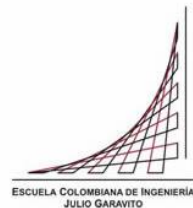


# Maestría en Ingeniería Civil

**Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.**

**Dairo Stevens Puentes Penagos**

**Bogotá, D.C., 15 de junio de 2019**



**Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en geotecnia.**

**Sandra Ximena Campagnoli Martínez**

**Director**

**Bogotá, D.C., 15 de junio de 2019**



La tesis de maestría titulada “**Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado**”, presentada por Dairo Stevens Puentes Penagos, 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 Martínez

Jurado

Fernando Estrada Sánchez

Jurado

Oscar Reyes Ortiz

Bogotá, D.C., 15 de junio de 2019

### Dedicatoria

A mi madre Sara Isabel Penagos Navarrete por su constancia, ingenio, deseo y empoderamiento, todo lo que soy se lo debo a ella y esto es un paso más gracias a ella. A mi hermana Judy Andrea por haber estado cuando la necesité. A Liliana Patiño por haber llegado a mi vida a darme tranquilidad.

### **Agradecimientos**

Quiero expresar mi gratitud a la ingeniera Sandra Campagnoli por su acompañamiento en el proceso. Este trabajo no habría sido posible sin su guía.

Agradecer a los laboratoristas Marco Contreras, Edgar Contreras y Osmar Tolosa por haber apoyado diversas actividades.

Quiero agradecer a la empresa Compañía de Trabajos Urbanos (CTU), Incoasfaltos y MPI por la donación de los materiales que posibilitaron la realización del trabajo.

A la ingeniera Sandy Pardo, por hacer más llevadero el proceso.

A la Escuela Colombiana de Ingeniería por haberme permitido encontrar un propósito de vida.

## Resumen

A nivel mundial se ha observado un aumento en las técnicas de reciclaje profundo donde hay variaciones en el contenido de Pavimento de asfalto Recuperado (RAP, por sus siglas en inglés Reclaimed Asphalt Pavement), utilizando asfalto espumado como agente estabilizador para la obtención de bases competentes que requieren de un dimensionamiento en la estructura del pavimento por lo que se hace indispensable el conocimiento de su comportamiento mecánico, teniendo como indicadores los parámetros de resistencia al corte.

El presente estudio inicia con la investigación del estado del arte de las técnicas de estabilización con asfalto espumado, así como de las metodologías de caracterización de espuma de asfalto y del comportamiento de los materiales que utilizan ésta técnica.

Como objetivo principal se buscó obtener los parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con espuma de asfalto (BSM-AF) mediante ensayos triaxiales monotónicos. Los materiales usados se caracterizaron siguiendo las normas de ensayo del INVIAS 2013 y se mezclaron con la espuma de asfalto atendiendo las recomendaciones del Asphalt Academy de Sudáfrica y de la Wirtgen de Alemania. Se elaboraron un total de 12 fórmulas de trabajo, cada una con diferentes tipo de asfalto (dos provenientes de Barrancabermeja y uno de la planta de asfalto de Apiay de Colombia), porciones de material granular/RAP: 100/0, 85/15, 70/30 y 50/50, dadas con respecto al peso total de agregados secos, y 1% de llenante (cal o cemento).

Los parámetros de diseño de cada mezcla con espuma de asfalto – selección del tipo de llenante y concentración óptima de espuma - se definieron a partir de los resultados de la resistencia a la tracción indirecta (ITS, Indirect Tensile Strength por sus siglas en inglés) y de la Resistencia Conservada (TSR, Tensile Strength Ratio por sus siglas en inglés) obtenidos sobre probetas de 101 mm de diámetro X 64 mm de altura. Con las condiciones así establecidas, se procedió a fabricar probetas de 100mm de diámetro x 200mm de altura empleando compactación vibratoria, que se sometieron a un proceso de curado normalizado y posteriormente se fallaron bajo diferentes presiones de confinamiento en un equipo triaxial monotónico, para la obtención de los parámetros de resistencia al corte.

Para las diferentes fórmulas de trabajo, los valores de cohesión se encuentran entre **227kPa** y **620kPa** y los del ángulo de fricción entre **19°** y **50°**. Estos valores están acordes con los reportados para materiales estabilizados con asfalto espumado, investigados por

diversos autores. Se concluye que los parámetros de resistencia al corte son dependientes de la proporción de RAP utilizada y que el tipo de cemento asfáltico usado en el espumado tiene incidencia en el comportamiento de dichos parámetros.

Palabras Claves: Materiales estabilizados con asfalto, Asfalto Espumado, Pavimento de Asfalto Recuperado (RAP); Cohesión, Ángulo de Fricción Interna, Reciclaje de Pavimentos.

## Índice general

Capítulo 1. Introducción.....	16
1.1 Antecedentes .....	16
1.2 Estado actual del problema.....	17
1.3 Objetivos.....	18
1.3.1    Objetivo general:.....	18
1.3.2    Objetivos específicos:.....	18
1.4 Metodología .....	18
1.5 Organización del trabajo de grado .....	21
Capítulo 2. Revisión de literatura.....	24
2.1 Introducción .....	24
2.2 Asfalto espumado.....	25
2.2.1    Origen de la tecnología de asfalto espumado.....	25
2.2.2    Características y propiedades del asfalto espumado.....	28
2.2.3    Medida de las características de la espuma de asfalto.....	41
2.2.4    Factores que influyen en las propiedades de la espuma de asfalto. ....	44
2.3 Materiales estabilizados con asfalto espumado – bsm-fa .....	46
2.3.1    Ventajas y limitaciones de las mezclas con asfalto espumado. ....	49
2.3.2    Propiedades índice.....	51
2.3.3    Comportamiento de los bsm.....	54
2.3.4    Parámetros que afectan el comportamiento de los bsm.....	56
2.4 Resistencia al corte de los BSM .....	62
2.4.1    Comportamiento de la resistencia al corte .....	64
2.4.2    Ensayo simple triaxial monotónico .....	75
2.5 Compactación y curado.....	76
2.5.1    Compactación.....	76
2.5.2    Curado .....	82
2.6 Bibliografía.....	83
Capítulo 3. Materiales, procedimientos de laboratorio y métodos de ensayo .....	92
3.1 Introducción .....	92
3.2 Materiales.....	92
3.2.1    Pavimento Asfáltico Recuperado – RAP ( <i>Reclaimed Asphalt Pavement</i> ).....	92



3.2.2	Material Granular virgen .....	95
3.2.3	Dosificaciones de Agregados.....	96
3.2.4	Cementos Asfálticos .....	102
3.2.5	Llenantes Activos.....	106
3.3	Establecimiento de fórmulas de trabajo.....	107
	Procedimiento de laboratorio y métodos de ensayo.....	107
3.3.1	Selección de llenante y asfalto óptimos.....	107
3.3.2	Compactación y curado de probetas para parámetros de resistencia.....	111
3.4	ITS y triaxial monotónico.....	111
3.4.1	Ensayo de Resistencia a la Tensión Indirecta (ITS).....	111
3.1.1	Ensayo Triaxial Monotónico .....	113
3.2	Bibliografía.....	116
Capítulo 4.	Diseño De Mezcla.....	117
4.1	Introducción .....	117
4.2	Mezcla 100-0 .....	117
4.2.1	Definición de llenante - Cemento asfáltico (A1).....	117
4.2.2	Definición de llenante - Cemento asfáltico (B1).....	119
4.2.3	Definición de llenante - Cemento asfáltico (B2).....	120
4.2.4	Parámetros finales de diseño de Mezcla 100-0.....	121
4.3	Mezcla 85-15 .....	122
4.3.1	Definición de llenante - Cemento asfáltico (A1).....	122
4.3.2	Definición de llenante - Cemento asfáltico (B1).....	124
4.3.3	Definición de llenante - Cemento asfáltico (B2).....	125
4.3.4	Parámetros finales de diseño de Mezcla 85-15.....	126
4.4	Mezcla 70-30 .....	127
4.4.1	Definición de llenante - Cemento asfáltico (A1).....	127
4.4.2	Definición de llenante - Cemento asfáltico (B1).....	129
4.4.3	Definición de llenante - Cemento asfáltico (B2).....	130
4.4.4	Parámetros finales de diseño de Mezcla 70-30.....	131
4.5	Mezcla 50-50 .....	132
4.5.1	Definición de llenante - Cemento asfáltico (A1).....	132
4.5.2	Definición de llenante - Cemento asfáltico (B1).....	134
4.5.3	Definición de llenante - Cemento asfáltico (B2).....	135

4.5.4	Parámetros finales de diseño de Mezcla 50-50.....	136
4.6	Resumen de Diseños de fórmulas de trabajo.....	137
4.7	Bibliografía.....	141
Capítulo 5.	Resultados y análisis del ensayo triaxial monotónico .....	142
5.1	Introducción .....	142
5.2	Mezcla 100-0 .....	142
5.2.3	Cemento asfáltico (B2) .....	147
5.2.4	Resumen de Resultados para mezcla 100-0.....	150
5.3	Mezcla 85-15 .....	155
5.3.1	Cemento asfáltico (A1) .....	155
5.3.2	Cemento asfáltico (B1) .....	155
5.3.3	Cemento asfáltico (B2) .....	157
5.3.4	Resumen de Resultados para mezcla 85-15.....	158
5.4	Mezcla 70-30 .....	161
5.4.1	Cemento asfáltico (A1) .....	161
5.4.2	Cemento asfáltico (B1) .....	161
5.4.3	Cemento asfáltico (B2) .....	163
5.4.4	Resumen de Resultados para mezcla 70-30.....	165
5.5	Mezcla 50-50 .....	167
5.5.1	Cemento asfáltico (A1) .....	167
5.5.2	Cemento asfáltico (B1) .....	169
5.5.3	Cemento asfáltico (B2) .....	171
5.5.4	Resumen de Resultados para mezcla 50-50.....	173
5.6	Resumen de resultados de parámetros de resistencia al corte para las mezclas analizadas. 175	
5.7	Bibliografía.....	179
Capítulo 6.	Conclusiones Y Recomendaciones.....	182
6.1	Conclusiones .....	182
6.1.1	Conclusiones generales.....	182
6.1.2	Conclusiones particulares .....	185
6.2	Recomendaciones.....	187

## Índice de tablas

Tabla 2.1 Valores Mínimos de HL y ER Recomendados por Manuales e Investigadores.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 2.2 Granulometrías de diferentes guías. Adaptado de (Leek & Jameson, 2011) .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 2.3 Recomendaciones Generales de Principales Guías de Diseño. (Elaboración Propia). .....	53
Tabla 2.4 Efecto del Incremento en el Contenido de Asfalto en las propiedades y Comportamiento de los BSM(Lynch & Jenkins, 2013).....	58
Tabla 2.5 Especificaciones de Manual de Martillo BOSCH. Adaptación de (Constantyn Kelfkens, 2008) .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 3.1 Granulometría del Material de RAP frente a TG2. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 3.2 Características Físicas del RAP .....	94
Tabla 3.3 Granulometría del Material Granular frente a TG2.....	95
Tabla 3.4 Propiedades de Caracterización de Material. ....	96
Tabla 3.5 Tabla 3.5 Dosificaciones de Agregados. ....	97
Tabla 3.0.6 Granulometrías de cada Mezcla y Recomendación de Gradación de la TG2.....	100
Tabla 3.7 Características de las Mezclas para Trabajo.....	101
Tabla 3.8 Clasificación y Penetración por Origen de cemento Asfáltico.....	102
Tabla 3.9 Propiedades de Asfalto Espumado para los contenidos de FWC (%) y Temperatura (°C) seleccionados para mezcla.....	105
Tabla 3.10 Mezclas por tipo de Asfalto.....	107
Tabla 3.11 Mezclas por Proporción de granular (MG) y RAP .....	107
Tabla 3.12 Estimación de óptimo de Asfalto Teórico en Función de Granulometría.(Wirtgen GmbH, 2012) .....	108
Tabla 3.13 Óptimos Teóricos de Asfalto por Tipo de Mezcla.....	108

## Índice de figuras

Figura 2.1 Esquema de Cámara de Expansión de Espuma y Sistema de Espumado. a) Ilustración de la vista interna de la Cámara de Expansión. (Newcomb et al., 2015) b) Sistema de Espumado de Wirtgen. (Wirtgen GmbH, 2009).....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 2.2 Sistema de Espumado y Boquilla Desarrollado por Csanyi. (Buss, 2010). ....	27
Figura 2.3 a) Curva de Decaimiento para diferentes contenidos de agua. (B. W. Hailesilassie, Hugener, Bieder, & Partl, 2015). b) Curva de decaimiento para dos tipos de asfalto de diferente penetración (He & Wong, 2006). c) Curva de decaimiento para diferentes presiones de aire (He & Wong, 2006). d) Curva de decaimiento para diferentes temperaturas (He & Wong, 2006).....	29
Figura 2.4 Parámetro de vida media HL a) Valor de HL (t 1/2) en Curva de Decaimiento.(Ebels & Jenkins, 2007a) b) Esquema de medición de propiedades de la espuma. (Elaboración Propia). ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 2.5 Determinación del Contenido Óptimo de Agua para Producción de Espuma. (Asphalt Academy, 2009b) .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

Figura 2.6 Ilustración Conceptual de la microestructura de una Mezcla con Asfalto Espumado. (Fu, 2009). ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 2.7 a). Área Bajo curva de decaimiento de la espuma. b). Modelo exponencial y datos medidos. (K.J. Jenkins, 1999) ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 2.8 Relación entre Expansión medida y real en función de HL para diferentes tiempos de disparo. (Sunarjono, 2011)..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 2.9 Optimización de las características de la espuma de Asfalto Usando el Concepto FI(K.J. Jenkins, 2000; Sunarjono, 2008). ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 2.10 a) Esquema de sistema para toma de Imágenes con Rayos X.(B. W. Hailesilassie et al., 2015) (B. Hailesilassie et al., 2014). b) Sistema para toma de imágenes digitales con cámara fotográfica (Arega, Bhasin, & Li, 2015) c) Imágenes digitales procesadas. (Newcomb et al., 2015). d) Curva de Decaimiento mediante Rayos X. (B. W. Hailesilassie, Schuetz, et al., 2015) ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 2.11 a) Imágenes de análisis de tamaños de Burbujas sobre Radiografías tomadas con Rayos X (B. W. Hailesilassie, Hugener, & Partl, 2015). b) Distribución de Tamaños de Burbujas. (Arega et al., 2015). c) Imágenes de Burbujas en relación con ER mediante imágenes. (Yin et al., 2014) ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 2.12 Métodos de medición Invasiva de Propiedades a) Método de la varilla Graduada. b) Método AFCT. (Ozturk, 2013). c) Curvas de Decaimiento Obtenidas Mediante Técnica AFCT. (Campagnoli et al., 2016) ..... 42

Figura 2.13 Métodos No Invasivos. a). Sistema de Captura Mediante Laser y Cámara.(Newcomb et al., 2015) b) Sensor Infrarojo. (Campagnoli et al., 2016) ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 2.14 Determinación del Contenido Óptimo de Agua en Función de la Viscosidad del asfalto espumado.(Saleh, 2006)..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 2.15 Valores HL Y ER para un Mismo Asfalto a Diferentes Temperaturas. (Campagnoli et al., 2016) ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 2.16 Probetas de BSM-FA. a) Probetas Estabilizadas con Asfalto Espumado. b) Material estabilizado con bajo contenido de RAP (15%). c) Material estabilizado con alto contenido de RAP (85%). d) y e) Detalle de las caras de la probeta partida del ensayo de tracción indirecta ITS. (Elaboración Propia)..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 2.17 Granulometrías de Guías (Leek & Jameson, 2011). ..... 52

Figura 2.18 Comportamiento Conceptual de Materiales Usados en Pavimentos (Asphalt Academy, 2009b) ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 2.19 Condiciones de Falla en el Pavimento. Adaptado de: (Collings & Jenkins, 2012) ... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 2.20 Influencia del Contenido de Llenante Activo en a) Módulo Resiliente.(Sufian et al., 2014) de roca Triturada (Crush Rock-CR) y RAP. b) Resistencia Conservada en Tracción Indirecta (TSR) (Hainin, Matori, & Akin, 2014) ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 2.21 Influencia del Tiempo en el Módulo Resiliente.(Sufian et al., 2014) , b) en la resistencia a la tracción Indirecta ITS (Hainin et al., 2014) y c) Resistencia Conservada (TSR) (Hainin et al., 2014) ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 2.22 a). Gráfica Esfuerzo Vs. Deformación. b). Representación de parámetros de corte mediante el círculo de Mohr.(Van Zyl, 2015).....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 2.23 Esquema representativo de material Predominantemente Friccional (Izq.) y material Predominantemente Cohesivo. (Der.) (Jooste et al., 2007).....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 2.24 Análisis Conceptual de Esfuerzos para BSM. (K.J. Jenkins & Collings, 2016) .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 2.25 Resultados de ensayos realizados por Cizkova .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 2.26 Envolventes de resistencia para mezclas con RAP (Ebels, 2008).....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 2.27 Resultados de ensayos triaxiales en materiales con cemento al 1% y 2% AF. (Ben, 2014) .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 2.28 Relación entre ángulo de fricción y cohesión con el contenido de RAP. . (Ben, 2014) .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 2.29 Círculos Mohr Coulomb para materiales granulares con y sin asfalto espumado (K.J Jenkins, 2000).....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 2.30. Envolventes de resistencia para diferentes materiales. (Ebels & Jenkins, 2007b) .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 2.31 a) Variación de la cohesión con el aumento del contenido de cemento. b) a) Variación del ángulo de fricción con el aumento del contenido de cemento. (Adaptación de Achille, (2013) .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 2.32 Esquema General de métodos de Compactación. (K.J. Jenkins et al., 2012) .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 2.33 Relación Densidad Seca y Humedad. (Constantyn Kelfkens, 2008).....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 2.34 Tiempos de Compactación por capa e Influencia de la Temperatura del Material en la Compactación. (K.J. Jenkins et al., 2012) .....	80
Figura 2.35 Comportamiento Conceptual de los BSM-AF. (Mathaniya Twagira, 2010) .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 2.36 Niveles de Formación de Uniones entre Partículas de una Mezcla con Asfalto Espumado. Adaptado de:(Mathaniya Twagira, 2010) .....	83
Figura 3.37 Curva Granulométrica de RAP comparado con las Franjas Ideales recomendado por TG2. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 38 Curva Granulométrica de Material Granular Virgen comparado con las Franjas Ideales recomendado por TG2 .....	96
Figura 3.39 Granulometría 85-15 Teórica- Trabajada.....	98
Figura 3.40 Granulometría 70-30 Teórica- Trabajada.....	99
Figura 3.41 Granulometría 50-50 Teórica- Trabajada.....	99
Figura 3.42 Granulometría de Mezclas (Granular- RAP) Vs. Recomendación TG2.....	100
Figura 3.43 Relación Humedad Vs. Peso Unitario Seco para Diferentes Proporciones de Mezcla.	101
Figura 3.44 Viscosidad (Pa*s) Vs. Temperatura para Cemento Asfáltico .....	102
Figura 3.45 a). Planta de espumado Wirtgen WLB 10S. b). Mezcladora WLM30.....	103

Figura 3.46 a) Selección de contenido de Agua de Espumado (FWC) según (Asphalt Academy, 2009b). b).Selección de FWC según recomendación Campagnoli et al., (1998). Adaptación Propia. ....	103
Figura 3.47 Vida Media HL(s) Vs. Relación de Expansión ER para Asfalto A1 .....	104
Figura 3.48 Vida Media HL(s) Vs. Relación de Expansión ER para Asfalto B1.....	105
Figura3.49 Vida Media HL(s) Vs. Relación de Expansión ER para Asfalto B2.....	105
Figura 3.50 Características de los llenantes utilizados.....	106
Figura 3.51 Selección de Llenante Óptimo.....	109
Figura 3.52 Selección de Asfalto Óptimo .....	110
Figura 3.53 Montaje de Ensayo ITS. ....	112
Figura 3.54 Fabricación de probetas para ensayo Triaxial Monotónico	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 3. 55 a) Equipo Dyanapve. b) Sistema de Control y Procesamiento.	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

## Índice de anexos

<a href="#">Anexo 1: Densidad Seca Proctor Modificado</a> .....	188
<a href="#">MEZCLA 100-0:</a> .....	188
<a href="#">MEZCLA 85-15:</a> .....	189
<a href="#">MEZCLA 70-30:</a> .....	190
<a href="#">MEZCLA 50-50:</a> .....	191
<a href="#">Anexo 2: Características de Espuma de Asfalto</a> .....	192
<a href="#">Cemento asfáltico 60-70 TIPO A1</a> .....	192
<a href="#">Cemento asfáltico 60-70 TIPO B1</a> .....	193
<a href="#">Cemento asfáltico 60-70 TIPO B2</a> .....	194
<a href="#">Anexo 3: Diseño de Mezclas</a> .....	195
<a href="#">Obtención de llenante Mezcla 100-00 AF-A1</a> .....	195
<a href="#">Obtención de llenante Mezcla 85-15 AF-A1</a> .....	196
<a href="#">Obtención de llenante Mezcla 70-30 AF-A1</a> .....	197
<a href="#">Obtención de llenante Mezcla 50-50 AF-A1</a> .....	198
<a href="#">Obtención de llenante Mezcla 100-0 AF-B1</a> .....	199
<a href="#">Obtención de llenante Mezcla 85-15 AF-B1</a> .....	200
<a href="#">Obtención de llenante Mezcla 70-30 AF-B1</a> .....	201
<a href="#">Obtención de llenante Mezcla 100-0 AF-B2</a> .....	203
<a href="#">Obtención de llenante Mezcla 85-15 AF-B2</a> .....	204
<a href="#">Obtención de llenante Mezcla 70-30 AF-B2</a> .....	205
<a href="#">Obtención de llenante Mezcla 50-50 AF-B2</a> .....	206
<a href="#">Obtención de óptimo de asfalto espumado Mezcla 100-00 AF-A1</a> .....	207
<a href="#">Obtención de óptimo de asfalto espumado Mezcla 85-15 AF-A1</a> .....	208
<a href="#">Obtención de óptimo de asfalto espumado Mezcla 70-30 AF-A1</a> .....	209
<a href="#">Obtención de óptimo de asfalto espumado Mezcla 50-50 AF-A1</a> .....	210
<a href="#">Obtención de óptimo de asfalto espumado Mezcla 100-0 AF-B1</a> .....	211
<a href="#">Obtención de óptimo de asfalto espumado Mezcla 85-15 AF-B1</a> .....	212
<a href="#">Obtención de óptimo de asfalto espumado Mezcla 70-30 AF-B1</a> .....	213
<a href="#">Obtención de óptimo de asfalto espumado Mezcla 50-50 AF-B1</a> .....	214
<a href="#">Obtención de óptimo de asfalto espumado Mezcla 100-00 AF-B2</a> .....	215
<a href="#">Obtención de óptimo de asfalto espumado Mezcla 85-15 AF-B2</a> .....	216
<a href="#">Obtención de óptimo de asfalto espumado Mezcla 70-30 AF-B2</a> .....	217

<a href="#">Obtención de óptimo de asfalto espumado Mezcla 50-50 AF-B2</a> .....	218
<a href="#">Anexo 4: Ensayos Triaxiales</a> .....	219
<a href="#">Mezcla 100-00 AF-A1</a> .....	219
<a href="#">Mezcla 85-15 AF-A1</a> .....	220
<a href="#">Mezcla 70-30 AF-A1</a> .....	221
<a href="#">Mezcla 50-50 AF-A1</a> .....	222
<a href="#">Mezcla 100-0 AF-B1</a> .....	223
<a href="#">Mezcla 85-15 AF-B1</a> .....	224
<a href="#">Mezcla 70-30 AF-B1</a> .....	225
<a href="#">Mezcla 50-50 AF-B1</a> .....	226
<a href="#">Mezcla 100-00 AF-B2</a> .....	227
<a href="#">Mezcla 85-15 AF-B2</a> .....	228
<a href="#">Mezcla 70-30 AF-B2</a> .....	229
<a href="#">Mezcla 50-50 AF-B2</a> .....	230
<a href="#">Anexo 5: Valores de Esfuerzo Deformación</a> .....	231
<a href="#">Mezcla 85-15 AF-B1</a> .....	234
<a href="#">Mezcla 70-30 AF-B1</a> .....	235
<a href="#">Mezcla 50-50 AF-B1</a> .....	236
<a href="#">Mezcla 85-15 AF-B2</a> .....	238
<a href="#">Mezcla 70-30 AF-B2</a> .....	239
<a href="#">Mezcla 50-50 AF-B2</a> .....	240



# CAPÍTULO 1. Introducción

## 1.1 Antecedentes

Los materiales estabilizados con asfalto espumado BSM's- Foam, por sus siglas en inglés (Bitumen Stabilized Materials-Foam), han sido utilizados como capa de base de los pavimentos en las últimas décadas alrededor del mundo, principalmente en Sudáfrica, Europa y Australia. Estos materiales suelen implementarse principalmente en proyectos de rehabilitación de pavimentos existentes, sin embargo su aplicación también puede darse en proyectos nuevos (Lynch & Jenkins, 2013). Su utilización tiene beneficios ambientales y económicos que invitan a aumentar la investigación en este campo relativamente reciente.

La resistencia al corte se caracteriza por dos parámetros, cohesión  $c$  y ángulo de fricción interna  $\phi$ . Estos parámetros describen la envolvente de falla en el modelo Mohr- Coulomb. (...) y son usados para clasificar a los materiales (Ebels & Jenkins, 2007b). También proveen información del comportamiento de la resistencia a la deformación permanente (Asphalt Academy, 2009b) y son utilizados como parámetros de diseño de estructuras de pavimento en modelos avanzados actuales como el diseño mecanístico empleado por los Sudafricanos y aplicado en el software especializado denominado Rubicon<sup>1</sup>.

Según varios autores (Asphalt Academy, 2009b; Ebels & Jenkins, 2007b; K.J. Jenkins & Mulusa, 2008; Kim & Lee, 2011; Ozturk, 2013; Wirtgen GmbH, 2012) los asfaltos espumados pueden ser utilizados en combinación con material reciclado, conocido como Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). Este material proviene del proceso de fresado de las capas asfálticas de los pavimentos. Con la utilización de éste material se presenta un beneficio ambiental y económico doble: por un lado, se disminuyen las temperaturas de producción y construcción y por otro lado, se utilizan materiales sin requerir la explotación de nuevas fuentes.

El proceso de espumado en los asfaltos tiene sus orígenes a mediados de los años 50 por las investigaciones realizadas por el doctor Lady H Csanyi de la universidad estatal de Iowa. Posteriormente en el año 1968 la Mobil Oil Australia adquiere los derechos del invento original (Kendall, Baker, Evans, & Ramanujam, 1999) y no es hasta los años 90 que su

---

<sup>1</sup> <http://www.rubicontoolbox.com/Pages/home.aspx>

utilización se empezó a extender, debido entre otras razones, a la liberación de las patentes existentes relacionadas con la tecnología (Ebels & Jenkins, 2007b).

A pesar de la relativa novedad de las tecnologías de asfalto espumado como estabilizante de materiales, el estado del arte muestra desarrollos e investigaciones que permiten la implementación en nuestro medio de las técnicas usadas en los manuales existentes. En la actualidad, la utilización de asfalto espumado como estabilizante de material con cierto contenido de RAP se desarrolla, principalmente, bajo la guía metodológica TG2 de 2009 desarrollada por varios investigadores para Asphalt Academic de Sudáfrica, y en cuanto a los desarrollos del proceso de reciclaje de pavimentos y mezclas con asfaltos, se tiene el Manual de Wirtgen Cold Recycling Technology de Alemania, también existen desarrollos por parte de (“AustStab - Pavement Recycling and Stabilisation Association I”, s/f), Austraroads de Australia y la (“Asphalt Recycling & Reclaiming Association (ARRA) – Asphalt Recycling Reclaiming Association”, s/f) de los Estados Unidos de América.

## **1.2 Estado Actual del Problema**

No se conocen estudios sobre los parámetros de resistencia al corte en materiales estabilizados en el medio colombiano, ni la influencia que tiene el asfalto espumado sobre dichos parámetros. Su investigación y análisis es fundamental para desarrollar e implementar en el país nuevas metodologías de diseño, así como para comprender de manera más profunda y correcta estas nuevas tecnologías y contribuir con el aumento en el uso de materiales reciclados, situación que se espera se dé en las carreteras y vías urbanas del país (Ruiz Ojeda, Sanabria, Carreño Gomez, & Chiman, 2013).

El progreso vial del país que se espera en los próximos años bajo los proyectos de alianza público-privada (APP) denominados 4G, no solo invita al desarrollo económico sino también a adelantos en el campo tecnológico, relacionados con las estructuras de pavimento.

Los proyectos en concesión de vías 4G espera en 30 años tener alrededor de 7601 km de vías, con una inversión total de COP\$55 Billones del año 2013, (Agencia Nacional de Infraestructura, 2016). Una inversión de esta envergadura no solo promueve el desarrollo económico de la nación, sino además invita a la implementación de tecnologías e investigaciones para asegurar la óptima calidad de los proyectos que se ejecutarán.

De manera similar como hoy se incentiva el uso de caucho reciclado en los factores de calidad de las vías 4G (Tiempo, 2016), se espera contribuir con este tipo de investigaciones a que en un mediano plazo la utilización de RAP y de estabilizantes hagan parte de los pliegos de licitación; para lograr este objetivo, es necesario que el comportamiento de estos

materiales se tenga identificado, y que las técnicas de diseño existentes a nivel internacional se implementen en nuestro medio con la debida adaptación a las condiciones de materiales y de ambiente.

### **1.3 Objetivos**

El trabajo que se pretende llevar a cabo profundiza en la línea de pavimentos, específicamente en la caracterización de materiales y propiedades de resistencia al corte. Adicionalmente, aborda los conocimientos básicos sobre caracterización de materiales, comportamiento para uso de ingeniería, resistencia de materiales granulares, así como las técnicas de laboratorio vigentes para su caracterización.

#### **1.3.1 Objetivo general:**

Determinar los parámetros de resistencia al corte - cohesión y ángulo de fricción interna de materiales estabilizados con asfalto espumado.

#### **1.3.2 Objetivos específicos:**

- Implementar la metodología de diseño de mezclas para materiales estabilizados con asfalto espumado – Bitumen Stabilised Materials (BSMs) planteada en la guía metodológica TG2 Suráfricana.
- Evaluar el efecto de diferentes concentraciones de RAP sobre los parámetros de resistencia al corte.
- Evaluar la influencia de los cementos asfálticos y de sus características de espumado (Expansión y Vida media) sobre los parámetros de resistencia al corte.

### **1.4 Metodología**

Para la realización del presente trabajo se han considerado tres etapas de tal forma que desarrolle completamente el nivel 2 de diseño de una mezcla con asfalto espumado, aplicando la metodología descrita en el manual TG2 elaborado por el Asphalt Academy de Sudáfrica.

Los niveles desarrollados en el manual TG2 son tres (03), los cuales aumentan las especificaciones de los materiales y el grado de análisis, según el tránsito. El nivel 1, se recomienda para vías con un volumen de tránsito inferior a 3 millones de ejes equivalentes;

el nivel 2, se recomienda para vías con un volumen de tránsito inferior a 6 millones de ejes equivalentes y el nivel 3, para vías con un volumen de tránsito superior a 6 millones de ejes equivalentes de 80 kN.

### **Etapas 1.**

En esta etapa, se desarrolló la caracterización de los materiales granulares y de los asfaltos utilizando las técnicas convencionales de mecánica de suelos siguiendo las normas de ensayo del INVIAS 2013. Comprende la consecución de los materiales necesarios para el desarrollo del estudio a saber: granular de base, RAP y asfalto. El material de base granular se obtuvo de canteras que sirven como abastecimiento de materiales para construcción de vías en la ciudad de Bogotá y el asfalto a utilizar fue suministrado por dos proveedores reconocidos en el país. El material de reciclado RAP se obtuvo de apiques de un proyecto en ejecución en cercanías a la ciudad de Bogotá.

El material de Base y el reciclado deben cumplir con las especificaciones INVIAS 2013 y serán comparados con las especificaciones del apéndice A de la Guía metodológica TG2. El objetivo principal de esta etapa es determinar si este material resulta adecuado para ser estabilizado con asfalto espumado, de lo contrario, es indispensable el cambio de material o el ajuste de sus propiedades granulométricas.

Adicionalmente a la obtención y caracterización del material, es necesario realizar el ensayo de Proctor modificado, esto con el fin de obtener la humedad óptima y densidad seca máxima con la que se deberán realizar las probetas, previo a la etapa de ensayos.

En esta etapa inicial también aborda la recolección de literatura y la adquisición de los elementos necesarios para los ensayos a ejecutar en la etapa 3, tales como el martillo vibratorio, los moldes de fabricación y la cámara triaxial para probetas de 100mm X 200mm. Los asfaltos espumados a utilizar (3 en esta investigación) se caracterizaron en función de sus propiedades: relación de expansión (ER) y vida media (HL), dichos parámetros permiten definir el contenido de agua y la temperatura a utilizar en la etapa de producción de la espuma que asegure las mejores condiciones de cubrimiento de las partículas finas del agregado.

Ya que la temperatura del asfalto es uno de los factores más importantes en la producción de espuma (Wirtgen GmbH, 2012), es necesario verificar la temperatura a la que la espuma logra su mejor calidad especialmente para vida media (Wirtgen GmbH, 2012), por lo que en

la etapa de caracterización de la espuma, el asfalto se llevó a cuatro temperaturas (140°C, 150° C, 160° C y 170° C).

Luego de la caracterización del asfalto espumado, se procede al cálculo de los óptimos de llenante y asfalto. Estos valores óptimos se obtienen fabricando probetas y sometiéndolas a los ensayos propuestos por la guía TG2.

### **Etapa 2.**

En la segunda etapa del proyecto se estableció la fórmula de trabajo para cada mezcla, es decir, se obtuvieron el tipo de llenante (filler), así como el contenido de asfalto óptimo.

Se fabricaron 18 probetas de 100 mm de diámetro y 64 mm de altura con el contenido óptimo teórico de asfalto obtenido en función del material granular a utilizar, específicamente del Pasa los tamices No 4 y No 200. De las 18 probetas, 6 tendrán cal, 6 cemento y 6 no tienen llenante diferente al material natural pasa tamiz #No.200. Cada juego de probetas tiene un proceso de curado en seco y en condición húmeda; posterior al curado, se someten al ensayo de corte por tracción indirecta (ITS). El conjunto de probetas que alcanzan los mayores resultados de ITS húmedo e ITS seco, cumpliendo con los respectivos valores mínimos y la resistencia conservada (TSR) recomendados, permiten seleccionar el llenante con el que se debe trabajar la mezcla de diseño.

Con el llenante seleccionado, se elaboraron 18 probetas de 100 mm de diámetro y 64 mm variando el contenido de asfalto inicial en 0.2% y 0.4% por encima y 0.2% por debajo del valor óptimo inicial. Las probetas se sometieron al ensayo ITS en condición húmeda y seca, de manera similar al paso anterior, el asfalto óptimo seleccionado fue aquel que presentó los mayores valores de ITS y de TSR, cumpliendo con los valores mínimos especificados. Los porcentajes de RAP a utilizar en la mezcla fueron de 0%, 15%, 30% y 50 % del peso seco total de agregados en la mezcla.

### **Etapa 3.**

Con el llenante y el óptimo de asfalto definidos, se procedió a la fabricación de probetas de 100mm de diámetro X 200mm de altura siguiendo los lineamientos de la guía metodológica TG2 para determinar los parámetros de resistencia al corte mediante ensayos triaxiales monotónicos.

Aun cuando la TG2 recomienda probetas de 150mm de diámetro por 300mm de altura compactadas en 5 capas de igual espesor con martillo vibrador, el tamaño utilizado en el presente trabajo fue de 100mm X 200mm dado que la cámara triaxial con la que se contaba

en el laboratorio en el momento de realizar los ensayos impedían la utilización de muestras más grandes. Se recomienda para próximas investigaciones el uso de cámaras de mayor dimensión.

Para la compactación de los materiales estabilizados con asfalto espumado, existen diferentes equipos de vibración recomendados en la literatura (Academy, 2009; Asphalt Academy, 2009b; Collings & Jenkins, 2012; K.J. Jenkins & Collings, 2015; K.J. Jenkins & Constantyn Kelfkens, 2008; K.J. Jenkins & Mulusa, 2009; Kim & Lee, 2011; Leek & Jameson, 2011; Mulusa, 2009). En esta etapa se desarrolló el montaje de un sistema de compactación para las muestras siguiendo las recomendaciones existentes de la guía TG2 y se utilizó un compactador marca Bosch ®.

La ejecución de los ensayos triaxiales se llevó a cabo en la máquina Dynapav de los laboratorios de suelos y pavimentos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. El equipo cuenta con el software necesario para implementar los niveles de carga que se requieren para los distintos ensayos y aplicación de presiones de cámara de 50 kPa, 100 kPa y 200 kPa.

## **1.5 Organización del Trabajo de Grado**

El trabajo presentado está organizado en **6** capítulos descritos a continuación:

**Capítulo 1. INTRODUCCIÓN:** Se presenta un resumen general de los antecedentes junto con 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 planteados en el presente estudio y adicionalmente, se incluye un breve resumen de la metodología seguida.

**Capítulo 2. REVISIÓN DE LITERATURA:** Este capítulo contiene la revisión bibliográfica de los materiales estabilizados con asfalto espumado-BSM's-Foam en lo referente a las definiciones, historia, comportamientos y características, así como una descripción del ensayo triaxial usado para obtener los parámetros de resistencia al corte del material junto con los valores reportados para materiales similares en diferentes investigaciones, para establecer sus órdenes de magnitud.

**Capítulo 3. MATERIALES, PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO Y MÉTODOS DE ENSAYO:** Se muestra la metodología y el diseño experimental seguido. Incluye una descripción de los equipos y materiales usados, la forma de preparación y tipo mezclas, el método de compactación, curado y ensayo de probetas y, en general, se describen los protocolos de ensayo de laboratorio.

Capítulo 4. **DISEÑO DE MEZCLA:** Se presentan los resultados de los ensayos de ITS sobre briquetas tipo Marshall que permitieron obtener los parámetros de mezcla como lo son los contenidos de agua de espumado (FWC), tipo de llenante (cal, cemento o natural) y contenido óptimo de la espuma de asfalto. Se muestran todas las tablas y gráficos de los ensayos realizados, sus resultados y respectiva interpretación.

Capítulo 5. **RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE OBTENIDOS EN EL ENSAYO TRIAXIAL MONOTÓNICO:** Este capítulo contiene los resultados de los ensayos triaxiales realizados sobre las probetas de cada mezcla para obtener los parámetros de cohesión y ángulo de fricción interna. Se presentan y analizan las curvas esfuerzo deformación y los círculos de Mohr que permitieron obtener los valores de los parámetros de resistencia junto con una comparación con los respectivos valores reportados por diferentes autores.

Capítulo 6. **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 de la caracterización básica de los materiales pétreos – granulares y RAP y de los cementos asfálticos, de las propiedades de la espuma de asfalto y de los diseños de mezcla, La segunda, corresponde a las conclusiones particulares basadas en las observaciones sobre los resultados obtenidos de los ensayos triaxiales y se muestra la influencia de las variables consideradas (tipo de asfalto, proporción de materiales reciclados) sobre las propiedades de resistencia al corte del material (cohesión y ángulo de Fricción interna).

## 1.6 Bibliografía

Academy, A. (2009a). Procedure for Compaction of Test Specimens Using the Vibratory Hammer.

Academy, A. (2009b). *TG2-A guideline for the Design and construction of Bitumen Stabilised Materials*. (2da. ed.). Pretoria: Asphalt Academy.

Agencia Nacional de Infraestructura. (2016). ANI. Recuperado a partir de <http://ani.gov.co/>

Asphalt Recycling & Reclaiming Association (ARRA) – Asphalt Recycling And Reclaiming Association. (s/f).

AustStab - Pavement Recycling and Stabilisation Association |. (s/f).

Collings, D., & Jenkins, K. J. (2012). Pavement Rehabilitation using Bitumen Stabilisation. State-of-the-art. *23 rd Road Pavement Forum*, (May).

- Jan Ebels, L., & Jenkins, K. J. (2007). Mix design of bitumen stabilised materials: Best practice and considerations for classification. *Proceedings of the 9th Conference on*, (September), 213–232.
- Jenkins, K. J., & Collings, D. (2015). Mix Design of Bitumen Stabilised Materials (BSMs) – A South African Perspective. En *3rd ISAP APE SYMPOSIUM* (pp. 1–9).
- Jenkins, K. J., & Kelfkens, R. (2008). *Updating Bituminous Stabilized Materials Guidelines : Mix Design Report , Phase II Task 7 : Curing Protocol : Improvement Sept 2008*.
- Jenkins, K. J., & Mulusa, W. . (2009). Updating Bituminous Stabilized Materials Guidelines : Mix Design Report , Phase II Task 2 - Development of a Simple Triaxial Test, 1–58.
- Kendall, M., Baker, B., Evans, P., Ramanujam, J., & Ntroduction, I. (1999). Foamed Bitumen Stabilisation. *Symposium A Quarterly Journal In Modern Foreign Literatures*, 1–18.
- Kim, Y., & Lee, H. D. (2011). Influence of Reclaimed Asphalt Pavement Temperature on Mix Design Process of Cold In-Place Recycling Using Foamed Asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(7), 961–968. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000274](http://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000274)
- Leek, C., & Jameson, G. (2011). *AUSTROADS Technical Report: Review of Foamed Bitumen Stabilisation Mix Design Methods*. Sidney, Australia: Austroroads Ltd.
- Lynch, A., & Jenkins, K. J. (2013). Materials Recycled Using Foamed Bitumen Stabilisation : What Is Their Long Term. *15th INTERNATIONAL FLEXIBLE PAVEMENTS CONFERENCE OF AAPA MATERIALS*, 1–18.
- McDaniel, R., & Michael Anderson, R. (2001). *NCHRP REPORT 452 - Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method: Technician's Manual TRANSPORTATION. NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM*. Washington, D.C.
- Ozturk, H. (2013). Quantification of quality of foamed warm mix asphalt binders and mixtures, 232.
- Place, H. (2008). Updating Bituminous Stabilized Materials Guidelines : Mix Design Report, Phase II, (September), 1–29.
- Ruiz Ojeda, M. P., Sanabria, L. E., Carreño Gomez, J. L., & Chiman, A. (2013). Modelos de Reciclaje en Pavimentos Asfálticos. *Asfalto y Pavimentos*, 27, 66.
- Tiempo, C. E. El. (2016, enero). Comienza era de vías que se harán con llantas usadas - Sectores [Informativa].
- William, B., Mulusa, K., Thesis, R., Scienceengineering, M. O. F., Supervisor, S., & Sanral, K. I. M. J. J. (2009). DEVELOPMENT OF A SIMPLE TRIAXIAL TEST FOR CHARACTERISING BITUMEN STABILISED MATERIALS By SANRAL Chair of Pavement Engineering at Stellenbosch University. *University of Stellenbosch*, 1–119.
- Wirtgen GmbH. (2012). *Wirtgen Cold Recycling Technology*. (Wirtgen GmbH, Ed.) (1a ed.). Windhagen, Alemania.



## CAPÍTULO 2. Revisión de literatura

En éste capítulo se presenta un breve recuento histórico de la tecnología de asfalto espumado, aplicada al Reciclaje Profundo de Pavimentos o reclamación total de espesores – FDR, por sus siglas en inglés (Full Depht Reclamation) o a la estabilización de suelos, junto con los principales conceptos asociados con las propiedades, el comportamiento y la calidad de la espuma de asfalto y de los materiales estabilizados con ella, que en este documento se denominan respectivamente: FA y BSM por sus siglas en inglés – *Foam Asphalt* y *Bitumen Stabilized Materials*. Se incluye también la descripción de las propiedades de resistencia al corte de los BSM.

### 2.1 Introducción

La literatura técnica relacionada con los materiales estabilizados con asfalto - BSM, en particular con asfalto espumado – FA, tiene su origen en los años 50, pero no es hasta los 90 en que el desarrollo de los BSM-FA se masifica, debido a las investigaciones desarrolladas principalmente en Sudáfrica, Australia y Nueva Zelanda, con algunos aportes de Noruega, Suecia, Finlandia, Alemania, China, India, Estados Unidos de América y en menor escala de América Latina y Japón.(Weston, 2001)

Paralelamente a la literatura sobre los BSM, el estudio sobre el asfalto espumado FA, se ha desarrollado en los países anteriormente mencionados, cada uno de éstos con diferentes alcances como se describe a continuación: Alemania lidera con el grupo Wirtgen GmbH, el desarrollo tecnológico de los equipos necesarios para la producción de FA, la fabricación y puesta en obra de los BSM así como la publicación de manuales relacionados. De manera similar lo hace Noruega con la tecnología Nesotec (Thenoux Z. & Jamet, 2002). Sudáfrica aparece como principal investigador de las propiedades y comportamiento de los FA y de los BSM, estableciendo los procedimientos y técnicas de ensayo en laboratorio para este propósito y países como Nueva Zelanda, Japón y Australia se han caracterizado por sus aportes a la tecnología con investigaciones realizadas a escala real.

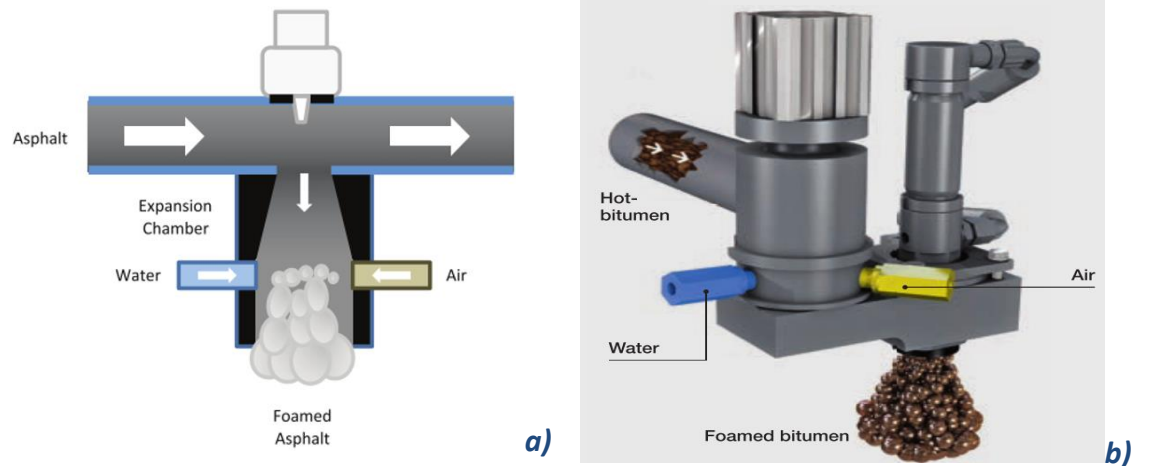
Estados Unidos de Norteamérica, al igual que Sudáfrica, se enfoca en el estudio del comportamiento de los BSM, de las técnicas de compactación de probetas en laboratorio y adicionalmente en las aplicaciones en vías estatales.

La investigación sobre los parámetros de resistencia al corte de materiales estabilizados con asfalto espumado no es extensa, ésta se ha desarrollado principalmente en Sudáfrica y algunas investigaciones recientes en Estados Unidos de Norteamérica.

## 2.2 Asfalto Espumado

El asfalto espumado se obtiene al poner en contacto agua a temperatura ambiente, normalmente entre 2% a 4% por peso de asfalto, y asfalto a una temperatura que varía típicamente entre 140° y 180° C, dentro de una cámara de expansión (Asphalt Academy, 2009b; Ben, 2014; Ebels, 2008; Mulusa, 2009) aplicando usualmente una presión de aire controlada del orden de 3 bares (Wirtgen GmbH, 2012, p.149) . El contacto entre el asfalto caliente y el agua fría produce vapor de agua que se dispersa en el asfalto, produciendo espuma la cual se expulsa de la cámara de expansión mediante un dispositivo rociador. (Thenoux & Jamet, 2013, p. 2). La figura 2.1 ilustra el proceso de espumado que ocurre en la cámara de expansión.

Figura 2.1 Esquema de Cámara de Expansión de Espuma y Sistema de Espumado. a) Ilustración de la vista interna de la Cámara de Expansión. (Newcomb et al., 2015) b) Sistema de Espumado de Wirtgen. (Wirtgen GmbH, 2009)



El fenómeno produce un aumento de volumen del asfalto entre 15 a 20 veces de su volumen original (Wirtgen GmbH, 2012), éste proceso ocurre en pocos segundos. A medida que la mezcla producida se enfría a temperatura ambiente, la espuma colapsa por lo que el volumen inicial se recupera sin que se alteren de manera importante las propiedades originales del asfalto (Thenoux Z. & Jamet, 2013).

### 2.2.1 Origen de la Tecnología de Asfalto Espumado.

Las primeras evidencias de la utilización de asfalto en la estabilización de bases, se remontan a 1889, en Nebraska, Estados Unidos durante la recuperación de vías.

Posteriormente, en 1928, en Darmstadt, Alemania se patentó el primer sistema de asfalto espumado. (Weston, 2001). A mediados de los años 50 las investigaciones realizadas por el profesor Ladys H Csanyi de la universidad estatal de Iowa terminan de describir el proceso de asfalto espumado. En el año 1968 la Mobil Oil de Australia adquiere las patentes del invento original de Csanyi (Kendall et al., 1999) y no es hasta los años 90 que su utilización se empezó a extender, debido entre otros, a la liberación de las patentes existentes relacionadas con la tecnología (Ebels & Jenkins, 2007b).

Dada la escasez de materiales pétreos adecuados para uso en construcción de carreteras en Iowa, el profesor Csanyi buscó el mejoramiento de ciertos materiales finos combinándolos con una mezcla de vapor de agua y asfalto caliente empleando tres técnicas de uso común para la época: Emulsión de asfalto, Mezcla con vapor ("Steam Mix") y "proceso de impacto ("Impact Process") o Asfalto atomizado, obteniendo un producto que denominó Mortero de Asfalto ("Mortar Mix"). (Ebels, 2008, p.29). La utilización de emulsión de asfalto presentó un problema de agrupamiento y aglutinamiento de las partículas finas, denominado por el profesor Csanyi como: "problema de esfera o aglutinamiento de material" por lo que dejó de utilizar la tecnología en sus investigaciones, lo que eventualmente lo llevaría a desarrollar la tecnología de Asfalto Espumado (Ebels, 2008, p.30).

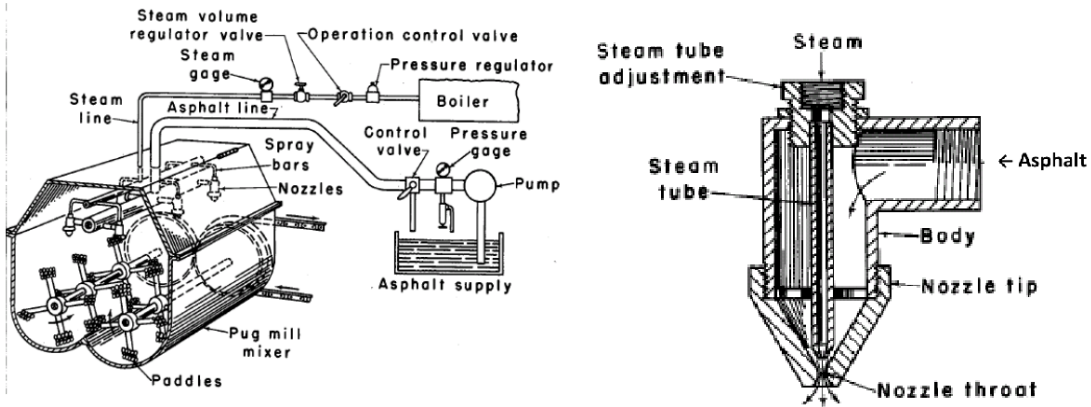
Con la segunda técnica, - "steam Mix"-, se buscaba la creación temporal de una emulsión asfáltica por la reducción de la viscosidad del asfalto con la incorporación de vapor. Sin embargo, Csanyi dejó de utilizarla porque el mortero de asfalto obtenido presentó el mismo problema de aglutinamiento que el producido con la emulsión asfáltica.

Por último, la técnica de asfalto atomizado fue la que mejores resultados produjo en la creación del mortero de asfalto. El procedimiento consistía en la producción, por medio de una boquilla, de una "nube" de asfalto atomizado mediante la aplicación de altas presiones (17 bares) al asfalto a altas temperaturas (160°C). El agregado también a 160°C se pasaba bajo la dispersión con lo que se lograba una distribución uniforme del asfalto sobre las partículas.

De la anterior investigación surgieron estudios posteriores que evidenciaron varios inconvenientes en el proceso de producción del atomizado de asfalto, así como de las altas velocidades de la mezcla, lo que eventualmente permitió el desarrollo de la tecnología de espumado como una combinación entre la técnica de "Steam Mix" y el "impact Process" (Ebels, 2008, p.31).

En la Figura 2.2 se muestra el esquema de la boquilla diseñada por Csanyi en 1957.

Figura 1.2 Sistema de Espumado y Boquilla Desarrollado por Csanyi. (Buss, 2010).



De las diferentes investigaciones desarrolladas por Csanyi se obtuvieron, entre otras, las siguientes conclusiones:

- El Asfalto al espumarse incrementa tremendamente su volumen, la viscosidad se reduce manteniendo una consistencia blanda incluso a bajas temperaturas (Emery, 2007).
- Durante la etapa meta-estable de la espuma (antes de su decaimiento total), el asfalto puede mezclarse con gran variedad de materiales, mejorando sus propiedades para ser utilizados en carreteras (K.J. Jenkins, 2000).
- Las propiedades químicas del asfalto no se ven afectadas por pasar por un proceso de espumado (K.J. Jenkins, 2000).

La Mobil Oil adquirió en 1968 la patente del sistema desarrollado por Csanyi y modificó el sistema original de vapor por uno de inyección de agua fría dentro del asfalto. Esta modificación recibió el nombre de Foamix (Buss, 2010; Muthen, 1998; Ozturk, 2013). El doctor D.Y Lee continuó con las investigaciones para la Mobil Oil y concluyó que el cambio de vapor por agua no produce ningún cambio en la producción de la espuma, excepto que se requiere menos energía en el proceso (Buss, 2010).

Desde 1991, luego de que la patente de Mobil expiró, alrededor del mundo se desarrollaron sistemas de producción de asfalto espumado como el de Nesotec de Escandinavia, el de Savalco de Suecia en el 1994 y Wirtgen de Alemania en 1995. (Weston, 2001)

En general, la literatura existente coincide en ubicar los orígenes de la técnica de espumado en los años 50, sin embargo, es importante resaltar que la técnica desarrollada por el

profesor Csanyi proviene de técnicas más antiguas. Autores como Weston, (2001) y Van der Walt, ubican los orígenes de la técnica en el año 1889 en Nebraska (EE.UU.) y posteriormente en Dartmstadt (Alemania) en 1928 con el primer sistema patentado.

## **2.2.2 Características y Propiedades del Asfalto espumado.**

El asfalto espumado se caracteriza principalmente mediante dos propiedades; la primera: Relación de Expansión ER, (por sus siglas en inglés *Expansion Ratio*), y la segunda: Vida Media - HL, (por sus siglas en inglés *Half Life*).

Adicionalmente, se han definido otros parámetros para caracterizar de manera más adecuada una espuma de asfalto y evaluar su calidad, como son el Índice de Espumado FI, (por sus siglas en inglés *Foam Index*), el Índice de Área Superficial SAI, (por sus siglas en inglés *Surface Area Index*) y la Distribución de Tamaños de Burbujas BSD, (por sus siglas en inglés *Bubble Size Distribution*).

### **2.2.2.1 Relación de Expansión (ER)**

La ER, es la relación que existe entre el volumen de asfalto ( $V_0$ ) en un tiempo inicial  $t=0$  antes de ser espumado y el máximo volumen ( $V_t$ ) alcanzado por la espuma en el proceso de expansión en un tiempo  $t$ . (Asphalt Academy, 2009b; Iwański & Chomicz-Kowalska, 2013; Ozturk, 2013; Wirtgen GmbH, 2012). La ER es también vista como una medida de la viscosidad de la espuma y determina que tan bien ésta se va a dispersar en los agregados (Ben, 2014; Iwański, ChoMicz-Kowalska, & Maciejewski, 2015).

La ER se define como:

$$ER = \frac{V_t}{V_0}$$

*Ecuación 1 Relación de Expansión (ER)*

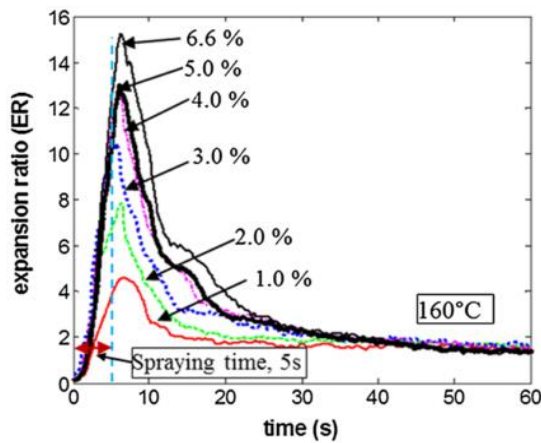
Donde:

$V_t$  = Volumen máximo de Asfalto alcanzado por la espuma.

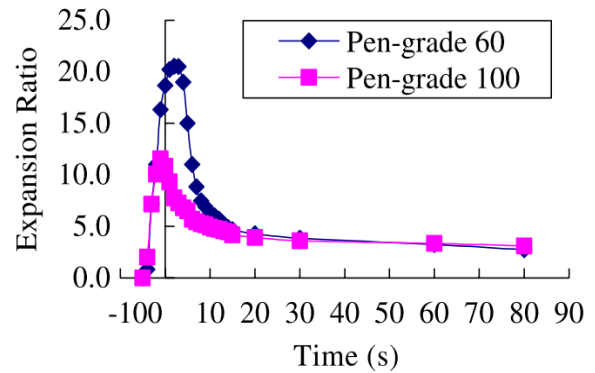
$V_0$  = Volumen de Asfalto previo a ser espumado.

Al representar la ER en función del tiempo se obtiene la curva de decaimiento o colapso de la espuma. En la Figura 2.3 se presentan curvas de decaimiento típicas de asfaltos espumados, así como la variación que la ER sufre en función de distintos parámetros.

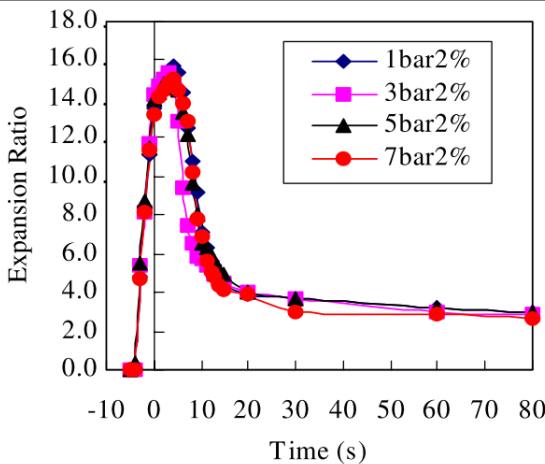
Figura 2.32 a) Curva de Decaimiento para diferentes contenidos de agua. (B. W. Hailesilassie, Hugener, Bieder, & Partl, 2015). b) Curva de decaimiento para dos tipos de asfalto de diferente penetración (He & Wong, 2006). c) Curva de decaimiento para diferentes presiones de aire (He & Wong, 2006). d) Curva de decaimiento para diferentes temperaturas (He & Wong, 2006).



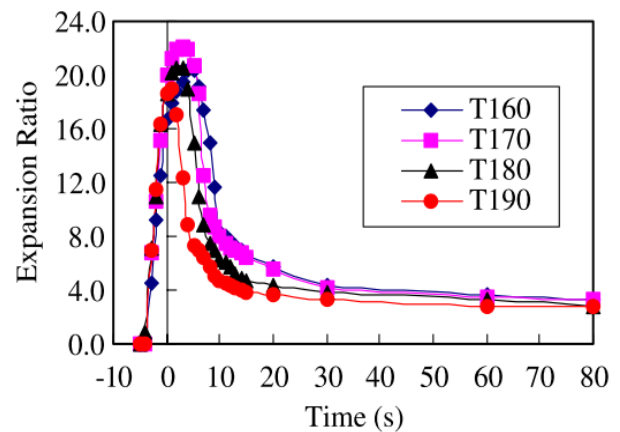
a)



b)



c)



d)

Como se observa, los valores de ER no solo dependen del tipo de asfalto (fig 2.3-b), sino además de los contenidos de agua usados durante el proceso de espumado, de las presiones de aire y, como se verá más adelante, de la temperatura.

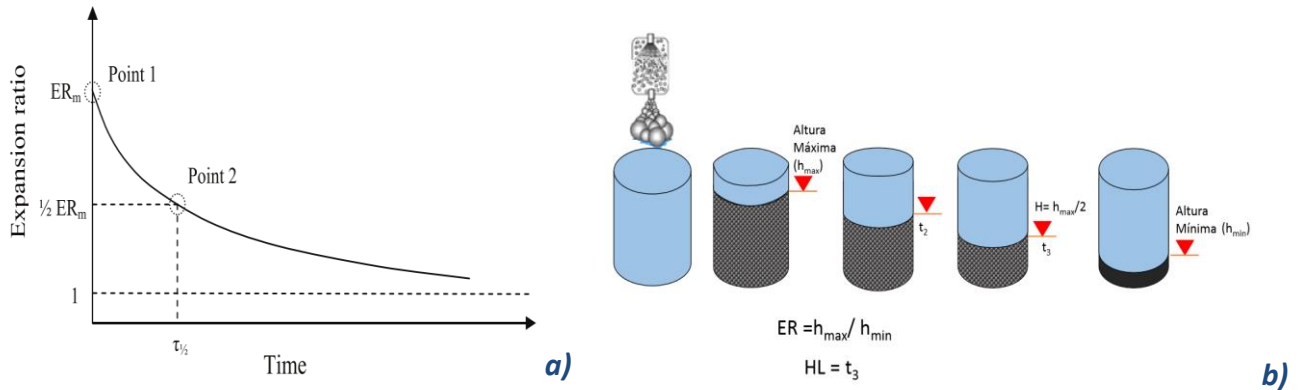
### 2.2.2.2 Vida Media (HL)

La HL se define como el tiempo que tarda la espuma en llegar a la mitad de su volumen máximo. (Asphalt Academy, 2009b; Iwański & Chomicz-Kowalska, 2013; Muthen, 1998; Ozturk, 2013; Wirtgen GmbH, 2012). Éste valor indica que tan estable es la espuma en el

tiempo, es decir, muestra cuanto tiempo la espuma mantendrá su volumen expandido antes de colapsar.

En la figura 2.4 se presenta de manera esquemática la obtención del parámetro HL.

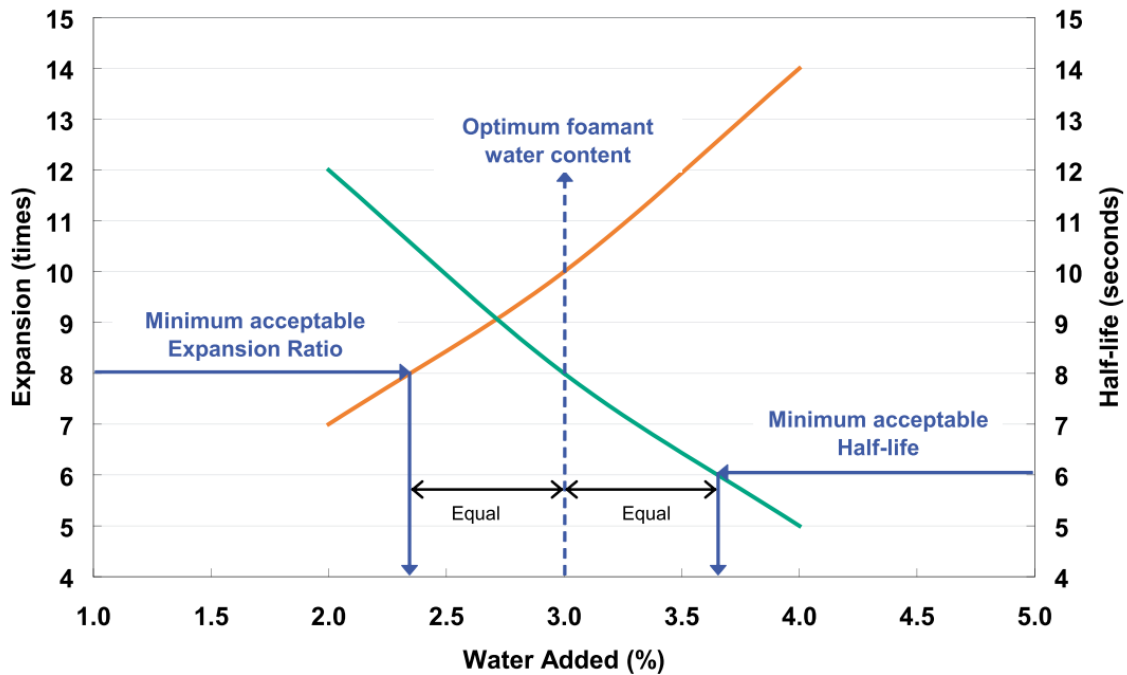
Figura 2.4 Parámetro de vida media HL a) Valor de HL ( $t_{1/2}$ ) en Curva de Decaimiento. (Ebels & Jenkins, 2007a) b) Esquema de medición de propiedades de la espuma. (Elaboración Propia).



Con el objetivo de maximizar las propiedades del asfalto, obteniendo una espuma de calidad, para ser usada en los BSM, es necesario obtener los parámetros HL y ER para distintas concentraciones de agua (Godenzoni, Graziani, & Perraton, 2016). Usualmente los contenidos de agua varían de 2% al 4% con incrementos del 0.5%.

La cantidad de agua inyectada durante la producción de la espuma FWC, (por sus siglas en inglés Foam Water Content), afecta directamente los valores de HL Y ER; mientras la ER aumenta con el aumento del FWC, la HL disminuye (Asphalt Academy, 2009b; He & Wong, 2006; K.J. Jenkins, 1999; Lesueur et al., 2004; Wirtgen GmbH, 2012). Si los dos parámetros se grafican en función del contenido de agua, la selección del contenido óptimo se determina, según lo propuesto en los manuales de Wirtgen GmbH, (2002, 2012) en función de los valores mínimos recomendados de la tabla 2.1, como se muestra en la figura 2.5.

Figura 2.5 Determinación del Contenido Óptimo de Agua para Producción de Espuma. (Asphalt Academy, 2009b)

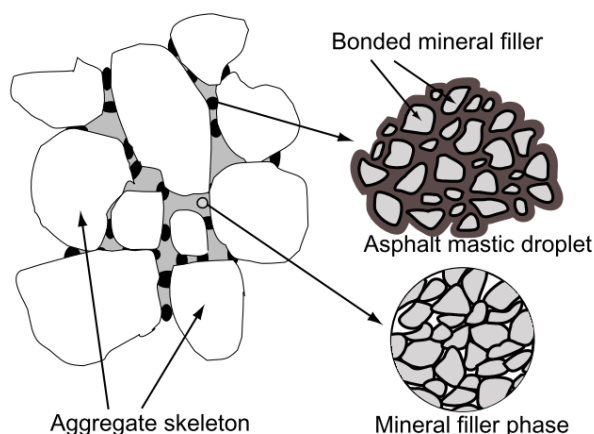


Valores altos de ER representan una mayor superficie específica, una baja viscosidad relativa y da a la espuma la habilidad para cubrir agregados finos. Por otro lado, valores elevados de HL, representan una espuma muy estable con mayor tiempo para interactuar con los agregados resultando en un mayor cubrimiento de estos (Achille, 2013; Iwański et al., 2015; Leek & Jameson, 2011).

El objetivo principal del proceso de espumado es el de encapsular el agregado fino para que éste trabaje como puntos de vinculación entre los agregados de mayor tamaño, formando así un mastico (Vorobieff, 2005; Vorobieff & Preston, 2004). La figura 2.6 es una representación conceptual desarrollada por Fu, (2009) del sistema de BSM – Foam del fenómeno comentado.



Figura 2.6 Ilustración Conceptual de la microestructura de una Mezcla con Asfalto Espumado. (Fu, 2009).



Los valores mínimos de HL Y ER recomendados por diferentes autores se presentan en orden cronológico, en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Valores Mínimos de HL y ER Recomendados por Manuales e Investigadores.

### VALORES MÍNIMOS DE RELACIÓN DE EXPANSIÓN Y VIDA MEDIA

Procedencia-Año	Relación de Expansión (ER)	Vida Media Segundos-(HL)	FUENTE	Autor
<b>Bowering &amp; Martin, 1976</b>	10 -15	120	Foamed bitumen production and application of mixtures evaluation and performance of pavements	Bowering, RH Martin, CL
<b>Ruckel et al, 1983</b>	8-15	20	Foamed asphalt mixes-mix design procedure	Ruckel, P J Acott, S M Bowering, R H
<b>Suráfrica-CSIR 1998</b>	10	12	Mix design of bitumen stabilised materials: Best practice and considerations for classification	Jan Ebels, LJ Jenkins, K.J.
<b>Suráfrica-Mutten 1998</b>	15	(15)60	Foamed asphalt mixes-mix design procedure	SABITA- Transportation Research Record
<b>TRL Report 386, 1999</b>	10	10	Design guide and specification for structural maintenance of High Way pavements by cold in situ recycling	Transport Research Laboratory
<b>Suráfrica -The Council for Scientific and Industrial Research, 1999</b>	10	12	Influence of foaming water content on foam asphalt mixtures	Muthen KM, Lewis A, Vos RM

<b>Suráfrica -Asphalt Academy 2002</b>	7	7	Mix design of bitumen stabilised materials: Best practice and considerations for classification	Jan Ebels, LJ Jenkins, K.J.
<b>Indonesia 2002</b>	8	8	Influence of foaming water content on foam asphalt mixtures	Chiu and Huang
<b>Alemania-Wirtgen 2004</b>	10	8	Mix design of bitumen stabilised materials: Best practice and considerations for classification	Jan Ebels, LJ Jenkins, K.J.
<b>Australia-Austrroads 2006</b>	15	30-45	AUSTROADS Technical Report: Review of Foamed Bitumen Stabilisation Mix Design Methods	Leek, Colin Jameson, Geoff
<b>Australia-Queensland 2006</b>	10-12	20-45	AUSTROADS Technical Report: Review of Foamed Bitumen Stabilisation Mix Design Methods	Leek, Colin Jameson, Geoff
<b>Italia-Autostrade 2008</b>	20	25	Complex modulus characterization of cold recycled mixtures with foamed bitumen and different content of reclaimed asphalt	Autostrade per l'Italia SpA.- Coppini, Matteo Rossignoli, Chiara Rossi, Tommaso
<b>Suráfrica-Asphalt Academy 2009 (Agregados de 10°C a 15°C)</b>	10	6	TG2-A guideline for the Design and construction of Bitumen Stabilised Materials.	Academy, Asphalt
<b>Suráfrica-Asphalt Academy 2009 (Agregados mayores a 15°C)</b>	8	6	TG2-A guideline for the Design and construction of Bitumen Stabilised Materials.	Academy, Asphalt
<b>EE.UU-Caltrans 2009</b>	10	12	Evaluation of Mix Design Methods for Reclaimed Asphalt Pavement Mixes with Foamed Bitumen	Chandra, Rajeev Veeraragavan, A. Krishnan, J. Murali
			Full-depth pavement reclamation with foamed asphalt in California: Guidelines for project selection, design, and construction	Jones, D. Fu, P Harvey, J.T.
<b>Alemania-Wirtgen 2010</b>	11	8	I-81 In-Place Pavement Recycling Project	Virginia Center Of Transportation

<b>Alemania-Wirtgen 2012 (Agregados de 10°C a 15°C)</b>	10	8	Wirtgen Cold Recycling Technology	Wirtgen GmbH
<b>Alemania-Wirtgen 2012 (Agregados mayores a 15°C)</b>	8	6	Wirtgen Cold Recycling Technology	Wirtgen GmbH

Como se observa en la tabla, los valores mínimos recomendados de HL han variado desde 7 segundos hasta de 60 segundos, (el valor de 120 sg de Bowering y Martin, no se plantea como recomendado sino como el obtenido por los autores durante su investigación). El valor más elevado es de 60 segundos (si se usan aditivos), aun cuando pareciera que las experiencias desarrolladas han llevado a proponer, valores tan bajos como 6 segundos como adecuados para los trabajos con BSM, tal y como se aprecia en las referencias más recientes.

