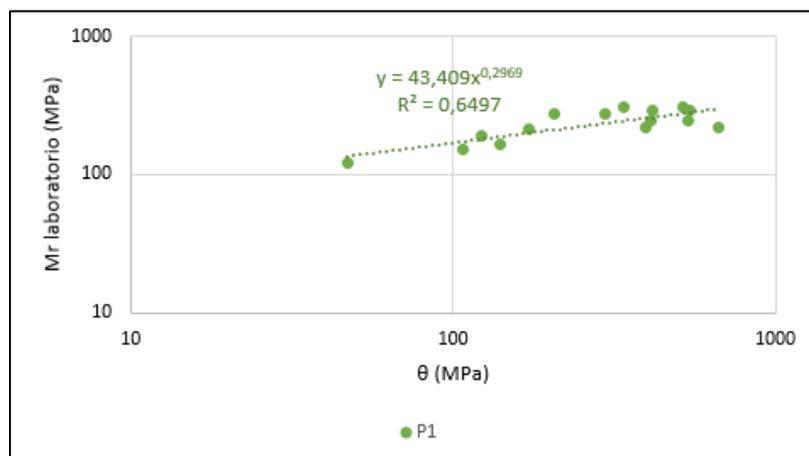
Figura 50 Resultados de MR vs θ para la mezcla 85/15 + 2.3 ASF B1 + CAL.



Fuente: Elaboración propia.

Para la mezcla 85/15 con 2.3% de asfalto B1 se obtuvieron resultados de K1 de 104.15 y 165.98 y de k2 de 0.19 para la P1 (Probeta 1) y P2 (Probeta 2) respectivamente, con valores de R2= 0.31 y 0.27 lo que indica que la rigidez de esta mezcla es muy similar en las dos probetas evaluadas; por otro lado también se observa que los valores de módulo resiliente son muy cercanos y que la correlación entre módulo e invariante de esfuerzos es baja y similar en las dos muestras ensayadas.

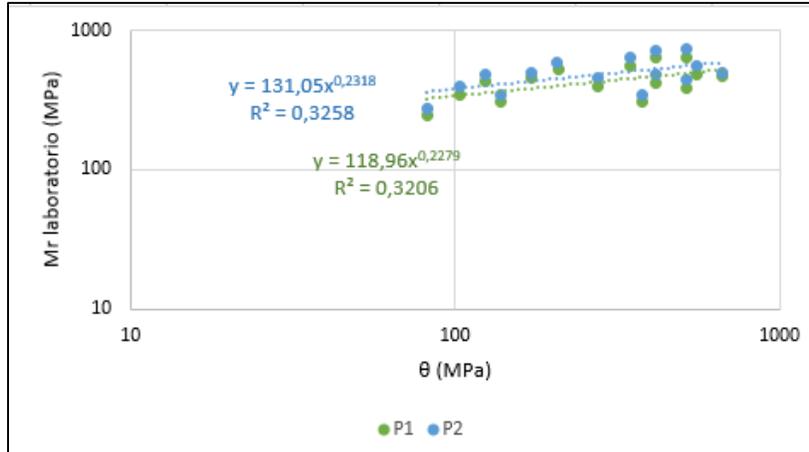
Figura 51 Resultados de MR vs θ para la mezcla 85/15 + 2.5 ASF B2 + CAL.



Fuente: Elaboración propia.

Para la mezcla 85/15 con 2.5% de asfalto B2 se obtuvieron resultados de K1 de 43.41 y de K2 de 0.29, y una correlacion de R2=0.65 para la unica muestra ensayada, lo que indica que la rigidez de esta mezcla no es totalmente dependiente del invariante de esfuerzos, no obstante su relación permite que el valor del R2 supere el 50%.

Figura 52 Resultados de MR vs θ para la mezcla 85/15 + 2.8 ASF A1 + CEM.



Fuente: Elaboración propia.

La mezcla 85/15 con un 2.9% de espuma de asfalto tipo A1 muestra una correlación entre el módulo resiliente y el invariante de esfuerzos con valores de R^2 de 0.32 y 0.33, un valor de K1 de 118.96 y 131.05 y de K2 0.23 evidenciando de esta manera una dependencia baja entre las dos variables, los resultados muestran que el comportamiento de las probetas es muy similar por lo que sus tendencias son paralelas y con resultados de módulos similares.

Con los resultados obtenidos de K2 del modelo K- θ para las mezclas cuando se adiciona un 15% de RAP con los asfaltos B1, B2 y A1 muestran valores muy similares; por lo que para evaluar la dependencia de las mismas con el invariante de esfuerzos se tuvo en cuenta los valores de R^2 , en los cuales se muestra que la que mayor correlación es la obtenida con el asfalto B2.

Para la obtención de los valores de R^2 , de los modelos Uzan y τ Octaedrico se realizó la comparación de los resultados de Mr obtenidos en laboratorio v_s . Los obtenidos con la aplicación de la ecuación. En la Tabla 51, se presenta el resumen de los valores de K1, K2, K3 y R^2 para los tres tipos de asfalto y para las tres ecuaciones.

Tabla 51 valores de K para las tres ecuaciones constitutivas mezcla 85/15

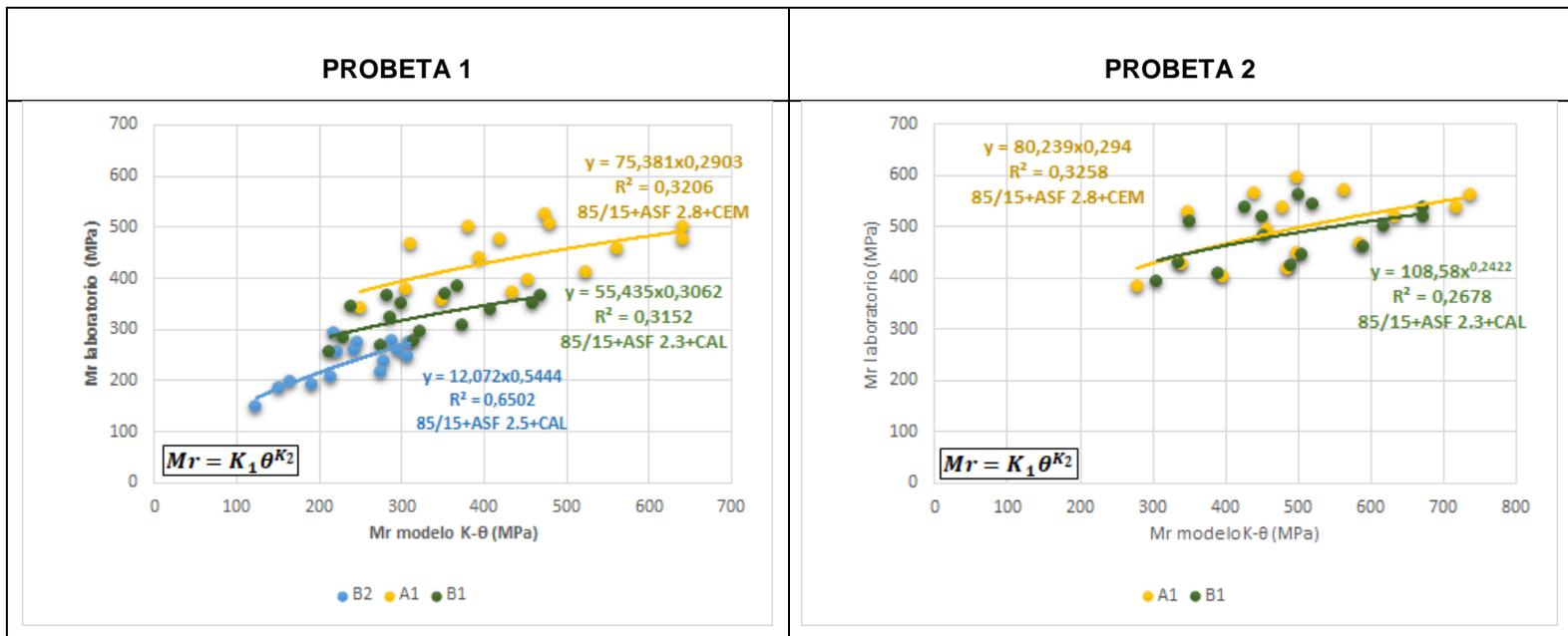
Ecuación	Probeta	B1				B2				A1			
		K1	K2	K3	R^2	K1	K2	K3	R^2	K1	K2	K3	R^2
$M_r = K_1 \theta^{K_2}$	P1	104,15	0,19		0,31	43,41	0,29		0,65	118,96	0,23		0,32
	P2	165,98	0,19		0,27					131,05	0,23		0,33
	P1	83,45	0,00	0,29	0,75	60,39	0,09	0,18	0,71	103,96	0,00	0,32	0,74

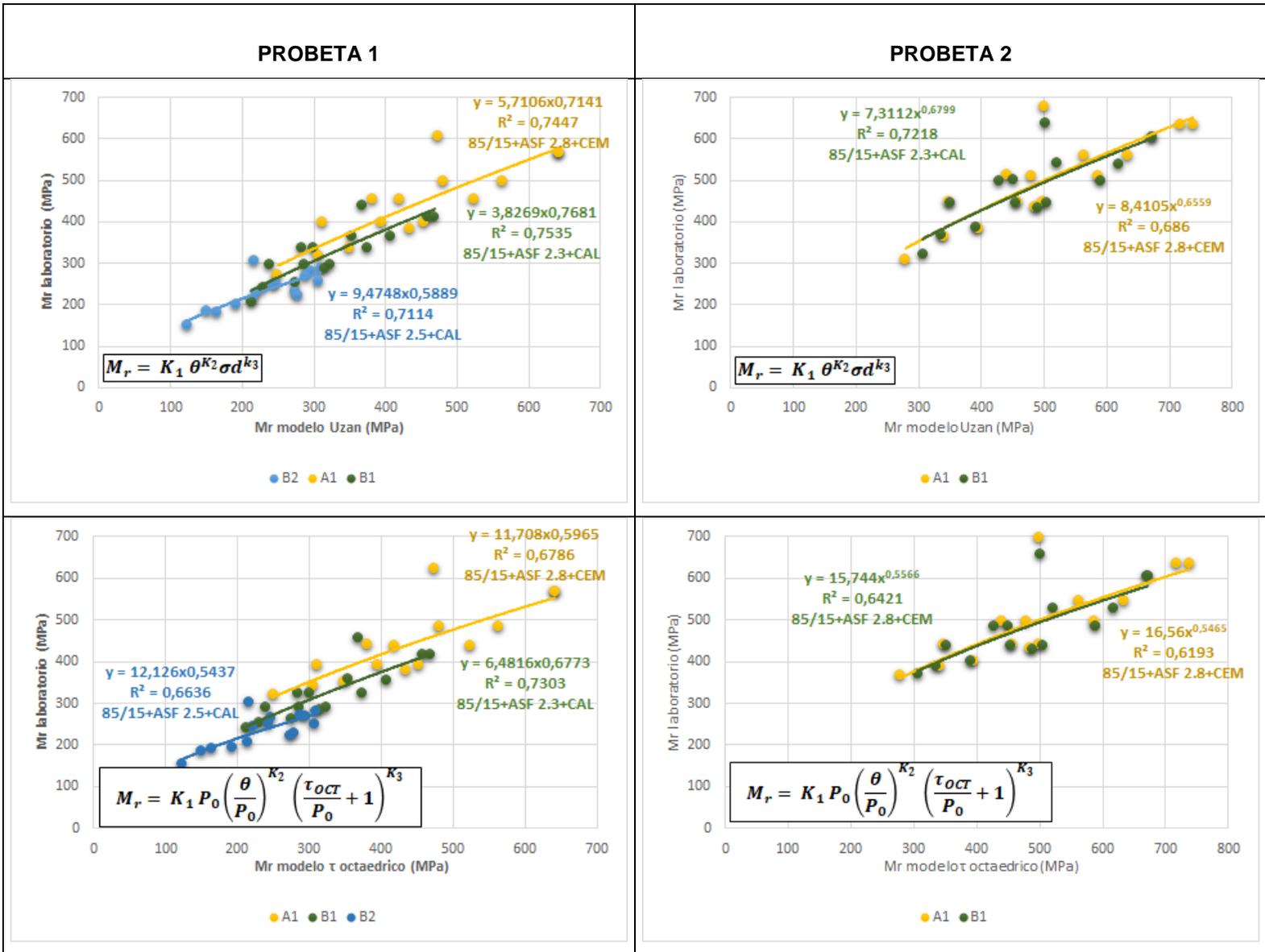
Ecuación	Probeta	B1				B2				A1			
		K1	K2	K3	R ²	K1	K2	K3	R ²	K1	K2	K3	R ²
$M_r = K_1 \theta^{K_2} \sigma d^{K_3}$	P2	140,68	0,00	0,27	0,68					120,44	0,00	0,31	0,72
$M_r = K_1 P_0 \left(\frac{\theta}{P_0}\right)^{K_2} \left(\frac{\sigma_{OCCT}}{P_0} + 1\right)^{K_3}$	P1	2,17	0,00	0,66	0,73	1,74	0,19	0,18	0,66	2,89	0,00	0,68	0,68
	P2	3,37	0,00	0,59	0,61					3,3	0,00	0,66	0,64

Fuente: Elaboración propia.

Con los resultados del Mr de laboratorio y los obtenidos mediante la aplicación de las ecuaciones constitutivas se determinan los valores de R² para cada una de las mezclas y cada uno de los asfaltos, (ver Figura 53).

Figura 53 Correlaciones entre el MR de laboratorio y el obtenido mediante las ecuaciones para mezcla 85/15 con los tres tipos de asfalto.





Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de módulo resiliente más altos para la mezcla 85/15 son los obtenidos con el asfalto procedente de la refinería de Apiay A1 para las diferentes presiones de confinamiento; seguidos por los obtenidos con el asfalto de B1; mientras que los resultados más bajos son los presentados por el asfalto B2, lo que nos permite inferir que los asfaltos de procedencia 1 nos dan mejores resultados que el de procedencia 2.

Con la inclusión del 15% de RAP en la mezcla, se observa que la combinación de los materiales con el asfalto A1 presentan resultados de módulo resiliente más altos que los

otros dos, a pesar de ser el que mayor cantidad de espuma de asfalto requiere como porcentaje optimo (2.8%), para esta mezcla no aplica lo mismo en que en la mezcla 100/0.

En la Figura 53 se observa que el modelo que mejor ajusta los datos de los ensayos es el uzan, con valores de R^2 que oscilan entre 0.68 y 0.75 lo que muestra que los materiales semiligados al igual que los materiales no ligados son dependientes del esfuerzo desviador.

El modelo $k-\theta$ no representa de forma significativa el comportamiento de las mezcla 85/15 por lo que los valores de R^2 para este modelo son de 0.65 para la mezcla con asfalto de B2, de 0.32 para las mezclas con asfalto A1 y de 0.26 para las mezclas con asfalto de la refinería de B1.

Teniendo en cuenta los resultados de las correlaciones de los diferentes modelos se observa que las mezclas no son dependientes directamente el estado de esfuerzos; pero si del esfuerzo desviador, esto teniendo en cuenta que el modelo $K-\theta$ muestra valores de R^2 bajos, mientras que los modelos que incluyen este parámetro muestran resultados de R^2 altos.

Como se observa en la Tabla 51 los resultados de K_2 para los modelos universal y τ octaédrico son de cero (0), lo que indica que el término que incluye el invariante de esfuerzos se convierte en una constante con valor de uno (1) descartando la influencia del invariante de esfuerzo en la ecuación; a excepción del modelo octaédrico obtenido por el asfalto B2 que muestra un valor de K_2 de 0.09 para el modelo Uzan y de 0.19 para el modelo octaédrico, lo que nos permite inferir que esta mezcla si presenta cierta dependencia del invariante de esfuerzos como se observa en modelo $K-\theta$ ya que en este modelo el R^2 supera el 0.5.

Con los resultados de k_3 para los modelos Uzan y τ octaédrico podemos determinar que la las mezclas realizadas con asfaltos de procedencia 1 muestran resultados de 0.29 para el asfalto B1 y de 0.32 para el A1; mientras que el asfalto B2 es de 0.18, lo que representa una menor dependencia del esfuerzo desviador. Lo que muestra que al adicionar un 15% de asfalto el comportamiento de la mezcla respecto al esfuerzo desviador disminuye para el asfalto de tipo 2 y aumenta para los de tipo 1.

Comparando los resultados de K_2 en cada una de las mezclas podemos concluir que los valores de k_2 mas altos son los obtenidos con el asfalto B2, lo que nos lleva a inferir que

es la mezcla que mayor influencia tiene del esfuerzo desviador y esto es corroborado con los resultados de R2.

6.3 MEZCLA 70/30

6.3.1 Módulo Resiliente Asfalto B1.

Llenante Optimo: CEMENTO 1.0%

Llenante óptimo: 2.4%

Tabla 52 Módulo resiliente para los diferentes σ_d en la mezcla 70/30 asfalto B1.

Presión de confinamiento (KPa)	σ_d (esfuerzo desviador)	 Mr (MPa)	 Mr (MPa)
20	21	145	204
21	41	205	281
21	62	267	358
34	34	179	266
34	68	288	376
34	104	370	448
69	68	266	343
69	138	413	488
69	207	484	544
103	68	225	277
103	104	310	368
103	207	527	590
138	104	313	359
138	138	413	460
138	255	377	401

Fuente: Elaboración propia.

Los valores de módulo para esta mezcla están en un rango de 145 KPa y 590 KPa con las diferentes presiones de confinamiento, los cuales son valores que se encuentran en el rango de los obtenidos en los diferentes estudios para este tipo de mezclas.

6.3.2 Módulo Resiliente Asfalto B2.

Llenante Optimo: CEMENTO 1.0%

Llenante óptimo: 2.4%

Tabla 53 Módulo resiliente para los diferentes σ_d en la mezcla 70/30 asfalto B2.

Presión de confinamiento (KPa)	σ_d (esfuerzo desviador)	 Mr (MPa)
20	23	170
21	47	227
21	71	282
34	39	210
34	79	304
34	116	390
69	79	308
69	155	438
69	232	471
103	78	278
103	116	340
103	232	401
138	116	316
138	155	294
138	310	290

Fuente: Elaboración propia.

Los valores de módulo para esta muestra están en un rango de 68 KPa y 471 KPa, siendo el valor mínimo un resultado bajo comparado con los resultados mostrados por la literatura en general.

6.3.3 Módulo Resiliente Asfalto A1.

Llenante Optimo: CAL 1.0%

Llenante óptimo: 2.4%

Tabla 54 Módulo resiliente para los diferentes σ_d en la mezcla 70/30 asfalto A1.

Presión de confinamiento (KPa)	σ_d (esfuerzo desviador)	 Mr (MPa)	 Mr (MPa)
20	20	269	230
21	41	305	285
21	62	359	341
34	34	300	281
34	68	391	379
34	103	440	431
69	68	359	369
69	138	464	460
69	207	508	511
103	68	322	350
103	103	391	406
103	207	559	555
138	104	392	395
138	138	460	468
138	255	435	367

Fuente: Elaboración propia.

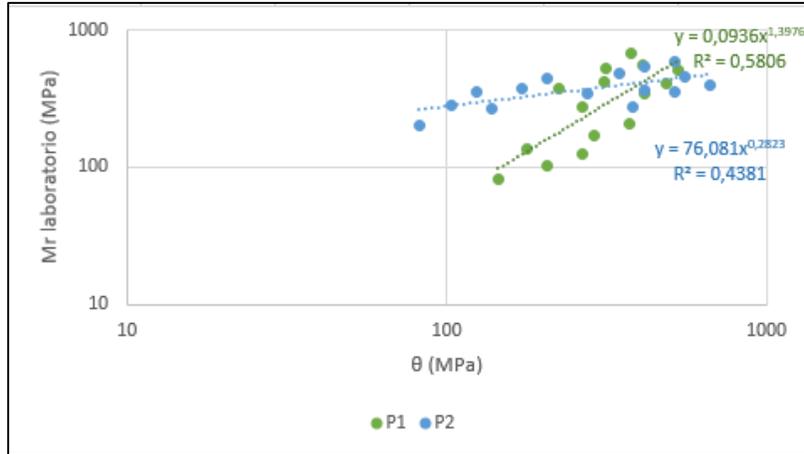
Los resultados de Mr varían entre 230 KPa y 559 KPa con las diferentes presiones de confinamiento, lo cuales son valores que se encuentran en el rango de los obtenidos en los diferentes estudios para este tipo de mezclas.

6.3.4 Ecuaciones Constitutivas

Por medio del análisis estadístico del ensayo de módulo resiliente y la aplicación de la metodología de las diferencias cuadráticas se obtuvieron los valores de K1, K2 y K3 para cada uno de los modelos propuestos en el capítulo 4.

El primer modelo analizado es el K- θ , el cual relaciona la dependencia del módulo resiliente con el invariante de esfuerzos, por lo que a partir la gráfica y la correlación del mismo se pueden obtener los valores de K1 y K2 para la ecuación.

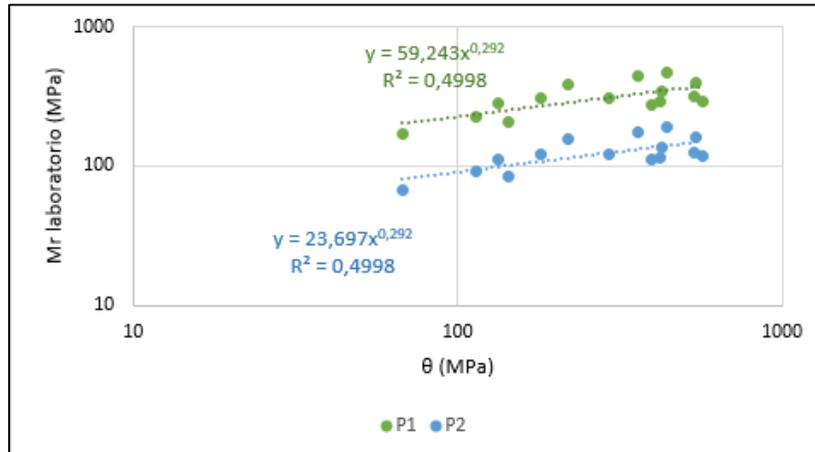
Figura 54 Resultados de MR vs θ para la mezcla 70/30 + 2.4 ASF B1 + CEM.



Fuente: Elaboración propia.

La mezcla 70/30 con 2.4% de asfalto B1 mostro resultados de K1 de 104.15 y 165.98 y de k2 de 0.19 para la P1 (Probeta 1) y P2 (Probeta 2) respectivamente, con valores de R2= 0.31 y 0.27 lo que indica que la rigidez de esta mezcla es muy similar en las dos probetas evaluadas; por otro lado también se observa que los valores de módulo resiliente son muy cercanos y que la correlación entre módulo e invariante de esfuerzos es baja y similar en las dos muestras ensayadas.

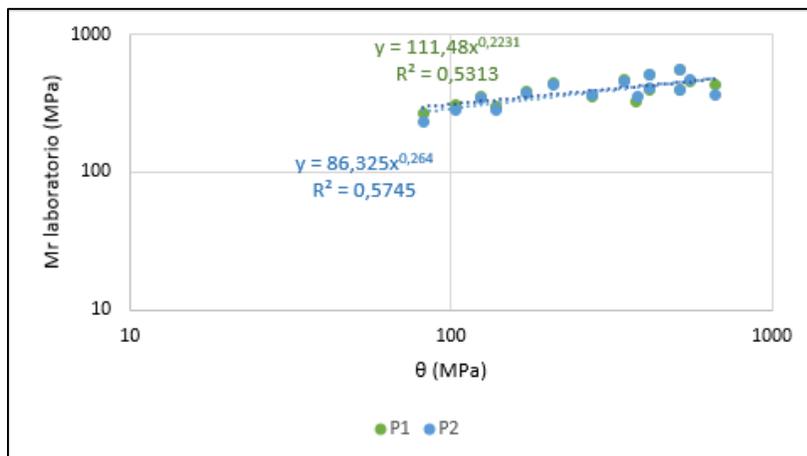
Figura 55 Resultados de MR vs θ para la mezcla 70/30 + 2.4 ASF B2 + CEM.



Fuente: Elaboración propia.

Para la mezcla 70/30 los resultados de módulo resiliente y la correlación con el invariante de esfuerzos muestran valores de R² de 0.49, evidenciando de esta manera una dependencia baja de la suma de los esfuerzos principales con los resultados de Mr.

Figura 56 Resultados de MR vs θ para la mezcla 70/30 + 2.6 ASF A1 + CAL.



Fuente: Elaboración propia.

La mezcla 70/30 muestra una correlación entre el módulo resiliente y el invariante de esfuerzos con valores de R^2 de 0.53 y 0.57, evidenciando de esta manera una dependencia baja de la suma de los esfuerzos principales con los resultados de Mr.

Para la evaluación de la mezcla 70/30 se realizó la modelación de las tres ecuaciones constitutivas, para analizar el comportamiento de la rigidez de las mezclas. Los resultados de las constantes obtenidas para cada uno se muestran en Tabla 55.

