

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MDC-2
CON ASFALTO ORIGINAL Y MODIFICADO CON POLÍMEROS POR LOS
MÉTODOS MARSHALL Y SUPERPAVE**

**FASE 1 – PROYECTO TAAT
CORASFALTOS**



EDGAR ALEXIS PEÑA ACOSTA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2007**

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MDC-2
CON ASFALTO ORIGINAL Y MODIFICADO CON POLÍMEROS POR LOS
MÉTODOS MARSHALL Y SUPERPAVE**

FASE 1 – PROYECTO TAAT

CORASFALTOS

**Proyecto de Grado para optar el Título de
Ingeniero Civil**

**EDGAR ALEXIS PEÑA ACOSTA
CÓD. 21 - 2010528**

**Director del Proyecto:
Ing. Ph D. EDUARDO CASTAÑEDA**

**Tutor del Proyecto:
Ing. Esp. JHON WILSON CORREA AVELLO
Profesional Técnico CORASFALTOS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2007**

CONTENIDO

	Pág.
LISTA DE TABLAS	7
LISTA DE GRÁFICAS.....	9
LISTA DE ECUACIONES	11
GLOSARIO	13
PRESENTACIÓN.....	17
INTRODUCCIÓN	20
1. OBJETIVOS.....	21
1.1 OBJETIVO GENERAL	21
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
2. MARCO TEÓRICO.....	23
2.1 ANTECEDENTES.....	23
2.2 PROYECTO CORASFALTOS “TAAT”.....	27
2.3 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES Y MEZCLAS ASFÁLTICAS	31
2.4 DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	38
2.5 DURABILIDAD DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS PREPARADAS CON LIGANTES MODIFICADOS CON POLÍMEROS.....	57
3. CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS PÉTREOS	60
3.1 DESCRIPCIÓN DE LOS AGREGADOS PÉTREOS	60
3.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICO MECÁNICA DE AGREGADOS PÉTREOS.....	60
3.2.1 GRANULOMETRÍA DE LOS AGREGADOS PÉTREOS	61
3.2.2 PESOS ESPECÍFICOS DE LOS AGREGADOS.....	63
3.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA DE AGREGADOS PÉTREOS	64
4. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA Y DETERMINACIÓN DEL GRADO DE DESEMPEÑO DE LOS ASFALTOS EMPLEADOS	66
4.1 ANÁLISIS QUÍMICO	66
4.2 PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS	67
4.3 CURVAS REOLÓGICAS DE LOS ASFALTOS	68
4.4 GRADO DE DESEMPEÑO (PG) TECNOLOGÍA SHRP	73
5. DISEÑO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS POR EL MÉTODO MARSHALL	80
5.1 MEZCLA ASFÁLTICA ELABORADA CON ASFALTO BASE 80-100	80
5.2 MEZCLA ASFÁLTICA ELABORADA CON ASFALTO MODIFICADO CON ELVALOY	84
5.3 MEZCLA ASFÁLTICA ELABORADA CON ASFALTO MODIFICADO CON SBS	88
6. DISEÑO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS POR EL MÉTODO SUPERPAVE	93
6.1 DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA CON ASFALTO BASE 80-100.....	93
6.2 DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA CON ASFALTO MODIFICADO CON ELVALOY	98

6.3 DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA CON ASFALTO MODIFICADO CON SBS	103
7. DETERMINACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL HUMEDECIMIENTO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS DISEÑADAS POR EL MÉTODO MARSHALL	110
8. CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS DISEÑADAS POR EL MÉTODO MARSHALL.....	113
8.1 MÓDULOS DINÁMICOS.....	113
8.2 DEFORMACIÓN PERMANENTE	115
8.3 FATIGA A ESFUERZO CONTROLADO	118
9. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	121
9.1 COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS 3 ASFALTOS ESTUDIADOS.....	121
9.2 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR LOS DOS MÉTODOS DE DISEÑO: MARSHALL Y SUPERPAVE.....	127
9.3 ANÁLISIS DE LA CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS DISEÑADAS POR EL MÉTODO MARSHALL	128
10. ANÁLISIS DE LOS MÉTODOS DE DISEÑO SUPERPAVE Y MARSHALL UTILIZANDO PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA METODOLOGÍA RAMCODES	130
10.1 LA METODOLOGÍA RAMCODES.....	130
10.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA LAS MEZCLAS POR CADA TIPO DE ASFALTO....	130
11. CONCLUSIONES	142
12. RECOMENDACIONES	145
13. ANEXOS.....	146
13.1 ANEXO A – DIFRACTOGRAMAS.....	146
13.2 ANEXO B – CUADROS RESUMEN DE LOS DISEÑOS MARSHALL	148
13.3 ANEXO C – REPORTES RESUMEN DE LOS DISEÑOS SUPERPAVE	152
13.4 ANEXO D – ILUSTRACIÓN DE LOS REPORTES DE ENSAYO DE MÓDULOS DINÁMICOS EN EL EQUIPO NAT	155
13.5 ANEXO E – ILUSTRACIÓN DE LOS REPORTES DE ENSAYO DE DEFORMACIÓN PERMANENTE (RLA), EN EL EQUIPO NAT	161
13.6 ANEXO F – ILUSTRACIÓN DE LOS REPORTES DE ENSAYO DE FATIGA POR TRACCIÓN INDIRECTA, EN EL EQUIPO NAT	162
13.7 ANEXO G – GALERÍA FOTOGRÁFICA DE EQUIPOS.....	163
BIBLIOGRAFÍA	166
INFOGRAFÍA	168