Los Valores de ER mínimos varían desde 7 hasta 20, siendo el valor de 10 el más recomendado por la mayoría de los autores.

Lamentablemente en ninguno de los artículos se da una justificación precisa de las razones de la selección de los valores mínimos de HL y ER, diferente a la de “*la calidad de la espuma*”. Sin embargo, Bowering & Martin, (1976), demostraron que los valores de cohesión y resistencia a la compresión inconfina de materiales fabricados con asfalto espumado cuya relación de expansión ER= 15, eran significativamente mayores a las obtenidas con ER=3. (Ruckel, Acott, & Bowering, 1983). Por otro lado, en la literatura técnica asociada, no se encuentran reportes de mezclas con ER mayores a 15 (Sunarjono, 2008).

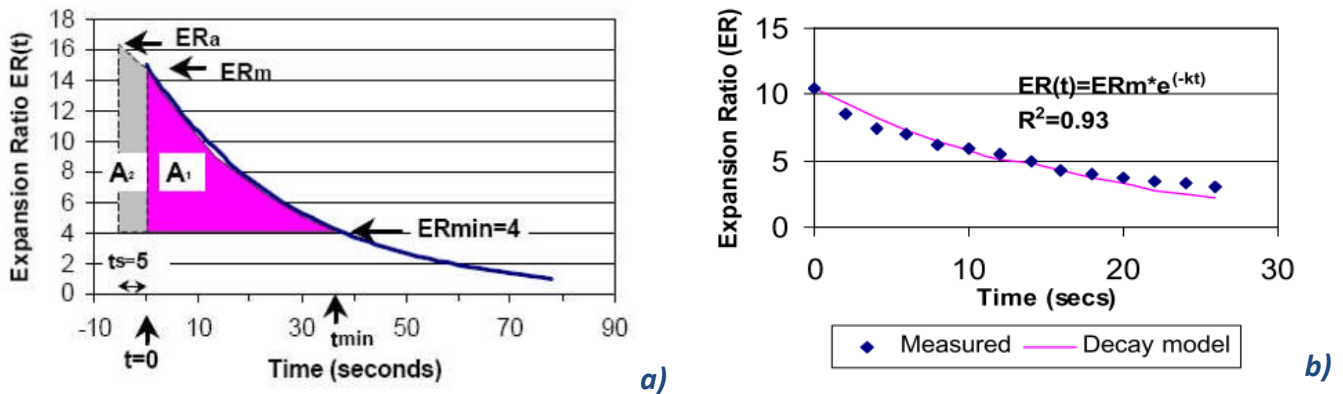
Varios autores (K.J. Jenkins, 1999; Ozturk, 2013; Weston, 2001) reconocen que no existen valores definidos para las propiedades de HL y ER, sin embargo en investigaciones realizadas por Kim J. Jenkins & Van de Ven, (2001) se adoptan valores mínimos de recomendados por el CSIR, 1998 (Muthen, 1998) de ER= 10 y HL=12 soportados en valores de Foam Index (FI), los cuales se sustentan a su vez en valores recomendados por Ruckel, Acott, & Bowering, en el año 1983 y de estudios realizados por Bowering y Martin del año 1976 con valores de ER=8 y HL= 20s, en donde utilizaron recipientes de 1 galón de capacidad. Macarrone, (1995), sugiere que valores elevados de ER mejoran el cubrimiento de los agregados y el comportamiento de la mezcla.

En el artículo de Bowering & Martin, (1976) no se hace referencia directa a los términos de relación de expansión (ER), ni de vida media (HL), la caracterización que se realiza sobre la espuma está enfocada al número de veces que se expande el asfalto, lo que sería una referencia a la relación de expansión; y al tiempo de decaimiento de su máximo volumen a la mitad está entre 2 y 3 minutos.

### 2.2.2.3 Índice de Espumado (FI)

El FI se obtiene como el área bajo la curva de decaimiento (A1+A2) y una ER de 4 (K.J. Jenkins, 1999) como se muestra en la figura 2.7 a) Si dicha curva sigue un comportamiento como el mostrado en la figura 2.7b), se ajusta a un modelo exponencial (ecuación 2) y el FI puede obtenerse como función de la HL y ER a partir de la ecuación 3.

Figura 2.7 a). Área Bajo curva de decaimiento de la espuma. b). Modelo exponencial y datos medidos. (K.J. Jenkins, 1999)



La ecuación 2 representa el modelo planteado por Jenkins (1999) de la curva ER vs Tiempo.

$$ER(t) = ER_m * e^{\frac{-Ln2}{HL} * t}$$

Ecuación 2. Modelo Exponencial de Decaimiento de la Espuma de Asfalto. (K.J. Jenkins, 2000)

Donde,

ER(t)= Relación de Expansión en función del tiempo luego de la descarga de Espuma.

ER<sub>m</sub>= 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.

La figura 1a no es la única forma que toma la curva de decaimiento. Existen al menos 6 curvas reportadas por Jenkins (1999) las cuales tienen cada una su propio modelo de comportamiento y en todas es necesario calcular el área bajo la curva para obtener el FI.

$$FI = \frac{-HL}{\ln 2} \cdot \left( 4 - ER_m - 4 \ln \left( \frac{4}{ER_m} \right) \right) + \left( \frac{1+c}{2c} \right) \cdot ER_m \cdot t_s$$

*Ecuación 3. Índice de Espumado en función de HL y ER para el modelo exponencial. (González, 2009; Iwański et al., 2015)*

Donde,

FI= Índice de Espumado en segundos.

ER<sub>m</sub>= 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.

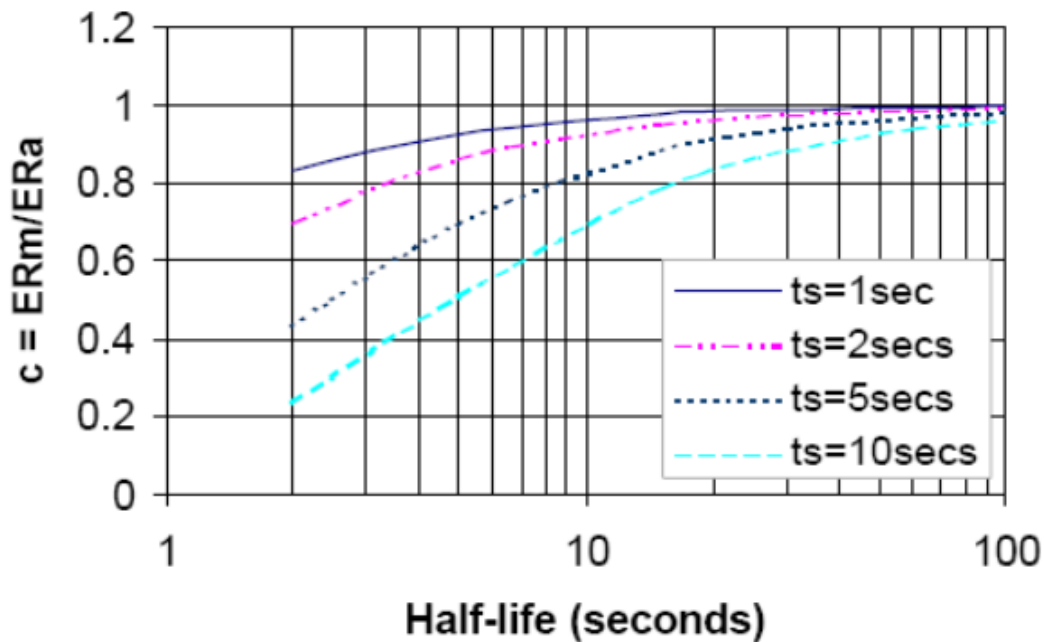
C<sup>2</sup>= Relación entre ER<sub>m</sub>/ ER<sub>a</sub> (Ver ER<sub>a</sub> en Figura 2.8), donde ER<sub>a</sub> corresponde a la relación de expansión máxima presentada durante el proceso de espumado.

Como se observa en la figura 2.7a, el valor de ER máximo (ER<sub>a</sub>) realmente se da antes de terminar el disparo, sin embargo, la medición (ER<sub>m</sub>) se realiza justo después de terminado, es así como el valor de C, permite relacionar ambos términos para ser incluidos en la ecuación 3 y se obtiene haciendo uso de la figura 2.8.

---

<sup>2</sup> Éste valor está en función del tiempo de disparo de la espuma así como de la vida media HL..

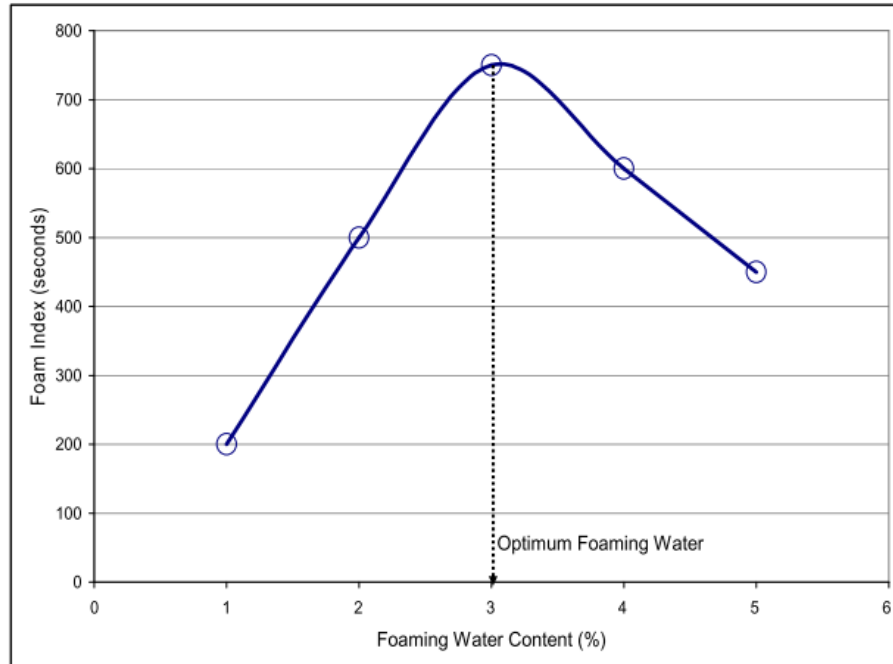
Figura 2.8 Relación entre Expansión medida y real en función de HL para diferentes tiempos de disparo. (Sunarjono, 2011)



El FI, dado en segundos, permite cuantificar la estabilidad de la espuma siendo un indicativo de la energía (K.J. Jenkins, 1999), y determinar el contenido óptimo de agua, así como la necesidad de aditivos, compararlos entre sí y establecer su concentración. Jenkins sugiere que para mezclas asfálticas en frío el valor mínimo de FI sea de 164s. (Sunarjono, 2008)

Sunarjono, (2008) estableció que la técnica de selección de las propiedades óptimas de la espuma propuesta por Wirtgen GmbH (2002) es útil para aplicaciones de campo, sin embargo ésta técnica no es rigurosa debido a que HL y ER no están relacionados de manera lineal, por lo que la utilización del FI para la optimización de las características de la espuma es más recomendable principalmente en investigaciones. Ver Figura 2.9.

Figura 2.9 Optimización de las características de la espuma de Asfalto Usando el Concepto FI(K.J. Jenkins, 2000; Sunarjono, 2008).



#### 2.2.2.4 Distribución de Tamaños de Burbujas (BSD)

La BSD se relaciona directamente con la capacidad del asfalto espumado de cubrir al agregado durante el proceso de mezcla, así como de dar trabajabilidad a la misma. Es también un indicador del área superficial de burbujas. En la medida en que la BSD aumenta (tamaño mayor de burbujas), más interfaces están disponibles para permitir la interacción entre el asfalto y los agregados (Ozturk, 2013).

Burbujas de tamaño pequeños colapsan mucho más despacio que las de mayor tamaño, por lo que la HL de la espuma es mayor, lo que lleva a que la mezcla sea más trabajable y el proceso de compactación más sencillo. Sin embargo, existe un riesgo de que la cantidad de agua remanente que queda dentro de las burbujas luego de la construcción, pueda ocasionar daños por humedad, principalmente en mezclas tibias (Ozturk, 2013).

La BSD aumenta con el incremento del contenido de agua (Newcomb et al., 2015; Ozturk, 2013; Schuetz et al, 2014).

La medición del BSD se realiza en distintos momentos y requiere de métodos especiales para la obtención de datos, entre ellos se tienen la toma de imágenes digitales y mediante radiografías usando rayos X. (Ver figura 2.10), posteriormente los datos obtenidos se procesan mediante computador y de manera estadística. Ver figura 2.10 b.

Figura 2.10 a) Esquema de sistema para toma de Imágenes con Rayos X. (B. W. Hailesilassie et al., 2015) (B. Hailesilassie et al., 2014). b) Sistema para toma de imágenes digitales con cámara fotográfica (Arega, Bhasin, & Li, 2015) c) Imágenes digitales



La variación de éste parámetro en el tiempo se puede modelar mediante la utilización de la ley de Stoke, la cual permite obtener el diámetro de las burbujas que existen en un determinado tiempo de manera análoga al ensayo de hidrometría realizado en el análisis granulométrico del suelo. Una vez calculado el valor de BSD es posible calcular el Índice de área superficial (SAI) (Ozturk, 2013)



#### **2.2.2.5 Índice de Área Superficial (SAI).**

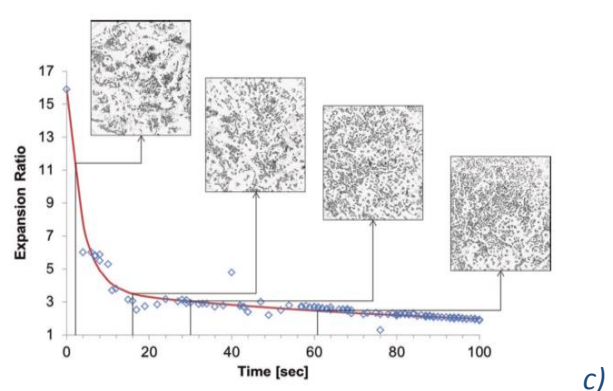
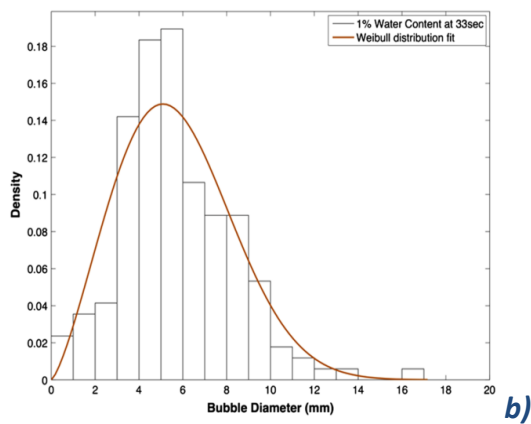
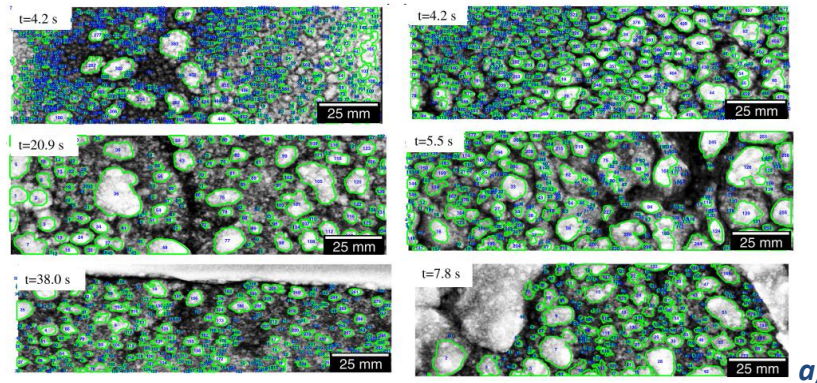
El SAI representa la relación entre el área superficial total de las burbujas BSA, (por sus siglas en inglés Buble Surface Area) tan pronto el disparo de la espuma se termina y el área superficial que ocupa el asfalto en el recipiente cuando todas las burbujas se han disipado (Ozturk, 2013; Yin, Arámbula, & Newcomb, 2016).

El SAI es un parámetro adimensional muy útil para cuantificar el área superficial generada por la espuma y como ésta influenciará en el cubrimiento de los agregados en aplicaciones de mezclas tibias. Disminución del SAI, resulta en cubrimientos pobres. Valores elevados de SAI son muestra de burbujas pequeñas, las cuales no colapsan tan rápido como las de mayor dimensión y mejoran la trabajabilidad durante la colocación y la compactación de la mezcla. El SAI decrece con el incremento en el contenido de agua. (Newcomb et al., 2015; Ozturk, 2013).

Los valores del parámetro SAI se obtienen mediante adquisición y procesamiento de imágenes digitales durante el proceso de espumado mediante técnicas de no contacto (Ver Figura 2.10b y 2.13a). 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) .

En la figura 2.11 presentada a continuación, se muestran las imágenes obtenidas a partir de un proceso de No contacto con la espuma.

Figura 2.11 a) Imágenes de análisis de tamaños de Burbujas sobre Radiografías tomadas con Rayos X (B. W. Hailesilassie, Hugener, & Partl, 2015). b) Distribución de Tamaños de Burbujas. (Arega et al., 2015). c) Imágenes de Burbujas en relación con ER medida



### 2.2.3 Medida de las Características de la Espuma de Asfalto

Actualmente, existen diferentes técnicas para la medida de HL y ER, éstas pueden ser clasificadas en dos grupos: La primera, reúne aquellas que son invasivas; la segunda, corresponde a las técnicas no invasivas.

#### 2.2.3.1 Técnicas invasivas

Dentro de las técnicas invasivas se encuentra el “*método de la varilla graduada*” o “*método manual*” (Ver imagen 2.12a), que consiste en introducir, dentro del balde que contiene la espuma de asfalto, inmediatamente después de su descarga, una varilla con marcaciones separadas uniformemente una distancia equivalente a un número de veces la altura que alcanzaría una masa de 500 g de asfalto sin espumar (Campagnoli, Estupiñan, & Soto, 2016), la varilla se empapa de asfalto hasta una altura máxima que se denomina  $ER_{max}$ .

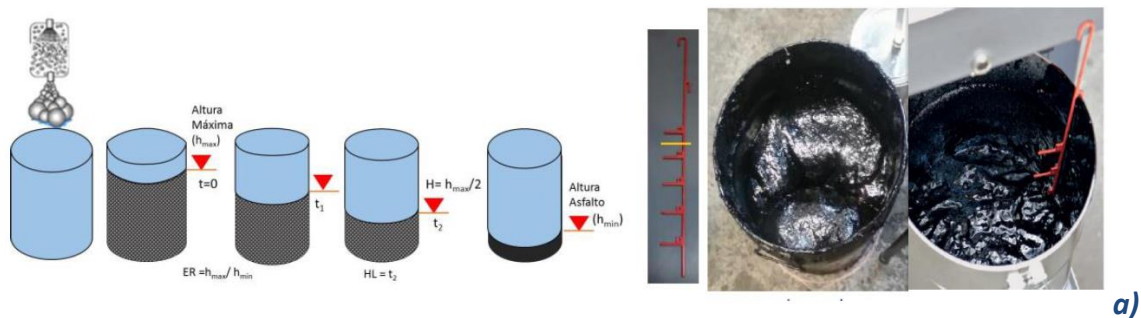
Para determinar la HL de la espuma de asfalto existen dos metodologías, la primera consiste en tomar el tiempo transcurrido desde la altura máxima alcanzada por la espuma ( $ER_{max}$ ) hasta la mitad de dicha altura; la segunda, corresponde al tiempo desde que la

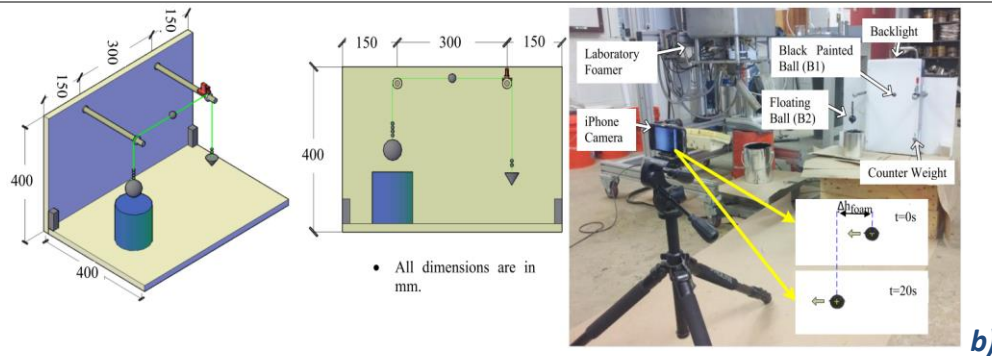
descarga termina hasta que la espuma alcanza la mitad de su máximo volumen. La guía de diseño de California recomienda el método dos por considerar que es difícil la determinación exacta del punto en que la espuma alcanza su máximo volumen [método 1], y que la espuma es estable y trabajable en el período de tiempo en que la boquilla cierra el paso de asfalto [en 0 segundos] y la espuma alcanza su volumen máximo. (Jones, Fu, & Harvey, 2009, pg 34).

Adicionalmente al método de la varilla graduada, se tiene un sistema de medida invasivo desarrollado por Ozturk, (2013) denominado Ensayo de Colapso de Asfalto Espumado AFCT, (por sus siglas en inglés Asphalt Foam Collapse Test), el cual es un sistema compuesto por un par de esferas de igual peso y dimensiones así como de una cámara digital para la captura de imágenes y posterior procesamiento mediante computador (Ver figura 2.12b).

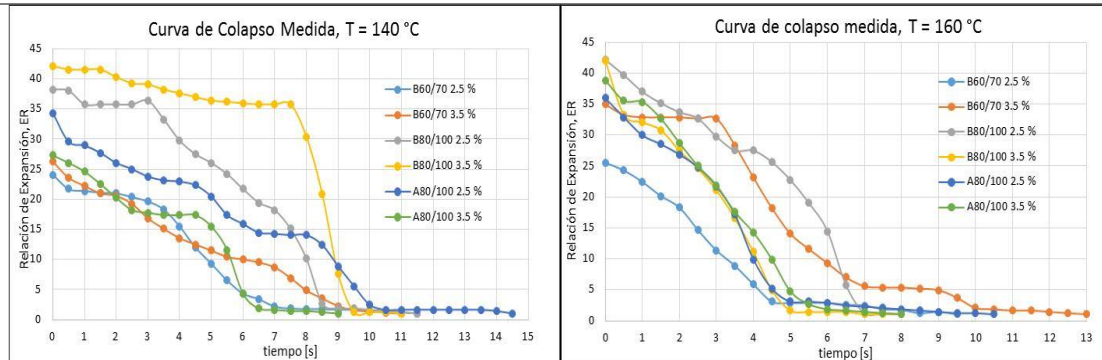
El sistema consiste en la inmersión de una esfera cubierta de asfalto y de peso determinado dentro de un recipiente metálico capaz de contener 200 g de asfalto espumado y, mediante el análisis de las imágenes que se capturan en video obtener los parámetros HL y ER a partir de la curva de decaimiento. El principio se basa en permitir que la esfera se apoye en la superficie de la espuma tan pronto ha cesado el disparo de la misma desde la boquilla. Como la espuma colapsa, la esfera baja apoyada sobre la superficie de la espuma. Simultáneamente, la videocámara registra el proceso para su posterior análisis mediante computador. (Ver figura 12c).

Figura 2.12 Métodos de medición Invasiva de Propiedades a) Método de la varilla Graduada. b) Método AFCT. (Ozturk, 2013). c) Curvas de Decaimiento Obtenidas Mediante Técnica AFCT. (Campagnoli et al., 2016)





b)



c)

### 2.2.3.2 Métodos No Invasivos

Dentro de las metodologías no invasivas se agrupan todos aquellos sistemas que no requieren de un contacto físico con la espuma del asfalto, esto se logra mediante técnicas de toma de imágenes para posterior análisis en computador o imágenes de Rayos X.

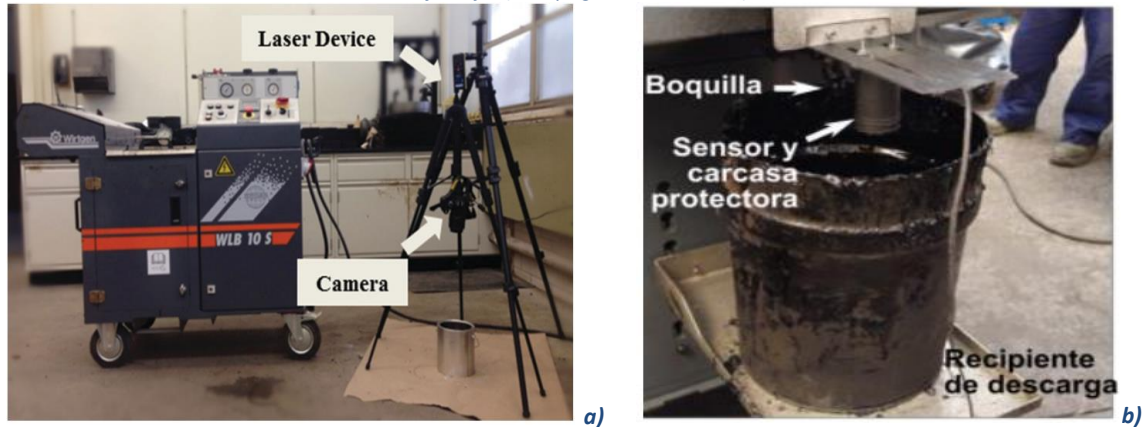
Como primera técnica se tiene la utilización de cámaras fotográficas para la toma de imágenes digitales y videos como la mostrada en la Figura 2.11c y 2.13a. Principalmente son utilizadas para obtener parámetros BSD y SAI, sin embargo, es posible obtener los parámetros HL y ER si a la cámara se le adapta un láser capaz de registrar los cambios de altura de la espuma del asfalto.

La segunda técnica no invasiva corresponde a la utilización de equipos de rayos X como el visto en el parámetro de BSD. (Figura 2.10a y 2.10b). Esta técnica también permite obtener la curva de decaimiento y con ella los valores de HL y ER. (Figura 2.10d)

Otra técnica que permite la obtención de los parámetros HL y ER es la utilización de un sensor infrarrojo que, como se explica en Campagnoli et al. (2016), consiste en un dispositivo con un rango de 15 cm a 100 cm, que apunta a una sección del recipiente donde se realiza la descarga de la espuma. (...) Se realiza una captura de datos de

aproximadamente 20 muestras por segundo, y la generación de un archivo que incluye los datos de distancia y tiempo de muestra. (Figura 12b)

Figura 2.13 Métodos No Invasivos. a). Sistema de Captura Mediante Laser y Cámara.(Newcomb et al., 2015) b) Sensor Infrarojo. (Campagnoli et al., 2016)



#### 2.2.4 Factores que Influyen en las Propiedades de la Espuma de Asfalto.

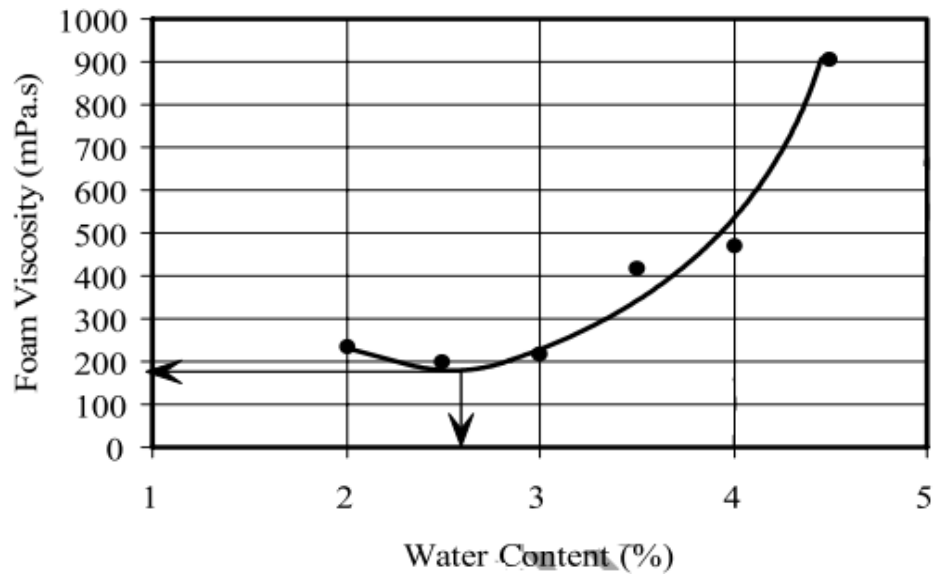
El tipo de asfalto, la cantidad de agua inyectada y la temperatura del asfalto en el momento de la producción de la espuma, son en su orden los factores que más influyen en la calidad de la espuma. Usualmente temperaturas elevadas producen espumas de mejor calidad (Wirtgen GmbH, 2012). Sin embargo, otros factores como el origen y el método de producción del asfalto también afectan las propiedades de espumado. (K.J. Jenkins, 1999).

A continuación, se presentan los factores de mayor incidencia en las propiedades de la espuma.

##### 2.2.4.1 Cantidad de Agua Inyectada

El contenido de agua juega un papel fundamental en la calidad de la espuma. Como se observa en la figura 2.5 el contenido de agua puede ser seleccionado en función de los valores de HL y ER (Asphalt Academy, 2009b; Wirtgen GmbH, 2012), también del parámetro FI (ver figura 9) y en función de la viscosidad del asfalto (ver figura 2.14). Como se observa en la figura 3a, el área bajo la curva de decaimiento crece con el aumento del contenido de agua.

Figura 2.14 Determinación del Contenido Óptimo de Agua en Función de la Viscosidad del asfalto espumado. (Saleh, 2006)

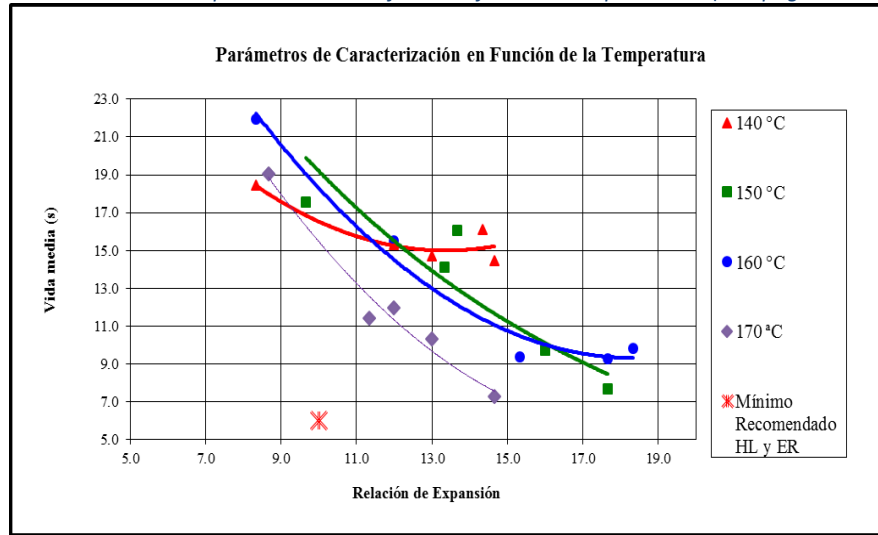


#### 2.2.4.2 Temperatura

La temperatura de producción de la espuma es, junto a la cantidad de agua, un parámetro fundamental durante la producción de la espuma. La temperatura recomendada para calentar el asfalto está entre los 140°C y 170°C (Academy, 2009b; Strozzi et al., 2011; Wirtgen GmbH, 2009). Para un mismo tipo de asfalto, como se observa en la figura 3d, el aumento de la temperatura, generalmente, incrementa el área bajo la curva de decaimiento.

Este factor es de tal importancia, que la definición de la temperatura de mezcla se realiza en laboratorio determinando para cada temperatura los valores de HL y ER con diferentes contenidos de agua, y así definir en cuál de ellas se obtienen las mejores propiedades de la espuma (figura 2.15).

Figura 2.15 Valores HL Y ER para un Mismo Asfalto a Diferentes Temperaturas. (Campagnoli et al., 2016)



#### 2.2.4.3 Masa del Asfalto.

El valor de ER se calcula en función del volumen del asfalto y de la espuma producida. De manera estándar, para la caracterización de la espuma, se utilizan 500 g de asfalto, así como un recipiente de dimensiones estandarizadas.

#### 2.2.4.4 Tipo de Asfalto.

El tipo de asfalto utilizado produce diferentes curvas de decaimiento (Figura 2.3b). Para el proceso de espumado, comúnmente se recomienda el asfalto de penetración 80/100 sin embargo, también son utilizados asfaltos más blandos o de mayor dureza como el 60/70 (Mathaniya Twagira, 2010). Varios autores coinciden en que cualquier tipo de asfalto, independientemente del grado de dureza u origen, pueden ser espumados con una combinación de boquilla, agua, aire y presión de inyección adecuados para lograr los valores mínimos recomendados de HL y ER (Muthen, 1998).

Lesueur et al., (2004), notaron que la composición del asfalto no tiene gran influencia en las propiedades finales de la espuma y que la presencia de ceras dentro del mismo mejora las características de la espuma.

### 2.3 MATERIALES ESTABILIZADOS CON ASFALTO ESPUMADO – BSM-FA

La estabilización de materiales se logra con la incorporación de pequeñas cantidades de asfalto ya sea en forma de emulsión o de espuma y, normalmente, con la adición de un bajo porcentaje de llenante activo (cal o cemento) (Achille, 2013). El material estabilizado es utilizado como base o sub base en la estructura del pavimento. Los BSM con asfalto espumado FA (Foam Asphalt) se han convertido en una técnica de rehabilitación y

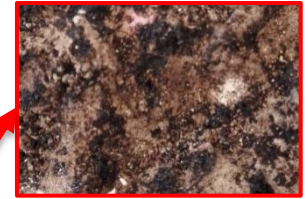
mantenimiento de estructuras de pavimento, muy utilizada alrededor del mundo (Achille, 2013; Ebels, 2008; Ebels & Jenkins, 2007b; Mathaniya Twagira, 2010).

Son variados los materiales que pueden ser estabilizados con FA, estos van desde arenas, gravas y pavimento asfáltico recuperado conocido como RAP, (por sus siglas en inglés Reclaimed Asphalt Pavement) (Asphalt Academy, 2009b). En la práctica es usual usar una mezcla de RAP con la capa subyacente del sitio, material granular de aporte y adicionar un llenante como la cal o el cemento y tratar está mezcla con FA para formar una nueva base o sub base. El producto obtenido tiene un tono oscuro donde se observa una distribución del asfalto en forma de pecas y no posee la sensación pegajosa que si poseen las mezclas en caliente (Achille, 2013). Esta manera distribuirse el en los agregados, se debe a que durante el proceso de mezcla el asfalto cubre a las partículas más finas las cuales trabajan como puntos de unión con las partículas de mayor tamaño (Achille, 2013; Ebels, 2008; Mathaniya Twagira, 2010). En la Figura 2.16 se puede observar la apariencia de probetas de BSM – FA elaboradas con diferentes contenidos de RAP y un mismo contenido de asfalto espumado.

*Figura 2.16 Probetas de BSM-FA. a) Probetas Estabilizadas con Asfalto Espumado. b) Material estabilizado con bajo contenido de RAP (15%). c) Material estabilizado con alto contenido de RAP (85%). d) y e) Detalle de las caras de la probeta partida del ensayo.*







“Una variedad de agentes estabilizadores son utilizados en la industria (de construcción de pavimento) alrededor del mundo, estos incluyen compuestos químicos (...) así como productos ligantes convencionales como el cemento y el asfalto”. (Mulusa, 2009. p.5), todos los productos buscan proveer a los BSM una combinación de rigidez y flexibilidad a la capa en la que se utilizan, adicionalmente mejoran la durabilidad y disminuyen la afectación del material frente al agua (Achille, 2013; Asphalt Academy, 2009b; Ebels, 2008; K.J. Jenkins, 2000; Muthen, 1998).

Las primeras experiencias con BSM registradas en manuales datan de los años 70 principalmente en Sudáfrica, utilizando como material ligante el asfalto de emulsiones catiónicas, algunos de estos manuales son: 1972: TRH (Technical Recommendations for Highways) - 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 y, a finales de los años 90 principios de los 2000 donde se desarrolla una guía utilizando asfalto espumado FA en el manual TG2: The design and use of foamed bitumen treated materials (Jan Ebels & Jenkins,

2007, p.1) 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 de AustRoads; 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 aunque ésta última se enfoca en mezclas frías y no en BSM (Chandra, Veeraragavan, & Krishnan, 2013). Mención especial tiene el manual alemán 2012: Wirtgen Cold Recycling Technology basado en el manual TG2 sudafricano.

Adrian Bergh es conocido como el pionero en el uso de los BSM (Collings & Jenkins, 2011). En los años 70, utilizó emulsiones asfálticas para la rehabilitación de vías en Suráfrica con comprobado éxito, sin embargo y a pesar de que los beneficios en la utilización de emulsiones fue demostrado en diferentes proyectos, se encontraron bastantes problemas de aplicación de la técnica, por lo que en el año 1994, debido al desarrollo tecnológico en asfalto espumado, se inició en Suráfrica la implementación de los BSM – FA como técnica de rehabilitación (Collings & Jenkins, 2011, p.3).

### **2.3.1 Ventajas y limitaciones de las Mezclas con Asfalto Espumado.**

#### **2.3.1.1 *Ventajas***

El asfalto espumado se produce directamente en el sitio de aplicación, sin necesidad de transportar agua, como es en el caso de las emulsiones asfálticas.

La producción de asfalto espumado no cambia las propiedades químicas del asfalto. (Mathaniya Twagira, 2010; Namutebi, Birgisson, & Bagampadde, 2011)

El asfalto espumado puede ser usado con una importante variedad de materiales desde materiales tipo grava hasta materiales contaminados con materia orgánica previo a tratamiento (Constantyn Kelfkens, 2008).

Incrementos en el contenido de asfalto espumado en la mezcla, incrementan en la mayoría de ocasiones, las propiedades de resistencia de los materiales tratados y se reduce la susceptibilidad a la humedad (Mulusa, 2009; Muthen, 1998).

El uso de espuma en la mezcla reduce los tiempos de apertura al tráfico. Las mezclas pueden ser compactadas inmediatamente son aplicadas y puede habilitarse para tráfico luego de la compactación. (K.J. Jenkins, 1999; Muthen, 1998)

En el proceso de curado no se pierden compuestos volátiles, por lo que se suprimen los efectos ambientales negativos (K.J. Jenkins & Constantyn Kelfkens, 2008) así como reducción de polución atmosférica, con poca o ninguna emisión de hidrocarburos.

Algunos autores como Jenkins, (2000) y Muthen, (1998) consideran que el asfalto espumado puede ser usado con agregados en frío y húmedos y que no se requiere de un precalentamiento del material, así como que no existe una afectación importante de los valores de humedad de los materiales usados por la inclusión de la espuma de asfalto. Sin embargo en varias investigaciones si se recomiendan el valor mínimo de temperatura de los agregados en 10°C, reconociendo que la calidad de la dispersión del asfalto espumado en la mezcla disminuye a bajas temperaturas (Bowering & Martin, 1976).

Los BSM's-Foam pueden ser almacenados si las condiciones de humedad se mantienen. (Jenkins, 2000; Muthen, 1998)

Se pueden utilizar materiales reciclados, lo que reduce significativamente los impactos al medio ambiente.(Mulusa, 2009). Técnicas de reciclaje in situ, como el Reciclaje en frío in situ -CIPR, (por sus siglas en inglés Cold-In-Place Recycling), son usadas desde los años 80 en países como Malasya. (Sufian et al., 2014)

Se reducen costos de transporte y de asfalto, ya que los BSM requieren de menos cantidad de asfalto y de agua que otras técnicas.(Muthen, 1998)

Es posible la construcción bajo condiciones ambientales adversas de lluvia y temperatura ambiental sin afectarse la trabajabilidad o la calidad final del material, evitando que el material baje de los 10°C. (Mulusa, 2009; Muthen, 1998)

### **2.3.1.2 Limitaciones**

Los procesos de producción de espuma y de mezcla, requieren un conocimiento y experiencia, así como el uso de maquinaria especializada. (K.J. Jenkins, 2000; Mulusa, 2009)

En ocasiones, durante la producción del asfalto, se adicionan anti espumantes que dificultan la producción de la espuma en laboratorio y en campo.

Los procedimientos para el diseño de estructuras de pavimento con asfalto espumado, aún no han sido suficientemente desarrollados.(K. J. Jenkins & Van de Ven, 2001; Van de Ven et al., 2007)

Materiales con bajos contenidos de finos (tamaños menores a 0.075mm) no pueden ser utilizados o requieren de adición de nuevos materiales.(K.J. Jenkins & Mulusa, 2009; Mulusa, 2009).

### 2.3.2 Propiedades Índice.

La investigación desarrollada por Grenfell et al., (2015) demostró que pequeños cambios en la granulometría del RAP provocan grandes cambios en el comportamiento de la mezcla.

El Índice de plasticidad y la curva granulométrica son los indicadores más usados para determinar si el material es viable para ser estabilizado con asfalto espumado. (Wirtgen GmbH, 2012. pg. 127) En esta misma línea, Jenkins, (2000) plantea que materiales con elevados valores de plasticidad presentan respuestas pobres a los tratamientos con asfalto espumado así como los que poseen altos contenidos de arcillas, por lo que previo al espumado deben ser tratados. De igual manera comenta que varias investigaciones han demostrado que el valor máximo del Índice de Plasticidad debe ser de 12 y que el material debe ser tratado con cal como llenante si el índice es mayor a 8. A su vez, Weston, (2001) recomienda un IP de máximo 10, y si se usa cal, de 15.

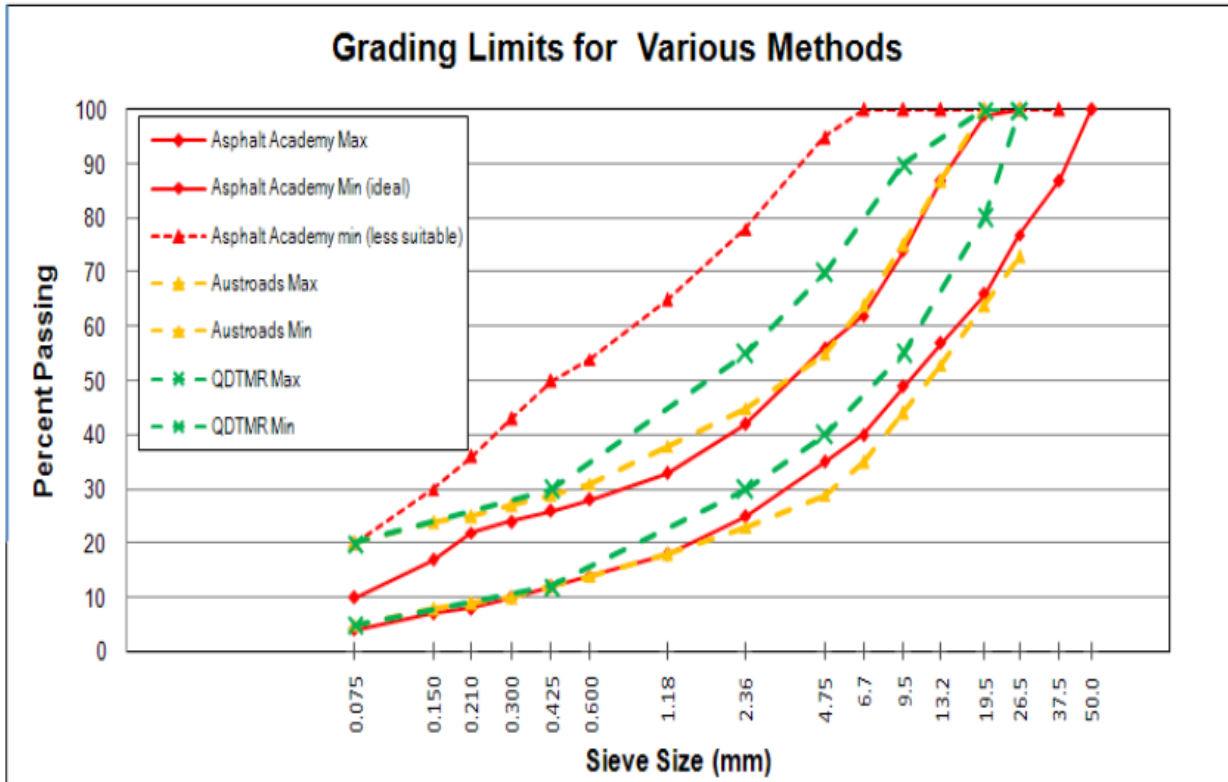
La tabla 2.2 muestra los rangos granulométricos recomendadas por tres diferentes guías, en la figura 2.17 se observan de manera gráfica los diferentes rangos recomendados.

*Tabla 2.2 Granulometrías de diferentes guías. Adaptado de (Leek & Jameson, 2011)*

TAMAÑO DE		AUSTROADS	TMR QUEENSLAND	TG2 SUDÁFRICA
TAMIZ	mm	AUSTRALIA 2006	2008	2009
1 1/2"	38.1	100	100	
1"	5.4	73-100	80-100	77-100
3/4"	19.1	64-10	55-90	66-99
1/2"	12.7			
3/8"	9.53	44-75	40-70	49-74
1/4"	6.35			
N° 4	4.75	29-55	30-55	35-56
N° 8	2.38	23-45		25-42
N° 10	2			18-33
N° 16	1.19	18-38		
N° 30	0.6	14-31		14-28

N° 40	0.425		12-30	12-26
N° 50	0.3	10-27		10-24
N° 60	0.25			
N° 80	0.18			
N° 100	0.15	8-24		7-17
No. 200	0.075	5-20	5-20	4-10

Figura 2.17 Granulometrías de Guías (Leek & Jameson, 2011).



Como se observa, las granulometrías cuyo rango son más finas, son las propuestas por los australianos, mientras que los rangos propuestos por los surafricanos son mucho más gruesas. Todas se caracterizan por tener un máximo contenido de fracción inferior a 0.075 mm (pasa No.200) de 20%.

En la tabla 2.3 presenta un resumen de las principales características de las guías australianas y surafricana en donde se presentan características relacionadas a las técnicas de compactación, curado y ensayos que cada una de las guías recomienda.

Tabla 2.3 Recomendaciones Generales de Principales Guías de Diseño. (Elaboración Propia).

	Cantidad mínima de pasa 200	Contenido de humedad	Ip	Uso de llenante	Contenido de asf. inicial	Contenido de asf. final usado	Observaciones	Método de Compactación	Curado	Ensayos	Autor
<b>AUSTRO ADS 2006</b>	5%		<10	<2% de Cal	2%, 3% y 4%	4%	Mínimo dos caras fracturadas en el material	Marshall y Gyropac.	3 Días a 60°C y 10 minutos en bomba a 0.95 kPa o 24 hr sumergido.	Módulo por tensión indirecta. (Dry: en seco. Wet: en Húmedo) Mdry y Mwet. (Mw/MD)=0.5	Bitumen Stabilisation– An Australian Perspective
<b>QUEENSLAND DEPARTMENT TMR2008</b>	5%	70% del Contenido Optimo de Proctor	<10	<2% de Cal	Ensayo de probetas partiendo de 3% en función de la Granulometría	3.5 a 4%	>10 en índice de partículas	Marshall. Diametro 15cm	3 Días a 40°C y 10 minutos en bomba a 0.95 kPa	Módulo por tensión indirecta	AUSTROAD S Technical Report: Review of Foamed Bitumen Stabilisation Mix Design Methods
<b>ASPHALT ACADEMY TG2 2009</b>	5%	65% al 85% del Optimo de Proctor modificado	<10	<1.5% de cal o <1% de cemento	No existe recomendación inicial	<3%	No hace recomendaciones al respecto	Marshall y Martillo Vibratorio	Nivel de Diseño 1: 3 Días a 40°C Nivel de Diseño 2 y 3: 20 horas a 30°C y 2 Días selladas en bolsas a 40°C. y 24 hr sumergidos.	Tracción Indirecta en Seco y Húmedo y correspondiente Resistencia conservada mayor al 50%-Compresión Simple -UCS	Asphalt Academy 2009

### **2.3.3 Comportamiento de los BSM.**

Existen muchos factores que afectan el comportamiento de los BSM, varios autores coinciden que entre los más relevantes están: el origen y propiedades de los materiales, la composición volumétrica, el tipo, contenido y dispersión del asfalto, la humedad, el tipo y proporción de llenante, la gradación de los agregados y la plasticidad (Collings & Jenkins, 2011; K.J. Jenkins & Collings, 2015; K.J. Jenkins & Ebels, 2007). De lo anterior, la complejidad en el comportamiento de éste tipo de materiales hace que sea causa de estudios profundos en la actualidad.

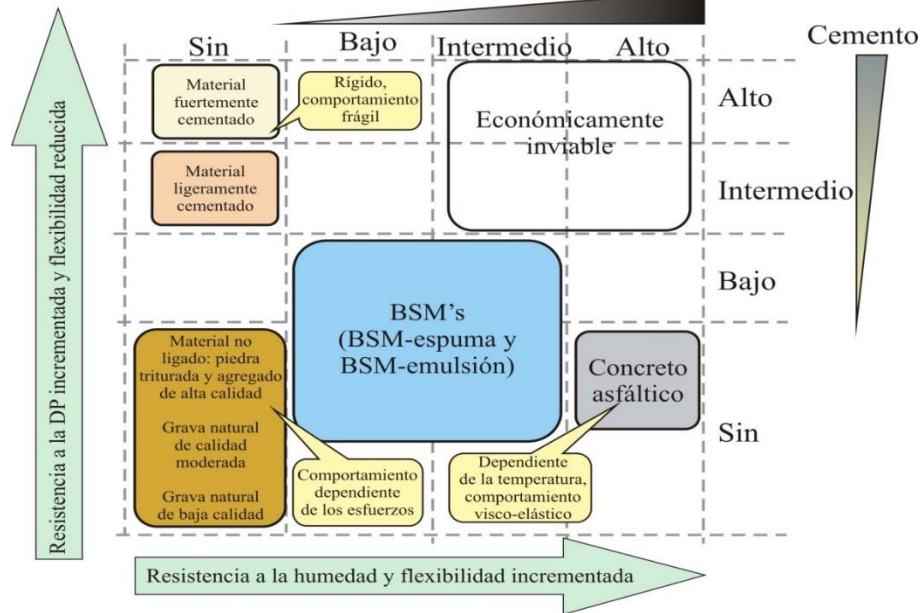
En cuanto a los materiales que componen los BSM, el RAP se denomina como “agregado negro” por los suráfricanos y, en principio, no se considera la influencia de la edad ni el envejecimiento del asfalto que posee (Chandra et al., 2013, p1). Sin embargo, se ha encontrado que la durabilidad final de la mezcla depende en gran medida de la resistencia de los materiales y del asfalto que originalmente componen el RAP.(Anochie-Boateng et al., 2009; Kim & Lee, 2011; Mathaniya Twagira, 2010)

Los BSM son tratados 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 afectación por la humedad (Collings & Jenkins, 2011, p.2; Jenkins & Kelfkens, 2008; Place, 2008, p.5; Wirtgen GmbH, 2012, p.116). 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) y disminuye la sensibilidad a la humedad de la mezcla sin disminuir significativamente la fricción, y aumentando la resistencia a la flexión (González et al., 2014, p.1; Wirtgen GmbH, 2012, p.107). También se incorpora un llenante activo que puede ser cemento o cal, en proporciones menores al 1% en masa de la mezcla total, lo que puede aumentar significativamente la resistencia conservada sin afectar la flexibilidad de la capa (Wirtgen GmbH, 2012). El uso de la cal como llenante ha demostrado incrementar el módulo resiliente del material (Kendall et al., 1999; Vorobieff & Preston, 2004).

Comúnmente en Suráfrica son utilizadas cantidades de asfalto menores al 3% y de llenante hasta del 1%. Sin embargo, en Australia y Nueva Zelanda los contenidos de asfalto y llenante llegan a ser superiores y varían en función del comportamiento deseado (Lynch & Jenkins, 2013, p.2).

En la Figura 2.18 se presentan la conceptualización de los BSM en combinación con cemento asfáltico y cemento hidráulico.

Figura 2.18 Comportamiento Conceptual de Materiales Usados en Pavimentos (Asphalt Academy, 2009b)



Los materiales granulares exhiben un comportamiento dependiente de los esfuerzos a los que se ve sometido, es decir que el material al verse confinado aumenta la rigidez efectiva mientras el estado de esfuerzos aumenta; Cuando el material es llevado a esfuerzos superiores o cercanos al valor de resistencia último, se presenta falla por deformación permanente o ahuellamiento (Wirtgen GmbH, 2012, p.103).

Como resultado de la similitud entre los BSM 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 relación de esfuerzo desviador ( $\sigma_d/\sigma_{d,f}$ ) obtenido mediante ensayo triaxial, el cual relaciona el esfuerzo desviador aplicado  $\sigma_d$  y el esfuerzo desviador obtenido en el momento de la falla  $\sigma_{d,f}$ . (Jenkins & Collings, 2015, pg.2; Mathaniya Twagira, 2010)



Autores australianos plantean como principal mecanismo de falla de los BSM el agrietamiento por fatiga, seguido por el de deformación permanente y el de agrietamiento por contracción como un mecanismo de falla poco usual, causado principalmente por bajos contenidos de asfalto y altos contenidos de cemento (Vorobieff, 2005, p.1). (Figura 2.19).

Figura 2.19 Condiciones de Falla en el Pavimento. Adaptado de: (Collings & Jenkins, 2012)



El CSIR Transportec en asociación con Gauteng Province Department of Transport (Gautrans) de Suráfrica concluyeron que los BSM tratados con FA tienen un comportamiento similar a los materiales estabilizados con cemento cuando el contenido de este es mayor al del asfalto adicionado (Collings & Jenkins, 2011, p.4) de lo contrario, su comportamiento es más flexible que los materiales tratados con cemento (Ben, 2014, p. 36).

En cuanto a la durabilidad de los BSM, se han podido observar estructuras de pavimento con vidas útiles mayores a 20 años que han utilizado esta tecnología (Ben, 2014, p.37.). Sin embargo, es aún poco lo que se sabe al respecto de sus propiedades (Ebels & J Jenkins Promotor, 2008, p. 22; Elias Mathaniya Twagira, 2010, p.26) y la afectación en el tiempo, lo que hasta ahora se sabe es que uno de los principales factores que afectan la durabilidad es la humedad (Elias Mathaniya Twagira, 2010, p. 23) y el aumento de su módulo de rigidez en el tiempo.

#### 2.3.4 Parámetros que Afectan el Comportamiento de los BSM.

El comportamiento y desempeño los BSM – FA es complejo debido a naturaleza de sus componentes. El uso o no de llenantes activos, el origen de los materiales, la granulometría,

la composición volumétrica, el clima, el tipo de asfalto y el contenido del mismo, así como la temperatura del asfalto durante el espumado y la humedad son, entre muchos otros, los factores que afectan significativamente las propiedades de los BSM (Lynch & Jenkins, 2013). Adicionalmente, algunas investigaciones han demostrado que la variación en el porcentaje de uso de RAP, tipo y cantidad de agentes estabilizantes y cantidad de llenante tienen efecto directo en el comportamiento definitivo de los BSM (Sufian et al., 2014). A continuación, se analizan varios parámetros que afectan el comportamiento de los BSM.

a) Agregados.

El tamaño máximo del agregado a ser tratado con asfalto espumado, es de 53mm (K.J. Jenkins, 1999; Weston, 2001) y el espesor de la capa estabilizada compactada en campo es como mínimo, tres veces el tamaño máximo de la partícula de agregado.

El comportamiento de los BSM está influenciado de manera significativa por la trabazón y la angularidad de los agregados más que por la viscosidad del asfalto. La angularidad del agregado fino es un excelente indicador de la idoneidad del material para ser tratado con asfalto espumado (Leek & Jameson, 2011).

De acuerdo con la literatura y varias guías de diseño, la elección del uso de un agregado para estabilizarse con asfalto está en función de la gradación más que en el origen o la naturaleza del mismo. Guías de diseño como la TG2 de la Asphalt Academy, (2009b) recomiendan zonas de gradación “ideal y menos ideal” (Figura 2.17) para materiales a ser usados con asfalto espumado (Achille, 2013, Kim J. Jenkins, 1999; Ruckel et al., 1983).

La relación entre el contenido de finos y el contenido de asfalto es fundamental ya que un exceso de asfalto en el mástico (mezcla de material fino, agua y asfalto espumado) actúa como lubricante y reduce la resistencia, la estabilidad y la trabajabilidad del BSM (Muthen, 1998). Estudios realizados por Sakr y Manke (1985) demostraron que, en mezclas con asfalto espumado, la estabilidad depende en mayor parte de la trabazón de los agregados que de la viscosidad del asfalto. Esto implica que los BSM-FA no son tan susceptibles a la temperatura como una mezcla asfáltica en caliente (Betti et al., 2016; Muthen, 1998).

Es importante tener presente que en diversas ocasiones los tamaños de partícula obtenidos en campo pueden diferir de manera significativa con los tamaños manejados en laboratorio, esto debido principalmente, a la acción mecánica de los equipos de campo, situación no emulada por los equipos de laboratorio. (Ben, 2014, pg.54).

Las características de los agregados, así como la distribución de tamaños de los agregados tienen incidencia en la relación de vacíos que tendrá la mezcla final y ésta a su vez, incidirá en su permeabilidad. Los valores típicos de la relación de vacíos con aire se encuentran entre el 6% y el 16%, siendo más altos con el incremento en el contenido de RAP. Los valores típicos de permeabilidad de los BSM se encuentran entre  $10^{-4}$  y  $10^{-2}$ cm/s, haciendo que el material se comporte como de “drenaje pobre” (Ben, 2014).

b) Propiedades del asfalto

Es factible espumar todo tipo y grado de asfalto. Aun cuando no existe ninguna limitante para el espumado, se reconoce que los asfaltos con un alto grado de penetración (asfaltos blandos), suelen tener mayores valores de vida media y Relación de Expansión que asfaltos de penetración baja (asfaltos duros) (Achille, 2013; Asphalt Academy, 2009b).

No solo el tipo, sino además la cantidad adicionada de asfalto determinan el comportamiento final de los BSM. Es así como una adición superior al 3.5% de asfalto en peso de material seco, provoca que la mezcla sea altamente flexible pero con baja resistencia a la deformación (Lynch & Jenkins, 2013). En la tabla 2.4, se presenta un recuento de la influencia del contenido de asfalto en las propiedades y comportamiento de los BSM.

*Tabla 2.4 Efecto del Incremento en el Contenido de Asfalto en las propiedades y Comportamiento de los BSM(Lynch & Jenkins, 2013).*

<i>Propiedad y Comportamiento del Material</i>	<i>Efecto</i>
<b>Cohesión</b>	Incrementa
<b>Ángulo de Fricción Interna</b>	Decrece
<b>Resistencia al Corte</b>	Variable
<b>Rigidez</b>	Variable
<b>Comportamiento Termo-dependiente</b>	Incrementa
<b>Resistencia a la deformación Permanente</b>	Variable
<b>Resistencia al corte</b>	Incrementa
<b>Fatiga</b>	Incrementa

c) Contenido de agua de espumado (FWC)

Como se observó en el numeral 2.2.3, las características básicas de la espuma de asfalto están en función, entre otros, de la cantidad de agua usada para su producción.

El exceso de FWC puede tener un efecto negativo en el comportamiento del BSM y las mezclas con asfalto espumado. Los principales mecanismos de afectación sobre la mezcla por exceso de humedad son, entre otros: reducción de adhesión entre agregado y asfalto, reducción de cohesión de la mezcla lo que resulta en una disminución de la resistencia al corte y en el módulo de rigidez de la mezcla final (B. W. Hailesilassie, Hugener, & Partl, 2015). Las investigaciones realizadas por Hailesilassie et al., son las primeras que analizan éstos tipos de afectaciones ocasionadas por el agua residual del proceso de espumado del asfalto sobre las mezclas tibias.

#### d) Contenido De Humedad

La humedad de la mezcla, tiene un rol fundamental para aumentar la lubricación del material, aumentar la dispersión del asfalto espumado en toda la mezcla y mejorar la trabajabilidad durante la compactación. Se ha observado que, en mezclas con FA a humedad óptima de compactación, los valores de resistencia en muestras falladas en ensayos UCS (por sus siglas en inglés Unconfined Compressive Strength), crecen en comparación a muestras de diferente contenido de humedad sin importar las variaciones en la cantidad de RAP usado.

#### e) Contenido de RAP

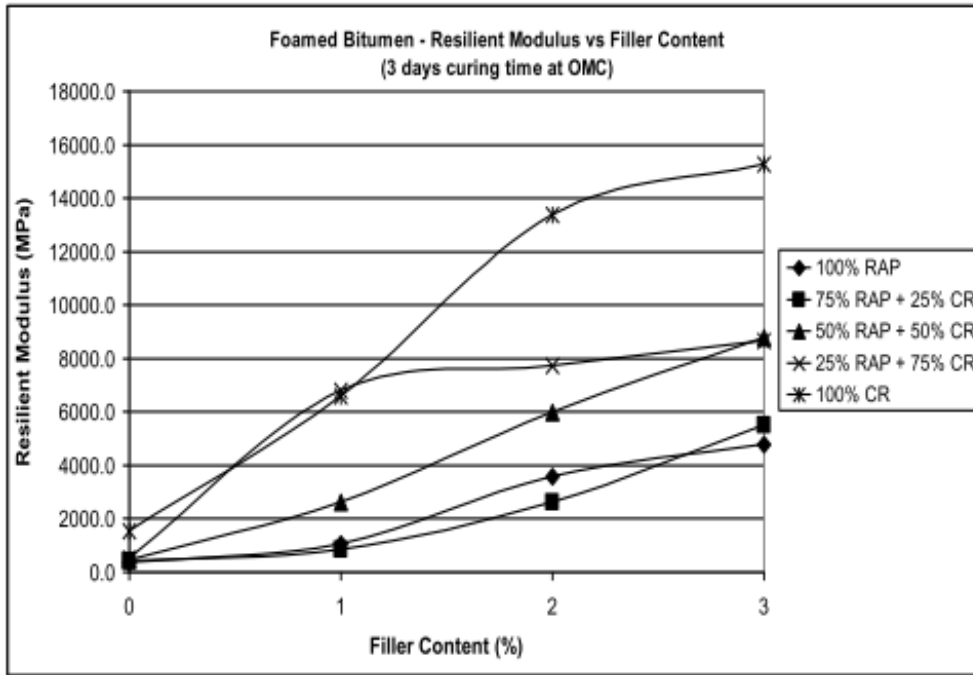
Para BSM con contenidos de RAP inferiores al 25% la ITS crece con la disminución del contenido de agua, mientras que con contenidos de RAP mayores al 25%, el contenido de humedad no presenta influencia significativa en la resistencia de las muestras (Sufian et al., 2014). Adicionalmente, He & Wong, (2008) concluyen que entre más envejecido esté el RAP utilizado en la mezcla, mayor es la susceptibilidad de la misma a la humedad

#### f) Llenante activo

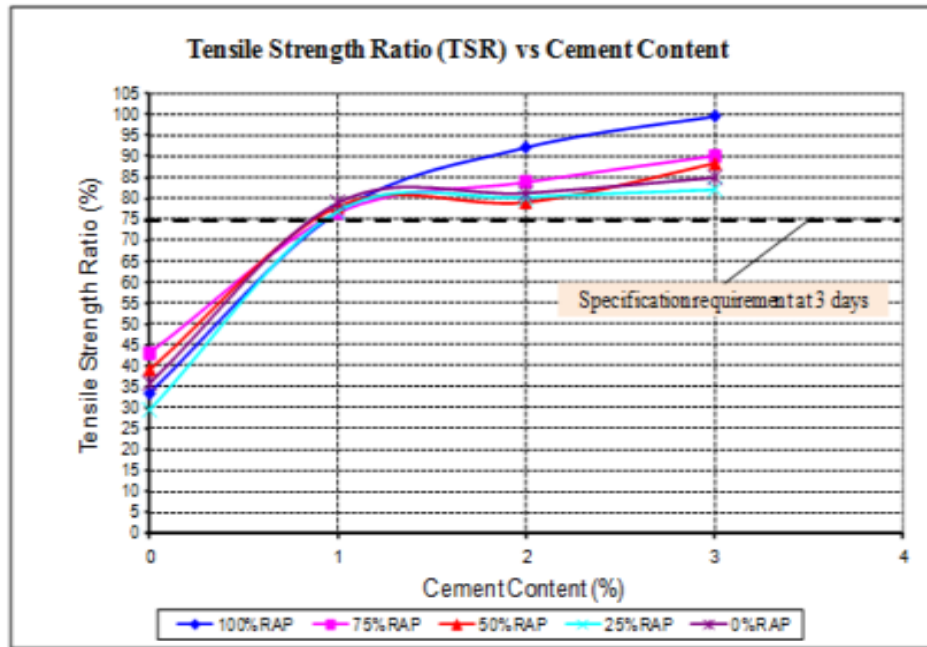
El tipo y cantidad de llenante tienen influencia directa en las propiedades de resistencia y susceptibilidad al daño inducido por el agua de los BSM. En la investigación realizada por Sufian et al., (2014) se observó que para diversas combinaciones de RAP, excepto la del 100%, los requerimientos de resistencia mínimos son cumplidos siempre que se utilice como mínimo un 1% de llenante activo. Para muestras con 100% de RAP un mínimo de 2% de llenante activo es requerido. De igual manera, se observó que el aumento en la cantidad de llenante utilizado, aumenta la resistencia para cualquier porcentaje de RAP utilizado en el BSM.

El aumento en el contenido de llenante activo para cualquier combinación con material natural como el material de roca partida CR (por sus siglas en inglés Crush Rock) analizadas por Hainin et al., presenta un aumento del módulo de resiliente de los BSM. (Figura 2.20a). Se sugiere que el contenido de llenante debe ser elevado en vías donde se desea habilitar el tráfico de manera rápida y así disminuir los tiempos de curado requeridos.(Sufian et al., 2014).

Figura 2.20 Influencia del Contenido de Llenante Activo en a) Módulo Resiliente.(Sufian et al., 2014) de roca Triturada (Crush Rock-CR) y RAP. b) Resistencia Conservada en Tracción Indirecta (TSR) (Hainin, Matori, & Akin, 2014)



a)



b)

#### g) Temperatura

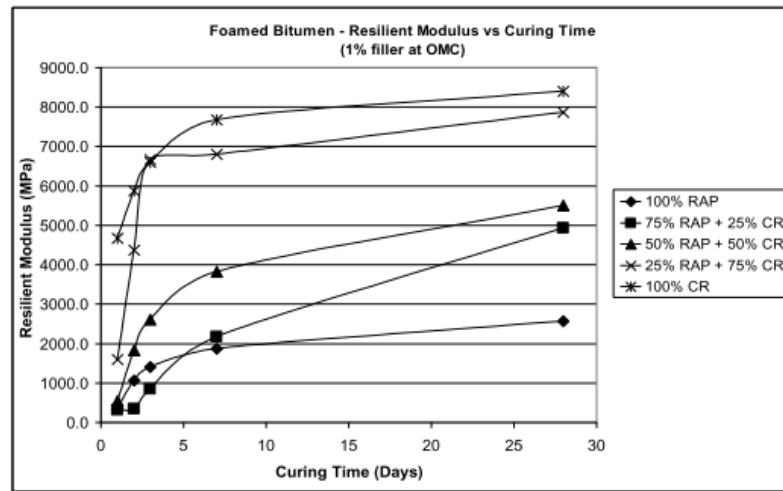
En los materiales estabilizados con asfalto, la temperatura del asfalto influncia el comportamiento de la mezcla. En mezclas obtenidas con asfaltos a baja temperatura el comportamiento tiende a ser rígido. Por otro lado, si el asfalto se encuentra a elevada temperatura durante el proceso de espumado, la mezcla final exhibe un comportamiento dúctil. Es importante resaltar que el comportamiento flexible o rígido de los BSM está también directamente relacionado con la cantidad de llenante activo utilizado. (Achille, 2013). El comportamiento final estará determinado por la combinación entre llenante activo (cal o Cemento) y Asfalto espumado inyectado en la mezcla.

#### h) Tiempo de Curado

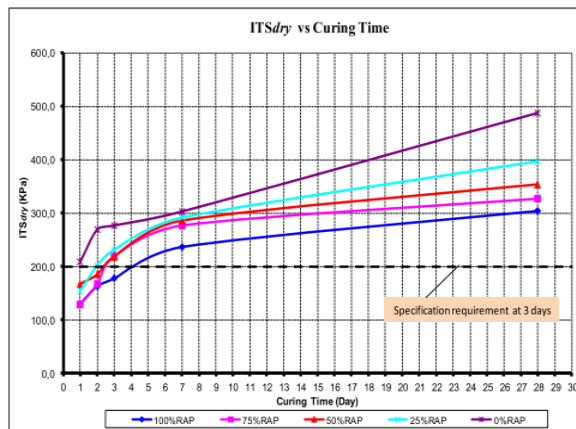
Se ha observado que la resistencia de los BSM se incrementa con el tiempo de curado. Existe un aumento considerable de la resistencia del material en los primeros cinco días de curado, luego de éste periodo la resistencia crece de forma gradual (Sufian et al., 2014).

En la Figura 2.21 se observa el aumento de los valores de módulo Resiliente y resistencia a la tracción indirecta ITS en el tiempo para BSM de CR con diferentes contenidos de RAP. Por otro lado, los valores de resistencia conservada (TSR) disminuyen con los tiempos de curado sin importar el contenido de RAP que posean.