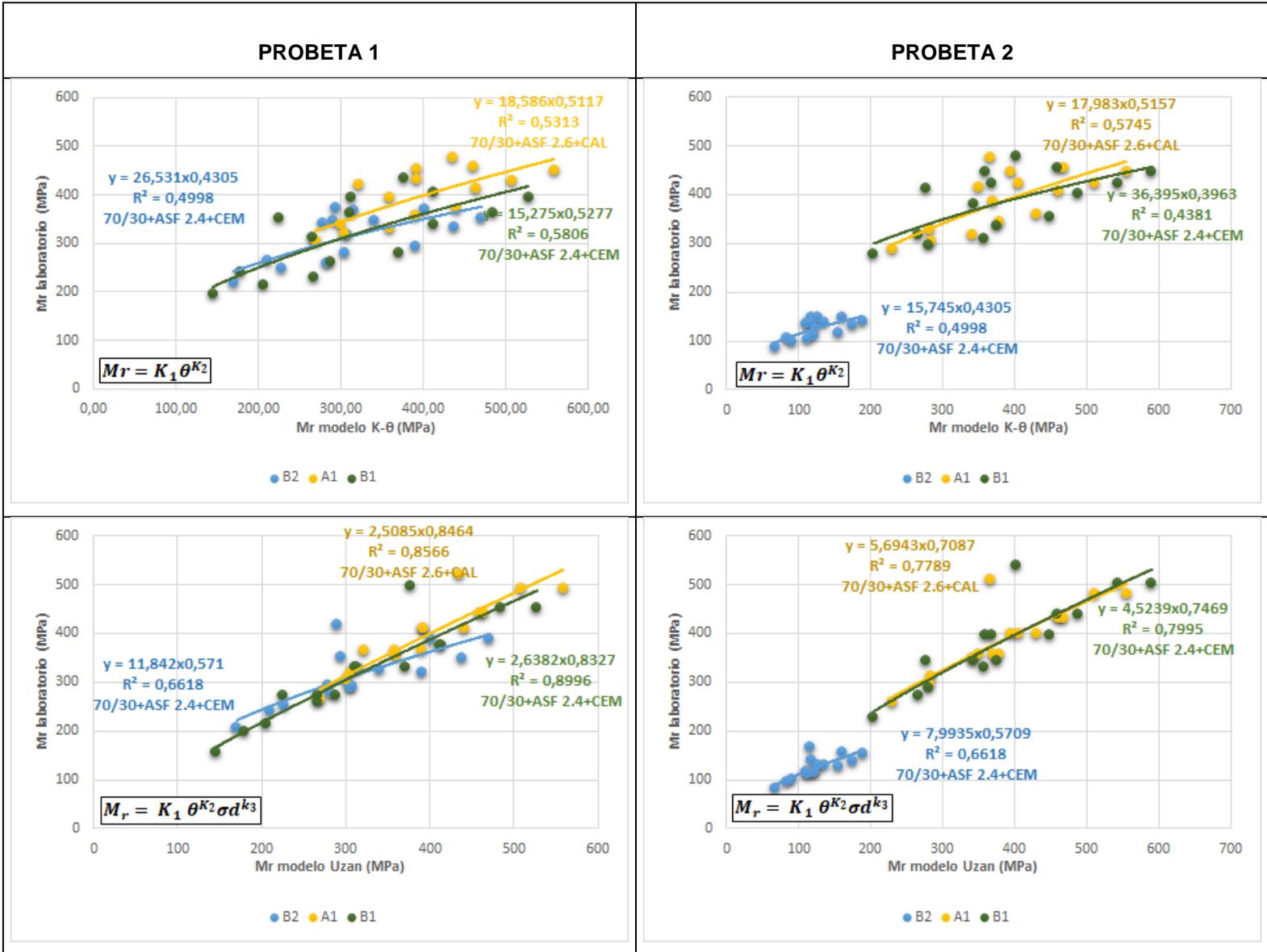
Tabla 55 valores de K para las tres ecuaciones constitutivas mezcla 70/30

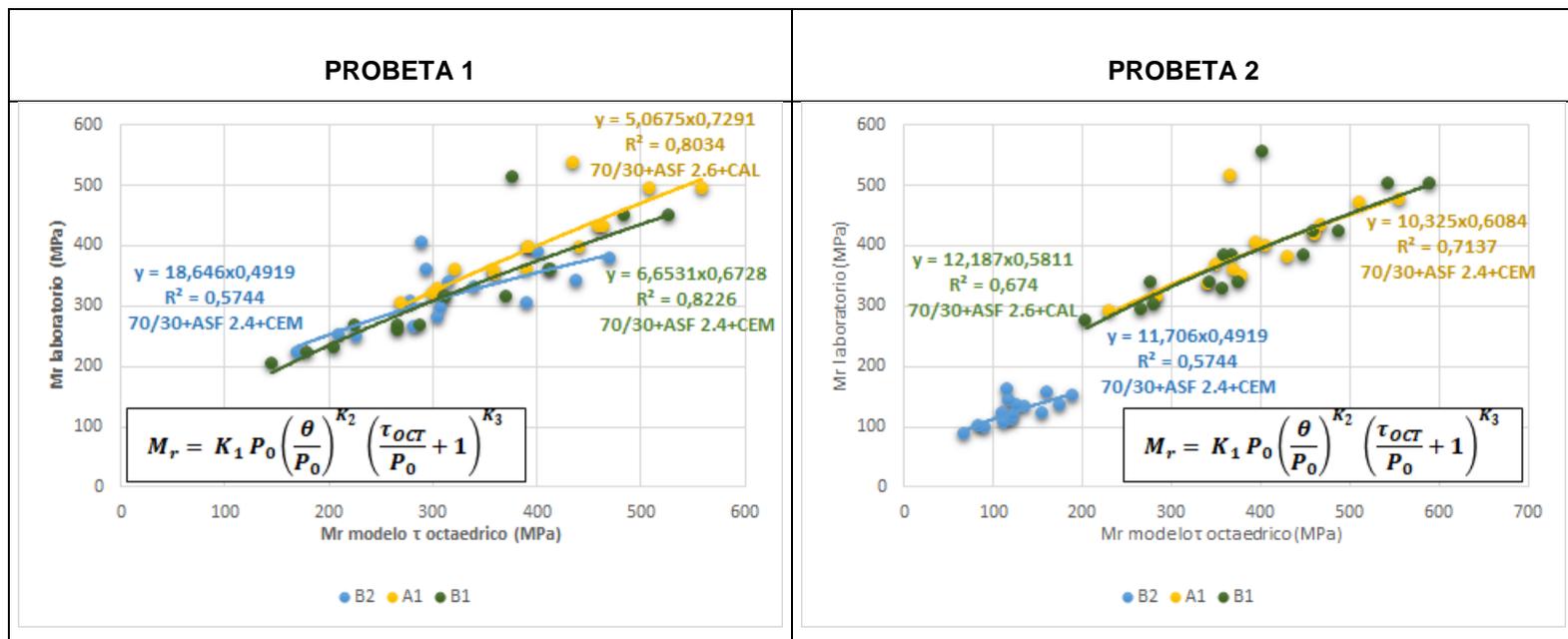
Ecuación	Probeta	B1				B2				A1			
		K1	K2	K3	R ²	K1	K2	K3	R ²	K1	K2	K3	R ²
$M_r = K_1 \theta^{K_2}$	P1	0,094	1,39		0,58	59,24	0,29		0,49	111,4	0,22		0,53
	P2	76,08	0,28		0,44	23,69	0,29		0,49	86,32	0,26		0,57
$M_r = K_1 \theta^{K_2} \sigma d^{K_3}$	P1	39,32	0,00	0,46	0,89	84,62	0,02	0,25	0,66	117,5	0,00	0,27	0,86
	P2	81,19	0,00	0,34	0,79	33,85	0,02	0,25	0,66	115,3	0,00	0,27	0,77
$M_r = K_1 P_0 \left(\frac{\theta}{P_0}\right)^{K_2} \left(\frac{\sigma_{OCT}}{P_0} + 1\right)^{K_3}$	P1	1,75	0,00	0,95	0,83	2,19	0,12	0,34	0,57	2,77	0,00	0,59	0,85
	P2	2,46	0,00	0,72	0,71	0,88	0,12	0,34	0,57	2,77	0,07	0,44	0,67

Fuente: Elaboración propia.

Con los resultados del Mr de laboratorio y los obtenidos mediante la aplicación de las ecuaciones constitutivas se determinan los valores de R^2 para cada una de las mezclas y cada uno de los asfaltos, (ver Figura 57).

Figura 57 Correlaciones entre el MR de laboratorio y el obtenido mediante las ecuaciones para mezcla 70/30 con los tres tipos de asfalto.





Fuente: Elaboración propia.

Se observa que los valores de módulo más altos para la mezcla 70/30 son los obtenidos con el asfalto A1 para las diferentes presiones de confinamiento; seguidos por los obtenidos con el asfalto B1; mientras que los resultados más bajos son los presentados por el asfalto de B2.

En la Figura 57 se observa que el modelo que mejor ajusta los datos de los ensayos es el Uzan, con valores de R^2 que oscilan entre 0.66 y 0.89 lo que muestra que los materiales semiligados al igual que los materiales no ligados son dependientes del esfuerzo desviador.

El modelo $k-\theta$ no representa de forma significativa el comportamiento de las mezcla 70/30 por lo que los valores de R^2 para este modelo son de 0.89 para la mezcla con asfalto de B1, de 0.86 para las mezclas con asfalto A1 y de 0.66 para las mezclas con asfalto B2.

Con los resultados de las correlaciones de los diferentes modelos se observa que las mezclas no son totalmente dependientes del estado de esfuerzos; pero si del esfuerzo desviador, esto teniendo en cuenta que el modelo $K-\theta$ muestra valores de R^2 bajos, mientras que los modelos que incluyen este parámetro muestran resultados de R^2 altos.

Como se observa en la Tabla 55 los resultados de K_2 para los modelos universal y τ octaédrico son de cero (0), lo que indica que el término que incluye el invariante de esfuerzos se convierte en una constante con valor de uno (1) descartando la influencia del invariante de esfuerzo en la ecuación; a excepción del modelo octaédrico y el universal

obtenido por la mezcla con asfalto B2 que muestra con valores de K2 de 0.12 y 0.02 respectivamente, lo que indica que esta mezcla si tiene alguna dependencia del invariante de esfuerzos lo que es coherente con los resultados de R2 obtenidos en el modelo K- θ ya que muestran valores que se acercan al 0.5.

Con los resultados de k3 para los modelos Uzan y τ octaédrico podemos determinar que la las mezclas realizadas con asfaltos de procedencia 1 muestran resultados de 0.46 para el asfalto B1 y de 0.27 para el A1; mientras que el asfalto B2 es de 0.25, lo que representa una mayor dependencia del esfuerzo desviador para el asfalto B1 y A1 y una mayor dependencia del estado de esfuerzos para el asfalto B2. Lo que muestra que al adicionar un 20% de RAP el comportamiento de la mezcla respecto al esfuerzo desviador disminuye para el asfalto de tipo 2 y aumenta para los de tipo 1.

Comparando los resultados de K2 en cada una de las mezclas podemos concluir que los valores de k2 mas altos son los obtenidos con el asfalto B2, lo que nos lleva a inferir que es la mezcla que mayor influencia tiene del esfuerzo desviador y esto es corroborado con los resultados de R2.

6.4 MEZCLA 50/50

6.4.1 Módulo Resiliente Asfalto B1.

Llenante Optimo: CEMENTO 1.0%

Llenante óptimo: 2.4%

Tabla 56 Módulo resiliente para las diferentes σ_d en la mezcla 50/50 asfalto B1.

Presión de confinamiento (KPa)	σ_d (esfuerzo desviador)	 Mr (MPa)
20	21	259
21	41	312
21	62	363
34	34	291
34	68	376
34	104	401
69	68	313
69	138	408
69	207	409

Presión de confinamiento (KPa)	σ_d (esfuerzo desviador)	 Mr (MPa)
103	68	190
103	104	257
103	207	420
138	104	239
138	138	316
138	255	345

Fuente: Elaboración propia.

Los valores de módulo para esta mezcla están en un rango de 190 KPa y 420 KPa con las diferentes presiones de confinamiento, los cuales son valores que se encuentran en el rango de los obtenidos en los diferentes estudios para este tipo de mezclas.

6.4.2 Módulo Resiliente Asfalto B2.

Llenante Optimo: CEMENTO 1.0%

Llenante óptimo: 2.2%

Tabla 57 Módulo resiliente para las diferentes σ_d en la mezcla 50/50 asfalto B2.

Presión de confinamiento (KPa)	σ_d (esfuerzo desviador)	 Mr (MPa)	 Mr (MPa)
20	23	103	90
21	47	134	107
21	71	168	129
34	39	129	101
34	79	184	137
34	116	234	170
69	79	190	139
69	155	264	190
69	232	294	203
103	78	170	123
103	116	208	148
103	232	308	201
138	116	213	144
138	155	256	169
138	310	340	116

Fuente: Elaboración propia.

Los valores de módulo para esta mezcla están en un rango de 90 KPa y 340 KPa con las diferentes presiones de confinamiento, los cuales son valores bajos comparados con los que se encuentran en el rango de los obtenidos en los diferentes estudios para este tipo de mezclas.

6.4.3 Módulo Resiliente Asfalto A1.

Llenante Optimo: CAL 1.0%

Llenante óptimo: 3.0%

Tabla 58 Módulo resiliente para las diferentes σ_d en la mezcla 50/50 asfalto A1.

Presión de confinamiento (KPa)	σ_d (esfuerzo desviador)	 Mr (MPa)	 Mr (MPa)
20	23	63	222
21	47	119	283
21	71	191	344
34	39	100	270
34	79	209	365
34	116	298	400
69	79	180	338
69	155	349	431
69	232	465	470
103	78	141	276
103	116	227	356
103	232	476	520
138	116	214	366
138	155	312	467
138	310	289	422

Fuente: Elaboración propia.

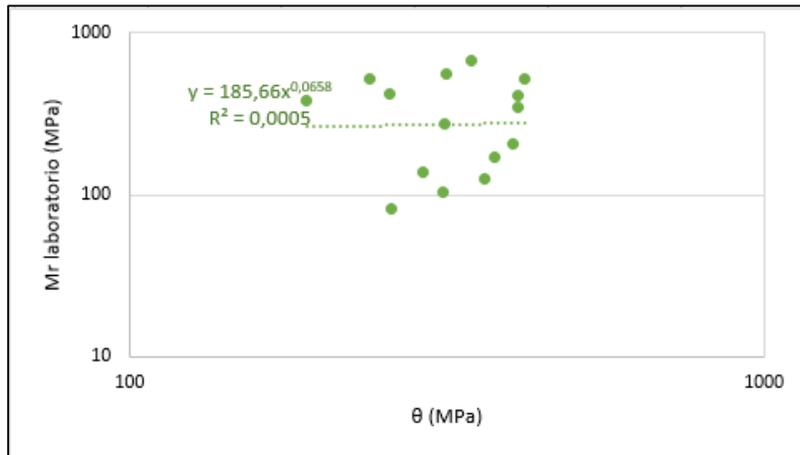
Los valores de módulo para esta mezcla están en un rango de 100 KPa y 520 KPa con las diferentes presiones de confinamiento, los cuales son valores que se encuentran en el rango de los obtenidos en los diferentes estudios para este tipo de mezclas.

6.4.4 Ecuaciones Constitutivas

Por medio del análisis estadístico del ensayo de módulo resiliente y la aplicación de la metodología de las diferencias cuadráticas se obtuvieron los valores de K1, K2 y K3 para cada uno de los modelos propuestos en el capítulo 4.

El primer modelo analizado es el K- θ , el cual relaciona la dependencia del módulo resiliente con el invariante de esfuerzos, por lo que a partir la gráfica y la correlación del mismo se pueden obtener los valores de K1 y K2 para la ecuación.

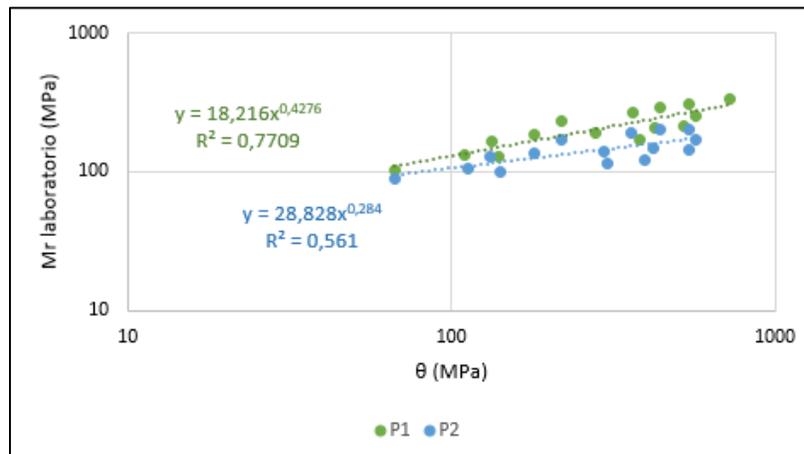
Figura 58 Resultados de MR vs θ para la mezcla 50/50 + 2.4 ASF B1 + CEM.



Fuente: Elaboración propia.

Para la mezcla 50/50 los resultados de módulo resiliente y la correlación con el invariante de esfuerzos muestran valores de R^2 de 0.005, evidenciando de esta manera una dependencia baja de la suma de los esfuerzos principales con los resultados de M_r .

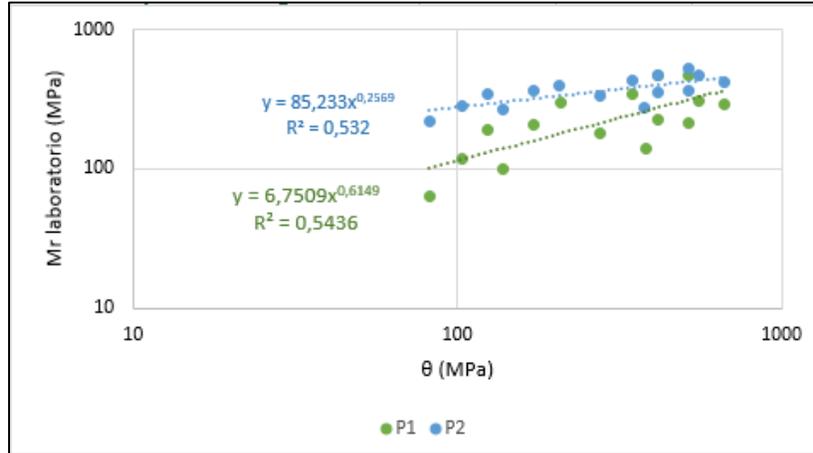
Figura 59 Resultados de MR vs θ para la mezcla 50/50 + 2.2 ASF B2 + CEM.



Fuente: Elaboración propia.

En la mezcla 50/50 con asfalto B2 muestra que los resultados de módulo resiliente y la correlación con el invariante de esfuerzos muestran valores de R^2 de 0.77 y 0.56, evidenciando de esta manera una dependencia baja de la suma de los esfuerzos principales con los resultados de M_r . Las muestras evaluadas presentan una tendencia similar y resultados de módulo resiliente cercanos.

Figura 60 Resultados de MR vs θ para la mezcla 50/50 + 3.0 ASF A1 + CAL.



Fuente: Elaboración propia.

La mezcla 50/50 con 3.0% de espuma de asfalto A1 muestra una correlación entre el módulo resiliente y el invariante de esfuerzos con valores de R^2 de 0.53 y 0.54, evidenciando de esta manera una dependencia parcial de la suma de los esfuerzos principales con los resultados de M_r , por otro lado la tendencia de los valores de graficados no presentan muestran que los valores de módulo de la probeta 2 son más altos que los de la probeta 1.

Para la evaluación de la mezcla 50/50 se utilizaron los mismos modelos para obtener las ecuaciones constitutivas, para analizar el comportamiento de la rigidez de las mezclas. Los resultados de las constantes obtenidas para cada uno se muestran en la **Tabla 59**.

Tabla 59 valores de K para las tres ecuaciones constitutivas mezcla 50/50

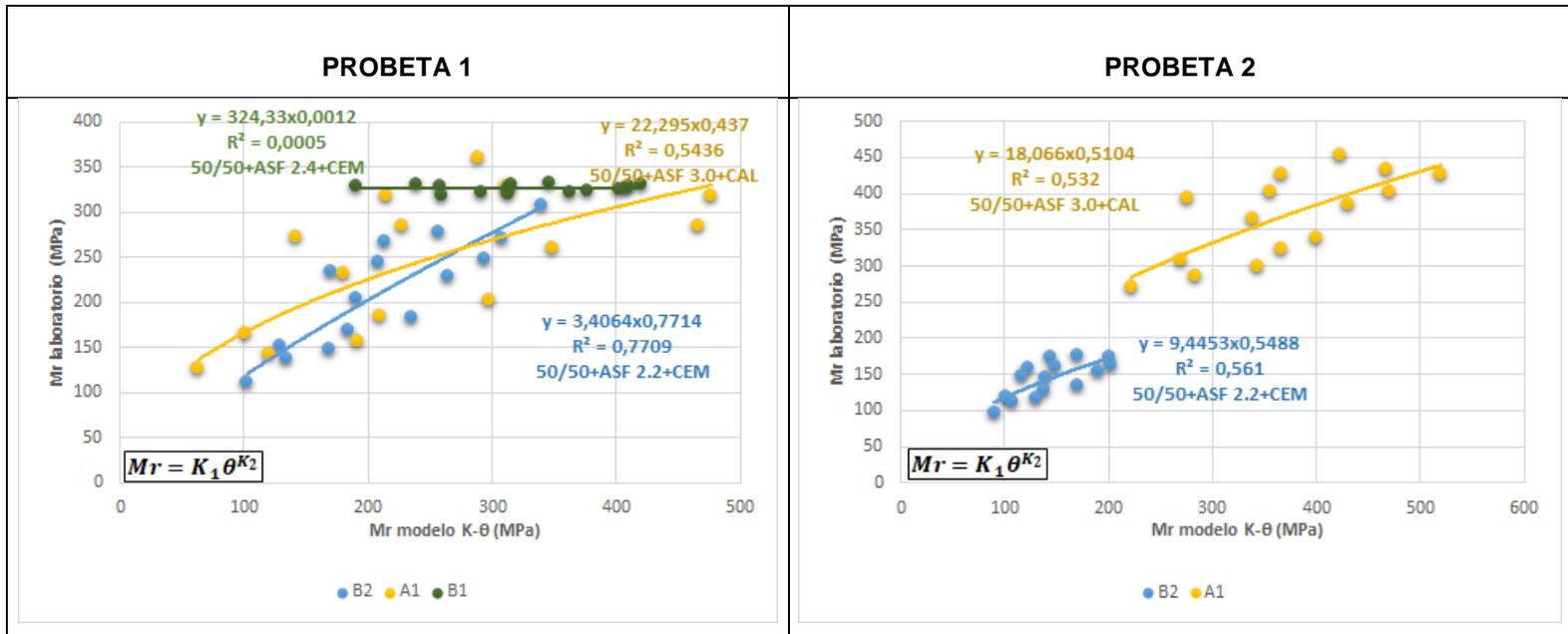
Ecuación	Probeta	B1				B2				A1			
		K1	K2	K3	R ²	K1	K2	K3	R ²	K1	K2	K3	R ²
$M_r = K_1 \theta^{K_2}$	P1	185,7	0,06		0,00	18,21	0,43		0,77	6,75	0,61		0,54
	P2					28,82	0,56		0,56	85,23	0,26		0,53
$M_r = K_1 \theta^{K_2} \sigma d^{K_3}$	P1	160,2	0,00	0,16	0,21	23,02	0,00	0,47	0,98	12,61	0,00	0,64	0,88
	P2					24,39	0,00	0,38	0,88	95,24	0,00	0,29	0,85

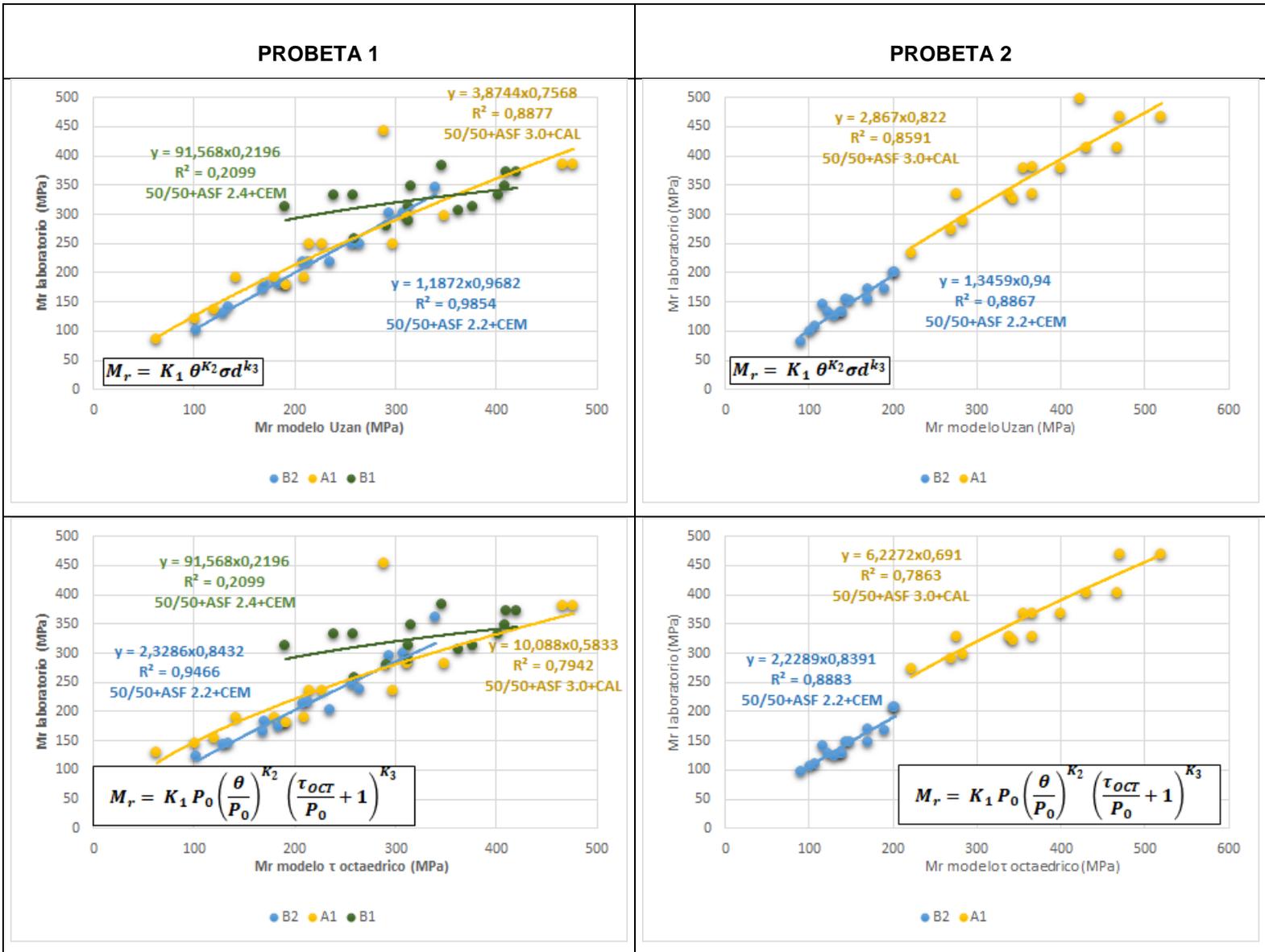
Ecuación	Probeta	B1				B2				A1			
		K1	K2	K3	R ²	K1	K2	K3	R ²	K1	K2	K3	R ²
$M_r = K_1 P_0 \left(\frac{\theta}{P_0}\right)^{K_2} \left(\frac{\sigma_{OCIT}}{P_0} + 1\right)^{K_3}$	P1	2,61	0,00	0,37	0,21	1,119	0,07	0,82	0,95	1,068	0,00	1,28	0,79
	P2					0,847	0,00	0,85	0,88	2,48	0,00	0,64	0,78

Fuente: Elaboración propia.

Con los resultados del Mr de laboratorio y los obtenidos mediante la aplicación de las ecuaciones constitutivas se determinan los valores de R² para cada una de las mezclas y cada uno de los asfaltos, (ver Figura 61).

Figura 61 Correlaciones entre el MR de laboratorio y el obtenido mediante las ecuaciones para mezcla 50/50 con los tres tipos de asfalto.





Fuente: Elaboración propia.

Se observa que los valores de módulo más altos para la mezcla 50/50 son los obtenidos con el asfalto B1 para las diferentes presiones de confinamiento; seguidos por los obtenidos con el asfalto procedentes de la planta A1; mientras que los resultados más bajos son los presentados por el asfalto de B2.

En la Figura 61 se observa que el modelo que mejor ajusta los datos de los ensayos es el universal, con valores de R^2 que oscilan entre 0.21 y 0.98 lo que muestra que los materiales semiligados al igual que los materiales no ligados son dependientes del esfuerzo desviador.