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características de dos asfaltos extremos en términos de estructura coloidal/susceptibilidad térmica.	25
Tabla 2. Criterios para mezclas asfálticas del Método Marshall.	39
Tabla 3. Resumen de ensayos a los materiales pétreos fuente Pescadero.	60
Tabla 4. Gradación de la combinación de los agregados pétreos.	61
Tabla 5. Especificaciones de la gradación según Superpave, para TMN = 1/2".....	62
Tabla 6. Peso específico de los agregados gruesos.....	63
Tabla 7. Peso específico de arenas.	64
Tabla 8. Peso específico del llenante mineral.....	64
Tabla 9. Análisis elemental de arenas.	64
Tabla 10. Análisis elemental de finos.....	64
Tabla 11. Fases presentes en el material fino (A9TA).....	65
Tabla 12. Fases presentes en arenas (A9TB).....	65
Tabla 13. Composición química de los asfaltos.	67
Tabla 14. Resultados de ensayos fisicoquímicos de los asfaltos.....	67
Tabla 15. Datos de la curva reológica del asfalto base en estado original, RTFOT y PAV.	68
Tabla 16. Datos de la curva reológica del asfalto modificado con Elvaloy en estado original, RTFOT y PAV.	69
Tabla 17. Datos de la curva reológica del asfalto modificado con SBS en estado original, RTFOT y PAV.	70
Tabla 18. Temperaturas óptimas de mezclado en laboratorio y planta y compactación en el laboratorio.....	72
Tabla 19. Grado de desempeño (PG) del asfalto base.....	74
Tabla 20. Datos de Rigidez del Asfalto Base a 60 segundos de aplicación de carga.....	75
Tabla 21. Grado de desempeño (PG) del asfalto modificado con Elvaloy.....	76
Tabla 22. Datos de Rigidez del Asfalto modificado con Elvaloy a 60 segundos de aplicación de carga.	77
Tabla 23. Grado de desempeño (PG) del asfalto modificado con SBS.	78
Tabla 24. Datos de Rigidez del Asfalto modificado con SBS a 60 segundos de aplicación de carga.	79
Tabla 25. Requerimientos mezcla asfáltica MDC-2.	80
Tabla 26. Obtención del porcentaje óptimo de asfalto base 80-100.	80
Tabla 27. Obtención del porcentaje óptimo de asfalto modificado con Elvaloy.....	84
Tabla 28. Obtención del porcentaje óptimo de asfalto modificado con SBS.....	88
Tabla 29. Resumen del diseño de la mezcla con asfalto base 80-100.	98
Tabla 30. Resumen del diseño de la mezcla con asfalto modificado con Elvaloy.	103
Tabla 31. Resumen del diseño de la mezcla con asfalto modificado con SBS.....	109
Tabla 32. Resultados de TSR sobre la mezcla con asfalto base (80-100).	110
Tabla 33. Resultados de TSR sobre la mezcla elaborada con asfalto base 80-100 modificado con Elvaloy.....	111
Tabla 34. Resultados de TSR sobre la mezcla elaborada con asfalto base 80-100 modificado con SBS.....	112

Tabla 35. Módulos dinámicos a 3 temperaturas y 1 frecuencia.	113
Tabla 36. Módulos dinámicos a 3 temperaturas y 1 frecuencia.	114
Tabla 37. Módulos dinámicos a 3 temperaturas y 1 frecuencia.	114
Tabla 38. Deformación permanente (RLA) para la mezcla asfáltica elaborada con asfalto base 80-100.	115
Tabla 39. Deformación permanente (RLA) para la mezcla asfáltica elaborada con asfalto base 80-100 modificado con Elvaloy.	116
Tabla 40. Deformación permanente (RLA) para la mezcla asfáltica elaborada con asfalto base 80-100 modificado con SBS.	116
Tabla 41. Resultados del ensayo de fatiga de la mezcla elaborada con asfalto base 80-100.	118
Tabla 42. Resultados del ensayo de fatiga de la mezcla elaborada con asfalto base 80-100 modificado con Elvaloy.	119
Tabla 43. Constantes de ecuación de ley de fatiga.	119
Tabla 44. PVN para cada tipo de asfalto.	126
Tabla 45. Reporte final para el diseño Superpave con asfalto base 80-100.	131
Tabla 46. Reporte final para el diseño Marshall con asfalto base 80-100.	131
Tabla 47. Reporte final para el diseño Superpave con asfalto modificado con Elvaloy.	134
Tabla 48. Reporte final para el diseño Marshall con asfalto modificado con Elvaloy.	134
Tabla 49. Reporte final para el diseño Superpave con asfalto modificado con SBS.	137
Tabla 50. Reporte final para el diseño Marshall con asfalto modificado con SBS.	138