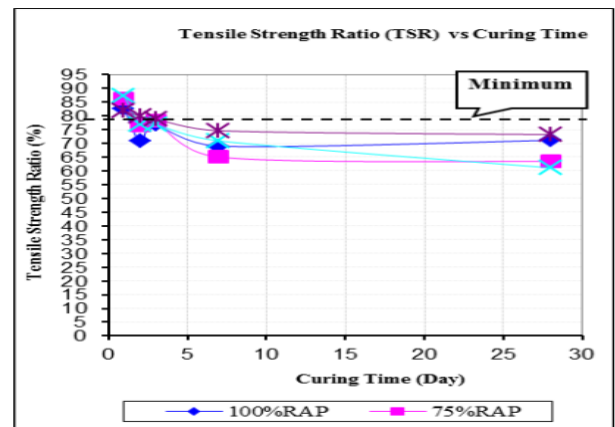
Figura 2.21 Influencia del Tiempo en el Módulo Resiliente.(Sufian et al., 2014) , b) en la resistencia a la tracción Indirecta ITS (Hainin et al., 2014) y c) Resistencia Conservada (TSR) (Hainin et al., 2014)



a)



b)



c)

La utilización de los BSMs tiene beneficios tanto ambientales como económicos; Los ambientales, por ser un proceso que reduce las temperaturas de mezcla y con ello las emisiones de gases efecto invernadero y porque suelen combinarse con materiales reciclados; y económicos, logrados por la reducción en el uso de energía para calentar el asfalto.

## 2.4 Resistencia al Corte de los BSM

K.J. Jenkins & Ebels, (2007) reportan que los primeros estudios enfocados en analizar la resistencia al corte de los BSM-FA, fueron desarrollados en los años 70 por investigadores de Australia que realizaron una amplia cantidad de ensayos triaxiales tanto dinámicos como estáticos. En 1976 Bowering y Martin usaron el Cohesionmetro de Hveem para evaluar la cohesión a 60 °C de materiales estabilizados con emulsiones, secos y expuestos al agua durante 3 días (K.J. Jenkins, 2000).

En 1976, Bowering y Martin, demostraron que los valores de cohesión y resistencia a la compresión inconfiada de materiales fabricados con asfalto espumado cuya relación de expansión era mayor a 15, eran significativamente mayores que con valores inferiores. (Ruckel et al., 1983). Esta conclusión es similar a la obtenida en los estudios realizados por Leek & Jameson, (2011) en donde se muestra que los valores de cohesión y compresión simple UCS, son generalmente mayores para ER superiores a 15 que para valores inferiores. Macarrone et al. (1995) sugieren que elevados valores de expansión dan como resultado un mejor recubrimiento de las partículas, lo que consecuentemente mejora el comportamiento final de la mezcla.

En los años 80 se desarrollaron los primeros ensayos triaxiales en materiales granulares en donde se compararon los valores de los parámetros al corte antes y después de la adición de asfalto. Se encontró que la cohesión creció cerca de 4 veces con respecto al valor obtenido sobre los granulares sin adición de asfalto. Adicionalmente, se observó que el desarrollo de resistencia en materiales arenosos estabilizados con asfalto espumado, se da alrededor de los dos años luego de realizada la estabilización. (K.J. Jenkins, 2000)

En el año 2000 Jenkins profundizó en las propiedades de corte de los materiales mediante ensayos triaxiales monotónicos sobre muestras de gran tamaño (150mm X 300mm) siguiendo la guía desarrollada por Meere en 1979 para materiales con FA. En su investigación, Jenkins concluye que los valores de fricción  $\varphi$  decrecen mientras que los valores de cohesión aumentan con el aumento en el contenido de asfalto espumado de la mezcla.

Autores como (Santagata et al. 2010), se enfocaron en la caracterización mecánica de las mezclas de materiales con asfalto espumado para diferentes mecanismos de compactación como el giratorio y el vibratorio (Santagata et al., 2010)

En el manual TG2 surafricano se clasifican los BSM, para propósitos de diseño y uso, con base en los valores de la resistencia a la tensión indirecta ITS (por sus siglas en inglés Indirect Tensile Strength), de resistencia a la compresión inconfiada (UCS, por sus siglas en inglés Unconfined Compression Strength) y del ensayo triaxial. Todos ellos son ensayos que buscan definir parámetros de resistencia al corte como esenciales para diseño con BSM (Achille, 2013).



Otro aspecto relevante en la resistencia al corte, es el tipo de llenante activo (cemento o cal) incorporado en la mezcla. Varias investigaciones han mostrado que aunque los BSM-FA tienen un comportamiento dependiente del estado de esfuerzos aplicado, similar al de un material granular, cuando incorporan un 1% o más de llenante activo, presentan un incremento en los valores de cohesión y una disminución en el ángulo de resistencia interna, lo que demuestra que la dependencia de los esfuerzos es solo válido para mezclas con valores de llenante activo inferiores a 1% (González, 2009; Cubrinovski et al., 2012; Čížková, et al., 2016), ya que la componente independiente al estado de esfuerzos (cohesión) es el parámetro que rige el comportamiento.

Por último, se tiene que Jenkins, (2000) incorpora la relación de esfuerzos (RE) como parámetro de comportamiento en el diseño de estructuras de pavimento con capas de BSM y que su importancia radica en que con dicha relación es posible caracterizar la falla permanente (Jenkins & Collings, 2015, p.2; Ebels & Jenkins, 2007). El valor de RE se define mediante la siguiente ecuación:

$$RE = \frac{\sigma_d}{\sigma_{d,f}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{1f} - \sigma_{3f}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_3 \left( \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) - 1 \right) + 2c \tan \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right)}$$

*Ecuación 2. Parámetro de relación de esfuerzos*

Donde,  $\sigma_1$  es el esfuerzo principal mayor aplicado;  $\sigma_{1f}$  es el esfuerzo principal mayor máximo soportado;  $\sigma_3$  es el esfuerzo principal menor;  $c$  es la cohesión y  $\Phi$  es el ángulo de fricción interna del material.

Adicionalmente, Jenkins, (2000) encontró que el parámetro fundamental de comportamiento de un BSM-FA está dado por la relación de esfuerzos desviadores  $\sigma_d / \sigma_{d,f}$  y no por la relación de esfuerzos principales mayores  $\sigma_1 / \sigma_{1f}$ , que no se ve afectada por los esfuerzos de confinamiento.

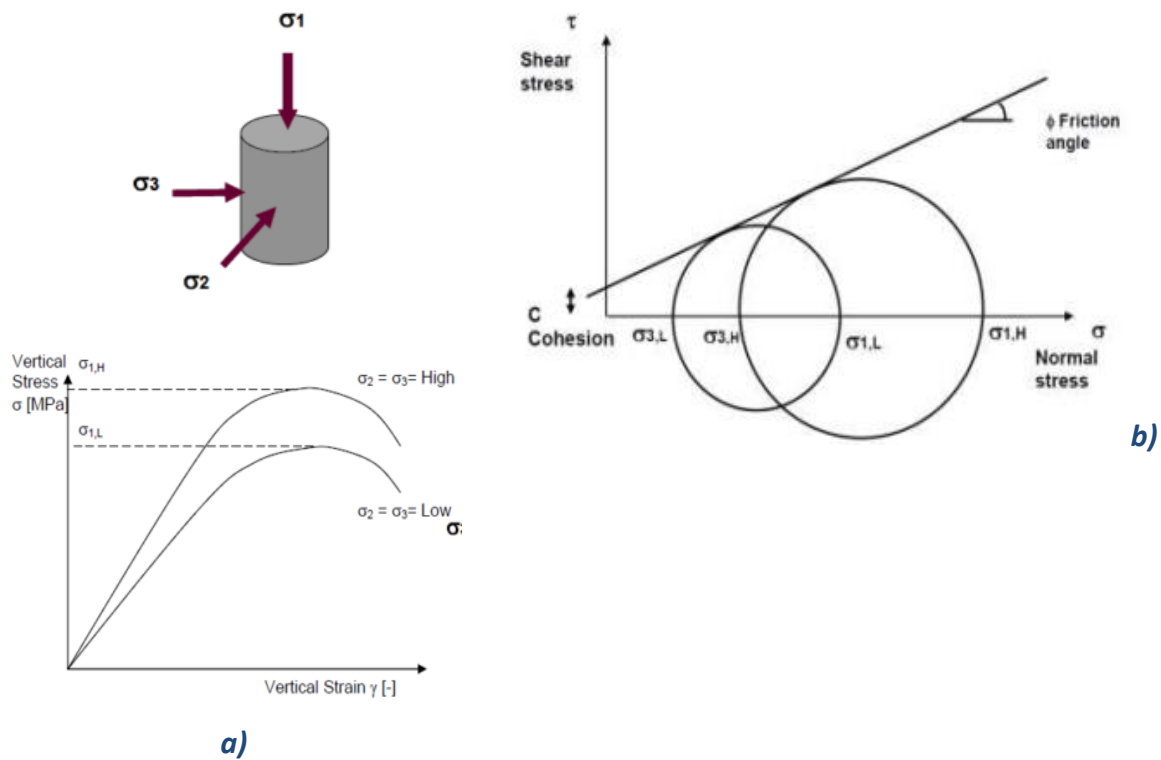
#### **2.4.1 Comportamiento de la Resistencia al Corte**

Los BSM - FA, tienen como característica que las partículas de mayor tamaño no están cubiertas por asfalto por lo que las propiedades de fricción no se ven afectadas de manera significativa a menos que la utilización de llenantes activos estén por encima del 4%, sin embargo, la gran cantidad de puntos de liga producidos por el asfalto en los agregados finos, hacen que la cohesión crezca hasta diez veces su valor comparado con el mismo

material sin usar asfalto. Esto hace que el material muestre un comportamiento dependiente de los esfuerzos de confinamiento aplicados (Collings & Jenkins, 2011)

La obtención de los parámetros de resistencia al corte se logra mediante la aplicación de carga monótonica con para diferentes presiones de confinamiento mediante ensayo triaxial llevando al material hasta la falla. En la figura 2.22 se observa la relación entre el esfuerzo a la falla y la deformación, así como la representación de los parámetros de corte fricción  $\phi$  y cohesión C.

Figura 2.22 a). Gráfica Esfuerzo Vs. Deformación. b). Representación de parámetros de corte mediante el círculo de Mohr. (Van Zyl, 2015)



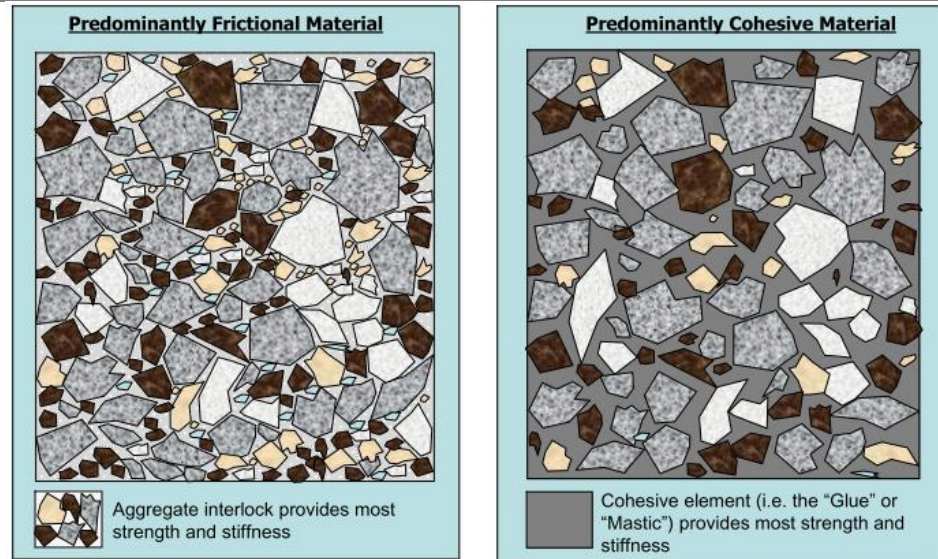
#### 2.4.1.1 Modelo MOHR- COULOMB

La modelación de materiales bajo el criterio Mohr-Coulomb define dos parámetros básicos; el primero de estos es el de cohesión, aportada principalmente por el mastico formado por el material fino y el asfalto espumado utilizado; el segundo, corresponde a la resistencia por fricción que se obtiene por el roce y la trabazón que existe entre las partículas de mayor tamaño que componen la mezcla. (Jooste, Long, & Hefer, 2007).

La regresión lineal con la que se obtienen los parámetros de resistencia al corte se considera válida para materiales estabilizados con un contenido de asfalto inferior al 4%.

K.J. Jenkins, (2000). La aproximación lineal de la envolvente de falla se considera suficiente para definir las propiedades de corte, sin embargo, se reconoce que a bajos niveles de esfuerzo aplicado ocurre un comportamiento no lineal.(González, 2009; K.J. Jenkins & Collings, 2016; Mathaniya Twagira, 2010).

Figura 2.23 Esquema representativo de material Predominantemente Friccional (Izq.) y material Predominantemente Cohesivo. (Der.) (Jooste et al., 2007)



De acuerdo con el criterio de Mohr-Coulomb, la resistencia al corte crece con el incremento del esfuerzo normal en el plano de falla. La ecuación que representa éste modelo está dada por:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi$$

Ecuación 4. Resistencia al corte bajo el criterio del modelo Mohr-Coulomb

Donde,

$\tau$  = Resistencia al corte en el plano de Falla.

C = Cohesión del material.

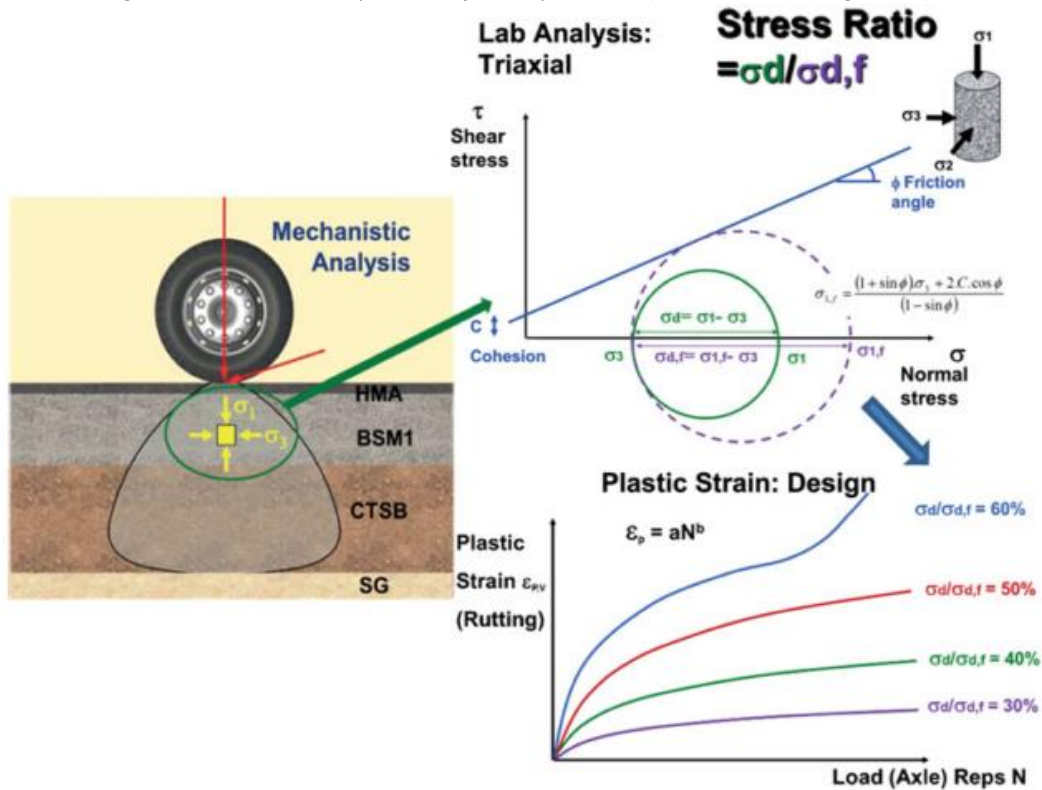
$\varphi$  = Ángulo de fricción interna.

$\sigma_n$  = Esfuerzo normal aplicado en la superficie de falla.

Se requieren mínimo dos ensayos triaxiales (se recomiendan 3) con diferentes presiones de confinamiento para la formulación de la envolvente de falla.

El análisis empírico- mecánico tiene en cuenta los esfuerzos principales a los que se somete el material en el pavimento. Estos esfuerzos principales son analizados en conjunto con los parámetros de resistencia al corte con lo que se obtiene el parámetro denominado relación de esfuerzo desviador ( $\sigma_d/\sigma_{d,f}$ ) que como se observa, relaciona el esfuerzo desviador aplicado  $\sigma_d$  y el esfuerzo desviador a la falla  $\sigma_{d,f}$  como se muestra en la figura 2.24.

Figura 2.24 Análisis Conceptual de Esfuerzos para BSM. (K.J. Jenkins & Collings, 2016)



El esfuerzo principal mayor  $\sigma_{1,f}$  puede ser definido geométicamente usando una relación entre los parámetros de cohesión  $C$  y resistencia interna  $\phi$ . (K.J. Jenkins, 2000). La relación está dada por:

$$\sigma_{1,f} = \frac{(1 + \sin \phi) \sigma_3 + 2.C. \cos \phi}{(1 - \sin \phi)}$$

Ecuación 5. Esfuerzo Principal Mayor en función de esfuerzo de Confinamiento.

Si la relación entre esfuerzos principales se asume lineal, se tiene:

$$\sigma_{1,f} = \sigma_{a,f} + \sigma_3 + \sigma_{dw}$$

$$\sigma_{1,f} = m \cdot \sigma_3 + b$$

$$m = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$$

$$b = 2 \cdot C \cdot \frac{\cos \phi}{(1 - \sin \phi)}$$

El valor  $\sigma_{a,f}$  corresponde a la carga máxima aplicada dividida por el área transversal del espécimen, el valor  $\sigma_3$  corresponde a la presión de confinamiento durante el ensayo y  $\sigma_{dw}$  corresponde a la presión de contacto en la parte superior de la muestra.

De lo anterior se tiene:

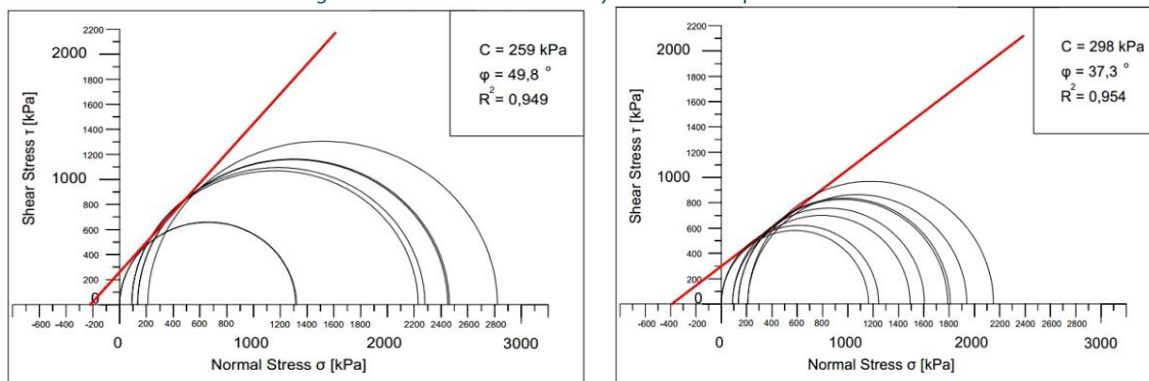
$$\phi = \sin^{-1} \left( \frac{m - 1}{m + 1} \right)$$

$$C = \frac{B(1 - \sin \phi)}{2 * \cos \phi}$$

Los lineamientos presentados para la obtención de los parámetros de resistencia al corte presentados fueron utilizados por diversos autores para la investigación sobre materiales BSM. A continuación, se presentan la recopilación de datos y tendencias obtenidos.

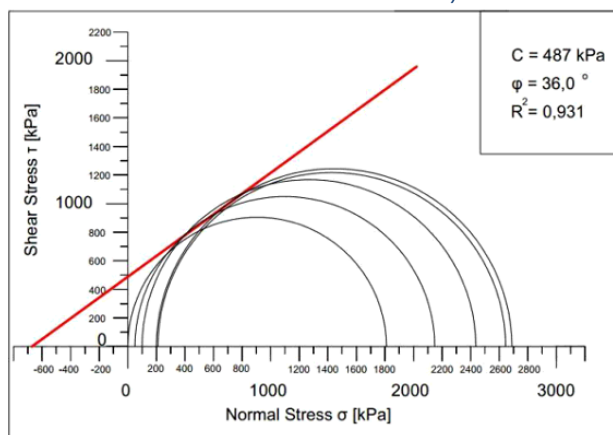
Ensayos realizados por Čížková et al., (2016) (ver figura 2.25) mostraron que los valores de ángulo de fricción interna de un mismo tipo de mezcla con diferentes contenidos de asfalto espumado (**2.5% y 4.5%**) presentaron una significativa variación (**37.3° y 49.8°**) respectivamente, mientras que los de cohesión no presentaron un cambio resaltable (**298kPa y 259kPa**) respectivamente. Adicionalmente, muestra que la adición de cemento como llenante al 1% para un mismo contenido de asfalto espumado aumenta los valores de cohesión de **298kPa a 487kPa** sin alterar de manera importante los valores del ángulo de fricción interna (**36° sin cemento y 37.3° con cemento**).

Figura 2.25 Resultados de ensayos realizados por Cizkova



a) Resultados de mezcla con AF=2.5%

b) Resultados de mezcla con AF=4.5%



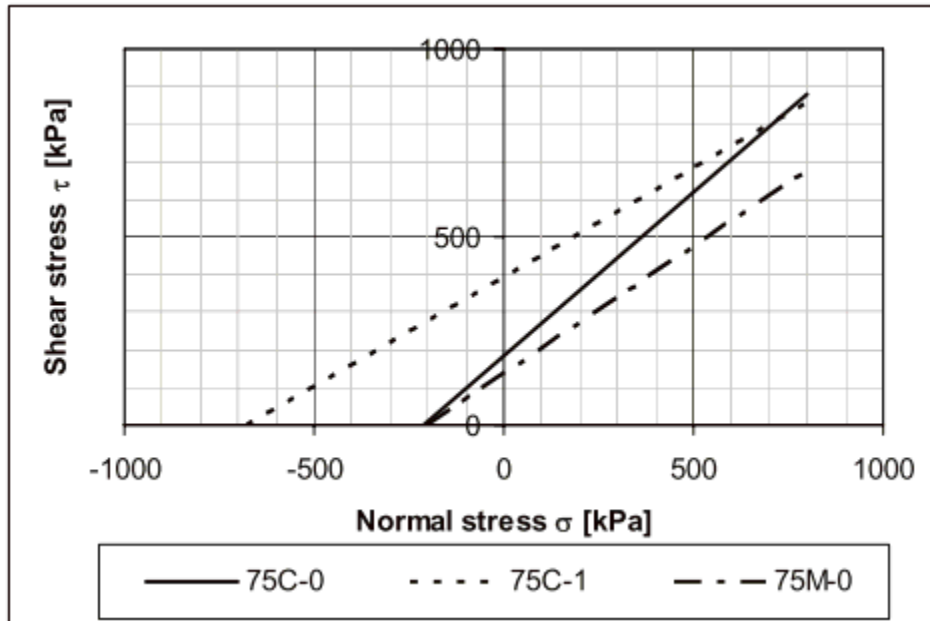
c) Resultados de mezcla con AF=2.5% + 1% de Cemento

En sentido contrario a los estudios de Cizkova, Collings & Jenkins, (2011), muestran que la adición de asfalto espumado en materiales granulares incrementa de manera importante los valores de cohesión y reduce unos pocos grados el ángulo de fricción interna debido a que la dispersión del asfalto en el material genera puntos de “soldadura” sin recubrir las partículas de mayor tamaño. En cuanto al aumento en la proporción de RAP en las mezclas utilizadas, se muestra una leve afectación en los parámetros de resistencia, pasando de un valor de cohesión igual a **311kPa** para un material sin RAP versus **319kPa** en la mezcla con 25% de RAP y ángulo de fricción de **45.8°** versus **43.1°** respectivamente. Para mezclas con 50% y 75% de RAP los valores de cohesión pasaron de **252kPa** a **276kPa** y los de ángulo de fricción interna de **44.7°** a **35.5°** respectivamente. Se muestra que la adición de RAP disminuye los valores de fricción y aumentan los de cohesión.

Estudios como los realizados por Ebels & Jenkins, (2007a) (ver figura 2.26) muestran que la adición de cemento como llenante incrementa la cohesión para mezclas de materiales con contenidos de RAP del 25% y el 75% (**75C-0:75%** de caliza sin cemento y AF= 3.6%;

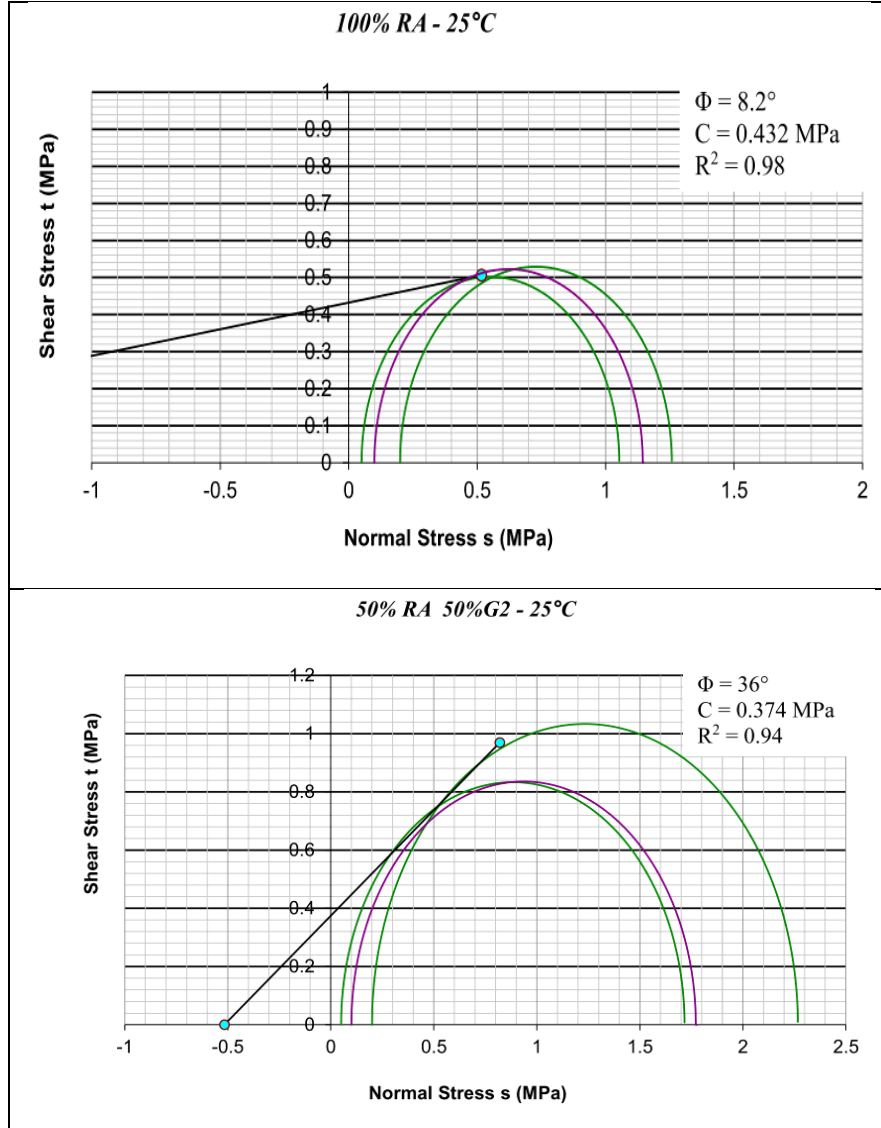
**75C-1**:75% de caliza con cemento al 1% y AF= 3.6%; **75M-0**:75% de RAP sin cemento y AF= 2.4%) Ver figura 2.26. Adicionalmente que los valores de ángulo de fricción interna y cohesión decrecen levemente con el aumento del contenido de RAP.

Figura 2.26 Envolventes de resistencia para mezclas con RAP (Ebels, 2008)

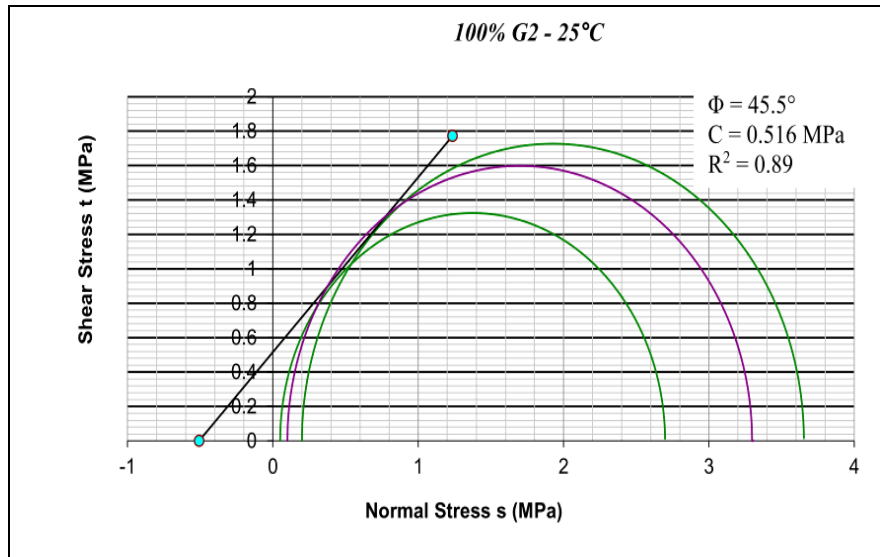


En la figura 2.27, Ben, (2014) muestra una disminución de los parámetros de resistencia de una mezcla sin RAP versus 50% y 100% de RAP. Siendo los valores de Cohesión de **516kPa** y ángulo de fricción interna de **45.5°** para la mezcla con 100% de granular y de **374kPa** y **432kPa** de cohesión y ángulo de fricción interna de **36°** y **8.2°** para las mezclas con 50% de RAP y 100% de RAP respectivamente. El autor resalta que el bajo valor de cohesión de la mezcla 100% RAP se debe posiblemente, al elevado contenido de vacíos.

Figura 2.27 Resultados de ensayos triaxiales en materiales con cemento al 1% y 2% AF. (Ben, 2014)

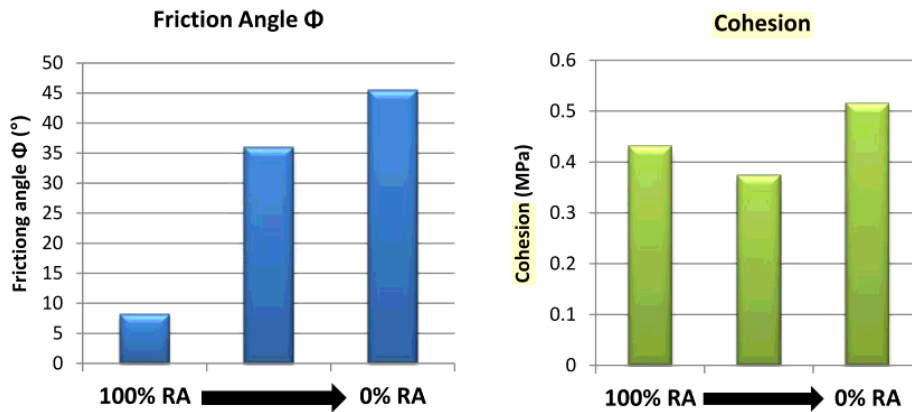






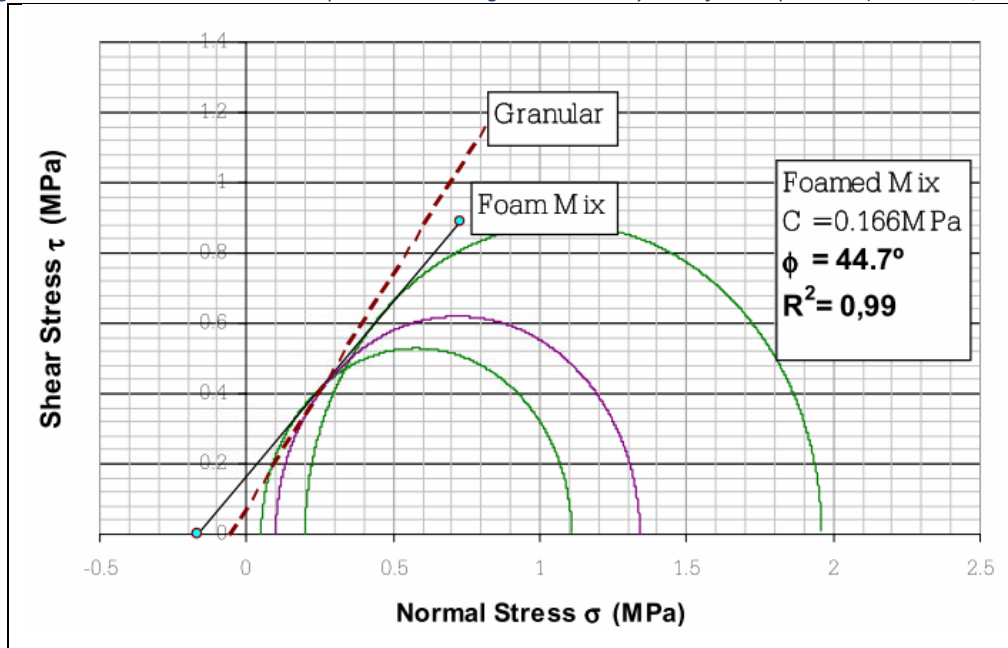
La figura 2.28 muestra la influencia del contenido del RAP sobre los parámetros de resistencia al corete según las investigaciones de Ben, (2014).

Figura 2.28 Relación entre ángulo de fricción y cohesión con el contenido de RAP. (Ben, 2014)



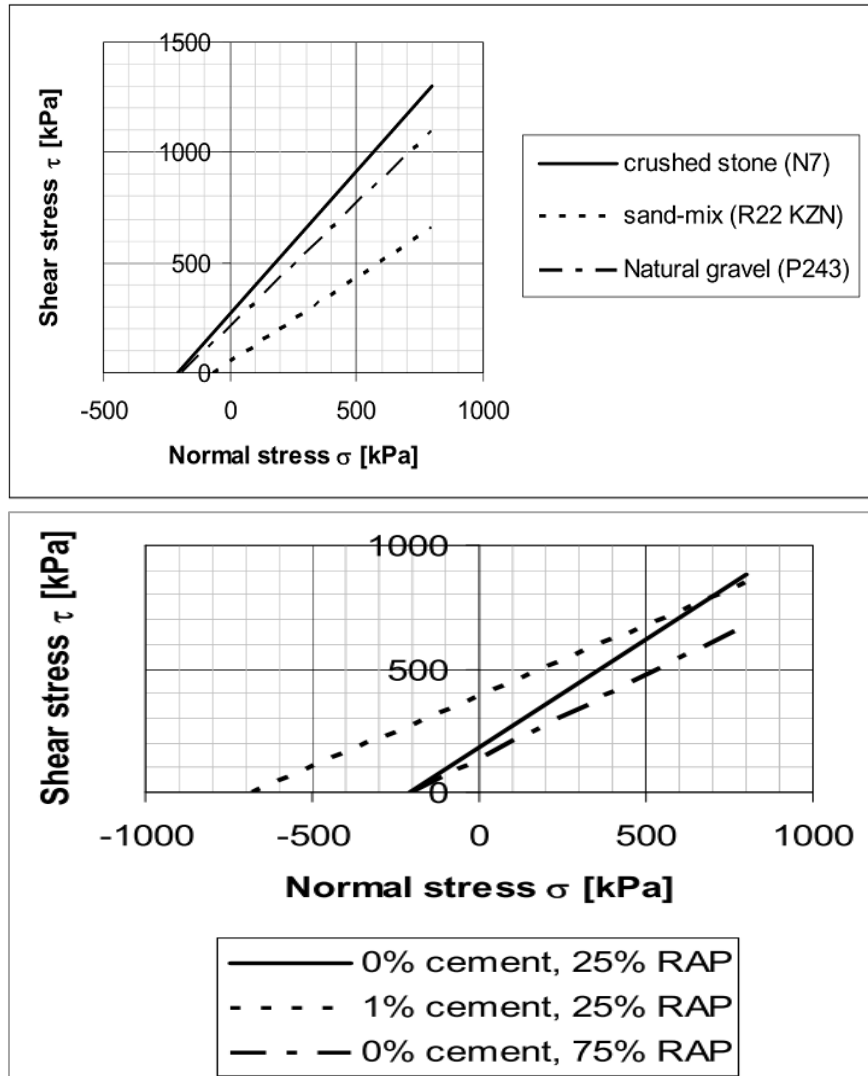
La figura 2.29 muestra los resultados recolectados por autores como Van de Ven et al., (2001), Van Zyl, (2015) y K.J Jenkins, (2000) en la que los valores del ángulo de fricción decrecen mientras que los valores de cohesión aumentan con la inclusión de asfalto espumado. Por lo que plantean que la cohesión y el ángulo de fricción no son enteramente independientes el uno del otro, se encuentra que existe cierto balance donde los valores de ángulo de fricción se reducen cuando los valores de cohesión aumentan significativamente.

Figura 2.29 Círculos Mohr Coulomb para materiales granulares con y sin asfalto espumado (K.J Jenkins, 2000).



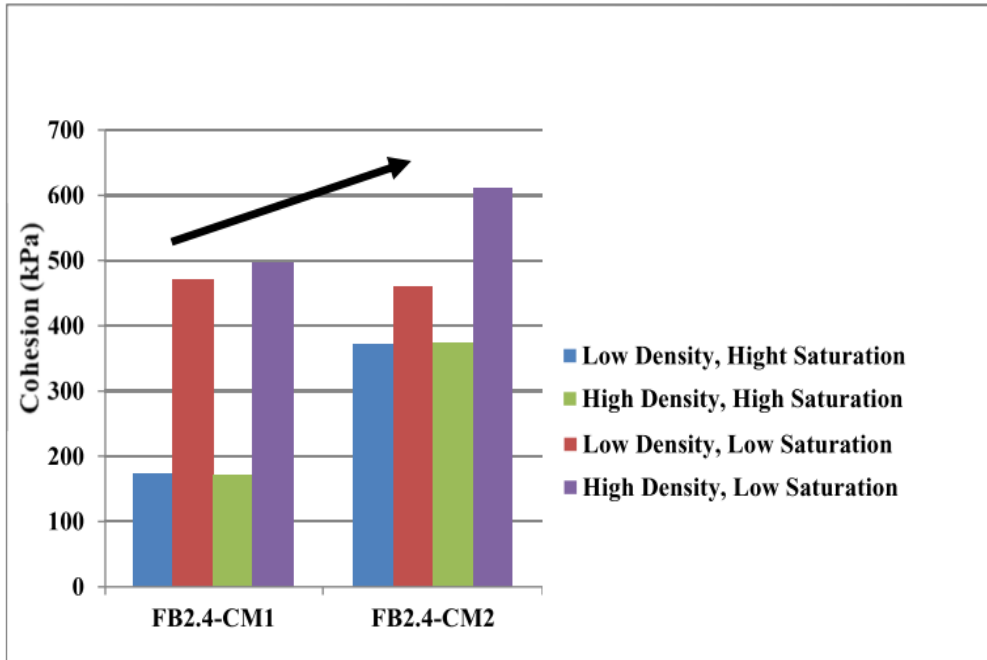
El tratamiento de materiales granulares con asfalto espumado **reduce** el ángulo de fricción, lo que se puede explicar por el hecho de que adicionar asfalto actúa como lubricante, y el valor de cohesión aumenta debido los puntos de unión generados en la mezcla (Strozzi et al., 2011). Adicionalmente, Jenkins & Ebels, (2007) encontraron que el ángulo de fricción **decrece** con el incremento de la proporción de RAP adicionado en la mezcla. Los mayores valores reportados de ángulo de fricción y cohesión se encontraron en materiales de roca triturada, seguida por grava natural y finalmente por arena como se observa en la figura 2.30.

Figura 2.30. Envoltantes de resistencia para diferentes materiales. (Ebels & Jenkins, 2007b)

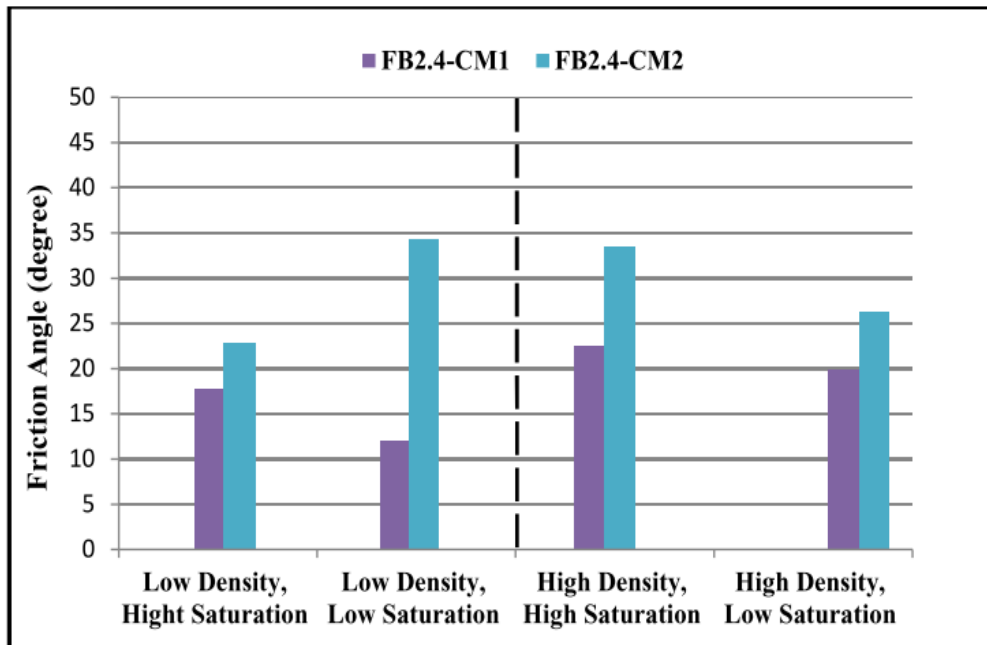


Finalmente, en la figura 2.31 se presentan los resultados de Achille, (2013) en la que se observa la influencia en el contenido de cemento en los valores de fricción como los cohesión, lo cuales aumentan en mezclas con 2.4% de AF y 2% de cemento, respecto a mezclas con 1% de cemento.

Figura 2.31 a) Variación de la cohesión con el aumento del contenido de cemento. b) a) Variación del ángulo de fricción con el aumento del contenido de cemento. (Adaptación de Achille, (2013))



a)



b)

## 2.4.2 ENSAYO SIMPLE TRIAXIAL MONOTÓNICO

Este ensayo permite obtener los parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto, al medir la resistencia a la falla monotónica de probetas de material de 150mm X 300mm de altura, compactadas mediante

la técnica de martillo vibratorio siguiendo el método 8 contenido en la guía TG2 de la Asphalt Academy (Academy, 2009).

El ensayo triaxial permite obtener información de la respuesta mecánica de los BSM con poco tiempo de curado, situación que no se logra mediante el ensayo de tensión indirecta ITS, por sus siglas en inglés (Indirect Tensile Test) (Santagata et al., 2010). El ensayo ITS no caracteriza de manera apropiada el comportamiento de los BSM (Ben, 2014).

El ensayo monotónico es apropiado para la obtención de los parámetros de corte en granulares no ligados y otro tipo de materiales, sin embargo, no permite simular las condiciones cíclicas de tránsito reales. Bajo cargas reales de tránsito el esfuerzo principal vertical aplicado  $\sigma_d$  es mucho menor que el esfuerzo a la falla  $\sigma_{d,f}$ . (Van Zyl, 2015).

El ensayo se lleva a cabo a una temperatura de 25°C. Se realiza bajo condiciones de velocidad controlada de 2.1% a 2.6% de deformación unitaria por minuto hasta la falla del material. (K.J. Jenkins & Mulusa, 2009).

En el ensayo Triaxial monotónico los esfuerzos aplicados tanto vertical  $\sigma_v$  y el horizontal  $\sigma_h$  son por definición, esfuerzos principales. El criterio de falla se basa en la variación de los esfuerzos de confinamiento y se describen mediante el modelo Mohr-Coulomb descrito en 2.4.1.1.

El procedimiento de ensayo es explicado con detalle en el capítulo 3 del presente trabajo.

## **2.5 Compactación y curado**

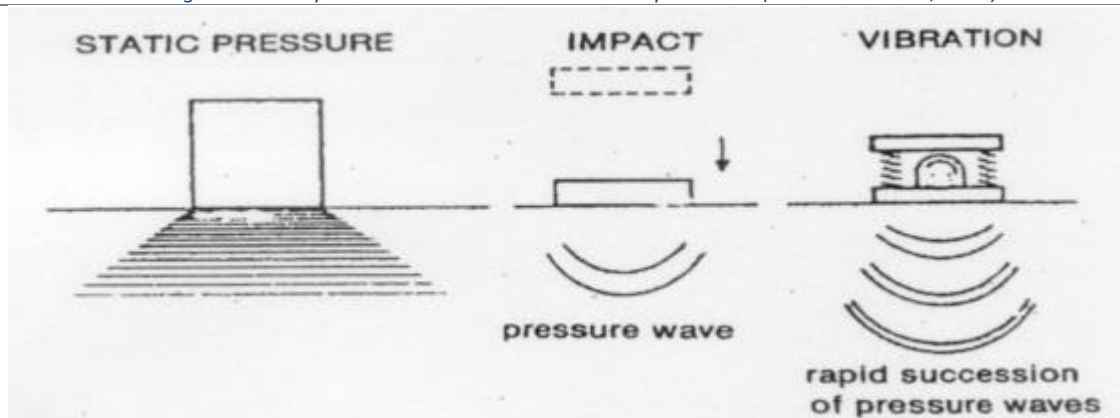
### **2.5.1 Compactación**

Carson (2004), define la compactación como el método por el cual se aumenta la densidad de determinado material mediante la aplicación de energía mecánica. La densidad se incrementa por la remoción de aire y agua de los poros del material.

El primer desarrollo de una técnica de compactación de laboratorio fue el realizado O. James Porter en 1929 fue conocida como California Impact Test y permitía relacionar la densidad humedad y humedad de terreno en una gráfica similar a la desarrollada por Ralph R. Proctor en 1933, quien implemento un procedimiento de laboratorio estándar conocido como Proctor Estándar, posteriormente la técnica fue modificada y pasó a conocerse como Proctor Modificado (“Origins of Mechanical Compaction”, 2006).

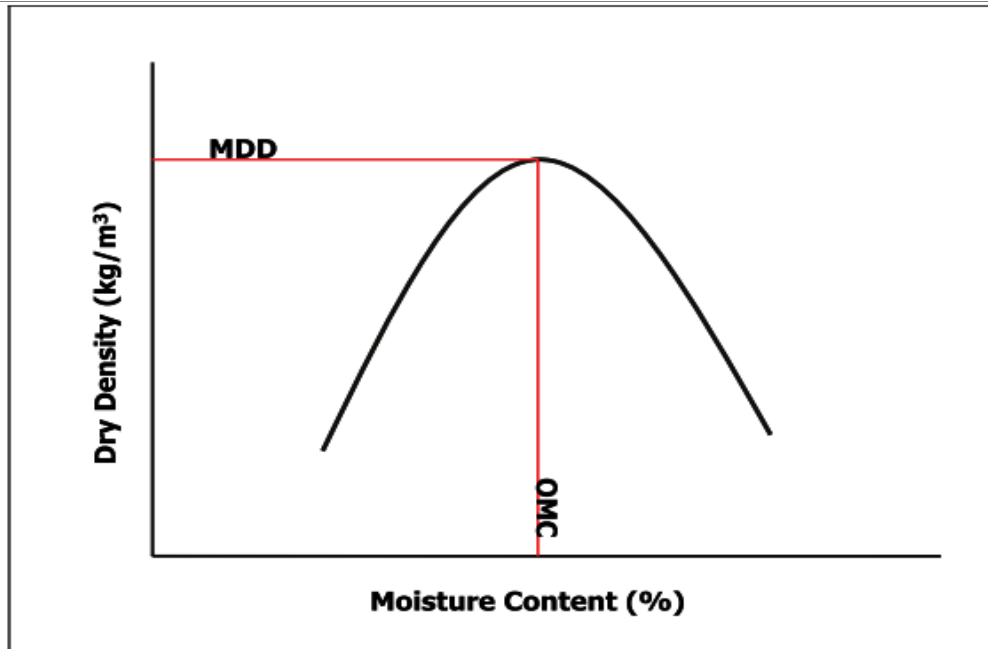
En el laboratorio, las técnicas de compactación son clasificadas en estáticas, de impacto y vibratorias (K.J. Jenkins, Twagira, Constantyn Kelfkens, & Mulusa, 2012) ver figura 2.32. Éstas técnicas incluyen métodos como los de AASHTO estándar y modificado, método Marshall, compactación giratoria, mesa vibratoria y compactación vibratoria, entre otros (K.J. Jenkins & Constantyn Kelfkens, 2008; K.J. Jenkins & Mulusa, 2008, 2009), los valores que se obtienen en laboratorio son los que se comparan con los de campo, sin embargo y a pesar de las diferentes técnicas, se ha observado que los resultados de éstas no son los suficientemente representativos y consistentes con los de campo.

Figura 2.32 Esquema General de métodos de Compactación. (K.J. Jenkins et al., 2012)



Uno de los factores que más afecta la compactación del material es el contenido de humedad que el mismo posee (Constantyn Kelfkens, 2008), es así como en todas las técnicas de laboratorio se busca determinar la relación entre un contenido de agua y la densidad seca para determinar la máxima densidad seca que alcanza el material. Ver figura 2.33.

Figura 2.33 Relación Densidad Seca y Humedad. (Constantyn Kelfkens, 2008)



Para BSM –FA, Investigadores como Kelfkens,(2008), Jenkins(2007) y otros, coinciden en que la compactación con mesa vibratoria es la que mejor representa las condiciones de campo, sin embargo ésta técnica requiere una sobrecarga de 50 kg que se aplica y retira en cada capa, haciendo que el proceso sea muy laborioso (K.J. Jenkins et al., 2012). Investigaciones realizadas por Weston, (2001), Weston et al. (2002) y Constantyn Kelfkens (2008), concluyeron que en el laboratorio el uso de martillos vibratorios como el BOSCH GSH 11E ® para la compactación, simula de manera más apropiada la compactación que se realiza con los rodillos en campo y resulta eficiente, relativamente económica y fácil de usar en el laboratorio. La guía TG2, recomienda el método de compactación vibratorio. Sin embargo, para el nivel de diseño 1 (el cual se definió en el capítulo 1) donde las probetas son de 100 mm de diámetro, se aplica el método de compactación Marshall.

Las propiedades del martillo BOSCH GSH 11E ®, se presentan en la tabla 2.5.

Tabla 2.5 Especificaciones de Manual de Martillo BOSCH. Adaptación de (Constantyn Kelfkens, 2008)

Martillo	Potencia de Entrada(w)	Energía de Impacto (J)	Rango de Impacto (1/min)	Frecuencia (Hz)	Masa (Kg)
BOSCH GSH 11E ®	1500	6 a 25	900 a 1890	15 a 31,5	10,1

Es de resaltar que la sobrecarga total corresponde a la masa del martillo más el peso del sistema de ajuste del mismo. El sistema utilizado durante la compactación, permite tener energías de compactación entre 17 y 33 kJ por capa y entre 51 y 99 kJ total (Kim J. Jenkins & Constantyn Kelfkens, 2008)

La norma colombiana INVIAS 2013 presenta el método de compactación vibratoria en el anexo A de la norma 156/13 – Modulo resiliente para materiales granulares y la guía de diseño TG2 plantea en su anexo de compactación (Academy, 2009), que el procedimiento vibratorio debe ser el utilizado para el nivel de trafico 3 en la fabricación de moldes para la obtención de los parámetros de corte como es el caso del presente trabajo.

La recomendación según Constantyn Kelfkens, (2008) y Kim J. Jenkins et al., (2012) es que la compactación para especímenes que se sometan al ensayo triaxial se realice en 5 capas de igual espesor, la primera capa se compacta a 10 segundos y las siguientes a 25 segundos cada una para alcanzar una densidad del 100% del Proctor (AASHTO) modificado. En la figura 2.34, se presenta el tiempo mínimo por capa para alcanzar el 100% de la densidad del Proctor modificado para la BSM's-Foam en mesa vibratoria y con martillo Bosch®.

#### **2.5.1.1 Compactación por Martillo Vibratorio.**

Diversos estudios han demostrado que la utilización de martillo vibratorio como método de compactación en el laboratorio, es capaz de representar adecuadamente las condiciones de compactación y densidad de campo (Constantyn Kelfkens, 2008; Theyse et. al, 2004; Weston, 2001).

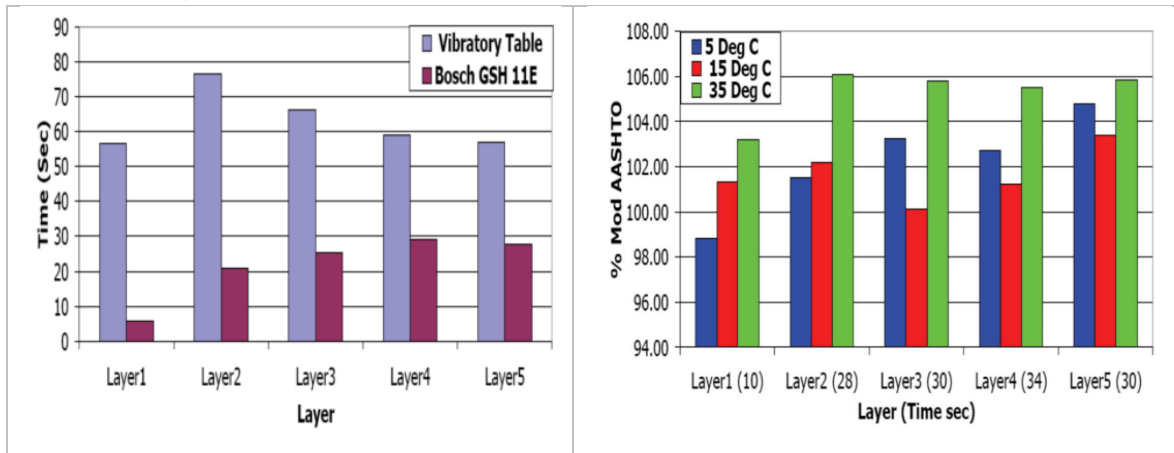
Existen distintas metodologías de compactación que utilizan martillo vibratorio, desarrolladas en diferentes países, como New Zealand, United Kingdom, Estados Unidos de Norte América, Holanda, específicamente en la Universidad de Delf.

La influencia de la temperatura del material durante la compactación también es una variable a tener presente. Entre menor sea la temperatura de la mezcla con asfalto espumado durante el proceso de compactación, menores serán las densidades obtenidas. Esto se debe a que a bajas temperatura se presenta una pobre dispersión de la espuma en la mezcla y se forman grumos lo que conlleva a pobre compactación. (K.J. Jenkins et al., 2012). Se recomienda que la temperatura mínima de compactación sea de 15°C.



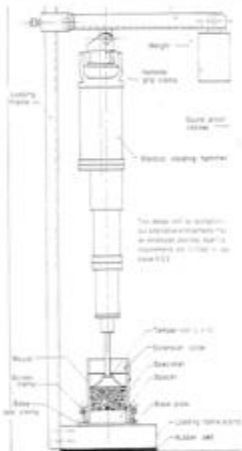



En la Tabla 2.6 se presentan los métodos de compactación utilizados alrededor del mundo

Figura 2.34 Tiempos de Compactación por capa e Influencia de la Temperatura del Material en la Compactación. (K.J. Jenkins et al., 2012)



y se resaltan las principales diferencias entre ellos.

Tabla 2.6. Resumen de Métodos de Compactación Utilizando Martillo Vibratorio. Adaptado de (Constantyn Kelfkens, 2008)

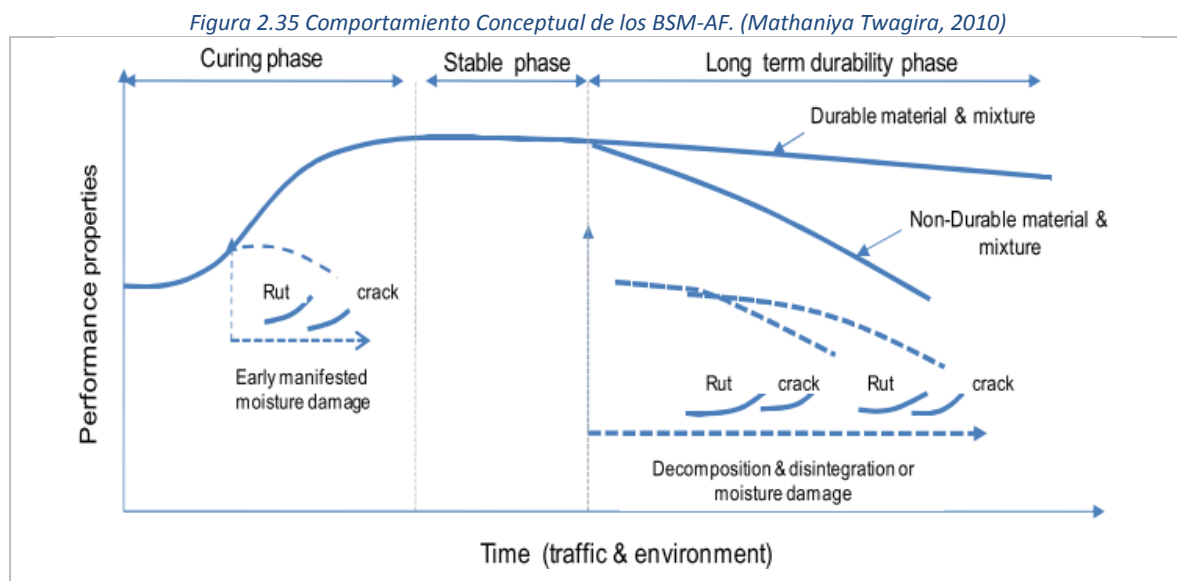
ESPECÍFICACIONES DE MARTILLO	MÉTODO DE COMPACTACIÓN			
	New Zealand	The United Kingdom	The Netherlands (Specifically the Technical University at Delft)	The United States of America (USA)
Guía	New Zealand Standards (NZS) 4402: 1986	BSEN12697-32-2003	TU DELFT	ASTM D7328-07, 2007
Golpes por Minuto	250 to 600 (4.2 a 10Hz)	1200 a 3000 (20 a 50Hz)	1800 (30 Hz)	3200 a 3500 (28 a 55Hz)
Fuerza Aplicada	300N +- 50 N	350 N +- 50N	No especifica	89N
Altura del Espécimen	127 mm	170 mm	300 mm	116mm
Tiempo de Compactación por capa	180 s	60s	Hasta alcanzar altura por cada capa	60s
Número de capas	2	3	5	3
Características Físicas				

### 2.5.2 Curado

El proceso de curado se encuentra establecido en la guía metodológica TG2, y se define como la reducción de humedad de la mezcla por el desplazamiento del agua durante la compactación y posterior evaporación, lo que provoca un incremento en la rigidez y la resistencia a la tensión (Asphalt Academy, 2009b).

En el laboratorio el proceso de curado se acelera para buscar simular la humedad de equilibrio que se tendrá en el campo y depende del nivel de diseño seleccionado. Es así como para el nivel de diseño 1 el proceso de curado de las briquetas se realiza en un horno a 40°C durante 72 horas; para el nivel de diseño 2 y 3, el curado se realiza a 30°C durante 20 horas y posteriormente a 40°C durante 48 horas en condición sellada. Éste procedimiento de curado no solo es el recomendado por la guía TG2 sino además por diversos autores como (K.J. Jenkins & Collings, 2016).

Como se muestra en la figura 2.35, la etapa de curado es la única en la que el material gana resistencia, siendo en ésta donde se dan los procesos de evaporación y se llega, al finalizar la etapa, a la humedad de equilibrio.

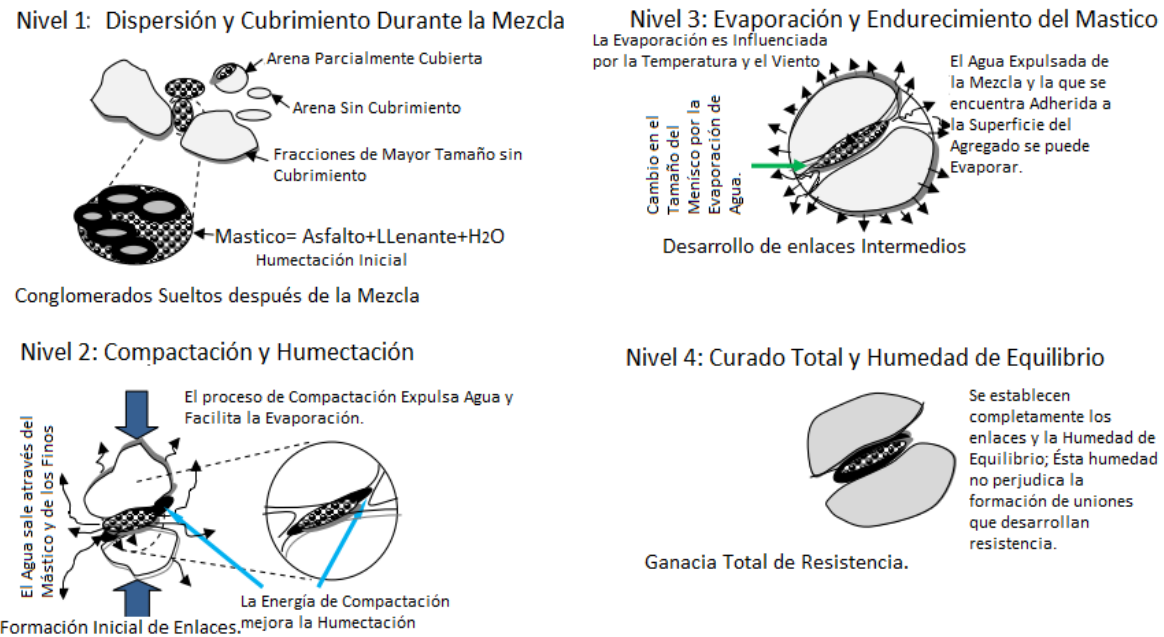


El proceso de curado de los BSM es complejo y depende de múltiples factores tales como, la velocidad del viento, el gradiente de temperatura de cada capa granular, humedad relativa, condiciones de frontera y mecanismo de evaporación. A la fecha, no existen modelos que representen de manera completamente el proceso de curado en campo (Mathaniya Twagira, 2010).

Actualmente, el proceso de laboratorio está enfocado en obtener la humedad de equilibrio, la cual se encuentra entre el 40% y el 50% de la humedad óptima. El proceso fue desarrollado por Jenkins (2000) y corresponde a una modificación del desarrollado por Emery (1988). Éste modelo ha sido cuestionado por no representar de manera suficiente las condiciones de humedad de campo Malubira (2005) (Mathaniya Twagira, 2010).

El proceso de curado se da en 4 etapas o niveles en los que el material pierde agua y mejora sus propiedades de resistencia y rigidez. En el nivel 1, el asfalto espumado se mezcla con las partículas de menor tamaño formando un mástico que posteriormente generará la unión con partículas de mayor tamaño; En el nivel 2, el proceso de compactación provoca la salida de agua y se da inicio al proceso de evaporación; En el nivel 3, la evaporación disminuye el tamaño del mástico y desarrolla enlaces intermedios; por último, en el Nivel 4 se desarrollan completamente las uniones entre partículas y se llega a la humedad de equilibrio. Ver figura 2.36.

Figura 2.36 Niveles de Formación de Uniones entre Partículas de una Mezcla con Asfalto Espumado. Adaptado de:(Mathaniya Twagira, 2010)



## 2.6 Bibliografía

Academy, A. (2009). Procedure for Compaction of Test Specimens Using the Vibratory Hammer-TG2.

Achille, N. T. (2013). Flexibility and Performance Properties of Bitumen. Stellenbosch.

Anochie-Boateng, J., Paige-Green, P., & Mgangira, M. (2009). Evaluation of Test Methods for Estimating Resilient Modulus of Pavement Geomaterials, (July).

Arega, Z., Bhasin, A., & Li, W. (2015). Parametric Analysis of Factors That Affect Asphalt Binder Foaming Characteristics. *ASCE Civ. Eng.*, 1–10. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001329](http://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001329).

Asphalt Academy. (2009). TG2-A guideline for the Design and construction of Bitumen Stabilised Materials. (2da.). Pretoria: Asphalt Academy.

Ben, M. D. (2014). hiRESILIENT RESPONSE AND PERFORMANCE OF BITUMEN STABILIZED MATERIALS WITH FOAM INCORPORATING RECLAIMED by. Stellenbosch University.

Betti, G., Airey, G., Jenkins, K. J., Marradi, A., Tebaldi, G., & Tebaldi, G. (2016). Active filler's effect on in situ performances of bitumen emulsion recycled mixtures. *RILEM Bookseries*, 11(September), 799–810. [http://doi.org/10.1007/978-94-017-7342-3\\_64](http://doi.org/10.1007/978-94-017-7342-3_64)

Bowering, R., & Martin, C. (1976). Foamed bitumen production and application of mixtures evaluation and performance of pavements. *Association of Asphalt Paving Technologists ....* <http://doi.org/Volume 45>.

Buss, A. F. (2010). Investigation of warm-mix asphalt using Iowa aggregates. Thesis (Masters). Iowa State University. Iowa State.

Campagnoli, S. X., Estupiñan, E., & Soto, J. E. (2016). Caracterización de Espumas de Asfalto. 7a. SEMANA TÉCNICA DEL ASFALTO, 13.

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. <http://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.092>

Čížková, Z., Šedina, J., Valentin, J., & Engels, M. (2016). Laboratory experience with the application of monotonic triaxial test on the cold recycled asphalt mixes, (June).

Collings, D., & Jenkins, K. J. (2011). THE LONG-TERM BEHAVIOUR OF BITUMEN STABILISED MATERIALS (BSMs). Southern Africa.

Collings, D., & Jenkins, K. J. (2012). Pavement Rehabilitation using Bitumen Stabilisation. State-of-the-art. 23 rd Road Pavement Forum, (May).

Constantyn Kelfkens, R. W. (2008). Vibratory Hammer Compaction Of Bitumin Stabilized Materials. Stellenbosch.

Ebels, L.-J. (2008). Characterisation of Material Properties and Behaviour of Cold Bituminous Mixtures for Road Pavements. Stellenbosch University.

Ebels, L.-J., & Jenkins, K. J. (2007a). Characterization of bitumen stabilised granular pavement material properties using tri-axial testing.

Ebels, L.-J., & Jenkins, K. J. (2007b). Mix design of bitumen stabilised materials: Best practice and considerations for classification. Proceedings of the 9th Conference on ..., (September), 213–232.

Emery, J. J. (2007). Practical Experience With Emulsion Cold In-Place Recycling And Foamed Asphalt Full Depth Reclamation. 4th INTERNATIONAL SIIV CONGRESS – PALERMO (ITALY), 21.

Fu, P. (2009). Micromechanics for Foamed Asphalt Stabilized Materials.

Godenzoni, C., Graziani, A., & Perraton, D. (2016). Complex modulus characterisation of cold-recycled mixtures with foamed bitumen and different contents of reclaimed asphalt. Road Materials and Pavement Design, 629(April), 1–21. <http://doi.org/10.1080/14680629.2016.1142467>

González, A. (2009). An Experimental Study of the Deformation and Performance Characteristics of Foamed Bitumen Stabilised Pavements. Canterbury.

González, A., Cubrinovski, M., Pidwerbesky, B., & Alabaster, D. (2012). Desempeño de pavimentos estabilizado con asfalto espumado en una prueba de pavimentos a escala real y carga acelerada. Revista Ingenieria de Construccion, 27(2), 5–17. <http://doi.org/10.4067/S0718-50732012000200001>

González, A., Paniagua, F., Thenoux Z., G., & López, C. (2014). Effect of Foamed Bitumen Content in Laboratory Tests Cold in-Place Recycling Using Foamed Bitumen. En 26th ARRB Conference – Research driving efficiency, Sydney, New South Wales 2014 EFFECT (pp. 1–11). Sidney.

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). <http://doi.org/10.1007/978-94-017-7342-3>

Hailesilassie, B., Schuetz, P., Jerjen, I., Bieder, A., Hugener, M., & Pratl, M. (2014). Evolution of bubble size distribution during foam bitumen formation and decay, (July 2015). <http://doi.org/10.1201/b17219-150>

Hailesilassie, B. W., Hugener, M., Bieder, A., & Partl, M. N. (2015). New experimental methods for characterizing formation and decay of foam bitumen. *Materials and Structures*, (June). <http://doi.org/10.1617/s11527-015-0659-6>

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. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.071>

Hailesilassie, B. W., Schuetz, P., Jerjen, I., Hugener, M., & Partl, M. N. (2015). Dynamic X-ray radiography for the determination of foamed bitumen bubble area distribution. *Journal of Materials Science*, 50(1), 79–92. <http://doi.org/10.1007/s10853-014-8568-6>

Hainin, M. R., Matori, M. Y., & Akin, O. E. (2014). Evaluation of factors influencing strength of foamed bitumen stabilised mix. *Jurnal Teknologi*, 70(4), 111–119.

He, G. P., & Wong, W. G. (2006). Decay properties of the foamed bitumens. *Construction and Building Materials*, 20(10), 866–877. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.06.027>

He, G. P., & Wong, W. G. (2008). Effects of moisture on strength and permanent deformation of foamed asphalt mix incorporating RAP materials. *Construction and Building Materials*, 22(1), 30–40. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.06.033>

Iwański, M., & Chomicz-Kowalska, A. (2013). Laboratory study on mechanical parameters of foamed bitumen mixtures in the cold recycling technology. *Procedia Engineering*, 57, 433–442. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.056>

Iwański, M., ChoMicz-Kowalska, A., & Maciejewski, K. (2015). Application of synthetic wax for improvement of foamed bitumen parameters. *Construction and Building Materials*, 83, 62–69. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.060>

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.

Jenkins, K. J., & Collings, D. (2015). Mix Design of Bitumen Stabilised Materials (BSMs) – A South African Perspective. En 3rd ISAP APE SYMPOSIUM (pp. 1–9).

Jenkins, K. J., & Collings, D. C. (2016). Mix design of bitumen-stabilised materials – South Africa and abroad. *Road Materials and Pavement Design*, 629(October), 1–19. <http://doi.org/10.1080/14680629.2016.1213511>

Jenkins, K. J., & Constantyn Kelfkens, R. W. (2008). Updating Bituminous Stabilized Materials Guidelines : Mix Design Report, Phase II Task 7 : Curing Protocol : Improvement Sept 2008.

Jenkins, K. J., & Ebels, L.-J. (2007). Foamed bitumen mixes= shear performance? *International Journal of Pavement Engineering*, 8(2), 85–98. <http://doi.org/10.1080/10298430601149718>

Jenkins, K. J., & Mulusa, W. K. (2008). Updating Bituminous Stabilized Materials Guidelines : Mix Design Report, Phase II.

Jenkins, K. J., & Mulusa, W. K. (2009). Updating Bituminous Stabilized Materials Guidelines: Mix Design Report, Phase II Task 2 - Development of a Simple Triaxial Test.