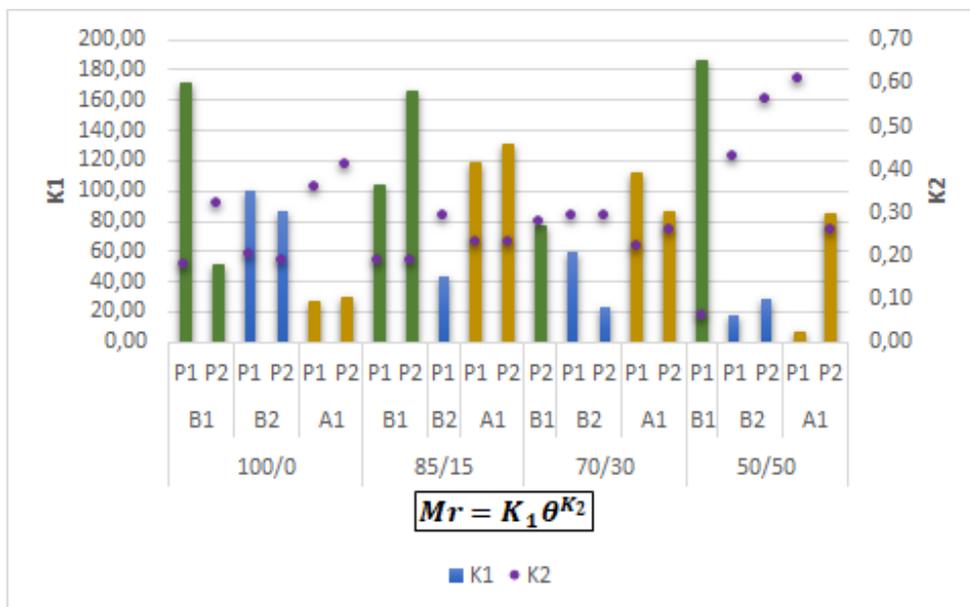
El modelo $k-\theta$ no representa de forma significativa el comportamiento de las mezcla 50/50 por lo que los valores de R^2 para este modelo son de 0.05 para la mezcla con asfalto de B1, de 0.54 para las mezclas con asfalto A1 y de 0.77 para las mezclas con asfalto B2.

Teniendo en cuenta los resultados de las correlaciones de los diferentes modelos se observa que las mezclas no son dependientes directamente el estado de esfuerzos; pero si del esfuerzo desviador, esto teniendo en cuenta que el modelo $K-\theta$ muestra valores de R^2 bajos, mientras que los modelos que incluyen este parámetro muestran resultados de R^2 altos.

Como se observa en la Figura 62 los resultados de K_2 para los modelos universal y τ octaédrico son de cero (0), lo que indica que el término que incluye el invariante de esfuerzos se convierte en una constante con valor de uno (1) descartando la influencia del invariante de esfuerzo en la ecuación; a excepción del modelo octaédrico obtenido por MPI que muestra con valores de K_2 de 0.07.

Con los resultados de k_3 para los modelos Uzan y τ octaédrico podemos determinar que la las mezclas realizadas con asfaltos de procedencia 1 muestran resultados de 0.16 para el asfalto B1 y de 0.64 y 0.29 para las probetas 1 y 2 respectivamente con asfalto A1; mientras que el asfalto B2 es de 0.47 y 0.38, lo que representa una mayor dependencia del esfuerzo desviador para el asfalto A1. Lo que muestra que al adicionar un 50% de RAP el comportamiento de la mezcla respecto al esfuerzo desviador aumenta para el asfalto de tipo 2 y disminuye para los de tipo 1.

Figura 62 Valores de K1 y K2 para los diferente tipos de mezclas, modelo K-θ



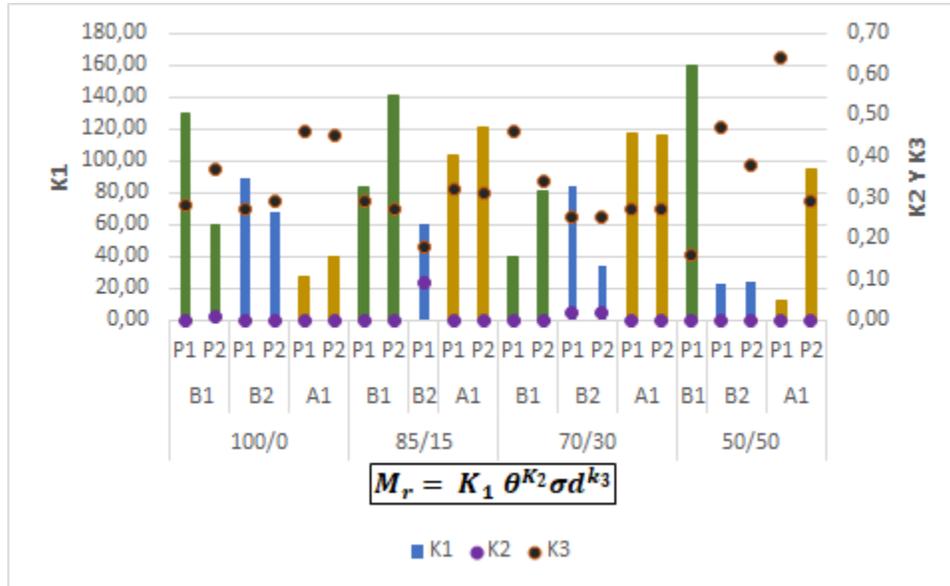
Fuente: Elaboración propia.

Para el modelo K-θ aplicado en las diferentes mezclas se obtienen valores de K1 que oscilan entre 0.09 y 185.66, donde el valor más alto es el obtenido con el asfalto B1 y el más bajo obtenido con el asfalto B2 y valores de K2 que varían entre 0.06 y 0.61 mostrando los valores más altos las mezclas 50/50 fabricadas con los distintos tipos de asfalto lo que evidencia que estas mezclas tienen mayor dependencia del estado de esfuerzos (Ver Figura 62).

Es importante mencionar que de acuerdo a las diferentes investigaciones estos valores de K2 se obtienen en mezclas para la cuales la correlación entre el módulo resiliente y el invariante de esfuerzos es bajo (K.J. Jenkins & Mulusa, 2008), por lo que el modelo K-θ no es el modelo que representa de forma adecuada el comportamiento de las mezclas realizadas en el presente trabajo de investigación.

Con el aumento del contenido de RAP el comportamiento de las mezclas es distinto para cada uno de los tipos de asfalto: para el tipo B1 se genera una mayor correlación entre el Mr y el θ, para el tipo B2 la correlación entre Mr y θ es variable con picos en la mezcla 85/15 y la 50/50; mientras que para el tipo A1 la mezcla conserva una relación Mr-θ constante lo que representa valores de K2 similares.

Figura 63 Valores de K1, K2 y K3 para los diferente tipos de mezclas, modelo Universal



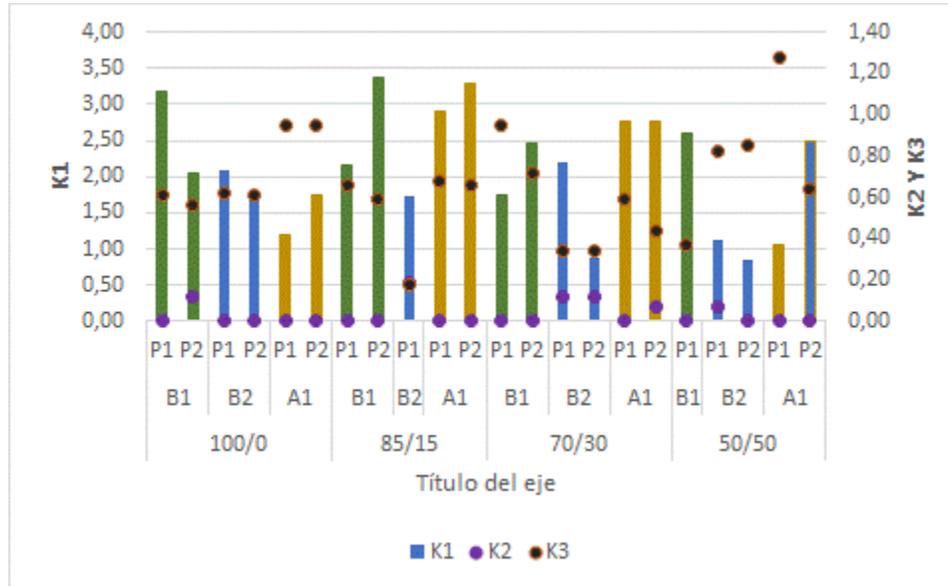
Fuente: Elaboración propia.

El modelo Universal muestra valores de K1 que varían entre 12.69 y 160.19 y al igual que en el modelo K-θ los valores más altos son obtenidos en las briquetas fabricadas con asfalto B1 y los más bajos con asfalto B2, en este modelo se observa que los resultados de K2 varían entre 0.00 y 0.09 lo que corrobora la baja dependencia de los materiales tratados con asfalto espumado del estado de esfuerzos; por otro lado los resultados de K3 muestran valores entre 0.16 y 0.64 lo que representa una mayor dependencia de las mezclas al esfuerzo desviador que al invariante de esfuerzos θ; mostrando resultados opuestos a los propuestos en la literatura por autores como Santagata, Jenkins y Campagnoli.

La inclusión del esfuerzo desviador en la modelación del comportamiento de las mezclas se genera que los valores de R² aumenten de 0.47 en promedio a 0.77.

En la Figura 63 se observa que con el incremento del contenido de RAP el comportamiento de las mezclas es distinto para cada uno de los tipos de asfalto: para el tipo B1 se genera una mayor correlación entre el Mr y el σ_d, para el tipo B2 la correlación entre Mr y θ es variable con picos en la mezcla 85/15 y la 50/50; mientras que para el tipo A1 la mezcla conserva una relación Mr-θ constante lo que representa valores de K2 similares.

Figura 64 Valores de K1, K2 y K3 para los diferente tipos de mezclas, modelo τ Octaedrico.



Fuente: Elaboración propia.

El modelo τ octaédrico muestra valores de K1 que varían entre 0.85 y 3.37 mostrando que los valores más altos son los obtenidos en las briquetas fabricadas con asfalto B1 y los más bajos con asfalto B2, en este modelo se observa que los resultados de K2 varían entre 0.00 y 0.19 lo que corrobora la baja dependencia de los materiales tratados con asfalto espumado del estado de esfuerzos; por otro lado los resultados de K3 muestran valores entre 0.18 y 1.28 lo que representa una mayor dependencia de las mezclas al esfuerzo desviador que al invariante de esfuerzos θ ; mostrando resultados opuestos a los propuestos en la literatura por autores como Santagata, Jenkins y Campagnoli.

En la Figura 64 se observa que con el incremento del contenido de RAP la dependencia de la mezcla con el esfuerzo desviador aumenta, por lo que los valores de K3 son más altos para las mezclas 50/50.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En general de la investigación se obtienen las conclusiones que se muestran a continuación.

- Los parámetros de Vida Media (HL) y Relación de expansión (ER), obtenidos para los tres asfaltos analizados, cumplieron con las especificaciones mínimas propuestas en los lineamientos de la guía de diseño y construcción sudafricana TG2-A guideline for the Design and construction of Bitumen Stabilised Materials.
- Los asfaltos analizados presentan propiedades reológicas diferentes de acuerdo con su procedencia y características de espumado variables. No obstante no se pudo definir una tendencia específica en el comportamiento o la influencia del asfalto en las mezclas, debido a que durante la ejecución del presente estudio no se controlaron variables como la granulometría, o el tipo de llenante que afectan de forma directa los resultados.
- Las granulometrías obtenidas para el material virgen y el material RAP se ajustaron a los límites establecidos en la guía metodológica TG2. Sin embargo, al realizar las mezclas del material granular y el RAP sin separar por tamaños se afectaron las gradaciones de las mezclas que a su vez incidieron en la relación humedad – peso unitario seco y seguramente en los diseños de las mezclas con espuma de asfalto y por lo tanto en la rigidez de las mezclas – esta incidencia resultó difícil de cuantificar.
- Era de esperarse que la densidad seca máxima aumentara mientras que la humedad óptima disminuyera con el incremento de la proporción de RAP, tratándose este de un material con menor contenido de arenas y finos, La mezcla 70-30 no presentó el comportamiento esperado, atribuible a la no separación por fracciones, para controlar la gradación y las proporciones deseadas de material granular/RAP en la elaboración de la mezcla. Este procedimiento de preparación de los agregados también pudo tener influencia en los comportamientos encontrados en los diseños de las mezclas y en los módulos resilientes.
- Para los tres asfaltos analizados la FWC y la temperatura para obtener en las espumas de asfalto adecuadas vida media (HL) y relación de expansión (ER) fue de 2.5% y 160°C respectivamente; cumpliendo con los valores mínimos recomendados por Instituto del Asfalto, relación de expansión (ER) 10 y vida media (HL) 6s.

- Las viscosidades absolutas del asfalto denominado A1, en las diferentes temperaturas consideradas, son superiores entre 10 y 30 veces a la de los cementos asfálticos B1 y B2. Sin embargo, en este estudio con el asfalto más viscoso (A1) se obtuvieron las más altas relaciones de expansión (ER) de 34, llegando a ser entre 2 y 3 veces mayores a las de los asfaltos de menor viscosidad B1 y B2 con valores de 12 y de 18 respectivamente.
- Los llenantes seleccionados mediante los resultados de los ensayos de tracción indirecta varían en cada una de las mezclas de las distintas proporciones con la proveniencia del asfalto; obteniendo llenantes iguales para el tipo B y un llenante distinto para el tipo A.
- Los contenidos óptimos de asfalto espumado obtenidos para todas las mezclas con diferentes concentraciones de RAP estuvieron en un rango entre 2.2% y 2.9%. Para las mezclas con asfalto tipo A1 se obtuvieron los contenidos de asfalto más altos (2.8% en promedio), mientras que los contenidos usando asfalto tipo B1 y B2 se encontraron en promedio en 2.3% y 2.4%, respectivamente
- Los resultados más altos de resistencia a la tracción indirecta en general son los obtenidos para aquellas mezclas en las cuales el llenante seleccionado es cemento, independientemente del tipo de asfalto y de la concentración de RAP; con valores de ITS seco para CAL entre 161 kPa y 319 kPa, para cemento entre 169 kPa y 356 kPa; y de ITS en húmedo para CAL entre 65 kPa y 178 kPa y para cemento entre 83 kPa y 178 kPa.
- Los resultados de tracción indirecta en seco y en húmedo no muestran una tendencia definida con el aumento de RAP o con el tipo de asfalto lo que no se puede atribuir a una variable específica, ya que los procedimientos usados en el presente estudio dieron lugar a distintos factores que pueden ser la causa de la dispersión de los resultados.
- En general se observa que los resultados de resistencia conservada se encuentran por encima de lo especificado en la guía metodológica del asfalto TG-2; a excepción de la mezcla 70/30 con asfalto A1 que tiene un TSR de 41. COMENTAR SOBRE LOS TSR
- Los valores de los módulo resiliente de las diferentes fórmulas de trabajo se obtuvieron mediante ensayos triaxiales monotónicos sobre briquetas de 100 mm de diámetro x 200 mm debido a que la cámara de la escuela colombiana de ingeniería solamente tiene la capacidad para ensayas este tipo de muestras.

- Las probetas fueron compactadas, usando martillo vibratorio siguiendo las recomendaciones de la metodología sudafricana; sin embargo, la duración de la compactación de 25 segundos por capa no resultó suficiente para alcanzar la densidad seca máxima establecida en el ensayo de relaciones humedad – peso unitario seco en los suelos (ensayo modificado de compactación) INV E – 142 – 13. Se observa que la densidad alcanzada decrece con el aumento en el contenido de RAP en cada mezcla, excepto en la mezcla 100- 0 con asfalto tipo A1 la cual presentó los menores valores de densidad seca de todas las briquetas sin RAP.
- Los valores de relación de compactación (densidad seca de mezcla/ densidad seca máxima de proctor) más elevados se obtuvieron para las mezclas fabricadas con asfalto del proveedor 1 (A1 y B1) a su vez, también fueron las que menor disminución de densidad presentaron con el aumento del contenido de RAP.

6.1.1 CONCLUSIONES PARTICULARES

A partir de la ejecución del diseño de mezcla y fabricación de briquetas para la obtención de parámetros de resistencia presentados en el capítulo 5 y posteriores resultados del capítulo 6 se plantean las siguientes conclusiones particulares:

- Los valores de módulo resiliente para todas las mezclas realizadas mostraron resultados acordes a lo encontrado en la literatura que varían entre 150MPa y 737 MPa.
- En el presente estudio, no se encontró una tendencia definida entre el comportamiento del módulo resiliente con el incremento del RAP. Posiblemente debido, como ya se ha comentado, a que se tienen variables adicionales como la gradación, el contenido de asfalto y el tipo de llenante utilizado para la fabricación de las probetas.
- Se observa en general que contrario a lo indicado en la literatura técnica relacionada, que los resultados de M_r , son más dependientes del esfuerzo desviador - σ_d , que del invariante de esfuerzos θ , es decir los modelos que mejor representan la rigidez del material corresponden al Uzan y el τ octaédrico o Universal. No obstante Ebels en 2008, también encuentra en su trabajo que no existe una correlación directa entre el invariante de esfuerzos y el módulo resiliente para los materiales analizados en su proyecto.

- Los valores de k_2 para los modelos Uzan y T octaédrico muestran una tendencia a 0 en la mayoría de las mezclas evaluadas, lo que convierte en 1 el término evaluado en este caso el invariante de esfuerzos θ , lo que confirma la menor dependencia de las mezclas del estado de esfuerzos.

6.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar la dosificación de materiales controlando las fracciones por tamaño y no por cuarteo.

Para futuras investigaciones, en la caracterización de la espuma se recomienda trabajar además de los parámetros de relación de expansión y vida media con el índice de espumado (FI) propuesto por Jenkins, 2000. Este índice permite establecer de manera más adecuada el óptimo contenido de agua de espumado FWC y la temperatura de calentamiento del asfalto.

Teniendo en cuenta los tamaños máximos de los agregados (granulares y RAP), se debe trabajar con probetas de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura cuidando lograr las densidades secas máximas y con las humedades óptimas.

Finalmente, se deben ir analizando los datos a medida que estos se vayan generando con el fin de hacer las correcciones y ajustes necesarios, de tal forma que no se afecten los resultados al introducir en el estudio más variables que las inicialmente propuestas.

8. BIBLIOGRAFIA

- Abel, F. (1979). Foamed Asphalt Base Stabilisation. In *6th Annual Paving Seminar* (p. 1982).
- Academy, A. (2009). *TG2-A guideline for the Design and construction of Bitumen Stabilised Materials*. (2da.). Pretoria: Asphalt Academy.
- Acott, S. M., & Myburgh, P. A. (1983). Design and Performance Study of Sand Bases Treated with Foamed Asphalt. *Transportation Research Record*, (898), 290–296.
- Acott S.M. (1979). Sand and stabilization using Bitumen. Durban.
- Andrés, F. C. R. (2011). *Estimación del coeficiente estructural del asfalto espumado mediante el análisis de deflectometría fwd*.
- Association, P. C. (2008). Full Depth Reclamation. *America's Cement Manufacturers*, 1(2008), 2016.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Badilla, V. G. A. ., Ávila, E. T., & Duarte, P. A. (2011). *EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE BASES ESTABILIZADAS CON ASFALTOS ESPUMADOS EN TRAMOS DE PRUEBA*.
- Ben, M. D. (2014). hiRESILIENT RESPONSE AND PERFORMANCE OF BITUMEN STABILIZED MATERIALS WITH FOAM INCORPORATING RECLAIMED by, (January), 375.
- Bowering, R. H. (1970). Properties and Behaviour of Foamed Bitumen Mixtures for Road Building. *5th Australian Road Research Board Conference*.
- Brennan, M. (1981). *A Laboratory Investigation on the Use of Foamed Asphalt for Recycled Pavements : Interim Report*. <https://doi.org/10.5703/1288284314026>
- Brennen, M., Tia, M., Altschaeffl, A. G., & Wood, L. E. (1999). Laboratory investigation of the use of foamed asphalt for recycled bituminous pavements.

Characteristics of Bituminous Paving Mixtures to Meet Structural Requirements.

- Campagnoli, S. (1998). *Principios básicos de la Tecnología de los cementos asfálticos espumados, Características de espumado de los cementos asfálticos Colombianos, Tecnologías de Diseño, construcción y rehabilitación de pavimentos flexibles, aspectos generales sobre el recicla. Sociedad Colombiana de Ingeniería* (Vol. 1).
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Campagnoli, S. X., & Puentes, D. S. (2016). Módulo resiliente de materiales estabilizados con asfalto espumado Foame. *Corasfaltos*, 11.
- Carlos, J. (2009). Estudio De Las Ventajas Del “Reciclado in Situ” En Caliente De Pavimentos Flexibles. *Universidad de La Salle*, 354.
- Castedo Franco, L. H. Wood, L. E. (1983). Durability characteristics of foamed asphalt for recycled bituminous pavements. Canada., 1984.
- Chandra, R., Veeraragavan, a., & Krishnan, J. M. (2013). Evaluation of Mix Design Methods for Reclaimed Asphalt Pavement Mixes with Foamed Bitumen. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 104, 2–11.
<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.092>
- Collings, D., & Jenkins, K. J. (2011). *THE LONG-TERM BEHAVIOUR OF BITUMEN STABILISED MATERIALS (BSMs)*. Southern Africa.
- Csanyi, L. H. (1960). *Bituminous Mixes Prepared with Foamed Asphalt. Iowa Engineering Experiments Station Bulletin No 189.*
- Fu, P., Jones, D., Harvey, J. T., & Bukhari, S. A. (2009). Laboratory test methods for foamed asphalt mix resilient modulus. *Road Materials and Pavement Design*, 10(1), 188–212. <https://doi.org/10.1080/14680629.2009.9690187>
- Gonzalez, A. (2009). AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE DEFORMATIONAL AND PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF FOAMED BITUMEN STABILISED PAVEMENTS.

- Grenfell, J., Pasetto, M., Lo Presti, D., & D. Airey, G. (2015). Tests Campaign Analysis to Evaluate the Capability of Fragmentation Test to Characterize Recycled Asphalt Pavement (RAP) Material. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 7(1). <https://doi.org/10.1007/978-94-017-7342-3>
- GUERRERO ABREGO, O. W., MARTÍNEZ RODRÍGUEZ, O. E., & PORTILLO REVELO, J. M. (2014). “ ESTABILIZACIÓN DE MATERIAL RECICLADO DE PARA SER EMPLEADO COMO BASE EN.
- Hailesilassie, B. W., Hugener, M., & Partl, M. N. (2015). Influence of foaming water content on foam asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 85(JUNE 2015), 65–77. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.071>
- He, G. P., & Wong, W. G. (2006). Decay properties of the foamed bitumens. *Construction and Building Materials*, 20(10), 866–877. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.06.027>
- Jenkins, K. J. (1999). Characterisation of foamed bitumen. *7th Conference on Asphalt ...*, 1–18.
- Jenkins, K. J. (2000). Mix design considerations for cold and half-warm bituminous mixes with emphasis on foamed bitumen, (September), 385.
- Jenkins, K. J. (2013). FLEXIBILITY AND PERFORMANCE PROPERTIES OF BITUMEN by Nwando Tiyon Achille Thesis presented in fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science in the Faculty of Engineering at Stellenbosch University, (April).
- Jenkins, K. J., Long, F. M., & Ebels, L. J. (2007). Foamed bitumen mixes = Shear performance? *International Journal of Pavement Engineering*, 8(2), 85–98. <https://doi.org/10.1080/10298430601149718>
- Jenkins, K. J., & Mulusa, W. K. (2008). Updating Bituminous Stabilized Materials Guidelines : Mix Design Report, Phase II, (September), 1–29.
- Jingang, W., Jenkins, K. J., Molenaar, A. A. A., & Shaopeng, W. (2011). Evaluation

- of Resilient Modulus Models for A High Quality Crushed Stone, (March 2016), 12.
- Lee, D. Y. (1981). Treating marginal aggregates and soil with foamed asphalt. *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 50, 211–150. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Treating+marginal+aggregates+and+soils+with+foamed+asphalt#0>
- Leek, C., & Jameson, G. (2011). *AUSTROADS Technical Report: Review of Foamed Bitumen Stabilisation Mix Design Methods*. Sidney, Australia: Austroroads Ltd.
- Lesueur, D., Clech, H., Brosseaud, A., Such, C., Cazacliu, B., Koenders, B., ... Bonvallet, J. (2004). Foamability and Foam Stability. *Road Materials and Pavement Design*, 5(3), 277–302. <https://doi.org/10.1080/14680629.2004.9689973>
- Little, D. N., Button, J. W., & Epps, J. A. (1983). Structural Properties of Laboratory Mixtures Containing Foamed Asphalt and Marginal Aggregates. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (911), 104–113.
- Moossazadeh, J., & Witczak, W. (1981). Prediction of subgrade moduli for soil that exhibits non-linear behaviour. *Transportation Research Board*.
- Mulusa, W. K. (2009). *DEVELOPMENT OF A SIMPLE TRIAXIAL TEST FOR CHARACTERISING BITUMEN STABILISED MATERIALS*. University of Stellenbosch. Stellenbosch University.
- Muthen, K. M. (1998). Foamed asphalt mixes-mix design procedure. *Transportation Research Record*, 898, 290–296. Retrieved from <http://www.greenmixinc.com/pics/foamasph.pdf>
- Newcomb, D., Arambula, E., Yin, F., Zhang, J., Bhasin, A., Li, W., & Arega, Z. (2015). *NCHRP - REPORT 807. Properties of Foamed Asphalt for Warm Mix Asphalt*

Applications.

- Orellana, L. R. (2002). Asfalto Espumado Tecnología y aplicaciones. *Infraestructura Vial*, (Agosto 2002), 26–29. Retrieved from <http://myslide.es/documents/asfalto-espumado.html>
- Ozturk, H. (2013). *Quantification of quality of foamed warm mix asphalt binders and mixtures*. Michigan State University.
- PROAS. (2016). Manual de consulta técnicas en frío. *Betunes CEPSA*, 1, 10.
- Ruckel, P. J., Acott, S. M., & Bowering, R. H. (1982). Foamed - asphalt paving mixture: Preparation of Design mixes and treatment of test specimens. *Transportation Research Board*, (911), 88–95.
- Ruckel, P. J., Acott, S. M., & Bowering, R. H. (1983). Foamed-Asphalt Paving Mixtures: Preparation of Design Mixes and Treatment of Test Specimens. *Transportation Research Record*.
- Santagata, E., Chiappinelli, G., Riviera, P. P., & Baglieri, O. (2010). Triaxial testing for the short term evaluation of cold-recycled bituminous mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 11(1), 123–147. <https://doi.org/10.1080/14680629.2010.9690263>
- Sunarjono, S. (2008). *The Influence of Foamed Bitumen Characteristics On Cold-Mix Asphalt Properties*. Nottingham.
- Thenoux, G., & Jamet, A. (2002). Tecnología del asfalto espumado. *Revista Ingeniería de Construcción*, 17, 84–92.
- Transporte, P. de I. del. (2011). Boletín Técnico. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Vidal, J., & Osorio, R. (2002). Módulo Resiliente de suelos finogranulares. *Revista Universidad EAFIT*, 25, 10. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Wirtgen, G. (2004). *Wirtgen Manual de Reciclado en Frío*.

Wirtgen GmbH. (2012). Wirtgen Cold Recycling Technology. In Wirtgen GmbH (Ed.)
(1st ed., p. 342). Windhagen, Alemania.