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Curva Granulométrica Agregados Fuente Pescadero, frente a las especificaciones INVIAS para MDC-2.....	62
Gráfica 2. Curva Granulométrica Agregados Fuente Pescadero, frente a las especificaciones Superpave para TMN=1/2”.....	63
Gráfica 3. Curvas reológicas del asfalto Base.....	71
Gráfica 4. Curvas reológicas del asfalto modificado con Elvaloy.....	71
Gráfica 5. Curvas reológicas del asfalto modificado con SBS.....	72
Gráfica 6. Obtención del porcentaje óptimo de asfalto 80-100 – Método Marshall.....	81
Gráfica 7. Obtención del porcentaje óptimo de asfalto modificado con Elvaloy – Método Marshall.....	85
Gráfica 8. Obtención del porcentaje óptimo de asfalto modificado con SBS – Método Marshall.....	89
Gráfica 9. Comparación del porcentaje de compactación (%Gmm) para las diferentes proporciones de asfalto base 80-100.....	96
Gráfica 10. Curva de vacíos con aire para la mezcla con asfalto base 80-100.....	96
Gráfica 11. Curva de vacíos en agregado mineral para la mezcla con asfalto base 80-100.....	97
Gráfica 12. Curva de vacíos llenos de asfalto para la mezcla con asfalto base 80-100.....	97
Gráfica 13. Comparación del porcentaje de compactación (%Gmm) para las diferentes proporciones de asfalto modificado con Elvaloy.....	101
Gráfica 14. Curva de vacíos con aire para la mezcla con asfalto modificado con Elvaloy.....	102
Gráfica 15. Curva de vacíos en agregado mineral para la mezcla con asfalto modificado con Elvaloy.....	102
Gráfica 16. Curva de vacíos llenos de asfalto para la mezcla con asfalto modificado con Elvaloy.....	103
Gráfica 17. Comparación del porcentaje de compactación (%Gmm) para las diferentes proporciones de asfalto modificado con SBS.....	107
Gráfica 18. Curva de vacíos con aire para la mezcla con asfalto modificado con SBS.....	107
Gráfica 19. Curva de vacíos en agregado mineral para la mezcla con asfalto modificado con SBS.....	108
Gráfica 20. Curva de vacíos llenos de asfalto para la mezcla con asfalto modificado con SBS.....	108
Gráfica 21. Módulos dinámicos de las mezclas asfálticas.....	114
Gráfica 22. Deformación permanente en mezclas asfálticas.....	117
Gráfica 23. Leyes de fatiga de las mezclas asfálticas.....	120
Gráfica 24. Comparación de las fracciones SARA – Estado Original.....	121
Gráfica 25. Comparación de las fracciones SARA después de ensayo PAV.....	122
Gráfica 26. Comparación de la consistencia por penetración de los 3 asfaltos, en las diferentes etapas de envejecimiento.....	123
Gráfica 27. Comparación de la consistencia por viscosidad de los 3 asfaltos, en estado original.....	124

Gráfica 28. Comparación de la consistencia por viscosidad de los 3 asfaltos, con envejecimiento PAV.	124
Gráfica 29. Carta para la determinación de valores de PVN para asfaltos.	126
Gráfica 30. Comparación de los contenidos óptimos de asfalto encontrados.....	127
Gráfica 31. Comparación de %VFA para el %Óptimo de cada asfalto.	128
Gráfica 32. Comparación de la variación del contenido de vacíos con aire en la mezcla elaborada con asfalto base 80-100.	131
Gráfica 33. Comparación de la variación del contenido de vacíos en agregado mineral en la mezcla elaborada con asfalto base 80-100.	132
Gráfica 34. Comparación de la variación del contenido de vacíos llenos con asfalto en la mezcla elaborada con asfalto base 80-100.....	132
Gráfica 35. Comparación de la variación de la densidad Bulk en la mezcla elaborada con asfalto base 80-100.....	133
Gráfica 36. Polígono de vacíos de la mezcla elaborada con asfalto 80-100.....	133
Gráfica 37. Comparación de la variación del contenido de vacíos con aire en la mezcla elaborada con asfalto modificado con Elvaloy.	135
Gráfica 38. Comparación de la variación del contenido de vacíos en agregado mineral en la mezcla elaborada con asfalto modificado con Elvaloy.	135
Gráfica 39. Comparación de la variación del contenido de vacíos llenos con asfalto en la mezcla elaborada con asfalto modificado con Elvaloy.	136
Gráfica 40. Comparación de la variación de la densidad Bulk en la mezcla elaborada con asfalto modificado con Elvaloy.	136
Gráfica 41. Polígono de vacíos de la mezcla elaborada con asfalto modificado con Elvaloy.	137
Gráfica 42. Comparación de la variación del contenido de vacíos con aire en la mezcla elaborada con asfalto modificado con SBS.....	138
Gráfica 43. Comparación de la variación del contenido de vacíos en agregado mineral en la mezcla elaborada con asfalto modificado con SBS.....	139
Gráfica 44. Comparación de la variación del contenido de vacíos llenos con asfalto en la mezcla elaborada con asfalto modificado con SBS.	139
Gráfica 45. Comparación de la variación de la densidad Bulk en la mezcla elaborada con asfalto modificado con SBS.....	140
Gráfica 46. Polígono de vacíos de la mezcla elaborada con asfalto modificado con SBS.	140
Gráfica 47. Ejemplo del rango óptimo del contenido de asfalto en la mezcla.	141

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Peso específico bulk.....	39
Ecuación 2. Peso específico máximo teórico.....	39
Ecuación 3. Peso específico máximo medido – Rice.....	40
Ecuación 4. Volumen Bulk.....	40
Ecuación 5. Volumen máximo medido.....	40
Ecuación 6. Volumen máximo teórico.....	40
Ecuación 7. Volumen de vacíos.....	40
Ecuación 8. Volumen de asfalto.....	40
Ecuación 9. Volumen de agregados.....	40
Ecuación 10. Volumen de asfalto absorbido.....	40
Ecuación 11. Volumen de asfalto efectivo.....	41
Ecuación 12. Volumen de vacíos en los agregados minerales.....	41
Ecuación 13. Porcentaje de volumen de vacíos.....	41
Ecuación 14. Porcentaje de volumen de agregados.....	41
Ecuación 15. Porcentaje de volumen de asfalto efectivo.....	41
Ecuación 16. Porcentaje de agregados minerales.....	41
Ecuación 17. Porcentaje de asfalto.....	41
Ecuación 18. Porcentaje de vacíos llenos de asfalto.....	41
Ecuación 19. Porcentaje en peso de asfalto absorbido respecto al peso de los agregados (%A).....	41
Ecuación 20. Porcentaje en peso de asfalto efectivo respecto al peso de la mezcla (%B).....	41
Ecuación 21. Gravedad específica de la mezcla.....	44
Ecuación 22. Volumen de ligante asfáltico absorbido.....	44
Ecuación 23. Volumen de ligante asfáltico efectivo.....	45
Ecuación 24. Porcentaje de prueba inicial de ligante asfáltico.....	45
Ecuación 25. Peso de los agregados, en la mezcla.....	45
Ecuación 26. Relaciones entre los giros inicial, de diseño y máximo.....	45
Ecuación 27. Factor de corrección para el Gmb.....	46
Ecuación 28. Porcentaje de compactación de la mezcla de prueba.....	46
Ecuación 29. Porcentaje de vacíos con aire.....	46
Ecuación 30. Porcentaje de vacíos en el agregado mineral.....	46
Ecuación 31. Porcentaje de asfalto estimado.....	46
Ecuación 32. Propiedades estimadas para la proporción de vacíos ideal (4%).....	47
Ecuación 33. Volumen de aire – Ensayo TSR.....	50
Ecuación 34. Volumen de agua absorbida – Ensayo TSR.....	50
Ecuación 35. Porcentaje de saturación del espécimen – Ensayo TSR.....	50
Ecuación 36. Hinchazón de los especímenes parcialmente saturados – Ensayo TSR.....	51
Ecuación 37. Hinchazón de los especímenes sometidos a humedad – Ensayo TSR.....	51
Ecuación 38. Resistencia a la tensión - Ensayo TSR.....	51
Ecuación 39. Relación de resistencia a la tensión, TSR.....	52
Ecuación 40. Módulo de rigidez medido, Sm.....	53
Ecuación 41. Módulo de rigidez ajustado, S'm.....	53
Ecuación 42. Esfuerzo de tracción – Ensayo Deformación Permanente.....	55
Ecuación 43. Deformación por tracción – Ensayo Deformación Permanente.....	55
Ecuación 44. Deformación por tracción, para $\mu = 0.35$	55
Ecuación 45. Número de aplicaciones requeridas para la fatiga del material.....	56
Ecuación 46. Relación Frecuencia – Velocidad de aplicación de carga.....	113