Jenkins, K. J., Twagira, M. E., Constantyn Kelfkens, R. W., & Mulusa, W. K. (2012). New laboratory testing procedures for mix design and classification of bitumen-stabilised materials. *Road Materials and Pavement Design*, 13(4), 618–641. <http://doi.org/10.1080/14680629.2012.742625>

Jenkins, K. J., & Van de Ven, M. (2001). Guidelines for the Mix Design and Performance Prediction of Foamed Bitumen Mixes. 20th South African Transport Conference South Africa, “Meeting the Transport Challenges in Southern Africa”. South Africa.

Jones, D., Fu, P., & Harvey, J. T. (2009). Full-depth pavement reclamation with foamed asphalt in California: Guidelines for project selection, design, and construction. California.



Jooste, F., Long, F., & Hefer, A. (2007). A Method for Consistent Classification of Materials for Pavement Rehabilitation Design Technical Memorandum (Vol. 1000).

Kendall, M., Baker, B., Evans, P., & Ramanujam, J. (1999). Foamed Bitumen Stabilisation. Symposium A Quarterly Journal In Modern Foreign Literatures, 1–18.

Kim, Y., & Lee, H. D. (2011). Influence of Reclaimed Asphalt Pavement Temperature on Mix Design Process of Cold In-Place Recycling Using Foamed Asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(7), 961–968. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000274](http://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000274)

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. <http://doi.org/10.1080/14680629.2004.9689973>

Lynch, A., & Jenkins, K. J. (2013). Materials Recycled Using Foamed Bitumen Stabilisation : What Is Their Long Term. 15th INTERNATIONAL FLEXIBLE PAVEMENTS CONFERENCE OF AAPA MATERIALS, 1–18.

Mathaniya Twagira, E. (2010). Influence of Durability Properties on Performance of Bitumen Stabilized Materials.

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* (Vol. 898).

Namutebi, M., Birgisson, B., & Bagampadde, U. (2011). Foaming effects on binder chemistry and aggregate coatability using foamed bitumen. *Road Materials and Pavement Design*, 12(4), 821–847. <http://doi.org/10.1080/14680629.2011.9713896>

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.

Origins of Mechanical Compaction. (2006). Recuperado el 13 de agosto de 2016, a partir de [http://web.mst.edu/~rogersda/umrcourses/ge441/online\\_lectures/compaction/GE441-Lecture2-1.pdf](http://web.mst.edu/~rogersda/umrcourses/ge441/online_lectures/compaction/GE441-Lecture2-1.pdf)

Ozturk, H. (2013). Quantification of quality of foamed warm mix asphalt binders and mixtures. Michigan State University.

Plati, C., Loizos, A., Papavasiliou, V., & Kaltsounis, A. (2010). Investigating in situ properties of recycled asphalt pavement with foamed asphalt as base stabilizer. *Advances in Civil Engineering*, 2010. <http://doi.org/10.1155/2010/565924>

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*.

Saleh, M. (2006). Characterization of Foam Bitumen Quality and the Mechanical Properties of Foam Stabilized Mixes. University of Canterbury. Civil Engineering.

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. <http://doi.org/10.1080/14680629.2010.9690263>

Strozzi, F., Coppini, M., Rossignoli, C., & Rossi, T. (2011). Complex modulus characterization of cold recycled mixtures with foamed bitumen and different content of reclaimed asphalt, (February). <http://doi.org/10.13140/RG.2.1.2787.0481>

Sufian, Z., Aziz, N. A., Matori, M. Y., Hussain, M. Z., Hainin, M. R., & Oluwasola, E. A. (2014). Influence of active filler, Curing time and moisture content on the strength properties of emulsion and foamed bitumen stabilized mix. *Jurnal Teknologi*, 70(4), 135–141.

Sunarjono, S. (2008). The Influence of Foamed Bitumen Characteristics On Cold-Mix Asphalt Properties. Nottingham.

Sunarjono, S. (2011). Laboratory Mixture Design for Foamed Asphalt (Vol. 11). Surakarta.

Thenoux Z., G., & Jamet, A. (2002). Tecnología del asfalto espumado. *Revista Ingeniería de Construcción*, 17, 84–92.

- Thenoux Z., G., & Jamet, A. (2013). TECNOLOGÍA DEL ASFALTO ESPUMADO Y DISEÑO DE MEZCLA. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Theyse, H. ., De Beer, M., & Rust, F. C. (2004). Overview of South African Mechanistic. *Transportation Research Record*, (1), 6–17.
- Van de Ven, M. F. C., Jenkins, K. J., Voskuilen, J. L. M., & Van den Beemt, R. (2007). Development of (half-) warm foamed bitumen mixes: state of the art. *International Journal of Pavement Engineering*, 8(2), 163–175. <http://doi.org/10.1080/10298430601149635>
- Van Zyl, E. B. (2015). INFLUENCE OF SPECIMEN GEOMETRY AND GRADING CURVE ON THE PERFORMANCE OF AN UNBOUND GRANULAR MATERIAL. Stellenbosch.
- Vorobieff, G. (2005). Design of foamed bitumen layers for roads. Australian Stabilisation Industry Association (AustStab), 1–10.
- Vorobieff, G., & Preston, N. (2004). Bitumen Stabilisation—An Australian Perspective. NZIHT Stabilisation of road pavements Seminar, (June), 1–19.
- Weston, C. T. (2001). A study into the mechanical properties of foamed bituminous stabilised materials. Technikin.
- Wirtgen GmbH. (2002). Foamed Bitumen—The Innovative Binding Agent for Road Construction. En Wirtgen GmbH (p. 32).
- Wirtgen GmbH. (2009). Foamed bitumen Cold recycling with foamed bitumen – sophisticated process , perfect results. En Wirtgen (p. 24).
- Wirtgen GmbH. (2012). Wirtgen Cold Recycling Technology. En Wirtgen GmbH (Ed.), (1a ed., p. 342). Windhagen, Alemania.
- Yin, F., Arámbula, E., & Newcomb, D. (2016). Mix design procedure for foamed asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 629(January), 1–12. <http://doi.org/10.1080/14680629.2015.1132633>
- Yin, F., Arambula, E., Newcomb, D., & Bhasin, A. (2014). Workability and coatability of foamed Warm-Mix Asphalt. *Asphalt Pavements*, 721–730. <http://doi.org/doi:10.1201/b17219-90> [10.1201/b17219-90](http://doi.org/doi:10.1201/b17219-90)



## **CAPÍTULO 3. Materiales, procedimientos de laboratorio y métodos de ensayo**

### **3.1 Introducción.**

En este capítulo se presenta una descripción general de los materiales, de los procedimientos para la fabricación de las muestras y de los métodos de ensayo usados en el desarrollo del presente trabajo.

En términos generales, se incluyen en:

- *La selección y caracterización de los materiales:* el Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP), el material granular virgen, los cementos asfálticos y los llenantes activos
- *Los procedimientos para la fabricación de las muestras:* El espumado del asfalto, la dosificación de materiales, la elaboración de la mezcla, el proceso de Compactación y el curado.
- *Los métodos de ensayo:* Ensayo de tracción indirecta en estado seco y húmedo, Ensayo monotónico triaxial.

### **3.2 Materiales.**

#### **3.2.1 Pavimento Asfáltico Recuperado - RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*).**

El RAP se obtuvo de acopios de labores de rehabilitación de pavimentos realizados en la ciudad de Bogotá D.C, Colombia. En el sitio de acopio el RAP se manipula con maquinaria pesada para su transporte y disposición final a la intemperie.

El material proviene de diferentes proyectos de la sabana de Bogotá, esta condición, unida a que la empresa dispone todo el material RAP en un único acopio sin distinción del origen, hacen que éste sea muy heterogéneo por lo que se procuró que el utilizado en la elaboración del presente trabajo procediera de una única toma.

El RAP se consideró como material inerte conocido como “roca negra” por lo que, aun cuando las propiedades físicas, con excepción de la gradación, como son los índices de alargamiento y aplanamiento y el desgaste en la máquina de los ángeles, no son parámetros de caracterización del RAP, estas se incluyen en el presente estudio.

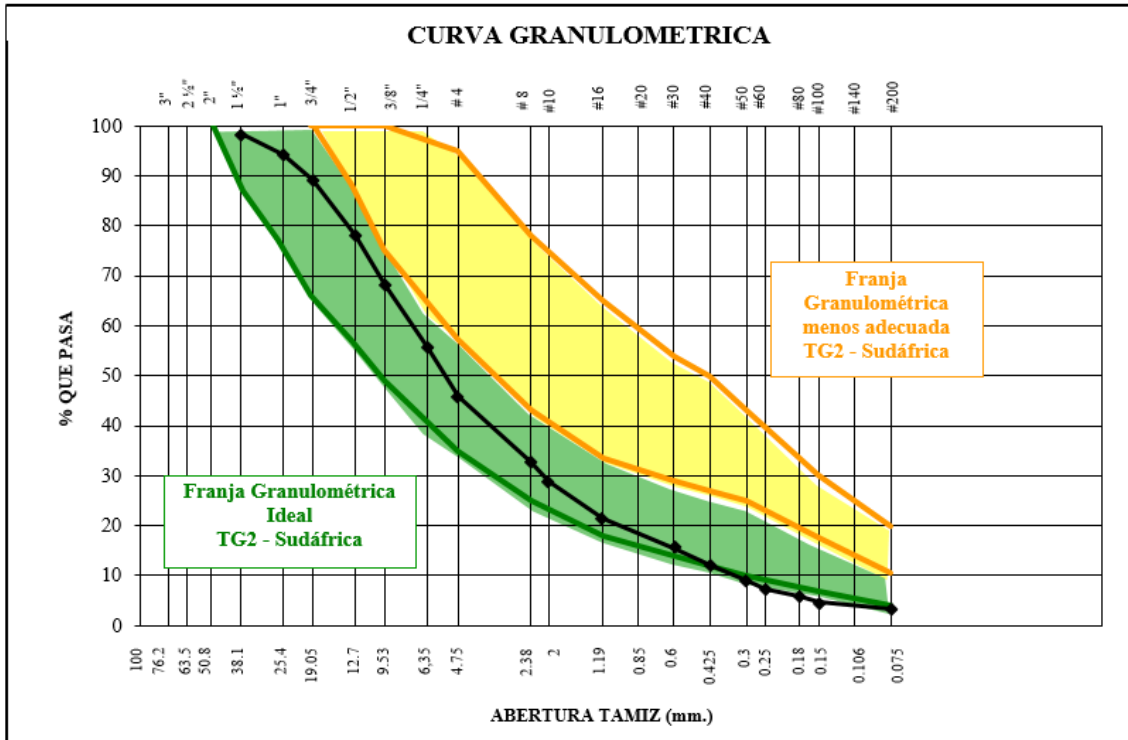
### Granulometría RAP.

La granulometría sobre el RAP se ejecutó siguiendo los lineamientos de la norma INVIAS 213-2013. La granulometría se realizó como parte de la caracterización básica del material utilizado. Los resultados del análisis granulométrico se muestran en la tabla 3.1 y en la Figura 3.1 donde se presenta la distribución granulométrica del RAP comparada con las recomendadas por la TG2 como ideal y menos deseable.

*Tabla 3.1 Granulometría del Material de RAP frente a TG2.*

TAMIZ	% PASA		TG2		
	RAP	% PASA		% PASA	
		IDEAL		MENOS DESEABLE	
2"	100	100	100	100	100
1 1/2"	98	87	100	100	100
1"	94	77	100	100	100
3/4"	89	66	0	99	100
1/2"	78	67	87	87	100
3/8"	68	49	74	74	100
1/4"	56	40	62	62	100
N° 4	46	35	56	56	95
N° 8	33	25	42	42	78
N° 10	29	21	35	35	65
N° 16	22	18	33	33	60
N° 30	15	14	28	28	54
N° 40	12	12	26	26	50
N° 50	9	10	24	24	43
N° 60	7	9	19	29	38
N° 80	6	7	17	17	30
N° 100	5	5	15	15	25
No. 200	3.2	4.0	10.0	10.0	20.0
Fondo	0	0	0	0	0

Figura 3.1 Curva Granulométrica de RAP comparado con las Franjas Ideales recomendado por TG2.



Como se observa en la figura 3.1, según la granulometría recomendada por la guía TG2 el RAP podría ser utilizado con asfalto espumado aun cuando tiene una leve deficiencia de finos. Sin embargo, en el presente estudio no se consideró el uso de este material para ser estabilizado con asfalto espumado sin la adición de material virgen.

En la tabla 3.2 se presentan los valores de las características físicas evaluadas del RAP.

Tabla 3.2 Características Físicas del RAP

PROPIEDAD	RAP
TAMAÑO MÁXIMO DE PARTÍCULA (mm)	25
MATERIAL PASA TAMIZ #4 (4.75mm)	45%
MATERIAL PASA TAMIZ #200 (0.075 mm)	4%
INDICE DE PLASTICIDAD	NP
DESGASTE EN MÁQUINA DE LOS ÁNGELES (INV E-218)	18%
ÍNDICES DE ALARGAMIENTO Y APLANAMIENTO (INV E-230)	25%

El RAP presenta un contenido de asfalto del 5.7%, una penetración sobre el asfalto de 20  $\frac{1}{10}$  mm y un punto de ablandamiento de 80°C, lo que muestra un alto grado de envejecimiento

### 3.2.2 Material Granular virgen.

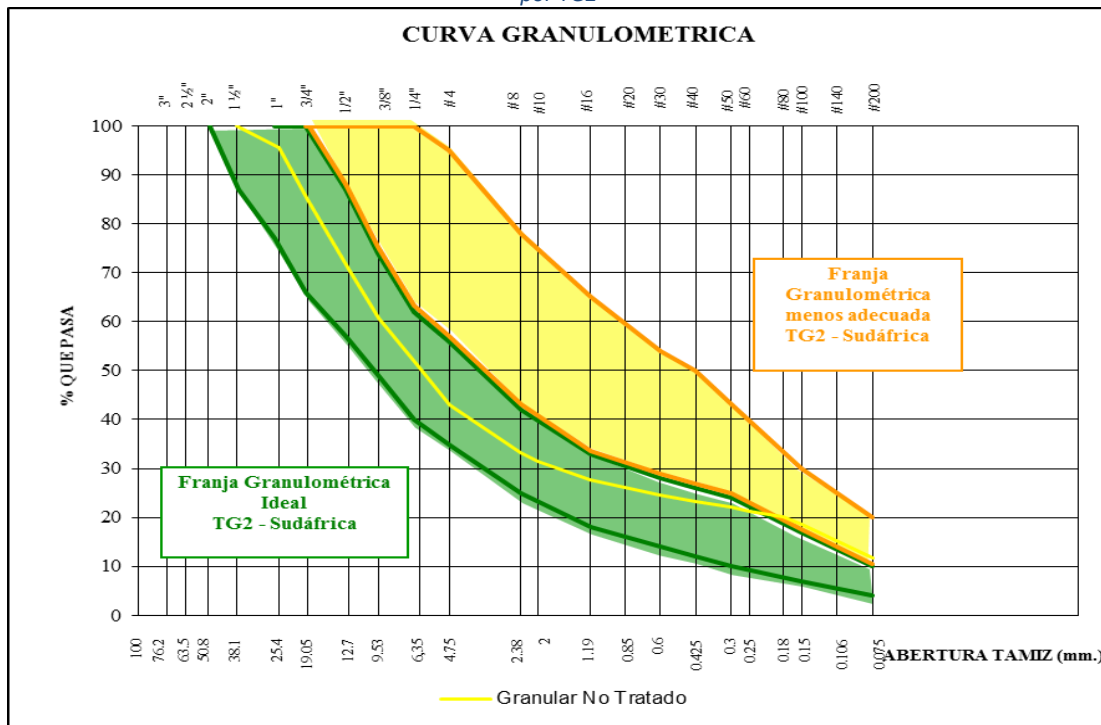
El material granular fue suministrado por la empresa COMPAÑÍA DE TRABAJOS URBANOS (CTU). Este es de uso convencional en los proyectos de pavimentación de la Sabana de Bogotá y proviene de la explotación en cantera propiedad de la compañía. Los resultados del análisis granulométrico se muestran en la tabla 3.3 y en la Figura 3.2 donde se presentan comparados con la TG2.

*Tabla 3.3 Granulometría del Material Granular frente a TG2*

TAMIZ	% PASA	TG2			
		% PASA		% PASA	
		Granular No tratado	IDEAL	MENOS DESEABLE	
2"	100	100	100	100	100
1 1/2"	100	87	100	100	100
1"	96	77	100	100	100
3/4"	85	66	0	99	100
1/2"	71	67	87	87	100
3/8"	61	49	74	74	100
1/4"	50	40	62	62	100
N° 4	43	35	56	56	95
N° 8	33	25	42	42	78
N° 10	31	21	35	35	65
N° 16	28	18	33	33	60
N° 30	24	14	28	28	54
N° 40	23	12	26	26	50
N° 50	22	10	24	24	43
N° 60	21	9	19	29	38
N° 80	20	7	17	17	30
N° 100	19	5	15	15	25
No. 200	11.8	4.0	10.0	10.0	20.0
Fondo	0.0				



Figura 3.2 Curva Granulométrica de Material Granular Virgen comparado con las Franjas Ideales recomendado por TG2



Como se observa en la figura 3.2, según la granulometría recomendada por la guía TG2 el material granular virgen puede estabilizarse con asfalto espumado.

Siguiendo los lineamientos de las Normas INVIAS, (2013) presentadas en la tabla 3.4, se realizaron ensayos de caracterización sobre el material virgen utilizado en el presente trabajo. En la tabla 3.4, se presenta el resumen de los resultados para cada ensayo.

Tabla 3.4 Propiedades de Caracterización de Material.

DESCRIPCIÓN	MATERIAL GRANULAR
LÍMITES DE ATTERBERG (INV E-126)	NP
EQUIVALENTE ARENA (INV E-133)	21 %
CARAS FRACTURADAS (INV E-227)	94%
DESGASTE EN MÁQUINA DE LOS ÁNGELES (INV E-218)	22%
ÍNDICES DE ALARGAMIENTO Y APLANAMIENTO (INV E-230)	IALAR=29% -IA=23%.

### 3.2.3 Dosificaciones de Agregados

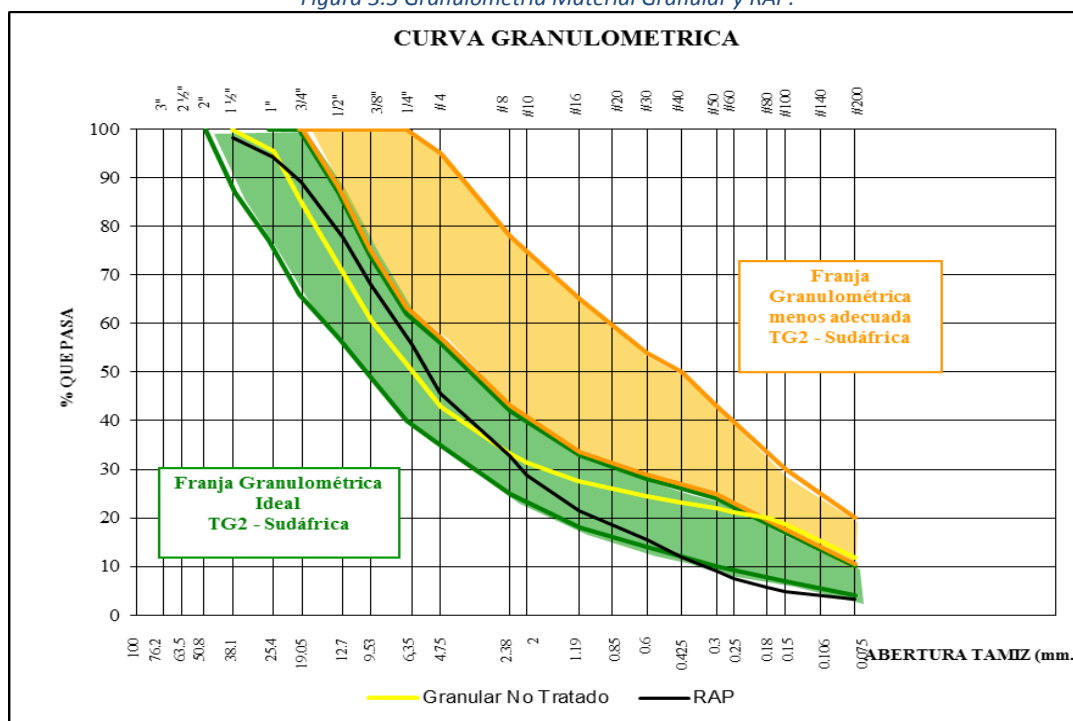
Se usaron cuatro dosificaciones con proporciones de RAP y agregado virgen como se muestra en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Dosificaciones de Agregados.

PROPORCIONES DE MATERIALES		
IDENTIFICACIÓN	MATERIAL GRANULAR (%)	RAP (%)
1	100	0
2	85	15
3	70	30
4	50	50

Las granulometrías de las proporciones mostradas en la tabla 3.5 se comparan con las franjas de aceptación presentadas en el TG2 como se observa en de la figura 3.3 a la 3.6.

Figura 3.3 Granulometría Material Granular y RAP.



Como se observa en la figura 3.3, las granulometrías de los materiales a utilizar cumplen para ser estabilizados con asfalto espumado. Las de cada fracción se pueden observar de las figuras 3.4 a 3.6.

Los valores teóricos corresponden al cálculo de la proporción para cada material utilizado (Granular y RAP) de la tabla 3.5, y los valores trabajados corresponden a la granulometría obtenida luego de realizar la mezcla por cuarteo en laboratorio, se resalta que la mezcla de materiales no se realizó separando por fracciones. 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 (figura 3.7), que lógicamente tendrán efecto en los diseños de las mezclas con asfalto espumado y en los parámetros de resistencia al corte, que son el objeto del estudio.

Figura 3.4 Granulometría 85-15 Teórica- Trabajada

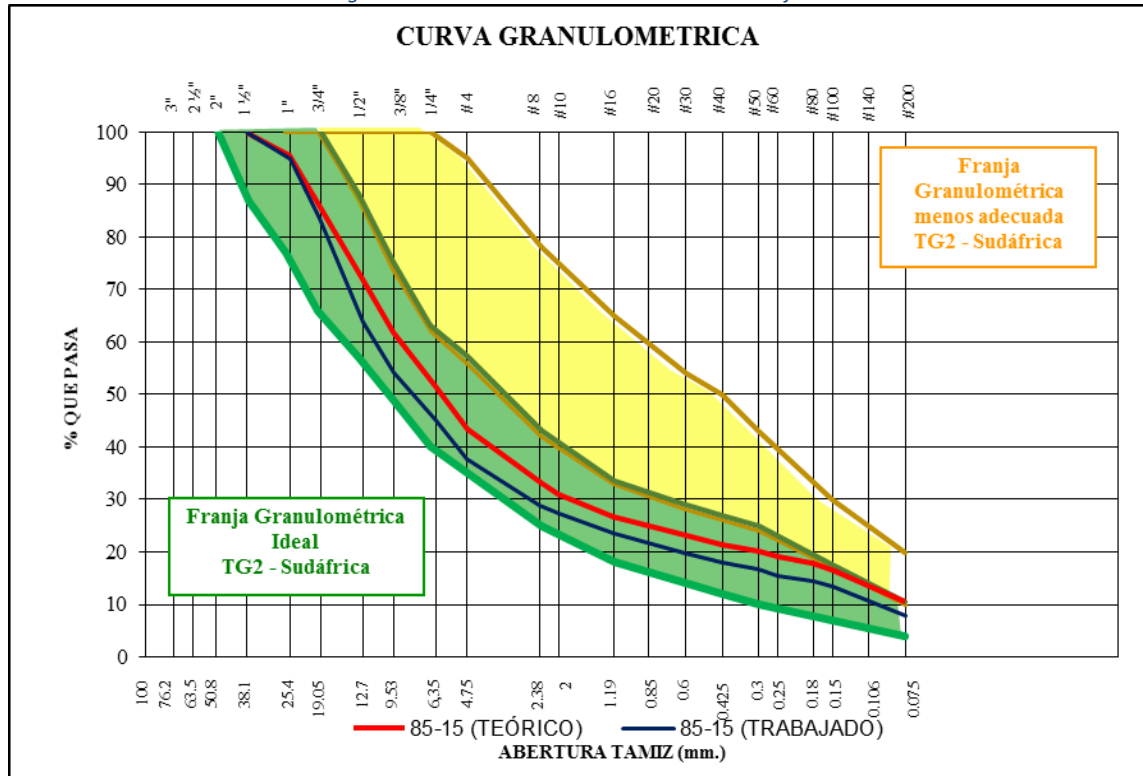


Figura 3.5 Granulometría 70-30 Teórica- Trabajada

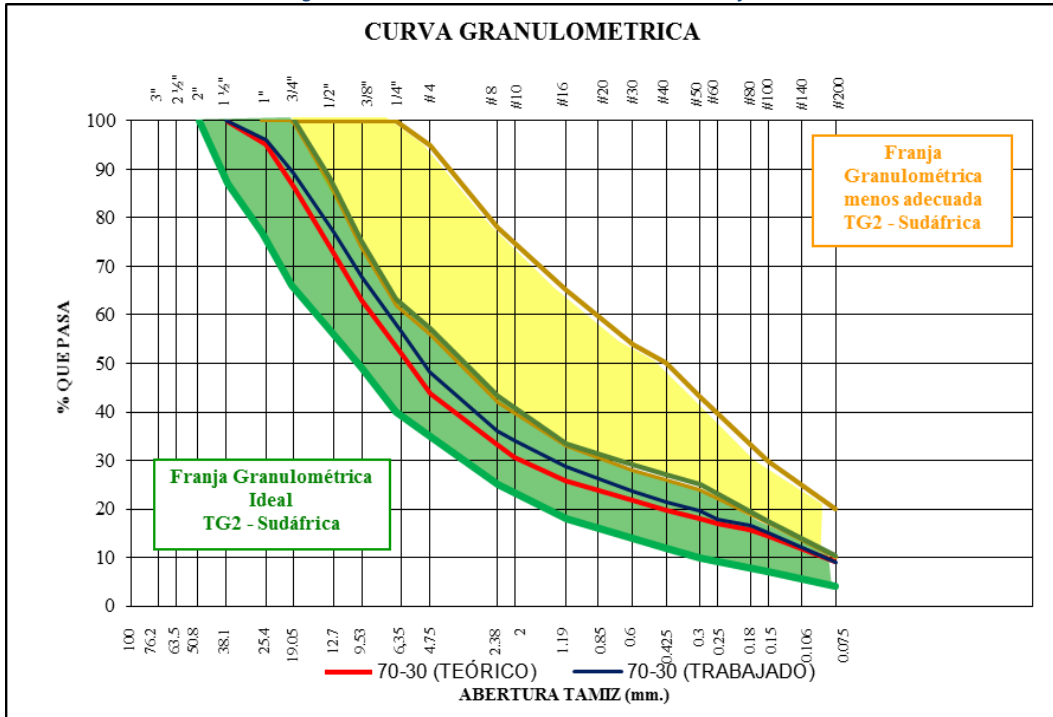
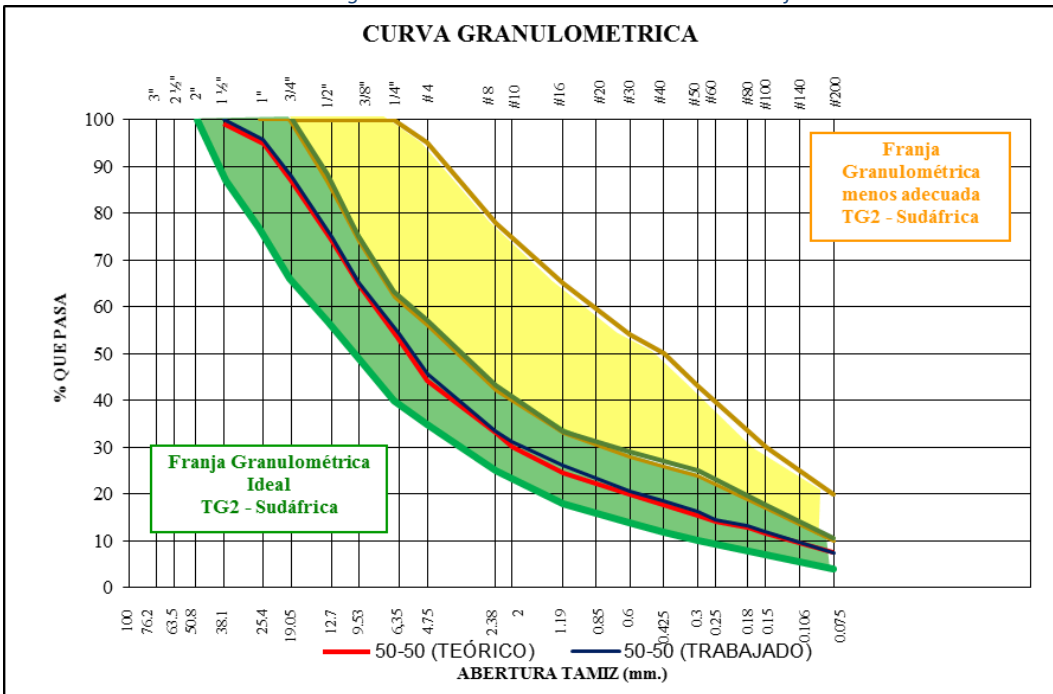


Figura 3.6 Granulometría 50-50 Teórica- Trabajada



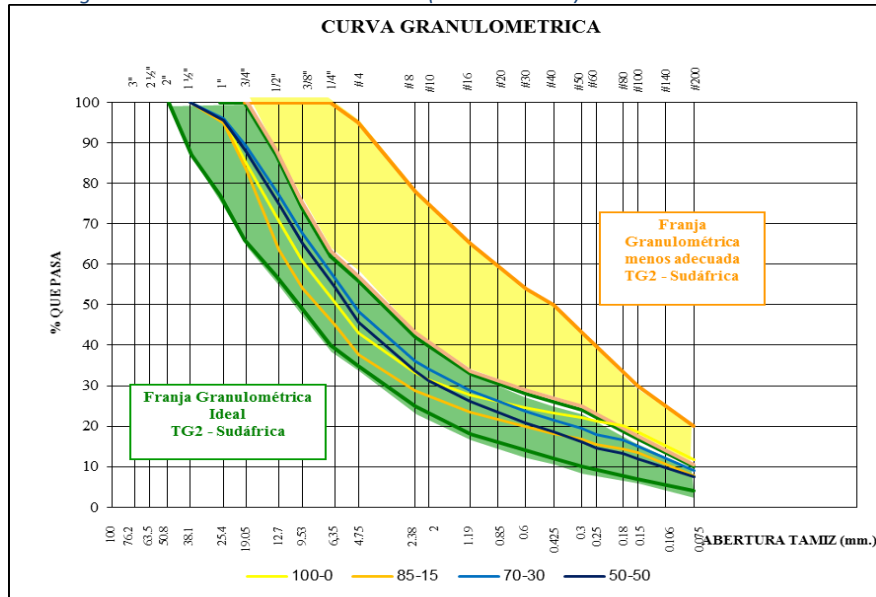
La granulometría INVIAS 213-2013 se realizó con dos objetivos básicos: El primero, determinar el porcentaje de finos (pasa tamiz #200) y segundo, comparar los valores frente a las granulometrías recomendadas por la guía de diseño TG2. Los resultados de los

análisis granulométricos se presentan en la tabla 3.6 y las gráficas en la Figura 3.6 donde se presenta comparados con la TG2.

Tabla 3.6 Granulometrías de cada Mezcla y Recomendación de Gradación de la TG2.

TAMIZ	% PASA POR MEZCLAS					TG2 (2009)			
	RAP	100-0	85-15	70-30	50-50	% PASA		% PASA	
						IDEAL		MENOS DESEABLE	
2"	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1 1/2"	98	100	100	100	100	87	100	100	100
1"	94	96	95	100	96	77	100	100	100
3/4"	89	85	83	96	88	66	0	99	100
1/2"	78	71	64	89	75	67	87	87	100
3/8"	68	61	54	77	65	49	74	74	100
1/4"	56	50	45	68	54	40	62	62	100
N° 4	46	43	38	57	46	35	56	56	95
N° 8	33	33	29	48	34	25	42	42	78
N° 10	29	31	27	36	31	21	35	35	65
N° 16	22	28	24	34	26	18	33	33	60
N° 30	15	24	20	29	21	14	28	28	54
N° 40	12	23	18	24	18	12	26	26	50
N° 50	9	22	17	22	16	10	24	24	43
N° 60	7	21	16	20	15	9	19	29	38
N° 80	6	20	14	18	13	7	17	17	30
N° 100	5	19	13	17	12	5	15	15	25
No. 200	3.2	11.8	7.8	15	7.5	4.0	10.0	10.0	20.0

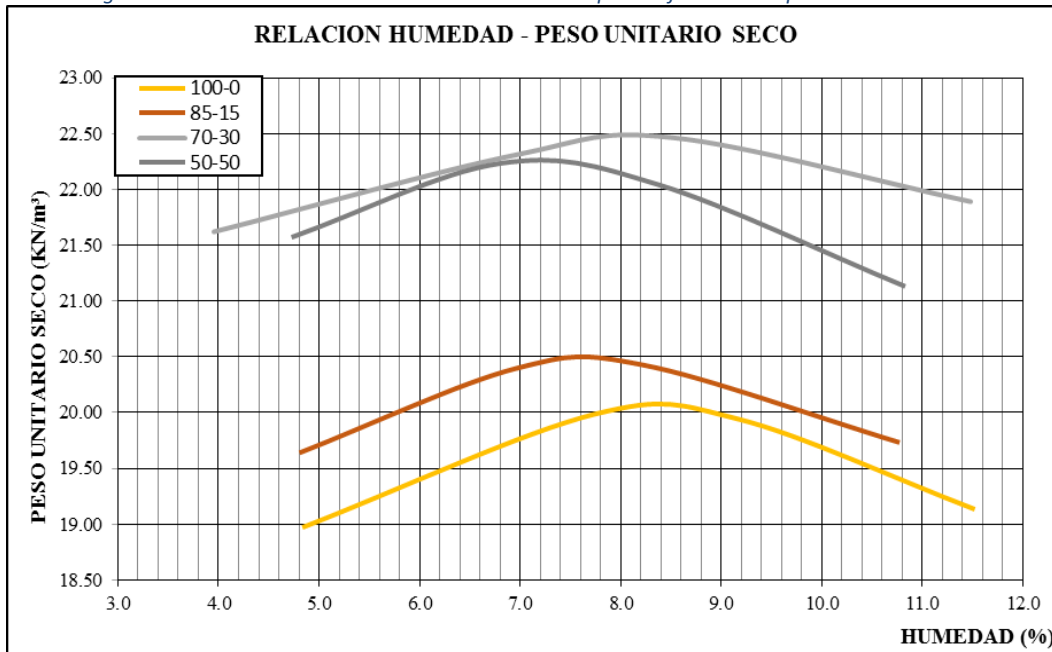
Figura 3.7 Granulometría de Mezclas (Granular- RAP) Vs. Recomendación TG2.



Como se observa en las figuras 3.4 a 3.6, la diferencia entre las granulometrías teóricas y reales fue disminuyendo con el aumento en la proporción de RAP. Todas las proporciones cumplen con los límites recomendados para granulometría óptima dadas por la guía TG2.

Para cada proporción de la tabla 3.5 se obtuvo la relación entre densidad seca y humedad bajo los parámetros de la norma INVIAS 142-13. La Figura 3.8 muestra las curvas de humedad Vs. Peso Unitario obtenidas para las cuatro proporciones.

Figura 3.8 Relación Humedad Vs. Peso Unitario Seco para Diferentes Proporciones de Mezcla



A continuación, se presentan las características de las distintas proporciones de material utilizadas.

Tabla 3.7 Características de las Mezclas para Trabajo.

PROPIEDAD	100-0	85-15	70-30	50-50
TAMAÑO MÁXIMO DE PARTÍCULA (mm)	25	25	25	25
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%
INDICE DE PLASTICIDAD	NP	NP	NP	NP
HUMEDAD ÓPTIMA DEL PROCTOR MODIFICADO (INV E-142)	8.4%	7.6%	8.2%	7.2%
DENSIDAD SECA MÁXIMA DE PROCTOR MODIFICADO (INV E-142) (kN/m <sup>3</sup> )	20.1	20.5	22.5	22.3

La figura 3.8 y tabla 3.7 se observa que la mezcla 70-30 posee un contenido de finos superior respecto a las mezclas con RAP y presenta valores de humedad óptima y densidad seca máxima, alejados de la tendencia de las demás mezclas.

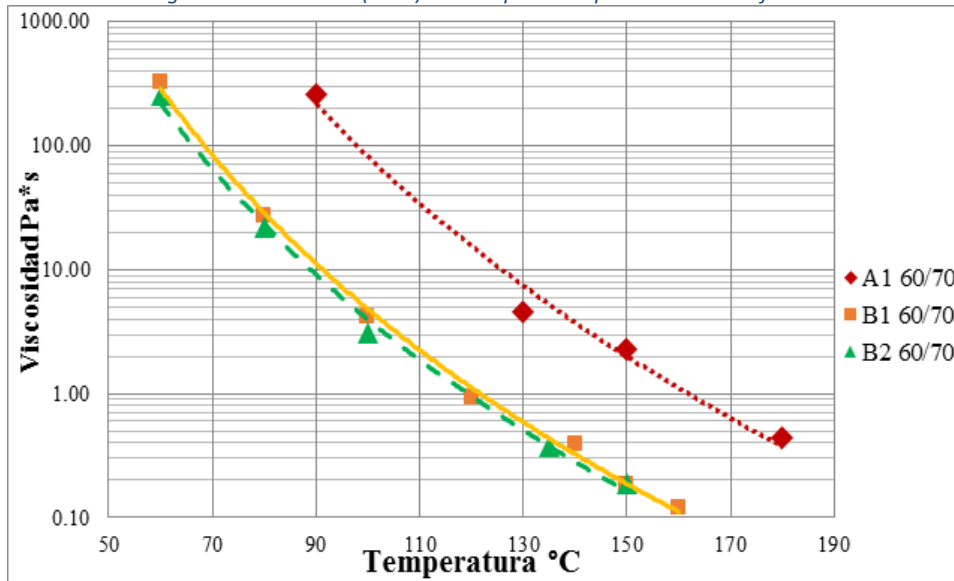
### 3.2.4 Cementos Asfálticos

Los cementos asfálticos fueron suministrados por dos empresas diferentes (1 y 2), y provienen de la refinería de Barrancabermeja (B) y de la planta de Apiay (A). Clasifican por grado de penetración como 60/70 1/10 mm como se presenta en la tabla 3.8. Adicionalmente, se presentan las curvas de Viscosidad – Temperatura en la Figura 3.9 donde se puede apreciar que los asfaltos B1 y B2 del mismo origen y diferente proveedor tienen valores de viscosidad muy cercanos entre sí y son inferiores a la viscosidad presentada en el asfalto A1 que posee un origen diferente.

Tabla 3.8 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

Figura 3.9 Viscosidad (Pa\*s) Vs. Temperatura para Cemento Asfáltico



#### 3.2.4.1 Asfalto Espumado

El proceso de espumado para la clasificación y calidad de la espuma se realizó en la planta WLB 10s de Wirtgen ® y el proceso de mezclado se llevó a cabo en la mezcladora WLM 30 (Figura 3.10). Ésta planta permite la producción de asfalto espumado en cantidades controladas, bajo condiciones similares a las de las recicladoras actuales. La WLB10s posee un tanque contenedor de asfalto termostáticamente regulado, un sistema de compresión de aire y un recipiente con agua. La cantidad de agua añadida al asfalto se

calcula en términos de porcentaje de masa del asfalto que se utiliza y es regulada mediante una válvula controladora de flujo.

Figura 3.10 a). Planta de espumado Wirtgen WLB 10S. b). Mezcladora WLM30.



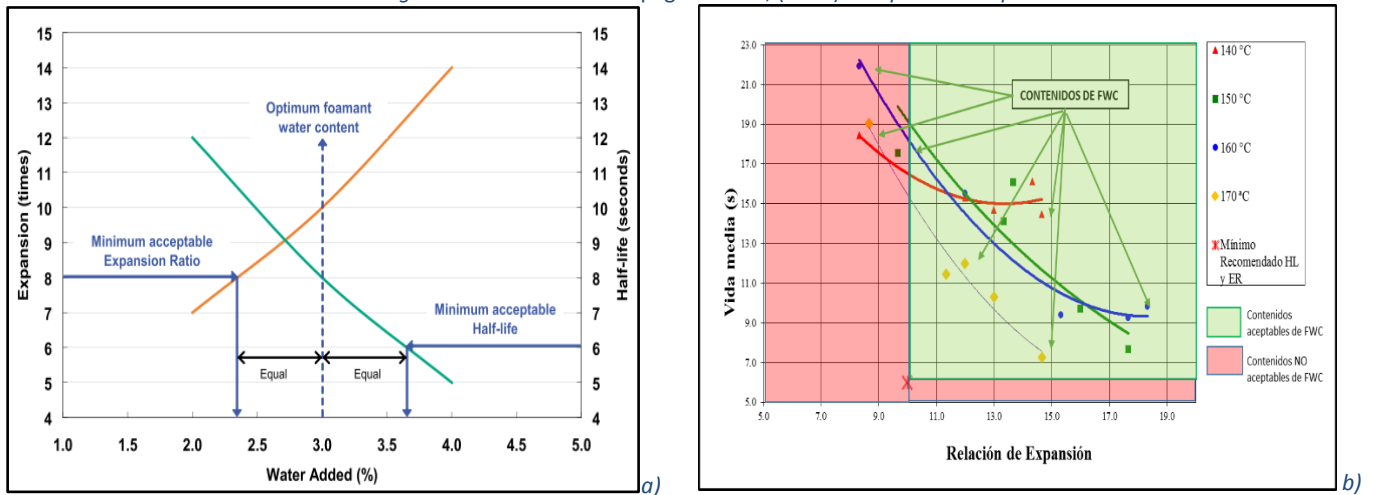
La selección de los valores de relación de expansión ER y vida media de la espuma HL de los 3 asfaltos mencionados se realizó con los criterios de la guía TG2 ( $HL > 6$  s y  $ER > 10$ , como valores mínimos para una temperatura de agregados de  $10^{\circ}\text{C}$  a  $25^{\circ}\text{C}$ ).

Las espumas de todos los asfaltos se fabricaron a 4 temperaturas ( $140^{\circ}\text{C}$ ,  $150^{\circ}\text{C}$ ,  $160^{\circ}\text{C}$  y  $170^{\circ}\text{C}$ ) y con 4 contenidos de agua de espumado FWC (por sus siglas en inglés, Foam Water Content) de: 2.5%, 3.0%, 3.5% y 4.0%

Si bien la guía de diseño TG2 sugiere que el FWC se seleccione como se muestra en la figura 3.11a, se ha optado por seleccionar este valor como aquel que cumple los mínimos sugeridos por la TG2 en una gráfica que relaciona la vida media y a relación de expansión como se muestra en la figura 3.11b.



Figura 3.11 a) Selección de contenido de Agua de Espumado (FWC) según (Asphalt Academy, 2009b). b). Selección de FWC según recomendación Campagnoli et al., (1998). Adaptación Propia.



A continuación, se presentan las figuras de vida media HL(s) Vs. Relación de Expansión ER para cada tipo de cemento asfáltico utilizado (figuras 3.12 a la 3.14).

Figura 3.12 Vida Media HL(s) Vs. Relación de Expansión ER para Asfalto A1

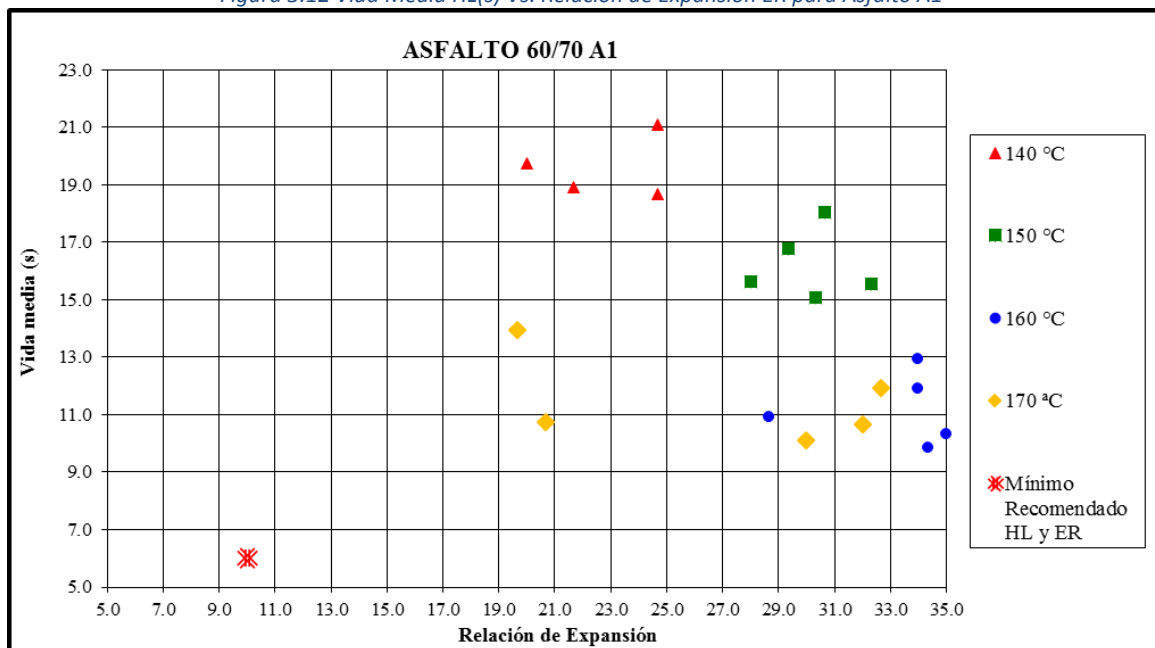


Figura 3.13 Vida Media HL(s) Vs. Relación de Expansión ER para Asfalto B1

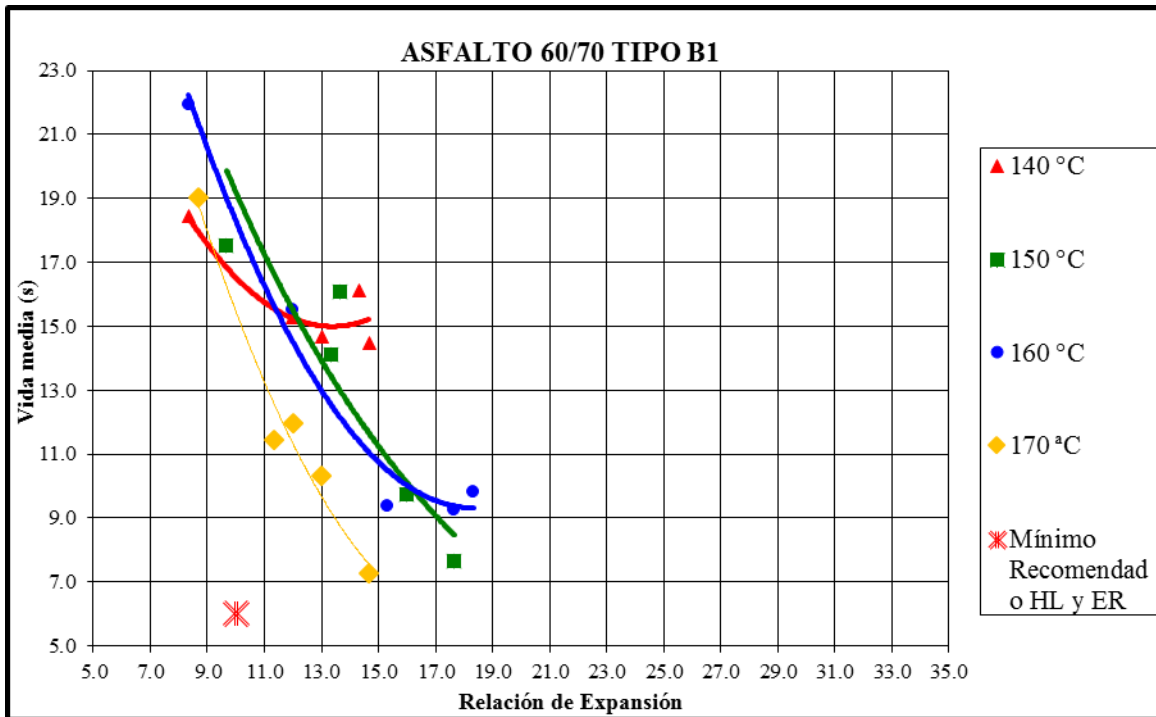
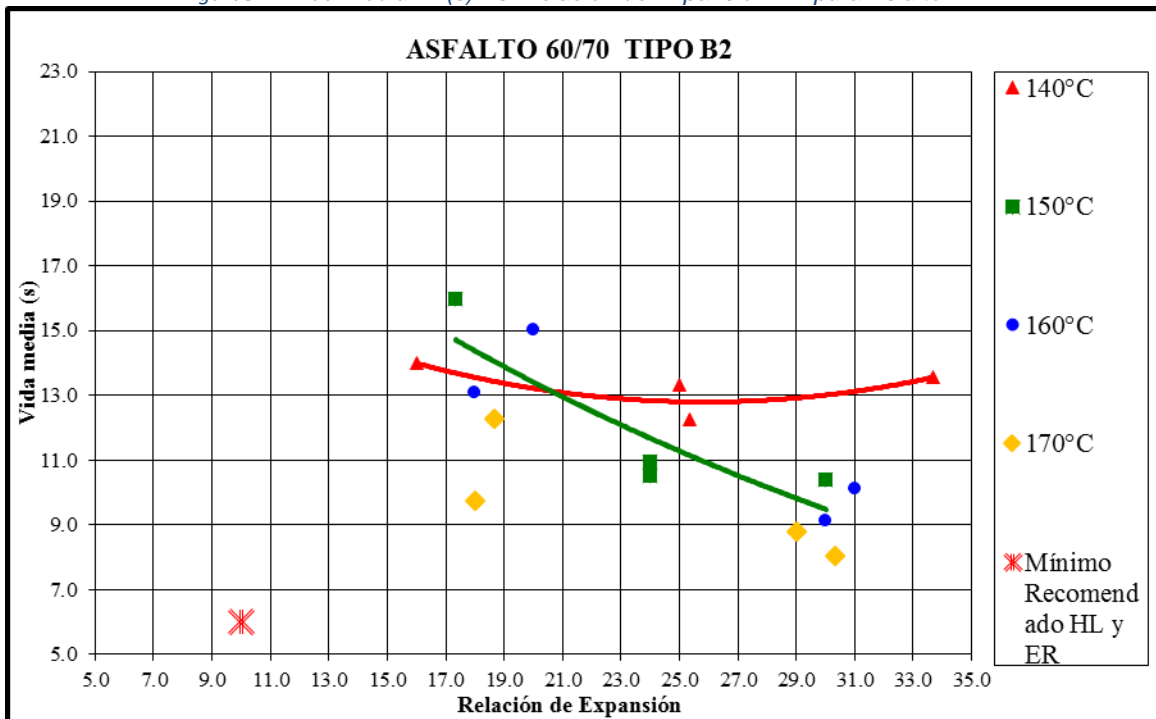


Figura 3.14 Vida Media HL(s) Vs. Relación de Expansión ER para Asfalto B2



En la tabla 3.9 se presentan los contenidos de FWC (%) y Temperatura (°C) seleccionados para la producción de la espuma de cada tipo de asfalto, así como los valores de vida media (HL) y Relación de Expansión (ER).



Tabla 3.9 Propiedades de Asfalto Espumado para los contenidos de FWC (%) y Temperatura (°C) seleccionados para mezcla.

TIPO DE ASFALTO	FWC (%)	TEMPERATURA (°C)	HL (s)	ER
A1	2.5	160	12.9	34
B1	2.5	160	15.5	12
B2	2.5	160	13.1	18

### 3.2.5 Llenantes Activos

La adición de un llenante activo permite aumentar la resistencia de los materiales así como incrementar la resistencia al agua de las mismas (Jitareekul, 2009). En este trabajo se utilizaron dos llenantes comúnmente utilizados como estabilizantes en la construcción: cemento Portland Tipo I y Cal. En la figura 3.15, se presentan las características generales de los llenantes.

Figura 3.15 Características de los llenantes utilizados

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cemento hidráulico marca Holcim de uso general (UG). <ul style="list-style-type: none"> <li>• Saco de 50 kg.</li> </ul> </li> <li>• Sello de calidad Icontec bajo norma NTC 121.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cal hidratada de uso general en construcción.</li> <li>• Saco de 10 kg.</li> </ul>

### 3.3 Establecimiento de fórmulas de trabajo.

El objetivo principal del diseño de mezcla es establecer las proporciones y calidades de material que se usarán en la fórmula de trabajo para optimizar las propiedades de resistencia, durabilidad y otros, de las briquetas que se llevarán a ensayo.

La fase 1 de Diseño de Mezclas se subdivide en dos etapas; La primera corresponde a la selección del llenante activo Cal, Cemento o filler natural (pasa tamiz No.200), y la segunda corresponde a la selección del contenido de asfalto espumado óptimo para cada una de las 12 combinaciones de material seleccionado mostradas en las tablas 3.10 y 3.11.

A continuación, se presentan las mezclas elaboradas por tipo de asfalto y por proporción Granular (MG) /RAP:

*Tabla 3.10 Mezclas por tipo de Asfalto.*

TIPO DE ASFALTO	PROPORCIÓN MG/RAP			
	M1	M2	M3	M4
B2	100/0	85/15	70/30	50/50
A1	M5	M6	M7	M8
	100/0	85/15	70/30	50/50
B1	M9	M10	M11	M12
	100/0	85/15	70/30	50/50

*Tabla 3.11 Mezclas por Proporción de granular (MG) y RAP*

PROPORCIÓN MG/RAP	MEZCLAS		
100/0	M1	M5	M9
85/15	M2	M6	M10
70/30	M3	M7	M11
50/50	M4	M8	M12

## PROCEDIMIENTO DE LABORATORIO Y MÉTODOS DE ENSAYO

### 3.3.1 Selección de llenante y asfalto óptimos

Las mezclas realizadas, tanto para la obtención del llenante como de óptimo de asfalto, se fabricaron con la humedad óptima del Proctor modificado mostradas en la tabla 3.7

Para la selección de llenante y óptimo de asfalto fue necesaria la fabricación de 6 series de briquetas por cada tipo de llenante (18 en total) o cada contenido de asfalto espumado. Las dimensiones de cada briketa fueron de 10 cm de diámetro y 6,4 cm de altura compactadas mediante método Marshall, aplicando a 75 golpes por cara, se extrajeron mediante gato hidráulico y se llevaron a horno a 40°C por un periodo de 72 horas.

La cantidad preparada de cada mezcla fue de 30 kg (10 kg para mezcla con cal, 10 kg con cemento y 10 kg sin llenante activo).

El contenido óptimo teórico de asfalto espumado necesario para la definición de llenante se hizo en función de la granulometría de acuerdo a la recomendación de la guía de diseño de Wirtgen GmbH, (2012) mostrada en la tabla 3.12. La selección definitiva de llenante y asfalto espumado se hizo siguiendo los pasos presentados en los esquemas de las figuras 3.16 y 3.17.

*Tabla 3.12 Estimación de óptimo de Asfalto Teórico en Función de Granulometría.(Wirtgen GmbH, 2012)*

Guidelines for estimating optimum foamed bitumen addition			
Fraction passing 0.075 mm sieve (%)	Foamed bitumen addition (% by mass of dry aggregate)		Typical type of material
	Fraction passing 4.75 mm sieve		
	< 50%	> 50%	
< 4	2.0	2.0	Recycled asphalt (RA/RAP)
4 – 7	2.2	2.4	RA/Graded crushed stone/ Natural gravel/blends
7 – 10	2.4	2.8	
> 10	2.6	3.2	Gravels/sands

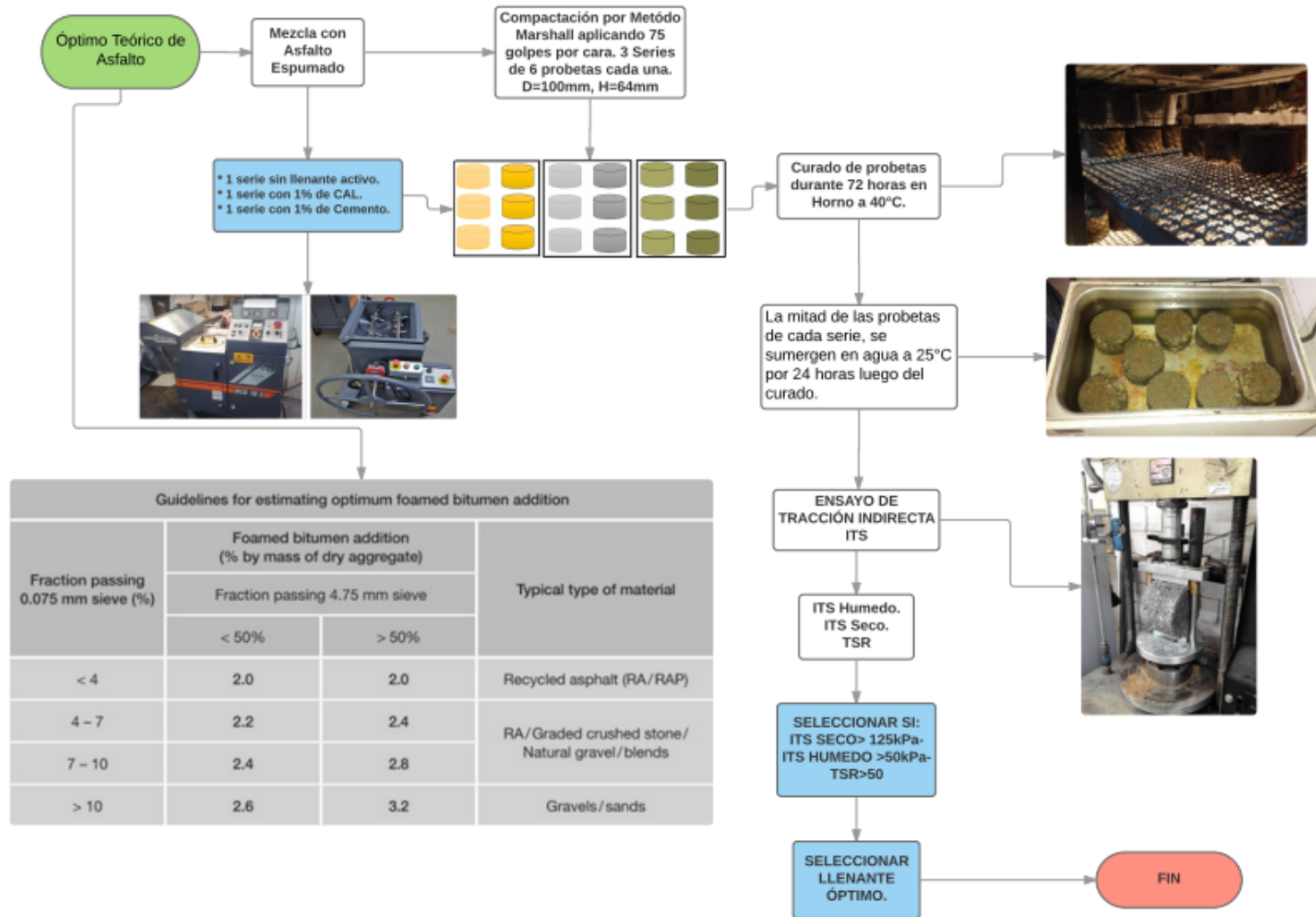
En la Tabla 3.13, se presentan los valores de asfalto óptimo teórico para cada mezcla.

*Tabla 3.13 Óptimos Teóricos de Asfalto por Tipo de Mezcla.*

MEZCLA	CONTENIDO DE ASFALTO ÓPTIMO TEÓRICO (%) PARA MEZCLA
M1-M5-M9	2.6
M2-M6-M10	2.4
M3-M7-M11	2.4
M4-M8-M12	2.4

Figura 3.16 Selección de Llenante Óptimo.

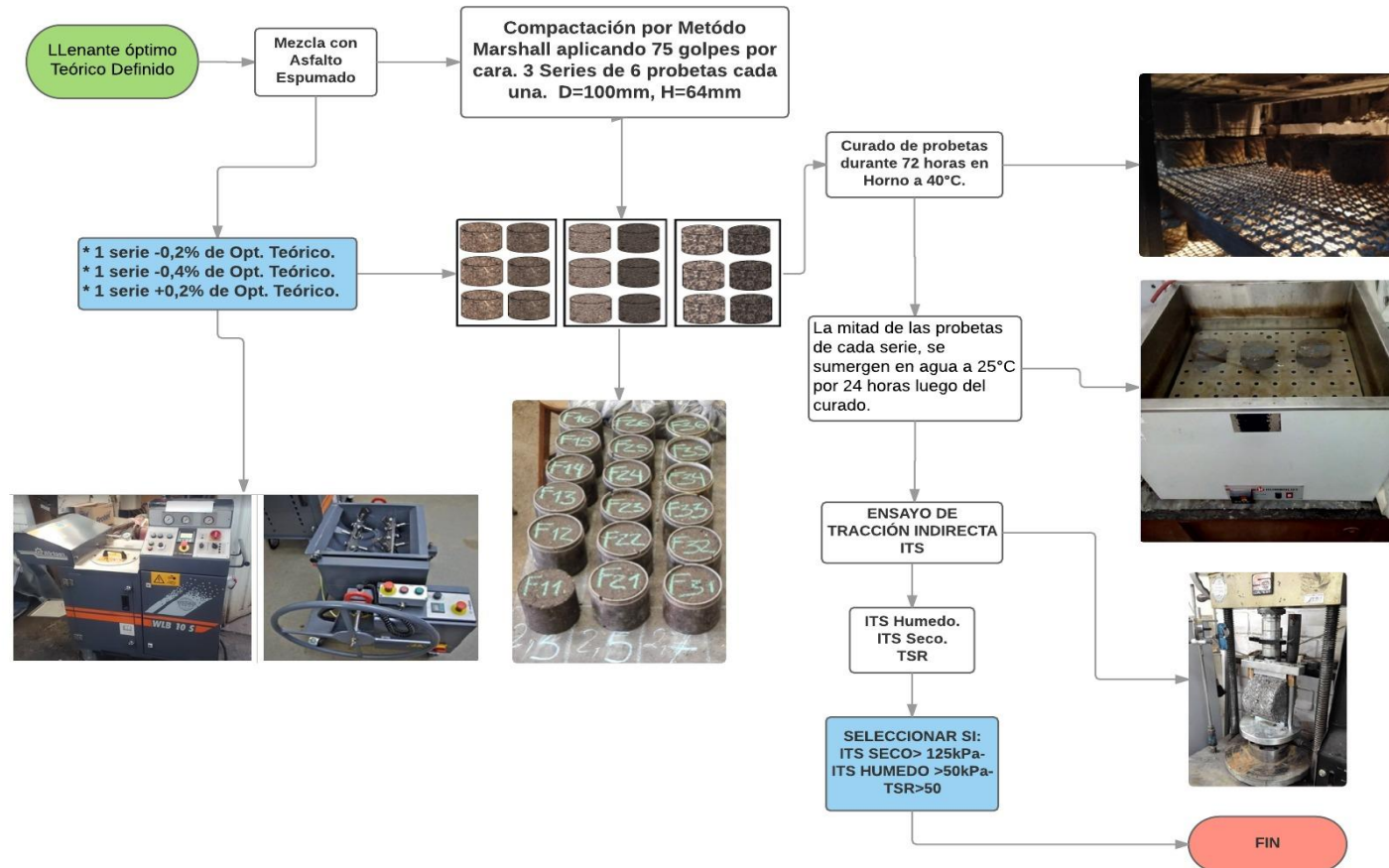
SELECCIÓN DE LLENANTE ÓPTIMO



Guidelines for estimating optimum foamed bitumen addition			
Fraction passing 0.075 mm sieve (%)	Foamed bitumen addition (% by mass of dry aggregate)		Typical type of material
	Fraction passing 4.75 mm sieve		
	< 50%	> 50%	
< 4	2.0	2.0	Recycled asphalt (RA/RAP)
4 – 7	2.2	2.4	RA/Graded crushed stone/ Natural gravel/blends
7 – 10	2.4	2.8	
> 10	2.6	3.2	Gravels/sands

Figura 3.17 Selección de Asfalto Óptimo

SELECCIÓN DE ASFALTO ÓPTIMO



### **3.3.2 Compactación y curado de probetas para parámetros de resistencia.**

La guía de diseño TG2 se tomó como orientación en el procedimiento de fabricación de las probetas para ensayo triaxial. En ella se recomienda que para el nivel de diseño 3 los ensayos triaxiales se ejecuten sobre probetas de 150mm de diámetro y 300 mm de altura. Sin embargo, los ensayos ejecutados en el presente trabajo se realizaron sobre probetas de 100 mm de diámetro por 200mm de altura, en cuanto al proceso de curado y ejecución del ensayo triaxial monotónico, estos se siguieron en su totalidad bajo las recomendaciones de la TG2.

#### **3.3.2.1 Compactación**

Las probetas para el ensayo triaxial Monotónico (Fase 2) se fabricaron utilizando un compactador vibratorio BOSCH®. Las dimensiones obtenidas son de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura. Las especificaciones y generalidades se discutieron en el capítulo 2 (Revisión de Literatura) y se siguió el procedimiento presentado en el manual de compactación vibratoria de la guía TG2 donde se plantea que los especímenes se deben fabricar en 5 capas con un tiempo de compactación de 25 segundos por cada capa (Academy, 2009). Entre capa y capa se utilizó el sistema escarificador con el objetivo de asegurar la continuidad entre capas

#### **3.3.2.2 Curado**

Las muestras de la fase 2 (100mm X 200 mm) fueron curadas a una temperatura de 30°C por 20 horas y a 40°C por 48 horas en condición sellada. Esta situación de curado busca simular las condiciones de campo y representar de manera realista la ganancia en resistencia de los BSM-AF (Ben, 2014; González, 2009).

El proceso de fabricación de las probetas se esquematiza en la figura 3.19 presentada más adelante.

## **3.4 ITS y triaxial monotónico.**

### **3.4.1 Ensayo de Resistencia a la Tensión Indirecta (ITS)**

Las briquetas tipo Marshall se fallaron en el ensayo de resistencia a la tensión indirecta (ITS) mediante la aplicación de una carga sobre el plano diametral como se muestra en la Figura 3.17.



El ensayo ITS (Norma INVIAS 786-13) es un ensayo de deformación controlada en el cual se aplica una carga monotónica a la briqueta hasta llevarla a la falla. La velocidad del ensayo es de 50mm/min, se reporta la carga a la rotura en Newtons (N) y el valor de ITS en KiloPascales (kPa) como se muestra en la ecuación 3.1.

$$ITS = \frac{2 * P}{\pi * h * d} * 10000$$

*Ecuación 3.1. Resistencia a la Tracción indirecta*

Donde,

$ITS$  = Resistencia a la tracción indirecta (kPa).

$P$  = Máxima carga aplicada (kN).

$h$  = Altura Promedio de probeta (cm).

$d$  = Diámetro de la briqueta (cm).

El ensayo se ejecutó en la máquina universal Versatester de la Escuela Colombiana de Ingeniería. (Figura 3.18) para cada una de las probetas tanto en estado seco como luego de inmersión por 24 horas.



### **3.1.1 Ensayo Triaxial Monotónico**

Las probetas de 100mm X 200mm se ensayaron en un equipo dinámico de control Neumático, marca DYNAPAVE 30 de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Este equipo posee un sistema de control servo neumático que permite aplicar cargas dinámicas y estáticas. Adicionalmente, posee un sistema de presurización de aire que permite controlar la presión de cámara a la que se realiza el ensayo. La celda de carga del equipo tiene una capacidad máxima de 30 kN que se aplican mediante un actuador de recorrido vertical. La adquisición de datos es controlada por un sistema centralizado (CDC) que recibe las señales de los transductores de deformación externos (LVDT), de los sensores de presión de cámara y de la celda de carga y permite su procesamiento con una hoja de cálculo convencional. En la figura 3.19 se muestra el equipo utilizado para la ejecución del ensayo.

Figura 3.19 Fabricación de probetas para ensayo Triaxial Monotónico

PROBETAS PARA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS DE CORTE

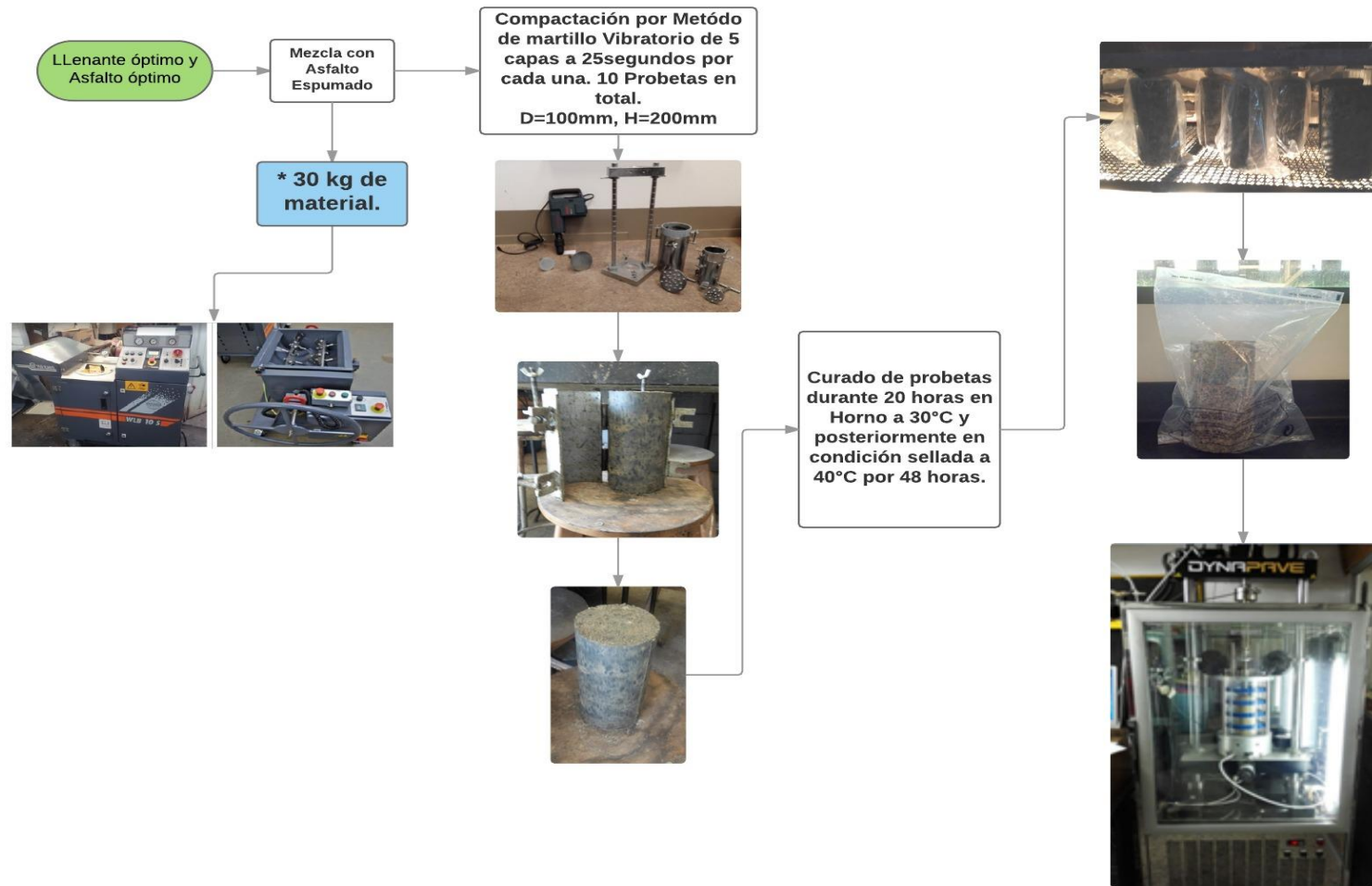
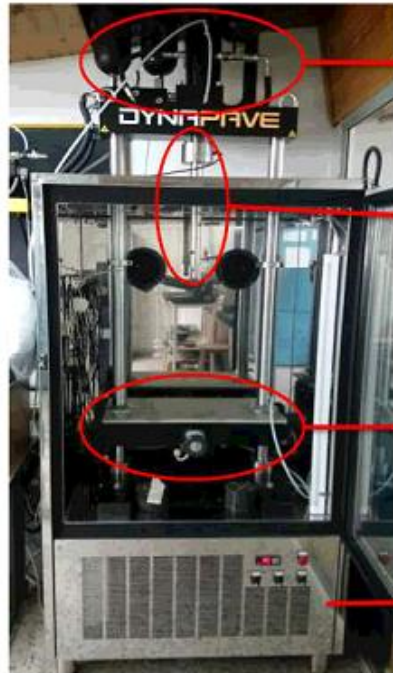


Figura 3.20 a) Equipo Dyanapve. b) Sistema de Control y Procesamiento.