9. ANEXOS

ANEXO A: DENSIDAD SECA PROCTOR MODIFICADO

MEZCLA 100-0:

1.1 RELACION HUMEDAD - DENSIDAD

Método Proctor Modificado

Norma INV - E 142 - 13

Material granular Virgen proveniente de Cantera

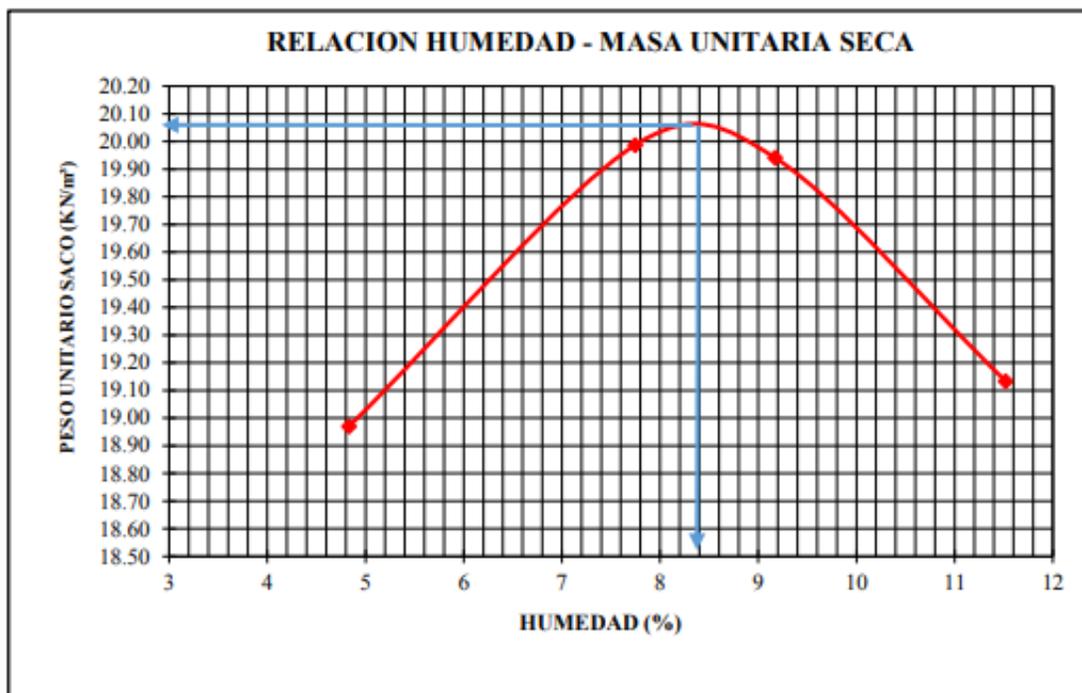
Método Empleado para la Compactación:

Método C

Método de la Preparación de la Muestra:

Vía Humeda

MUESTRA No.	Humedad (%)	Densidad Húmeda (g/cm ³)	Densidad Seca (g/cm ³)	Peso Unitario Seco (KN/m ³)
1	4.8	2.027	1.934	18.97
2	7.7	2.195	2.037	19.99
3	9.2	2.219	2.033	19.94
4	11.5	2.175	1.950	19.13



Humedad óptima:

8.4 %

Peso Unitario Seco Máximo:

20.05 KN/m³

MEZCLA 85-15:

1.2 RELACION HUMEDAD - DENSIDAD

Método Proctor Modificado

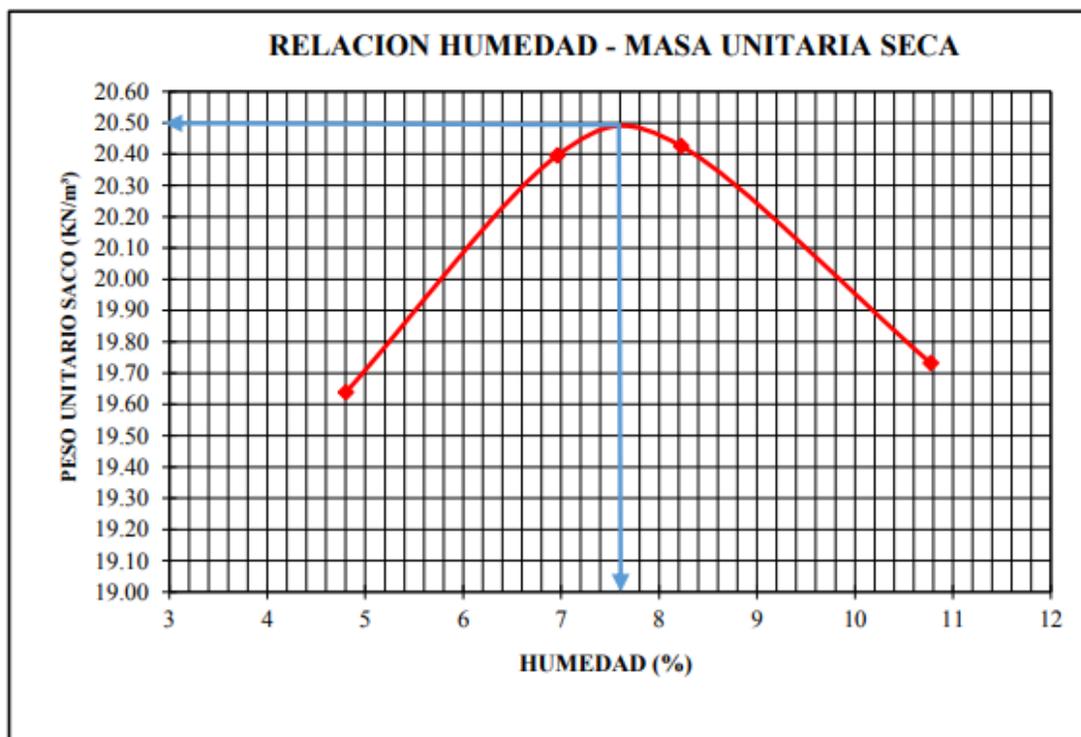
Norma INV - E 142 - 13

Mezcla 15% de RAP y 85% Material Granular.

Método Empleado para la Compactación: Método C

Método de la Preparación de la Muestra: Vía Humeda

MUESTRA No.	Humedad (%)	Densidad Húmeda (g/cm ³)	Densidad Seca (g/cm ³)	Peso Unitario Seco (KN/m ³)
1	4.8	2.098	2.002	19.64
2	7.0	2.224	2.079	20.40
3	8.2	2.253	2.082	20.43
4	10.8	2.228	2.011	19.73



Humedad óptima:

7.6 %

Peso Unitario Seco Máximo:

20.5 KN/m³

MEZCLA 70-30:

1.3 RELACION HUMEDAD - DENSIDAD

Método Proctor Modificado

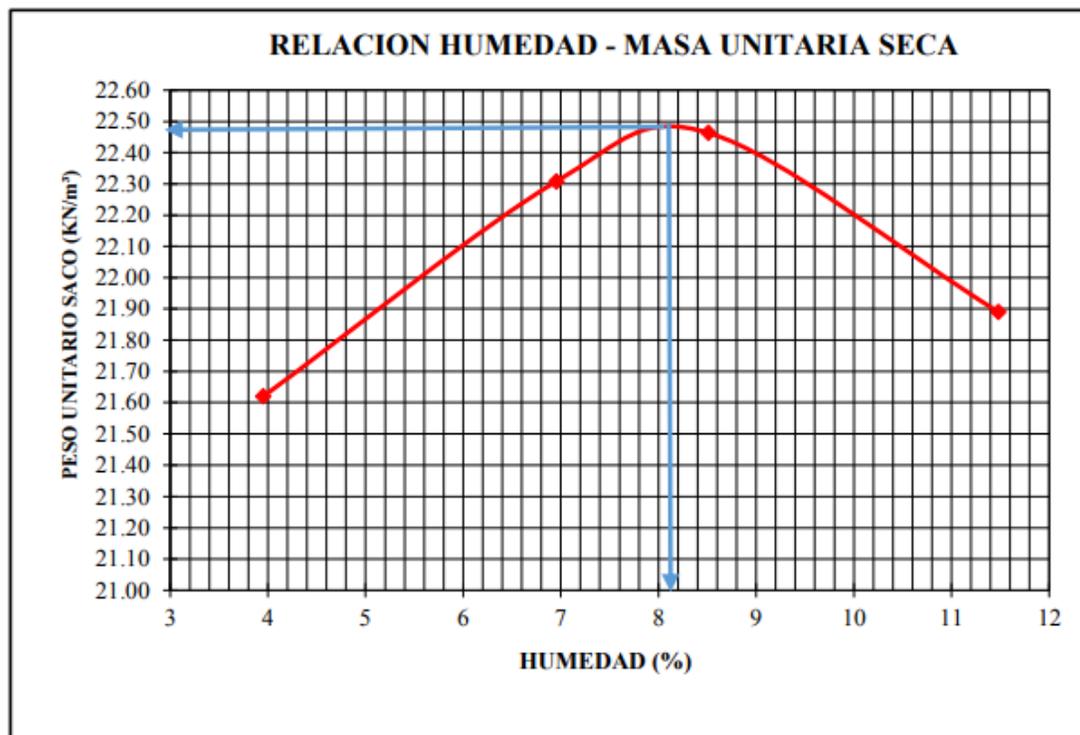
Norma INV - E 142 - 13

Mezcla 30% de RAP y 70% de material granular virgen.

Método Empleado para la Compactación: Método C

Método de la Preparación de la Muestra: Vía Humeda

MUESTRA No.	Humedad (%)	Densidad Húmeda (g/cm ³)	Densidad Seca (g/cm ³)	Peso Unitario Seco (KN/m ³)
1	4.0	2.291	2.204	21.62
2	7.0	2.432	2.274	22.31
3	8.5	2.485	2.290	22.46
4	11.5	2.488	2.231	21.89



Humedad óptima:

8.2 %

Peso Unitario Seco Máximo:

22.45 KN/m³

MEZCLA 50-50:

1.4 RELACION HUMEDAD - DENSIDAD

Método Proctor Modificado

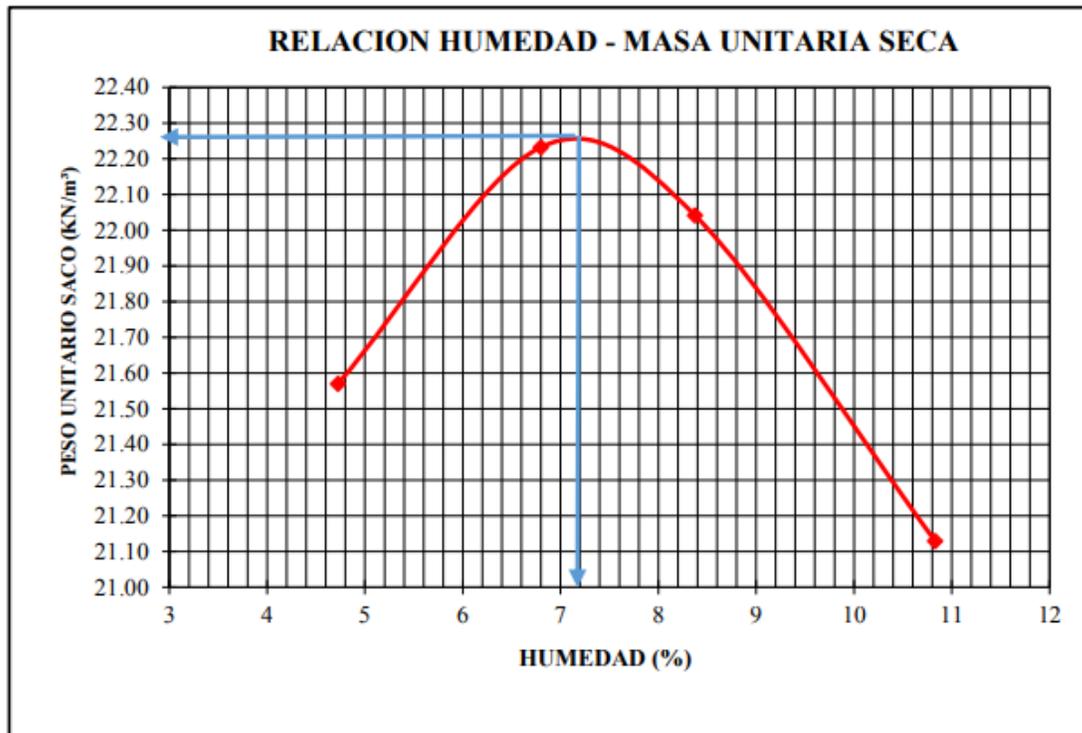
Norma INV - E 142 - 13

Mezcla 50% de RAP y 50% de la material granular virgen.

Método Empleado para la Compactación: Método C

Método de la Preparación de la Muestra: Vía Humeda

MUESTRA No.	Humedad (%)	Densidad Húmeda (g/cm ³)	Densidad Seca (g/cm ³)	Peso Unitario Seco (KN/m ³)
1	4.7	2.303	2.199	21.57
2	6.8	2.420	2.266	22.23
3	8.4	2.435	2.247	22.04
4	10.8	2.387	2.154	21.13



Humedad óptima:

7.2 %

Peso Unitario Seco Máximo:

22.25 KN/m³

10. ANEXO B: DISEÑO DE MEZCLAS OBTENCIÓN DE LLENANTE MEZCLA 100-00 AF-A1

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA- DEFINICIÓN DE LLENANTE

Norma I.N.V. E - 725 -13

Proyecto:	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.	Fecha de fabricación:	10/2/2017
Empresa:	Escuela Colombiana de Ingeniería		
ASFALTO:	Tipo A1	Clasificación por Dureza:	60/70
Agua (%)	2.50%	Relación de Expansión	34.0
		Vida Media (s)	13
AGREGADO:	Material granular virgen proveniente de cantera		

Fecha de ensayo probetas en condición seca: Febrero 13 de 2017

Fecha de ensayo probetas en condición saturada: Febrero 14 de 2016

Densidad, Resistencia - Ensayo de Tensión Indirecta y Resistencia Conservada

	Ident.	% Asfalto Añadido	Altura Promedio (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Densidad seca (g/cm ³)	Carga Máxima (N)		Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada (%)	
								Húmeda	Seca	Húmeda	Seca		
CAL	1CA	2.5	6.797	10.102	1176.5	1099.2	2.018	1363.6		126.4			
	2CA	2.5	6.823	10.112	1168.6	1097.1	2.002	1275.3		117.7			
	3CA	2.5	6.724	10.165	1176.2	1102.3	2.020	1442.1		134.3			
	4CA	2.5	6.683	10.130	1165.4	1091.6	2.027		4041.7		380.1		
	5CA	2.5	6.690	10.149	1169.9	1093.0	2.020		2982.2		279.6		
	6CA	2.5	6.813	10.114	1163.8	1085.6	1.984		3570.8		329.9		
	PROMEDIO							2.012	1360.3	3531.6	126.1	329.9	38.2
NATURAL	1F	2.5	6.798	10.142	1168.9	1095.8	1.995	451.3		41.7			
	2F	2.5	6.751	10.149	1165.3	1090.9	1.998	274.7		25.5			
	3F	2.5	6.735	10.177	1173.6	1092.4	1.994	166.8		15.5			
	4F	2.5	6.739	10.149	1152.8	1077.6	1.977		3325.6		309.6		
	5F	2.5	6.794	10.167	1163.0	1086.3	1.970		3502.2		322.8		
	6F	2.5	6.872	10.146	1170.6	1094.0	1.969		3718.0		339.5		
	PROMEDIO							1.984	297.6	3515.3	27.6	324.0	8.5
CEMENTO	1CE	2.6	6.744	10.142	1181.2	1105.5	2.029	2668.3		248.4			
	2CE	2.6	6.952	10.115	1178.5	1106.4	1.981	2697.8		244.3			
	3CE	2.6	6.795	10.122	1176.3	1104.4	2.020	2844.9		263.3			
	4CE	2.6	6.853	10.064	1177.7	1103.7	2.025		5356.3		494.4		
	5CE	2.6	6.774	10.157	1167.4	1091.4	1.988		5434.7		502.8		
	6CE	2.6	6.822	10.153	1173.2	1097.8	1.988		5464.2		502.2		
	PROMEDIO							2.017	2737.0	5418.4	252.0	499.8	50.4

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \times 10.000$$

ITS = Resistencia a la Tracción Indirecta (kPa)
P = Máxima Carga Aplicada (kN)

h = Altura promedio probeta (cm)
d = Diámetro de la probeta (cm)

OBTENCIÓN DE LLENANTE MEZCLA 85-15 AF-A1

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA- DEFINICIÓN DE LLENANTE

Norma I.N.V. E - 725 -13

Proyecto:	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.				Fecha de fabricación:	2/10/2017
Empresa:	Escuela Colombiana de Ingeniería					
ASFALTO:	Tipo A1	Clasificación por Dureza:		60/70		
Agua (%)	2.50%	Relación de Expansión	34.0	Vida Media (s)	13	
AGREGADO:	Mezcla 15% de RAP y 85% Material Granular Virgen					

Fecha de ensayo probetas en condición seca: Febrero 10 de 2017

Fecha de ensayo probetas en condición saturada: Febrero 13 de 2018

Densidad, Resistencia - Ensayo de Tensión Indirecta y Resistencia Conservada

	Ident.	% Asfalto Añadido	Altura Promedio (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Densidad seca (g/cm³)	Carga Máxima (N)		Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada (%)	
								Húmeda	Seca	Húmeda	Seca		
CEMENTO	1CE	2.6	6.790	10.149	1171.2	1103.8	2.010	1922.8		177.6			
	2CE	2.6	6.760	10.141	1168.8	1101.2	2.017	2344.6		217.7			
	3CE	2.6	6.777	10.149	1170.2	1102.7	2.011	2295.5		212.5			
	4CE	2.6	6.717	10.179	1170.6	1104.8	2.021		4777.5		444.9		
	5CE	2.6	6.871	10.160	1169.8	1105.9	1.985		5670.2		517.1		
	6CE	2.6	6.879	10.152	1178.1	1111.0	1.996		5160.1		470.4		
	PROMEDIO							2.007	2187.6	5202.6	202.6	477.5	42.4
NATURAL	1F	2.6	6.686	10.133	1138.1	1065.7	1.977	323.7		30.4			
	2F	2.6	6.942	10.165	1193.8	1116.6	1.982	588.6		53.1			
	3F	2.6	6.958	10.113	1165.7	1097.6	1.964	578.8		52.4			
	4F	2.6	7.096	10.168	1185.1	1112.0	1.930		4453.7		393.0		
	5F	2.6	6.725	10.140	1164.3	1090.0	2.007		5248.4		490.0		
	6F	2.6	6.767	10.146	1166.2	1094.0	2.000		4237.9		392.9		
	PROMEDIO							1.977	497.0	4646.7	45.3	425.3	10.7
CAL	1CA	2.6	6.833	10.162	1172.7	1103.1	1.991	1128.2		103.4			
	2CA	2.6	6.946	10.144	1170.7	1102.9	1.965	1167.4		105.5			
	3CA	2.6	6.918	10.190	1164.7	1097.3	1.945	1363.6		123.1			
	4CA	2.6	6.859	10.147	1169.8	1101.1	1.985		3296.2		301.5		
	5CA	2.6	6.888	10.152	1176.7	1108.8	1.989		3139.2		285.8		
	6CA	2.6	6.752	10.154	1154.2	1086.4	1.987		3237.3		300.6		
	PROMEDIO							1.977	1219.7	3224.2	110.7	296.0	37.4

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \times 10.000$$

ITS = Resistencia a la Tracción Indirecta (kPa)
P = Máxima Carga Aplicada (kN)

h = Altura promedio probeta (cm)
d = Diámetro de la probeta (cm)

OBTENCIÓN DE LLENANTE MEZCLA 70-30 AF-A1

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA- DEFINICIÓN DE LLENANTE

Norma I.N.V. E - 725 -13

Proyecto:	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.			Fecha de fabricación:	24/02/2017
Empresa:	Escuela Colombiana de Ingeniería				
ASFALTO:	Tipo A1	Clasificación por Dureza:	60/70		
Agua (%)	2.5%	Relación de Expansión	12.9	Vida Media (s)	34
AGREGADO:	Mezcla 30% de RAP y 70% Material Granular Virgen				

Fecha de ensayo probetas en condición seca: Mayo 23 de 2016

Fecha de ensayo probetas en condición saturada: Mayo 24 de 2016

Densidad, Resistencia - Ensayo de Tensión Indirecta y Resistencia Conservada

	Ident.	% Asfalto Añadido	Altura Promedio (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Densidad seca (g/cm ³)	Carga Máxima (N)		Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada (%)	
								Húmeda	Seca	Húmeda	Seca		
CAL	1CA	2.4	7.383	10.142	1159.1	1100.2	1.845	559.2		47.5			
	2CA	2.4	7.384	10.163	1158.9	1104.9	1.845	971.2		82.4			
	3CA	2.4	7.100	10.137	1166.8	1114.0	1.944	765.2		67.7			
	4CA	2.4	7.091	10.141	1158.5	1100.3	1.921		2109.2		186.7		
	5CA	2.4	7.043	10.137	1160.7	1101.7	1.938		1795.2		160.1		
	6CA	2.4	7.140	10.156	1200.7	1144.2	1.978		1510.7		132.6		
	PROMEDIO							1.912	765.2	1805.0	65.9	159.8	41.2
CEMENTO	7CT	2.4	7.204	10.140	1161.0	1108.7	1.906	882.9		77.0			
	8CT	2.4	7.157	10.141	1163.2	1112.4	1.925	706.3		62.0			
	9CT	2.4	7.144	10.138	1160.7	1104.5	1.916	441.5		38.8			
	10CT	2.4	7.206	10.138	1157.5	1099.1	1.890		1618.7		141.1		
	11CT	2.4	7.326	10.131	1159.0	1103.6	1.869		2001.2		171.7		
	12CT	2.4	6.875	10.158	1155.9	1105.1	1.984		1962.0		178.9		
	PROMEDIO							1.915	676.9	1860.6	59.2	163.9	36.2
NATURAL	13F	2.4	7.106	10.132	1159.1	1101.4	1.923	0.0		0.0			
	14F	2.4	7.097	10.152	1172.1	1110.3	1.933	0.0		0.0			
	15F	2.4	7.137	10.122	1171.6	1110.9	1.935	0.0		0.0			
	16F	2.4	7.104	10.158	1167.1	1107.1	1.923		2972.4		262.2		
	17F	2.4	7.179	10.144	1169.8	1111.2	1.916		2874.3		251.3		
	18F	2.4	7.278	10.181	1165.4	1106.6	1.868		2835.1		243.6		
	PROMEDIO							1.916	0.0	2894.0	0.0	252.4	0.0

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \times 10.000$$

ITS = Resistencia a la Tracción Indirecta (kPa)
P = Máxima Carga Aplicada (kN)

h = Altura promedio probeta (cm)
d = Diámetro de la probeta (cm)

OBTENCIÓN DE LLENANTE MEZCLA 50-50 AF-A1

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA- DEFINICIÓN DE LLENANTE
Norma I.N.V. E - 725 -13

Proyecto:	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.				Fecha de fabricación:	1/3/2017
Empresa:	Escuela Colombiana de Ingeniería					
ASFALTO:	Tipo A1	Clasificación por Dureza:		60/70		
Agua (%)	2.5%	Relación de Expansión	12.9	Vida Media (s)	34	
AGREGADO:	Mezcla 50% de RAP y 50% Material Granular Virgen					

Fecha de ensayo probetas en condición seca:	Marzo 01 de 2017
Fecha de ensayo probetas en condición saturada:	Marzo 04 de 2017

Densidad, Resistencia - Ensayo de Tensión Indirecta y Resistencia Conservada

	Ident.	% Asfalto Añadido	Altura Promedio (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Densidad seca (g/cm³)	Carga Máxima (N)		Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada (%)	
								Húmeda	Seca	Húmeda	Seca		
CAL	1CA	2.4	7.450	10.157	1170.9	1122.9	1.860	735.8		61.9			
	2CA	2.4	7.506	10.140	1169.5	1104.4	1.822	843.7		70.6			
	3CA	2.4	7.055	10.146	1164.9	1119.4	1.963	657.3		58.5			
	4CA	2.4	7.014	10.155	1135.4	1089.7	1.918		1922.8		171.9		
	5CA	2.4	7.012	10.142	1150.0	1119.7	1.977		1844.3		165.1		
	6CA	2.4	7.088	10.080	1155.9	1110.4	1.963		1805.0		160.9		
	PROMEDIO							1.917	745.6	1857.4	63.6	165.9	38.4
CEMENTO	7CT	2.4	7.189	10.118	1159.6	1112.6	1.925	902.5		79.0			
	8CT	2.4	7.112	10.135	1156.7	1106.5	1.929	794.6		70.2			
	9CT	2.4	7.050	10.148	1145.3	1098.4	1.926	598.4		53.3			
	10CT	2.4	7.103	10.143	1153.9	1103.6	1.923		1677.5		148.2		
	11CT	2.4	7.349	10.121	1155.7	1106.6	1.872		2570.2		220.0		
	12CT	2.4	6.812	10.125	1168.4	1121.0	2.044		2884.1		266.2		
	PROMEDIO							1.936	765.2	2377.3	67.5	211.5	31.9
NATURAL	13F	2.4	6.965	10.150	1154.2	1104.4	1.960	58.9		5.3			
	14F	2.4	7.034	10.141	1164.8	1116.6	1.965	78.5		7.0			
	15F	2.4	7.105	10.087	1153.7	1104.0	1.944	58.9		5.2			
	16F	2.4	7.059	10.159	1162.7	1116.5	1.952		3237.3		287.4		
	17F	2.4	7.124	10.135	1159.8	1109.9	1.931		2069.9		182.5		
	18F	2.4	7.226	10.137	1168.9	1118.6	1.918		3041.1		264.3		
	PROMEDIO							1.945	65.4	2782.8	5.8	244.7	2.4

$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \times 10.000$	ITS = Resistencia a la Tracción Indirecta (kPa) P = Máxima Carga Aplicada (kN)	h = Altura promedio probeta (cm) d = Diámetro de la probeta (cm)
--	---	---

OBTENCIÓN DE LLENANTE MEZCLA 100-0 AF-B1

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA- DEFINICIÓN DE LLENANTE

Norma L.N.V. E - 725 -13

Proyecto:	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.				Fecha de fabricación:	12/9/2016
Empresa:	Escuela Colombiana de Ingeniería					
ASFALTO:	Tipo B1	Clasificación por Dureza:	60/70			
Agua (%)	2.5%	Relación de Expansión	12.0	Vida Media (s)	15.5	
AGREGADO:	Material Granular virgen					

Fecha de ensayo probetas en condición seca: Diciembre 13 de 2016

Fecha de ensayo probetas en condición saturada: Diciembre 14 de 2016

Densidad, Resistencia - Ensayo de Tensión Indirecta y Resistencia Conservada

	Ident.	% Asfalto Añadido	Altura Promedio (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Densidad seca (g/cm³)	Carga Máxima (N)		Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada (%)	
								Húmeda	Seca	Húmeda	Seca		
CEMENTO	1CE	2.4	7.021	10.167	1166.6	1083.9	1.902		2629.1		234.5		
	2CE	2.4	7.047	10.162	1158.4	1078.0	1.886		2266.1		201.4		
	3CE	2.4	7.019	10.164	1168.0	1088.4	1.911	804.4		71.8			
	4CE	2.4	7.169	10.132	1155.0	1076.4	1.862	696.5		61.0			
	5CE	2.4	7.005	10.164	1168.1	1084.0	1.907	1216.4		108.8			
	6CE	2.4	7.116	10.168	1169.6	1085.2	1.878		1814.9		159.7		
	PROMEDIO							1.891	905.8	2236.7	80.5	198.5	40.6
CAL	1C	2.4	6.820	10.139	1161.1	1075.7	1.954		3011.7		277.3		
	2C	2.4	6.800	10.153	1172.2	1085.3	1.971		2756.6		254.2		
	3C	2.4	6.938	10.120	1166.3	1079.7	1.935	1765.8		160.1			
	4C	2.4	6.838	10.142	1161.6	1077.4	1.950	1942.4		178.3			
	5C	2.4	6.910	10.187	1170.4	1083.5	1.924	1550.0		140.2			
	6C	2.4	6.901	10.109	1167.9	1083.8	1.957		2717.4		248.0		
	PROMEDIO							1.949	1752.7	2828.6	159.5	259.8	61.4
NATURAL	1F	2.4	6.858	10.094	1160.8	1075.8	1.960	598.4		55.0			
	2F	2.4	6.816	10.094	1169.8	1083.0	1.986	1962.0		181.6			
	3F	2.4	6.748	10.144	1171.3	1080.9	1.982	1079.1		100.4			
	4F	2.4	6.894	10.084	1172.2	1084.5	1.970		4198.7		384.5		
	5F	2.4	6.903	10.126	1170.3	1081.3	1.945		4061.3		369.9		
	6F	2.4	6.592	10.054	1132.1	1046.6	2.000		4973.7		477.8		
	PROMEDIO							1.974	1213.2	4411.2	112.3	410.7	27.3