Ecuación 47. Índice de Penetración. 125
Ecuación 48. Número Penetración – Viscosidad, PVN. 126

GLOSARIO

AGREGADOS MINERALES: material que compone la mayor proporción tanto en volumen, peso y resistencia a una mezcla asfáltica.

AMP: sigla que indica, asfaltos modificados con polímeros.

COMPACTADOR GIRATORIO: dispositivo utilizado en la compactación de especímenes en la metodología Superpave. Sus principales características son la simulación de la compactación en campo por medio de amasado a una presión constante y el registro de la altura a medida que sucede la compactación.

DEFORMACIÓN PERMANENTE: prueba útil para identificar el potencial de ahuellamiento de una mezcla asfáltica. Su comportamiento en las mezclas asfálticas depende fuertemente del tipo de ligante utilizado, así como de la composición de la mezcla, forma y tamaño de las partículas, calidad de los agregados y aditivos, cuando éstos son empleados. Se caracteriza por una sección transversal de la superficie que ya no se encuentra en su posición de diseño.

DIAGRAMA DE FASES: representación por medio de la cual se puede visualizar a la vez el volumen y los pesos de los materiales componentes de la mezcla.

DISEÑO MARSHALL: metodología de diseño de mezclas asfálticas más utilizada en el mundo, que debido a su tipo de compactación, por impacto, no simula procedimientos de campo y puede influir en la resistencia del espécimen por fractura de agregados.

DISEÑO SUPERPAVE: metodología de diseño de mezclas asfálticas, que simula de mejor manera en el laboratorio lo que sucede en campo.

DSR: sigla que indica, Dynamic Oscillatory Shear Rheometer. Reómetro oscilatorio de corte dinámico. Utilizado en la caracterización de asfaltos a altas e intermedias temperaturas.

ELVALOY: (Etileno – Butilacrilato – Gliceril – Metacrilato). Polímero utilizado como modificador del asfalto, de la firma Du Pont.

ESPÉCIMEN: mezcla asfáltica densificada con el aparato de compactación Marshall o el Compactador Giratorio el cual es sometido a diferentes pruebas.

ESTABILIDAD DE LA MEZCLA: medida de su capacidad para resistir las deformaciones plásticas provocadas por cargas de servicio.

FATIGA: las repeticiones de carga pueden inducir agrietamientos en las capas confinadas. Los esfuerzos cortantes y de tensión, así como las deformaciones en las capas confinadas, causan la formación de micro grietas. Estas micro grietas acumuladas con la repetición de cargas pueden generar macro grietas visibles. Este proceso es llamado fatiga.

GMM: ensayo que se realiza a la mezcla asfáltica para determinar el peso específico máximo de la misma.

GRADACIÓN: es la combinación de dos o más tipos de agregados ya sea de la misma o diferente fuente de tal manera que al hacer la combinación matemática, en masa, cumpla las especificaciones que lo rigen.

GRADO DE DESEMPEÑO: describe las dos temperaturas límites hasta las cuales el asfalto poseería propiedades físicas y mecánicas adecuadas.

GRANULOMETRÍA: ensayo que se realiza a un material pétreo para determinar la distribución de los tamaños de las partículas.

HMA: sigla en inglés que indica, Hot Mix Asphalt. Mezcla asfáltica en caliente.

ÍNDICE DE INESTABILIDAD COLOIDAL: da una idea del grado de gelificación de los asfaltos o del cambio de la estructura coloidal y de la susceptibilidad térmica. Esta en función de los constituyentes dispersados y floculantes.

MÓDULO DE RIGIDEZ: valor que relaciona la capacidad o la estabilidad de cada espécimen con la fluencia que este tiene para esa aplicación de la carga.

N INICIAL: número del giro que se tiene en cuenta para comparar valores de porcentajes de compactación mínimo para cada espécimen en el compactador giratorio.

N MÁXIMO: número del giro que se tiene en cuenta para comparar valores de porcentajes de compactación máximo para cada espécimen en el compactador giratorio.

N DISEÑO: número del giro para el cual el espécimen debe cumplir con el contenido de vacíos deseado en el compactador giratorio. Generalmente 4% de vacíos.

NAT: sigla en inglés que indica Nottingham Asphalt Tester. Equipo de ensayo en el cual se llevan acabo las pruebas de caracterización dinámica de cada mezcla.