- BOMBAS.
- ACTUADOR DE CARGA.
- BANDEJA DE SOPORTE.
- CABINA TERMOSTÁTICA.

a)



- SISTEMA DE AIRE
- TABLERO PRINCIPAL DE ENCENDIDO.
- IMPRESORA
- COMPUTADOR
- UNIDAD DE CONTROL DIÁMICO CDC.

b)

Los ensayos se realizaron a una temperatura de 25°C. 8 probetas se ensayaron después de un proceso de curado en seco y 2 luego de ser sumergidas en agua durante 24 horas, con deformación controlada a razón de 2.1% de la altura por minuto. Las presiones de

cámara por cada par de briquetas fueron: 0kPa, 50kPa, 100 kPa y 200kPa y se dio por terminado al llegar a una deformación unitaria del 6% o hasta la destrucción del espécimen teniendo en cuenta las recomendaciones del anexo L de Asphalt Academy, (2009a). Las probetas en húmedo se fallaron en compresión axial bajo una presión de cámara de 100kPa para determinar el parámetro de cohesión retenida (RetC).

### **3.2 Bibliografía.**

Academy, A. (2009). Procedure for Compaction of Test Specimens Using the Vibratory Hammer-TG2.

Asphalt Academy. (2009a). Determination of Triaxial Shear (pp. 1–7).

Asphalt Academy. (2009b). TG2-A guideline for the Design and construction of Bitumen Stabilised Materials. (2da.). Pretoria: Asphalt Academy.

Ben, M. D. (2014). hiRESILIENT RESPONSE AND PERFORMANCE OF BITUMEN STABILIZED MATERIALS WITH FOAM INCORPORATING RECLAIMED by. Stellenbosch University.

Campagnoli, S. X., Estupiñan, E., & Soto, J. E. (2016). Caracterización de Espumas de Asfalto. 7a. SEMANA TÉCNICA DEL ASFALTO, 13.

González, A. (2009). An Experimental Study of the Deformation and Performance Characteristics of Foamed Bitumen Stabilised Pavements. Canterbury.

INVIAS. (2012). Capítulo 3 - Afirmados , Subbases Y Bases, 150.

Jitarekul, P. (2009). An Investigation into Cold In-Place Recycling of Asphalt Pavement. Universidad de Nottingham.

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

## CAPÍTULO 4. DISEÑO DE MEZCLA

El presente capítulo, así como los anexos correspondientes, fueron desarrollados en conjunto con el estudio desarrollado por parte de la ingeniera Sandy Jazmín Pardo Herreño titulado “**Ecuaciones constitutivas de módulo resiliente para materiales tratados con asfalto espumado**”.

### 4.1 Introducción

En el presente capítulo se muestran los resultados de 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 triaxiales para determinar los parámetros de resistencia al corte: cohesión  $c$  y fricción  $\phi$ .

En la tabla 4.1 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 3.1.1 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

A continuación, se presentan y analizan los resultados para cada proporción de Granular – RAP con los diferentes asfaltos utilizados, de los diseños de mezcla en función de la resistencia conservada obtenida sobre cada briketa.

### 4.2 Mezcla 100-0

#### 4.2.1 Definición de llenante - Cemento asfáltico (A1)

El Contenido óptimo teórico de asfalto espumado presentado en la tabla 4.1 varió en el momento de la inyección por lo que los valores reales se presentan en la tabla 4.2, así como los resultados de resistencia a la tracción indirecta en seco y húmedo sobre la mezcla 100-0 AF-A1.

Tabla 4.2.1 Definición de llenante óptimo teórico para mezcla 100-0. AF-A1

LLENANTE	Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada (%)
	Seca*	Húmeda*	
	<b>100-0 AF-A1-OPT. TEÓRICO: 2.6%</b> <b>Real inyectado: 2.5%</b>		
<b>CAL (1%)</b>	380.1	126.4	<b>38.2</b>
	279.6	117.7	
	329.9	134.3	
	<b>329.9</b>	<b>126.1</b>	
<b>NATURAL</b>	309.6	41.7	<b>8.5</b>
	322.8	25.5	
	339.5	15.5	
	<b>324.0</b>	<b>27.6</b>	
<b>CEMENTO (1%)</b>	494.4	284.4	<b>50.4</b>
	502.8	244.3	
	502.2	263.3	
	<b>499.8</b>	<b>252</b>	

\*Los valores presentados en negrilla son el promedio de los datos de ITS obtenidos para cada tipo de llenante.

De los resultados presentados en la tabla 4.2 se determinó el  **cemento**  como llenante óptimo para las mezclas con AF-A1. Esta selección se realizó tomando el grupo de briquetas que presentaron mayor valor de resistencia conservada TSR.

En la tabla 4.3, se presentan los resultados de resistencia a tracción indirecta de la mezcla con AF-A1 para definición del contenido de asfalto espumado óptimo (AF).

Tabla 4.2 Valores de resistencia promedio para diferentes contenidos de asfalto en la mezcla 100-0 AF-A1

CONTENIDO DE ASFALTO (%)	100-0 AF-A1-CEMENTO AL 1%		Resistencia Conservada (%)
	Resistencia ITS (KPa)		
	Seca	Húmeda	
<b>2.30</b>	291.9	----**	----
<b>2.50</b>	499.8	252.0	50
<b>2.70</b>	290.4	143.7	49
<b>2.90</b>	355.6	221.1	62

\*\* No fue posible determinar la resistencia en húmedo para el contenido de asfalto espumado de 2.3%.

Se observa que el contenido óptimo de asfalto AF para la mezcla 100-0 con **cemento** al 1% en peso seco del material, es de **2.90%**, utilizando como criterio de selección la resistencia conservada.

Los valores de resistencia en seco y en húmedo para el contenido de asfalto seleccionado permiten clasificar a la mezcla como tipo BSM 1 según la Asphalt Academy, (2009) y clase 1 según Wirtgen GmbH, (2012), esto quiere decir que es un material apto para diseños con tráficos superiores a 6 millones de ejes equivalentes y se espera que tenga elevada resistencia al corte.

#### 4.2.2 Definición de llenante - Cemento asfáltico (B1)

El Contenido óptimo teórico de asfalto espumado presentado en la tabla 4.4 varió en el momento de la inyección por lo que los valores reales se presentan en la tabla 4.4, así como los resultados de resistencia a la tracción indirecta en seco y húmedo sobre las briquetas de la mezcla 100-0 AF-B1.

*Tabla 4.2 Definición de llenante óptimo teórico para mezcla 100-0. AF-B1*

LLENANTE	<b>100-0 AF-B1-OPT. TEÓRICO 2.6%</b>		
	<b>Real inyectado 2.55%</b>		
	Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada (%)
Seca*	Húmeda*		
<b>CAL (1%)</b>	277.3	160.1	<b>61.4</b>
	254.2	178.3	
	248.0	140.2	
	<b>259.8</b>	<b>159.5</b>	
<b>NATURAL</b>	384.5	55.0	<b>27.3</b>
	369.9	181.6	
	477.8	100.4	
	<b>410.7</b>	<b>112.3</b>	
<b>CEMENTO (1%)</b>	234.5	71.8	<b>40.6</b>
	201.4	61.0	
	159.7	108.8	
	<b>198.5</b>	<b>80.5</b>	

*\*Los valores presentados en negrilla son el promedio de los datos de ITS obtenidos para cada tipo de llenante.*

De los resultados presentados en la tabla 4.4 se determinó el **cal** como llenante óptimo para las mezclas con AF-B1. Esta selección se realizó tomando el grupo de briquetas que presentaron mayor valor de resistencia conservada TSR.



En la tabla 4.5, se presentan los resultados de resistencia a la tracción indirecta de la mezcla con AF-MB para definición de contenido de asfalto espumado óptimo (AF).

*Tabla 4.2 Valores de resistencia promedio para diferentes contenidos de asfalto en la mezcla 100-0 AF-B1*

CONTENIDO DE ASFALTO (%)	<b>100-0 AF-B1-CAL AL 1%</b>		
	Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada (%)
	Seca	Húmeda	
<b>2.26</b>	245.9	102.3	42
<b>2.55</b>	259.8	159.5	61
<b>2.64</b>	204	81.9	40
<b>2.77</b>	226.8	72.8	32

Se observa que el contenido óptimo de asfalto AF para la mezcla 100-0 con **cal** al 1% en peso seco del material, es de **2.55%**, utilizando como criterio de selección la resistencia conservada y las ITS mínimas sugeridas para las condiciones en seco y en húmedo de 200 kPa y 100 kPa, respectivamente, los cuales permiten clasificar a la mezcla como tipo BSM 1 según la Asphalt Academy, (2009) y clase 1 según Wirtgen GmbH, (2012), esto quiere decir que es un material apto para diseños con tráficos superiores a 6 millones de ejes equivalentes y se espera que presente una elevada resistencia al corte.

#### **4.2.3 Definición de llenante - Cemento asfáltico (B2)**

El Contenido óptimo teórico de asfalto espumado presentado en la tabla 4.1 varió en el momento de la inyección por lo que los valores reales se presentan en la tabla 4.6, así como los resultados de resistencia a la tracción indirecta en seco y húmedo sobre las briquetas de la mezcla 100-0 AF-B2.

*Tabla 4.2 Definición de llenante óptimo teórico para mezcla 100-0. AF- B2*

LLENANTE	<b>100-0 AF-B2-OPT. TEÓRICO: 2.6%</b>		
	<b>Real inyectado 2.3%</b>		Resistencia Conservada (%)
	Resistencia ITS (kPa)		
	Seca*	Húmeda*	
<b>CAL (1%)</b>	248.7	71.0	<b>28.1</b>
	274.3	82.4	
	244.0	62.4	
	<b>255.6</b>	<b>72.0</b>	
<b>NATURAL</b>	282.5	0.0	<b>0.0</b>
	275.1	0.0	
	387.8	0.0	
	<b>315.1</b>	<b>0.0</b>	
<b>CEMENTO (1%)</b>	346.8	176.3	<b>51.2</b>
	366.8	189.1	

352.8	181.0
<b>355.5</b>	<b>182.2</b>

\*Los valores presentados en negrilla son el promedio de los datos de ITS obtenidos para cada tipo de llenante.

De los resultados presentados en la tabla 4.6 se determinó el **cemento** como llenante óptimo para las mezclas con AF-B2. Esta selección se realizó tomando el grupo de briquetas que presentaron mayor valor de resistencia conservada TSR.

En la tabla 4.7, se presentan los resultados de resistencia a tracción indirecta de la mezcla con AF-B2 para definición de contenido óptimo de asfalto espumado (AF).

Tabla 4.2 Valores de resistencia promedio para diferentes contenidos de asfalto en la mezcla 100-0 AF-B2

CONTENIDO DE ASFALTO (%)	100-0 AF-B2-CEMENTO AL 1%		
	Resistencia ITS (kPa)		Resistencia Conservada (%)
	Seca	Húmeda	
<b>2.30</b>	282.8	146.2	52
<b>2.30</b>	355.5	182.2	51
<b>2.73</b>	321.9	109.7	34
<b>2.91</b>	281.8	126.3	45

Se observa que el contenido óptimo de asfalto AF para la mezcla 100-0 con **cemento** al 1% en peso seco del material, es de **2.3%**, utilizando como criterio de selección la resistencia conservada al igual que los valores mínimos recomendados de ITS seco e ITS húmedo (200 kPa y 100 KPa, respectivamente), los cuales permiten clasificar a la mezcla como tipo BSM 1 según la Asphalt Academy, (2009) y clase 1 según Wirtgen GmbH, (2012), esto quiere decir que es un material apto para diseños con tráfico superiores a 6 millones de ejes equivalentes y se espera que presente una elevada resistencia al corte.

#### 4.2.4 Parámetros finales de diseño de Mezcla 100-0

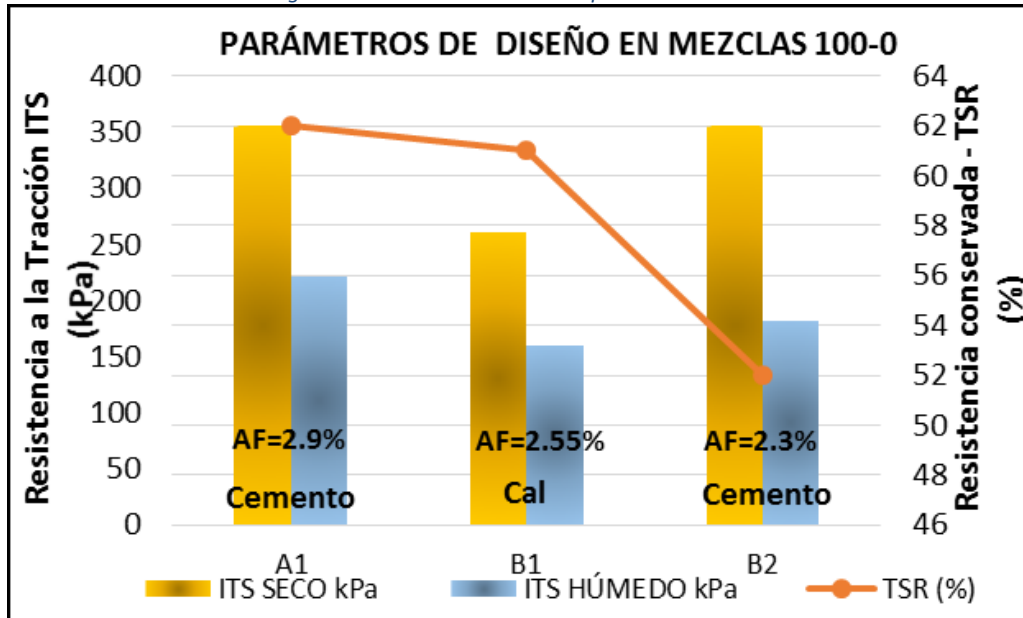
En la tabla 4.8 se presenta el resumen de los parámetros para diseño con los distintos tipos de asfalto para la mezcla 100-0.

Tabla 4.2 Diseño para mezcla 100-0 con asfalto espumado

Tipo de Asfalto	Llenante (%)	Contenido de Asfalto Espumado (%)	100-0 AF		Resistencia Conservada (%)
			ITS seco (kPa)	ITS húmedo (kPa)	
<b>A1</b>	Cemento	2.90	356	221	62
<b>B1</b>	Cal	2.55	260	160	61

B2	Cemento	2.30	356	182	51
----	---------	------	-----	-----	----

Figura 4.2 Parámetros de diseño para mezcla 100-0



En la tabla 4.8 y grafica 4.1 se observa una disminución en la resistencia conservada con la disminución del contenido de asfalto espumado.

Aun cuando la mezcla utilizada fue igual para todos los asfaltos, se observa un cambio en el llenante utilizado, así como un aumento en la resistencia conservada TSR con el incremento del contenido de asfalto espumado.

### 4.3 Mezcla 85-15

#### 4.3.1 Definición de llenante - Cemento asfáltico (A1)

El Contenido óptimo teórico de asfalto espumado presentado en la tabla 4.1 varió en el momento de la inyección por lo que los valores reales se presentan en la tabla 4.9, así como los resultados de resistencia a la tracción indirecta en seco y húmedo sobre la mezcla 85-15 AF-A1.

Tabla 4.3 Definición de llenante óptimo teórico para mezcla 85-15. AF-A1

85-15 AF-A1-OPT. TEÓRICO: 2.6%			
Real inyectado: 2.5%			
LLENANTE	Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada (%)
	Seca*	Húmeda*	

<b>CAL (1%)</b>	301.5	103.4	<b>37.4</b>
	285.8	105.5	
	300.6	123.1	
	<b>296.0</b>	<b>110.7</b>	
<b>NATURAL</b>	393.0	30.4	<b>10.7</b>
	490.0	53.1	
	392.9	52.4	
	<b>425.3</b>	<b>45.3</b>	
<b>CEMENTO (1%)</b>	444.9	177.6	<b>42.4</b>
	517.1	217.7	
	470.4	212.5	
	<b>477.5</b>	<b>202.6</b>	

\*Los valores presentados en negrilla son el promedio de los datos de ITS obtenidos para cada tipo de llenante.

De los resultados presentados en la tabla 4.9 se determinó el **cimento** como llenante óptimo para las mezclas con AF-A1. Esta selección se realizó tomando el grupo de briquetas que presentaron mayor valor de resistencia conservada TSR aun cuando ninguno de los valores supero el 50% y el ITS seco supera los 400kPa lo que indica, según la guía TG2 (2009), que el material puede contener arcillas que hacen inefectivo el uso de asfalto espumado.

En la tabla 4.10, se presentan los resultados de resistencia a tracción indirecta de la mezcla con AF-A1 para definición del contenido de asfalto espumado óptimo (AF).

*Tabla 4.3 Valores de resistencia promedio para diferentes contenidos de asfalto en la mezcla 85-15 AF-A1*

<b>CONTENIDO DE ASFALTO (%)</b>	<b>85-15 AF-A1-CEMENTO AL 1%</b>		
	<b>Resistencia ITS</b>		<b>Resistencia</b>
	<b>(KPa)</b>		<b>Conservada</b>
	<b>Seca</b>	<b>Húmeda</b>	<b>(%)</b>
<b>2.41</b>	367.9	196.3	53
<b>2.60</b>	477.5	202.6	42
<b>2.81</b>	352.3	219.1	62
<b>2.97</b>	311.9	177.4	57

Se observa que el contenido óptimo de asfalto AF para la mezcla 85-15 con **cimento** al 1% en peso seco del material, es de **2.81%**, utilizando como criterio de selección la resistencia conservada.

Los valores de resistencia en seco y en húmedo para el contenido de asfalto seleccionado permiten clasificar a la mezcla como tipo BSM 1 según la Asphalt Academy, (2009) y clase 1 según Wirtgen GmbH, (2012), esto quiere decir que es un material apto para diseños con tráficos superiores a 6 millones de ejes equivalentes.

### 4.3.2 Definición de llenante - Cemento asfáltico (B1)

El Contenido óptimo teórico de asfalto espumado presentado en la tabla 4.1 varió en el momento de la inyección por lo que los valores reales se presentan en la tabla 4.11, así como los resultados de resistencia a la tracción indirecta en seco y húmedo sobre la mezcla 85-15 AF-B1.

Tabla 4.3 Definición de llenante óptimo teórico para mezcla 85-15- AF-B1

LLENANTE	Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada (%)
	Seca*	Húmeda*	
	<b>85-15 AF-B1-OPT. TEÓRICO: 2.4%</b> <b>Real inyectado: 2.33%</b>		
<b>CAL (1%)</b>	214.5	171.9	<b>84</b>
	220.8	185.2	
	199.1	176.9	
	<b>211.5</b>	<b>178.0</b>	
<b>NATURAL</b>	501.9	73.1	<b>12</b>
	584.0	49.8	
	484.2	63.2	
	<b>523.4</b>	<b>62.0</b>	
<b>CEMENTO (1%)</b>	219.2	117.6	<b>54</b>
	211.3	109.2	
	189.6	107.7	
	<b>206.7</b>	<b>111.5</b>	

\*Los valores presentados en negrilla son el promedio de los datos de ITS obtenidos para cada tipo de llenante.

De los resultados presentados en la tabla 4.11 se determinó el **Cal** como llenante óptimo para las mezclas con AF-B1. Esta selección se realizó tomando el grupo de briquetas que presentaron mayor valor de resistencia conservada TSR.

En la tabla 4.12, se presentan los resultados de resistencia a tracción indirecta de la mezcla con AF-B1 para definición del contenido de asfalto espumado óptimo (AF).

Tabla 4.3 Valores de resistencia promedio para diferentes contenidos de asfalto en la mezcla 85-15 AF-B1.

CONTENIDO DE ASFALTO (%)	Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada (%)
	Húmeda	Seca	
	<b>85-15 AF-B1-CAL 1%</b>		
<b>2.33</b>	178.0	211.5	84
<b>2.50</b>	77.6	252.6	31
<b>2.70</b>	133.2	245.0	54
<b>3.01</b>	70.8	244.5	29

Se observa que el contenido óptimo de asfalto AF para la mezcla 85-15 con **cal** al 1% en peso seco del material, es de **2.33%**, utilizando como criterio de selección la resistencia conservada.

Los valores de resistencia en seco y en húmedo para el contenido de asfalto seleccionado permiten clasificar a la mezcla como tipo BSM 2 según la Asphalt Academy, (2009) y clase 2 según Wirtgen GmbH, (2012), esto quiere decir que es un material apto para diseños con tráficos menores a 3 millones de ejes equivalentes y se espera que tenga moderada resistencia al corte.

#### 4.3.3 Definición de llenante - Cemento asfáltico (B2)

El Contenido óptimo teórico de asfalto espumado presentado en la tabla 4.1 varió en el momento de la inyección por lo que los valores reales se presentan en la tabla 4.13, así como los resultados de resistencia a la tracción indirecta en seco y húmedo sobre la mezcla 85-15 AF-B2.

Tabla 4.3 Definición de llenante óptimo teórico para mezcla 85-15. AF-B2

LLENANTE	Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada (%)
	Seca*	Húmeda*	
	<b>85-15 AF-B2-OPT. TEÓRICO: 2.4%</b> <b>Real inyectado: 2.24%</b>		
<b>CAL (1%)</b>	305.1	136.4	<b>52</b>
	283.5	140.9	
	273.1	168.7	
	<b>287.3</b>	<b>148.7</b>	
<b>NATURAL</b>	309.6	0.0	<b>0</b>
	252.8	0.0	
	242.9	0.0	
	<b>268.4</b>	<b>0.0</b>	
<b>CEMENTO (1%)</b>	398.7	93.5	<b>32</b>
	429.7	136.2	
	241.6	108.7	
	<b>356.7</b>	<b>112.8</b>	

\*Los valores presentados en negrilla son el promedio de los datos de ITS obtenidos para cada tipo de llenante.

De los resultados presentados en la tabla 4.13 se determinó el **Cal** como llenante óptimo para las mezclas con AF-B2. Esta selección se realizó tomando el grupo de briquetas que presentaron mayor valor de resistencia conservada TSR.

En la tabla 4.14, se presentan los resultados de resistencia a tracción indirecta de la mezcla con AF-B2 para definición del contenido de asfalto espumado óptimo (AF).

*Tabla 4.3 Valores de resistencia promedio para diferentes contenidos de asfalto en la mezcla 85-15 AF-B2*

CONTENIDO DE ASFALTO (%)	85-15 AF-B2-CAL 1%		
	Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada (%)
	Seca	Húmeda	
2.23	392.8	164.3	42
2.24	287.3	148.7	52
2.45	318.7	177.2	56
2.76	436.1	183.1	42

Se observa que el contenido óptimo de asfalto AF para la mezcla 85-15 con **cal** al 1% en peso seco del material, es de **2.45%**, utilizando como criterio de selección la resistencia conservada.

Los valores de resistencia en seco y en húmedo para el contenido de asfalto seleccionado permiten clasificar a la mezcla como tipo BSM 1 según la Asphalt Academy, (2009) y clase 1 según Wirtgen GmbH, (2012), esto quiere decir que es un material apto para diseños con tráficos superiores a 6 millones de ejes equivalentes y se espera que tenga elevada resistencia al corte.

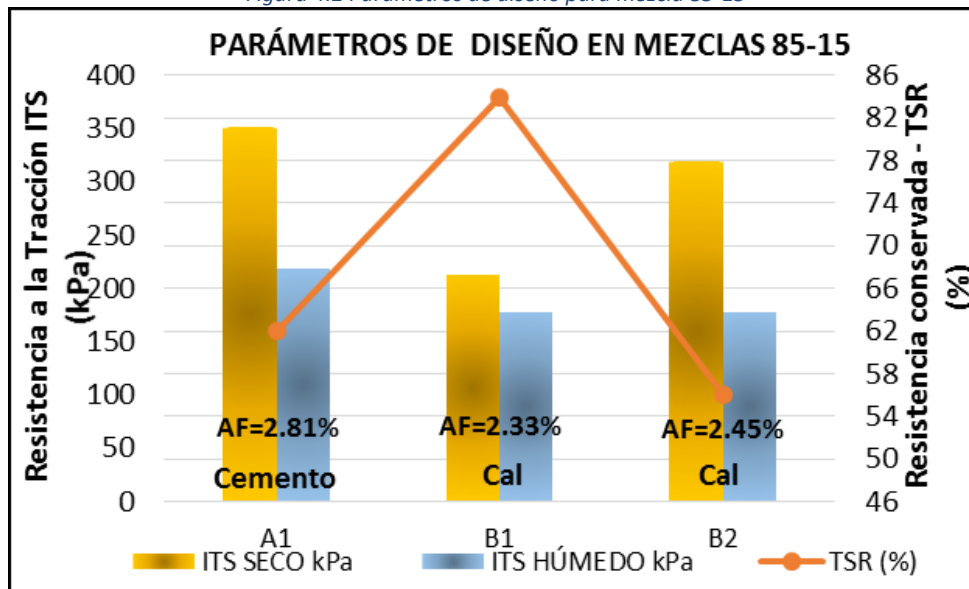
#### 4.3.4 Parámetros finales de diseño de Mezcla 85-15

En la tabla 4.15 se presenta el resumen de los parámetros para diseño con los distintos tipos de asfalto para la mezcla 85-15.

*Tabla 4.3 Diseño para mezcla 85-15 con asfalto espumado*

Tipo de Asfalto	Llenante (%)	Contenido de Asfalto Espumado (%)	85-15 AF		Resistencia Conservada (%)
			ITS seco (kPa)	ITS húmedo (kPa)	
A1	Cemento	2.81	352	219	62
B1	Cal	2.30	212	178	84
B2	Cal	2.45	319	177	56

Figura 4.2 Parámetros de diseño para mezcla 85-15



En la tabla 4.15 y figura 4.2 se observa que los valores más bajos de resistencia en húmedo y seco, se presentaron para las mezclas con los menores contenidos de asfalto espumado.

Aun cuando la mezcla era igual, se presenta un cambio en el llenante a utilizar que se puede deber inicialmente, a la diferencia en el origen del asfalto (tipo A y tipo B).

#### 4.4 Mezcla 70-30

##### 4.4.1 Definición de llenante - Cemento asfáltico (A1)

El Contenido óptimo teórico de asfalto espumado presentado en la tabla 4.1 varió en el momento de la inyección por lo que los valores reales se presentan en la tabla 4.16, así como los resultados de resistencia a la tracción indirecta en seco y húmedo sobre la mezcla 70-30 AF-A1.

Tabla 4.4 Definición de llenante óptimo teórico para mezcla 70-30. AF-A1

70-30 AF-A1-OPT. TEÓRICO: 2.6%			
Real inyectado: 2.6%			
LLENANTE	Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada (%)
	Seca*	Húmeda*	
CAL (1%)	186.7	47.5	41
	160.1	82.4	
	132.6	67.7	
	159.8	65.9	



<b>NATURAL</b>	262.2	0.0	<b>0.0</b>
	251.3	0.0	
	243.6	0.0	
	<b>252.4</b>	<b>0.0</b>	
<b>CEMENTO (1%)</b>	141.1	77.0	<b>36</b>
	171.7	62.0	
	178.9	38.8	
	<b>163.9</b>	<b>59.2</b>	

\*Los valores presentados en negrilla son el promedio de los datos de ITS obtenidos para cada tipo de llenante.

De los resultados presentados en la tabla 4.16 se determinó el **Cal** como llenante óptimo para las mezclas con AF-A1. Esta selección se realizó tomando el grupo de briquetas que presentaron mayor valor de resistencia conservada TSR, aun cuando ninguno de los valores supero el 50% lo que indica, según la guía TG2 (2009), que el material puede contener arcillas que hacen inefectivo el uso de asfalto espumado.

En la tabla 4.17, se presentan los resultados de resistencia a tracción indirecta de la mezcla con AF-A1 para definición del contenido de asfalto espumado óptimo (AF).

Tabla 4.4 Valores de resistencia promedio para diferentes contenidos de asfalto en la mezcla 85-15 AF-A1

<b>CONTENIDO DE ASFALTO (%)</b>	<b>70-30 AF-A1-CEMENTO AL 1%</b>		
	<b>Resistencia ITS</b>		<b>Resistencia</b>
	<b>(KPa)</b>		<b>Conservada</b>
	<b>Seca</b>	<b>Húmeda</b>	<b>(%)</b>
<b>2.4</b>	166.7	56.4	34
<b>2.6</b>	159.8	65.9	41
<b>2.8</b>	188.3	54.3	29
<b>3.0</b>	193.1	54.5	28

Se observa que el contenido óptimo de asfalto AF para la mezcla 70-30 con **cal** al 1% en peso seco del material, es de **2.6%**, utilizando como criterio de selección la resistencia conservada el cual no cumple con el mínimo recomendado por las guías de diseño, por lo que está mezcla no debería usarse.

Los valores de resistencia en seco y en húmedo para el contenido de asfalto seleccionado permiten clasificar a la mezcla como tipo BSM 3 según la Asphalt Academy, (2009) y clase 2 según Wirtgen GmbH, (2012), esto quiere decir que es un material apto para diseños con tráficos menores a 3 millones de ejes equivalentes.

#### 4.4.2 Definición de llenante - Cemento asfáltico (B1)

El Contenido óptimo teórico de asfalto espumado presentado en la tabla 4.1 varió en el momento de la inyección por lo que los valores reales se presentan en la tabla 4.18, así como los resultados de resistencia a la tracción indirecta en seco y húmedo sobre la mezcla 70-30 AF-B1.

Tabla 4.4 Definición de llenante óptimo teórico para mezcla 70-30- AF-B1

<b>70-30 AF-B1-OPT. TEÓRICO: 2.4%</b>			
<b>Real inyectado: 2.4%</b>			
LLENANTE	Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada (%)
	Seca*	Húmeda*	
<b>CAL (1%)</b>	246.2	205.8	<b>62</b>
	276.4	141.3	
	292.4	159.1	
	<b>271.7</b>	<b>168.7</b>	
<b>NATURAL</b>	302.0	25.1	<b>8</b>
	327.3	30.7	
	344.7	24.1	
	<b>324.7</b>	<b>26.6</b>	
<b>CEMENTO (1%)</b>	329.6	172.8	<b>65</b>
	345.9	183.3	
	173.5	194.1	
	<b>283.0</b>	<b>183.4</b>	

\*Los valores presentados en negrilla son el promedio de los datos de ITS obtenidos para cada tipo de llenante.

De los resultados presentados en la tabla 4.18 se determinó el **Cemento** como llenante óptimo para las mezclas con AF-B1. Esta selección se realizó tomando el grupo de briquetas que presentaron mayor valor de resistencia conservada TSR.

En la tabla 4.19, se presentan los resultados de resistencia a tracción indirecta de la mezcla con AF-B1 para definición del contenido de asfalto espumado óptimo (AF).

Tabla 4.4 Valores de resistencia promedio para diferentes contenidos de asfalto en la mezcla 70-30 AF-B1

<b>70-30 AF-B1-CAL 1%</b>			
CONTENIDO DE ASFALTO (%)	Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada (%)
	Seca	Húmeda	
	<b>2.24</b>	265.3	
<b>2.40</b>	283	183.4	65
<b>2.60</b>	320.6	191	60
<b>3.10</b>	329.6	158	48

Se observa que el contenido óptimo de asfalto AF para la mezcla 85-15 con **cal** al 1% en peso seco del material, es de **2.4%**, utilizando como criterio de selección la resistencia conservada.

Los valores de resistencia en seco y en húmedo para el contenido de asfalto seleccionado permiten clasificar a la mezcla como tipo BSM 1 según la Asphalt Academy, (2009) y clase 1 según Wirtgen GmbH, (2012), esto quiere decir que es un material apto para diseños con tráficos superiores a 6 millones de ejes equivalentes y se espera que tenga elevada resistencia al corte.

#### 4.4.3 Definición de llenante - Cemento asfáltico (B2)

El Contenido óptimo teórico de asfalto espumado presentado en la tabla 4.1 varió en el momento de la inyección por lo que los valores reales se presentan en la tabla 4.13, así como los resultados de resistencia a la tracción indirecta en seco y húmedo sobre la mezcla 70-30 AF-B2.

*Tabla 4.4 Definición de llenante óptimo teórico para mezcla 70-30. AF-B2*

LLENANTE	<b>70-30 AF-B2-OPT. TEÓRICO: 2.4%</b>		Resistencia Conservada (%)
	<b>Real inyectado: 2.35%</b>		
	Resistencia ITS (KPa)		
	Seca*	Húmeda*	
<b>CAL (1%)</b>	270.3	224.1	<b>62</b>
	305.2	155.7	
	321.3	173.9	
	<b>298.9</b>	<b>184.5</b>	
<b>NATURAL</b>	322.8	27.4	<b>9</b>
	360.5	38.9	
	376.4	26.9	
	<b>353.2</b>	<b>31.1</b>	
<b>CEMENTO (1%)</b>	353.3	188.7	<b>67</b>
	373.8	225.4	
	197.1	209.9	
	<b>308.8</b>	<b>208</b>	

*\*Los valores presentados en negrilla son el promedio de los datos de ITS obtenidos para cada tipo de llenante.*

De los resultados presentados en la tabla 4.20 se determinó el **Cemento** como llenante óptimo para las mezclas con AF-B2. Esta selección se realizó tomando el grupo de briquetas que presentaron mayor valor de resistencia conservada TSR.

En la tabla 4.21, se presentan los resultados de resistencia a tracción indirecta de la mezcla con AF-B2 para definición del contenido de asfalto espumado óptimo (AF).

*Tabla 4.4 Valores de resistencia promedio para diferentes contenidos de asfalto en la mezcla 70-30 AF-B2*

CONTENIDO DE ASFALTO (%)	70-30 AF-B2-CEMENTO 1%		
	Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada (%)
	Seca	Húmeda	
2.14	201.3	67.6	34
2.35	308.8	208	67
2.73	145.6	56	39
2.92	192	30	16

Se observa que el contenido óptimo de asfalto AF para la mezcla 85-15 con **Cemento** al 1% en peso seco del material, es de **2.35%**, utilizando como criterio de selección la resistencia conservada.

Los valores de resistencia en seco y en húmedo para el contenido de asfalto seleccionado permiten clasificar a la mezcla como tipo BSM 1 según la Asphalt Academy, (2009) y clase 1 según Wirtgen GmbH, (2012), esto quiere decir que es un material apto para diseños con tráficos superiores a 6 millones de ejes equivalentes y se espera que tenga elevada resistencia al corte.

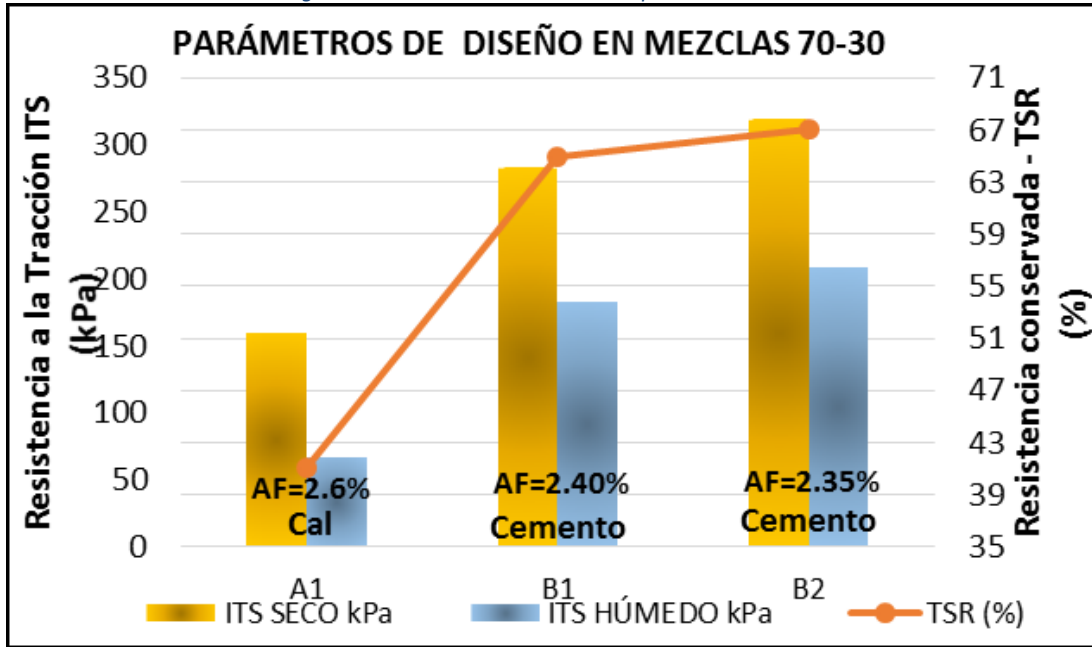
#### 4.4.4 Parámetros finales de diseño de Mezcla 70-30

En la tabla 4.22 y gráfica 4.3 se presenta el resumen de los parámetros para diseño con los distintos tipos de asfalto en la mezcla 70-30.

*Tabla 4.4 Diseño para mezcla 70-30 con asfalto espumado*

Tipo de Asfalto	70-30 AF				
	Llenante	Contenido de Asfalto Espumado	ITS seco	ITS húmedo	Resistencia Conservada
	(%)	(%)	(kPa)	(kPa)	(%)
A1	Cal	2.60	160	66	41
B1	Cemento	2.40	283	183	65
B2	Cemento	2.35	309	208	67

Figura 3.3.2.2 Parámetros de diseño para mezcla 70-30



En la tabla 4.22 y grafica 4.3 se observa una disminución en la resistencia en seco y en húmedo con el incremento del contenido de asfalto espumado.

Aun cuando la mezcla utilizada fue igual, se observa un cambio en el llenante utilizado, así como un aumento en la resistencia conservada TSR con la disminución del contenido de asfalto espumado.

#### 4.5 Mezcla 50-50

##### 4.5.1 Definición de llenante - Cemento asfáltico (A1)

El Contenido óptimo teórico de asfalto espumado presentado en la tabla 4.1 varió en el momento de la inyección por lo que los valores reales se presentan en la tabla 4.23, así como los resultados de resistencia a la tracción indirecta en seco y húmedo sobre la mezcla 50-50 AF-A1.

Tabla 4.5 Definición de llenante óptimo teórico para mezcla 50-50. AF-A1

LLENANTE	50-50 AF-A1-OPT. TEÓRICO: 2.4%		Resistencia Conservada (%)
	Real inyectado: 2.5%		
	Resistencia ITS (KPa)		
	Seca*	Húmeda*	
	171.9	61.9	

<b>CAL (1%)</b>	165.1	70.6	<b>38</b>
	160.9	58.5	
	<b>165.9</b>	<b>63.6</b>	
<b>NATURAL</b>	287.4	5.3	<b>2.4</b>
	182.5	7.0	
	264.3	5.2	
	<b>244.7</b>	<b>5.8</b>	
<b>CEMENTO (1%)</b>	148.2	148.2	<b>32</b>
	220.0	70.2	
	266.2	53.3	
	<b>211.5</b>	<b>67.5</b>	

\*Los valores presentados en negrilla son el promedio de los datos de ITS obtenidos para cada tipo de llenante.

De los resultados presentados en la tabla 4.23 se determinó el **Cal** como llenante óptimo para las mezclas con AF-A1. Esta selección se realizó tomando el grupo de briquetas que presentaron mayor valor de resistencia conservada TSR aun cuando ninguno de los valores supero el 50 lo que indica, según la guía TG2 (2009), que el material puede contener arcillas que hacen inefectivo el uso de asfalto espumado.

En la tabla 4.24, se presentan los resultados de resistencia a tracción indirecta de la mezcla con AF-A1 para definición del contenido de asfalto espumado óptimo (AF).

Tabla 4.5 Valores de resistencia promedio para diferentes contenidos de asfalto en la mezcla 50-50 AF-A1

CONTENIDO DE ASFALTO (%)	50-50 AF-A1-CAL AL 1%		
	Resistencia ITS		Resistencia
	(KPa)		Conservada
	Seca	Húmeda	(%)
<b>2.3</b>	219.9	67.1	31
<b>2.5</b>	165.9	63.6	38
<b>2.7</b>	171.1	74.5	44
<b>2.9</b>	162.2	85.6	53

Se observa que el contenido óptimo de asfalto AF para la mezcla 50-50 con **cal** al 1% en peso seco del material, es de **2.9%**, utilizando como criterio de selección la resistencia conservada el cual no cumple con el mínimo recomendado por las guías de diseño, por lo que esta mezcla no debería usarse.

Los valores de resistencia en seco y en húmedo para el contenido de asfalto seleccionado permiten clasificar a la mezcla como tipo BSM 3 según la Asphalt Academy, (2009) y No adecuado según Wirtgen GmbH, (2012), esto quiere decir que es un material No apto para diseños de pavimentos.

#### 4.5.2 Definición de llenante - Cemento asfáltico (B1)

El Contenido óptimo teórico de asfalto espumado presentado en la tabla 4.1 varió en el momento de la inyección por lo que los valores reales se presentan en la tabla 4.25, así como los resultados de resistencia a la tracción indirecta en seco y húmedo sobre la mezcla 50-50 AF-B1.

Tabla 4.5 Definición de llenante óptimo teórico para mezcla 50-50- AF-B1

LLENANTE	Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada (%)
	Seca*	Húmeda*	
	<b>CAL (1%)</b>	229.4 256.5 269.1 <b>251.7</b>	188.4 130.5 155.7 <b>158.2</b>
<b>NATURAL</b>	276.0 308.8 322.8 <b>302.5</b>	24.2 28.7 22.9 <b>25.2</b>	<b>8</b>
<b>CEMENTO (1%)</b>	311.6 329.1 174.8 <b>271.8</b>	162.6 172.9 179.2 <b>171.6</b>	<b>63</b>

\*Los valores presentados en negrilla son el promedio de los datos de ITS obtenidos para cada tipo de llenante.

De los resultados presentados en la tabla 4.25 se determinó el **Cemento** como llenante óptimo para las mezclas con AF-B1. Esta selección se realizó tomando el grupo de briquetas que presentaron mayor valor de resistencia conservada TSR.

En la tabla 4.26, se presentan los resultados de resistencia a tracción indirecta de la mezcla con AF-B1 para definición del contenido de asfalto espumado óptimo (AF).

Tabla 4.5 Valores de resistencia promedio para diferentes contenidos de asfalto en la mezcla 50-50 AF-B1

CONTENIDO DE ASFALTO (%)	Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada (%)
	Seca	Húmeda	
	<b>2.20</b>	391.4	212.2
<b>2.36</b>	271.8	171.6	63
<b>2.60</b>	498.9	185.9	37
<b>2.80</b>	454.5	173.5	38

Se observa que el contenido óptimo de asfalto AF para la mezcla 50-50 con **Cemento** al 1% en peso seco del material, es de **2.36%**, utilizando como criterio de selección la resistencia conservada.

Los valores de resistencia en seco y en húmedo para el contenido de asfalto seleccionado permiten clasificar a la mezcla como tipo BSM 1 según la Asphalt Academy, (2009) y clase 1 según Wirtgen GmbH, (2012), esto quiere decir que es un material apto para diseños con tráficos superiores a 6 millones de ejes equivalentes y se espera que tenga elevada resistencia al corte.

#### 4.5.3 Definición de llenante - Cemento asfáltico (B2)

El Contenido óptimo teórico de asfalto espumado presentado en la tabla 4.1 varió en el momento de la inyección por lo que los valores reales se presentan en la tabla 4.27, así como los resultados de resistencia a la tracción indirecta en seco y húmedo sobre la mezcla 50-50 AF-B2.

*Tabla 4.5 Definición de llenante óptimo teórico para mezcla 50-50. AF-B2*

LLENANTE	Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada (%)
	Seca*	Húmeda*	
	<b>50-50 AF-B2-OPT. TEÓRICO: 2.4%</b>		
<b>Real inyectado: 2.4%</b>			
<b>CAL (1%)</b>	364.8	90.0	<b>33</b>
	338.1	157.6	
	334.8	97.7	
	<b>345.9</b>	<b>115.1</b>	
<b>NATURAL</b>	400.6	20.3	<b>6</b>
	328.7	20.1	
	294.1	19.2	
	<b>341.2</b>	<b>19.9</b>	
<b>CEMENTO (1%)</b>	398.8	140.8	<b>35</b>
	324.1	136.0	
	384.0	114.4	
	<b>368.9</b>	<b>130.4</b>	

*\*Los valores presentados en negrilla son el promedio de los datos de ITS obtenidos para cada tipo de llenante.*

De los resultados presentados en la tabla 4.27 se determinó el **Cemento** como llenante óptimo para las mezclas con AF-B2. Esta selección se realizó tomando el grupo de briquetas que presentaron mayor valor de resistencia conservada TSR aun cuando ninguno



de los valores supero el 50% lo que indica, según la guía TG2 (2009), que el material puede contener arcillas que hacen inefectivo el uso de asfalto espumado.

En la tabla 4.28, se presentan los resultados de resistencia a tracción indirecta de la mezcla con AF-B2 para definición del contenido de asfalto espumado óptimo (AF).

*Tabla 4.5 Valores de resistencia promedio para diferentes contenidos de asfalto en la mezcla 50-50 AF-B2*

CONTENIDO DE ASFALTO (%)	50-50 AF-B2-CEMENTO 1%		
	Resistencia ITS (KPa)		Resistencia Conservada
	Seca	Húmeda	(%)
	2.20	169.0	83.6
2.40	368.9	130.4	35
2.60	200.7	74.1	37
2.80	189.7	70.9	37

Se observa que el contenido óptimo de asfalto AF para la mezcla 50-50 con **Cemento** al 1% en peso seco del material, es de **2.2%**, utilizando como criterio de selección la resistencia conservada.

Los valores de resistencia en seco y en húmedo para el contenido de asfalto seleccionado permiten clasificar a la mezcla como tipo BSM 3 según la Asphalt Academy, (2009) y clase 2 según Wirtgen GmbH, (2012), esto quiere decir que es un material apto para diseños de pavimentos con menos de 3 millones de ejes equivalentes.

#### 4.5.4 Parámetros finales de diseño de Mezcla 50-50

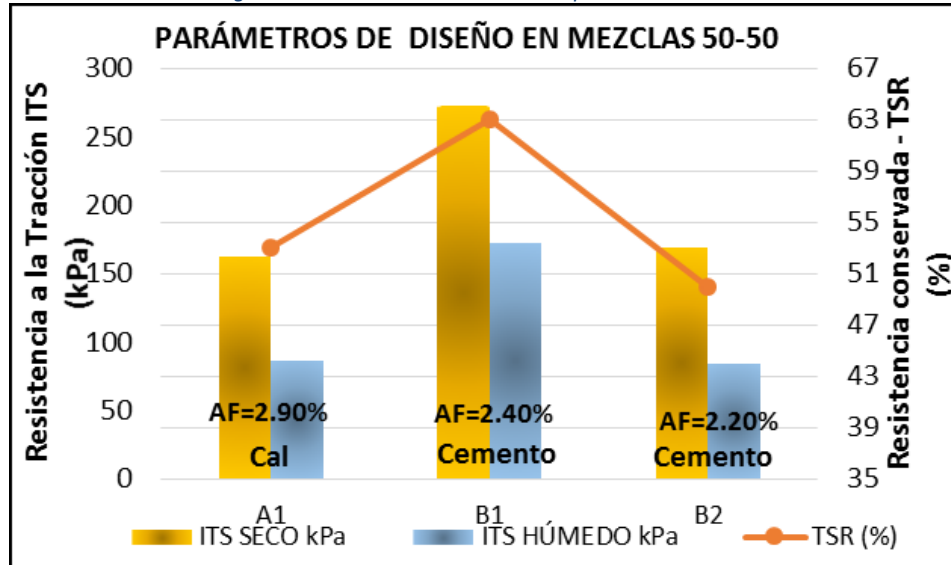
En la tabla 4.29 y gráfica 4.4 se presenta el resumen de los parámetros para diseño con los distintos tipos de asfalto en la mezcla 50-50.

*Tabla 4.5 Diseño para mezcla 50-50 con asfalto espumado*

Tipo de Asfalto	Llenante (%)	50-50 AF			Resistencia Conservada (%)
		Contenido de Asfalto Espumado (%)	ITS seco (kPa)	ITS húmedo (kPa)	
		A1	Cal	2.90	
B1	Cemento	2.40	272	172	63
B2	Cemento	2.20	169	84	50

En los resultados de la anterior tabla no se observa una dependencia de los valores de resistencia conservada con el contenido de espuma de asfalto.

Figura 3.3.2.2 Parámetros de diseño para mezcla 50-50



En la tabla 4.29 y figura 4.4 no se observa dependencia de los valores de ITS y TSR en función del contenido de asfalto espumado.

Aun cuando la mezcla era igual, se presenta un cambio en el llenante a utilizar que se puede deber inicialmente, a la diferencia en el origen del asfalto (tipo A y tipo B).

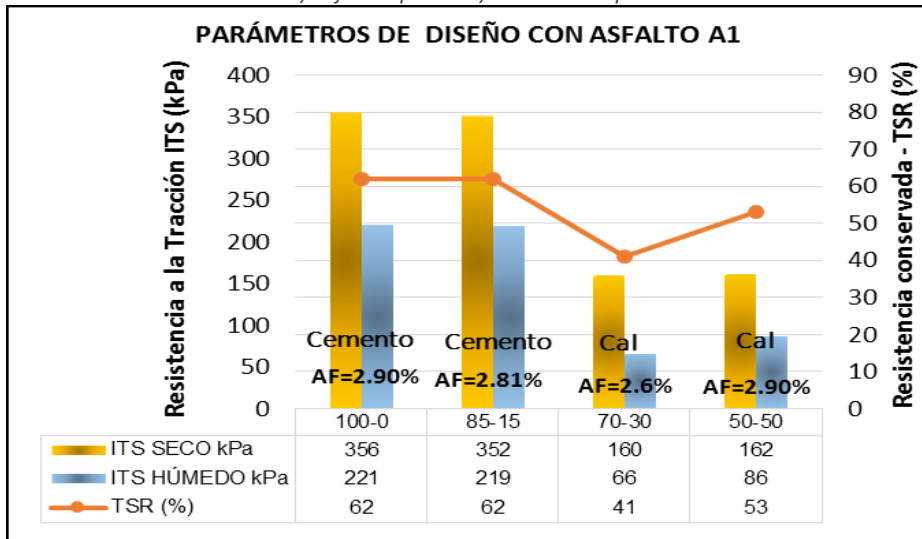
#### 4.6 Resumen de Diseños de fórmulas de trabajo

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

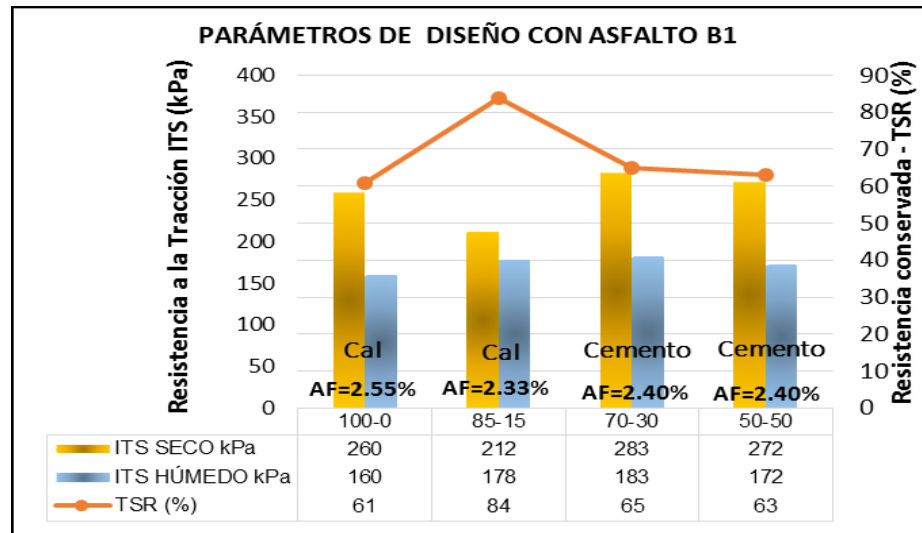
Tabla 4.6 Recopilación de datos para fórmulas de trabajo

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

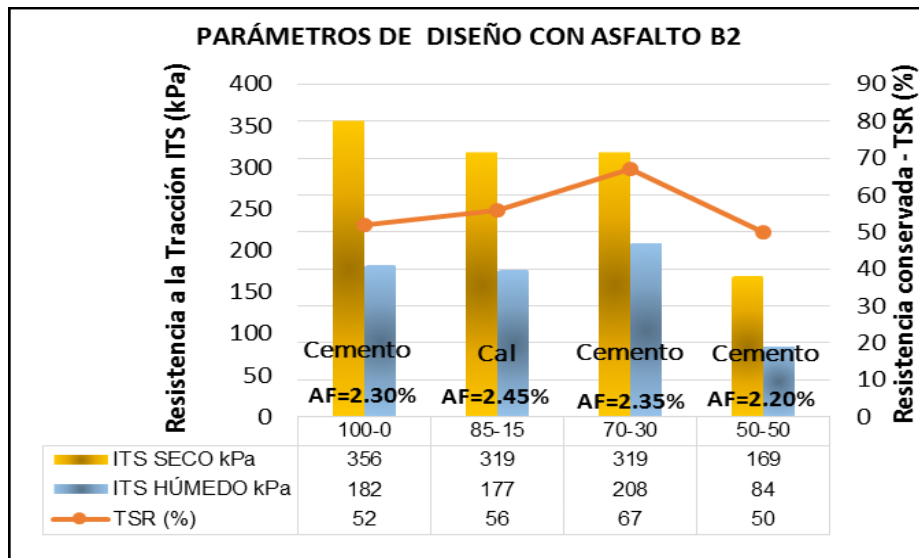
Figura 3.3.2.2 Parámetros de diseño de mezcla para los diferentes tipos de asfalto. a) Asfalto tipo A1. b) AAsfalto tipo B1. c) Asfalto tipo B2. d) Resumen de parámetros.



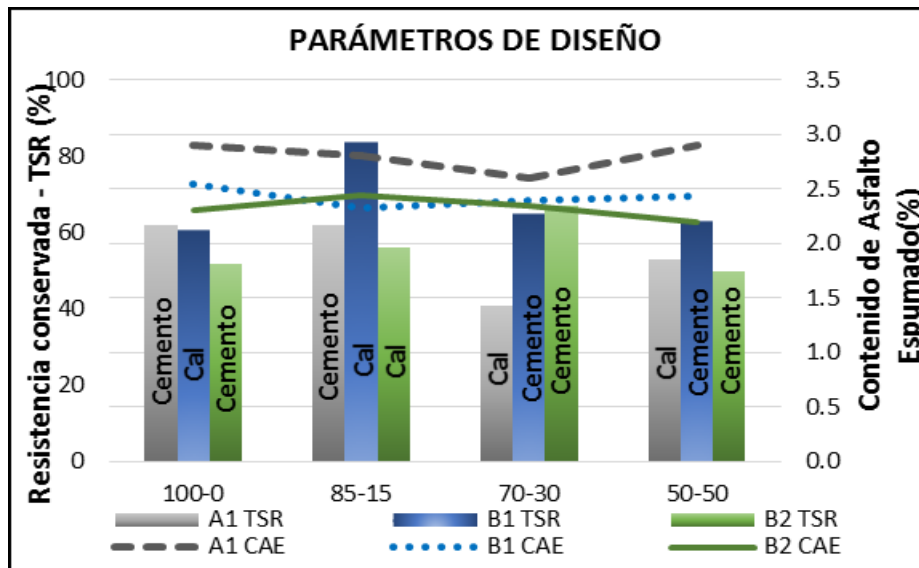
a)



b)



c)



d)

La figura 4.5 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 tipo de asfalto 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 del llenante utilizado 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 gráfica 4.5 b permite observar que las mezclas con un mismo 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.

La determinación de calidad de la mezcla no debe hacerse en función del valor TSR ya que como se observa en la gráfica 4.5, existen valores de TSR elevados, no siempre corresponden a valores altos de resistencia en seco ni en húmedo.

Se puede concluir que el origen de asfalto afecta los parámetros de diseño, tanto en el llenante como en las resistencias conservadas y contenidos finales a utilizar.

#### **4.7 BIBLIOGRAFIA**

Asphalt Academy. (2009). TG2-A guideline for the Design and construction of Bitumen Stabilised Materials. (2da.). Pretoria: Asphalt Academy.

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

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DEL ENSAYO TRIAXIAL MONOTÓNICO

### 5.1 Introducción

Ya que la envolvente de falla en el diagrama Mohr Coulomb se considera suficiente para determinar los parámetros  $c$  y  $\varphi$  de los BSM, Ben, (2014), los valores presentados para dichos parámetros en el presente capítulo se obtuvieron siguiendo la metodología descrita en el capítulo 3 y se presentan los círculos de falla obtenidos así como las curvas esfuerzo deformación para cada mezcla granular-RAP-Espuma de asfalto.

En la tabla 5.1 se indican, para cada concentración de Material Granular - RAP, el llenante utilizado y el contenido de asfalto espumado con los cuales se fabricaron briquetas de diámetro 100 mm y altura 200 mm para fallarlas en el ensayo triaxial.

*Tabla 5.1 Concentraciones de Asfalto y tipo de llenante de las mezclas con variación de Granular - RAP.*

Tipo de Asfalto	100-0		85-15		70-30		50-50	
	LL	CAE (%)	LL	CAE (%)	LL	CAE (%)	LL	CAE (%)
<b>A1</b>	Ce	2.90	Ce	2.81	C	2.60	C	2.90
<b>B1</b>	C	2.55	C	2.33	Ce	2.40	Ce	2.40
<b>B2</b>	Ce	2.30	C	2.45	C	2.35	Ce	2.20

*LL: Tipo de llenante. CAE: Contenido de asfalto espumado. Ce: Cemento. C: Cal*

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.

### 5.2 Mezcla 100-0

#### 5.2.1 Cemento asfáltico (A1)

En la tabla 5.2, se presentan los resultados de los ensayos triaxiales obtenidos para la fórmula de trabajo (FT) 100-0 con asfalto espumado (AF) A1.

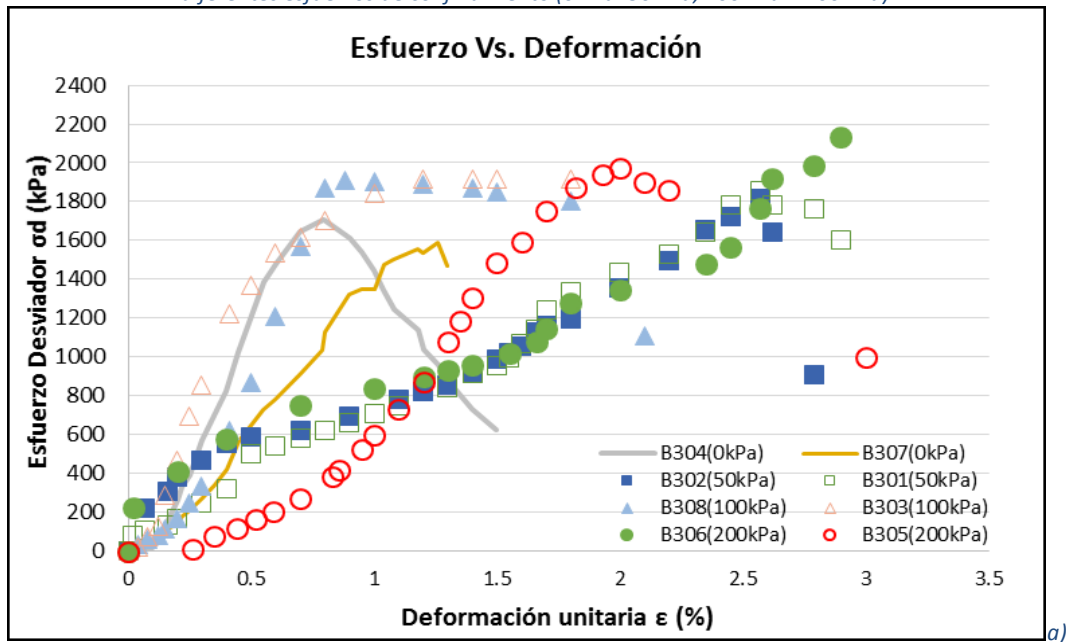
Tabla 5.2. Resumen de propiedades físicas y mecánicas para la mezcla 100-0 AF-A1

FT09-MEZCLA 100-0 AF-A1 2.9% CEMENTO 1%								
Esfuerzo de confinamiento- $\sigma_c$ (kPa)	Probeta	Peso Unitario seco de probetas - $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Esfuerzo a la falla - $\sigma_f$ (kPa)	Deformación unitaria a la falla- $\epsilon$ (%)	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción Interna (°)	Cohesión retenida-RetC	Coefficiente de correlación
0	B304	17.65	1704	0.79	530	27°	70.7	0.646
	B307	19.27	1591	1.30				
50	B308	18.73	1908	0.88				
	B303	17.93	1958	1.40				
100	B302	18.21	1818	2.57				
	B301	18.04	1974	2.60				
200	B305	18.22	2250	3.47				
	B306	18.40	1858	2.00				
100 W	B309	18.59	1314	1.80				

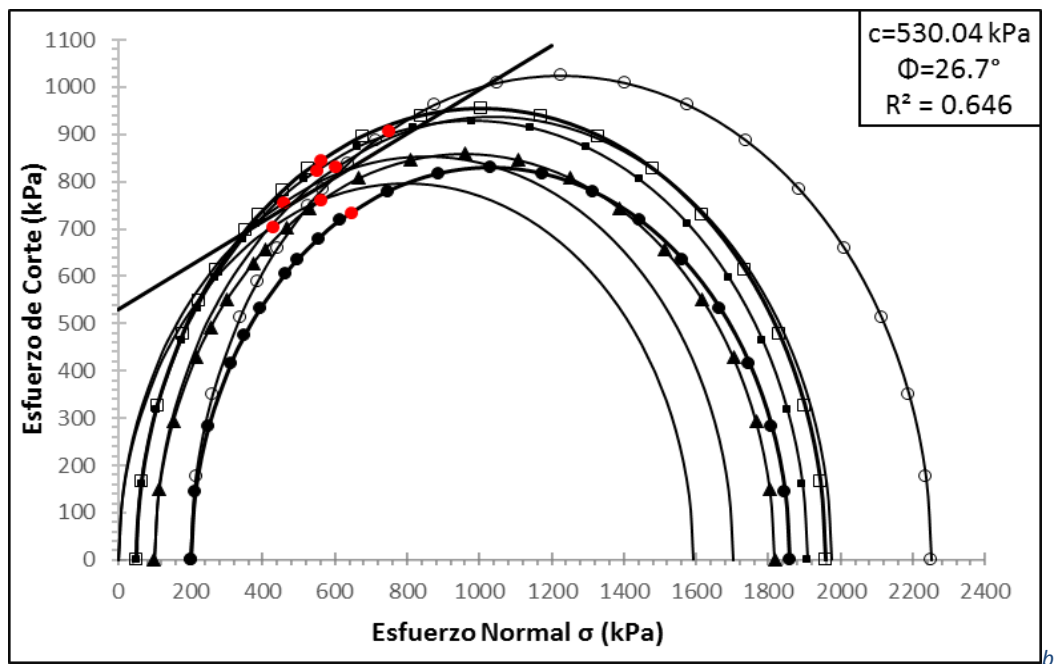
Los valores de Fricción y cohesión obtenidos, permiten clasificar a la mezcla como tipo BSM3 según la Asphalt Academy, (2009). Se resalta que el valor de cohesión (c) para esta mezcla fue elevado ( $c > 250\text{kPa}$  para BSM 1).

En la figura 5.1, se observan las curvas esfuerzo deformación y los círculos de Mohr obtenidos para las diferentes probetas ensayadas.

Figura 5.2.1. a) Curvas esfuerzo deformación b) Envolvente de falla Mohr – Coulomb para la mezcla 100-0 AF-A1 con diferentes esfuerzos de confinamiento (0 kPa, 50 kPa, 100 kPa Y 200 kPa)







Los valores obtenidos de los parámetros de resistencia al corte, son significativamente más bajos que los reportados por la mayoría de autores para materiales granulares y con contenidos de asfalto entre 2% al 4%.

El valor de correlación obtenido para la envolvente de falla de los círculos de Mohr, es bajo respecto a valores reportados en la literatura. Ver tabla 5.3.

En la tabla 5.3 se presenta un resumen de valores de  $c$  y  $\phi$  similares a los obtenidos en el presente trabajo presentados por distintos autores para materiales sin RAP.

*Tabla 5.2 Resultados de  $C$  y  $\phi$  reportados por diferentes autores para materiales sin RAP.*

Ángulo de fricción Interna (°)	Cohesión (kPa)	Autor	Observaciones
27	343	González, (2009)	Mezcla con 4.0% de AF y 1% de cemento sin RAP. Mezcla de material <b>H40*</b> y <b>AP5*</b> con contenido de finos (pasa #200) del 4%.
26	140	H.L Theyse et al., (2004)	Mezcla con 4.0% de AF y 1% de cemento sin RAP. Clasificación <b>G1</b> .
22.5	170.8	Achille, (2013. p.111)	Mezcla con 2.4% de AF y 0% de cemento. Triturado Dolorita. Pasa # 200 entre 6.4% y 7%.

29	290	H. L Theyse, (2007) Mezcla con 0% de AF y 0% de cemento. Roca Caliza y materiales de calidad media arenosos.
----	-----	--

**\*QC:(Quartzite Crushed- Triturado de Hornfels-roca metamórfica). G1. Material triturado de roca con CBR>100%. G2. Material triturado de roca con CBR>80%. H40: Material triturado Neo Zelandés de roca tamaño máximo de 40mm. AP5: Polvo de material Neo Zelandes triturado.**

Como se observa en la tabla anterior, los valores reportados tienen como característica el tener elevados contenidos de asfalto espumado o materiales de calidad media.

### 5.2.2 Cemento asfáltico (B1)

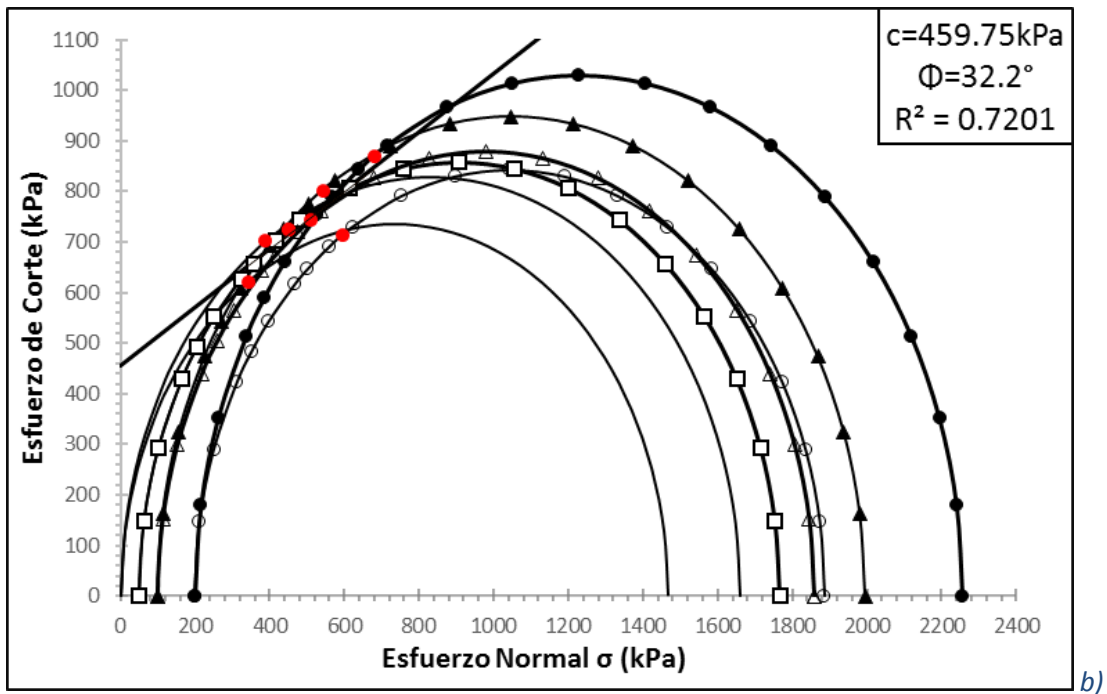
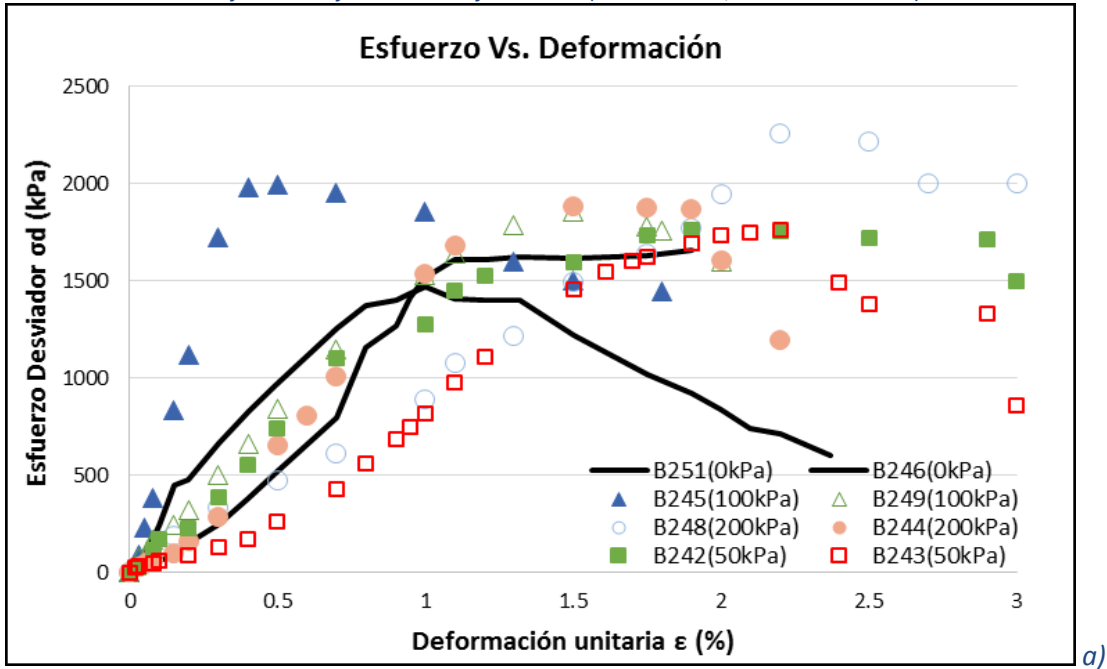
En la tabla 5.4, se presentan los resultados de los ensayos triaxiales obtenidos para la fórmula de trabajo (FT) 100-0 con asfalto espumado (AF) (B1).