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \times 10.000$$

ITS = Resistencia a la Tracción Indirecta (kPa)
P = Máxima Carga Aplicada (kN)

h = Altura promedio probeta (cm)
d = Diámetro de la probeta (cm)

OBTENCIÓN DE LLENANTE MEZCLA 85-15 AF-B1

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA- DEFINICIÓN DE LLENANTE

Norma I.N.V. E - 725 -13

Proyecto:	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.				Fecha de fabricación:	12/12/2016
Empresa:	Escuela Colombiana de Ingeniería					
ASFALTO:	Tipo B1	Clasificación por Dureza:	60/70			
Agua (%)	2.50%	Relación de Expansión	12.0	Vida Media (s)	16	
AGREGADO:	Mezcla 15% de RAP y 85% Material Granular Virgen					

Fecha de ensayo probetas en condición seca: Diciembre 12 de 2016

Fecha de ensayo probetas en condición saturada: Diciembre 12 de 2016

Densidad, Resistencia - Ensayo de Tensión Indirecta y Resistencia Conservada

	Ident.	% Asfalto Añadido	Altura Promedio (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Densidad seca (g/cm ³)	Carga Máxima (N)		Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada (%)	
								Húmeda	Seca	Húmeda	Seca		
CEMENTO	1CE	2.3	7.022	10.135	1170.1	1076.6	1.900	1314.5		117.6			
	2CE	2.3	6.918	10.086	1166.0	1077.1	1.949	1196.8		109.2			
	3CE	2.3	6.950	10.099	1171.0	1083.0	1.946	1187.0		107.7			
	4CE	2.3	6.942	10.095	1164.4	1075.8	1.936		2413.3		219.2		
	5CE	2.3	7.148	10.130	1167.9	1074.9	1.866		2403.5		211.3		
	6CE	2.3	6.913	10.104	1167.1	1073.4	1.937		2079.7		189.6		
	PROMEDIO							1.922	1232.8	2298.8	111.5	206.7	53.9
CAL	1C	2.3	6.874	10.096	1170.4	1079.3	1.961	1873.7		171.9			
	2C	2.3	6.826	10.129	1166.9	1074.4	1.953	2011.1		185.2			
	3C	2.3	6.914	10.108	1177.5	1088.9	1.963	1942.4		176.9			
	4C	2.3	6.808	10.094	1175.1	1082.2	1.987		2315.2		214.5		
	5C	2.3	6.731	10.128	1164.1	1070.5	1.974		2364.2		220.8		
	6C	2.3	6.786	10.077	1169.4	1076.8	1.990		2138.6		199.1		
	PROMEDIO							1.971	1942.4	2272.7	178.0	211.5	84.2
FILLER	1F	2.4	6.743	10.135	1171.1	1078.7	1.983	784.8		73.1			
	2F	2.4	6.802	10.141	1173.6	1077.9	1.962	539.6		49.8			
	3F	2.4	6.717	10.153	1167.8	1077.9	1.982	676.9		63.2			
	4F	2.4	6.776	10.138	1170.9	1075.9	1.967		5415.1		501.9		
	5F	2.4	6.787	10.132	1166.5	1075.9	1.966		6307.8		584.0		
	6F	2.4	6.710	10.150	1171.1	1079.4	1.988		5179.7		484.2		
	PROMEDIO							1.975	667.1	5634.2	62.0	523.4	11.9

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \times 10.000$$

ITS = Resistencia a la Tracción Indirecta (kPa)
P = Máxima Carga Aplicada (kN)

h = Altura promedio probeta (cm)
d = Diámetro de la probeta (cm)

OBTENCIÓN DE LLENANTE MEZCLA 70-30 AF-B1
ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA- DEFINICIÓN DE LLENANTE
 Norma I.N.V. E - 725 -13

Proyecto:	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.				Fecha de fabricación:	12/2/2016
Empresa:	Escuela Colombiana de Ingeniería					
ASFALTO:	Tipo B1	Clasificación por Dureza:		60/70		
Agua (%)	2.50%	Relación de Expansión	12.0	Vida Media (s)	15.5	
AGREGADO:	Mezcla 30% de RAP y 70% Material Granualr Virgen					

Fecha de ensayo probetas en condición seca:	Mayo 23 de 2016
Fecha de ensayo probetas en condición saturada:	Mayo 24 de 2016

Densidad, Resistencia - Ensayo de Tensión Indirecta y Resistencia Conservada

	Ident.	% Asfalto Añadido	Altura Promedio (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Densidad seca (g/cm³)	Carga Máxima (N)		Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada (%)	
								Húmeda	Seca	Húmeda	Seca		
CEMENTO	1CE	2.5	6.753	10.098	1164.7	1085.1	2.007	1851.1		172.8			
	2CE	2.5	6.743	10.124	1159.4	1080.6	1.991	1965.9		183.3			
	3CE	2.5	6.699	10.082	1166.9	1090.5	2.039	2059.1		194.1			
	4CE	2.5	6.686	10.069	1154.3	1076.3	2.022		3485.5		329.6		
	5CE	2.5	6.668	10.124	1172.4	1096.4	2.043		3667.0		345.9		
	6CE	2.5	7.002	10.134	1156.3	1080.1	1.912		1933.6		173.5		
	PROMEDIO							2.002	1958.7	3028.7	183.4	283.0	64.8
CAL	1C	2.4	6.759	10.062	1167.9	1089.8	2.028	2198.4		205.8			
	2C	2.4	6.790	10.103	1164.9	1083.2	1.990	1522.5		141.3			
	3C	2.4	6.728	10.144	1169.3	1088.7	2.002	1706.0		159.1			
	4C	2.4	6.798	10.095	1172.6	1089.2	2.002		2653.6		246.2		
	5C	2.4	6.822	10.108	1170.4	1093.0	1.997		2994.0		276.4		
	6C	2.4	6.779	10.122	1172.5	1091.5	2.001		3152.0		292.4		
	PROMEDIO							2.003	1809.0	2933.2	168.7	271.7	62.1
NATURAL	1F	2.4	6.751	10.113	1163.2	1081.0	1.994	268.8		25.1			
	2F	2.4	6.891	10.013	1172.9	1092.8	2.014	332.6		30.7			
	3F	2.4	6.891	10.113	1175.3	1091.8	1.973	263.9		24.1			
	4F	2.4	6.649	10.039	1173.0	1089.4	2.070		3166.7		302.0		
	5F	2.4	6.803	10.111	1168.0	1089.1	1.994		3536.5		327.3		
	6F	2.4	6.767	10.076	1163.2	1080.5	2.002		3692.5		344.7		
	PROMEDIO							2.008	288.4	3465.2	26.6	324.7	8.2

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \times 10.000$$

ITS = Resistencia a la Tracción Indirecta (kPa)
 P = Máxima Carga Aplicada (kN)

h = Altura promedio probeta (cm)
 d = Diámetro de la probeta (cm)

OBTENCIÓN DE LLENANTE MEZCLA 50-50 AF-B1

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA- DEFINICIÓN DE LLENANTE

Norma I.N.V. E - 725 -13

Proyecto:	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.				Fecha de fabricación:	10/3/2017
Empresa:	Escuela Colombiana de Ingeniería					
ASFALTO:	Tipo B1	Clasificación por Dureza:	60/70			
Agua (%)	2.50%	Relación de Expansión	12.0	Vida Media (s)	16	
AGREGADO:	Mezcla 50% de RAP y 50% Material Granular Virgen					

Fecha de ensayo probetas en condición seca: Mayo 23 de 2016

Fecha de ensayo probetas en condición saturada: Mayo 24 de 2016

Densidad, Resistencia - Ensayo de Tensión Indirecta y Resistencia Conservada

	Ident.	% Asfalto Añadido	Altura Promedio (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Densidad seca (g/cm³)	Carga Máxima (N)		Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada (%)	
								Húmeda	Seca	Húmeda	Seca		
CEMENTO	1CE	2.4	7.134	10.158	1204.8	1115.6	1.930	1851.1		162.6			
	2CE	2.4	7.115	10.174	1196.0	1118.0	1.933	1965.9		172.9			
	3CE	2.4	7.202	10.157	1188.0	1125.7	1.929	2059.1		179.2			
	4CE	2.4	7.019	10.146	1195.0	1102.2	1.942		3485.5		311.6		
	5CE	2.4	6.964	10.186	1172.4	1094.3	1.929		3667.0		329.1		
	6CE	2.4	6.935	10.153	1166.5	1092.8	1.946		1933.6		174.8		
	PROMEDIO							1.935	1958.7	3028.7	171.6	271.8	63.1
CAL	1C	2.4	7.324	10.141	1187.9	1119.3	1.892	2198.4		188.4			
	2C	2.4	7.296	10.178	1164.9	1092.7	1.841	1522.5		130.5			
	3C	2.4	6.906	10.100	1105.4	1041.5	1.882	1706.0		155.7			
	4C	2.4	7.252	10.155	1172.6	1111.9	1.893		2653.6		229.4		
	5C	2.4	7.326	10.143	1185.4	1115.3	1.884		2994.0		256.5		
	6C	2.4	7.347	10.149	1182.5	1121.5	1.887		3152.0		269.1		
	PROMEDIO							1.880	1809.0	2933.2	158.2	251.7	62.9
NATURAL	1F	2.4	6.964	10.172	1163.2	1088.1	1.923	268.8		24.2			
	2F	2.4	7.274	10.148	1172.9	1112.4	1.891	332.6		28.7			
	3F	2.4	7.214	10.169	1175.3	1103.8	1.884	263.9		22.9			
	4F	2.4	7.184	10.168	1173.0	1115.5	1.912		3166.7		276.0		
	5F	2.4	7.210	10.114	1198.0	1110.0	1.916		3536.5		308.8		
	6F	2.4	7.173	10.153	1195.6	1128.6	1.943		3692.5		322.8		
	PROMEDIO							1.912	288.4	3465.2	25.2	302.5	8.3

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \times 10.000$$

ITS = Resistencia a la Tracción Indirecta (kPa)
P = Máxima Carga Aplicada (kN)

h = Altura promedio probeta (cm)
d = Diámetro de la probeta (cm)

OBTENCIÓN DE LLENANTE MEZCLA 100-0 AF-B2

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA- DEFINICIÓN DE LLENANTE

Norma I.N.V. E - 725 -13

Proyecto:	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.					Fecha de fabricación:	25/11/16
Empresa:	Escuela Colombiana de Ingeniería						
ASFALTO:	Tipo B2	Clasificación por Dureza: 60/70					
Agua (%)	2.50%	Relación de Expansión	18.0	Vida Media (s)	13		
AGREGADO:	Material Granular Virgen proveniente de Cantera						

Fecha de ensayo probetas en condición seca: Noviembre 28 de 2016

Fecha de ensayo probetas en condición saturada: Noviembre 29 de 2016

Densidad, Resistencia - Ensayo de Tensión Indirecta y Resistencia Conservada

	Ident.	% Asfalto Añadido	Altura Promedio (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Densidad seca (g/cm³)	Carga Máxima (N)		Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada (%)
								Húmeda	Seca	Húmeda	Seca	
CAL	1CA	2.6	6.976	10.089	1168.4	1097.1	1.967	784.8		71.0		
	2CA	2.6	6.899	10.102	1166.0	1095.6	1.982	902.5		82.4		
	3CA	2.6	7.025	10.108	1169.7	1099.7	1.951	696.5		62.4		
	4CA	2.6	6.985	10.069	1164.9	1094.8	1.969		2746.8		248.7	
	5CA	2.6	7.046	10.114	1167.4	1094.3	1.933		3070.5		274.3	
	6CA	2.6	7.075	10.095	1166.1	1094.5	1.933		2737.0		244.0	
	PROMEDIO						1.956	794.6	2851.4	72.0	255.6	28.1
NATURAL	1F	2.6	7.065	10.131	1169.1	1099.1	1.930	0.0		0.0		
	2F	2.6	7.145	10.102	1169.1	1100.2	1.921	0.0		0.0		
	3F	2.6	6.981	10.132	1166.6	1096.2	1.948	0.0		0.0		
	4F	2.6	7.050	10.099	1166.8	1097.8	1.944		3158.8		282.5	
	5F	2.6	7.025	10.116	1171.4	1100.1	1.949		3070.5		275.1	
	6F	2.6	6.982	10.126	1170.8	1100.9	1.958		4306.6		387.8	
	PROMEDIO						1.942	0.0	3512.0	0.0	315.1	0.0
CEMENTO	1CE	2.6	7.034	10.122	1169.5	1102.8	1.948	1971.8		176.3		
	2CE	2.6	7.025	10.105	1171.3	1104.7	1.961	2109.2		189.2		
	3CE	2.6	7.058	10.122	1180.6	1114.4	1.962	2030.7		181.0		
	4CE	2.6	7.104	10.115	1174.6	1107.4	1.940		3914.2		346.8	
	5CE	2.6	7.083	10.097	1179.2	1106.8	1.952		4120.2		366.8	
	6CE	2.6	7.062	10.102	1168.6	1103.0	1.949		3953.4		352.8	
	PROMEDIO						1.952	2037.2	3995.9	182.2	355.5	51.2

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \times 10.000$$

ITS = Resistencia a la Tracción Indirecta (kPa)
P = Máxima Carga Aplicada (kN)

h = Altura promedio probeta (cm)
d = Diámetro de la probeta (cm)

OBTENCIÓN DE LLENANTE MEZCLA 85-15 AF-B2

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA- DEFINICIÓN DE LLENANTE
Norma I.N.V. E - 725 -13

Proyecto:	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.				Fecha de fabricación:	2/12/2016
Empresa:	Escuela Colombiana de Ingeniería					
ASFALTO:	Tipo B2	Clasificación por Dureza:		60/70		
Agua (%)	2.5%	Relación de Expansión	18.0	Vida Media (s)	13	
AGREGADO:	Mezcla 15% de RAP y 85% Material Granular Virgen					

Fecha de ensayo probetas en condición seca:	DICIEMBRE 05 de 2016
Fecha de ensayo probetas en condición saturada:	DICIEMBRE 06 de 2016

Densidad, Resistencia - Ensayo de Tensión Indirecta y Resistencia Conservada

	Ident.	% Asfalto Añadido	Altura Promedio (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Densidad seca (g/cm ³)	Carga Máxima (N)		Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada (%)	
								Húmeda	Seca	Húmeda	Seca		
CEMENTO	1CE	2.4	7.060	10.116	1167.4	1102.6	1.943		4473.4		398.7		
	2CE	2.4	7.068	10.096	1168.8	1106.1	1.955		4816.7		429.7		
	3CE	2.4	7.337	10.101	1165.2	1103.4	1.877	1088.9		93.5			
	4CE	2.4	7.201	10.123	1168.1	1105.6	1.908	1559.8		136.2			
	5CE	2.4	7.161	10.111	1169.9	1104.4	1.921	1236.1		108.7			
	6CE	2.4	7.582	10.160	1163.5	1102.5	1.794		2923.4		241.6		
	PROMEDIO							1.900	1294.9	4071.2	112.8	356.7	31.6
CAL	1C	2.4	6.919	10.146	1167.3	1107.4	1.980		3364.8		305.1		
	2C	2.4	7.021	10.103	1168.5	1110.1	1.972		3158.8		283.5		
	3C	2.4	7.042	10.077	1129.4	1071.1	1.907	1520.6		136.4			
	4C	2.4	7.098	10.114	1163.9	1103.6	1.936	1589.2		140.9			
	5C	2.4	7.115	10.093	1168.0	1110.4	1.951	1903.1		168.7			
	6C	2.4	7.041	10.102	1174.2	1174.2	2.081		3050.9		273.1		
	PROMEDIO							1.971	1671.0	3191.5	148.7	287.3	51.8
NATURAL	1F	2.4	7.060	10.179	1162.4	1098.5	1.912	0.0		0.0			
	2F	2.4	7.193	10.120	1047.0	991.5	1.714	0.0		0.0			
	3F	2.4	7.085	10.137	1141.6	1080.5	1.890	0.0		0.0			
	4F	2.4	7.277	10.145	1168.1	1003.4	1.706		3590.5		309.6		
	5F	2.4	7.078	10.156	1170.0	1107.4	1.931		2854.7		252.8		
	6F	2.4	7.023	10.142	1164.7	1103.9	1.946		2717.4		242.9		
	PROMEDIO							1.850	0.0	3054.2	0.0	268.4	0.0

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \times 10.000$$

ITS = Resistencia a la Tracción Indirecta (kPa)
P = Máxima Carga Aplicada (kN)

h = Altura promedio probeta (cm)
d = Diámetro de la probeta (cm)

OBTENCIÓN DE LLENANTE MEZCLA 70-30 AF-B2

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA- DEFINICIÓN DE LLENANTE
Norma I.N.V. E - 725 -13

Proyecto:	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.				Fecha de fabricación:	23/11/2016
Empresa:	Escuela Colombiana de Ingeniería					
ASFALTO:	Tipo B2 Clasificación por Dureza 60/70					
Agua (%)	2.50%	Relación de Expansión	18.0	Vida Media (s)	13	
AGREGADO:	Mezcla 30% de RAP y 70% Material Granualr Virgen					

Fecha de ensayo probetas en condición seca: Mayo 23 de 2016
Fecha de ensayo probetas en condición saturada: Mayo 24 de 2016

Densidad, Resistencia - Ensayo de Tensión Indirecta y Resistencia Conservada

	Ident.	% Asfalto Añadido	Altura Promedio (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Densidad seca (g/cm ³)	Carga Máxima (N)		Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada (%)	
								Húmeda	Seca	Húmeda	Seca		
CEMENTO	1CE	2.4	6.753	10.098	1164.7	1085.1	2.007	2020.9		188.7			
	2CE	2.4	5.993	10.124	1159.4	1080.6	2.240	2148.4		225.4			
	3CE	2.4	6.699	10.082	1166.9	1090.5	2.039	2226.9		209.9			
	4CE	2.4	6.686	10.069	1154.3	1076.3	2.022		3757.2		355.3		
	5CE	2.4	6.668	10.124	1172.4	1096.4	2.043		3963.2		373.8		
	6CE	2.4	7.002	10.134	1156.3	1080.1	1.912		2197.4		197.1		
	PROMEDIO							2.044	2132.0	3306.0	208.0	308.8	67.4
CAL	1C	2.4	6.759	10.062	1167.9	1089.8	2.028	2393.6		224.1			
	2C	2.4	6.790	10.103	1164.9	1083.2	1.990	1677.5		155.7			
	3C	2.4	6.728	10.144	1169.3	1088.7	2.002	1863.9		173.9			
	4C	2.4	6.798	10.095	1172.6	1089.2	2.002		2913.6		270.3		
	5C	2.4	6.822	10.108	1170.4	1093.0	1.997		3306.0		305.2		
	6C	2.4	6.779	10.122	1172.5	1091.5	2.001		3462.9		321.3		
	PROMEDIO							2.003	1978.4	3227.5	184.5	298.9	61.7
NATURAL	1F	2.4	6.751	10.113	1163.2	1081.0	1.994	294.3		27.4			
	2F	2.4	6.891	10.013	1172.9	1092.8	2.014	421.8		38.9			
	3F	2.4	6.891	10.113	1175.3	1091.8	1.973	294.3		26.9			
	4F	2.4	6.649	10.039	1173.0	1089.4	2.070		3384.5		322.8		
	5F	2.4	6.803	10.111	1168.0	1089.1	1.994		3894.6		360.5		
	6F	2.4	6.767	10.076	1163.2	1080.5	2.002		4031.9		376.4		
	PROMEDIO							2.008	336.8	3770.3	31.1	353.2	8.8

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \times 10.000$$

ITS = Resistencia a la Tracción Indirecta (kPa)
P = Máxima Carga Aplicada (kN)

h = Altura promedio probeta (cm)
d = Diámetro de la probeta (cm)

OBTENCIÓN DE LLENANTE MEZCLA 50-50 AF-B2

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA- DEFINICIÓN DE LLENANTE

Norma I.N.V. E - 725 -13

Proyecto:	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.				Fecha de fabricación:	11/11/2016
Empresa:	Escuela Colombiana de Ingeniería					
ASFALTO:	Tipo B2	Clasificación por Dureza:	60/70			
Agua (%)	2.50%	Relación de Expansión	18.0	Vida Media (s)	13.1	
AGREGADO:	Mezcla 50% de RAP y 50% Material Granular Virgen					

Fecha de ensayo probetas en condición seca: Mayo 23 de 2016

Fecha de ensayo probetas en condición saturada: Mayo 24 de 2016

Densidad, Resistencia - Ensayo de Tensión Indirecta y Resistencia Conservada

	Ident.	% Asfalto Añadido	Altura Promedio (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Densidad seca (g/cm³)	Carga Máxima (N)		Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada (%)	
								Húmeda	Seca	Húmeda	Seca		
CAL	1CA	2.4	7.450	10.157	1198.8	1141.8	1.892	1069.3		90.0			
	2CA	2.4	7.506	10.140	1185.0	1134.1	1.871	1883.5		157.6			
	3CA	2.4	7.055	10.146	1112.8	1059.2	1.857	1098.7		97.7			
	4CA	2.4	7.014	10.155	1112.4	1056.4	1.860		4081.0		364.8		
	5CA	2.4	7.012	10.142	1123.8	1068.6	1.886		3776.9		338.1		
	6CA	2.4	7.088	10.080	1120.6	1073.2	1.898		3757.2		334.8		
	PROMEDIO							1.877	1350.5	3871.7	115.1	345.9	33.3
CEMENTO	7CT	2.4	7.189	10.118	1118.1	1074.4	1.859	1608.8		140.8			
	8CT	2.4	7.112	10.135	1118.5	1076.7	1.877	1540.2		136.0			
	9CT	2.4	7.050	10.148	1114.5	1071.9	1.880	1285.1		114.4			
	10CT	2.4	7.103	10.143	1117.4	1074.4	1.872		4512.6		398.8		
	11CT	2.4	7.349	10.121	1155.6	1110.5	1.878		3786.7		324.1		
	12CT	2.4	6.812	10.125	1064.7	1017.4	1.855		4159.4		384.0		
	PROMEDIO							1.870	1478.0	4152.9	130.4	368.9	35.3
NATURAL	13F	2.4	6.965	10.150	1118.9	1072.5	1.903	225.6		20.3			
	14F	2.4	7.034	10.141	1130.9	1084.9	1.910	225.6		20.1			
	15F	2.4	7.105	10.087	1120.1	1067.5	1.880	215.8		19.2			
	16F	2.4	7.059	10.159	1128.2	1084.4	1.896		4512.6		400.6		
	17F	2.4	7.124	10.135	1140.1	1095.5	1.906		3727.8		328.7		
	18F	2.4	7.226	10.137	1151.6	1104.5	1.894		3384.5		294.1		
	PROMEDIO							1.898	222.4	3875.0	19.9	341.2	5.8

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \times 10.000$$

ITS = Resistencia a la Tracción Indirecta (kPa)
P = Máxima Carga Aplicada (kN)

h = Altura promedio probeta (cm)
d = Diámetro de la probeta (cm)

OBTENCIÓN DE ÓPTIMO DE ASFALTO ESPUMADO MEZCLA 100-00 AF-A1

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

Norma I.N.V. E - 725 -13

Proyecto:	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.	Fecha de fabricación:	10/2/2017
Empresa:	Escuela Colombiana de Ingeniería		
ASFALTO:	Tipo A1	Clasificación por Dureza:	60/70
Agua (%)	2.50%	Relación de Expansión	34.0
		Vida Media (s)	13
AGREGADO:	Material granular de aporte proveniente de la Cantera CTU		
Llenante:	Cemento		

Fecha de ensayo probetas en condición seca: 23/01/2017

Fecha de ensayo probetas en condición saturada: 24/01/2017

Densidad, Resistencia - Ensayo de Tensión Indirecta y Resistencia Conservada

Ident.	% Asfalto Añadido	Altura Promedio (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Densidad seca (g/cm³)	Carga Máxima (N)		Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada (%)
							Húmeda	Seca	Húmeda	Seca	
241	2.3	6.797	10.102	1170.0	1108.4	2.035	88.3		8.2		
242	2.3	6.823	10.112	1174.6	1110.5	2.027	0.0		0.0		
243	2.3	6.724	10.165	1179.9	1112.9	2.040	0.0		0.0		
244	2.3	6.683	10.130	1162.4	1098.3	2.039		2972.4		279.5	
245	2.3	6.690	10.149	1175.0	1106.2	2.044		3178.4		298.0	
246	2.3	6.813	10.114	1172.6	1099.8	2.010		3227.5		298.2	
PROMEDIO						2.032	29.4	3126.1	2.7	291.9	0.9
281	2.7	6.798	10.142	1185.1	1128.2	2.054	1608.8		148.6		
282	2.7	6.751	10.149	1172.5	1115.3	2.042	1481.3		137.6		
283	2.7	6.735	10.177	1181.0	1126.2	2.056	1559.8		144.9		
284	2.7	6.739	10.149	1167.3	1108.2	2.033		2992.1		278.5	
285	2.7	6.794	10.167	1174.8	1115.5	2.023		3786.7		349.0	
286	2.7	6.872	10.146	1178.5	1113.7	2.005		2668.3		243.6	
PROMEDIO						2.035	1550.0	3149.0	143.7	290.4	49.5
301	2.9	6.744	10.142	1169.2	1112.5	2.042	2246.5		209.1		
302	2.9	6.952	10.115	1170.7	1114.1	1.994	2550.6		230.9		
303	2.9	6.795	10.122	1183.0	1127.0	2.061	2413.3		223.4		
304	2.9	6.853	10.064	1159.0	1101.1	2.020		3521.8		325.1	
305	2.9	6.774	10.157	1222.6	1164.2	2.121		3884.8		359.4	
306	2.9	6.822	10.153	1170.7	1110.4	2.010		4159.4		382.3	
PROMEDIO						2.042	2403.5	3855.3	221.1	355.6	62.2

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \times 10.000$$

ITS = Resistencia a la Tracción Indirecta (kPa)
P = Máxima Carga Aplicada (kN)

h = Altura promedio probeta (cm)
d = Diámetro de la probeta (cm)

OBTENCIÓN DE ÓPTIMO DE ASFALTO ESPUMADO MEZCLA 85-15 AF-A1

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

Norma I.N.V. E - 725 -13

Proyecto:	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.	Fecha de fabricación:	3/3/2017
Empresa:	Escuela Colombiana de Ingeniería		
ASFALTO:	Tipo A1	Clasificación por Dureza:	60/70
Agua (%)	2.5	Relación de Expansión	34.0
		Vida Media (s)	13
AGREGADO:	Mezcla 15% de RAP y 85% Material Granular Virgen		
LLenante:	Cemento		