PAV: sigla en inglés que indica Pressure Aging Vessel. Prueba que se realiza a los asfaltos a condiciones establecidas de tal manera que simule el envejecimiento aproximadamente a los 7 años de servicio.

POLÍGONO DE VACÍOS: polígono formado en el análisis Ramcodes. Liga racionalmente las especificaciones de control en campo y se define por medio de las propiedades volumétricas de la mezcla.

PORCENTAJE DE AGREGADOS: es la relación entre el peso de los agregados frente al peso total de la muestra de mezcla asfáltica. En el diagrama de fases, representa la mayor cantidad en peso de la mezcla.

PORCENTAJE DE VACÍOS EN LOS AGREGADOS MINERALES: los VAM, vacíos en agregado mineral, es la cantidad de material compuesto por el volumen de aire y el volumen de asfalto efectivo.

PORCENTAJE DE ASFALTO EFECTIVO: es aquella cantidad de ligante que no es absorbida por el agregado y que se acumula en los intersticios dejados entre las partículas pétreas.

PORCENTAJE DE ASFALTO: es la suma del valor del asfalto efectivo más el ligante absorbido por el agregado.

PORCENTAJE DE VACÍOS LLENOS DE ASFALTO: indica el porcentaje de los VAM que contienen asfalto.

PORCENTAJE DE VOLUMEN DE VACÍOS: proporción en volumen, de los intersticios que permanecen en la mezcla asfáltica después de su compactación.

PROPIEDADES DE CONSENSO: requisitos que deben cumplir los agregados, imprescindibles en todos los casos para alcanzar un buen desempeño de la mezcla.

PROPIEDADES DE ORIGEN: requisitos que deben cumplir los agregados para calificar a la fuente de donde son extraídos.

REOLOGÍA: estudio de los principios viscoelásticos que regulan el movimiento de los fluidos.

RAMCODES: indica, Rational Methodology for Compacted Geomaterial's Densification and Strength Analysis. Metodología Racional para el análisis de densidad y resistencia de geomateriales compactados, que permite además hacer comparación entre los Métodos Marshall y Superpave.

RELACIÓN DE POLVO: relación entre la proporción de material que pasa el tamiz # 200 y el ligante efectivo.

RTFOT: sigla en inglés que indica Rolling Thin Film Oven Test. Ensayo que simula el envejecimiento al que es sometida una mezcla durante el proceso de mezclado en planta.

SBS: (Estireno – Butadieno – Estireno), polímero elastómero de la firma Shell. Es el más utilizado de los polímeros para la modificación de los asfaltos. También es llamado Kraton.

SHRP: sigla en inglés que indica, Strategic Highway Research Program. Programa estratégico de investigación en carreteras.

SUPERPAVE: SUPERior PERforming Asphalt PAVement. Metodología de diseño de mezclas asfálticas desarrollada por el SHRP.

TSR: sigla en inglés que indica Tensile Strength Ratio. Ensayo que permite medir la susceptibilidad a la humedad y la adherencia entre partículas constitutivas de la mezcla asfáltica.

VISCOSIDAD: resistencia que ofrece un fluido a la deformación, debida básicamente al rozamiento interno de las partículas.

ZONA RESTRINGIDA: zona usada en el diseño Superpave para evitar mezclas con alta proporción de arenas finas en relación al total de la arena y para evitar gradaciones que tienen valores cercanos a los límites de las proporciones volumétricas.

PRESENTACIÓN

El presente proyecto está enmarcado en la modalidad de práctica empresarial, y se desarrolla en la Corporación para la Investigación y Desarrollo en Asfaltos en el Sector Transporte e Industrial – CORASFALTOS, con Sede en Piedecuesta (Santander), Km. 2 Vía al Refugio, UIS Guatiguará.

CORASFALTOS es una entidad mixta de carácter civil sin ánimo de lucro que propende por la integración, difusión y mejoramiento del conocimiento sobre asfaltos y los materiales empleados en la construcción de la infraestructura vial. Brinda soporte para satisfacer las necesidades tecnológicas en asfaltos y/o pavimentos a los sectores industrial, estatal y educativo. Para ello cuenta con talento humano calificado, tecnología de punta, conocimiento e infraestructura física, trabajando en equipo con filosofía de mejoramiento continuo.

El trabajo de grado se desarrolla como parte de las actividades del proyecto “Transferencia, Adaptación y Aplicación de Tecnología en Servicios Especializados de Laboratorio para mejorar la Asistencia Técnica brindada por CORASFALTOS, al igual que su Capacidad Investigativa - TAAT”, que actualmente se realiza en CORASFALTOS.

Para el tiempo de realización de la práctica empresarial los estudiantes **Edwin Ricardo Medina Solano** de la Escuela de Ingeniería de Transporte y Vías de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, y **Edgar Alexis Peña Acosta**, estudiante de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander, estarán vinculados principalmente a las actividades referentes a la realización del proyecto TAAT, del que se adquiere la información necesaria para desarrollar el presente documento de trabajo de grado.

Así pues, el trabajo de grado afianza los lazos entre la UPTC, CORASFALTOS y la UIS, siendo un proyecto de amplio campo de aplicación, con enfoque a la investigación y que aporta a las tres partes involucradas experiencia en trabajo interinstitucional, transferencia de conocimientos, tecnologías y además contribuye al fortalecimiento de los sistemas de gestión de la calidad, y al mantenimiento de la certificación y acreditación de laboratorios tanto de CORASFALTOS como de las Universidades.

De tal forma, el trabajo de grado se desarrolla mancomunadamente entre los dos estudiantes que optan al título del pregrado, en Ingeniería de Transporte y Vías e Ingeniería Civil respectivamente, que adquieren habilidades y destrezas en un centro de investigación con tecnología de punta, lo que brinda a cada una de las escuelas fortaleza en la articulación de trabajos interdisciplinarios y la preparación de semilleros de investigación acordes a las necesidades que demanda la actual economía.