*Tabla 5.2 Resumen de propiedades físicas y mecánicas para la mezcla 100-0 AF-B1*

FT05-MEZCLA 100-0 AF-B1 AF=2.55% - CAL AL 1%								
Esfuerzo de confinamiento- $\sigma_c$ (kPa)	Probeta	Peso Unitario seco de probetas - $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Esfuerzo a la falla - $\sigma_f$ (kPa)	Deformación unitaria a la falla- $\epsilon$ (%)	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción Interna (°)	Cohesión retenida-RetC (%)	Coefficiente de correlación
0	B246	20.91	1659	1.9	460	32°	79.1	0.720
	B251	20.19	1469	1.0				
50	B243	20.77	1766	2.2				
	B242	20.65	1763	1.9				
100	B245	20.29	1995	0.5				
	B249	20.12	1858	1.5				
200	B244	20.24	1990	2.7				
	B248	20.72	2257	2.2				
100 W	B241	20.72	1556	1.69				
	B250	20.85	1533	1.4				

En la figura 5.2 se presentan las curvas esfuerzo deformación y los círculos de Mohr obtenidos para las diferentes probetas ensayadas.

Figura 5.2.2 a) Curvas esfuerzo deformación b) Envolvente de falla Mohr – Coulomb para la mezcla 100-0 AF-B1 con diferentes esfuerzos de confinamiento (0 kPa, 50 kPa, 100 kPa Y 200 kPa)



Los valores de Fricción  $\phi = 32^\circ$  y cohesión  $c= 460$  kPa obtenidos, confirman la clasificación de la mezcla como tipo BSM2 según la Asphalt Academy, (2009). Se resalta que los valores de cohesión retenida (RetC) y cohesión (c) para esta mezcla fueron elevados (BSM1 > 75% y  $c > 250\text{kPa}$ ). Estos son comparables con los resultados reportados en literatura para

materiales tipo grava con ángulos de fricción entre **35° y 45°** como los mencionados por Ebels & Jenkins, (2007b), cercanos a los valores de fricción de **30°** de materiales principalmente arenosos con contenidos de asfalto espumado entre 2.5 % y 3% observados en Theyse et al., (2004), así como para materiales con contenidos de asfalto espumado superiores a 3% y sin cemento o cal como los reportados en K J Jenkins et al., (2007) y González, (2009) reporta valores de  $\phi = 33^\circ$ ,  $c=469$  kPa para un material granular con un contenido de asfalto espumado de 2.0% y 1% de cemento.

Los valores obtenidos de los parámetros de resistencia al corte, son significativamente más bajos que los reportados por la mayoría de autores (ver referencia en la tabla 5.6) para materiales granulares sin contenido de RAP y con contenidos de asfalto entre 2% y 4%.

### 5.2.3 Cemento asfáltico (B2)

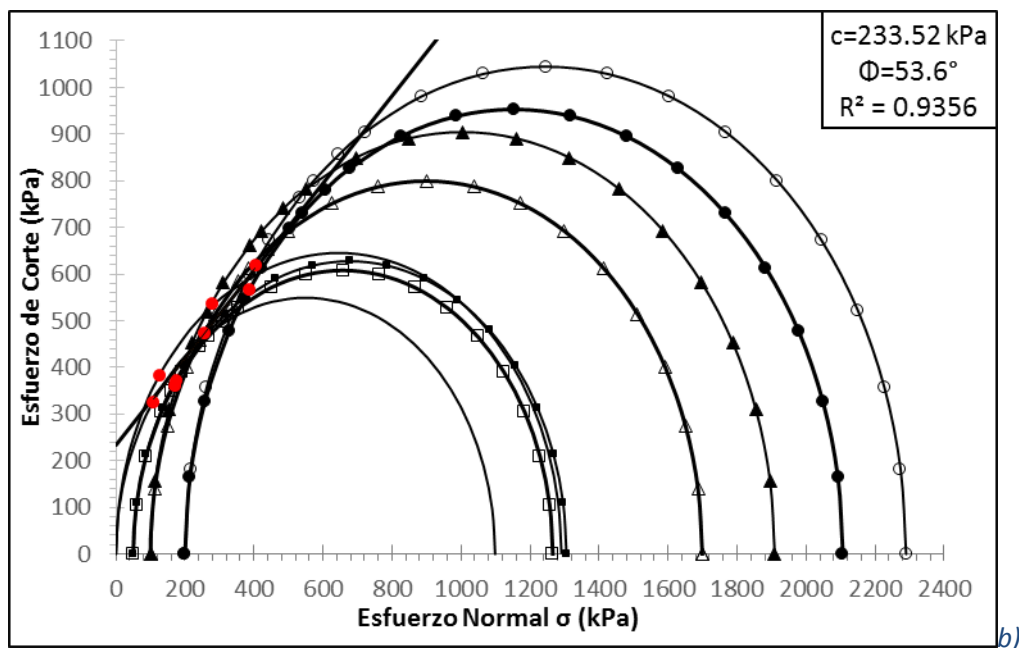
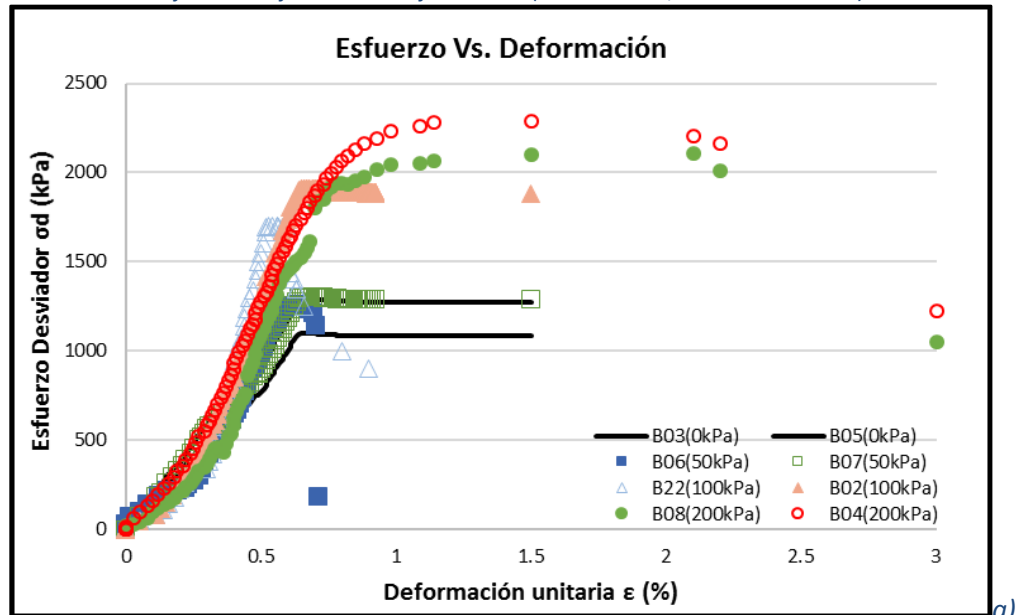
En la tabla 5.5, se resumen los resultados de los ensayos triaxiales obtenidos para la fórmula de trabajo (FT) 100-0 con asfalto espumado (AF) (B2).

Tabla 5.2 Resumen de propiedades físicas y mecánicas para la mezcla 100-0 AF-B2

FT01-MEZCLA 100-0 AF-B2 AF=2.30% - CEMENTO AL 1%								
Esfuerzo de confinamiento- $\sigma_c$ (kPa)	Probeta	Peso Unitario seco de probetas - $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Esfuerzo a la falla - $\sigma_f$ (kPa)	Deformación unitaria a la falla- $\epsilon$ (%)	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción Interna (°)	Cohesión retenida-RetC (%)	Coefficiente de correlación
<b>0</b>	B05	19.18	1099	0.69	233	54	30.5	0.936
	B03	19.28	1291	0.70				
<b>50</b>	B07	20.01	1305	0.67				
	B06	19.63	1266	0.64				
<b>100</b>	B02	19.86	1909	0.69				
	B01	20.55	1699	0.62				
<b>200</b>	B04	21.01	2290	1.50				
	B08	21.10	2106	2.10				
<b>100 W</b>	B09	19.81	580	0.55				
	B10	19.38	660	0.76				

En la figura 5.3 se presentan las curvas esfuerzo deformación y los círculos de Mohr obtenidos para las diferentes probetas ensayadas.

Figura 5.2.2 a) curvas esfuerzo de formación (b) Envolvente de falla Mohr – Coulomb para la mezcla 100-0 AF-B2 con diferentes esfuerzos de confinamiento (0 kPa, 50 kPa, 100 kPa Y 200 kPa)



Los valores de Fricción  $\phi = 54^\circ$  y cohesión  $c = 233 \text{ kPa}$  obtenidos, confirman la clasificación de la mezcla como tipo BSM1 según la Asphalt Academy, (2009) obtenida en el diseño de mezcla del capítulo 4. Sin embargo, se resalta que el valor de cohesión retenida es

significativamente bajo, lo que ocasionaría que la mezcla no fuese apta para uso en vías como material de pavimento (material no apto < 50%).

En la tabla 5.6 se presenta un resumen de valores de  $c$  y  $\phi$  presentados por distintos autores para materiales granulares sin RAP.

*Tabla 5.2 Resultados de  $C$  y  $\phi$  reportados por diferentes autores para materiales sin RAP.*

Ángulo de fricción Interna (°)	Cohesión (kPa)	Autor	Observaciones
<b>49.1</b>	44	I. ebels Lcharacteristics of material properties	Mezcla con 0% de AF y 0% de cemento sin RAP. Mezcal de triturado de roca y grava natural – <b>QC*</b> .
<b>54</b>	120	González, (2009)	Mezcla con 0% de AF y 0% de cemento sin RAP. Mezcla de material <b>H40*</b> y <b>AP5*</b> con contenido de finos (pasa #200) del 4%
<b>55</b>	65	Mulusa, (2009)	Mezcla con 0% de AF y 0% de cemento sin RAP. Material de alta densidad de calidad elevada reportado por los autores. Se resalta el bajo valor de cohesión.
<b>52</b>	193	Theyse et. al,(1996)	Clasificación <b>G1</b> con contenido De finos (pasa#200) < 4%.
<b>52</b>	150	Jenkins & Ebels, (2007)	Mezcla con 0% de AF y 0% de cemento sin RAP. Clasificación <b>G1</b> con Contenido De finos (pasa#200) < 4%.
<b>55</b>	115	Jingang, et al., (2011)	Mezcla con 0% de AF y 0% de cemento. Clasificación <b>G1</b> con contenido De finos (pasa#200) < 4%.
<b>51.73</b>	109	Van Zyl, (2015)	Mezcla con 0% de AF y 1% de cemento Sin RAP. Clasificación <b>G2</b> con contenido de finos (pasa#200) < 12%.
<b>46</b>	386	González, (2009)	Mezcla con 2.25% de AF y 1% de cemento sin RAP. Mezcla de material <b>H40*</b> y <b>AP5*</b> con contenido de finos (pasa #200) del 4%
<b>45.5</b>	516	Ben, (2014)	Mezcla con 2.4% de AF y 0% de cemento sin RAP. Clasificación <b>G2</b> con contenido de finos (pasa#200) < 12%.
<b>47</b>	109	Twagira, et al., (2012)	Mezcla con 2.0% de AF y 0% de cemento sin RAP. Clasificación <b>G2</b> con contenido De finos (pasa#200) < 12%.
<b>46</b>	311	Jenkins & Collings, (2016)	Mezcla con 2.0% de AF y 1% de cemento. Material <b>QC</b> No Plástico y con CBR superior al 90%

54.6	562	(K.J. Jenkins, 2000)	Mezcla con 2.0% de AF y 0% de cemento sin RAP. Mezcla <b>G1</b> y <b>G2</b> con contenido de fino (pasa #200) 4%-12%.
44.7	166	(K.J. Jenkins, 2000)	Mezcla con 2.5% de AF y 0% de cemento sin RAP. Clasificación <b>G1</b> y <b>G2</b> con contenido De finos (pasa#200) 4%-12%.
53	240	(K J Jenkins et al., 2007)	Mezcla con 2.2% de AF y 0% de cemento.

**\*QC:(Quarzte Crushed - Triturado de Hornfels-roca metamórfica). G1: Material triturado de roca con CBR>100%. G2. Material triturado de roca con CBR>80%. H40: Material triturado Neo Zelandés de roca tamaño máximo de 40mm. AP5: Polvo de material Neo Zelandes triturado.**

Los datos reportados por K J Jenkins, Long, & Ebels, (2007) son los más cercanos a los obtenidos en el presente trabajo. Ambas mezclas poseen valores semejantes de espuma de asfalto (2.2% y 2.3%, respectivamente).

En la figura 5.3 a) curva esfuerzo-deformación se puede observar que la pendiente - Modulo tangente inicial -E) se incrementa ligeramente con el aumento del confinamiento.

Adicionalmente, no se observa un aumento en los valores de deformación a la falla con el aumento de las presiones de cámara, salvo para las probetas cuyo confinamiento fue de 200 kPa.

El valor de correlación obtenido para la envolvente de falla de los círculos de Mohr, se encuentra cercano a los reportados por diferentes autores con valores superiores a 0.93. (Čížková, et al., 2016; Collings & Jenkins, 2011; Ebels, 2007a; Muthen, 1998) entre otros.

#### 5.2.4 Resumen de Resultados para mezcla 100-0

En la tabla 5.7, se resumen los resultados para las mezclas con 100% de granulares y para cada tipo de asfalto espumado utilizado.

*Tabla 5.2 Resultados de ensayo triaxial monotónico para mezcla 100-0 con diferentes asfaltos.*

MEZCLA (OPT. ASF) (LLENANTE)	Esfuerzo de confinamiento (kPa)	Esfuerzo o a la falla (kPa)	Deformación unitaria a la falla-ε (%)	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción Interna (°)	Cohesión retenida (RetC) (%)	Coefficiente de correlación	TSR (%)
	0	1659	0.79					

<b>FT09-A1</b> FA: 2.9% (1% CEM) ITS <sub>SECO</sub> = 356kPa ITS <sub>HUM.</sub> = 221kPa HL: 13 s ER: 34		1469	1.30	531	27	70.7	0.646	62
	50	1766	0.88					
		1763	1.40					
	100	1995	2.57					
		1858	2.60					
	200	1990	3.47					
		2257	2.00					
	100 W	1556	1.80					
		0	1659					
		1469	1.0					
	50	1766	2.2					
		1763	1.9					
<b>FT05-B1</b> (FA: 2.55%) (1% CAL) ITS <sub>SECO</sub> = 260kPa ITS <sub>HUM.</sub> = 160kPa HL: 16 s ER: 12	100	1995	0.5	461	32	79.1	0.720	61
		1858	1.5					
	200	1990	2.7					
		2257	2.2					
	100 W	1556	1.69					
		1533	1.4					
	0	1099	0.69					
	1291	0.70						
<b>FT01-B2</b> (FA: 2.3%) (1% CEM) ITS <sub>SECO</sub> = 355kPa ITS <sub>HUM.</sub> = 182kPa TSR: 52% HL: 13 s ER: 18	50	1305	0.67	234	54	30.5	0.936	52
		1266	0.64					
	100	1909	0.69					
		1699	0.62					
	200	2290	1.50					
		2106	2.10					
	100 W	580	0.55					
	660	0.76						

Se observa una correspondencia entre los valores de relación de expansión de la espuma asfáltica (ER) y el contenido final de asfalto inyectado. Es decir que para valores elevados de ER se tienen los contenidos más altos de espuma.

Autores como Mathaniya Twagira, (2010), Jenkins et al., (2012), entre otros plantean que la cohesión retenida (RetC), depende entre otros factores, del llenante utilizado (cal o cemento) los cuales siempre aumentan la resistencia a la humedad respecto a un material que no posee llenante activo.

En los resultados obtenidos en el presente trabajo se tiene que los valores de cohesión retenida (RetC) fueron mayores en la mezcla con FT05B1 con cal al 1%, seguida por la mezcla FT09-A1 con cemento y finalmente, la mezcla FT01-B2 con cemento la cual



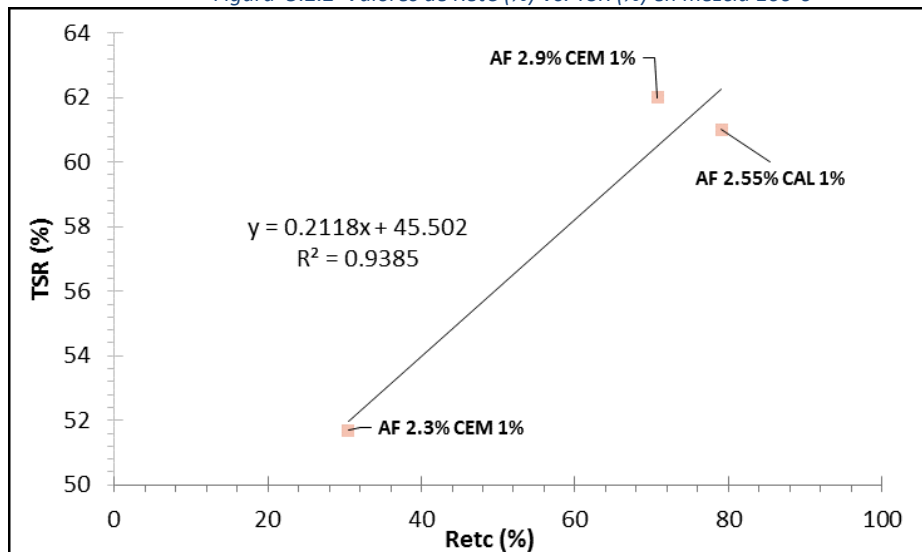
presentó la cohesión retenida más baja, este comportamiento coincide con lo observado para las mismas mezclas en la definición de los parámetros de diseño de mezcla vistos en el capítulo 4, en donde se determinó que las mezclas con asfalto tipo A1 y B1 presentaron las resistencias conservadas más altas.

El valor obtenido de Ret C para B2 se puede explicar dado que fue la mezcla con el menor contenido de asfalto espumado (AF=2.3%) y es solo comparable con reportes de literatura de mezclas con asfalto espumado, pero sin cemento RetC (%)=31 en cuarcitas con 2.6% de AF.

Los valores obtenidos permiten clasificar las mezclas con asfalto tipo A1 y tipo B1 procedentes del proveedor 1 como de resistencia moderada a la humedad, mientras que para la mezcla con asfalto tipo B2 procedente del proveedor 2 la resistencia a la humedad es pobre Según Academy, (2009) y Twagira et al., (2012).

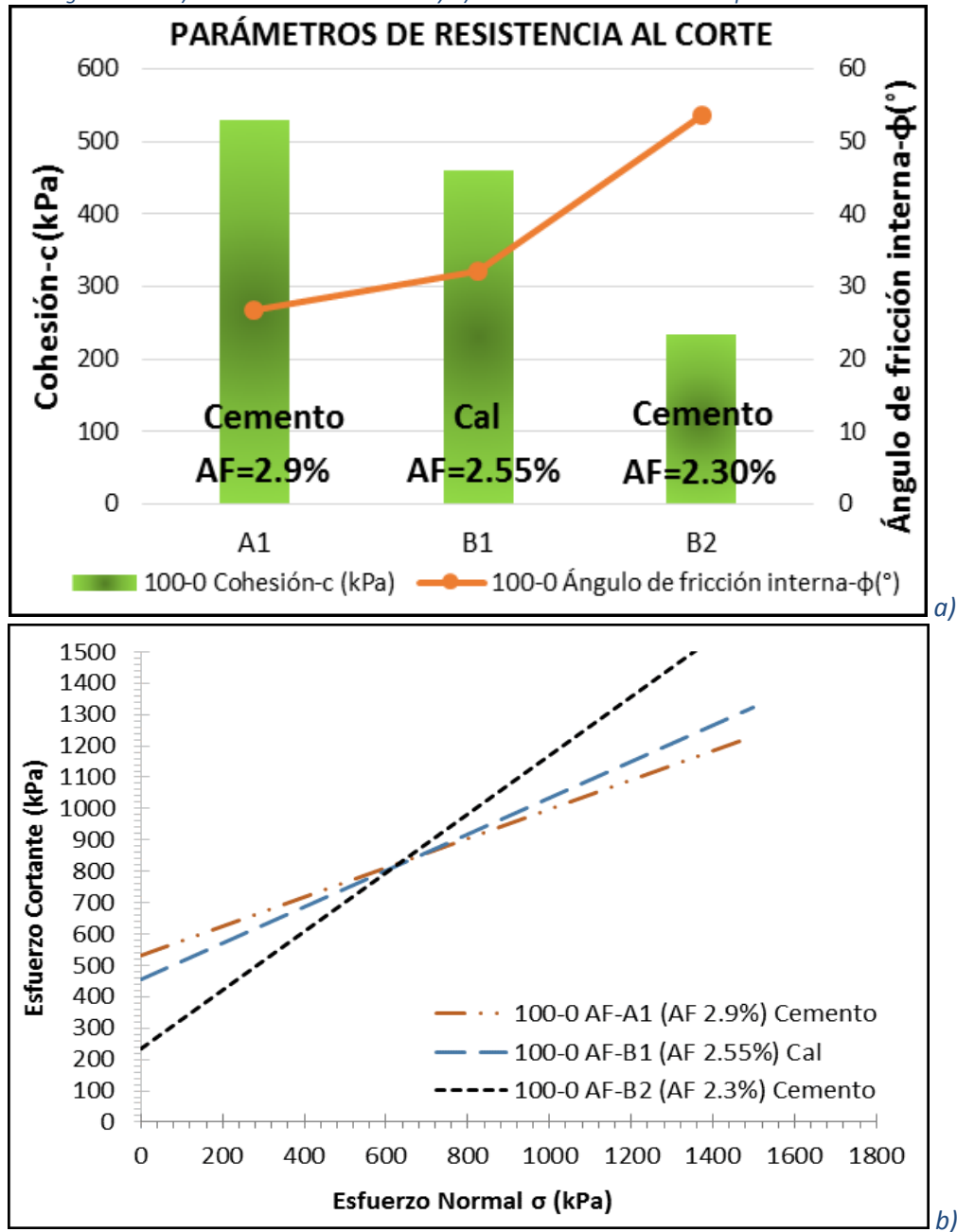
Finalmente, se tiene que existe una relación directa entre el comportamiento de los valores de TSR(%) y los de RetC (%), como lo observado por autores como Ben, (2014) y Jenkins & Collings, (2015), quienes muestran que el aumento de TSR se ve de igual manera en el incremento de los valores de RetC como se observa en la figura 5.4.

Figura 5.2.2 Valores de RetC (%) Vs. TSR (%) en mezcla 100-0



En la figura 5.5 se muestran los valores de los parámetros de resistencia, así como las envolventes de falla para cada mezcla.

Figura 5.2.2 a) Parámetros de resistencia y b) envolventes Mohr-Coulomb para mezclas 100-0



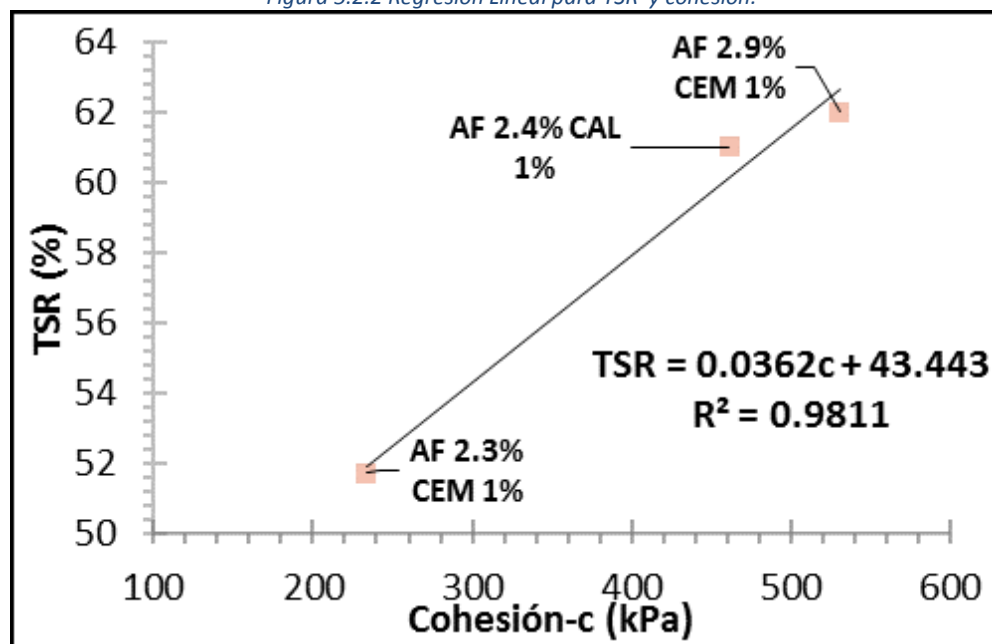
En la figura 5.5 a y b se observa que el valor del ángulo de fricción interna y el de cohesión para las mezclas del proveedor tipo 1 son similares.

Aunque autores como Čížková et al., (2016); Ebels, (2008); González, (2009); K.J. Jenkins, (2000); Moloto, (2010) muestran que existe incremento en los valores de cohesión con el aumento del contenido de asfalto, todos los resultados se basan en aumentos de mínimo 1% en dicho contenido, por lo que no se considera que el cambio en el contenido de la espuma, el cual es aproximadamente igual entre todas las mezclas (0.3% aprox.) haya tenido incidencia en los valores finales de fricción y cohesión para cada mezcla.

Otro factor que afecta los valores de cohesión, es la cantidad de llenante utilizado (cal o cemento) y ya que, en el presente trabajo la cantidad se mantuvo fija (1%), se considera que las variaciones presentadas de este parámetro, se pueden deber a una combinación de las variables tipo de llenante y tipo de asfalto espumado.

Finalmente, autores como (Čížková et al., 2016) sugieren que existe una relación directa entre parámetros de resistencia al corte y características de resistencia como los son ITS y TSR (%), presentando valores de correlación entre estos parámetros superiores a 0.83 para mezclas con diferentes contenidos de asfalto sin adición de RAP. Para los datos obtenidos en el presente trabajo se corrobora que existe una correlación directa entre los parámetros mencionados y los valores de TSR (%) como se observa en la figura 5.6.

Figura 5.2.2 Regresión Lineal para TSR y cohesión.



## 5.3 Mezcla 85-15

### 5.3.1 Cemento asfáltico (A1)

Aun cuando se elaboraron las mezclas con el asfalto A1 y se realizaron los respectivos ensayos triaxiales sobre las probetas fabricadas con ellas, los resultados encontrados se apartan de los comportamientos convencionales. Al analizar las curvas esfuerzo – deformación, se detectó un problema relacionado con la celda de aplicación de carga, evidenciándose que, aun cuando la capacidad de la misma era de 30 kN, en los ensayos todas las muestras alcanzaron un valor límite de 15 kN, independientemente de la presión de confinamiento. En la revisión de la máquina y del software, se pudo determinar que se tenía una protección que no se había deshabilitado por lo que los resultados de estos ensayos fueron descartados.

### 5.3.2 Cemento asfáltico (B1)

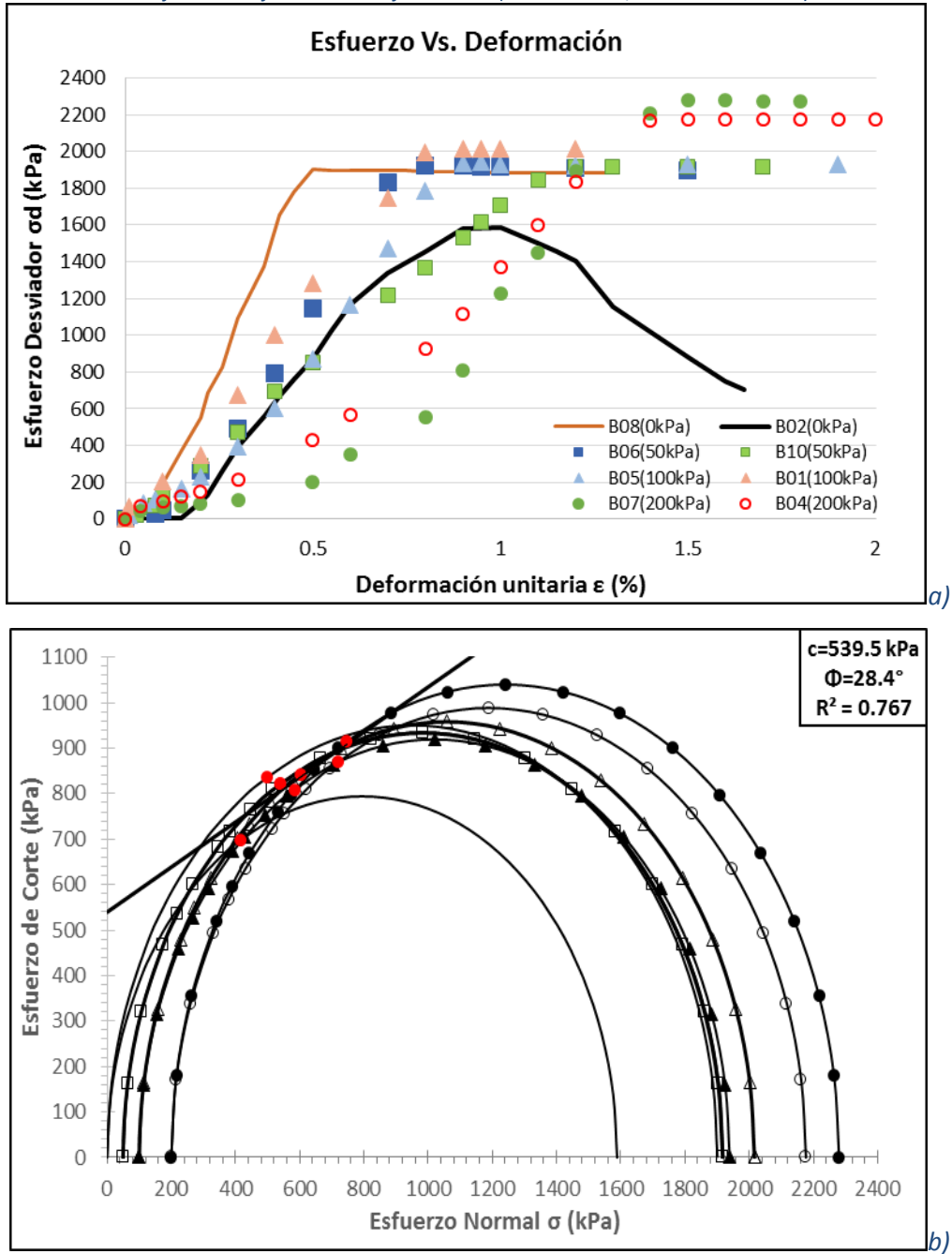
En la tabla 5.8, se presentan los resultados de los ensayos triaxiales obtenidos para la fórmula de trabajo (FT) 85-15 con asfalto espumado (AF) B1.

Tabla 5.3 Resumen de propiedades físicas y mecánicas para la mezcla 85-15 AF-B1

FT06-MEZCLA 85-15 AF-B1								
Esfuerzo de confinamiento- $\sigma_c$ (kPa)	Probeta	Peso Unitario seco de probetas - $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Esfuerzo a la falla - $\sigma_f$ (kPa)	Deformación unitaria a la falla- $\epsilon$ (%)	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción Interna (°)	Cohesión retenida- RetC (%)	Coefficiente de correlación
<b>0</b>	B02	19.65	1589	1.00	540	28°	67.9	0.767
	B08	20.06	1901	0.50				
<b>50</b>	B06	19.56	1920	0.90				
	B10	20.03	1917	1.50				
<b>100</b>	B05	19.86	1939	0.95				
	B01	20.21	2016	0.95				
<b>200</b>	B04	20.33	2177	1.50				
	B07	20.26	2280	1.60				
<b>100 W</b>	B09	20.26	1349	1.09				

En la figura 5.7 se presentan las curvas esfuerzo deformación y los círculos de Mohr obtenidos para las diferentes probetas ensayadas.

Figura 5.2.2 a) Curvas esfuerzo de formación b) Envolvente de falla Mohr – Coulomb para la mezcla 85-15 AF-B1 con diferentes esfuerzos de confinamiento (0 kPa, 50 kPa, 100 kPa Y 200 kPa)



El valore de Fricción  $\phi = 28^\circ$ , hace que la clasificación de la mezcla sea tipo BSM3 según la Asphalt Academy, (2009). Sin embargo, se resalta que el valor de cohesión retenida haría que la mezcla fuese BSM 2 y la cohesión  $c = 540 \text{ kPa}$  BSM1.

### 5.3.3 Cemento asfáltico (B2)

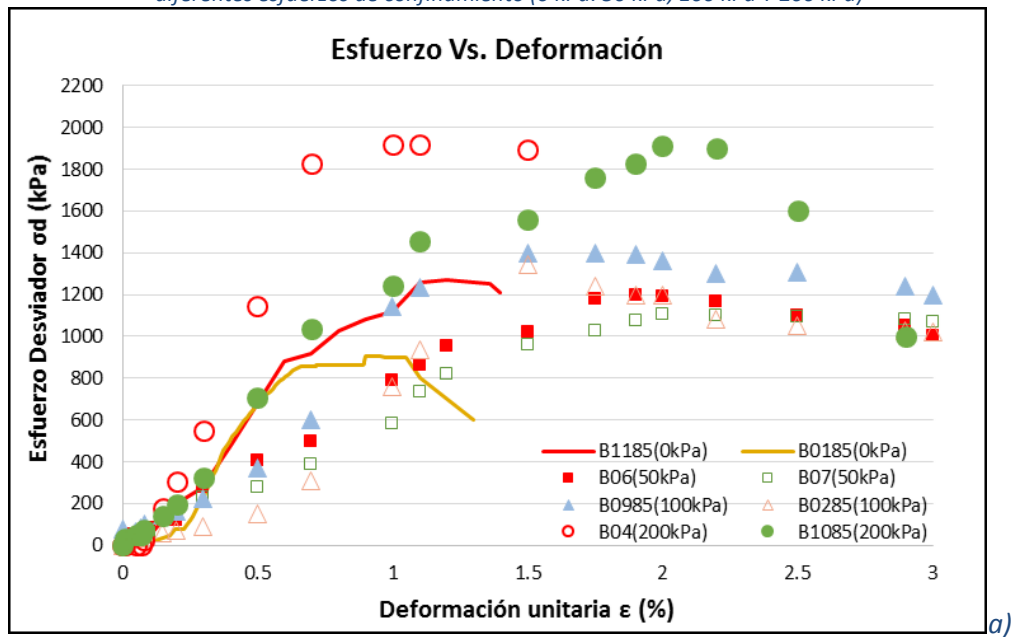
En la tabla 5.9, se presentan los resultados de los ensayos triaxiales obtenidos para la fórmula de trabajo (FT) 85-15 con asfalto espumado (AF) B2.

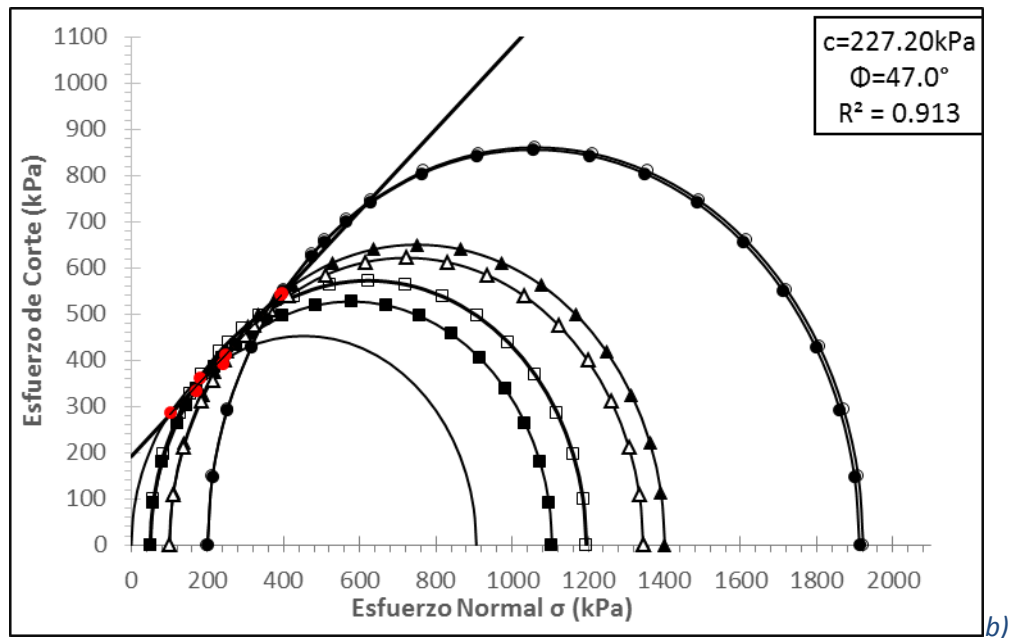
Tabla 5.3 Resumen de propiedades físicas y mecánicas para la mezcla 85-15 AF-B2

FT02-MEZCLA 85-15 AF-B2 2.45% CAL 1%												
Esfuerzo de confinamiento- $\sigma_c$ (kPa)	Probeta	Peso Unitario seco de probetas - $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Esfuerzo a la falla - $\sigma_f$ (kPa)	Deformación unitaria a la falla- $\epsilon$ (%)	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción Interna (°)	Cohesión retenida-RetC (%)	Coefficiente de correlación				
0	B01	17.98	906	0.95	227	47	27.3	0.913				
	B11	18.24	1272	1.20								
50	B07	18.02	1105	2.00								
	B06	18.57	1195	1.90								
100	B09	18.45	1401	1.50								
	B02	18.25	1344	1.50								
200	B04	18.17	1922	1.10								
	B10	17.97	1912	2.10								
100 W	B03	18.36	467	1.3								

En la figura 5.8 se presentan las curvas esfuerzo deformación y los círculos de Mohr obtenidos para las diferentes probetas ensayadas.

Figura 5.2.2 a) Curvas esfuerzo de formación (b) Envolvente de falla Mohr – Coulomb para la mezcla 85-15 AF-B2 con diferentes esfuerzos de confinamiento (0 kPa, 50 kPa, 100 kPa Y 200 kPa)





Los valores de Fricción  $\varphi = 47^\circ$  y cohesión  $c= 227 \text{ kPa}$  obtenidos, confirman la clasificación de la mezcla como tipo BSM1 según la Asphalt Academy, (2009) obtenida en el diseño de mezcla del capítulo 4. Sin embargo, se resalta que el valor de cohesión retenida es significativamente bajo, lo que ocasionaría que la mezcla no fuese apta para uso en vías como material de pavimento (material no apto  $< 50\%$ ).

### 5.3.4 Resumen de Resultados para mezcla 85-15

En la tabla 5.10, se resumen los resultados para las mezclas con 85% de granulares y 15% de RAP para cada tipo de asfalto espumado utilizado.

Tabla 5.3 Resultados de ensayo triaxial monotónico para mezcla 85-15 con diferentes asfaltos.

MEZCLA (OPT. ASF) (LLENANTE)	Esfuerz o de confina miento - $\sigma_f$ (kPa)	Esfuerz o a la falla - $\sigma_f$ (kPa)	Deformaci ón unitaria a la falla- $\epsilon$ (%)	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción Interna ( $^\circ$ )	Cohesión retenida- RetC (%)	Coefficiente de correlación	TSR (%)
<b>FT06-B1</b> (FA: 2.33%) (1% CAL) ITS <sub>SECO</sub> =212kPa ITS <sub>HUM.</sub> =178kPa HL: 16 s	0	1589	1.00	540	28	79.1	0.720	84
		1901	0.50					
	50	1920	0.90					
		1917	1.50					
	100	1939	0.95					
		2016	0.95					
	200	2177	1.50					
		2280	1.60					
	100 W	1349	1.09					

ER: 12								
	0	906	0.95	227	47	27.3	0.913	56
		1272	1.2					
<b>FT02-B2</b>	50	1105	2					
<b>(FA: 2.45%)</b>		1195	1.90					
<b>(1% CAL)</b>	100	1401	1.50					
<b>ITS<sub>SECO</sub> =319kPa</b>		1344	1.50					
<b>ITS<sub>HUM.</sub> =177kPa</b>	200	1922	1.10					
<b>HL: 13 s</b>		1912	2.10					
<b>ER: 18</b>	100 W	467	1.30					
		444	1.45					

Se observa correspondencia entre los valores de relación de expansión de la espuma asfáltica (ER) y el contenido final de asfalto inyectado. Es decir que para valores elevados de ER se tienen los contenidos más altos de espuma.

Se observa una variación importante entre los valores de los parámetros de resistencia al corte y Cohesión retenida RetC para una misma mezcla. Esta variación se puede deber a la diferencia que se tiene entre los parámetros expansión y vida media entre las espumas de asfalto y posiblemente al comportamiento atípico presentado durante el espumado del asfalto B2. Adicionalmente, es posible que la presencia de RAP y su heterogeneidad estén influenciando en el comportamiento final de las mezclas.

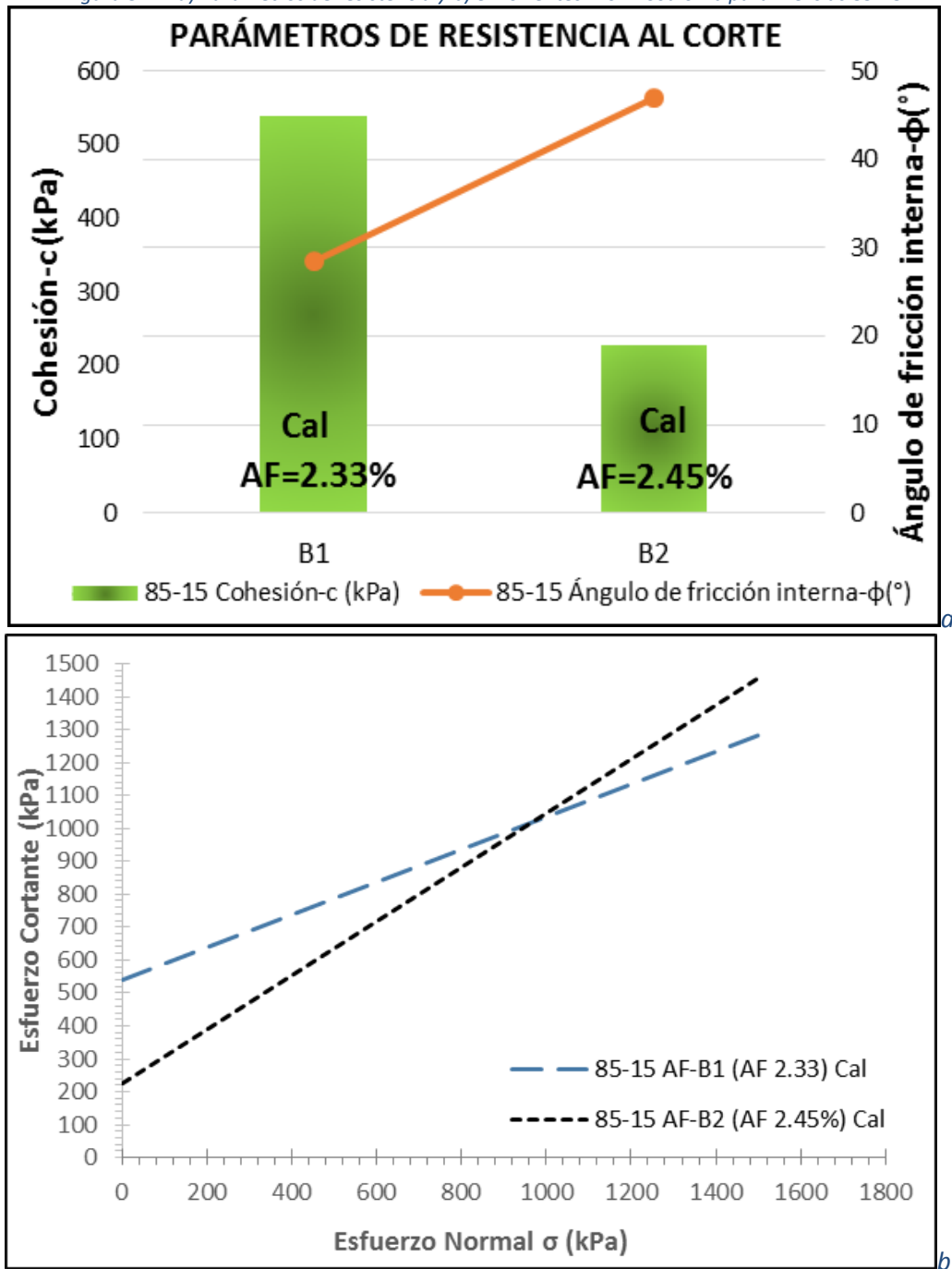
Los valores obtenidos permiten clasificar la mezclas con asfalto tipo B1 procedente del proveedor 1 como de resistencia alta a la humedad, mientras que para la mezcla con asfalto tipo B2 procedente del proveedor 2 la resistencia a la humedad es pobre Según Academy, (2009) y Twagira et al., (2012).

Finalmente, se tiene que existe una relación directa entre el comportamiento de los valores de TSR(%) y los de RetC (%), como lo observado por autores como Ben, (2014) y Jenkins & Collings, (2015), quienes muestran que el aumento de TSR se ve de igual manera en el incremento de los valores de RetC como se observa en la tabla 5.10.

En la figura 5.9 se muestran los valores de los parámetros de resistencia, así como las envolventes de falla para cada mezcla 85-15.



Figura 5.2.2 a) Parámetros de resistencia y b) envolventes Mohr-Coulomb para mezclas 85-15



En la figura 5.9 a y b se observa que el valor del ángulo de fricción interna para la mezcla del proveedor tipo 1 es el más bajo.

La variación en los parámetros de resistencia parece deberse solo a la diferencia entre los tipos de asfalto, ya que como se observa el tipo de llenante en la mezcla es el mismo. El

comportamiento encontrado no responde a lo esperado para el tipo de mezcla trabajado, debido a que era de esperar que la mezcla con mayor contenido de asfalto (asfalto tipo B2) presentara los valores más elevados, eso no se observa.

## 5.4 Mezcla 70-30

### 5.4.1 Cemento asfáltico (A1)

Aun cuando se elaboraron las mezclas con el asfalto A1 y se realizaron los respectivos ensayos triaxiales sobre las probetas fabricadas con ellas, los resultados encontrados se apartan de los comportamientos convencionales. Al analizar las curvas esfuerzo – deformación, se detectó un problema relacionado con la celda de aplicación de carga, evidenciándose que, aun cuando la capacidad de la misma era de 30 kN, en los ensayos todas las muestras alcanzaron un valor límite de 15 kN, independientemente de la presión de confinamiento. En la revisión de la máquina y del software, se pudo determinar que se tenía una protección que no se había deshabilitado por lo que los resultados de estos ensayos fueron descartados.

### 5.4.2 Cemento asfáltico (B1)

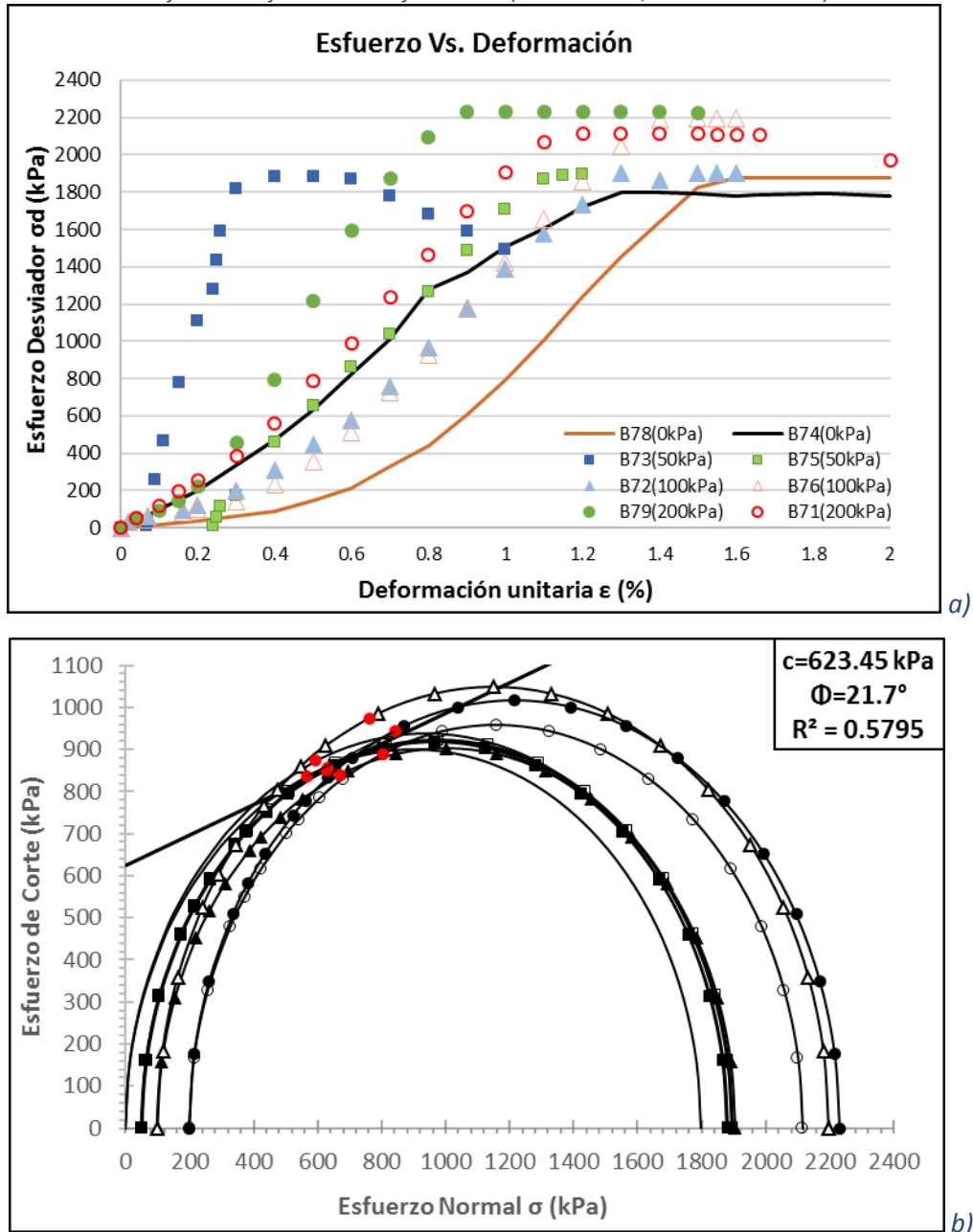
En la tabla 5.11, se presentan los resultados de los ensayos triaxiales obtenidos para la fórmula de trabajo (FT) 70-30 con asfalto espumado (AF) B1.

Tabla 5.4 Resumen de propiedades físicas y mecánicas para la mezcla 70-30 AF-B1

FT07-MEZCLA 70-30 AF-B1								
Esfuerzo de confinamiento- $\sigma_c$ (kPa)	Probeta	Peso Unitario seco de probetas - $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Esfuerzo a la falla - $\sigma_f$ (kPa)	Deformación unitaria a la falla- $\epsilon$ (%)	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción Interna (°)	Cohesión retenida-RetC (%)	Coefficiente de correlación
0	B78	19.74	1879	1.60	623	22	73.3	0.579
	B74	19.85	1799	1.40				
50	B73	19.26	1883	0.80				
	B75	19.71	1896	1.33				
100	B72	19.77	1905	1.50				
	B76	19.49	2197	1.50				
200	B71	19.30	2115	1.30				
	B79	19.77	2232	1.00				
100 W	B710	19.66	1423	1.66				

En la figura 5.10 se presentan las curvas esfuerzo deformación y los círculos de Mohr obtenidos para las diferentes probetas ensayadas.

Figura 5.2.2 a) Curvas esfuerzo de formación b) Envolvente de falla Mohr – Coulomb para la mezcla 70-30 AF-B1 con diferentes esfuerzos de confinamiento (0 kPa, 50 kPa, 100 kPa Y 200 kPa)



El valor de Fricción  $\phi = 22^\circ$ , hace que la clasificación de la mezcla sea tipo BSM3 según la Asphalt Academy, (2009). Sin embargo, se resalta que el valor de cohesión retenida haría que la mezcla fuese BSM 2 y la cohesión  $c= 623.45$  kPa BSM1.

Este comportamiento dispar en la clasificación puede deberse a la presencia de material RAP el cual es altamente heterogéneo.

### 5.4.3 Cemento asfáltico (B2)

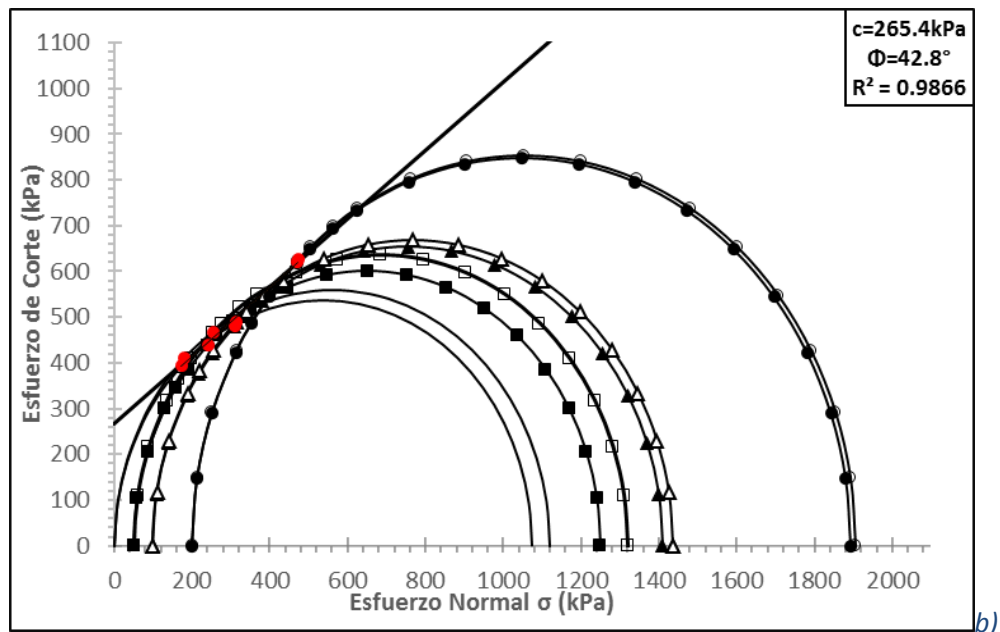
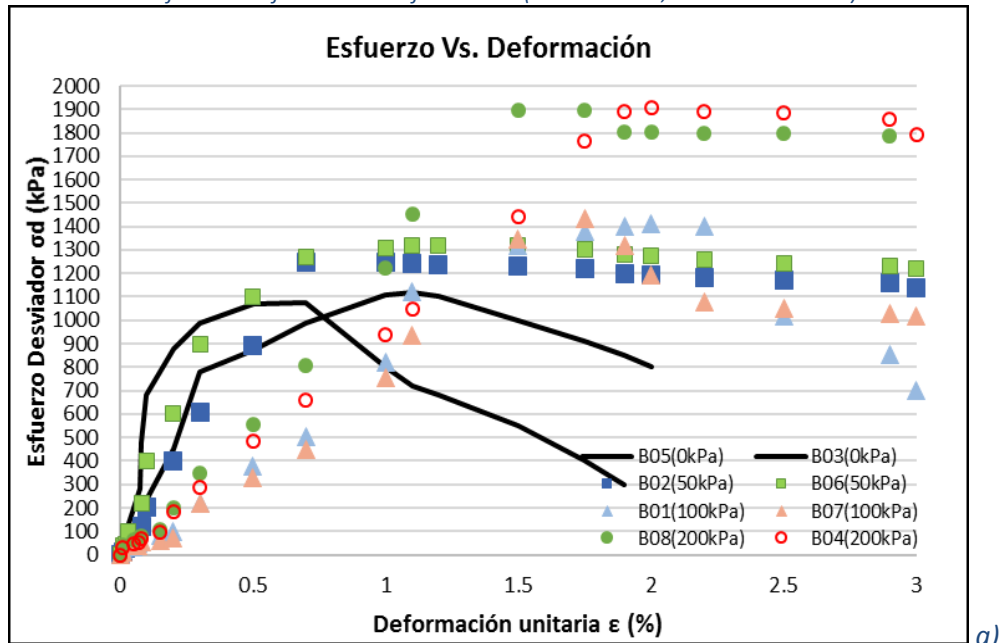
En la tabla 5.12, se presentan los resultados de los ensayos triaxiales obtenidos para la fórmula de trabajo (FT) 70-30 con asfalto espumado (AF) B2.

Tabla 5.4 Resumen de propiedades físicas y mecánicas para la mezcla 70-30 AF-B2

FT03-MEZCLA 70-30 AF-B2 2.35% CEMENTO 1%								
Esfuerzo de confinamiento- $\sigma_c$ (kPa)	Probeta	Peso Unitario seco de probetas - $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Esfuerzo a la falla - $\sigma_f$ (kPa)	Deformación unitaria a la falla- $\epsilon$ (%)	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción Interna (°)	Cohesión retenida-RetC (%)	Coefficiente de correlación
<b>0</b>	B03	18.26	1120	1.10	265	43	30.0	0.987
	B09	18.08	1073	0.77				
<b>50</b>	B02	18.29	1250	0.70				
	B06	17.63	1320	1.20				
<b>100</b>	B01	17.83	1409	2.00				
	B07	17.64	1435	1.75				
<b>200</b>	B04	18.52	1905	2.00				
	B08	18.61	1894	1.75				
<b>100 W</b>	B05	0.00	482	2.60				
	B10	18.11	503	1.90				

En la figura 5.11 se presentan las curvas esfuerzo deformación y los círculos de Mohr obtenidos para las diferentes probetas ensayadas.

Figura 5.2 a) Curvas esfuerzo de formación (b) Envolvente de falla Mohr – Coulomb para la mezcla 70-30 AF-B2 con diferentes esfuerzos de confinamiento (0 kPa, 50 kPa, 100 kPa Y 200 kPa)



Los valores de Fricción  $\varphi = 43^\circ$  y cohesión  $c = 265 \text{ kPa}$  obtenidos, confirman la clasificación de la mezcla como tipo BSM1 según la Asphalt Academy, (2009) obtenida en el diseño de mezcla del capítulo 4. Sin embargo, se resalta que el valor de cohesión retenida es significativamente bajo, lo que ocasionaría que la mezcla no fuese apta para uso en vías como material de pavimento (material no apto < 50%).

#### 5.4.4 Resumen de Resultados para mezcla 70-30

En la tabla 5.13, se resumen los resultados para las mezclas con 70% de granulares y 30% de RAP para cada tipo de asfalto espumado utilizado.

Tabla 5.4 Resultados de ensayo triaxial monotónico para mezcla 70-30 con diferentes asfaltos.

MEZCLA (OPT. ASF) (LLENANTE)	Esfuerzo de confinamiento- $\sigma_f$ (kPa)	Esfuerzo a la falla- $\sigma_f$ (kPa)	Deformación unitaria a la falla- $\epsilon$ (%)	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción Interna ( $^\circ$ )	Cohesión retenida- RetC (%)	Coefficiente de correlación	TSR (%)
<b>FT07-B1</b> (FA: 2.33%) (1% CAL) ITS <sub>SECO</sub> =212kPa ITS <sub>HUM.</sub> =178kPa HL: 16 s ER: 12	0	1879	1.6	623	22	73.3	0.579	65
		1799	1.4					
	50	1883	0.8					
		1896	1.33					
	100	1905	1.5					
		2197	1.5					
	200	2115	1.3					
	2232	1.0						
100 W	1423	1.66						
<b>FT03-B2</b> (FA: 2.45%) (1% CAL) ITS <sub>SECO</sub> =319kPa ITS <sub>HUM.</sub> =177kPa HL: 13 s ER: 18	0	1120	1.1	265	43	30.3	0.987	67
		1073	0.77					
	50	1250	0.7					
		1320	1.20					
	100	1409	2.00					
		1435	1.75					
	200	1905	2.00					
	1894	1.75						
100 W	482	2.6						
	503	1.9						

Se observa correspondencia entre los valores de relación de expansión de la espuma asfáltica (ER) y el contenido final de asfalto inyectado. Es decir que para valores elevados de ER se tienen los contenidos más altos de espuma.

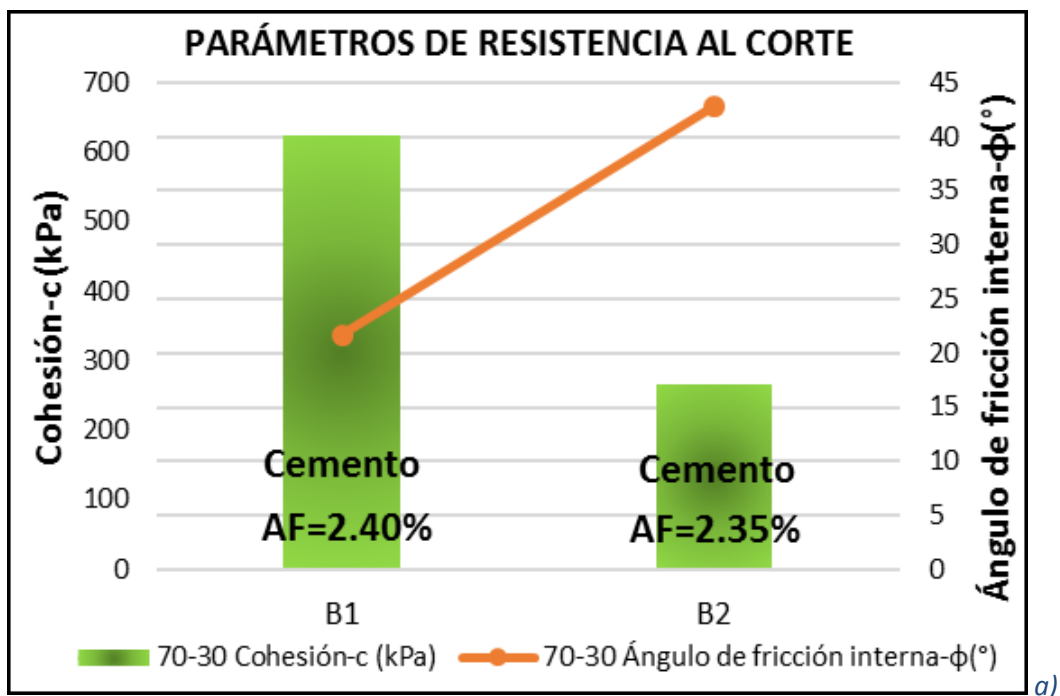
Se observa una variación importante entre los valores de los parámetros de resistencia al corte y Cohesión retenida RetC para una misma mezcla. Esta variación se puede deber a la diferencia que se tiene entre los parámetros expansión y vida media entre las espumas de asfalto y posiblemente al comportamiento atípico presentado durante el espumado del asfalto B2. Adicionalmente, es posible que la presencia de RAP y su heterogeneidad estén influenciando en el comportamiento final de las mezclas.

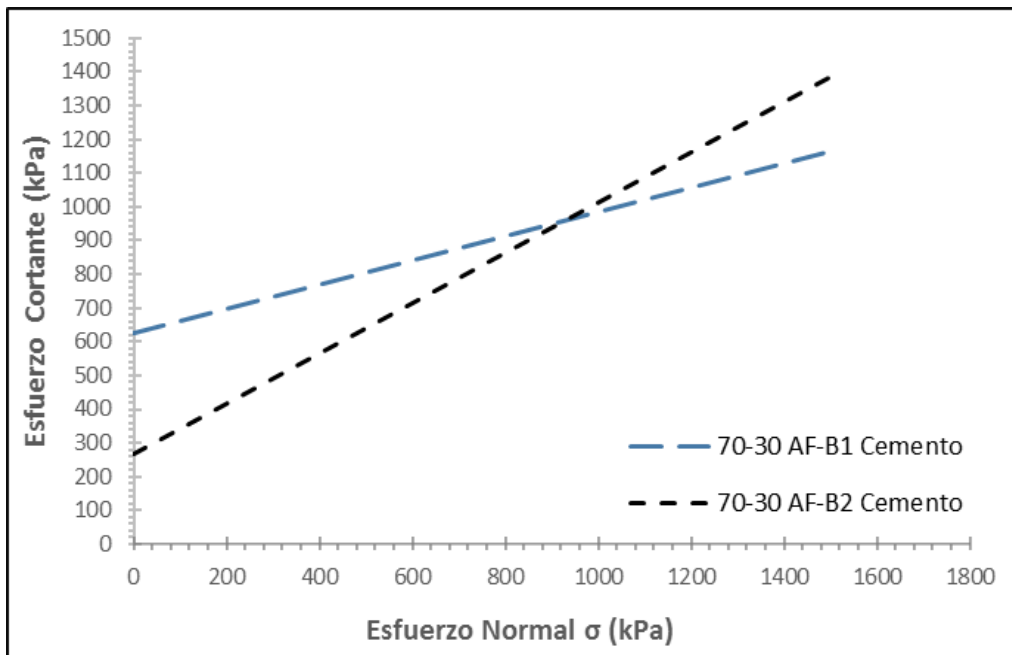
Los valores obtenidos permiten clasificar la mezcla con asfalto tipo B1 procedente del proveedor 1 como de resistencia moderada a la humedad, mientras que para la mezcla con asfalto tipo B2 procedente del proveedor 2 la resistencia a la humedad es pobre Según Academy, (2009) y Twagira et al., (2012).

Finalmente, en esta mezcla no se observa una relación directa entre el comportamiento de los valores de TSR (%) y los de RetC (%).

En la figura 5.12 se muestran los valores de los parámetros de resistencia, así como las envolventes de falla para cada mezcla 70-30.

Figura 5.2.2 a) Parámetros de resistencia al corte y b) envolventes Mohr-Coulomb para mezclas 70-30





En la figura 5.12 a y b se observa que el valor del ángulo de fricción interna para la mezcla del proveedor tipo 1 es el más bajo.

## 5.5 Mezcla 50-50

### 5.5.1 Cemento asfáltico (A1)

En la tabla 5.14, se presentan los resultados de los ensayos triaxiales obtenidos para la fórmula de trabajo (FT) 50-50 con asfalto espumado (AF) A1.

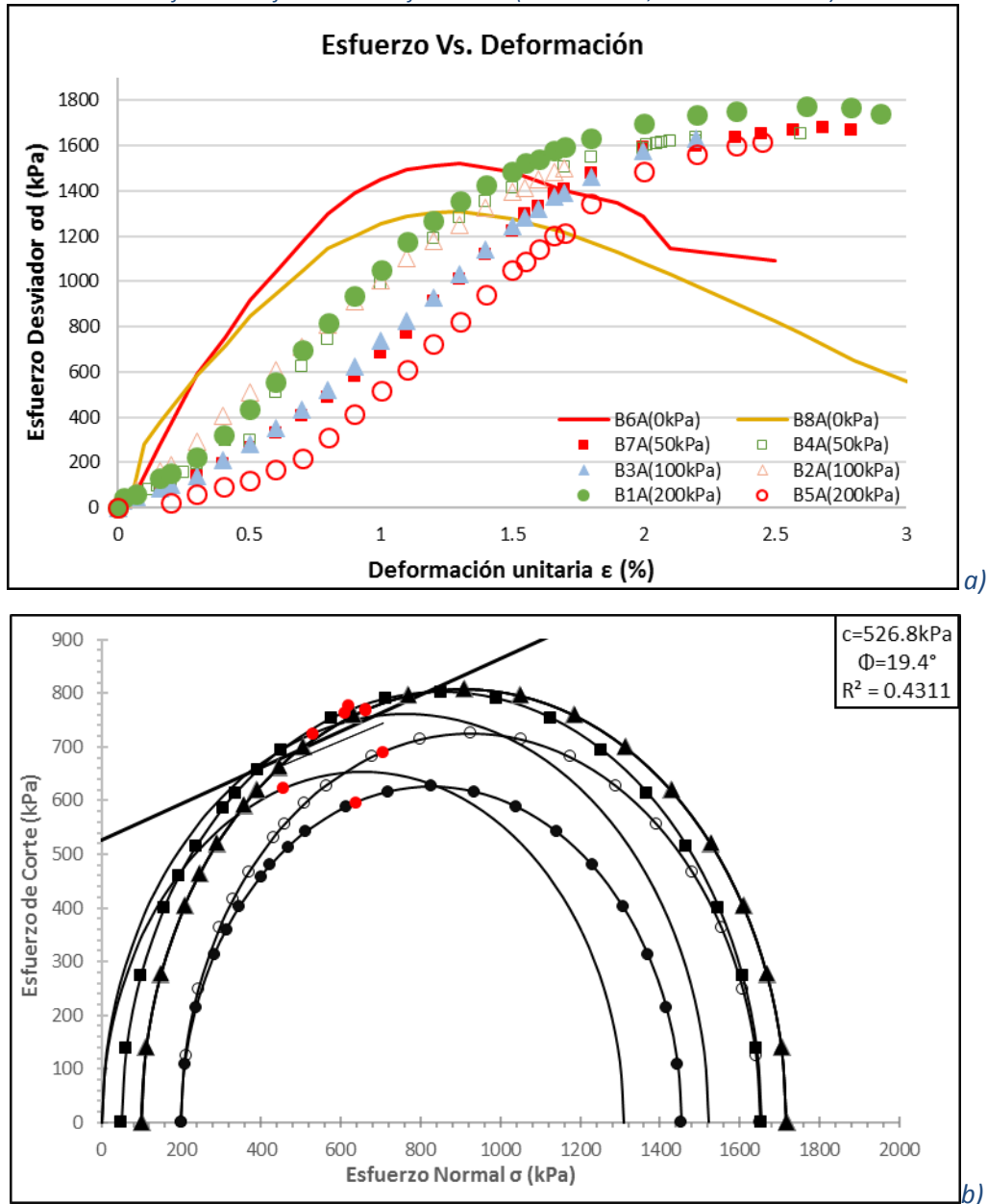
Tabla 5.5 Resumen de propiedades físicas y mecánicas para la mezcla 50-50 AF-A1

FT12-MEZCLA 50-50 AF-A1 2.9% CAL 1%								
Esfuerzo de confinamiento- $\sigma_c$ (kPa)	Probeta	Peso Unitario seco de probetas - $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Esfuerzo a la falla - $\sigma_f$ (kPa)	Deformación unitaria a la falla- $\epsilon$ (%)	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción Interna (°)	Cohesión retenida-RetC (%)	Coefficiente de correlación
0	B6A	18.33	1309	1.80	527	19.4	69.7	0.431
	B8A	19.51	1522	1.80				
50	B4A	19.35	1654	2.60				
	B2A	19.13	1681	2.30				
100	B3A	19.05	1715	2.68				
	B5A	18.90	1717	2.79				
200	B7A	19.44	1651	2.60				
	B1A	19.80	1453	2.60				
100 W	B9Aw	19.95	1226	2.20				



En la figura 5.13, se observan las curvas esfuerzo deformación y los círculos de Mohr obtenidos para las diferentes probetas ensayadas.