Fecha de ensayo probetas en condición seca: 3/3/2017

Fecha de ensayo probetas en condición saturada: 3/3/2017

Densidad, Resistencia - Ensayo de Tensión Indirecta y Resistencia Conservada

Ident.	% Asfalto Añadido	Altura Promedio (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Densidad seca (g/cm³)	Carga Máxima (N)		Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada (%)
							Húmeda	Seca	Húmeda	Seca	
241	2.4	6.894	10.146	1173.1	1115.8	2.002	2432.9		221.4		
242	2.4	6.854	10.149	1173.7	1120.5	2.021	1775.6		162.5		
243	2.4	6.839	10.160	1174.0	1117.3	2.015	2236.7		204.9		
244	2.4	6.847	10.157	1173.2	1119.1	2.017		4512.6		413.1	
245	2.4	6.741	10.170	1173.4	1123.5	2.052		3855.3		358.0	
246	2.4	6.734	10.173	1175.5	1119.3	2.045		3580.7		332.7	
PROMEDIO						2.025	2148.4	3982.9	196.3	367.9	53.4
281	2.8	6.813	10.125	1155.3	1122.5	2.046	2138.6		197.4		
282	2.8	6.897	10.107	1172.5	1109.0	2.004	2609.5		238.3		
283	2.8	6.945	10.139	1165.8	1111.1	1.982	2452.5		221.7		
284	2.8	6.853	10.182	1158.8	1110.7	1.990		4267.4		389.3	
285	2.8	6.853	10.163	1170.4	1115.9	2.007		2982.2		272.6	
286	2.8	7.020	10.157	1156.0	1109.8	1.951		4424.3		395.1	
PROMEDIO						1.997	2400.2	3891.3	219.1	352.3	62.2
301	3.0	6.765	10.172	1171.7	1109.5	2.019	2275.9		210.6		
302	3.0	6.894	10.179	1173.3	1110.4	1.980	1913.0		173.6		
303	3.0	6.893	10.168	1166.7	1114.7	1.992	1628.5		147.9		
304	3.0	6.811	10.144	1169.2	1111.9	2.020		3776.9		348.0	
305	3.0	6.669	10.190	1150.3	1121.5	2.062		2962.6		277.6	
306	3.0	6.804	10.180	1169.9	1117.6	2.018		3374.6		310.2	
PROMEDIO						2.015	1939.1	3371.4	177.4	311.9	56.9

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \times 10.000$$

ITS = Resistencia a la Tracción Indirecta (kPa)
P = Máxima Carga Aplicada (kN)

h = Altura promedio probeta (cm)
d = Diámetro de la probeta (cm)

OBTENCIÓN DE ÓPTIMO DE ASFALTO ESPUMADO MEZCLA 70-30 AF-A1

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

Norma I.N.V. E - 725 -13

Proyecto:	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.	Fecha de fabricación:	21/03/201
Empresa:	Escuela Colombiana de Ingeniería		
ASFALTO:	Tipo A1	Clasificación por Dureza:	60/70
Agua (%)	2.5%	Relación de Expansión	12.9
		Vida Media (s)	34
AGREGADO:	Mezcla 30% de RAP y 70% Material Granular Virgen		
LLenante:	Cal		

Fecha de ensayo probetas en condición seca:	24/03/2017
Fecha de ensayo probetas en condición saturada:	25/03/2017

Densidad, Resistencia - Ensayo de Tensión Indirecta y Resistencia Conservada

Ident.	% Asfalto Añadido	Altura Promedio (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Densidad seca (g/cm ³)	Carga Máxima (N)		Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada (%)
							Húmeda	Seca	Húmeda	Seca	
241	2.4	7.301	10.141	1159.7	1106.1	1.876	745.6		64.1		
242	2.4	7.093	10.156	1160.9	1109.3	1.931	637.7		56.4		
243	2.4	7.349	10.138	1166.8	1116.2	1.882	569.0		48.6		
244	2.4	7.284	10.141	1160.2	1111.5	1.889		1932.6		166.6	
245	2.4	7.234	10.140	1164.5	1119.6	1.917		2011.1		174.5	
246	2.4	7.265	10.161	1163.3	1112.4	1.888		1844.3		159.1	
PROMEDIO						1.897	650.7	1929.3	56.4	166.7	33.8
281	2.8	7.241	10.143	1178.1	1125.0	1.923	549.4		47.6		
282	2.8	7.274	10.144	1165.3	1120.4	1.906	696.5		60.1		
283	2.8	7.235	10.144	1156.1	1111.4	1.901	637.7		55.3		
284	2.8	7.419	10.145	1162.6	1119.4	1.867		2354.4		199.2	
285	2.8	7.276	10.127	1164.0	1116.1	1.904		2256.3		194.9	
286	2.8	7.173	10.153	1151.4	1104.9	1.903		1952.2		170.7	
PROMEDIO						1.901	627.8	2187.6	54.3	188.3	28.9
301	3.0	7.471	10.131	1163.8	1117.7	1.856	676.9		56.9		
302	3.0	7.168	10.154	1160.5	1115.5	1.922	696.5		60.9		
303	3.0	7.279	10.128	1163.4	1120.2	1.910	529.7		45.7		
304	3.0	7.309	10.152	1153.4	1105.6	1.869		2138.6		183.5	
305	3.0	7.455	10.149	1171.4	1125.3	1.866		2432.9		204.7	
306	3.0	7.389	10.177	1156.3	1112.3	1.851		2256.3		191.0	
PROMEDIO						1.879	634.4	2275.9	54.5	193.1	28.2

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \times 10.000$$

ITS = Resistencia a la Tracción Indirecta (kPa)
P = Máxima Carga Aplicada (kN)

h = Altura promedio probeta (cm)
d = Diámetro de la probeta (cm)

OBTENCIÓN DE ÓPTIMO DE ASFALTO ESPUMADO MEZCLA 50-50 AF-A1

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

Norma I.N.V. E - 725 -13

Proyecto:	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.	Fecha de fabricación:	17/03/2017
Empresa:	Escuela Colombiana de Ingeniería		
ASFALTO:	Tipo A1	Clasificación por Dureza:	60/70
Agua (%)	2.5%	Relación de Expansión	12.9
AGREGADO:	Mezcla 50% de RAP y 50% Material Granular Virgen		
Llenante:	Cal		

Fecha de ensayo probetas en condición seca:	20/03/2017
Fecha de ensayo probetas en condición saturada:	21/03/2017

Densidad, Resistencia - Ensayo de Tensión Indirecta y Resistencia Conservada

Ident.	% Asfalto Añadido	Altura Promedio (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Densidad seca (g/cm³)	Carga Máxima (N)		Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada (%)
							Húmeda	Seca	Húmeda	Seca	
241	2.6	7.175	10.113	1166.6	1120.5	1.944	853.5		74.9		
242	2.6	7.133	10.150	1158.0	1113.2	1.929	627.8		55.2		
243	2.6	7.175	10.143	1164.9	1119.9	1.932	814.2		71.2		
244	2.6	7.220	10.160	1173.3	1129.9	1.931		2599.7		225.6	
245	2.6	7.210	10.148	1159.1	1118.4	1.918		2570.2		223.6	
246	2.6	7.154	10.166	1167.8	1121.3	1.931		2403.5		210.4	
PROMEDIO						1.931	765.2	2524.4	67.1	219.9	30.5
281	2.8	7.406	10.109	1151.7	1004.1	1.689	814.2		69.2		
282	2.8	7.303	10.134	1173.0	1131.4	1.921	833.9		71.7		
283	2.8	7.325	10.117	1155.3	1112.9	1.890	961.4		82.6		
284	2.8	7.319	10.101	1168.0	1126.4	1.920		1942.4		167.3	
285	2.8	7.230	10.106	1158.1	1113.2	1.920		1952.2		170.1	
286	2.8	7.373	10.115	1163.1	1120.6	1.891		2060.1		175.9	
PROMEDIO						1.872	869.8	1984.9	74.5	171.1	43.6
301	3.0	7.617	10.080	1158.3	1116.1	1.836	981.0		81.3		
302	3.0	7.484	10.110	1159.7	1117.6	1.860	1187.0		99.9		
303	3.0	7.627	10.073	1155.9	1113.8	1.833	912.3		75.6		
304	3.0	7.545	10.111	1165.2	1120.2	1.849		1932.6		161.3	
305	3.0	7.599	10.095	1154.5	1110.5	1.826		2128.8		176.7	
306	3.0	7.492	10.099	1153.9	1110.0	1.850		1765.8		148.6	
PROMEDIO						1.842	1026.8	1942.4	85.6	162.2	52.8

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \times 10.000$$

ITS = Resistencia a la Tracción Indirecta (kPa)
P = Máxima Carga Aplicada (kN)

h = Altura promedio probeta (cm)
d = Diámetro de la probeta (cm)

OBTENCIÓN DE ÓPTIMO DE ASFALTO ESPUMADO MEZCLA 100-0 AF-B1

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

Norma I.N.V. E - 725 -13

Proyecto:	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.				Fecha de fabricación:	30/1/2017
Empresa:	Escuela Colombiana de Ingeniería					
ASFALTO:	Tipo B1	Clasificación por Dureza:	60/70			
Agua (%)	2.5%	Relación de Expansión	12.0	Vida Media (s)	15.5	
AGREGADO:	Material Granular virgen					
Llenante:	Cal					

Fecha de ensayo probetas en condición seca: 30/01/2017

Fecha de ensayo probetas en condición saturada: 31/01/2017

Densidad, Resistencia - Ensayo de Tensión Indirecta y Resistencia Conservada

Ident.	% Asfalto Añadido	Altura Promedio (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Densidad seca (g/cm ³)	Carga Máxima (N)		Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada (%)
							Húmeda	Seca	Húmeda	Seca	
221	2.2	6.580	10.148	1148.8	1065.5	2.002	1039.9		99.1		
222	2.2	6.763	10.145	1161.1	1080.9	1.978	755.4		70.1		
223	2.2	6.912	10.166	1172.3	1091.7	1.946	1520.6		137.8		
224	2.2	6.790	10.144	1163.1	1089.3	1.985		3100.0		286.5	
225	2.2	6.766	10.158	1169.8	1096.1	1.999		2158.2		199.9	
226	2.2	6.667	10.179	1169.9	1089.7	2.009		2678.1		251.2	
PROMEDIO						1.986	1105.3	2645.4	102.3	245.9	41.6
261	2.6	6.948	10.137	1171.3	1099.9	1.962	1010.4		91.3		
262	2.6	6.677	10.149	1169.4	1090.4	2.019	951.6		89.4		
263	2.6	7.119	10.147	1163.7	1090.9	1.895	735.8		64.8		
264	2.6	6.922	10.185	1163.9	1083.9	1.922		2393.6		216.1	
265	2.6	6.751	10.159	1171.7	1092.6	1.997		2933.2		272.3	
266	2.6	6.926	10.141	1160.4	1084.9	1.939		1363.6		123.6	
PROMEDIO						1.956	899.3	2230.1	81.9	204.0	40.1
281	2.8	6.765	10.172	1171.7	1093.2	1.989	990.8		91.7		
282	2.8	6.894	10.173	1173.3	1101.6	1.966	735.8		66.8		
283	2.8	6.868	10.158	1166.7	1093.0	1.964	657.3		60.0		
284	2.8	6.811	10.144	1169.2	1100.4	1.999		2452.5		226.0	
285	2.8	6.669	10.140	1150.3	1076.4	1.999		2364.2		222.6	
286	2.8	6.804	10.180	1169.9	1097.1	1.981		2521.2		231.7	
PROMEDIO						1.983	794.6	2446.0	72.8	226.8	32.1

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \times 10.000$$

ITS = Resistencia a la Tracción Indirecta (kPa)
P = Máxima Carga Aplicada (kN)

h = Altura promedio probeta (cm)
d = Diámetro de la probeta (cm)

OBTENCIÓN DE ÓPTIMO DE ASFALTO ESPUMADO MEZCLA 85-15 AF-B1

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

Norma I.N.V. E - 725 -13

Proyecto:	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.	Fecha de fabricación:	30/1/2017
Empresa:	Escuela Colombiana de Ingeniería		
ASFALTO:	Tipo B1	Clasificación por Dureza:	60/70
Agua (%)	2.50%	Relación de Expansión	12.0
		Vida Media (s)	15.5
AGREGADO:	Mezcla 15% de RAP y 85% Material Granular Virgen		
LLenante:	Cal		

Fecha de ensayo probetas en condición seca: 30/01/2017

Fecha de ensayo probetas en condición saturada: 31/01/2017

Densidad, Resistencia - Ensayo de Tensión Indirecta y Resistencia Conservada

Ident.	% Asfalto Añadido	Altura Promedio (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Densidad seca (g/cm³)	Carga Máxima (N)		Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada (%)
							Húmeda	Seca	Húmeda	Seca	
221	2.2	6.956	10.184	1163.5	1098.3	1.938	696.5		62.6		
222	2.2	6.876	10.196	1164.8	1100.6	1.960	1049.7		95.3		
223	2.2	6.885	10.190	1164.9	1098.1	1.956	824.0		74.8		
224	2.2	7.021	10.156	1169.2	1109.0	1.950		2687.9		240.0	
225	2.2	6.952	10.146	1167.1	1099.6	1.957		3090.2		278.9	
226	2.2	6.964	10.173	1165.1	1103.4	1.949		2658.5		238.9	
PROMEDIO						1.952	856.7	2812.2	77.6	252.6	30.7
261	2.6	6.887	10.167	1155.5	1097.5	1.963	1638.3		149.0		
262	2.6	7.007	10.183	1176.6	1118.2	1.960	1834.5		163.7		
263	2.6	7.069	10.165	1171.5	1141.1	0.199	981.0		86.9		
264	2.6	7.185	10.158	1167.3	1104.6	1.897		3139.2		273.8	
265	2.6	6.825	10.139	1114.2	1052.1	1.909		2746.8		252.7	
266	2.6	7.253	10.159	1160.4	1101.1	1.873		2413.3		208.5	
PROMEDIO						1.633	1484.6	2766.4	133.2	245.0	54.4
281	2.8	6.971	10.161	1164.2	1108.1	1.960	725.9		65.2		
282	2.8	6.991	10.174	1172.9	1115.6	1.963	843.7		75.5		
283	2.8	7.120	10.175	1171.3	1119.4	1.934	814.2		71.6		
284	2.8	7.081	10.166	1167.3	1109.5	1.931		3247.1		287.2	
285	2.8	7.048	10.168	1173.3	1112.4	1.944		2835.1		251.8	
286	2.8	7.037	10.129	1170.9	1112.4	1.962		2177.8		194.5	
PROMEDIO						1.949	794.6	2753.3	70.8	244.5	28.9

$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \times 10.000$	ITS = Resistencia a la Tracción Indirecta (kPa) P = Máxima Carga Aplicada (kN)	h = Altura promedio probeta (cm) d = Diámetro de la probeta (cm)
--	---	---

OBTENCIÓN DE ÓPTIMO DE ASFALTO ESPUMADO MEZCLA 70-30 AF-B1

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

Norma I.N.V. E - 725 -13

Proyecto:	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.				Fecha de fabricación:	30/1/2017
Empresa:	Escuela Colombiana de Ingeniería					
ASFALTO:	Tipo B1	Clasificación por Dureza:		60/70		
Agua (%)	2.50%	Relación de Expansión	12.0	Vida Media (s)	15.5	
AGREGADO:	Mezcla 30% de RAP y 70% Material Granualr Virgen					
LLenante:	Cemento					

Fecha de ensayo probetas en condición seca: 30/01/2017

Fecha de ensayo probetas en condición saturada: 31/01/2017

Densidad, Resistencia - Ensayo de Tensión Indirecta y Resistencia Conservada

Ident.	% Asfalto Añadido	Altura Promedio (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Densidad seca (g/cm³)	Carga Máxima (N)		Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada (%)
							Húmeda	Seca	Húmeda	Seca	
221	2.2	7.010	10.207	1171.6	1123.8	1.960	1373.4		122.2		
222	2.2	6.903	10.147	1154.4	1104.9	1.979	1206.6		109.7		
223	2.2	7.056	10.133	1172.3	1125.2	1.977	1579.4		140.6		
224	2.2	7.083	10.185	1175.1	1123.5	1.947		3119.6		275.3	
225	2.2	7.294	10.141	1169.3	1113.6	1.890		3178.4		273.6	
226	2.2	7.052	10.144	1172.1	1124.9	1.974		2776.2		247.1	
PROMEDIO						1.955	1386.5	3024.8	124.2	265.3	46.8
261	2.6	6.960	10.173	1171.8	1120.0	1.980	2246.5		202.0		
262	2.6	6.887	10.172	1166.0	1118.9	1.999	1863.9		169.4		
263	2.6	6.870	10.147	1172.8	1118.7	2.014	2207.3		201.6		
264	2.6	6.999	10.141	1173.9	1119.5	1.980		3737.6		335.2	
265	2.6	7.050	10.183	1167.2	1111.7	1.937		2756.6		244.5	
266	2.6	6.897	10.167	1170.7	1115.1	1.992		4208.5		382.1	
PROMEDIO						1.984	2105.9	3567.6	191.0	320.6	59.6
281	2.8	6.965	10.149	1166.8	1115.1	1.979	1863.9		167.9		
282	2.8	7.031	10.169	1189.1	1136.7	1.991	1795.2		159.8		
283	2.8	6.777	10.142	1152.6	1097.5	2.005	1579.4		146.3		
284	2.8	6.925	10.149	1157.8	1098.6	1.961		3835.7		347.5	
285	2.8	6.926	10.140	1165.9	1114.2	1.992		3561.0		322.8	
286	2.8	7.027	10.160	1173.3	1121.4	1.968		3570.8		318.4	
PROMEDIO						1.983	1746.2	3655.9	158.0	329.6	47.9

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \times 10.000$$

ITS = Resistencia a la Tracción Indirecta (kPa)
P = Máxima Carga Aplicada (kN)

h = Altura promedio probeta (cm)
d = Diámetro de la probeta (cm)

OBTENCIÓN DE ÓPTIMO DE ASFALTO ESPUMADO MEZCLA 50-50 AF-B1

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

Norma I.N.V. E - 725 -13

Proyecto:	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.	Fecha de fabricación:
Empresa:	Escuela Colombiana de Ingeniería	
ASFALTO:	Tipo B1 Clasificación por Dureza: 60/70	
Agua (%)	2.50%	Relación de Expansión 12.0 Vida Media (s) 16
AGREGADO:	Mezcla 50% de RAP y 50% Material Granualr Virgen	
Llenante:	Cemento	

Fecha de ensayo probetas en condición seca: 20/03/2017

Fecha de ensayo probetas en condición saturada: 21/03/2017

Densidad, Resistencia - Ensayo de Tensión Indirecta y Resistencia Conservada

Ident.	% Asfalto Añadido	Altura Promedio (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Densidad seca (g/cm³)	Carga Máxima (N)		Resistencia ITS (kPa)		Resistencia Conservada (%)
							Húmeda	Seca	Húmeda	Seca	
221	2.2	6.777	10.149	1167.3	1113.0	2.030	1648.1		152.6		
222	2.2	6.753	10.151	1169.7	1116.8	2.044	2746.8		255.1		
223	2.2	6.808	10.152	1174.9	1116.6	2.026	2501.6		230.4		
224	2.2	7.051	10.146	1183.7	1127.2	1.977		4787.3		426.0	
225	2.2	6.740	10.161	1171.1	1115.1	2.040		3727.8		346.5	
226	2.2	6.740	10.147	1166.9	1110.1	2.037		4316.4		401.8	
PROMEDIO						2.026	2298.8	4277.2	212.7	391.4	54.3
261	2.6	6.703	10.136	1164.1	1107.7	2.048	2119.0		198.5		
262	2.6	6.723	10.175	1177.4	1123.5	2.055	2060.1		191.7		
263	2.6	6.780	10.119	1165.3	1108.1	2.032	1805.0		167.5		
264	2.6	6.692	10.166	1168.5	1112.1	2.048		5621.1		526.0	
265	2.6	6.787	10.142	1169.9	1114.0	2.032		4944.2		457.3	
266	2.6	6.848	10.143	1168.7	1113.4	2.013		5601.5		513.5	
PROMEDIO						2.038	1994.7	5389.0	185.9	498.9	37.3
281	2.8	6.824	10.160	1175.3	1118.3	2.022	1353.8		124.3		
282	2.8	6.831	10.132	1175.0	1119.9	2.034	2275.9		209.4		
283	2.8	6.867	10.132	1173.3	1120.3	2.024	2040.5		186.7		
284	2.8	6.864	10.165	1175.0	1122.6	2.015		5532.8		504.8	
285	2.8	6.738	10.161	1155.3	1100.8	2.015		4326.2		402.3	
286	2.8	6.833	10.137	1166.1	1116.0	2.024		4963.9		456.3	
PROMEDIO						2.022	1890.1	4941.0	173.5	454.5	38.2

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \times 10.000$$

ITS = Resistencia a la Tracción Indirecta (kPa)
P = Máxima Carga Aplicada (kN)

h = Altura promedio probeta (cm)
d = Diámetro de la probeta (cm)

OBTENCIÓN DE ÓPTIMO DE ASFALTO ESPUMADO MEZCLA 100-00 AF-B2

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

Norma I.N.V. E - 725 -13

Proyecto:	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.				Fecha de fabricación:	20/01/2017
Empresa:	Escuela Colombiana de Ingeniería					
ASFALTO:	Tipo B2	Clasificación por Dureza:		60/70		
Agua (%)	0.0	Relación de Expansión	18.0	Vida Media (s)	13.1	
AGREGADO:	Material Granular Virgen proveniente de cantera					
LLenante:	Cemento					

Fecha de ensayo probetas en condición seca: 23/01/2017

Fecha de ensayo probetas en condición saturada: 24/01/2017

Densidad, Resistencia - Ensayo de Tensión Indirecta y Resistencia Conservada

Ident.	% Asfalto Añadido	Altura Promedio (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Densidad seca (g/cm³)	Carga Máxima (N)		Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada (%)
							Húmeda	Seca	Húmeda	Seca	
282	2.7	7.089	10.148	1172.2	1115.6	1.946	941.8		83.3		
281	2.7	7.237	10.150	1186.9	1128.5	1.927	1393.0		120.7		
283	2.7	7.139	10.152	1170.6	1113.1	1.926	1422.5		125.0		
284	2.7	7.353	10.151	1180.6	1123.0	1.887		4071.2		347.3	
285	2.7	7.161	10.164	1181.1	1123.8	1.934		3629.7		317.5	
286	2.7	7.389	10.164	1224.4	1163.9	1.942		3551.2		301.1	
PROMEDIO						1.927	1252.4	3750.7	109.7	321.9	34.1
241	2.3	7.235	10.153	1215.9	1157.8	1.977	1903.1		164.9		
242	2.3	6.810	10.192	1209.5	1148.4	2.067	1863.9		171.0		
243	2.3	7.186	10.146	1214.3	1150.1	1.980	1177.2		102.8		
244	2.3	7.318	10.179	1246.3	1181.8	1.985		2795.9		239.0	
245	2.3	7.285	10.141	1243.9	1183.1	2.011		2992.1		257.9	
245	2.3	7.130	10.165	1232.9	1170.7	2.023		4002.5		351.6	
PROMEDIO						2.007	1648.1	3263.5	146.2	282.8	51.7
31	2.9	7.423	10.147	1181.6	1123.0	1.871	1628.5		137.6		
32	2.9	7.353	10.156	1161.2	1105.4	1.856	1510.7		128.8		
33	2.9	7.346	10.132	1164.0	1107.0	1.869	1314.5		112.4		
34	2.9	7.549	10.153	1213.2	1153.7	1.888		3306.0		274.6	
35	2.9	7.503	10.151	1180.0	1121.8	1.848		3737.6		312.4	
36	2.9	7.488	10.106	1213.2	1130.5	1.882		3070.5		258.3	
PROMEDIO						1.869	1484.6	3371.4	126.3	281.8	44.8

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \times 10.000$$

ITS = Resistencia a la Tracción Indirecta (kPa)
P = Máxima Carga Aplicada (kN)

h = Altura promedio probeta (cm)
d = Diámetro de la probeta (cm)

OBTENCIÓN DE ÓPTIMO DE ASFALTO ESPUMADO MEZCLA 85-15 AF-B2

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

Norma I.N.V. E - 725 -13

Proyecto:	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.				Fecha de fabricación:	27/1/17
Empresa:	Escuela Colombiana de Ingeniería					
ASFALTO:	Tipo B2	Clasificación por Dureza:		60/70		
Agua (%)	2.5%	Relación de Expansión	18.0	Vida Media (s)	13.1	
AGREGADO:	Mezcla 15 % de RAP y 85% de Material granular Virgen					
Llenante:	Cemento					

Fecha de ensayo probetas en condición seca: 27/01/2017

Fecha de ensayo probetas en condición saturada: 28/01/2017

Densidad, Resistencia - Ensayo de Tensión Indirecta y Resistencia Conservada

Ident.	% Asfalto Añadido	Altura Promedio (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Densidad seca (g/cm³)	Carga Máxima (N)		Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada (%)
							Húmeda	Seca	Húmeda	Seca	
221	2.2	6.894	10.146	1173.1	1100.9	1.975	2069.9		188.4		
222	2.2	6.104	10.149	1171.8	1096.9	2.222	1432.3		147.2		
223	2.2	6.839	10.160	1165.9	1090.0	1.966	1716.8		157.3		
224	2.2	6.847	10.157	1174.0	1098.2	1.979		3875.0		354.7	
225	2.2	6.741	10.170	1176.5	1103.4	2.015		4757.9		441.9	
226	2.2	6.734	10.173	1177.6	1101.2	2.012		4110.4		382.0	
PROMEDIO						2.028	1739.6	4247.7	164.3	392.8	41.8
261	2.5	6.813	10.125	1155.3	1079.2	1.967	1991.4		183.8		
262	2.5	6.897	10.107	1172.5	1100.0	1.988	2158.2		197.1		
263	2.5	6.945	10.139	1165.8	1094.7	1.953	1667.7		150.8		
264	2.5	6.853	10.182	1158.8	1087.9	1.950		4012.3		366.1	
265	2.5	6.853	10.163	1170.4	1094.7	1.969		1844.3		168.6	
266	2.5	7.020	10.157	1156.0	1086.0	1.909		4718.6		421.3	
PROMEDIO						1.956	1939.1	3525.1	177.2	318.7	55.6
281	2.8	6.765	10.172	1171.7	1093.2	1.989	1510.7		139.8		
282	2.8	6.894	10.179	1173.3	1121.6	2.000	2305.4		209.2		
283	2.8	6.893	10.168	1166.7	1093.0	1.953	2207.3		200.5		
284	2.8	6.811	10.144	1169.2	1120.4	2.035		5876.2		541.5	
285	2.8	6.669	10.190	1150.3	1106.4	2.035		4875.6		456.8	
286	2.8	6.804	10.180	1169.9	1107.1	1.999		3374.6		310.2	
PROMEDIO						2.002	2007.8	4708.8	183.1	436.1	42.0

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \times 10.000$$

ITS = Resistencia a la Tracción Indirecta (kPa)
P = Máxima Carga Aplicada (kN)

h = Altura promedio probeta (cm)
d = Diámetro de la probeta (cm)

OBTENCIÓN DE ÓPTIMO DE ASFALTO ESPUMADO MEZCLA 70-30 AF-B2

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

Norma I.N.V. E - 725 -13

Proyecto:	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.	Fecha de fabricación:	20/01/2017
Empresa:	Escuela Colombiana de Ingeniería		
ASFALTO:	Tipo B2	TIPO : 60/70	
Agua (%)	2.5	Relación de Expansión	18.0
		Vida Media (s)	13.1
AGREGADO:	Mezcla 30% de RAP y 70% Material Granular Virgen		
Llenante:	Cemento		

Fecha de ensayo probetas en condición seca:	23/01/2017
Fecha de ensayo probetas en condición saturada:	24/01/2017