RESUMEN

Titulo: Análisis comparativo del diseño de mezclas asfálticas mdc-2 con asfalto original y modificado con polímeros por los métodos marshall y superpave*

Autor: Edgar Alexis Peña Acosta**

Palabras Claves: Diseños Marshall y Superpave con asfaltos originales y modificados.

Análisis de las características dinámicas y susceptibilidad a la humedad de mezclas asfálticas elaboradas por las metodologías de diseño más importantes en la actualidad Marshall y Superpave, a quienes se les hará la comparación de las propiedades volumétricas con las mezclas asfálticas compactadas y preparadas con tres tipos de ligantes por medio de la metodología RAMCODES. Los asfaltos utilizados son asfalto 80-100 de la refinería de Barrancabermeja y este mismo modificado con polímeros Elvaloy y SBS. Los asfaltos modificados brindan ventajas a la mezcla asfáltica que no pueden lograrse cuando se utiliza en estado base. El uso y comportamiento de las diferentes mezclas elaboradas son objeto de estudio. Se hace la caracterización físico-mecánica de los agregados pétreos y la físico-química a cada asfalto de acuerdo al programa SHRP. Las mezclas se diseñan por medio de las metodologías más importantes y reconocidas en el medio: "Método Marshall" y "Método Superpave". Estas principalmente difieren el modo de densificación de la mezcla asfáltica. Además el primer método es destructivo mientras que en el segundo se llega al óptimo de asfalto analizando las propiedades volumétricas de la mezcla. El uso del compactador giratorio Superpave simula de manera real lo acontecido en campo en el momento de compactación debido al sistema de presión, densificación por amasado y al modo de compactación por giros. También se estudia la susceptibilidad térmica a cada asfalto utilizado y la susceptibilidad a la humedad de las mezclas elaboradas con el ensayo Tensile Strength Ratio, TSR, y se caracteriza dinámicamente con las pruebas modulo dinámico, ley de fatiga y deformación permanente.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas Escuela Ingeniería Civil. Director: Eduardo Castañeda Pinzon

ABSTRACT

Title: Comparative analysis of the design of asphaltic mixtures MDC-2 with original asphalt and modified with polymers by the Marshall and Superpave methods.*

Author: Edgar Alexis Peña Acosta**

Important Words: Marshall and Superpave Designs with original and modified asphalts.

Abstract

Analysis of the dynamic characteristics and the moisture susceptibility of hot mix asphalt made up by the most important methodologies of design. Comparison is made between the Marshall Method and the Superpave Method using the volumetric properties with the compacted asphalt mixtures and prepared with three types of bindings by the RAMCODES methodology. The asphalts used are the asphalt 80-100 of the Barrancabermeja refinery and the same modified with polymers Elvaloy and SBS. The modified asphalts offer some advantages to the asphaltic mixture which can't be made when used in their natural state. The use and behavior of the different mixtures made is object of study. The physical-mechanic characterization of the stony aggregates and the physical-chemical of each asphalt according to the SHRP program is made. The mixtures are designed by the most important and most recognized methodologies en the medium: "The Marshall Method" and "The Superpave Method". These differ basically in the way of densification of the asphaltic mixture. Besides, the first method is destructive, while in the second one the optimum quantity of asphalt is reached analyzing the volumetric properties of the mixture. The use of the gyratory compactor Superpave simulates in a real way what happens on the field in the moment of compaction due to the system of pressure, densification by kneading, and the way of compaction by turns. Also the thermic susceptibility to each asphalt used and the moisture susceptibility of the mixtures made with the Tensile Strength Ratio, TSR, are studied and dynamically characterized with the dynamic modulus tests, fatigue law, and permanent deformation.

* Práctica Empresarial

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela Ingeniería Civil. Director: Eduardo Castañeda Pinzon

INTRODUCCIÓN

La mezcla asfáltica como principal componente estructural en un pavimento, desde el punto de vista de los costos, obliga al diseñador y constructor a optimizar por medio de metodologías apropiadas la dosificación de materiales. Esta práctica emplea el método Marshall, utilizado durante décadas, y el reciente método Superpave.

La implementación de la metodología Superpave ha traído grandes ventajas, la más representativa es la utilización del compactador giratorio, que simula lo realizado en campo.

En el presente documento son objeto de estudio tres asfaltos, dos de ellos modificados con polímeros. A los tres se les hace su respectiva caracterización fisicoquímica para ser empleados en el diseño por las dos metodologías en estudio. Con esto se busca, además del análisis de los métodos de diseño, evaluar la respuesta que tiene cada asfalto en las propiedades físicas químicas y dinámicas de la mezcla asfáltica y evidenciar su capacidad como mejorador de adherencia en la misma.

Cabe señalar que este análisis está enmarcado tan sólo dentro de la primera fase del proyecto “Transferencia, Adaptación y Aplicación de Tecnología en Servicios Especializados de Laboratorio para mejorar la Asistencia Técnica brindada por CORASFALTOS, al igual que su Capacidad Investigativa” el cual busca concluir las razones por las que dependiendo del tipo de estructura interna, originada por la oxidación del asfalto en cada uno de los grados de envejecimiento simulado, influyen en la compatibilidad del ligante y el agregado pétreo.