Figura 5.2.2. a) Curvas esfuerzo deformación b) Envolvente de falla Mohr – Coulomb para la mezcla 50-50 AF-A1 con diferentes esfuerzos de confinamiento (0 kPa, 50 kPa, 100 kPa Y 200 kPa)



El valor de Fricción  $\phi = 19^\circ$ , hace que la clasificación de la mezcla sea tipo BSM3 según la Asphalt Academy, (2009). Sin embargo, se resalta que el valor de cohesión retenida haría que la mezcla fuese BSM 2 y la cohesión  $c = 526.80 \text{ kPa}$  BSM1.

Este comportamiento dispar en la clasificación puede deberse a la presencia de material RAP el cual es altamente heterogéneo.

Los valores obtenidos de los parámetros de resistencia al corte, son significativamente más bajos que los reportados por la mayoría de autores para materiales granulares y con contenidos de asfalto entre 2% al 4%.

El valor de correlación obtenido para la envolvente de falla de los círculos de Mohr, es bajo respecto a valores reportados en la literatura. Ver tabla 5.3.

En la tabla 5.15 se presenta un resumen de valores de  $c$  y  $\phi$  similares a los obtenidos en el presente trabajo presentados por distintos autores para materiales sin RAP.

*Tabla 5.5 Resultados de  $C$  y  $\phi$  reportados por diferentes autores para materiales sin RAP.*

Ángulo de fricción Interna (°)	Cohesión (kPa)	Autor	Observaciones
27	343	González, (2009)	Mezcla con 4.0% de AF y 1% de cemento sin RAP. Mezcla de material <b>H40*</b> y <b>AP5*</b> con contenido de finos (pasa #200) del 4%.
26	140	H.L Theyse et al., (2004)	Mezcla con 4.0% de AF y 1% de cemento sin RAP. Clasificación <b>G1</b> .
22.5	170.8	Achille, (2013. p.111)	Mezcla con 2.4% de AF y 0% de cemento. Triturado Dolorita. Pasa # 200 entre 6.4% y 7%.
29	290	H. L Theyse, (2007)	Mezcla con 0% de AF y 0% de cemento. Roca Caliza y materiales de calidad media arenosos.

**\*QC:(Quartzite Crushed- Triturado de Hornfels-roca metamórfica). G1. Material triturado de roca con CBR>100%. G2. Material triturado de roca con CBR>80%. H40: Material triturado Neo Zelandés de roca tamaño máximo de 40mm. AP5: Polvo de material Neo Zelandes triturado.**

Como se observa en la tabla anterior, los valores reportados tienen como característica el tener elevados contenidos de asfalto espumado o materiales de calidad media.

### 5.5.2 Cemento asfáltico (B1)

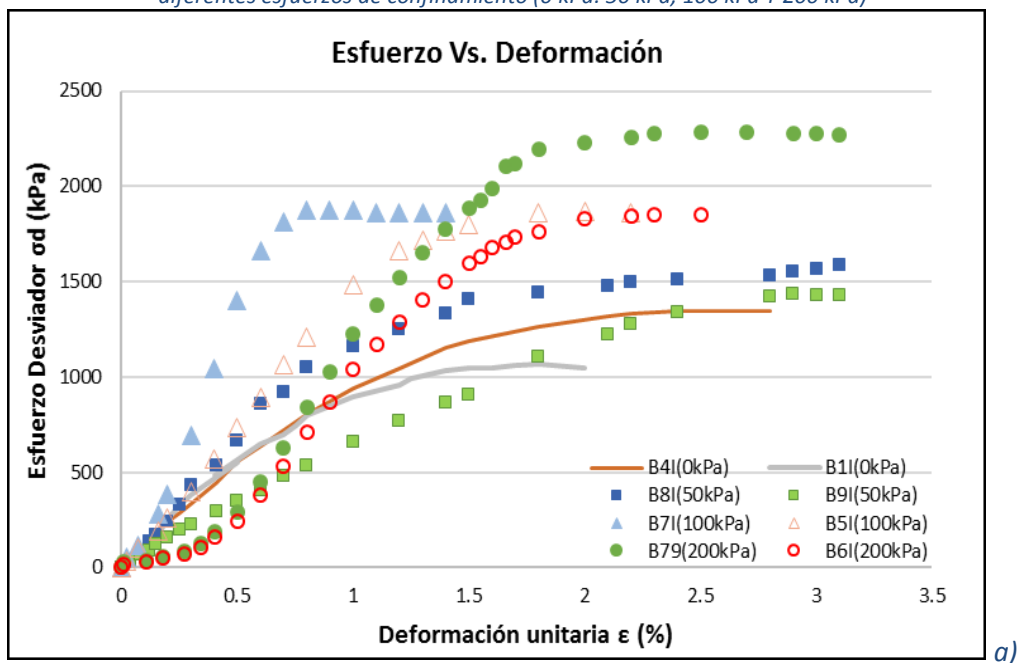
En la tabla 5.16, se presentan los resultados de los ensayos triaxiales obtenidos para la fórmula de trabajo (FT) 50-50 con asfalto espumado (AF) B1.

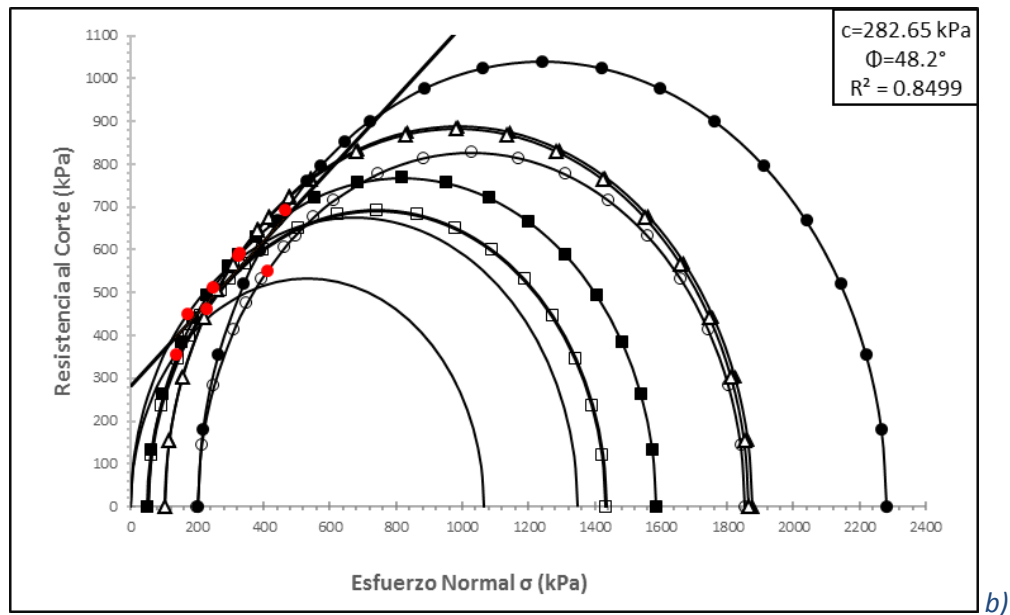
Tabla 5.5 Resumen de propiedades físicas y mecánicas para la mezcla 70-30 AF-B1

FT08-MEZCLA 50-50 AF-B1 2.36% CEMENTO 1%								
Esfuerzo de confinamiento- $\sigma_c$ (kPa)	Probeta	Peso Unitario seco de probetas - $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Esfuerzo a la falla - $\sigma_f$ (kPa)	Deformación unitaria a la falla- $\epsilon$ (%)	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción Interna (°)	Cohesión retenida- RetC (%)	Coefficiente de correlación
0	B1I	18.73	1096	1.60	283	48	72.5	0.850
	B4I	19.87	1349	1.40				
50	B8I	20.44	1586	0.80				
	B9I	20.22	1435	1.33				
100	B7I	18.56	1876	1.50				
	B5I	19.67	1865	1.50				
200	B6I	20.05	1854	1.30				
	B2I	19.22	2282	1.00				
100 W	B3I	19.57	1387	1.70				

En la figura 5.14 se presentan las curvas esfuerzo deformación y los círculos de Mohr obtenidos para las diferentes probetas ensayadas.

Figura 5.2.2 a) Curvas esfuerzo de formación b) Envolvente de falla Mohr – Coulomb para la mezcla 50-50 AF-B1 con diferentes esfuerzos de confinamiento (0 kPa, 50 kPa, 100 kPa Y 200 kPa)





Los valores de Fricción  $\phi = 48^\circ$  y cohesión  $c = 283 \text{ kPa}$  obtenidos, confirman la clasificación de la mezcla como tipo BSM1 según la Asphalt Academy, (2009) obtenida en el diseño de mezcla del capítulo 4. Sin embargo, se resalta que el valor de cohesión retenida  $RetC=73\%$  ocasiona que la mezcla clasifique en BSM 2.

### 5.5.3 Cemento asfáltico (B2)

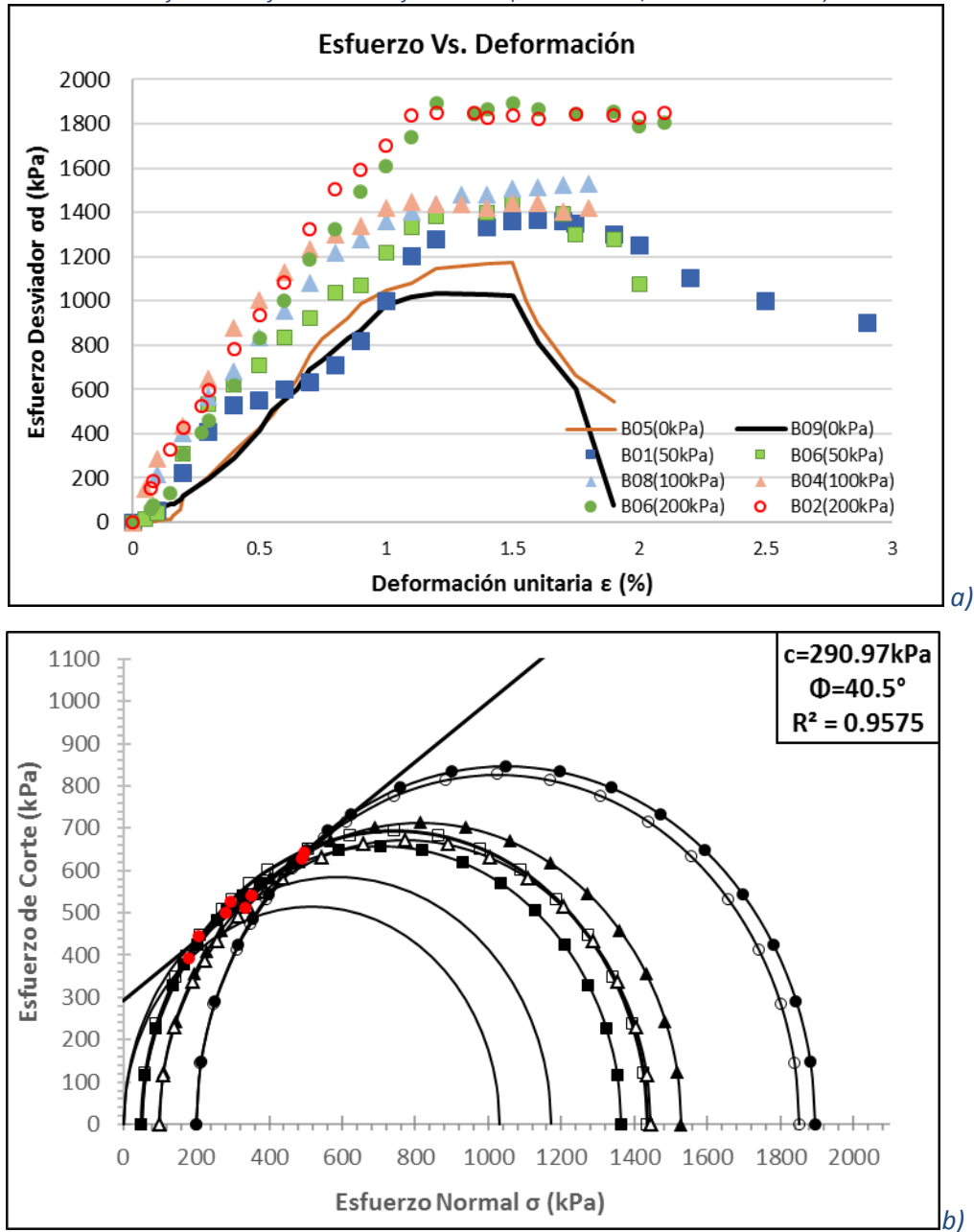
En la tabla 5.17, se presentan los resultados de los ensayos triaxiales obtenidos para la fórmula de trabajo (FT) 50-50 con asfalto espumado (AF) B2.

Tabla 5.5 Resumen de propiedades físicas y mecánicas para la mezcla 50-50 AF-B2

FT04-MEZCLA 50-50 AF-B2 2.20% CEMENTO 1%								
Esfuerzo de confinamiento- $\sigma_c$ (kPa)	Probeta	Peso Unitario seco de probetas - $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Esfuerzo a la falla - $\sigma_f$ (kPa)	Deformación unitaria a la falla- $\epsilon$ (%)	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción Interna ( $^\circ$ )	Cohesión retenida-RetC (%)	Coefficiente de correlación
0	B05	17.80	1032	1.20	291	41	41	0.957
	B03	18.68	1171	1.50				
50	B08	18.62	1364	1.60				
	B06	18.55	1436	1.50				
100	B09	18.86	1527	1.80				
	B04	18.51	1445	1.30				
200	B01	18.33	1852	1.60				
	B02	18.82	1894	1.60				
100 W	B07	18.72	876	1.50				
	B10	18.28	482	1.30				

En la figura 5.15 se presentan las curvas esfuerzo deformación y los círculos de Mohr obtenidos para las diferentes probetas ensayadas.

Figura 5.2.2 a) Curvas esfuerzo de formación) (b) Envolvente de falla Mohr – Coulomb para la mezcla 50-50 AF-B2 con diferentes esfuerzos de confinamiento (0 kPa, 50 kPa, 100 kPa Y 200 kPa)



Los valores de Fricción  $\phi = 41^\circ$  y cohesión  $c= 291\text{kPa}$  obtenidos, permiten clasificar la mezcla como tipo BSM1 según la Asphalt Academy, (2009). Sin embargo, se resalta que el

valor de cohesión retenida es significativamente bajo, lo que ocasionaría que la mezcla no fuese apta para uso en vías como material de pavimento (material no apto < 50%).

#### 5.5.4 Resumen de Resultados para mezcla 50-50

En la tabla 5.18, se resumen los resultados para las mezclas con 50% de granulares y 20% de RAP para cada tipo de asfalto espumado utilizado.

Tabla 5.5 Resultados de ensayo triaxial monotónico para mezcla 50-50 con diferentes asfaltos.

MEZCLA (OPT. ASF) (LLENANTE)	Esfuerzo de confinamiento - $\sigma_f$ (kPa)	Esfuerzo a la falla - $\sigma_f$ (kPa)	Deformación unitaria a la falla- $\epsilon$ (%)	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción Interna (°)	Cohesión retenida (RetC) (%)	Coefficiente de correlación	TSR (%)
<b>FT12-A1</b> (FA: 2.9% (1% CAL) ITS <sub>SECO</sub> =162kPa ITS <sub>HUM.</sub> =86kPa HL: 13 s ER: 34	0	1309	1.80	527	19	69.7	0.431	53
		1522	1.80					
	50	1654	2.60					
		1681	2.30					
	100	1715	2.68					
		1717	2.79					
	200	1651	2.60					
		1453	2.60					
100 W	1226	2.20						
<b>FT08-B1</b> (FA: 2.40%) (1% CEM) ITS <sub>SECO</sub> =272kPa ITS <sub>HUM.</sub> =172kPa HL: 16 s ER: 12	0	1096	1.60	283	48	72.5	0.850	63
		1349	1.40					
	50	1586	0.80					
		1435	1.33					
	100	1876	1.50					
		1865	1.50					
	200	1854	1.30					
		2282	1.00					
100 W	1387	1.70						
	1533	1.4						
<b>FT04-B2</b> (FA: 2.2%) (1% CEM) ITS <sub>SECO</sub> =169kPa ITS <sub>HUM.</sub> =84kPa HL: 13 s ER: 18	0	1099	0.69	291	41	41	0.957	50
		1291	0.70					
	50	1305	0.67					
		1266	0.64					
	100	1909	0.69					
		1699	0.62					
	200	2290	1.50					
		2106	2.10					
100 W	580	0.55						
	660	0.76						

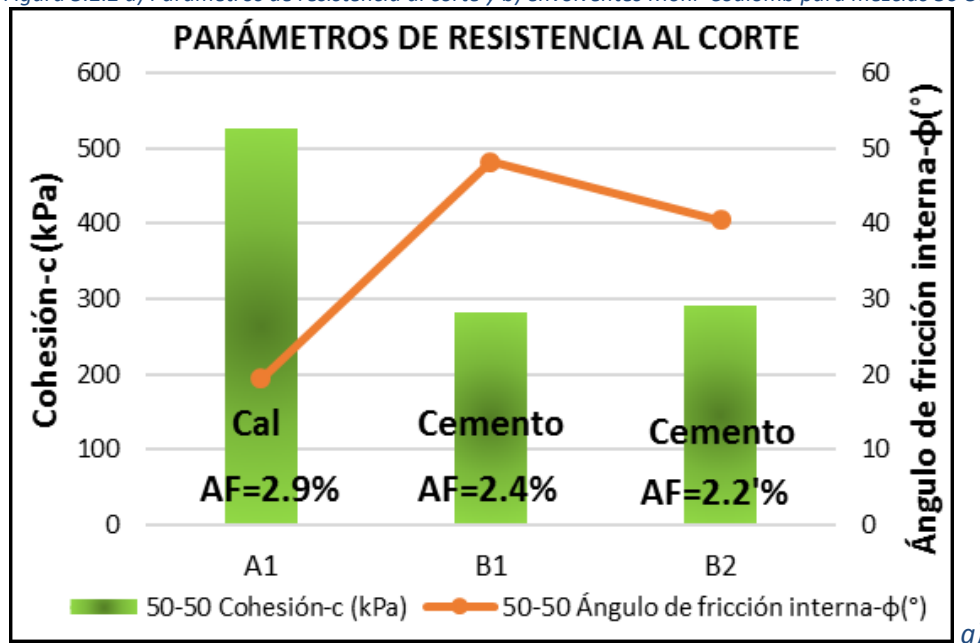
Se observa correspondencia entre los valores de relación de expansión de la espuma asfáltica (ER) y el contenido final de asfalto inyectado. Es decir que para valores elevados de ER se tienen los contenidos más altos de espuma.

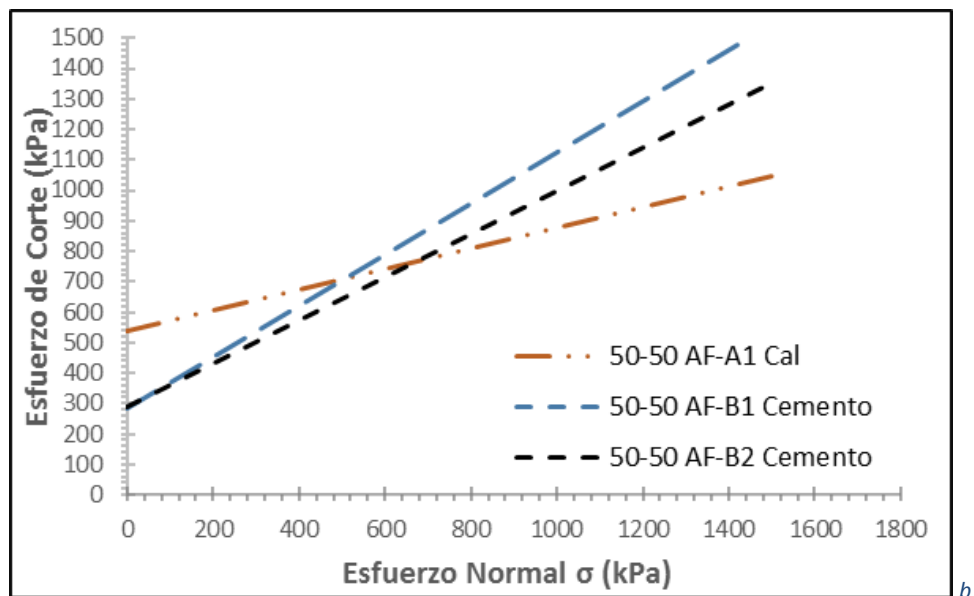
Existe una variación importante entre los valores de los parámetros de resistencia al corte y Cohesión retenida RetC para una misma mezcla. Esta variación se puede deber a la diferencia que se tiene entre los parámetros expansión y vida media entre las espumas de asfalto y el origen del asfalto. La mezcla con la espuma de asfalto A1 y más alto valor de ER presentó el valor más alto de cohesión y el más bajo de fricción, mientras que las mezclas con asfalto de origen B independiente al proveedor, mostraron valores muy similares de cohesión y fricción entre sí, siendo más bajos que la mezcla FT-12 A1.

Otra posible causa de la diferencia de valores de los parámetros puede ser atribuida a la variación de los valores de viscosidad del asfalto A respecto a los de origen B, los cuales se presentaron en el capítulo 3 y en el cual se evidencia que el asfalto A1 tiene valores de cohesión de hasta 25 veces más elevados que los de origen B.

En la figura 5.16 se muestran los valores de los parámetros de resistencia, así como las envolventes de falla para cada mezcla 50-50.

Figura 5.2.2 a) Parámetros de resistencia al corte y b) envolventes Mohr-Coulomb para mezclas 50-50





En la figura 5.16 a y b se observa que el valor del ángulo de fricción interna para la mezcla del proveedor tipo 1 es el más bajo.

## 5.6 Resumen de resultados de parámetros de resistencia al corte para las mezclas analizadas.

En la tabla 5.19 se presentan los resultados de resistencia al corte obtenidos para las diferentes mezclas y diferentes tipos de asfaltos utilizados.

Tabla 5.6 Parámetros de resistencia al corte para materiales estabilizados con asfalto espumado.

Asfalto	100-0		85-15		70-30		50-50	
	Cohesión (kPa)	Fricción (°)	Cohesión (kPa)	Fricción (°)	Cohesión (kPa)	Fricción (°)	Cohesión (kPa)	Fricción (°)
A1	531	27					527	19
B1	461	32	540	28	623	22	283	48
B2	234	54	227	47	265	43	291	41

Como se observa en la tabla los valores de resistencia al corte son muy similares para las mezclas fabricadas con asfalto tipo B2, donde la variación se puede deber a las diferencias en el contenido de RAP, teniendo valores entre **234kPa** y **291kPa** de cohesión y **41°** a **54°** los de ángulo de fricción.

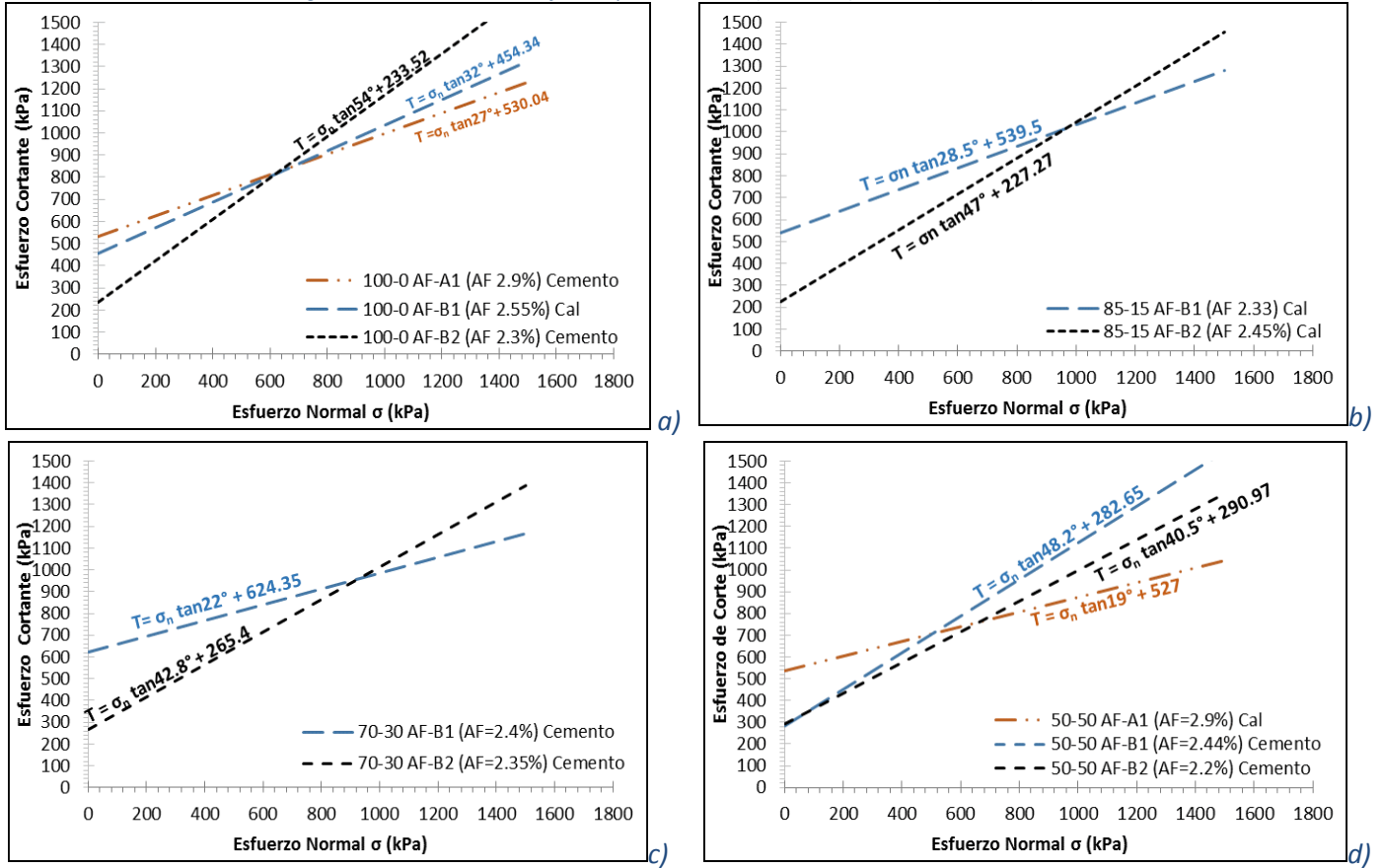
Las mezclas fabricadas con asfalto B1 presentaron la mayor variedad en los valores de resistencia al corte, con valores de cohesión entre **283kPa** y **623kPa** y de **22°** a **48°** para el ángulo de fricción interna.



De las dos fórmulas de trabajo con asfalto tipo A1 sobre las que se pudo obtener parámetros de resistencia, se puede observar que los valores de cohesión son prácticamente iguales estando entre **527kPa** y **530kPa** y ángulos de fricción interna de 19° a 27°, siendo la mezcla con mayor contenido de RAP la de más bajo valor de  $\varphi$ .

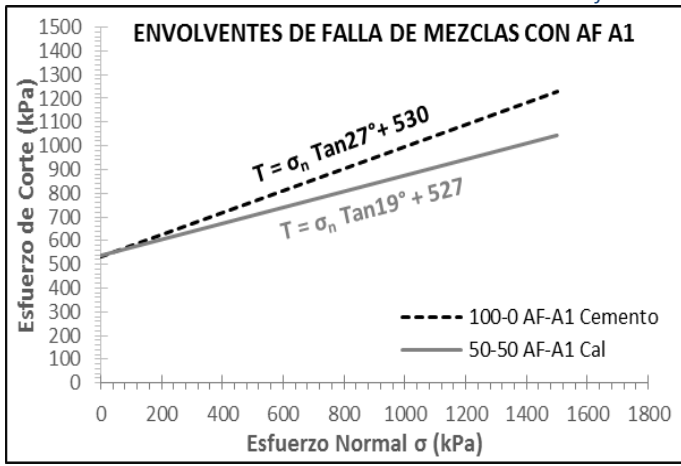
En la figura 5.17 se muestran las envolventes de resistencia la corte para cada mezcla.

Figura 5.6 Envolvente de esfuerzo para mezcla: a) 100-0; b) 85-15; c) 70-30; d) 50-50

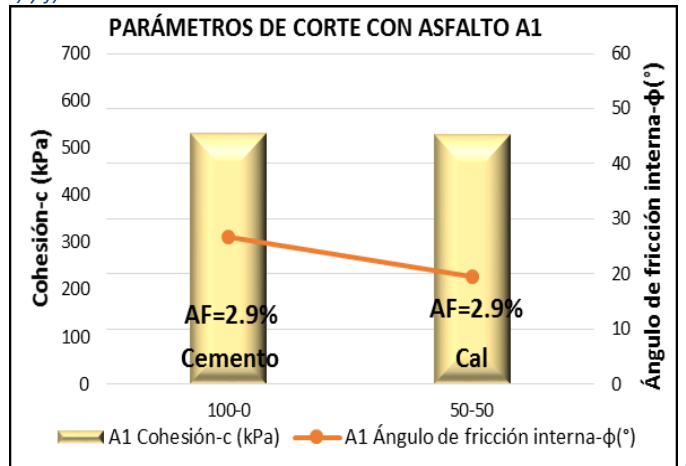


En la figura 5.18 se muestran los parámetros de resistencia la corte por tipo de asfalto para cada mezcla.

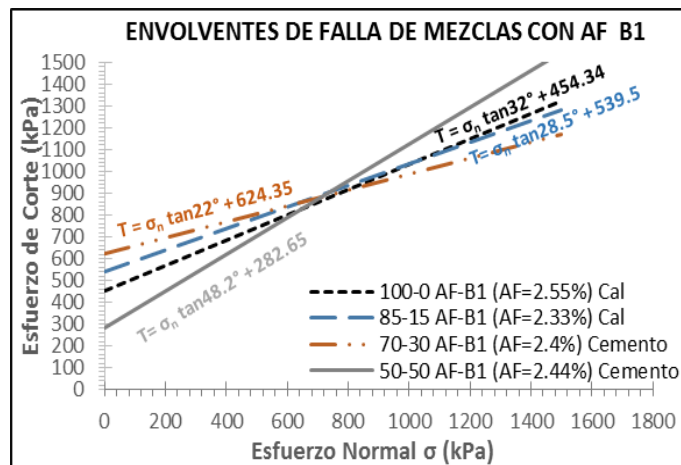
Figura 5.2.2 Envolventes de esfuerzo y parámetros de resistencia para: a) y b) mezclas con asfalto TIPO A1; c) y d) Mezclas con asfalto TIPO B1; e) y f) mezclas TIPO B2.



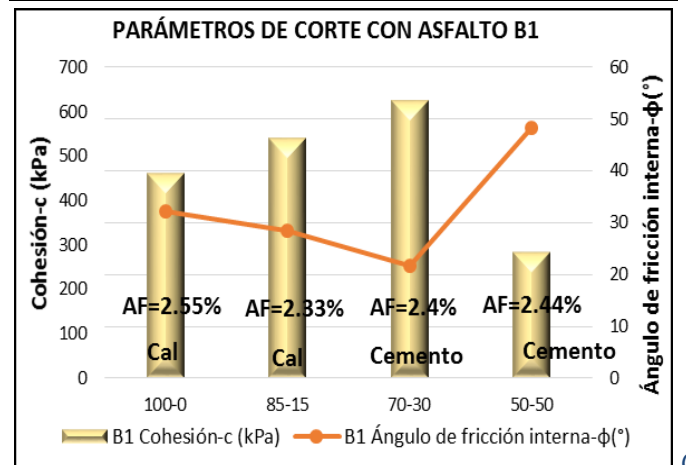
a)



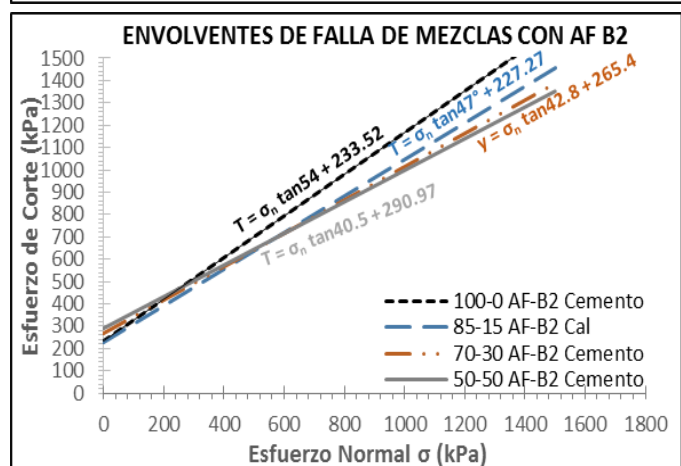
b)



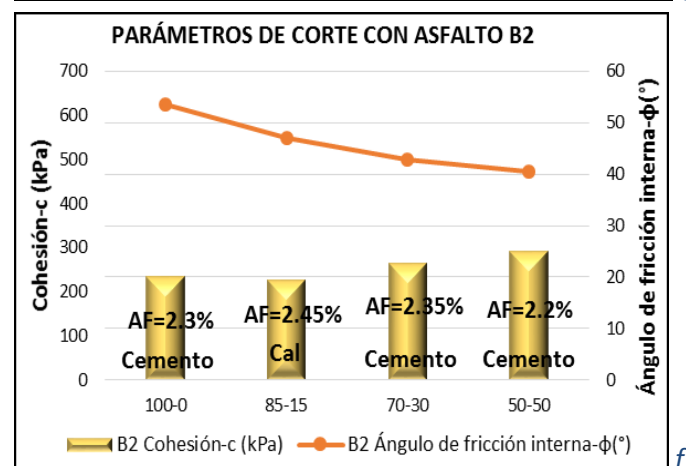
c)



d)



e)



f)

Los valores de cohesión en las mezclas con asfalto tipo A1, presentados en la figura 5.18 a y b) no tienen una variación significativa con el incremento en el contenido de RAP lo que

hace que la clasificación de calidad del material bajo este parámetro no se vea afectada. Sin embargo, los valores de fricción disminuyen un poco más del 30% con el aumento en el contenido de RAP para un mismo contenido de asfalto.

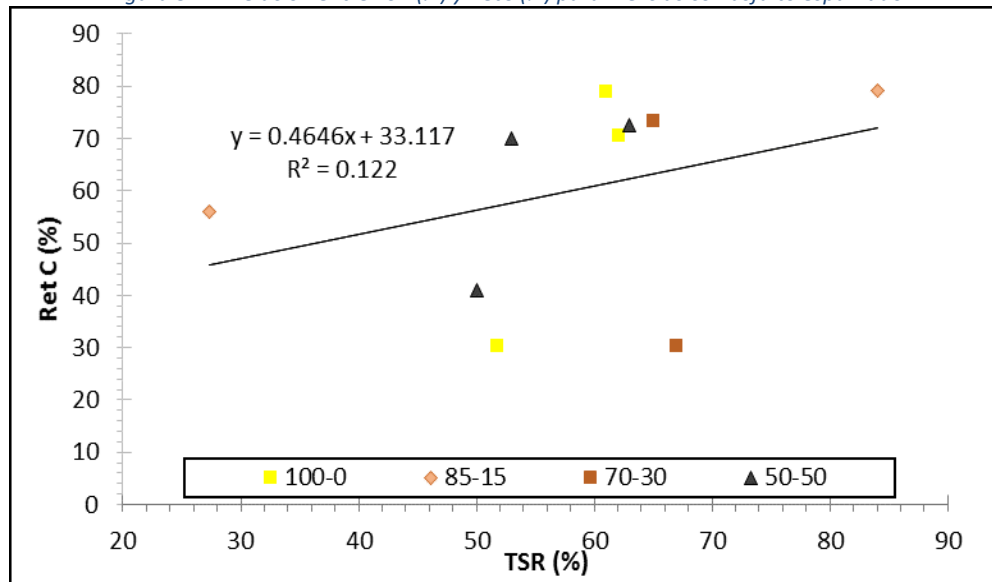
En la figura 5.18 f) se observa que con el incremento en el contenido de RAP los valores de cohesión crecen y los de ángulo de fricción interna decrecen, este comportamiento se puede explicar ya que, aunque el RAP es tratado como roca negra es posible que el contenido de asfalto que posee interacción con el asfalto espumado inyectado, generando cierta lubricación entre partículas con lo que la fricción se ve leve disminuida y la cohesión aumenta.

Un comportamiento similar se observa en la figura 5.18 d), sin embargo, para la mezcla 50-50 no se presenta la tendencia en el aumento de la cohesión y la disminución en el ángulo de fricción. Esto podría ser explicado por la fuerte heterogeneidad en el RAP.

En términos generales, se observa que la cohesión aumenta con el incremento de los contenidos de asfalto utilizado independientemente al tipo de llenante utilizado y la mezcla, esto coincide con lo presentado por Collings & Jenkins, (2011) quienes adicionalmente muestran que los valores de fricción se reducen levemente con el aumento del AF utilizado.

Por último, en la figura 5.19 se presenta la recopilación de datos de TSR (%) vs. RetC (%) para todas las fórmulas de trabajo.

Figura 5.2.2 Relación entre TSR (%) y RetC (%) para mezclas con asfalto espumado.



Como se observa en la figura, se verifica una tendencia creciente entre los valores de TSR(%) y RetC (%) como los planteados por autores como Ben, (2014), Jenkins & Collings, (2015) aunque el valor de correlación es significativamente bajo, lo que puede deberse a la variabilidad de llenantes, contenidos de asfalto espumado y contenidos de RAP entre las mezclas.

## 5.7 Bibliografía.

Academy, A. (2009). Procedure for Compaction of Test Specimens Using the Vibratory Hammer-TG2.

Achille, N. T. (2013). Flexibility and Performance Properties of Bitumen. Stellenbosch.

Asphalt Academy. (2009). TG2-A guideline for the Design and construction of Bitumen Stabilised Materials. (2da.). Pretoria: Asphalt Academy.

Ben, M. D. (2014). hiRESILIENT RESPONSE AND PERFORMANCE OF BITUMEN STABILIZED MATERIALS WITH FOAM INCORPORATING RECLAIMED by. Stellenbosch University.

Čížková, Z., Šedina, J., Valentin, J., & Engels, M. (2016). Laboratory experience with the application of monotonic triaxial test on the cold recycled asphalt mixes, (June).

Collings, D., & Jenkins, K. J. (2011). THE LONG-TERM BEHAVIOUR OF BITUMEN STABILISED MATERIALS (BSMs). Southern Africa.

Ebels, L.-J. (2008). Characterisation of Material Properties and Behaviour of Cold Bituminous Mixtures for Road Pavements. Stellenbosch University.

Ebels, L.-J., & Jenkins, K. J. (2007a). Characterization of bitumen stabilised granular pavement material properties using tri-axial testing.

Ebels, L.-J., & Jenkins, K. J. (2007b). Mix design of bitumen stabilised materials: Best practice and considerations for classification. Proceedings of the 9th Conference on ..., (September), 213–232.

González, A. (2009). An Experimental Study of the Deformation and Performance Characteristics of Foamed Bitumen Stabilised Pavements. Canterbury.

Jenkins, K. J. (2000). Mix design considerations for cold and half-warm bituminous mixes with emphasis on foamed bitumen.

Jenkins, K. J., & Collings, D. (2015). Mix Design of Bitumen Stabilised Materials (BSMs) – A South African Perspective. En 3rd ISAP APE SYMPOSIUM (pp. 1–9).

Jenkins, K. J., & Collings, D. C. (2016). Mix design of bitumen-stabilised materials – South Africa and abroad. Road Materials and Pavement Design, 629(October), 1–19. <http://doi.org/10.1080/14680629.2016.1213511>

Jenkins, K. J., & Ebels, L.-J. (2007). Foamed bitumen mixes= shear performance? International Journal of Pavement Engineering, 8(2), 85–98. <http://doi.org/10.1080/10298430601149718>

Jenkins, K. J., Long, F. M., & Ebels, L. J. (2007). Foamed bitumen mixes= shear performance? International Journal of Pavement Engineering, 8(2), 85–98. <http://doi.org/10.1080/10298430601149718>

Jenkins, K. J., Twagira, M. E., Constantyn Kelfkens, R. W., & Mulusa, W. K. (2012). New laboratory testing procedures for mix design and classification of bitumen-stabilised

materials. *Road Materials and Pavement Design*, 13(4), 618–641.  
<http://doi.org/10.1080/14680629.2012.742625>

Jingang, W., Jenkins, K. J., Molenaar, A. A. A., & Shaopeng, W. (2011). Evaluation of Resilient Modulus Models for A High Quality Crushed Stone (p. 12).

Mathaniya Twagira, E. (2010). Influence of Durability Properties on Performance of Bitumen Stabilized Materials.

Moloto, P. (2010). Accelerated curing protocol for bitumen stabilized materials. Stellenbosch.

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* (Vol. 898).

Theyse, H. ., De Beer, M., & Rust, F. C. (2004). Overview of South African Mechanistic. *Transportation Research Record*, (1), 6–17.

Theyse, H. L. (2007). A Mechanistic-Empirical Design Model for Unbound Granular Pavement Layers. PhD Dissertation, (March), 266.

Van Zyl, E. B. (2015). INFLUENCE OF SPECIMEN GEOMETRY AND GRADING CURVE ON THE PERFORMANCE OF AN UNBOUND GRANULAR MATERIAL. Stellenbosch.

## **CAPÍTULO 6. Conclusiones y recomendaciones**

Las conclusiones presentadas en éste capítulo corresponden al análisis de los resultados obtenidos durante los ensayos ejecutados sobre materiales manejados en laboratorio, por lo tanto, el alcance es particular a estos.

### **6.1 Conclusiones**

#### **6.1.1 Conclusiones generales**

Las conclusiones generales basadas en las observaciones y los resultados obtenidos durante el desarrollo del trabajo son:

- Los parámetros de Vida Media (HL) y Relación de expansión (ER) utilizados en la caracterización de espumas de asfalto para los tres asfaltos analizados, cumplieron con las especificaciones mínimas de la guía de diseño y construcción sudafricana TG2.
- La caracterización de la espuma de asfalto mediante los parámetros de ER y HL mostró que en los cementos tipo A1 y tipo B2 no presentaron el comportamiento esperado de disminución de la vida media y aumento en la relación de expansión con el incremento del contenido de agua de espumado, FWC.
- Las granulometrías obtenidas para el material virgen y el material RAP se ajustaron a los límites establecidos en la guía metodológica TG2. Sin embargo, la no separación por fracciones en la elaboración de las mezclas afectó los resultados de granulometría, relación humedad – peso unitario seco y posiblemente los diseños de las mezclas con AF y por lo tanto los parámetros de resistencia – esta incidencia resultó difícil de cuantificar.
- Los valores de densidad seca máxima del proctor aumentan con el incremento en la proporción de RAP en las mezclas, mientras que la humedad óptima disminuye. La mezcla 70-30 no presenta el comportamiento esperado, esto 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.
- Para los tres cementos asfálticos analizados, se seleccionaron una concentración de agua de espumado FWC de 2.5% y una temperatura de 160°C para la elaboración de las espumas, siguiendo experiencias locales como las mostradas en

la sección 3.2.4.1.y cumpliendo los valores mínimos recomendados por la TG2 de vida media ( $HL > 6$  s) y de relación de expansión ( $ER > 10$ ).

- Aun cuando los tres tipos de asfalto analizados clasifican por grado de penetración como 60-70 (0.1mm), la viscosidad dinámica del asfalto tipo A1 tuvo valores superiores entre **10 y 30** veces la de los cementos asfálticos B1 y B2 los cuales presentan viscosidades prácticamente iguales. El mismo fenómeno se presenta en el parámetro de caracterización de la espuma asfáltica - relación de expansión **ER**, el valor más alto lo presentó el asfalto tipo A1 (**ER=34**) siendo aproximadamente 3 veces superior al del asfalto tipo B1 (**ER=12**) y cerca del doble al del tipo B2 (**ER=18**). Lo anterior permite concluir que la clasificación por penetración no es suficiente para caracterizar el asfalto.
- Los valores de vida media (HL) no presentaron una variación significativa entre los tipos de asfalto.
- Se observó que las mezclas además de ser muy sensibles a la granulometría, presentan variaciones significativas en sus propiedades de acuerdo al tipo de llenante y concentración de asfalto espumado.
- 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 mayores contenidos de asfalto espumado se presentaron en las mezclas sin RAP, como era de esperar, al tratarse de un material con mayor contenido de arenas y finos.
- Aun cuando se tiene un efecto en la concentración óptima de asfalto por la granulometría de las mezclas, cada vez más gruesas con el incremento de RAP, se alcanza a evidenciar la influencia del tipo y origen del asfalto.
- En ninguna de las mezclas analizadas, bajo ningún contenido de asfalto ni para los diferentes contenidos de RAP, se obtuvieron valores aceptables de resistencias conservadas (TSR) usando solo el llenante natural, por lo que en todos los casos se requirió el empleo de llenantes activos como cal o cemento.
- En dos de las cuatro fórmulas de trabajo (85/15 y 70/30) con asfalto tipo A1 no fue posible la obtención de los parámetros de resistencia al corte debido a la



configuración del equipo dinámico el cual requería de parámetros adicionales para cargas superiores a 15 kN.

- Los valores de densidad seca de las briquetas variaron entre 18.52 kN/m<sup>3</sup> y 20.55kN/m<sup>3</sup>. Los valores promedio más altos se presentaron en las mezclas sin contenido de RAP (**19.64 kN/m<sup>3</sup>**) y decrecieron levemente con el aumento del mismo de **19.49 kN/m<sup>3</sup> a 19.15 kN/m<sup>3</sup>** para las mezclas 85-15 y 50-50, respectivamente, mientras que las mezclas 70-30 presentaron densidades de **18.11 kN/m<sup>3</sup>** Se tiene que, por tipo de asfalto los valores promedio de densidad fueron de **19.10kN/m<sup>3</sup>** para el asfalto tipo B1, **19.96 kN/m<sup>3</sup>** para el tipo B2 y **19.28 kN/m<sup>3</sup>** para el tipo A1. Ésta variación en las densidades está en concordancia con los contenidos de asfalto promedio presentados por tipo de asfalto.
- Los valores de relación de compactación (densidad seca de mezcla a 25 segundos por capa/ 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.
- No se encontró dependencia de los valores de ITS y TSR con los tipos de asfalto utilizados.
- 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.
- Con excepción de la mezcla 70-30, todas en las que se usó el asfalto tipo B2, presentaron las resistencias conservadas más bajas.
- 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.
- La determinación de calidad de la mezcla no debe hacerse en función del valor TSR ya que como se observa en la gráfica 4.5, existen valores de TSR elevados, no siempre corresponden a valores altos de resistencia en seco ni en húmedo.

### 6.1.2 Conclusiones particulares

A partir de los diseños de mezcla y de la fabricación de las probetas para la obtención de los parámetros de resistencia presentados en el capítulo 3 y posteriores resultados de los capítulos 4 y 5 se plantean las siguientes conclusiones particulares:

- Los valores de los parámetros de resistencia al corte de las diferentes fórmulas de trabajo se obtuvieron mediante ensayos triaxiales monotónicos sobre briquetas de 100 mm de diámetro X 200 mm de altura y no sobre probetas de 150 mm x 300 mm como lo recomienda la guía de diseño TG2. Para este estudio en específico se desconoce la incidencia del tamaño de la muestra en los resultados.
- Todas las briquetas de 100 mm diámetro X 200 mm de altura, se fabricaron en cinco capas con un tiempo de compactación de 25 segundos por capa como lo recomienda la guía TG2. Sin embargo, se observó que éste tiempo no resultó ser suficiente para alcanzar la densidad seca máxima establecida en el ensayo de proctor.
- La cohesión aumenta con el incremento en el contenido de RAP independientemente del tipo de llenante o de la cantidad de asfalto espumado utilizado. Esto concuerda con los reportado por autores como Ben, (2014), Cizcova (2011), Jenkins y Collins (2011) entre otros, presentados en el capítulo 2.
- Se aprecia que los valores de cohesión también aumentan con el incremento de la relación de expansión (ER) de las espumas asfálticas, la que a su vez depende del tipo de asfalto utilizado. En otras palabras, con el asfalto A1 se obtuvieron los mayores valores de cohesión. Sin embargo, es importante aclarar que con este tipo de asfalto, como ya se indicó, se trabajaron con mayores concentraciones del mismo lo que también pudo haber afectado la cohesión, incrementándola.
- Los valores de cohesión y la tendencia para diferente mezclas dependen del tipo de asfalto, siendo los más dispersos los obtenidos para las mezclas con asfalto tipo B1 estando entre **280kPa** y **620kPa** aproximadamente, seguido por los valores de las mezclas con asfalto tipo B2, entre **227kPa** y **290kPa** y por último con asfalto tipo A1 con aproximadamente **530kPa** para las mezclas 100-0 y 50-50.
- En términos generales, el ángulo de fricción interna decreció con el aumento en el contenido de RAP. Este comportamiento concuerda con los resultados de estudios

realizados por autores como Ben, (2014), Cizkova (2011), Jenkins y Collins (2011), entre otros, que fueron presentados en el capítulo 2. Se resalta como excepción la mezcla 50-50 con asfalto tipo B1 el cual tuvo un valor elevado atípico para la tendencia presentada.

- Se evidencia que el ángulo de fricción es dependiente de la granulometría, así como del tipo y cantidad de asfalto espumado. Las mezclas con el asfalto tipo B2 presentaron valores -entre **40°** y **54°**, seguidas por las mezclas con asfalto tipo B1 cuyos ángulos de fricción variaron entre **22°** y **48°** y por último las mezclas con el asfalto tipo A1 en donde los valores alcanzados de este parámetro fueron **19°** y **27°**. Al analizar el parámetro por tipo mezcla, se observa que el valor del ángulo de fricción cambia significativamente con variaciones en el contenido de asfalto del orden del 0.5%, independientemente del tipo de llenante que se esté utilizando. Esto último concuerda con lo reportado por Cizkova et al., (2016) quienes concluyen que el parámetro de fricción presenta una fuerte variación para un mismo tipo de mezcla al aumentar el contenido de asfalto espumado.
- Los valores del ángulo de fricción disminuyen con el aumento del contenido de asfalto espumado, lo que es congruente con resultados reportados por Van de Ven (2013), Van Zyl (2015) entre otros, para cualquier tipo de llenante y para casi todas las mezclas analizadas excepto para las elaboradas con asfalto tipo B2 en dos de las cuatro muestras.
- El cambio en el llenante utilizado no parece alterar la tendencia de la resistencia al corte, que si se ve afectada por el contenido de RAP en la mezcla, el tipo de asfalto utilizado y por la cantidad de asfalto espumado inyectado.
- De acuerdo a los resultados obtenidos en el presente trabajo, el incremento en el contenido de RAP en la mezcla da lugar a una disminución del ángulo de fricción interna y un aumento de la cohesión en casi todas las mezclas. Esto concuerda con lo reportado por diferentes autores como Ben, 2014 y Čížková et al., (2016).
- El aumento en el contenido de RAP tiene mayor incidencia sobre el ángulo de fricción interna que sobre la cohesión.
- En relación con la Cohesión retenida no se observó una relación directa con el contenido de asfalto en todas las mezclas. Sin embargo, se observa que tiene una relación con el parámetro de resistencia retenida TSR(%). Se observa una relación

directa con el comportamiento de la cohesión en las mezclas; aquellas que muestran incrementos en los valores de cohesión también presentan valores de resistencia retenida RetC (%) en ascenso.

## **6.2 Recomendaciones**

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 las humedades óptimas de compactación.

La compactación de briquetas de 100 mm diámetro X 200 mm de altura debe realizarse asegurando la densidad deseada del proctor y no con un tiempo definido por capa, ya que como se comentó en las conclusiones particulares, los valores de densidad dependen del tipo de mezcla e incluso del tipo y contenido de asfalto utilizado en cada una de ellas.

La dosificación de materiales debe realizarse controlando las fracciones por tamaño y no por cuarteo.

Determinar y analizar parámetros como la cantidad de vacíos y el grado de saturación en las mezclas estabilizadas con asfalto espumado que permitan complementar el análisis de los resultados.

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 y con ello, disminuir las variables involucradas en la investigación, determinando los parámetros para una misma condición de llenante e incluso la cantidad de asfalto espumado si el interés es observar la incidencia del tipo de asfalto usado.

## Anexo 1: 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**

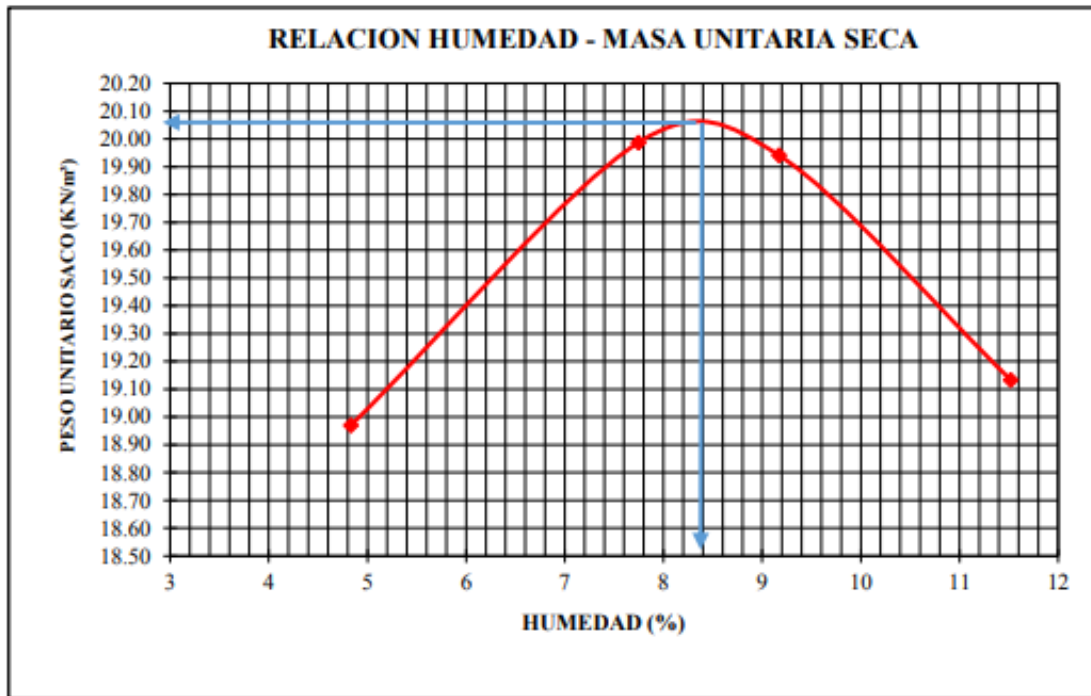
**Método Empleado para la Compactación:**

Método C

**Método de la Preparación de la Muestra:**

Vía Humeda

MUESTRA No.	Humedad (%)	Densidad Húmeda (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad Seca (g/cm <sup>3</sup> )	Peso Unitario Seco (KN/m <sup>3</sup> )
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/m<sup>3</sup>

## MEZCLA 85-15:

### 1.2 RELACION HUMEDAD - DENSIDAD

**Método Proctor Modificado**

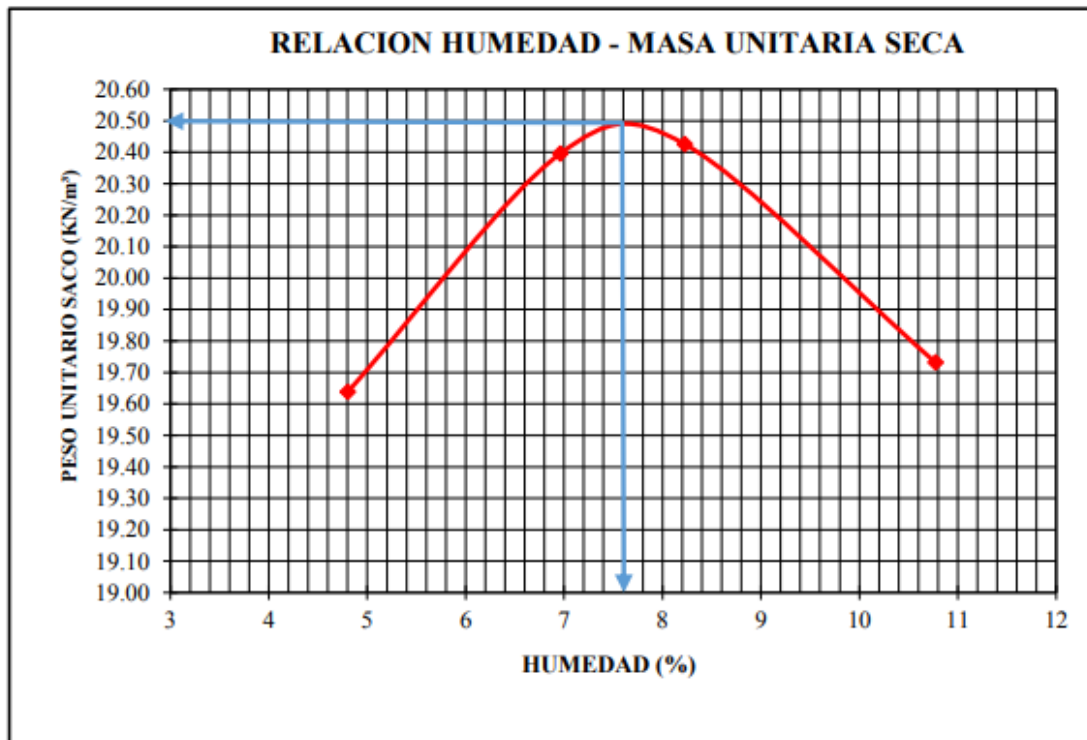
**Norma INV - E 142 - 13**

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 <sup>3</sup> )	Densidad Seca (g/cm <sup>3</sup> )	Peso Unitario Seco (KN/m <sup>3</sup> )
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/m<sup>3</sup>

## MEZCLA 70-30:

### 1.3 RELACION HUMEDAD - DENSIDAD

**Método Proctor Modificado**

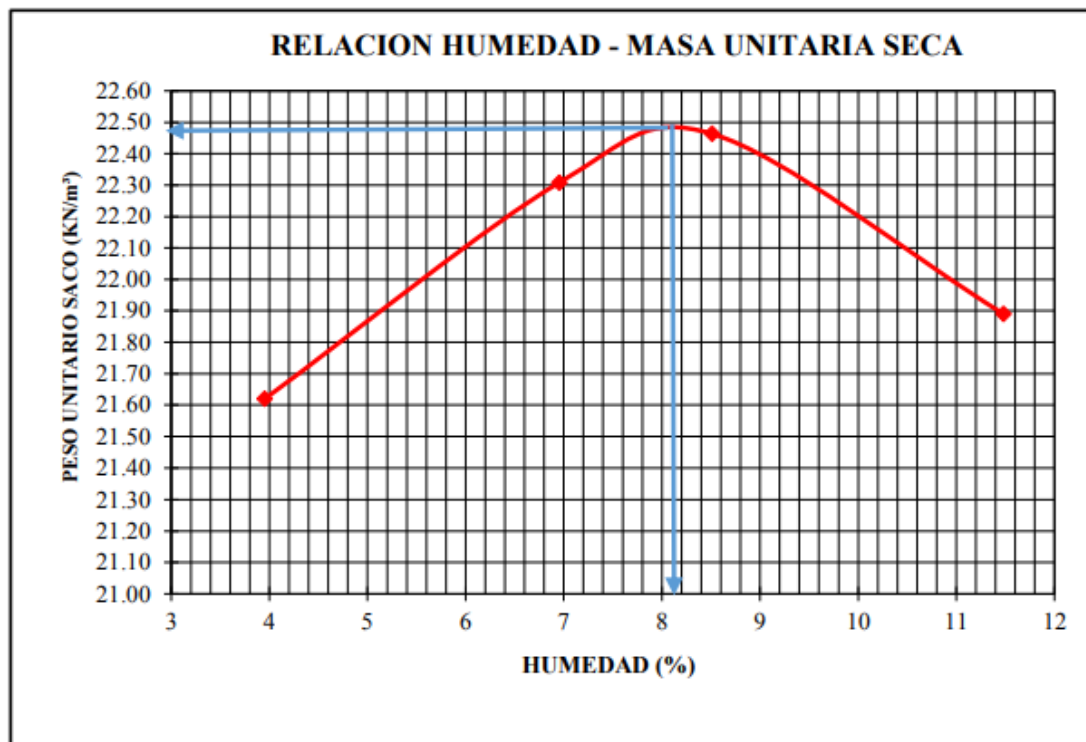
**Norma INV - E 142 - 13**

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 <sup>3</sup> )	Densidad Seca (g/cm <sup>3</sup> )	Peso Unitario Seco (KN/m <sup>3</sup> )
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/m<sup>3</sup>

## MEZCLA 50-50:

### 1.4 RELACION HUMEDAD - DENSIDAD

**Método Proctor Modificado**

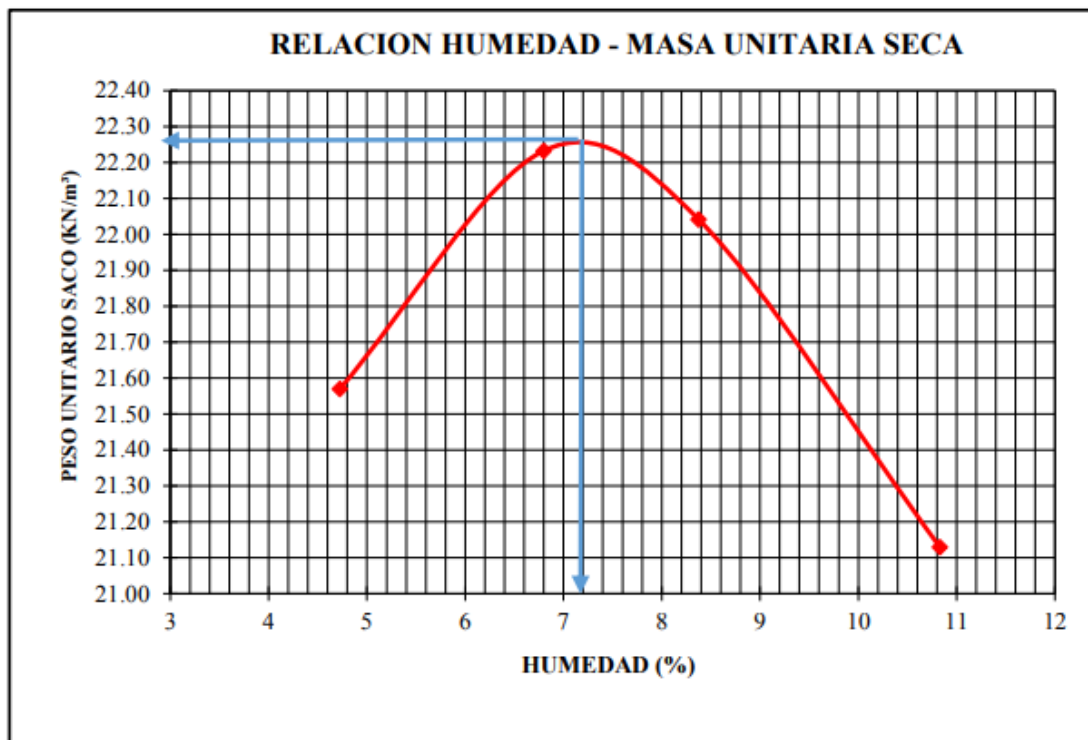
**Norma INV - E 142 - 13**

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 <sup>3</sup> )	Densidad Seca (g/cm <sup>3</sup> )	Peso Unitario Seco (KN/m <sup>3</sup> )
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/m<sup>3</sup>



## Anexo 2: Características de Espuma de Asfalto

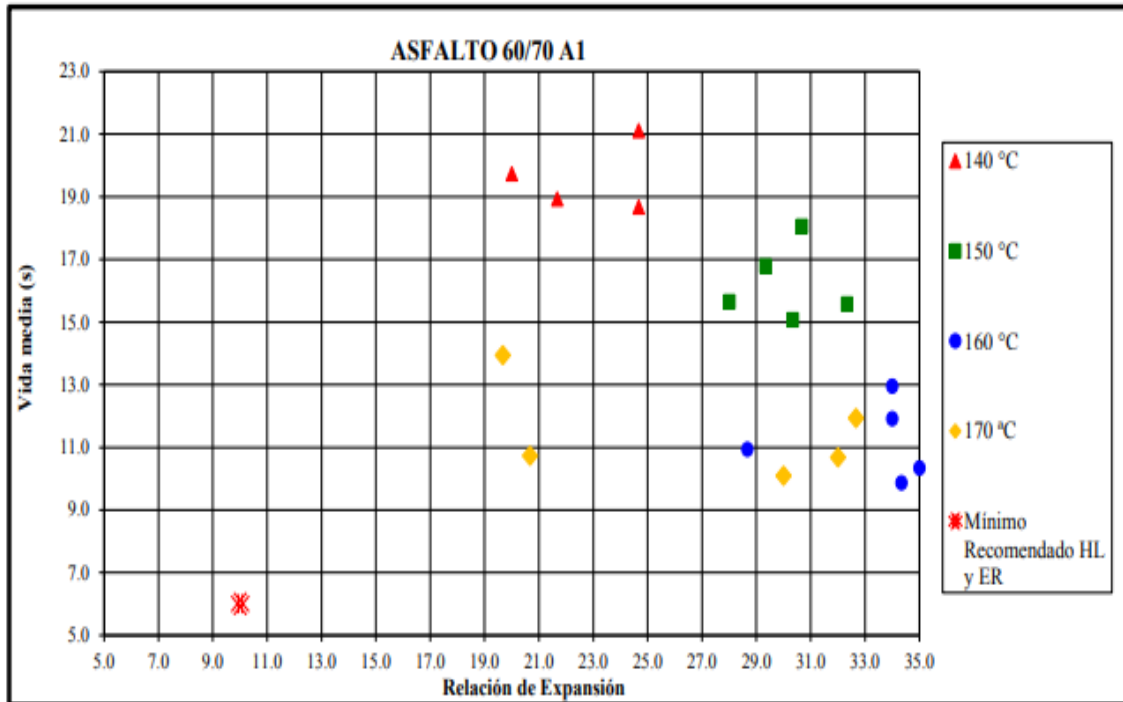
### Cemento asfáltico 60-70 TIPO A1

#### RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE ESPUMADO

Manual TG2 - 2009 (Sudáfrica)

Cemento asfáltico de refinería identificado como 60 - 70 INCOASFALTOS

Contenido de	T = 140 °C		T = 150 °C		T = 160 °C		T = 170 °C	
Agua (%)	Expansión	V. Media (s)	Expansión	V. Media (s)	Expansión	V. Media (s)	Expansión	V. Media (s)
2.0	20.0	19.7	29.3	16.8	28.7	10.9	19.7	13.9
2.5	24.7	18.7	28.0	15.6	34.0	12.9	20.7	10.7
3.0	21.7	18.9	30.3	15.1	34.0	11.9	30.0	10.1
3.5	24.7	21.1	32.3	15.6	35.0	10.3	32.0	10.7
4.0	23.3	24.5	30.7	18.1	34.3	9.9	32.7	11.9



#### CONDICIONES ÓPTIMAS:

<i>TEMPERATURA</i> =	160	<i>VIDA MEDIA</i> =	12.9
<i>% DE AGUA</i> =	2.5%	<i>RELACIÓN DE EXPANSIÓN</i> =	34.0

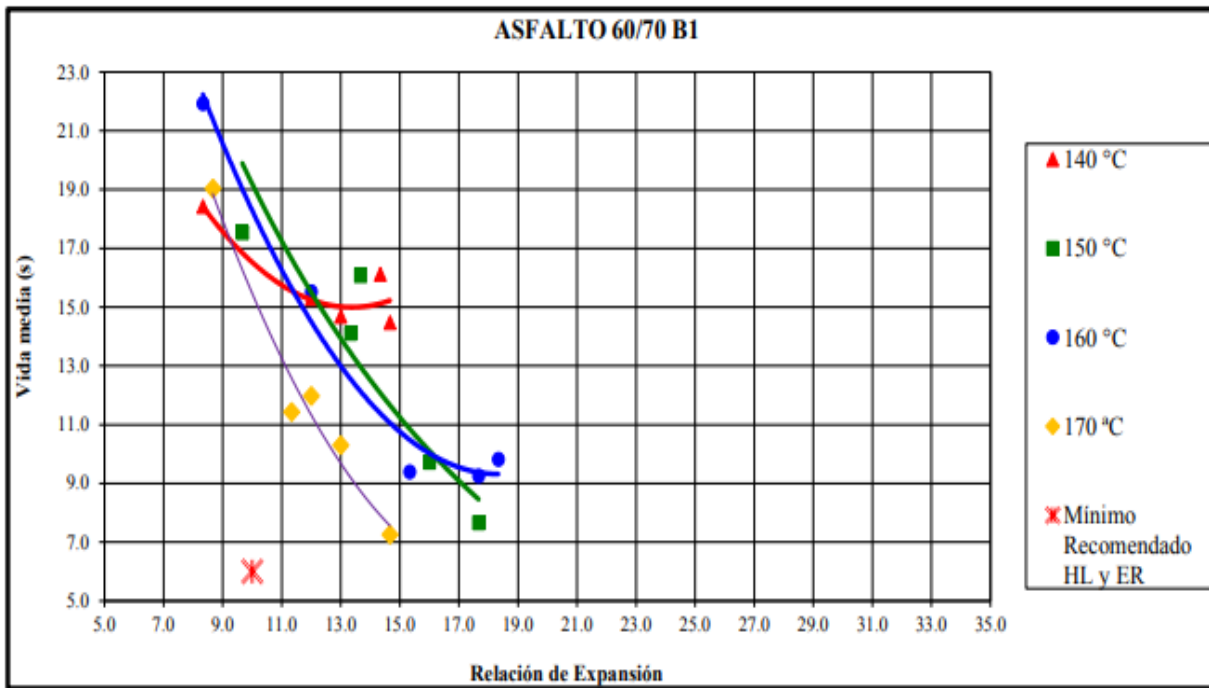
## Cemento asfáltico 60-70 TIPO B1

### RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE ESPUMADO

Manual TG2 - 2009 (Sudáfrica)

Cemento asfáltico de refinería identificado como 60 - 70 B1

Contenido de Agua (%)	T = 140 °C		T = 150 °C		T = 160 °C		T = 170 °C	
	Expansión	V. Media (s)	Expansión	V. Media (s)	Expansión	V. Media (s)	Expansión	V. Media (s)
2.0	8.3	18.4	9.7	17.5	8.3	21.9	8.7	19.0
2.5	12.0	15.3	13.3	14.1	12.0	15.5	11.3	11.4
3.0	13.0	14.7	13.7	16.1	15.3	9.4	12.0	12.0
3.5	14.3	16.1	16.0	9.7	17.7	9.3	13.0	10.3
4.0	14.7	14.5	17.7	7.7	18.3	9.8	14.7	7.3