Densidad, Resistencia - Ensayo de Tensión Indirecta y Resistencia Conservada

Ident.	% Asfalto Añadido	Altura Promedio (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Densidad seca (g/cm ³)	Carga Máxima (N)		Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada (%)
							Húmeda	Seca	Húmeda	Seca	
221	2.1	7.264	10.167	1198.8	1117.4	1.895	1059.5		91.3		
222	2.1	7.321	10.150	1213.5	1150.1	1.942	833.9		71.4		
223	2.1	7.222	10.145	1150.4	1086.5	1.861	461.1		40.1		
224	2.1	5.472	10.160	1115.9	1067.4	2.406		2109.2		241.5	
225	2.1	6.621	10.136	1126.4	1056.3	1.977		2079.7		197.3	
226	2.1	6.749	10.094	1113.4	1048.9	1.942		1765.8		165.0	
PROMEDIO						2.004	784.8	1984.9	67.6	201.3	33.6
261	2.7	7.308	10.141	1115.8	1060.4	1.797	735.8		63.2		
262	2.7	7.426	10.092	1146.8	1096.6	1.846	578.8		49.2		
	2.7	7.454	10.078	1116.8	1070.6	1.801					
264	2.7	7.333	10.090	1136.2	1088.2	1.856		2786.0		239.7	
265	2.7	7.523	10.117	1150.9	1101.9	1.822		2354.4		197.0	
266	2.7	7.454	10.080	1116.8	1070.6	1.800		2589.8		0.0	
PROMEDIO						1.820	657.3	2576.8	56.2	145.6	38.6
281	2.9	7.423	10.147	1181.6	1123.0	1.871	382.6		32.3		
282	2.9	7.353	10.156	1161.2	1105.4	1.856	382.6		32.6		
283	2.9	7.346	10.132	1164.0	1107.0	1.869	284.5		24.3		
284	2.9	7.549	10.153	1213.2	1153.7	1.888		2295.5		190.7	
285	2.9	7.503	10.151	1180.0	1121.8	1.848		2158.2		180.4	
286	2.9	7.488	10.106	1213.2	1130.5	1.882		2442.7		205.5	
PROMEDIO						1.869	349.9	2298.8	29.8	192.2	15.5

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \times 10.000$$

ITS = Resistencia a la Tracción Indirecta (kPa)
P = Máxima Carga Aplicada (kN)

h = Altura promedio probeta (cm)
d = Diámetro de la probeta (cm)

OBTENCIÓN DE ÓPTIMO DE ASFALTO ESPUMADO MEZCLA 50-50 AF-B2

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

Norma I.N.V. E - 725 -13

Proyecto:	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.	Fecha de fabricación:	20/01/2017
Empresa:	Escuela Colombiana de Ingeniería		
ASFALTO:	Tipo B2	Clasificación por Dureza:	60/70
Agua (%)	2.50%	Relación de Expansión	18.0
		Vida Media (s)	13.1
AGREGADO:	Mezcla 50% de RAP y 50% Material Granular Virgen		
Llenante:	Cemento		

Fecha de ensayo probetas en condición seca: 23/01/2017

Fecha de ensayo probetas en condición saturada: 24/01/2017

Densidad, Resistencia - Ensayo de Tensión Indirecta y Resistencia Conservada

Ident.	% Asfalto Añadido	Altura Promedio (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Densidad seca (g/cm ³)	Carga Máxima (N)		Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada (%)
							Húmeda	Seca	Húmeda	Seca	
221	2.2	7.251	10.158	1158.4	1114.7	1.897	1020.2		88.2		
221	2.2	7.318	10.137	1156.2	1113.5	1.885		2148.4		184.4	
223	2.2	7.269	10.144	1149.0	1105.6	1.882	971.2		83.9		
224	2.2	7.367	10.126	1154.5	1109.8	1.871		1746.2		149.0	
225	2.2	7.236	10.198	1160.6	1121.1	1.897	912.3		78.7		
226	2.2	7.302	10.157	1148.5	1106.1	1.870		2020.9		173.5	
PROMEDIO						1.884	967.9	1971.8	83.6	169.0	49.5
261	2.6	7.278	10.160	1162.3	1121.3	1.900	912.3		78.6		
262	2.6	7.265	10.154	1163.5	1123.4	1.910		2560.4		221.0	
263	2.6	7.247	10.148	1163.5	1122.4	1.915	981.0		84.9		
264	2.6	7.288	10.143	1160.5	1119.2	1.900		2177.8		187.5	
265	2.6	7.304	10.156	1158.6	1120.2	1.893	686.7		58.9		
266	2.6	7.357	10.128	1158.1	1117.0	1.885		2266.1		193.6	
PROMEDIO						1.901	860.0	2334.8	74.1	200.7	36.9
281	2.8	7.256	10.130	1146.9	1106.4	1.892	735.8		63.7		
282	2.8	7.285	10.165	1151.9	1114.2	1.885		2481.9		213.4	
283	2.8	7.339	10.162	1144.2	1105.9	1.858	833.9		71.2		
284	2.8	7.347	10.123	1154.4	1115.5	1.886		2148.4		183.9	
285	2.8	7.255	10.173	1155.1	1117.2	1.895	902.5		77.9		
286	2.8	7.341	10.151	1153.7	1114.3	1.876		2011.1		171.8	
PROMEDIO						1.882	824.0	2213.8	70.9	189.7	37.4

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \times 10.000$$

ITS = Resistencia a la Tracción Indirecta (kPa)
P = Máxima Carga Aplicada (kN)

h = Altura promedio probeta (cm)
d = Diámetro de la probeta (cm)

ANEXO C: RESULTADOS DE MÓDULO RESILIENTE

MÓDULO RESILIENTE MEZCLA 100-0 AF-B1 – P1

MÓDULO RESILIENTE (INV-E 156/13)									
PROBETA 1									
Altura:	200	mm				Área	8171,3	mm ²	
Diámetro:	102	mm				Peso Unitario Seco Máximo (kN/m ³):	20,18	KN/m ³	
MEZCLA (100/0)					ASFALTO B1				
Ciclo No.	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Deformación	Deformación	Deformación	Deformación	MÓDULO
	confinamiento	máximo	contacto	desviador	recuperable LDVT 1	recuperable LDVT 2	recuperable Promedio	Unitaria rec.	RESILIENTE LABORATORIO
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm	mm	mm	x 10 ⁶	MPa
1-1	20,6	19,3	1,93	20,536	0,0080	0,0190	0,0135	0,000001652	297
1-2	20,8	40,1	4,01	40,791	0,0160	0,0260	0,0210	0,000002570	369
1-3	20,8	61	6,1	61,992	0,0200	0,0310	0,0255	0,000003121	462
1-4	34,5	32,9	3,29	34,161	0,0160	0,0250	0,0205	0,000002509	319
1-5	34,4	68	6,8	69,001	0,0220	0,0330	0,0275	0,000003365	480
1-6	34,5	101,8	10,18	103,974	0,0300	0,0410	0,0355	0,000004344	555
1-7	68,80	67,30	6,73	68,768	0,0260	0,0350	0,0305	0,000003733	437
1-8	68,80	136,10	13,61	138,19	0,0390	0,0510	0,0450	0,000005507	586
1-9	68,80	206,40	20,64	206,932	0,0540	0,0700	0,0620	0,000007588	629
1-10	103,30	67,80	6,78	68,812	0,0350	0,0440	0,0395	0,000004834	334
1-11	103,30	102,80	10,28	104,096	0,0410	0,0520	0,0465	0,000005691	428
1-12	103,3	205,1	20,51	207,113	0,0540	0,0700	0,0620	0,000007588	634
1-13	139,7	102,2	10,22	104,006	0,0430	0,0550	0,0490	0,000005997	405
1-14	137,7	136,9	13,69	138,365	0,0470	0,0600	0,0535	0,000006547	492
1-15	137,7	274,4	27,44	255,246	0,0910	0,1140	0,1025	0,000012544	509

MÓDULO RESILIENTE MEZCLA 100-0 AF-B1 – P2

MÓDULO RESILIENTE (INV-E 156/13)									
PROBETA 2									
Altura:	198	mm				Área	8011,8	mm ²	
Diametro:	101	mm			Peso Unitario Seco Máximo (kN/m3):		20,64	KN/m ³	
MEZCLA (100/0)					ASFALTO B1				
Ciclo No.	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Deformación	Deformación	Deformación	Deformación	MÓDULO
	confinamiento	máximo	contacto	desviador	recuperable LDVT 1	recuperable LDVT 2	recuperable Promedio	Unitaria rec.	RESILIENTE LABORATORIO
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm	mm	mm	x 10 ⁻⁶	MPa
1-1	20,6	19,3	1,93	20,733	0,0220	0,0250	0,0235	0,000002876	177
1-2	20,8	40,1	4,01	41,114	0,0370	0,0420	0,0395	0,000004834	209
1-3	20,8	61	6,1	61,648	0,0450	0,0490	0,0470	0,000005752	264
1-4	34,5	32,9	3,29	34,397	0,0310	0,0350	0,0330	0,000004039	210
1-5	34,4	68	6,8	68,208	0,0450	0,0500	0,0475	0,000005813	289
1-6	34,5	101,8	10,18	103,674	0,0560	0,0620	0,0590	0,000007220	353
1-7	68,80	67,30	6,73	68,072	0,0460	0,0510	0,0485	0,000005935	282
1-8	68,80	136,10	13,61	138,408	0,0670	0,0740	0,0705	0,000008628	395
1-9	68,80	206,40	20,64	207,167	0,0830	0,0920	0,0875	0,000010708	476
1-10	103,30	67,80	6,78	68,004	0,0440	0,0490	0,0465	0,000005691	294
1-11	103,30	102,80	10,28	103,77	0,0560	0,0630	0,0595	0,000007282	351
1-12	103,3	205,1	20,51	207,124	0,0770	0,0870	0,0820	0,000010035	508
1-13	139,7	102,2	10,22	103,825	0,0580	0,0650	0,0615	0,000007526	340
1-14	137,7	136,9	13,69	138,469	0,0620	0,0700	0,0660	0,000008077	422
1-15	137,7	274,4	27,44	255,399	0,1380	0,1590	0,1485	0,000018173	346

MÓDULO RESILIENTE MEZCLA 85-15 AF-B1 – P1

MÓDULO RESILIENTE (INV-E 156/13)									
PROBETA 1									
Altura:	199	mm				Área	8171,3	mm ²	
Diametro:	102	mm				Peso Unitario Seco Máximo (kN/m3):	19,65	KN/m ³	
MEZCLA (85/15)					ASFALTO B1				
Ciclo No.	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Deformación	Deformación	Deformación	Deformación	MÓDULO
	confinamiento	máximo	contacto	desviador	recuperable LDVT 1	recuperable LDVT 2	recuperable Promedio	Unitaria rec.	RESILIENTE LABORATORIO
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm	mm	mm	x 10 ⁻⁶	MPa
1-1	20,6	19,3	1,93	20,589	0,0190	0,0200	0,0195	0,000002386	212
1-2	20,8	40,1	4,01	40,93	0,0290	0,0310	0,0300	0,000003671	274
1-3	20,8	61	6,1	61,842	0,0380	0,0410	0,0395	0,000004834	315
1-4	34,5	32,9	3,29	34,22	0,0290	0,0310	0,0300	0,000003671	229
1-5	34,4	68	6,8	69,036	0,0410	0,0450	0,0430	0,000005262	323
1-6	34,5	101,8	10,18	104,054	0,0540	0,0580	0,0560	0,000006853	374
1-7	68,80	67,30	6,73	68,879	0,0460	0,0510	0,0485	0,000005935	286
1-8	68,80	136,10	13,61	138,543	0,0660	0,0710	0,0685	0,000008383	407
1-9	68,80	206,40	20,64	207,15	0,0880	0,0940	0,0910	0,000011137	458
1-10	103,30	67,80	6,78	68,838	0,0550	0,0610	0,0580	0,000007098	239
1-11	103,30	102,80	10,28	104,149	0,0670	0,0730	0,0700	0,000008567	299
1-12	103,3	205,1	20,51	207,199	0,0860	0,0920	0,0890	0,000010892	468
1-13	139,7	102,2	10,22	104,164	0,0700	0,0780	0,0740	0,000009056	283
1-14	137,7	136,9	13,69	138,595	0,0750	0,0830	0,0790	0,000009668	353
1-15	137,7	274,4	27,44	255,68	0,1350	0,1450	0,1400	0,000017133	367

MÓDULO RESILIENTE MEZCLA 85-15 AF-B1 – P2

MÓDULO RESILIENTE (INV-E 156/13)									
PROBETA 2									
Altura:	202	mm				Área	8171,3	mm²	
Diametro:	102	mm			Peso Unitario Seco Máximo (kN/m3):	19,75	KN/m³		
MEZCLA (85/15)					ASFALTO B1				
Ciclo No.	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Deformación	Deformación	Deformación	Deformación	MÓDULO
	confinamiento	máximo	contacto	desviador	recuperable LDVT 1	recuperable LDVT 2	recuperable Promedio	Unitaria rec.	RESILIENTE LABORATORIO
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm	mm	mm	x 10 ⁻⁶	MPa
1-1	20,6	19,3	1,93	20,536	0,0080	0,0190	0,0135	0,000001652	306
1-2	20,8	40,1	4,01	40,791	0,0160	0,0260	0,0210	0,000002570	391
1-3	20,8	61	6,1	61,992	0,0200	0,0310	0,0255	0,000003121	489
1-4	34,5	32,9	3,29	34,161	0,0160	0,0250	0,0205	0,000002509	335
1-5	34,4	68	6,8	69,001	0,0220	0,0330	0,0275	0,000003365	505
1-6	34,5	101,8	10,18	103,974	0,0300	0,0410	0,0355	0,000004344	589
1-7	68,80	67,30	6,73	68,768	0,0260	0,0350	0,0305	0,000003733	454
1-8	68,80	136,10	13,61	138,19	0,0390	0,0510	0,0450	0,000005507	618
1-9	68,80	206,40	20,64	206,932	0,0540	0,0700	0,0620	0,000007588	671
1-10	103,30	67,80	6,78	68,812	0,0350	0,0440	0,0395	0,000004834	350
1-11	103,30	102,80	10,28	104,096	0,0410	0,0520	0,0465	0,000005691	450
1-12	103,3	205,1	20,51	207,113	0,0540	0,0700	0,0620	0,000007588	672
1-13	139,7	102,2	10,22	104,006	0,0430	0,0550	0,0490	0,000005997	427
1-14	137,7	136,9	13,69	138,365	0,0470	0,0600	0,0535	0,000006547	520
1-15	137,7	274,4	27,44	255,246	0,0910	0,1140	0,1025	0,000012544	501

MÓDULO RESILIENTE MEZCLA 70-30 AF-B1 – P1

MÓDULO RESILIENTE (INV-E 156/13)									
PROBETA 1									
Altura:	197	mm				Área	8332,3	mm²	
Diametro:	103	mm			Peso Unitario Seco Máximo (kN/m3):	19,25	KN/m³		
MEZCLA (70/30)					ASFALTO B1				
Ciclo No.	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Deformación	Deformación	Deformación	Deformación	MÓDULO
	confinamiento	máximo	contacto	desviador	recuperable LDVT 1	recuperable LDVT 2	recuperable Promedio	Unitaria rec.	RESILIENTE LABORATORIO
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm	mm	mm	x 10 ⁻⁶	MPa
1-1	20,6	19,3	1,93	20,536	0,0340	0,0230	0,0285	0,000003488	145
1-2	20,8	40,1	4,01	40,791	0,0480	0,0320	0,0400	0,000004895	205
1-3	20,8	61	6,1	61,992	0,0560	0,0370	0,0465	0,000005691	267
1-4	34,5	32,9	3,29	34,161	0,0460	0,0310	0,0385	0,000004712	179
1-5	34,4	68	6,8	69,001	0,0580	0,0380	0,0480	0,000005874	288
1-6	34,5	101,8	10,18	103,974	0,0670	0,0460	0,0565	0,000006914	370
1-7	68,80	67,30	6,73	68,768	0,0620	0,0420	0,0520	0,000006364	266
1-8	68,80	136,10	13,61	138,19	0,0780	0,0570	0,0675	0,000008261	413
1-9	68,80	206,40	20,64	206,932	0,0970	0,0750	0,0860	0,000010525	484
1-10	103,30	67,80	6,78	68,812	0,0720	0,0510	0,0615	0,000007526	225
1-11	103,30	102,80	10,28	104,096	0,0780	0,0570	0,0675	0,000008261	310
1-12	103,3	205,1	20,51	207,113	0,0890	0,0690	0,0790	0,000009668	527
1-13	139,7	102,2	10,22	104,006	0,0780	0,0560	0,0670	0,000008199	313
1-14	137,7	136,9	13,69	138,365	0,0780	0,0570	0,0675	0,000008261	413
1-15	137,7	274,4	27,44	255,246	0,1570	0,1160	0,1365	0,000016705	377

MÓDULO RESILIENTE MEZCLA 70-30 AF-B1 – P2

MÓDULO RESILIENTE (INV-E 156/13)									
PROBETA 2									
Altura:	205	mm				Área	8011,8	mm²	
Diametro:	101	mm			Peso Unitario Seco Máximo (kN/m3):	19,71	KN/m³		
MEZCLA (70/30)					ASFALTO B1				
Ciclo No.	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Deformación	Deformación	Deformación	Deformación	MÓDULO
	confinamiento	máximo	contacto	desviador	recuperable LDVT 1	recuperable LDVT 2	recuperable Promedio	Unitaria rec.	RESILIENTE LABORATORIO
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm	mm	mm	x 10 ⁻⁶	MPa
1-1	20,6	19,3	1,93	20,788	0,0180	0,0230	0,0205	0,000002509	204
1-2	20,8	40,1	4,01	41,179	0,0270	0,0320	0,0295	0,000003610	281
1-3	20,8	61	6,1	61,376	0,0310	0,0380	0,0345	0,000004222	358
1-4	34,5	32,9	3,29	34,334	0,0230	0,0290	0,0260	0,000003182	266
1-5	34,4	68	6,8	68,228	0,0330	0,0400	0,0365	0,000004467	376
1-6	34,5	101,8	10,18	103,524	0,0430	0,0500	0,0465	0,000005691	448
1-7	68,80	67,30	6,73	68,165	0,0350	0,0450	0,0400	0,000004895	343
1-8	68,80	136,10	13,61	138,202	0,0530	0,0610	0,0570	0,000006976	488
1-9	68,80	206,40	20,64	206,906	0,0730	0,0800	0,0765	0,000009362	544
1-10	103,30	67,80	6,78	68,136	0,0420	0,0570	0,0495	0,000006058	277
1-11	103,30	102,80	10,28	103,488	0,0500	0,0630	0,0565	0,000006914	368
1-12	103,3	205,1	20,51	206,809	0,0660	0,0750	0,0705	0,000008628	590
1-13	139,7	102,2	10,22	103,654	0,0500	0,0660	0,0580	0,000007098	359
1-14	137,7	136,9	13,69	138,297	0,0540	0,0670	0,0605	0,000007404	460
1-15	137,7	274,4	27,44	255,279	0,1150	0,1410	0,1280	0,000015665	401

MÓDULO RESILIENTE MEZCLA 50-50 AF-B1 – P1

MÓDULO RESILIENTE (INV-E 156/13)									
PROBETA 1									
Altura:	202	mm				Área	8011,8	mm²	
Diametro:	101	mm			Peso Unitario Seco Máximo (kN/m3):	19,71	KN/m³		
MEZCLA (50/50)					ASFALTO B1				
Ciclo No.	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Deformación	Deformación	Deformación	Deformación	MÓDULO
	confinamiento	máximo	contacto	desviador	recuperable LDVT 1	recuperable LDVT 2	recuperable Promedio	Unitaria rec.	RESILIENTE LABORATORIO
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm	mm	mm	x 10 ⁻⁶	MPa
1-1	20,6	19,3	1,93	20,788	0,0140	0,0170	0,0155	0,000001897	204
1-2	20,8	40,1	4,01	41,179	0,0220	0,0290	0,0255	0,000003121	281
1-3	20,8	61	6,1	61,376	0,0270	0,0380	0,0325	0,000003977	358
1-4	34,5	32,9	3,29	34,334	0,0190	0,0260	0,0225	0,000002754	266
1-5	34,4	68	6,8	68,228	0,0280	0,0420	0,0350	0,000004283	376
1-6	34,5	101,8	10,18	103,524	0,0400	0,0590	0,0495	0,000006058	448
1-7	68,80	67,30	6,73	68,165	0,0340	0,0500	0,0420	0,000005140	343
1-8	68,80	136,10	13,61	138,202	0,0530	0,0760	0,0645	0,000007893	488
1-9	68,80	206,40	20,64	206,906	0,0860	0,1060	0,0960	0,000011748	544
1-10	103,30	67,80	6,78	68,136	0,0540	0,0850	0,0695	0,000008505	277
1-11	103,30	102,80	10,28	103,488	0,0610	0,0930	0,0770	0,000009423	368
1-12	103,3	205,1	20,51	206,809	0,0820	0,1050	0,0935	0,000011443	590
1-13	139,7	102,2	10,22	103,654	0,0660	0,1000	0,0830	0,000010158	359
1-14	137,7	136,9	13,69	138,297	0,0680	0,0990	0,0835	0,000010219	460
1-15	137,7	274,4	27,44	255,279	0,1340	0,1690	0,1515	0,000018541	401

MÓDULO RESILIENTE MEZCLA 100-0 AF-B2 – P1

MÓDULO RESILIENTE (INV-E 156/13)									
PROBETA 1									
Altura:	194	mm				Área	8171,3	mm²	
Diametro:	102	mm			Peso Unitario Seco Máximo (kN/m3):	20,54	KN/m³		
MEZCLA (100/0)					ASFALTO B2				
Ciclo No.	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Deformación	Deformación	Deformación	Deformación	MÓDULO
	confinamiento	máximo	contacto	desviador	recuperable LDVT 1	recuperable LDVT 2	recuperable Promedio	Unitaria rec.	RESILIENTE LABORATORIO
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm	mm	mm	x 10 ⁻⁶	MPa
1-1	20,6	19,3	1,93	16,127	0,0150	0,0140	0,0145	0,000001775	211
1-2	20,8	40,1	4,01	38,855	0,0310	0,0290	0,0300	0,000003671	244
1-3	20,8	61	6,1	61,654	0,0440	0,0390	0,0415	0,000005079	283
1-4	34,5	32,9	3,29	30,943	0,0260	0,0240	0,0250	0,000003059	230
1-5	34,4	68	6,8	68,578	0,0470	0,0440	0,0455	0,000005568	284
1-6	34,5	101,8	10,18	104,826	0,0650	0,0610	0,0630	0,000007710	316
1-7	68,80	67,30	6,73	68,747	0,0470	0,0430	0,0450	0,000005507	293
1-8	68,80	136,10	13,61	143,132	0,0790	0,0760	0,0775	0,000009484	352
1-9	68,80	206,40	20,64	214,947	0,1000	0,0970	0,0985	0,000012054	416
1-10	103,30	67,80	6,78	67,956	0,0520	0,0500	0,0510	0,000006241	252
1-11	103,30	102,80	10,28	106,947	0,0700	0,0660	0,0680	0,000008322	298
1-12	103,3	205,1	20,51	214,686	0,0990	0,0950	0,0970	0,000011871	421
1-13	139,7	102,2	10,22	106,079	0,0760	0,0710	0,0735	0,000008995	275
1-14	137,7	136,9	13,69	143,422	0,0810	0,0770	0,0790	0,000009668	346
1-15	137,7	274,4	27,44	266,793	0,1490	0,1400	0,1445	0,000017684	378

MÓDULO RESILIENTE MEZCLA 100-0 AF-B2 – P2

MÓDULO RESILIENTE (INV-E 156/13)									
PROBETA 2									
Altura:	195	mm				Área	7854,0	mm²	
Diametro:	100	mm			Peso Unitario Seco Máximo (kN/m3):	21,00	KN/m³		
MEZCLA (100/0)					ASFALTO B2				
Ciclo No.	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Deformación	Deformación	Deformación	Deformación	MÓDULO
	confinamiento	máximo	contacto	desviador	recuperable LDVT 1	recuperable LDVT 2	recuperable Promedio	Unitaria rec.	RESILIENTE LABORATORIO
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm	mm	mm	x 10 ⁻⁶	MPa
1-1	20,6	19,3	1,93	23,243	0,0210	0,0210	0,0210	0,000002570	211
1-2	20,8	40,1	4,01	46,687	0,0430	0,0470	0,0450	0,000005507	198
1-3	20,8	61	6,1	70,761	0,0590	0,0630	0,0610	0,000007465	222
1-4	34,5	32,9	3,29	39,255	0,0370	0,0390	0,0380	0,000004650	197
1-5	34,4	68	6,8	78,721	0,0610	0,0670	0,0640	0,000007832	235
1-6	34,5	101,8	10,18	115,773	0,0720	0,0800	0,0760	0,000009301	291
1-7	68,80	67,30	6,73	78,674	0,0610	0,0680	0,0645	0,000007893	233
1-8	68,80	136,10	13,61	154,418	0,0920	0,1020	0,0970	0,000011871	304
1-9	68,80	206,40	20,64	231,915	0,1290	0,1450	0,1370	0,000016766	323
1-10	103,30	67,80	6,78	78,514	0,0690	0,0760	0,0725	0,000008873	207
1-11	103,30	102,80	10,28	115,733	0,0870	0,0960	0,0915	0,000011198	242
1-12	103,3	205,1	20,51	231,85	0,1250	0,1400	0,1325	0,000016215	334
1-13	139,7	102,2	10,22	115,762	0,0840	0,0930	0,0885	0,000010831	250
1-14	137,7	136,9	13,69	154,88	0,0960	0,1070	0,1015	0,000012422	291
1-15	137,7	274,4	27,44	309,511	0,1530	0,1710	0,1620	0,000019826	365

MÓDULO RESILIENTE MEZCLA 85-15 AF-B2 – P1

MÓDULO RESILIENTE (INV-E 156/13)									
PROBETA 1									
Altura:	202	mm				Área	8011,8	mm²	
Diametro:	101	mm			Peso Unitario Seco Máximo (kN/m3):	18,57	KN/m³		
MEZCLA (85/15)					ASFALTO B2				
Ciclo No.	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Deformación	Deformación	Deformación	Deformación	MÓDULO
	confinamiento	máximo	contacto	desviador	recuperable LDVT 1	recuperable LDVT 2	recuperable Promedio	Unitaria rec.	RESILIENTE LABORATORIO
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm	mm	mm	x 10 ⁻⁶	MPa
1-1	20,6	19,3	1,93	20,605	0,0320	0,0320	0,0320	0,000003916	123
1-2	20,8	40,1	4,01	41,669	0,0530	0,0520	0,0525	0,000006425	150
1-3	20,8	61	6,1	62,31	0,0620	0,0610	0,0615	0,000007526	192
1-4	34,5	32,9	3,29	34,791	0,0400	0,0400	0,0400	0,000004895	165
1-5	34,4	68	6,8	69,018	0,0620	0,0600	0,0610	0,000007465	214
1-6	34,5	101,8	10,18	103,183	0,0730	0,0690	0,0710	0,000008689	274
1-7	68,80	67,30	6,73	69,002	0,0382	0,0560	0,0471	0,000005764	279
1-8	68,80	136,10	13,61	137,465	0,0820	0,0870	0,0845	0,000010341	307
1-9	68,80	206,40	20,64	206,129	0,1280	0,1360	0,1320	0,000016154	295
1-10	103,30	67,80	6,78	68,957	0,0580	0,0600	0,0590	0,000007220	221
1-11	103,30	102,80	10,28	102,991	0,0790	0,0810	0,0800	0,000009790	243
1-12	103,3	205,1	20,51	206,242	0,1230	0,1290	0,1260	0,000015420	309
1-13	139,7	102,2	10,22	102,877	0,0770	0,0810	0,0790	0,000009668	247
1-14	137,7	136,9	13,69	137,606	0,0880	0,0930	0,0905	0,000011075	288
1-15	137,7	274,4	27,44	254,402	0,2320	0,2480	0,2400	0,000029371	217