El análisis de resultados esta basado en la comparación de las propiedades volumétricas de cada mezcla asfáltica diseñadas con las metodologías anteriormente aludidas, empleando el procedimiento RAMCODES, con el que se concluye que no solo existe un contenido óptimo con el que se cumplen los criterios volumétricos, sino que hay un rango de valores que puede ser utilizado en caso de un control de calidad de la mezcla.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Comparar los resultados obtenidos al realizar el diseño de mezclas asfálticas MDC-2 con asfalto base y modificado con polímeros, mediante las metodologías Marshall y Superpave.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Participar en las determinaciones y análisis de resultados de la caracterización físico química de los diferentes ligantes asfálticos.
- Analizar la susceptibilidad térmica, mediante las curvas reológicas, el índice de penetración y el número penetración-viscosidad de los tres asfaltos seleccionados para la preparación de las mezclas asfálticas.
- Realizar los diseños de las mezclas asfálticas por los métodos Marshall y Superpave, con un asfalto original convencional, un asfalto modificado con el polímero SBS, y un asfalto modificado con el polímero ELVALOY.
- Comparar los resultados obtenidos en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas, de acuerdo con las características propias de cada método de diseño.
- Obtener las propiedades dinámicas, tales como módulos dinámicos, ley de fatiga y deformación permanente, de las mezclas asfálticas diseñadas por el método Marshall.
- Medir el deterioro que podría sufrir una mezcla asfáltica al ser sometida al efecto simulado de las condiciones climáticas tropicales mediante el ensayo TSR.
- Comparar y analizar los diferentes resultados físicos, mecánicos y dinámicos obtenidos de las diferentes mezclas asfálticas.

- Dar soporte a los servicios de laboratorio ofrecidos por CORASFALTOS y demás actividades relacionadas con la práctica empresarial.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

El comportamiento de cualquier obra de construcción inicia con el estudio y caracterización de los materiales y del cambio, que éstos pueden sufrir tanto en el proceso constructivo como en el periodo de servicio. Los dos principales constituyentes de un pavimento flexible, ligante asfáltico y agregado mineral, asumen la mayor responsabilidad en la calidad de la capa asfáltica que se construya. La utilización de los ligantes asfálticos en obras civiles tiene una historia larga ya que las primeras menciones pertenecen a los hallazgos arqueológicos que demuestran su uso antes de la era Cristiana.

2.1.1 Propiedades reológicas del asfalto frente a las propiedades estructurales.

- ***Asfaltos originales.***

En la evaluación del desempeño de un asfalto, las propiedades reológicas son básicas, a partir de las cuales se realizan tanto los cálculos del proceso constructivo inicial, como el pronóstico del comportamiento del pavimento en servicio. Debido a la composición compleja y muy específica en cada caso de los diferentes ligantes asfálticos, este se califica como el material visco-elástico, cuyas propiedades reológicas intrínsecas dependen tanto de la temperatura como del tiempo de aplicación de carga.

La ruta principal para caracterizar el comportamiento particular de los asfaltos, consiste en medir la respuesta del material a una carga dinámica aplicada, por ejemplo ante un esfuerzo cortante (“shear stress”). La naturaleza visco-elástica del asfalto, en este caso, será descrita en los términos de mediciones de Dynamic Oscillatory Shear Rheometer (DSR), es decir, se determinan los módulos: G^* - módulo complejo; G' - módulo elástico; G'' - módulo viscoso; δ - ángulo de fase y viscosidad. Con la presentación de las “Curvas Maestras” y diagramas “Black” o “Cole-Cole” se caracteriza el comportamiento del asfalto a diferentes temperaturas y frecuencias¹.

Se sabe que los asfaltos del tipo “sol” tienen alta susceptibilidad térmica y baja concentración de asfaltenos. Las partículas estructurales (micelas) se mueven libremente en un medio homogéneo.

¹ Loeber L., Muller G., Morel J., Sutton O. Bitumen in colloid science: a chemical, structural and rheological approach – Fuel, V.77, N° 13, pp. 1443-1450, 1998.

Los asfaltos “gel” se caracterizan por la deformabilidad elástica retardada pero considerable. Al contrario de los asfaltos “sol”, los “gel” tienen baja dependencia cinética y son completamente estructurizados; tienen espectro de relajación grande y su ángulo de fase no varía mucho con los módulos.

Los asfaltos visco-elásticos, del tipo “sol-gel” demuestran efectos elásticos y algunas deformaciones permanentes. La cantidad de los asfaltenos en estos asfaltos es media. Con el aumento de la concentración de las “micelas” casi proporcionalmente crecen las deformaciones elásticas y el material demuestra un comportamiento pseudo-plástico.

Analizando 5 (cinco) diferentes asfaltos (algunos de altos contenidos de asfaltenos, otros de resinas y convencionales), Loeber L. y colaboradores encontraron que los asfaltos de mayor concentración de asfaltenos en su composición demuestran menores ángulos de fase, bajo las mismas temperaturas, frecuencias y tensiones. A mayores temperaturas estos asfaltos mantienen mayor durabilidad comparándolos con los asfaltos de menor concentración de asfaltenos. La longitud total de las curvas de diagramas de “Black” es menor, con las mismas frecuencias, indicando la menor susceptibilidad térmica, pero al mismo tiempo, se nota menor uniformidad del producto y, por consiguiente, su menor homogeneidad estructural.

Al contrario, en los asfaltos con alto contenido de resinas, se identificaron altos ángulos de fase, bajo las mismas temperaturas, frecuencias y tensiones. Los módulos complejos de estos asfaltos son mayores que los de asfaltos convencionales. Se concluye que la presencia de las resinas sería necesaria para obtener un sistema con alto grado de dispersión, prevenir la floculación y así obtener un sistema homogéneo.

El aumento de la concentración de los aceites aromáticos lleva el sistema a mayor grado de dispersión, con altos ángulos de fase.

Sin embargo, analizando los datos de otros autores para diferentes sistemas asfálticos en vista de sus propiedades reológicas, hay que reconocer que los resultados mencionados no pueden ser generalizados.

Los investigadores franceses² demostraron el efecto de la susceptibilidad térmica (que es, principalmente, resultado de la estructura coloidal) de los dos asfaltos de tipos extremos, “sol” y “gel” para mezclas de altos módulos. En la tabla 1 se reportan los resultados de sus análisis.