#### CONDICIONES ÓPTIMAS:

<i>TEMPERATURA</i> =	160	<i>VIDA MEDIA</i> =	15.5
<i>% DE AGUA</i> =	2.5%	<i>RELACIÓN DE EXPANSIÓN</i> =	12.0

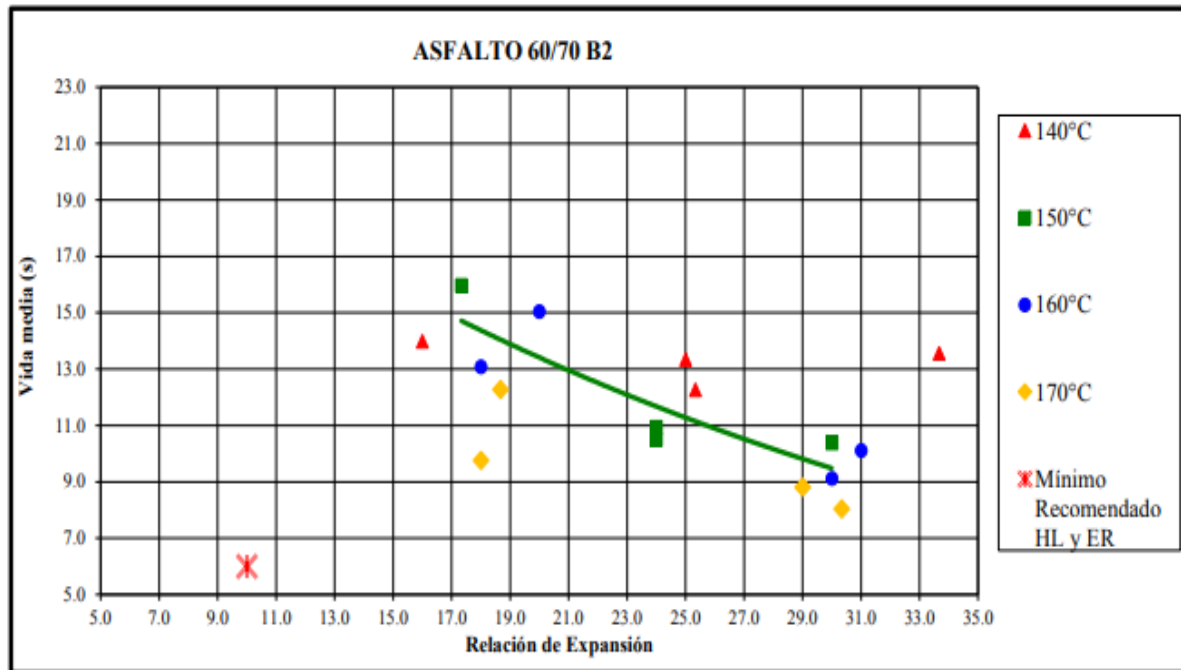
## Cemento asfáltico 60-70 TIPO B2

### RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE ESPUMADO

Manual TG2 - 2009 (Sudáfrica)

Cemento asfáltico de refinería identificado como 60 - 70 B2

Contenido de Agua (%)	T = 140 °C		T = 150 °C		T = 160 °C		T = 170 °C	
	Expansión	V. Media (s)	Expansión	V. Media (s)	Expansión	V. Media (s)	Expansión	V. Media (s)
2.5	16.0	14.0	17.3	16.0	18.0	13.1	18.0	9.8
3.0	33.7	13.6	24.0	10.5	20.0	15.0	18.7	12.3
3.5	25.0	13.3	24.0	10.9	30.0	9.1	30.3	8.0
4.0	25.3	12.3	30.0	10.4	31.0	10.1	29.0	8.8



## Anexo 3: 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

<b>Proyecto:</b>	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.	<b>Fecha de fabricación:</b>	10/2/2017
<b>Empresa:</b>	Escuela Colombiana de Ingeniería		
<b>ASFALTO:</b>	Tipo A1	Clasificación por Dureza:	60/70
<b>Agua (%)</b>	2.50%	<b>Relación de Expansión</b>	34.0
		<b>Vida Media (s)</b>	13
<b>AGREGADO:</b>	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/cm³)	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		
	<b>PROMEDIO</b>							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		
	<b>PROMEDIO</b>							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		
	<b>PROMEDIO</b>							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

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

<b>Fecha de ensayo probetas en condición seca:</b>	Febrero 10 de 2017
<b>Fecha de ensayo probetas en condición saturada:</b>	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		
	<b>PROMEDIO</b>							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		
	<b>PROMEDIO</b>							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		
	<b>PROMEDIO</b>							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 <sup>3</sup> )	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	
	<b>PROMEDIO</b>						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	
	<b>PROMEDIO</b>						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	
	<b>PROMEDIO</b>						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

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

<b>Fecha de ensayo probetas en condición seca:</b>	Marzo 01 de 2017
<b>Fecha de ensayo probetas en condición saturada:</b>	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		
	<b>PROMEDIO</b>							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		
	<b>PROMEDIO</b>							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		
	<b>PROMEDIO</b>							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 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:	12/9/2016
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/cm <sup>3</sup> )	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		
	<b>PROMEDIO</b>							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		
	<b>PROMEDIO</b>							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		
	<b>PROMEDIO</b>							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

<b>Proyecto:</b>	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.				<b>Fecha de fabricación:</b>	12/12/2016
<b>Empresa:</b>	Escuela Colombiana de Ingeniería					
<b>ASFALTO:</b>	Tipo B1	Clasificación por Dureza:	60/70			
<b>Agua (%)</b>	2.50%	<b>Relación de Expansión</b>	12.0	<b>Vida Media (s)</b>	16	
<b>AGREGADO:</b>	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 <sup>3</sup> )	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	
	<b>PROMEDIO</b>						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	
	<b>PROMEDIO</b>						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	
	<b>PROMEDIO</b>						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 TRACCION INDIRECTA- DEFINICION 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 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 <sup>3</sup> )	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		
	<b>PROMEDIO</b>							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		
	<b>PROMEDIO</b>							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		
	<b>PROMEDIO</b>							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 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	2.4	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	
	<b>PROMEDIO</b>						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	
	<b>PROMEDIO</b>						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	
	<b>PROMEDIO</b>						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

<b>Proyecto:</b>	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.				<b>Fecha de fabricación:</b>	25/11/16
<b>Empresa:</b>	Escuela Colombiana de Ingeniería					
<b>ASFALTO:</b>	Tipo B2	Clasificación por Dureza: 60/70				
<b>Agua (%)</b>	2.50%	<b>Relación de Expansión</b>	18.0	<b>Vida Media (s)</b>	13	
<b>AGREGADO:</b>	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/cm <sup>3</sup> )	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		
	<b>PROMEDIO</b>							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		
	<b>PROMEDIO</b>							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		
	<b>PROMEDIO</b>							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 Granualr 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/cm³)	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		
	<b>PROMEDIO</b>							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	1235.4	1174.2	2.081		3050.9		273.1		
	<b>PROMEDIO</b>							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		
	<b>PROMEDIO</b>							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/cm³)	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		
	<b>PROMEDIO</b>							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		
	<b>PROMEDIO</b>							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		
	<b>PROMEDIO</b>							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/cm <sup>3</sup> )	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		
	<b>PROMEDIO</b>							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		
	<b>PROMEDIO</b>							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		
	<b>PROMEDIO</b>							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/cm <sup>3</sup> )	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	
<b>PROMEDIO</b>						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	
<b>PROMEDIO</b>						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	
<b>PROMEDIO</b>						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

<b>Proyecto:</b>	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.			<b>Fecha de fabricación:</b>	3/3/2017
<b>Empresa:</b>	Escuela Colombiana de Ingeniería				
<b>ASFALTO:</b>	Tipo A1	Clasificación por Dureza:	60/70		
<b>Agua (%)</b>	2.5	<b>Relación de Expansión</b>	34.0	<b>Vida Media (s)</b>	13
<b>AGREGADO:</b>	Mezcla 15% de RAP y 85% Material Granualr Virgen				
<b>LLenante:</b>	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	
<b>PROMEDIO</b>						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	
<b>PROMEDIO</b>						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	
<b>PROMEDIO</b>						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

<b>Proyecto:</b>	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.			<b>Fecha de fabricación:</b>	21/03/201
<b>Empresa:</b>	Escuela Colombiana de Ingeniería				
<b>ASFALTO:</b>	Tipo A1	Clasificación por Dureza:		60/70	
<b>Agua (%)</b>	2.5%	<b>Relación de Expansión</b>	12.9	<b>Vida Media (s)</b>	34
<b>AGREGADO:</b>	Mezcla 30% de RAP y 70% Material Granular Virgen				
<b>Lenante:</b>	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/cm³)	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	
<b>PROMEDIO</b>						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	
<b>PROMEDIO</b>						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	
<b>PROMEDIO</b>						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 L.N.V. E - 725 -13

<b>Proyecto:</b>	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.			<b>Fecha de fabricación:</b>	17/03/2017
<b>Empresa:</b>	Escuela Colombiana de Ingeniería				
<b>ASFALTO:</b>	Tipo A1	Clasificación por Dureza:	60/70		
<b>Agua (%)</b>	2.5%	<b>Relación de Expansión</b>	12.9	<b>Vida Media (s)</b>	34
<b>AGREGADO:</b>	Mezcla 50% de RAP y 50% Material Granular Virgen				
<b>Llenante:</b>	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/cm <sup>3</sup> )	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	
<b>PROMEDIO</b>						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	
<b>PROMEDIO</b>						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	
<b>PROMEDIO</b>						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

<b>Proyecto:</b>	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.				<b>Fecha de fabricación:</b>	30/1/2017
<b>Empresa:</b>	Escuela Colombiana de Ingeniería					
<b>ASFALTO:</b>	Tipo B1	Clasificación por Dureza:		60/70		
<b>Agua (%)</b>	2.5%	<b>Relación de Expansión</b>	12.0	<b>Vida Media (s)</b>	15.5	
<b>AGREGADO:</b>	Material Granular virgen					
<b>LLenante:</b>	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 <sup>3</sup> )	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	
<b>PROMEDIO</b>						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	
<b>PROMEDIO</b>						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	
<b>PROMEDIO</b>						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

<b>Proyecto:</b>	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.				<b>Fecha de fabricación:</b>	30/1/2017
<b>Empresa:</b>	Escuela Colombiana de Ingeniería					
<b>ASFALTO:</b>	Tipo B1	Clasificación por Dureza:		60/70		
<b>Agua (%)</b>	2.50%	<b>Relación de Expansión</b>	12.0	<b>Vida Media (s)</b>	15.5	
<b>AGREGADO:</b>	Mezcla 15% de RAP y 85% Material Granular Virgen					
<b>LLenante:</b>	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 <sup>3</sup> )	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	
<b>PROMEDIO</b>						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	114.1	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	
<b>PROMEDIO</b>						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	
<b>PROMEDIO</b>						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

<b>Proyecto:</b>	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.				<b>Fecha de fabricación:</b>	30/1/2017
<b>Empresa:</b>	Escuela Colombiana de Ingeniería					
<b>ASFALTO:</b>	Tipo B1	Clasificación por Dureza:	60/70			
<b>Agua (%)</b>	2.50%	<b>Relación de Expansión</b>	12.0	<b>Vida Media (s)</b>	15.5	
<b>AGREGADO:</b>	Mezcla 30% de RAP y 70% Material Granular Virgen					
<b>Lenante:</b>	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/cm <sup>3</sup> )	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	
<b>PROMEDIO</b>						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	
<b>PROMEDIO</b>						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	
<b>PROMEDIO</b>						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/cm <sup>3</sup> )	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	
<b>PROMEDIO</b>						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	
<b>PROMEDIO</b>						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	
<b>PROMEDIO</b>						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/cm <sup>3</sup> )	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	
<b>PROMEDIO</b>						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	
<b>PROMEDIO</b>						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	
<b>PROMEDIO</b>						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

<b>Proyecto:</b>	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.				<b>Fecha de fabricación:</b>	27/1/17
<b>Empresa:</b>	Escuela Colombiana de Ingeniería					
<b>ASFALTO:</b>	Tipo B2	Clasificación por Dureza:	60/70			
<b>Agua (%)</b>	2.5%	<b>Relación de Expansión</b>	18.0	<b>Vida Media (s)</b>	13.1	
<b>AGREGADO:</b>	Mezcla 15 % de RAP y 85% de Material granular Virgen					
<b>LLenante:</b>	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	
<b>PROMEDIO</b>						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	
<b>PROMEDIO</b>						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	
<b>PROMEDIO</b>						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

<b>Proyecto:</b>	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.			<b>Fecha de fabricación:</b>	20/01/2017
<b>Empresa:</b>	Escuela Colombiana de Ingeniería				
<b>ASFALTO:</b>	Tipo B2	<b>TIPO :</b> 60/70			
<b>Agua (%)</b>	2.5	<b>Relación de Expansión</b>	18.0	<b>Vida Media (s)</b>	13.1
<b>AGREGADO:</b>	Mezcla 30% de RAP y 70% Material Granualr Virgen				
<b>LLenante:</b>	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	
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	
<b>PROMEDIO</b>						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	
<b>PROMEDIO</b>						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	
<b>PROMEDIO</b>						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

<b>Proyecto:</b>	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.					<b>Fecha de fabricación:</b>	20/01/2017
<b>Empresa:</b>	Escuela Colombiana de Ingeniería						
<b>ASFALTO:</b>	Tipo B2	Clasificación por Dureza:		60/70			
<b>Agua (%)</b>	2.50%	<b>Relación de Expansión</b>	18.0	<b>Vida Media (s)</b>	13.1		
<b>AGREGADO:</b>	Mezcla 50% de RAP y 50% Material Granular Virgen						
<b>LLenante:</b>	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 <sup>3</sup> )	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	
<b>PROMEDIO</b>						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	
<b>PROMEDIO</b>						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	
<b>PROMEDIO</b>						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 5: Ensayos Triaxiales

### Mezcla 100-00 AF-A1

MEZCLA CON ASFALTO ESPUMADO

Manual TG2 - 2009 (Sudáfrica)

FABRICACION DE MEZCLAS CON ASFALTO ESPUMADO

Proyecto:	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales			Fecha:	17/03/2017
Empresa:	Escuela Colombiana de Ingeniería				
ASFALTO:	Tipo A1		TIPO : 60/70		
Temperatura:	160	Agua (%)	2.5%	R. de Expansión	18.0
				Vida Media (s)	13.1
AGREGADO:	Material granular de aporte proveniente de la Cantera CTU				
Humedad Óptima (%)	8.2	Humedad inicial (%)	5.5	Humedad de preenvuelta (0,6w <sub>óptima</sub> )	5.7
Peso Húmedo (g)	10000.0	Peso Seco (g)	9478.7	Agua de mezclado antes de espumado (g)	22.7
				Agua de mezclado después de espumado (g)	233.2

Variación de Asfalto Espumado

Identificación	Asfalto	Cemento	Peso Asfalto	Peso Llenante
	(%)	(%)	(g)	(g)
1	3.0	1.0	334.4	94.8
2	3.0	1.0	334.4	
3	3.0	1.0	334.4	

Densidad, Resistencia - Ensayo de Tensión Indirecta y Resistencia Conservada

Ident.	Altura Promedio (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )
301	20.153	10.073	3110.5	2953.6	1.839
302	19.936	10.159	3151.6	2999.1	1.856
303	19.822	10.125	3068.5	2917.6	1.828
304	20.202	10.137	3168.5	2932.2	1.798
305	20.184	10.139	3186.6	3026.3	1.857
306	19.731	10.133	3128.1	2984.2	1.875
307	19.265	10.135	3189.8	3052.8	1.964
308	20.415	10.076	3259.0	3108.2	1.910
309	19.696	10.100	3155.5	2991.1	1.895
<b>PROMEDIO</b>	19.934	10.120	3157.567	2996.122	1.869

## Mezcla 85-15 AF-A1

### MEZCLA CON ASFALTO ESPUMADO

Manual TG2 - 2009 (Sudáfrica)

### FABRICACION DE MEZCLAS CON ASFALTO ESPUMADO

<b>Proyecto:</b>	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales			<b>Fecha:</b>	21/04/2017
<b>Empresa:</b>	Escuela Colombiana de Ingeniería				
<b>ASFALTO:</b>	Tipo A1		TIPO : 60/70		
<b>Temperatura:</b>	160	<b>Agua (%)</b>	2.5%	<b>R. de Expansión</b>	18.0
				<b>Vida Media (s)</b>	13.1
<b>AGREGADO:</b>	Mezcla 15% de RAP y 85% Material Granualr Virgen				
<b>Humedad Óptima (%)</b>	7.6	<b>Humedad inicial (%)</b>	2.6	<b>Humedad de preenvuelta (0,6w<sub>óptima</sub>)</b>	
				5.3	
<b>Peso Húmedo (g)</b>	10000.0	<b>Peso Seco (g)</b>	9749.2	<b>Agua de mezclado antes de espumado (g)</b>	267.8
	5000		4874.6	<b>Agua de mezclado después de espumado (g)</b>	222.3

### Variación de Asfalto Espumado

Identificación	Asfalto	Cemento	Peso Asfalto	Peso Llenante
	(%)	(%)	(g)	(g)
1	2.8	1.0	323.0	97.5
2	2.8	1.0	186.5	48.7

### Densidad, Resistencia - Ensayo de Tensión Indirecta y Resistencia Conservada

Ident.	Altura Promedio (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )
81	19.425	10.133	3439.3	3268.0	2.086
82	18.944	10.094	3349.6	3163.6	2.087
83	19.231	10.150	3383.9	3205.5	2.060
84	19.548	10.175	3467.7	3278.6	2.063
85	18.981	10.076	3359.7	3189.8	2.108
86	19.806	10.200	3487.5	3289.8	2.033
87	18.888	10.245	3358.7	3182.6	2.044
88	19.110	10.188	3378.3	3204.2	2.057
89	18.717	10.098	3212.5	3100.0	2.068
810	19.910	10.100	3490.0	3307.9	2.074
<b>PROMEDIO</b>	19.256	10.146	3392.720	3219.000	2.068

## Mezcla 70-30 AF-A1

### MEZCLA CON ASFALTO ESPUMADO

Manual TG2 - 2009 (Sudáfrica)

### FABRICACION DE MEZCLAS CON ASFALTO ESPUMADO

Proyecto:	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales			Fecha:	28/04/2017
Empresa:	Escuela Colombiana de Ingeniería				
ASFALTO:	Tipo A1		TIPO : 60/70		
Temperatura:	160	Agua (%)	2.5%	R. de Expansión	18.0
				Vida Media (s)	13.1
AGREGADO:	Mezcla 30% de RAP y 70% Material Granualr Virgen				
Humedad Óptima (%)	8.2	Humedad inicial (%)	3.1	Humedad de preenvuelta (0,6w <sub>óptima</sub> )	
				5.7	
Peso Húmedo (g)	10000.0	Peso Seco (g)	9696.3	Agua de mezclado antes de espumado (g)	
				253	
				Agua de mezclado después de espumado (g)	
				239	

### Variación de Asfalto Espumado

Identificación	Asfalto	Cal	Peso Asfalto	Peso Llenante
	(%)	(%)	(g)	(g)
1	2.4	1.0	283	97.0

### Densidad, Resistencia - Ensayo de Tensión Indirecta y Resistencia Conservada

Ident.	Altura Promedio (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )
B1I	20.234	10.258	3478.5	3308.6	1.979
B2I	19.862	10.129	3398.8	3228.7	2.017
B3I	19.767	10.169	3350.9	3200.5	1.994
B4I	20.036	10.086	3486.3	3316.9	2.072
B5I	20.351	10.139	3485.9	3315.2	2.018
B6I	20.399	10.108	3502.7	3335.4	2.038
B7I	20.243	10.240	3495.2	3314.7	1.989
B8I	20.138	10.149	3475.1	3312.8	2.034
B9I	19.931	10.189	3379.3	3210.9	1.976
<b>PROMEDIO</b>	20.107	10.163	3450.300	3282.633	2.013

## Mezcla 50-50 AF-A1

### MEZCLA CON ASFALTO ESPUMADO

Manual TG2 - 2009 (Sudáfrica)

### FABRICACION DE MEZCLAS CON ASFALTO ESPUMADO

Proyecto:	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales			Fecha:	5/5/2017
Empresa:	Escuela Colombiana de Ingeniería				
ASFALTO:	Tipo A1	TIPO : 60/70			
Temperatura:	160	Agua (%)	2.5%	R. de Expansión	18.0
				Vida Media (s)	13.1
AGREGADO:	Mezcla 50% de RAP y 50% Material Granular Virgen				
Humedad Óptima (%)	7.2	Humedad inicial (%)	1.0	Humedad de preenvuelta (0,6w <sub>óptima</sub> )	5.0
Peso Húmedo (g)	10000.0	Peso Seco (g)	9902.8	Agua de mezclado antes de espumado (g)	402
				Agua de mezclado después de espumado (g)	214

### Variación de Asfalto Espumado

Identificación	Asfalto	Cal	Peso Asfalto	Peso Llenante
	(%)	(%)	(g)	(g)
1	3.0	1.0	347	99.0

### Densidad, Resistencia - Ensayo de Tensión Indirecta y Resistencia Conservada

Ident.	Altura Promedio (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )
B1I	18.923	10.098	3263.4	3059.0	2.019
B2I	18.912	10.179	3226.2	2964.2	1.926
B3I	19.215	10.252	3315.8	3080.0	1.942
B4I	19.695	10.177	3369.6	3160.4	1.973
B5I	20.137	10.187	3459.3	3252.0	1.982
B6I	19.771	10.121	3407.8	3163.6	1.989
B7I	20.038	10.130	3438.0	3149.1	1.950
B8I	19.939	10.145	3449.5	3172.8	1.969
B9I	20.114	10.163	3456.2	3248.5	1.991
<b>PROMEDIO</b>	19.638	10.161	3376.200	3138.844	1.971

## Mezcla 100-0 AF-B1

MEZCLA CON ASFALTO ESPUMADO PARA MODULO, C Y PHY

Manual TG2 - 2009 (Sudáfrica)

### FABRICACION DE MEZCLAS CON ASFALTO ESPUMADO

Proyecto:	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados			Fecha:	31/03/2017
Empresa:	Escuela Colombiana de Ingeniería				
ASFALTO:	Tipo B1		TIPO : 60/70		
Temperatura:	160	Agua (%)	2.5%	R. de Expansión	12.0
				Vida Media (s)	15.5
AGREGADO:	Material Granular virgen				
Humedad Óptima (%)	8.4	Humedad inicial (%)	4.7	Humedad de preenvuelta (0,6w <sub>óptima</sub> )	5.0
Peso Húmedo (g)	10000.0	Peso Seco (g)	9554.6	Agua de mezclado antes de espumado (g)	36.1
				Agua de mezclado después de espumado (g)	321.0

### Variación de Asfalto Espumado

Identificación	Asfalto	CAL	Peso Asfalto	Peso Llenante
	(%)	(%)	(g)	(g)
1.0	2.4	1.0	279.3	95.5
2.0	2.4	1.0		
4.0	2.4	1.0		

### Densidad, Resistencia - Ensayo de Tensión Indirecta y Resistencia Conservada

Ident.	Altura Promedio (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )
241	18.2	10.2	3320.0	3126.6	2.112
242	18.6	10.1	3373.0	3164.8	2.105
243	19.7	10.1	3548.5	3318.6	2.118
244	19.8	10.1	3517.5	3299.1	2.063
245	18.9	10.2	3391.8	3190.2	2.068
246	19.5	10.1	3520.3	3306.9	2.132
247	19.8	10.1	3559.9	3354.2	2.104
248	19.3	10.1	3476.1	3283.1	2.113
249	19.4	10.2	3492.6	3275.1	2.051
250	19.2	10.1	3466.4	3266.1	2.125
251	20.0	10.2	3586.1	3368.0	2.058
<b>PROMEDIO</b>	19.317	10.141	3477.473	3268.427	2.095



## Mezcla 85-15 AF-B1

MEZCLA CON ASFALTO ESPUMADO PARA MODULO, C Y PHY

Manual TG2 - 2009 (Sudáfrica)

### FABRICACION DE MEZCLAS CON ASFALTO ESPUMADO

Proyecto:	Tesis de Maestria			Fecha:	7/4/2017
Empresa:	Escuela Colombiana de Ingenieria				
ASFALTO:	Tipo B1		TIPO : 60/70		
Temperatura:	160	Agua (%)	2.5%	R. de Expansión	12.0
				Vida Media (s)	15.5
AGREGADO:	Mezcla 15% de RAP y 85% Material Granualr Virgen				
Humedad Óptima (%)	7.6	Humedad inicial (%)	4.6	Humedad de preenvuelta (0,6w <sub>óptima</sub> )	4.9
Peso Húmedo (g)	5000.0	Peso Seco (g)	4781.2	Agua de mezclado antes de espumado (g)	17
				Agua de mezclado después de espumado (g)	127

#### Variación de Asfalto Espumado

Identificación	Asfalto	CAL	Peso Asfalto	Peso Llenante
	(%)	(%)	(g)	(g)
1.0	2.4	1.0	165	48

Densidad, Resistencia - Ensayo de Tensión Indirecta y Resistencia Conservada

Ident.	Altura Promedio (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )
B1	19.0	10.2	3327.7	3178.2	2.060
B2	19.9	10.2	3390.3	3229.6	2.003
B3	20.2	10.2	3482.4	3314.0	2.013
B4	19.9	10.2	3502.0	3341.8	2.072
B5	20.1	10.2	3495.7	3322.5	2.025
B6	20.3	10.1	3436.7	3273.8	1.994
B7	19.4	10.2	3325.9	3170.8	2.015
B8	20.2	10.2	3500.3	3335.2	2.045
B9	19.6	10.1	3393.8	3233.2	2.065
B10	20.3	10.1	3502.1	3336.5	2.042
<b>PROMEDIO</b>	19.893	10.151	3435.690	3273.560	2.033

# Mezcla 70-30 AF-B1

## MEZCLA CON ASFALTO ESPUMADO PARA MODULO, C Y PHY

Manual TG2 - 2009 (Sudáfrica)

### FABRICACION DE MEZCLAS CON ASFALTO ESPUMADO

Proyecto:	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados			Fecha:	20/4/2017
Empresa:	Escuela Colombiana de Ingeniería				
ASFALTO:	Tipo B1		TIPO : 60/70		
Temperatura:	160	Agua (%)	2.5%	R. de Expansión	12.0
				Vida Media (s)	15.5
AGREGADO:	Mezcla 30% de RAP y 70% Material Granualr Virgen				
Humedad Óptima (%)	8.2	Humedad inicial (%)	2.4	Humedad de preenvuelta (0,6w <sub>óptima</sub> )	
				5.3	
Peso Húmedo (g)	10000.0	Peso Seco (g)	9763.6	Agua de mezclado antes de espumado (g)	284
				Agua de mezclado después de espumado (g)	280

### Variación de Asfalto Espumado

Identificación	Asfalto	CEMENTO	Peso Asfalto	Peso Llenante
	(%)	(%)	(g)	(g)
1.0	2.6	1.0	304	98

### Densidad, Resistencia - Ensayo de Tensión Indirecta y Resistencia Conservada

Ident.	Altura Promedio (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )
B71	20.0	10.2	3416.3	3200.7	1.967
B72	19.1	10.3	3298.6	3208.6	2.015
B73	19.7	10.3	3386.0	3194.7	1.963
B74	19.6	10.1	3385.0	3150.5	2.023
B75	20.5	10.1	3535.5	3325.4	2.010
B76	19.9	10.1	3357.0	3162.0	1.987
B77	19.9	10.1	3454.2	3246.0	2.019
B78	19.1	10.2	3333.5	3129.2	2.012
B79	19.8	10.1	3415.9	3222.4	2.015
B710	19.4	10.2	3360.6	3160.1	2.004
<b>PROMEDIO</b>	19.700	10.166	3394.260	3199.960	2.002

## Mezcla 50-50 AF-B1

### MEZCLA CON ASFALTO ESPUMADO

Manual TG2 - 2009 (Sudáfrica)

### FABRICACION DE MEZCLAS CON ASFALTO ESPUMADO

Proyecto:	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales			Fecha:	5/5/2017
Empresa:	Escuela Colombiana de Ingeniería				
ASFALTO:	Tipo B1	TIPO : 60/70			
Temperatura:	160	Agua (%)	2.5%	R. de Expansión	18.0
				Vida Media (s)	13.1
AGREGADO:	Mezcla 50% de RAP y 50% Material Granualr Virgen				
Humedad Óptima (%)	7.2	Humedad inicial (%)	1.0	Humedad de preenvuelta (0,6w <sub>óptima</sub> )	5.0
Peso Húmedo (g)	10000.0	Peso Seco (g)	9902.8	Agua de mezclado antes de espumado (g)	401.9
				Agua de mezclado después de espumado (g)	213.9

### Variación de Asfalto Espumado

Identificación	Asfalto	Cemento	Peso Asfalto	Peso Llenante
	(%)	(%)	(g)	(g)
1	2.4	1.0	287.7	99.0
2	2.4	1.0	287.7	
3	2.4	1.0	287.7	

### Densidad, Resistencia - Ensayo de Tensión Indirecta y Resistencia Conservada

Ident.	Altura Promedio (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )
B1I	20.153	10.073	3313.8	3065.5	1.909
B2I	20.214	10.179	3474.5	3223.1	1.959
B3I	19.822	10.125	3442.7	3184.1	1.995
B4I	20.202	10.137	3509.2	3303.0	2.026
B5I	20.258	10.106	3505.8	3258.1	2.005
B6I	19.731	10.133	3421.6	3253.0	2.044
B7I	20.014	10.135	3291.3	3055.1	1.892
B8I	19.010	10.122	3264.6	3186.7	2.083
B9I	19.696	10.100	3374.9	3253.5	2.062
<b>PROMEDIO</b>	19.900	10.123	3399.822	3198.011	1.997

## Mezcla 100-00 AF-B2

MEZCLA CON ASFALTO ESPUMADO PARA C Y PHY -Mr  
Manual TG2 - 2009 (Sudáfrica)

### FABRICACION DE MEZCLAS CON ASFALTO ESPUMADO

Proyecto:	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales			Fecha:	3/2/2017
Empresa:	Escuela Colombiana de Ingeniería				
ASFALTO:	Tipo B2	TIPO : 60/70			
Temperatura:	160	Agua (%)	2.5%	R. de Expansión	18.0
				Vida Media (s)	13.1
AGREGADO:	Material Granular Virgen proveniente de cantera				
Humedad Óptima (%)	8.2	Humedad inicial (%)	5.5	Humedad de preenvuelta (0,6w <sub>óptima</sub> )	5.7
Peso Húmedo (g)	10000.0	Peso Seco (g)	9478.7	Agua de mezclado antes de espumado (g)	22.7
				Agua de mezclado después de espumado (g)	233.2

### Variación de Asfalto Espumado

Identificación	Asfalto	Cemento	Peso Asfalto	Peso Llenante
	(%)	(%)	(g)	(g)
1	2.4	1.0	277.5	94.8

### Densidad, Resistencia - Ensayo de Tensión Indirecta y Resistencia Conservada

Ident.	Presión de Confinamiento (kPa)	Altura Promedio (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )
241	100	19.427	10.224	3545.7	3340.0	2.094
242	100	19.270	10.169	3362.0	3168.8	2.025
243	0	20.362	10.142	3388.1	3233.2	1.965
244	200	19.452	10.030	3445.9	3290.9	2.141
245	0	20.362	10.142	3452.7	3217.0	1.956
246	50	19.896	10.136	3376.9	3211.9	2.001
247	50	19.680	10.126	3401.4	3233.2	2.040
248	200	19.437	10.335	3544.9	3573.1	2.191
24W1	100	19.389	10.166	3382.3	3177.8	2.019
24W2	100	20.023	10.243	3469.9	3259.4	1.975
<b>PROMEDIO</b>						2.041

## Mezcla 85-15 AF-B2

MEZCLA CON ASFALTO ESPUMADO PARA C Y PHY - Mr

Manual TG2 - 2009 (Sudáfrica)

### FABRICACION DE MEZCLAS CON ASFALTO ESPUMADO

Proyecto:	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.			Fecha:	17/2/2017
Empresa:	Escuela Colombiana de Ingeniería				
ASFALTO:	Tipo B2	TIPO : 60/70			
Temperatura:	160	Agua (%)	2.5%	R. de Expansión	18.0
				Vida Media (s)	13.1
AGREGADO:	Mezcla 15 % de RAP y 85% de Material granular Virgen				
Humedad Óptima (%)	8.2	Humedad inicial (%)	5.5	Humedad de preenvuelta (0,6w <sub>óptima</sub> )	5.7
Peso Húmedo (g)	10000.0	Peso Seco (g)	9478.7	Agua de mezclado antes de espumado (g)	22.7
				Agua de mezclado después de espumado (g)	233.2

### Variación de Asfalto Espumado

Identificación	Asfalto	Cemento	Peso Asfalto	Peso Llenante
	(%)	(%)	(g)	(g)
1	2.6	1.0	296.4	94.8
2	2.6	1.0	296.4	
3	2.6	1.0	296.4	

### Densidad, Resistencia - Ensayo de a Corte parámetros c y phy

Ident.	Altura Promedio (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Densidad seca (g/cm³)
1/85	19.995	10.138	3095.7	2958.0	1.833
2/85	19.940	10.105	3137.1	2975.6	1.861
3/85	20.082	10.086	3143.1	3002.6	1.871
4/85	20.320	10.086	3161.0	3006.9	1.852
5/85	19.874	10.139	3169.0	3019.4	1.882
6/85	20.216	10.081	3127.8	3054.5	1.893
7/85	19.714	10.196	3092.3	2957.2	1.837
8/85	20.281	10.173	3132.6	3099.2	1.880
9/85	20.402	10.132	3217.0	3034.7	1.845
10/85	20.070	10.123	3132.8	2959.5	1.832
11/85	20.287	10.056	3172.0	2996.6	1.860

## Mezcla 70-30 AF-B2

### MEZCLA CON ASFALTO ESPUMADO

Manual TG2 - 2009 (Sudáfrica)

### FABRICACION DE MEZCLAS CON ASFALTO ESPUMADO

Proyecto:	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.			Fecha:	17/2/2017
Empresa:	Escuela Colombiana de Ingeniería				
ASFALTO:	Tipo B2		TIPO : 60/70		
Temperatura:	160	Agua (%)	2.5%	R. de Expansión	18.0
				Vida Media (s)	13.1
AGREGADO:	Mezcla 30% de RAP y 70% Material Granualr Virgen				
Humedad Óptima (%)	8.2	Humedad inicial (%)	5.5	Humedad de preenvuelta (0,6w <sub>óptima</sub> )	
					5.7
Peso Húmedo (g)	10000.0	Peso Seco (g)	9478.7	Agua de mezclado antes de espumado (g)	
					22.7
				Agua de mezclado después de espumado (g)	
					233.2

### Variación de Asfalto Espumado

Identificación	Asfalto	Cemento	Peso Asfalto	Peso Llenante
	(%)	(%)	(g)	(g)
1	2.4	1.0	277.5	94.8
2	2.4	1.0	277.5	
3	2.4	1.0	277.5	

### Densidad, Resistencia - Ensayo de Tensión Indirecta y Resistencia Conservada

Ident.	Altura Promedio (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )
1	20.410	10.400	3138.3	3150.5	1.817
2	20.424	10.088	3217.3	3043.4	1.865
3	20.179	10.075	3158.4	2993.6	1.861
4	19.377	10.144	3136.6	2956.5	1.888
5	20.335	10.178	3231.4	3048.8	1.843
6	20.215	10.176	3215.0	2954.9	1.797
7	20.015	10.377	3248.2	3042.8	1.798
8	20.193	10.191	3340.7	3125.2	1.897
<b>PROMEDIO</b>	20.143	10.203	3210.738	3039.463	1.846

## Mezcla 50-50 AF-B2

### MEZCLA CON ASFALTO ESPUMADO

Manual TG2 - 2009 (Sudáfrica)

### FABRICACION DE MEZCLAS CON ASFALTO ESPUMADO

Proyecto:	Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción interna) de materiales estabilizados con asfalto espumado.			Fecha:	17/2/2017	
Empresa:	Escuela Colombiana de Ingeniería					
ASFALTO:	Tipo B2		TIPO : 60/70			
Temperatura:	160	Agua (%)	2.5%	R. de Expansión	18.0	
AGREGADO:	Mezcla 50% de RAP y 50% Material Granualr Virgen				Vida Media (s)	13.1
Humedad Óptima (%)	8.2	Humedad inicial (%)	5.5	Humedad de preenvuelta (0,6w <sub>óptima</sub> )	5.7	
Peso Húmedo (g)	10000.0	Peso Seco (g)	9478.7	Agua de mezclado antes de espumado (g)	22.7	
				Agua de mezclado después de espumado (g)	233.2	

### Variación de Asfalto Espumado

Identificación	Asfalto	Cemento	Peso Asfalto	Peso Llenante
	(%)	(%)	(g)	(g)
1	2.2	1.0	258.5	94.8
2	2.2	1.0	258.5	
3	2.2	1.0	258.5	

### Densidad, Resistencia - Ensayo de Tensión Indirecta y Resistencia Conservada

Ident.	Altura Promedio (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )
1	20.283	10.123	3182.0	3050.3	1.869
2	20.115	10.131	3247.4	3110.2	1.918
3	20.228	10.087	3223.1	3078.6	1.905
4	19.967	10.135	3177.2	3039.9	1.887
5	20.971	10.140	3195.3	3071.7	1.814
6	20.321	10.060	3185.0	3054.2	1.891
7	19.828	10.124	3162.2	3045.4	1.908
8	20.272	10.083	3191.4	3072.8	1.898
9	19.626	10.054	3122.2	2995.5	1.923
10	18.864	10.134	2955.7	2835.2	1.864
<b>PROMEDIO</b>	20.047	10.107	3164.150	3035.380	1.888

## Anexo 6: Valores de esfuerzo deformación

Mezcla 100-00 AF-A1.

Confinamiento 0 kPa			Confinamiento 50 kPa			Confinamiento 100 kPa			Confinamiento 200 kPa		
$\sigma_d = 0$ kPa	B304(0kPa)	B307(0kPa)	$\sigma_d = 100$ kPa	B302(50kPa)	B301(50kPa)	$\sigma_d = 100$ kPa	B308(100kPa)	B303(100kPa)	$\sigma_d = 200$ kPa	B305(200kPa)	B306(200kPa)
max Permanent actuador	1704 esfuerzo desviador	1591 esfuerzo desviador	max Permanent actuador	1818.48 esfuerzo desviador	1858 esfuerzo desviador	max Permanent actuador	1908 esfuerzo desviador	1917 esfuerzo desviador	max Permanent actuador	1974 esfuerzo desviador	2250 esfuerzo desviador
0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.097	17	34	0.02		78	0.04	37	20	0.26	8	221
0.12	43	88	0.07	220	105	0.08	61	75	0.35	80	
0.2	262	142	0.16	305	132	0.12	79	127	0.44	118	
0.22	333	178	0.2	384	168	0.15	115	290	0.52	166	410
0.25	393	205	0.3	468.5	246	0.2	169	470	0.59	202	
0.3	569	268	0.4	553	324	0.25	247	692	0.7	274	580
0.35	701	340	0.5	587.5	504	0.3	331	854	0.83	382	
0.4	828	421	0.6		543	0.41	619	1220	0.86	418	
0.45	1027	565	0.7	622	582	0.5	865	1366	0.95	526	750
0.55	1384	730	0.8		621	0.6	1207	1533	1	598	
0.6	1481	781	0.9	692	660	0.7	1572	1618	1.1	730	
0.7	1643	916	1		705	0.8	1872	1704	1.2	874	839
0.792	1704	1032.5	1.1	784	750	1	1900	1842	1.3	1078	
0.8	1703	1131	1.2	819		1.2	1890	1916	1.35	1186	899
0.9	1615	1320	1.3	853.5	840	1.4	1870	1917	1.4	1306	929
0.95	1539	1347	1.4	918.8	916.25	1.5	1850	1917	1.5	1486	960
1	1449	1347	1.5	988	954.4	1.8	1800	1917	1.6	1594	
1.04	1346.5	1478	1.55	1022.5	992.5	2.1	1110		1.7	1750	1020
1.08	1244	1504	1.6	1057	1068.75	0.88	1908		1.82	1870	
1.18	1141.5	1558	1.66	1126	1145	2.4			1.93	1940	1081
1.2	1039	1535	1.7	1160.8	1241	2.8			2	1974	1147.2
1.26	957	1591	1.8	1195.66	1337	2.9			2.1	1900	1279
1.3	875	1470	2	1357	1433	3			2.2	1860	1345
1.4	729		2.2	1495.5	1529	3.1			3	1000	
1.5	627		2.35	1657	1642				2.34		1478
			2.45	1726	1786				2.4		1566
			2.57	1818.48	1858				2.6		1767.7
			2.62	1645	1780				2.64		1919
			2.79	905.7	1760				2.83		1985
			2.9		1600				3.03		2136.1
					1750				3.47		2250
									3.5		2200
									3.6		2100



Mezcla 50-50 AF-A1.

Confinamiento 0 kPa			Confinamiento 50 kPa			Confinamiento 100 kPa			Confinamiento 200 kPa		
$\sigma_d=0$ kPa	B8A(0kPa)	B6A(0kPa)	$\sigma_d=50$ kPa	B4A(50kPa)	B7A(50kPa)	$\sigma_d=100$ kPa	B3A(100kPa)	B2A(100kPa)	$\sigma_d=200$ kPa	B5A(200kPa)	B1A(200kPa)
max	1306.94	1522.023	max	1654	1680.7	max	1715	1717	max	1735	1777
Permanent	esfuerzo	esfuerzo	Permanent	esfuerzo	esfuerzo	Permanent	esfuerzo	esfuerzo	Permanent	esfuerzo	esfuerzo
actuador	desviador	desviador	actuador	desviador	desviador	actuador	desviador	desviador	actuador	desviador	desviador
0			0	0	0	0	0		0	0	0
0.52	11	7.6	0.04	38	28.42	0.02	29	37	0.02		42
0.56	95.5	55	0.08	50	46.06	0.07	47	82	0.07		60
0.6	281.7	137	0.12	80	82.32	0.16	84	160	0.16		132
0.66	381	279.75	0.15	98	99.96	0.2	102	191	0.2	23	153
0.8	583.5	590.22	0.2	116	139.16	0.3	142	292	0.3	58	222
0.91	718.8	751.8	0.25	158	195.3	0.4	210	405	0.4	94	322
1	849	917.44	0.3	194	262.26	0.5	282	512	0.5	122	438
1.1	944	1041.023	0.41	296	329.22	0.6	354	605	0.6	172	555
1.21	1052.4	1181.722	0.5	296	404.55	0.7	435	712	0.7	216	695
1.3	1144.76	1297.5	0.6	512	485.46	0.8	522	808	0.8	310	816
1.4	1200.73	1390.023	0.7	626	579.39	0.9	623	912	0.9	412	936
1.5	1255.2	1448.78	0.8	746	685.41	1	737	1005	1	520	1052
1.6	1289.5	1493.98	1	986	769.11	1.1	827	1101	1.1	610	1176
1.7	1306.3	1512.723	1.2	1190	910.42	1.2	929	1179	1.2	724	1266
1.8	1306.94	1522.023	1.3	1280	1010.38	1.3	1031	1251	1.3	820	1356
2	1275.37	1484.91	1.4	1352	1116.22	1.4	1139	1323	1.4	940	1428
2.2	1218.76	1401.68	1.5	1412	1220.1	1.5	1245	1395	1.5	1050	1487
2.4	1127.5	1347.036	2	1585	1295.83	1.55	1283	1413	1.55	1090	1523
2.5	1078.16	1287	2.01	1603	1332.19	1.6	1319	1449	1.6	1144	1541
2.6	1029.611	1146.8	2.05	1611	1386.73	1.66	1373	1485	1.66	1204	1577
3	822.88	1092	2.07	1615.5	1404.91	1.7	1391	1500	1.7	1215	1595
3.1	770.83		2.1	1620	1477.63	1.8	1463	1539	1.8	1342	1631
3.3	651.8		2.2	1620	1591.76	2	1576	1610	2	1486	1700
3.5	557.7		2.2	1638	1597.4	2.2	1630	1652	2.2	1563	1736
4	358		2.6	1654	1637.58	2.35	1671	1669	2.35	1599	1753
			1.7	1507	1654.24	2.45	1688	1687	2.45	1617	
			1.8	1549	1670.9	2.57	1705	1703	2.57	1634	
					1680.7	2.68	1715		2.62	1651	1777
					1666	2.79	1700	1717	2.79	1677	1770
					0	3.3		1456	2.9	1705	1743
									3	1710	1700
									3.1	1720	
									3.2	1735	
									3.3	1725	
									3.5	1720	
									3.7	1698	

**Mezcla 100-00 AF-B1.**

Confinamiento 0 kPa			Confinamiento 50 kPa			Confinamiento 100 kPa			Confinamiento 200 kPa		
$\sigma_d=0$ kPa	B246(0kPa)	B251(0kPa)	$\sigma_d=50$ kPa	B242(50kPa)	B247(50kPa)	$\sigma_d=100$ kPa	B245(100kPa)	B249(100kPa)	$\sigma_d=200$ kPa	B250(200kPa)	B244(200kPa)
max	1659	1469	max	1763	1728.3	max	1995	1858	max	1860	1886
Permanent actuator	esfuerzo desviador	esfuerzo desviador	Permanent actuator	esfuerzo desviador	esfuerzo desviador	Permanent actuator	esfuerzo desviador	esfuerzo desviador	Permanent actuator	esfuerzo desviador	esfuerzo desviador
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.01	21	38	0.01			0.03	89.7	78	0.03	26	27
0.05	35	72	0.02		60	0.05	230.1		0.05	44	45
0.075		168	0.03	25	135.35	0.07		132	0.07	93	62
0.1	59	244	0.08	116	261	0.08	383	168	0.08	110	65
0.15	95	447	0.1	170	450	0.15	838.5	246	0.15	171	101
0.2	149	476	0.2	230	530	0.2	1119.3	324	0.2	231	160
0.3	251	663	0.3	386	610.125	0.3	1723.8	504	0.3	392	287
0.4	383	824	0.4	554	775.14	0.4	1,985	660	0.5	734	652
0.5	521	972	0.5	740	918.246	0.5	1995	840	0.6		808
0.7	797	1259	0.7	1100	1237.095	0.7	1955	1145	0.7	1082	1006
0.8	1157	1375	0.8		1409	1	1855	1529	1	1466	1534
0.9	1271	1403	0.9			1.1		1642	1.1	1556	1683
0.95	1414	1433	0.95			1.3	1603	1786	1.3	1702	
1	1522	1469	1	1279	1582.18	1.5	1500	1858	1.5	1734	1886
1.1	1612	1408	1.1	1447	1631.965	1.75		1780	1.75	1766	1881
1.2	1609	1403	1.2	1525	1674.48	1.8	1446.9	1760	1.9	1796	1868
1.319	1621	1401	1.5	1597	1728.3	2		1600	2	1810	1605
1.5	1616	1219	1.61			1.9		1750	2.2	1822	1200
1.75	1634	1018	1.7			2.2			2.5	1842	
1.9	1659	920	1.75	1733	1438.85	2.5			2.7	1860	
2		842	1.9	1763	1348.67	2.9			2.9	1821	
2.1	1644	740	2		1360	3			3	1790	
2.2		716	2.1						3.54		
2.37		600	2.2	1755	1189.3				3.97		
			2.4								
			2.5	1720	932.65						
			2.9	1712	580						
			3	1500	569.84						

**Mezcla 85-15 AF-B1.**

Confinamiento 0 kPa			Confinamiento 50 kPa			Confinamiento 100 kPa			Confinamiento 200 kPa		
$\sigma_d=0$ kPa	B02(0kPa)	B08(0kPa)	$\sigma_d=50$ kPa	B06(50kPa)	B10(50kPa)	$\sigma_d=100$ kPa	B05(100kPa)	B01(100kPa)	$\sigma_d=200$ kPa	B04(200kPa)	B07(200kPa)
max Permanent actuador	1588.5 esfuerzo desviador	1901 esfuerzo desviador	max Permanent actuador	1920 esfuerzo desviador	1917 esfuerzo desviador	max Permanent actuador	1939 esfuerzo desviador	2016.3 esfuerzo desviador	max Permanent actuador	2176.95 esfuerzo desviador	2280 esfuerzo desviador
0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.01			0.01			0.01	24	66.3	0.04	68	42
0.05	1	65	0.02			0.05	84		0.1	100	64
0.075	4	73	0.03		20	0.07			0.15	123	72
0.1	5	192	0.08	25	75	0.08	108		0.2	151	81
0.15	8.33	372	0.1	50	127	0.1		206	0.3	213	106
0.2	88.21	552	0.2	264	290	0.15	168		0.5	427	202
0.22	131	689	0.3	493	470	0.2	228	347.1	0.6	565	350
0.26	268.7	825	0.4	792.2	692	0.3	396	675	0.8	923.45	553
0.3	398.92	1091	0.5	1144.57	854	0.4	606	998.4	0.9	1116.65	806
0.37	560	1372	0.7	1829	1220	0.5	870	1279.2	1	1372.5	1225
0.41	662	1653	0.8	1920	1366	0.6	1164		1.1	1598.5	1450
0.45	763	1777	0.9	1920	1533	0.7	1470	1743.3	1.2	1833.1	1894
0.5	868	1901	0.95	1918.47	1618	0.8	1786	1992.9	1.4	2170.05	2210
0.55	1024.9	1899	1	1917.64	1704	0.9	1933	2012.4	1.5	2176.95	2280
0.6	1168.4	1898	1.1		1842	0.95	1939	2016.3	1.6	2176.95	2280
0.7	1339.65	1895	1.2	1910.35	1916	1	1931	2016.3	1.7	2176.95	2275
0.75	1398	1893.5	1.5	1895	1917	1.2	1925	2012.4	1.8	2175.8	2270
0.8	1458	1892	1.3		1917	1.5	1930		1.9	2175.8	
0.9	1577.53	1887	1.7		1917	1.9	1930		2	2173.4	
1	1588.5	1883	1.75			2	1931		12	200	
1.1	1499.1	1883	1.9								
1.15	1456.72	1883	2								
1.2	1401.23	1883	2.1								
1.3	1155.56	1882	2.2								
1.5	882.82		2.5								
1.6	751.42										
1.65	702.3										

**Mezcla 70-30 AF-B1.**

Confinamiento 0 kPa			Confinamiento 50 kPa			Confinamiento 100 kPa			Confinamiento 200 kPa		
max	1883.1	1896.3	max	1879	1799	max	1905	2196.5	max	2115.3	2232
Permanent	esfuerzo	esfuerzo	Permanent	esfuerzo	esfuerzo	Permanent	esfuerzo	esfuerzo	Permanent	esfuerzo	esfuerzo
actuador	desviador	desviador	actuador	desviador	desviador	actuador	desviador	desviador	actuador	desviador	desviador
0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.065	8.6		0.2	36	202	0.02	27	32	0.04	56	47
0.07	38.4		0.3	63	338	0.07	64	43	0.1	117	94.9
0.09	260.26		0.4	89	472	0.16	92	79	0.15	195	142
0.11	468.51		0.5	150	634	0.2	119	100	0.2	254	224
0.15	780		0.6	210	823	0.3	200	141	0.3	383	457.6
0.2	1108.2		0.7	332	1012	0.4	308	231	0.4	561	797
0.24	1280	9.8	0.8	440	1277	0.5	443	355	0.5	789	1218
0.25	1437	56	0.9	611	1372	0.6	578	514	0.6	986.7	1591
0.26	1590.7	112	1	791	1507	0.7	757	728	0.7	1234.2	1872
0.3	1819	173	1.1	1007	1605	0.8	964	928	0.8	1461.9	2093
0.4	1883.1	456	1.2	1240	1720	0.9	1171	1183	0.9	1698.4	2232
0.5	1879.6	656.2	1.3	1456	1799	1	1387	1424	1	1904.1	2232
0.6	1871.1	864	1.4	1644	1799	1.1	1575	1658	1.1	2065.8	2230
0.7	1776	1040.53	1.5	1827	1790	1.2	1735	1858	1.2	2115.3	2231
0.8	1682	1264.54	1.6	1879	1780	1.3	1904	2042	1.3	2115.3	2232
0.9	1587	1488	1.65	1878	1785	1.4	1864	2191	1.4	2113.1	2230
1	1492.96	1704.3	1.8	1878	1790	1.5	1905	2196.5	1.5	2111	2221
1.1		1869.75	1.85	1878	1790	1.55	1904	2196.5	1.55	2109.8	
1.15		1892.3	2	1878	1780	1.6	1903	2196.5	1.6	2107.6	
1.2		1895.5	2.1			1.66	1902	2196.5	1.66	2106.5	
1.25		1895.94	2.2			1.7	1902	2195.3	2	1973	
1.3		1896.3	2.4			1.8	1899	2194.2	1.8		
1.33		1896.13	2.5			2	1895	2188.45			
1.4		1894.87	2.8								
1.5		1895	3								
1.7		1891.9	2.2								
1.9		1888	2.5								
2		1886									

**Mezcla 50-50 AF-B1.**

Confinamiento 0 kPa			Confinamiento 50 kPa		Confinamiento 100 kPa			Confinamiento 200 kPa	
$\sigma_d = 0$ kPa	B4I(0kPa)	B1I(0kPa)	$\sigma_d = 50$ kPa	B9I(50kPa)	$\sigma_d = 100$ kPa	B7I(100kPa)	B5I(100kPa)	$\sigma_d = 200$ kPa	B6I(200kPa)
max	1349	1066	max	1435	max	1876	1865	max	1854
Permanent actuator	esfuerzo desviador	esfuerzo desviador	Permanent actuator	esfuerzo desviador	Permanent actuator	esfuerzo desviador	esfuerzo desviador	Permanent actuator	esfuerzo desviador
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.05	57	72	0.04	43	0.02	55	33	0.01	15
0.1	93	114	0.08	70	0.07	118	102	0.11	34
0.15	147	163	0.12	90	0.16	280	192	0.18	52
0.2	183	259	0.15	125	0.2	382	264	0.27	71
0.25	237	325	0.2	155	0.3	694	396	0.34	107
0.3	291	382	0.25	199	0.4	1042	570	0.4	161
0.5	339	551	0.3	227	0.5	1402	732	0.5	245
0.4	447	487	0.41	298	0.6	1659	894	0.6	383
0.6	555	649	0.5	353	0.7	1812	1062	0.7	533
0.7	639	699	0.6	407	0.8	1873	1211	0.8	713
0.75	720	744	0.7	478	0.9	1876		0.9	869
0.8	801	798	0.8	533	1	1874	1481	1	1037
0.9	939	848	1	658	1.1	1864		1.1	1169
1	1041	899	1.2	772	1.2	1864	1660	1.2	1289
1.2	1155	957	1.4	863	1.3	1860	1720	1.3	1402
1.25	1190	993	1.5	908	1.4	1864	1767	1.4	1504
1.4	1262	1033	1.8	1108	1.5		1802	1.5	1600
1.5	1316	1045	2.1	1222	1.55			1.55	1632
1.6	1333	1050	2.2	1276	1.6			1.6	1677
1.7	1349	1064	2.4	1342	1.66			1.66	1704
1.8	1347	1066	2.8	1423	1.7			1.7	1731
2		1050	2.9	1435	1.8		1862	1.8	1760
			3	1430	2		1865	2	1828
			3.1	1429	2.2		1860	2.2	1843
								2.3	1854
								2.5	1850
								2.7	
								2.9	
								3	
								3.1	

Mezcla 100-00 AF-B2.

Confinamiento 0 kPa			Confinamiento 50 kPa			Confinamiento 100 kPa			Confinamiento 200 kPa		
$\sigma_a = 0$ kPa	B05(0kPa)	B03(0kPa)	$\sigma_a = 50$ kPa	B07(50kPa)	B06(50kPa)	$\sigma_a = 100$ kPa	B02(100kPa)	B22(100kPa)	$\sigma_a = 200$ kPa	B04(200kPa)	B08(200kPa)
max	1098.67	1290.93	max	1305.48	1265.9752	max	1909	1699	max	2289.6	2106.362409
Permanent actuator strain (%)	esfuerzo desviador	esfuerzo desviador	Permanent actuator strain (%)	esfuerzo desviador	esfuerzo desviador	Permanent actuator strain (%)	esfuerzo desviador	esfuerzo desviador	Permanent actuator strain (%)	esfuerzo desviador	esfuerzo desviador
0	0.00	0.00	0	0.00	0.03	0	0	0	0	0	0.2
0	0.00	0.00	0	0.00	2.44	0	0	0	0	0	2.2
0	0.00	0.00	0	0.00	4.77	0	0	0	0	0	10.2
0	0.00	0.00	0	0.00	33.38	0	7	6	0	0	15.6
0.05	100.00	117.50	0.05	73.38	76.84	0.05	46	47	0	18	23.3
0.11	190.00	223.25	0.11	184.41	104.41	0.11	82	83	0.03	64.8	30.7
0.21	330.00	387.75	0.21	357.14	220.30	0.21	263	264	0.14	228.6	139.0
0.22	360.00	423.00	0.22	394.15	236.27	0.22	299	300	0.16	261	154.6
0.24	390.00	458.25	0.24	431.16	258.43	0.24	335	336	0.18	293.4	177.4
0.25	410.00	481.75	0.25	455.84	276.07	0.25	371	384	0.19	325.8	197.4
0.27	450.00	528.75	0.27	505.19	302.77	0.27	407	419	0.21	358.2	217.7
0.28	460.00	540.50	0.28	517.53	338.16	0.28	443	455	0.22	390.6	239.3
0.29	480.00	564.00	0.29	542.20	378.10	0.29	479	504	0.24	423	258.6
0.3	500.00	587.50	0.3	566.88	429.52	0.3	515	539	0.25	455.4	279.7
0.31	510.00	599.25	0.31	579.21	447.19	0.31	551	575	0.26	487.8	302.4
0.32	520.00	611.00	0.32	591.55	452.07	0.32	587	611	0.27	520.2	326.0
0.33	530.00	622.75	0.33	603.89	474.55	0.33	611	647	0.29	552.6	347.3
0.34	540.00	634.50	0.34	616.23	515.53	0.34	647	683	0.3	585	372.5
0.35	550.00	646.25	0.35	628.56	544.05	0.35	683	719	0.31	606.6	400.3
0.38	590.00	693.25	0.38	677.91	648.33	0.38	791	827	0.34	703.8	458.0
0.39	610.00	716.75	0.39	702.59	675.27	0.39	815	863	0.35	736.2	440.4
0.4	630.00	740.25	0.4	727.26	709.46	0.4	851	911	0.36	768.6	433.2
0.41	650.00	763.75	0.41	751.94	777.46	0.41	923	995	0.38	833.4	524.1
0.44	695.00	816.63	0.44	807.46	899.36	0.44	1,018	1,139	0.4	930.6	627.4
0.44	696.00	817.80	0.44	808.69	931.15	0.44	1,054	1,187	0.41	963	662.1
0.45	699.00	821.33	0.45	812.39	951.56	0.45	1,090	1,235	0.42	995.4	700.3
0.46	708.00	831.90	0.46	823.50	984.24	0.46	1,126	1,295	0.43	1,027.8	729.0
0.47	735.00	863.63	0.47	856.81	1,025.39	0.47	1,162	1,343	0.44	1,060.2	760.4
0.48	750.00	881.25	0.48	875.31	1,057.60	0.48	1,210	1,403	0.45	1,092.6	864.8
0.49	750.00	881.25	0.49	875.31	1,083.66	0.49	1,246	1,450	0.46	1,125	896.7
0.49	755.00	887.13	0.49	881.48	1,110.48	0.49	1,282	1,498	0.47	1,146.6	932.0
0.5	769.07	903.65	0.5	898.84	1,136.30	0.5	1,306	1,546	0.48	1,179	982.5
0.51	788.74	926.77	0.51	923.11	1,157.64	0.51	1,342	1,606	0.48	1,211.4	1,027.6
0.55	880.57	1,034.67	0.55	1,036.41	1,238.25	0.55	1,510	1,699	0.53	1,360.8	1,199.6
0.55	899.70	1,057.15	0.55	1,060.01	1,248.26	0.55	1,545	1,699	0.54	1,393.2	1,222.2
0.56	912.82	1,072.57	0.56	1,076.19	1,247.99	0.56	1,569	1,694	0.54	1,425.6	1,253.9
0.57	932.50	1,095.69	0.57	1,100.47	1,255.57	0.57	1,605	1,696	0.55	1,458	1,283.3
0.58	952.18	1,118.81	0.58	1,124.75	1,255.69	0.58	1,641	1,698	0.56	1,492.2	1,313.6
0.58	971.31	1,141.29	0.58	1,148.35	1,262.38	0.58	1,676	1,698	0.57	1,524.6	1,376.4
0.59	984.43	1,156.70	0.59	1,164.54	1,265.98	0.59	1,700	1,699	0.58	1,557	1,421.0
0.6	1,003.56	1,179.18	0.6	1,188.14	1,264.20	0.6	1,735	1,699	0.59	1,587.6	1,439.8
0.61	1,022.69	1,201.66	0.61	1,211.74	1,262.51	0.61	1,770	1,440	0.6	1,620	1,453.8
0.61	1,041.82	1,224.14	0.61	1,235.34	1,257.27	0.61	1,805	1,400	0.61	1,641.6	1,466.2
0.65	1,097.03	1,289.01	0.65	1,303.46		0.65	1,906	900	0.67	1,803.6	1,582.1
0.65	1,097.57	1,289.65	0.65	1,304.13		0.65	1,907		0.68	1,836	1,614.3
0.65	1,097.03	1,289.01	0.65	1,303.46		0.65	1,906		0.7	1,868.4	1,801.3
0.66	1,098.12	1,290.29	0.66	1,304.80		0.66	1,908		0.71	1,900.8	1,835.0
0.66	1,098.12	1,290.29	0.66	1,304.80		0.66	1,908		0.73	1,933.2	1,852.7
0.66	1,098.12	1,290.29	0.66	1,304.80		0.66	1,908		0.74	1,965.6	1,896.2
0.66	1,098.12	1,290.29	0.66	1,304.80		0.66	1,908		0.76	1,998	1,921.3
0.66	1,098.12	1,290.29	0.66	1,304.80		0.66	1,908		0.78	2,030.4	1,942.1
0.66	1,098.12	1,290.29	0.66	1,304.80		0.66	1,908		0.8	2,062.8	1,938.3
0.66	1,098.12	1,290.29	0.66	1,304.80		0.66	1,908		0.82	2,095.2	1,932.3
0.67	1,097.57	1,289.65	0.67	1,304.13		0.67	1,907		0.85	2,127.6	1,951.8
0.67	1,098.12	1,290.29	0.67	1,304.80		0.67	1,908		0.88	2,160	1,977.3
0.67	1,098.12	1,290.29	0.67	1,304.80		0.67	1,908		0.93	2,192.4	2,019.9
0.67	1,098.12	1,290.29	0.67	1,304.80		0.67	1,908		0.98	2,235.6	2,043.6

## Mezcla 85-15 AF-B2

Confinamiento 0 kPa				Confinamiento 50 kPa			Confinamiento 100 kPa			Confinamiento 200 kPa		
$\sigma_d = 0$ kPa	B0185(0kPa)		B1185(0kPa)	$\sigma_d = 50$ kPa	B07(50kPa)	B06(50kPa)	$\sigma_d = 100$ kPa	B0985(100kPa)	B0285(100kPa)	$\sigma_d = 200$ kPa	B04(200kPa)	B03(200kPa)
max Permanent actuador	906.0117476 esfuerzo desviador	Permanent actuador	1272 esfuerzo desviador	max Permanent actuador	1105 esfuerzo desviador	1195 esfuerzo desviador	max Permanent actuador	1401 esfuerzo desviador	1344 esfuerzo desviador	max Permanent actuador	1922 esfuerzo desviador	1706 esfuerzo desviador
0.000	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0
0.010	1	0.1	50	0.01	5	13	0.01	12	12	0.01	2	1
0.015	2	0.2	200	0.02	28	36	0.05	68	36	0.05	3	3
0.016	5	0.3	280	0.03	36	54	0.07	85	38	0.07	4	5
0.040	8	0.4	480	0.08	42	62	0.08	103	53	0.08	25.16	7
0.050	10.0	0.5	680	0.1	60	85	0.15	145	60	0.15	179.18	120
0.120	20.0	0.6	880	0.2	150	120	0.2	163	73	0.2	305.104	150
0.178	50.0	0.7	915	0.3	230	280	0.3	223	91	0.3	549.6	180
0.197	76.0	0.8	1030	0.5	280	405	0.5	367	151	0.5	1144.57	740
0.207	77.0	0.9	1080	0.7	390	500	0.7	601	308	0.7	1829.12	990
0.218	79.0	1	1120	1	585	790	1	1141	757	1	1917.64	1680
0.228	79.3	1.1	1260	1.1	735	860	1.1	1237	937	1.1	1922	1706
0.239	98.4	1.2	1272	1.2	820	955	1.5	1401	1344	1.5	1895.95	1700
0.249	118.6	1.36	1250	1.5	960	1020	1.75	1400	1242	1.75		1695
0.260	140.0	1.4	1210	1.75	1,025	1180	1.9	1390	1200	1.9		1685
0.270	162.4			1.9	1,075	1195	2	1360	1195	2		1680
0.281	185.9			2	1105	1190	2.2	1300	1080	2.2		1500
0.291	209.9			2.2	1100	1170	2.5	1305	1050	2.5		1300
0.302	235.7			2.5	1095	1100	2.9	1240	1030	2.9		1000
0.312	265.0			2.9	1085	1050	3	1200	1020	3		500
0.323	293.7			3	1070	1000						
0.333	324.3											
0.344	357.1											
0.354	390.8											
0.365	423.9											
0.375	452.2											
0.386	478.1											
0.397	500.2											
0.408	521.6											
0.419	541.7											
0.429	559.8											
0.440	577.8											
0.451	595.4											
0.461	613.0											
0.472	629.7											
0.482	646.2											
0.493	662.4											
0.503	677.6											
0.514	694.0											

## Mezcla 70-30 AF-B2

Confinamiento 0 kPa			Confinamiento 50 kPa			Confinamiento 100 kPa			Confinamiento 200 kPa		
$\sigma_d=0$ kPa	B03(0kPa)	B05(0kPa)	$\sigma_d=50$ kPa	B02(50kPa)	B06(50kPa)	$\sigma_d=100$ kPa	B01(100kPa)	B07(100kPa)	$\sigma_d=200$ kPa	B04(200kPa)	B08(200kPa)
max	1120	1073	max	1250	1320	max	1409	1435	max	1905	1894
Permanent actuator	esfuerzo desviador	esfuerzo desviador	Permanent actuator	esfuerzo desviador	esfuerzo desviador	Permanent actuator	esfuerzo desviador	esfuerzo desviador	Permanent actuator	esfuerzo desviador	esfuerzo desviador
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.01	60	50	0.01	12	36	0.01	22	12	0.01	32	42
0.05	90	200	0.02	26	42	0.05	35	36	0.05	49	64
0.075	120	280	0.03	34	100	0.07	47	38	0.07	51	72
0.08	150	480	0.08	120	220	0.08		53	0.08	70	81
0.1	230	680	0.1	200	400	0.15	83	60	0.15	94	106
0.2	450	880	0.2	400	600	0.2	101	73	0.2	182	202
0.3	780	990	0.3	609	900	0.3	221	220	0.3	290	350
0.5	875	1070	0.5	890	1100	0.5	380	330	0.5	482	553
0.7	990	1073	0.7	1,250	1270	0.7	505	450	0.7	662	806
1	1110	800	1	1,246	1310	1	820	757	1	938	1225
1.1	1120	720	1.1	1,240	1318	1.1	1120	937	1.1	1046	1450
1.2	1100	680	1.2	1,235	1320	1.5	1320	1344	1.5	1442	1894
1.5	1000	550	1.5	1,230	1319	1.75	1380	1435	1.75	1764	1894
1.75	910	400	1.75	1,220	1300	1.9	1400	1320	1.9	1891	1804
1.9	850	300	1.9	1,200	1280	2	1409	1195	2	1905	1805
2	800		2	1195	1275	2.2	1400	1080	2.2	1891	1800
			2.2	1180	1260	2.5	1020	1050	2.5	1884	1796
			2.5	1170	1240	2.9	852	1030	2.9	1860	1786
			2.9	1160	1230	3	700	1020	3	1790	
			3	1140	1220				12	200	



## Mezcla 50-50 AF-B2

Confinamiento 0 kPa			Confinamiento 50 kPa			Confinamiento 100 kPa			Confinamiento 200 kPa		
$\sigma_d=0$ kPa	B09(0kPa)	B05(0kPa)	$\sigma_d=50$ kPa	B01(50kPa)	B06(50kPa)	$\sigma_d=100$ kPa	B08(100kPa)	B04(100kPa)	$\sigma_d=200$ kPa	B02(200kPa)	B06(200kPa)
max Permanent actuator	1032 estuerzo desviador	1171.2 Permanent actuator	max Permanent actuator	1364 estuerzo desviador	1436 estuerzo desviador	max Permanent actuator	1527 estuerzo desviador	1445 estuerzo desviador	max Permanent actuator	1852 estuerzo desviador	1894 estuerzo desviador
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.07	156	60
0.09	45	1.6	0.05		12	0.05		150	0.08	186	75
0.1	63	6.4	0.1	50	40	0.1	216	290	0.15	330	133
0.15	81	13.6	0.2	220	310	0.2	400	436	0	0	0
0.16	82	28	0.3	410	536	0.3	565	650	0.2	426	305
0.19	105	57.6	0.4	530	620	0.4	680	880	0.27	526	406
0.2	123	110.4	0.5	550	710	0.5	833	1005	0.3	595	462
0.3	195	206.4	0.6	600	833	0.6	955	1130	0.4	780	620
0.4	290	321.6	0.7	630	920	0.7	1,082	1236	0.5	933	830
0.5	417	422.4	0.8	710	1035	0.8	1,217	1301	0.6	1086	1002
0.55	506	484.8	0.9	820	1072	0.9	1,276	1336	0.7	1325	1185
0.65	602	642.4	1	1,000	1220	1	1,362	1420	0.8	1506	1325
0.7	687	757.6	1.1	1,200	1330	1.1	1,405	1445	0.9	1590	1492
0.75	732	829.6	1.2	1,275	1380	1.2	1,435	1438	1	1700	1608
0.85	832	924	1.4	1330	1400	1.3	1,481	1435	1.1	1840	1742
0.9	865	988.8	1.5	1,360	1436	1.4	1482	1420	1.2	1852	1894
1	981	1050.4	1.6	1,364		1.5	1,505	1442	1.35	1852	1842
1.1	1016	1079.2	1.7	1362	1390	1.6	1,513	1440	1.4	1830	1864
1.2	1032	1145.6	1.75	1,350	1300	1.7	1526	1406	1.5	1840	1892
1.4	1027	1168	1.9	1,300	1275	1.8	1527	1420	1.6	1820	1866
1.5	1025	1171.2	2	1250	1075	1.9	1,515	1400	1.75	1842	1845
1.55	919	1004	2.2	1100	1030	2	1500	1360	1.9	1839	1855
1.6	812.55	896	2.5	1000	980	2.2	1464	1200	2	1830	1790
1.75	600	664	2.9	900	960	2.5	1270		2.1	1850	1805
1.9	75	544							3		