MÓDULO RESILIENTE MEZCLA 70-30 AF-B2 – P1

MÓDULO RESILIENTE (INV-E 156/13)									
PROBETA 1									
Altura:	193	mm				Área	8011,8	mm ²	
Diametro:	101	mm			Peso Unitario Seco Máximo (kN/m3):		18,52	KN/m ³	
MEZCLA (70/30)					ASFALTO B2				
Ciclo No.	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Deformación	Deformación	Deformación	Deformación	MÓDULO
	confinamiento	máximo	contacto	desviador	recuperable LDVT 1	recuperable LDVT 2	recuperable Promedio	Unitaria rec.	RESILIENTE LABORATORIO
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm	mm	mm	x 10 ⁻⁶	MPa
1-1	20,6	19,3	1,93	23,243	0,0720	0,0630	0,0675	0,000008261	68
1-2	20,8	40,1	4,01	46,687	0,1110	0,0990	0,1050	0,000012850	91
1-3	20,8	61	6,1	70,761	0,1330	0,1210	0,1270	0,000015542	113
1-4	34,5	32,9	3,29	39,255	0,1000	0,0890	0,0945	0,000011565	84
1-5	34,4	68	6,8	78,721	0,1360	0,1250	0,1305	0,000015971	122
1-6	34,5	101,8	10,18	115,773	0,1550	0,1460	0,1505	0,000018418	156
1-7	68,80	67,30	6,73	78,674	0,1350	0,1230	0,1290	0,000015787	123
1-8	68,80	136,10	13,61	154,418	0,1820	0,1760	0,1790	0,000021906	175
1-9	68,80	206,40	20,64	231,915	0,2460	0,2540	0,2500	0,000030595	188
1-10	103,30	67,80	6,78	78,514	0,1480	0,1380	0,1430	0,000017500	111
1-11	103,30	102,80	10,28	115,733	0,1750	0,1710	0,1730	0,000021172	136
1-12	103,3	205,1	20,51	231,85	0,2880	0,2990	0,2935	0,000035918	160
1-13	139,7	102,2	10,22	115,762	0,1870	0,1850	0,1860	0,000022763	126
1-14	137,7	136,9	13,69	154,88	0,2660	0,2670	0,2665	0,000032614	118
1-15	137,7	274,4	27,44	309,511	0,2660	0,2670	0,2665	0,000032614	116

MÓDULO RESILIENTE MEZCLA 70-30 AF-B2 – P2

MÓDULO RESILIENTE (INV-E 156/13)									
PROBETA 2									
Altura:	193	mm				Área	8011,8	mm ²	
Diametro:	101	mm			Peso Unitario Seco Máximo (kN/m3):	18,55	KN/m ³		
MEZCLA (70/30)					ASFALTO B2				
Ciclo No.	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Deformación	Deformación	Deformación	Deformación	MÓDULO
	confinamiento	máximo	contacto	desviador	recuperable LDVT 1	recuperable LDVT 2	recuperable Promedio	Unitaria rec.	RESILIENTE LABORATORIO
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm	mm	mm	x 10 ⁻⁶	MPa
1-1	20,6	19,3	1,93	23,243	0,0720	0,0630	0,0675	0,000008261	170
1-2	20,8	40,1	4,01	46,687	0,1110	0,0990	0,1050	0,000012850	227
1-3	20,8	61	6,1	70,761	0,1330	0,1210	0,1270	0,000015542	282
1-4	34,5	32,9	3,29	39,255	0,1000	0,0890	0,0945	0,000011565	210
1-5	34,4	68	6,8	78,721	0,1360	0,1250	0,1305	0,000015971	304
1-6	34,5	101,8	10,18	115,773	0,1550	0,1460	0,1505	0,000018418	390
1-7	68,80	67,30	6,73	78,674	0,1350	0,1230	0,1290	0,000015787	308
1-8	68,80	136,10	13,61	154,418	0,1820	0,1760	0,1790	0,000021906	438
1-9	68,80	206,40	20,64	231,915	0,2460	0,2540	0,2500	0,000030595	471
1-10	103,30	67,80	6,78	78,514	0,1480	0,1380	0,1430	0,000017500	278
1-11	103,30	102,80	10,28	115,733	0,1750	0,1710	0,1730	0,000021172	340
1-12	103,3	205,1	20,51	231,85	0,2880	0,2990	0,2935	0,000035918	401
1-13	139,7	102,2	10,22	115,762	0,1870	0,1850	0,1860	0,000022763	316
1-14	137,7	136,9	13,69	154,88	0,2660	0,2670	0,2665	0,000032614	294
1-15	137,7	274,4	27,44	309,511	0,2660	0,2670	0,2665	0,000032614	290

MÓDULO RESILIENTE MEZCLA 50-50 AF-B2 – P1

MÓDULO RESILIENTE (INV-E 156/13)									
PROBETA 1									
Altura:	203	mm				Área	7854,0	mm²	
Diametro:	100	mm			Peso Unitario Seco Máximo (kN/m3):	18,55		KN/m³	
MEZCLA (50/50)					ASFALTO B2				
Ciclo No.	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Deformación	Deformación	Deformación	Deformación	MÓDULO
	confinamiento	máximo	contacto	desviador	recuperable LDVT 1	recuperable LDVT 2	recuperable Promedio	Unitaria rec.	RESILIENTE LABORATORIO
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm	mm	mm	x 10 ⁻⁶	MPa
1-1	20,6	19,3	1,93	23,243	0,0410	0,0450	0,0430	0,000005262	103
1-2	20,8	40,1	4,01	46,687	0,0640	0,0720	0,0680	0,000008322	134
1-3	20,8	61	6,1	70,761	0,0750	0,0870	0,0810	0,000009913	168
1-4	34,5	32,9	3,29	39,255	0,0550	0,0620	0,0585	0,000007159	129
1-5	34,4	68	6,8	78,721	0,0770	0,0870	0,0820	0,000010035	184
1-6	34,5	101,8	10,18	115,773	0,0890	0,1010	0,0950	0,000011626	234
1-7	68,80	67,30	6,73	78,674	0,0740	0,0850	0,0795	0,000009729	190
1-8	68,80	136,10	13,61	154,418	0,1060	0,1180	0,1120	0,000013707	264
1-9	68,80	206,40	20,64	231,915	0,1470	0,1560	0,1515	0,000018541	294
1-10	103,30	67,80	6,78	78,514	0,0830	0,0930	0,0880	0,000010769	170
1-11	103,30	102,80	10,28	115,733	0,1000	0,1130	0,1065	0,000013033	208
1-12	103,3	205,1	20,51	231,85	0,1390	0,1500	0,1445	0,000017684	308
1-13	139,7	102,2	10,22	115,762	0,0970	0,1120	0,1045	0,000012789	213
1-14	137,7	136,9	13,69	154,88	0,1080	0,1240	0,1160	0,000014196	256
1-15	137,7	274,4	27,44	309,511	0,1690	0,1800	0,1745	0,000021355	340

MÓDULO RESILIENTE MEZCLA 50-50 AF-B2 – P2

MÓDULO RESILIENTE (INV-E 156/13)									
PROBETA 2									
Altura:	203	mm				Área	8011,8	mm²	
Diametro:	101	mm			Peso Unitario Seco Máximo (kN/m3):	18,62	KN/m³		
MEZCLA (50/50)					ASFALTO B2				
Ciclo No.	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Deformación	Deformación	Deformación	Deformación	MÓDULO
	confinamiento	máximo	contacto	desviador	recuperable LDVT 1	recuperable LDVT 2	recuperable Promedio	Unitaria rec.	RESILIENTE LABORATORIO
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm	mm	mm	x 10 ⁻⁶	MPa
1-1	20,6	19,3	1,93	22,702	0,0500	0,0520	0,0510	0,000006241	90
1-2	20,8	40,1	4,01	46,339	0,0860	0,0890	0,0875	0,000010708	107
1-3	20,8	61	6,1	70,706	0,1080	0,1130	0,1105	0,000013523	129
1-4	34,5	32,9	3,29	38,549	0,0750	0,0790	0,0770	0,000009423	101
1-5	34,4	68	6,8	78,783	0,1130	0,1190	0,1160	0,000014196	137
1-6	34,5	101,8	10,18	116,659	0,1360	0,1410	0,1385	0,000016950	170
1-7	68,80	67,30	6,73	78,858	0,1120	0,1180	0,1150	0,000014074	139
1-8	68,80	136,10	13,61	155,04	0,1620	0,1680	0,1650	0,000020193	190
1-9	68,80	206,40	20,64	232,476	0,2310	0,2330	0,2320	0,000028392	203
1-10	103,30	67,80	6,78	78,752	0,1270	0,1320	0,1295	0,000015848	123
1-11	103,30	102,80	10,28	116,289	0,1560	0,1610	0,1585	0,000019397	148
1-12	103,3	205,1	20,51	232,485	0,2340	0,2350	0,2345	0,000028698	201
1-13	139,7	102,2	10,22	116,336	0,1610	0,1650	0,1630	0,000019948	144
1-14	137,7	136,9	13,69	155,432	0,1850	0,1870	0,1860	0,000022763	169
1-15	137,7	274,4	27,44	103,486	0,1690	0,1800	0,1745	0,000021355	116

MÓDULO RESILIENTE MEZCLA 100-0 AF-A1 – P1

MÓDULO RESILIENTE (INV-E 156/13)									
PROBETA 1									
Altura:	202	mm				Área	8011,8	mm ²	
Diametro:	101	mm			Peso Unitario Seco Máximo (kN/m3):	17,64	KN/m ³		
MEZCLA (100/0)					ASFALTO A1				
Ciclo No.	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Deformación	Deformación	Deformación	Deformación	MÓDULO
	confinamiento	máximo	contacto	desviador	recuperable LDVT 1	recuperable LDVT 2	recuperable Promedio	Unitaria rec.	RESILIENTE LABORATORIO
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm	mm	mm	x 10 ⁻⁶	MPa
1-1	20,6	19,3	1,93	20,982	0,058	0,057	0,0575	0,000007177	108
1-2	20,8	40,1	4,01	41,353	0,069	0,067	0,0680	0,000008487	145
1-3	20,8	61	6,1	61,978	0,055	0,053	0,0540	0,000006740	183
1-4	34,5	32,9	3,29	34,408	0,072	0,07	0,0710	0,000008862	128
1-5	34,4	68	6,8	68,863	0,082	0,081	0,0815	0,000010172	195
1-6	34,5	101,8	10,18	104,491	0,079	0,077	0,0780	0,000009736	258
1-7	68,80	67,30	6,73	68,973	0,097	0,095	0,0960	0,000011982	178
1-8	68,80	136,10	13,61	138,957	0,118	0,115	0,1165	0,000014541	291
1-9	68,80	206,40	20,64	207,553	0,09	0,086	0,0880	0,000010984	358
1-10	103,30	67,80	6,78	69,021	0,102	0,098	0,1000	0,000012482	158
1-11	103,30	102,80	10,28	104,646	0,121	0,117	0,1190	0,000014853	210
1-12	103,3	205,1	20,51	207,607	0,11	0,105	0,1075	0,000013418	351
1-13	139,7	102,2	10,22	104,614	0,116	0,112	0,1140	0,000014229	196
1-14	137,7	136,9	13,69	139,041	0,204	0,192	0,1980	0,000024713	245
1-15	137,7	274,4	27,44	256,071	0,094	0,091	0,0925	0,000011545	260

MÓDULO RESILIENTE MEZCLA 100-0 AF-A1 – P2

MÓDULO RESILIENTE (INV-E 156/13)									
PROBETA 2									
Altura:	193	mm					Área	8011,8	mm ²
Diametro:	101	mm					Peso Unitario Seco Máximo (kN/m3):	19,27	KN/m ³
MEZCLA (100/0)					ASFALTO A1				
Ciclo No.	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Deformación	Deformación	Deformación	Deformación	MÓDULO
	confinamiento	máximo	contacto	desviador	recuperable LDVT 1	recuperable LDVT 2	recuperable Promedio	Unitaria rec.	RESILIENTE LABORATORIO
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm	mm	mm	x 10 ⁻⁶	MPa
1-1	20,6	19,3	1,93	20,982	0,0340	0,0230	0,0285	0,000003557	145
1-2	20,8	40,1	4,01	41,353	0,0480	0,0320	0,0400	0,000004993	205
1-3	20,8	61	6,1	61,978	0,0560	0,0370	0,0465	0,000005804	267
1-4	34,5	32,9	3,29	34,408	0,0460	0,0310	0,0385	0,000004805	179
1-5	34,4	68	6,8	68,863	0,0580	0,0380	0,0480	0,000005991	288
1-6	34,5	101,8	10,18	104,491	0,0670	0,0460	0,0565	0,000007052	370
1-7	68,80	67,30	6,73	68,973	0,0620	0,0420	0,0520	0,000006490	266
1-8	68,80	136,10	13,61	138,957	0,0780	0,0570	0,0675	0,000008425	413
1-9	68,80	206,40	20,64	207,553	0,0970	0,0750	0,0860	0,000010734	484
1-10	103,30	67,80	6,78	69,021	0,0720	0,0510	0,0615	0,000007676	225
1-11	103,30	102,80	10,28	104,646	0,0780	0,0570	0,0675	0,000008425	310
1-12	103,3	205,1	20,51	207,607	0,0890	0,0690	0,0790	0,000009860	527
1-13	139,7	102,2	10,22	104,614	0,0780	0,0560	0,0670	0,000008363	313
1-14	137,7	136,9	13,69	139,041	0,0780	0,0570	0,0675	0,000008425	413
1-15	137,7	274,4	27,44	256,071	0,1570	0,1160	0,1365	0,000017037	377

MÓDULO RESILIENTE MEZCLA 85-15 AF-A1 – P1

MÓDULO RESILIENTE (INV-E 156/13)									
PROBETA 1									
Altura:	189	mm				Área	8011,8	mm²	
Diametro:	101	mm			Peso Unitario Seco Máximo (kN/m3):	20,47	KN/m³		
MEZCLA (85/15)					ASFALTO A1				
Ciclo No.	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Deformación	Deformación	Deformación	Deformación	MÓDULO
	confinamiento	máximo	contacto	desviador	recuperable LDVT 1	recuperable LDVT 2	recuperable Promedio	Unitaria rec.	RESILIENTE LABORATORIO
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm	mm	mm	x 10 ⁻⁶	MPa
1-1	20,6	19,3	1,93	20,455	0,0170	0,0160	0,0165	0,000002059	249
1-2	20,8	40,1	4,01	40,742	0,0250	0,0220	0,0235	0,000002933	349
1-3	20,8	61	6,1	61,453	0,0310	0,0260	0,0285	0,000003557	434
1-4	34,5	32,9	3,29	34,157	0,0240	0,0210	0,0225	0,000002808	305
1-5	34,4	68	6,8	68,616	0,0330	0,0280	0,0305	0,000003807	453
1-6	34,5	101,8	10,18	103,95	0,0430	0,0370	0,0400	0,000004993	523
1-7	68,80	67,30	6,73	68,563	0,0370	0,0330	0,0350	0,000004369	394
1-8	68,80	136,10	13,61	138,362	0,0530	0,0460	0,0495	0,000006178	562
1-9	68,80	206,40	20,64	207,234	0,0680	0,0620	0,0650	0,000008113	641
1-10	103,30	67,80	6,78	68,75	0,0450	0,0440	0,0445	0,000005554	311
1-11	103,30	102,80	10,28	104,037	0,0520	0,0480	0,0500	0,000006241	419
1-12	103,3	205,1	20,51	207,205	0,0680	0,0620	0,0650	0,000008113	641
1-13	139,7	102,2	10,22	104,119	0,0560	0,0540	0,0550	0,000006865	381
1-14	137,7	136,9	13,69	138,48	0,0600	0,0560	0,0580	0,000007239	480
1-15	137,7	274,4	27,44	255,486	0,1120	0,1050	0,1085	0,000013542	474

MÓDULO RESILIENTE MEZCLA 85-15 AF-A1 – P2

MÓDULO RESILIENTE (INV-E 156/13)									
PROBETA 2									
Altura:	188	mm				Área	8171,3	mm²	
Diametro:	102	mm			Peso Unitario Seco Máximo (kN/m3):	20,05	KN/m³		
MEZCLA (85/15)					ASFALTO A1				
Ciclo No.	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Deformación	Deformación	Deformación	Deformación	MÓDULO
	confinamiento	máximo	contacto	desviador	recuperable LDVT 1	recuperable LDVT 2	recuperable Promedio	Unitaria rec.	RESILIENTE LABORATORIO
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm	mm	mm	x 10 ⁻⁶	MPa
1-1	20,6	19,3	1,93	20,788	0,0150	0,0150	0,0150	0,000001872	279
1-2	20,8	40,1	4,01	41,273	0,0210	0,0210	0,0210	0,000002621	395
1-3	20,8	61	6,1	61,449	0,0250	0,0260	0,0255	0,000003183	485
1-4	34,5	32,9	3,29	34,7	0,0200	0,0210	0,0205	0,000002559	340
1-5	34,4	68	6,8	68,128	0,0270	0,0280	0,0275	0,000003432	498
1-6	34,5	101,8	10,18	103,445	0,0340	0,0370	0,0355	0,000004431	586
1-7	68,80	67,30	6,73	68,099	0,0290	0,0310	0,0300	0,000003744	457
1-8	68,80	136,10	13,61	138,424	0,0430	0,0450	0,0440	0,000005492	633
1-9	68,80	206,40	20,64	206,945	0,0560	0,0600	0,0580	0,000007239	718
1-10	103,30	67,80	6,78	68,238	0,0400	0,0390	0,0395	0,000004930	347
1-11	103,30	102,80	10,28	103,433	0,0430	0,0440	0,0435	0,000005429	478
1-12	103,3	205,1	20,51	207	0,0550	0,0580	0,0565	0,000007052	737
1-13	139,7	102,2	10,22	103,806	0,0470	0,0480	0,0475	0,000005929	440
1-14	137,7	136,9	13,69	138,564	0,0480	0,0510	0,0495	0,000006178	563
1-15	137,7	274,4	27,44	255,408	0,0980	0,1080	0,1030	0,000012856	499

MÓDULO RESILIENTE MEZCLA 70-30 AF-A1 – P1

MÓDULO RESILIENTE (INV-E 156/13)									
PROBETA 1									
Altura:	198	mm				Área	8011,8	mm²	
Diametro:	101	mm			Peso Unitario Seco Máximo (kN/m3):	20,17	KN/m³		
MEZCLA (70/30)					ASFALTO A1				
Ciclo No.	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Deformación	Deformación	Deformación	Deformación	MÓDULO
	confinamiento	máximo	contacto	desviador	recuperable LDVT 1	recuperable LDVT 2	recuperable Promedio	Unitaria rec.	RESILIENTE LABORATORIO
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm	mm	mm	x 10 ⁻⁶	MPa
1-1	20,6	19,3	1,93	20,752	0,0160	0,0150	0,0155	0,000001935	269
1-2	20,8	40,1	4,01	40,936	0,0280	0,0260	0,0270	0,000003370	305
1-3	20,8	61	6,1	61,658	0,0360	0,0330	0,0345	0,000004306	359
1-4	34,5	32,9	3,29	34,305	0,0240	0,0220	0,0230	0,000002871	300
1-5	34,4	68	6,8	68,96	0,0370	0,0340	0,0355	0,000004431	391
1-6	34,5	101,8	10,18	104,022	0,0490	0,0460	0,0475	0,000005929	440
1-7	68,80	67,30	6,73	68,666	0,0400	0,0370	0,0385	0,000004805	359
1-8	68,80	136,10	13,61	138,409	0,0620	0,0580	0,0600	0,000007489	464
1-9	68,80	206,40	20,64	207,067	0,0850	0,0790	0,0820	0,000010235	508
1-10	103,30	67,80	6,78	68,775	0,0450	0,0410	0,0430	0,000005367	322
1-11	103,30	102,80	10,28	104,095	0,0560	0,0510	0,0535	0,000006678	391
1-12	103,3	205,1	20,51	206,965	0,0760	0,0730	0,0745	0,000009299	559
1-13	139,7	102,2	10,22	104,147	0,0560	0,0510	0,0535	0,000006678	392
1-14	137,7	136,9	13,69	138,42	0,0630	0,0580	0,0605	0,000007551	460
1-15	137,7	274,4	27,44	255,268	0,1210	0,1150	0,1180	0,000014728	435

MÓDULO RESILIENTE MEZCLA 70-30 AF-A1 – P2

MÓDULO RESILIENTE (INV-E 156/13)									
PROBETA 2									
Altura:	202	mm				Área	8171,3	mm²	
Diametro:	102	mm			Peso Unitario Seco Máximo (kN/m3):	19,87	KN/m³		
MEZCLA (70/30)					ASFALTO A1				
Ciclo No.	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Deformación	Deformación	Deformación	Deformación	MÓDULO
	confinamiento	máximo	contacto	desviador	recuperable LDVT 1	recuperable LDVT 2	recuperable Promedio	Unitaria rec.	RESILIENTE LABORATORIO
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm	mm	mm	x 10 ⁻⁶	MPa
1-1	20,6	19,3	1,93	20,613	0,0170	0,0190	0,0180	0,000002247	230
1-2	20,8	40,1	4,01	41,029	0,0280	0,0300	0,0290	0,000003620	285
1-3	20,8	61	6,1	61,818	0,0340	0,0390	0,0365	0,000004556	341
1-4	34,5	32,9	3,29	34,28	0,0230	0,0260	0,0245	0,000003058	281
1-5	34,4	68	6,8	68,745	0,0340	0,0390	0,0365	0,000004556	379
1-6	34,5	101,8	10,18	104,018	0,0440	0,0530	0,0485	0,000006054	431
1-7	68,80	67,30	6,73	68,856	0,0350	0,0400	0,0375	0,000004681	369
1-8	68,80	136,10	13,61	138,388	0,0550	0,0660	0,0605	0,000007551	460
1-9	68,80	206,40	20,64	206,959	0,0740	0,0890	0,0815	0,000010172	511
1-10	103,30	67,80	6,78	68,802	0,0370	0,0420	0,0395	0,000004930	350
1-11	103,30	102,80	10,28	103,861	0,0480	0,0550	0,0515	0,000006428	406
1-12	103,3	205,1	20,51	207,043	0,0680	0,0820	0,0750	0,000009361	555
1-13	139,7	102,2	10,22	103,949	0,0500	0,0560	0,0530	0,000006615	395
1-14	137,7	136,9	13,69	138,353	0,0550	0,0640	0,0595	0,000007427	468
1-15	137,7	274,4	27,44	255,415	0,1300	0,1500	0,1400	0,000017474	367

MÓDULO RESILIENTE MEZCLA 50-50 AF-A1 – P1

MÓDULO RESILIENTE (INV-E 156/13)									
PROBETA 1									
Altura:	197	mm				Área	8011,8	mm²	
Diametro:	101	mm			Peso Unitario Seco Máximo (kN/m³):	19,51	KN/m³		
MEZCLA (50/50)					ASFALTO A1				
Ciclo No.	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Deformación	Deformación	Deformación	Deformación	MÓDULO
	confinamiento	máximo	contacto	desviador	recuperable LDVT 1	recuperable LDVT 2	recuperable Promedio	Unitaria rec.	RESILIENTE LABORATORIO
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm	mm	mm	x 10 ⁻⁶	MPa
1-1	20,6	19,3	1,93	20,502	0,0670	0,0640	0,0655	0,000008175	63
1-2	20,8	40,1	4,01	41,248	0,0720	0,0670	0,0695	0,000008675	119
1-3	20,8	61	6,1	62,161	0,0680	0,0630	0,0655	0,000008175	191
1-4	34,5	32,9	3,29	34,435	0,0710	0,0670	0,0690	0,000008612	100
1-5	34,4	68	6,8	69,208	0,0690	0,0640	0,0665	0,000008300	209
1-6	34,5	101,8	10,18	104,332	0,0740	0,0670	0,0705	0,000008799	298
1-7	68,80	67,30	6,73	69,257	0,0810	0,0740	0,0775	0,000009673	180
1-8	68,80	136,10	13,61	138,609	0,0850	0,0750	0,0800	0,000009985	349
1-9	68,80	206,40	20,64	207,117	0,0950	0,0840	0,0895	0,000011171	465
1-10	103,30	67,80	6,78	69,446	0,1030	0,0950	0,0990	0,000012357	141
1-11	103,30	102,80	10,28	104,253	0,0960	0,0890	0,0925	0,000011545	227
1-12	103,3	205,1	20,51	207,142	0,0930	0,0820	0,0875	0,000010921	476
1-13	139,7	102,2	10,22	104,448	0,1020	0,0940	0,0980	0,000012232	214
1-14	137,7	136,9	13,69	138,654	0,0940	0,0850	0,0895	0,000011171	312
1-15	137,7	274,4	27,44	255,705	0,1850	0,1710	0,1780	0,000022217	289

MÓDULO RESILIENTE MEZCLA 50-50 AF-A1 – P2

MÓDULO RESILIENTE (INV-E 156/13)									
PROBETA 2									
Altura:	199	mm				Área	8011,8	mm²	
Diametro:	101	mm			Peso Unitario Seco Máximo (kN/m3):	19,31	KN/m³		
MEZCLA (50/50)					ASFALTO A1				
Ciclo No.	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Esfuerzo	Deformación	Deformación	Deformación	Deformación	MÓDULO
	confinamiento	máximo	contacto	desviador	recuperable LDVT 1	recuperable LDVT 2	recuperable Promedio	Unitaria rec.	RESILIENTE LABORATORIO
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm	mm	mm	x 10 ⁻⁶	MPa
1-1	20,6	19,3	1,93	20,398	0,0180	0,0190	0,0185	0,000002309	222
1-2	20,8	40,1	4,01	40,837	0,0280	0,0300	0,0290	0,000003620	283
1-3	20,8	61	6,1	61,513	0,0340	0,0380	0,0360	0,000004493	344
1-4	34,5	32,9	3,29	34,181	0,0250	0,0260	0,0255	0,000003183	270
1-5	34,4	68	6,8	68,112	0,0350	0,0400	0,0375	0,000004681	365
1-6	34,5	101,8	10,18	103,477	0,0490	0,0550	0,0520	0,000006490	400
1-7	68,80	67,30	6,73	68,004	0,0390	0,0420	0,0405	0,000005055	338
1-8	68,80	136,10	13,61	138,177	0,0620	0,0670	0,0645	0,000008051	431
1-9	68,80	206,40	20,64	206,928	0,0880	0,0890	0,0885	0,000011046	470
1-10	103,30	67,80	6,78	67,995	0,0510	0,0480	0,0495	0,000006178	276
1-11	103,30	102,80	10,28	103,414	0,0590	0,0580	0,0585	0,000007302	356
1-12	103,3	205,1	20,51	206,793	0,0790	0,0810	0,0800	0,000009985	520
1-13	139,7	102,2	10,22	103,587	0,0580	0,0560	0,0570	0,000007114	366
1-14	137,7	136,9	13,69	138,134	0,0600	0,0590	0,0595	0,000007427	467
1-15	137,7	274,4	27,44	255,178	0,1220	0,1210	0,1215	0,000015165	422

r