² Des Croix P., Planque L., Experience with optimized hard grade bitumen's in high modulus asphalt mixes – 3rd Euroasphalt&Eurobitumen Congress, Paper 094, Vienna, 2004.

Tabla 1. Características de dos asfaltos extremos en términos de estructura coloidal/susceptibilidad térmica.

CARACTERISTICAS	MUESTRA	
	1(S)	2(G)
Penetración @25°C, mm/10	15	22
Punto de Ablandamiento, °C	62	78
Índice de Penetración	-1.0	2.1
Temperatura Fraas, °C	-3	-14
Viscosidad @135°C, mm ² /s	1200	5700
T equi-viscos., 200 mPa s, °C	175	192
BBR (Asfalto original)		
Temperatura Crítica para S=300 MPa, °C	-	-21
Temperatura Crítica para m=0.3, °C	-	-15
BBR (RTFOT + PAV)		
Temperatura Crítica para S=300 MPa, °C	-	-20
Temperatura Crítica para m=0.3, °C	-	6
DSR		
Temperatura Crítica para G*/sinδ@ 1.6Hz = 1 kPa, °C	-	98
Módulos Complejos		
Módulo @ + 15°C ; 10 Hz, MPa	330	85
Módulo @ + 10°C ; 7.8 Hz, MPa	501	94
Angulo de fase δ@ + 10°C, 7.8 Hz,(°)	21	28
Módulo @ + 60°C ; 7.8 Hz, MPa	0.3	0.8
Angulo de fase δ@ + 60°C, 7.8 Hz,(°)	79	53
Temperatura Crítica para δ@ 7.8 Hz, = 45°C, (°C)	27	40
RTFOT		
Pérdida de masa, (%)	< -0.1	< -0.1
Penetración Retenida, (%)	85	83
Aumento de Punto de Ablandamiento, (°C)	3.5	8.0

Nota: 1(S) – muestra del asfalto tipo “sol”

2(G) – muestra del asfalto tipo “gel”

Estableciendo relaciones y/o tendencias entre la susceptibilidad térmica (relacionada con el tipo de estructura coloidal), las propiedades básicas y pronósticos para el desempeño de mezclas asfálticas de altos módulos, se concluye lo siguiente:

El material con mayor Índice de Penetración de Pfeiffer (PPI) e Índice Coloidal (IC) tiene menor resistencia al envejecimiento (que se aprecia por el crecimiento de Punto de Ablandamiento después de RTFOT y PAV y crecimiento en BBR bajo el criterio m=0.3) y menores módulos de rigidez @ + 15°C.

El material con menores índice de Penetración e índice Coloidal tiene menor resistencia al craqueo a bajas temperaturas (se aprecia por la Temperatura de

Fraas del asfalto en estado original), menor resistencia a fatiga @ + 10°C y menor resistencia al ahuellamiento @ + 60°C.

Así se considera ausencia de la relación de la susceptibilidad térmica de un asfalto y su estructura coloidal.

Sin embargo, vale la pena destacar que se analizaron los asfaltos para las mezclas de altos módulos obtenidos en procesos tecnológicos específicos, enfocados para la obtención de ligantes especiales.

- ***Asfaltos modificados con polímeros.***

El propósito principal de modificación de asfaltos con polímeros es disminuir la susceptibilidad térmica, aumentar la cohesión y mejorar las características reológicas. Generalmente, alrededor del 75% de los asfaltos modificados se pueden clasificar como elastoméricos, 15% como plastoméricos y 10% misceláneos³. Dentro de la clase de los elastómeros, se considera, que a los copolímeros de estireno sintéticos pertenece el mayor potencial en la modificación y mejoramiento de propiedades asfálticas. La modificación polimérica de un asfalto resulta en un sistema multifase con las fases enriquecidas en polímero y otras enriquecidas con asfalto. El estudio de estos sistemas requiere utilización de técnicas especiales como Microscopio Electrónico con técnicas de Espectroscopia.

Los cambios provocados por el envejecimiento en estos sistemas son más complejos y entre sus variables están la naturaleza del asfalto y del polímero, el grado de ramificación del polímero, la compatibilidad, el método de modificación y la proporción del polímero, entre otras.

Estudiando propiedades reológicas del asfalto modificado con estireno-butadieno-estireno (SBS)⁴ se concluyó que los asfaltos de carácter parafínico demuestran el mayor grado de modificación polimérica, comparándolos con los nafténicos, lo que se refleja en mayor concentración del polímero, mayores temperaturas y menores frecuencias. Se subraya que bajo estas condiciones la menor viscosidad del asfalto-base permite a la naturaleza de la red polimérica de SBS dominar a las propiedades reológicas del sistema. La simulación del envejecimiento en laboratorio, RTFOT y PAV, demostró la diferencia entre los ligantes modificados. Los asfaltos con mayor contenido de polímero, manifestaron desplazamiento hacia la respuesta elástica del sistema, que se vincula, normalmente, con el

³ Diehl C.F. Ethylene-styrene interpolymers for bitumen modification – 2^d Euroasphalt&Eurobitumen Congress, 2, pp 93-102, Barcelona, 2000.

⁴ Airey G.D., Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens-Fuel, V.82, pp.1709-1719, 2003.Lu X., Isacsson U. Chemical and rheological evaluation of aging properties of SBS polymer modified bitumens - Fuel, V.77, N° 9/10, pp.961-972, 1998.

envejecimiento por oxidación. Este comportamiento se puede atribuir a la degradación parcial del polímero SBS durante el envejecimiento simulado.

Evaluando el cambio de propiedades reológicas de diferentes sistemas asfalto-polímero durante el envejecimiento⁵, se encontró que las características de asfaltos modificados con los mismos polímeros y diferentes asfaltos-base (se utilizaron a un asfalto residual de refinería y otro asfalto producido por oxidación) demostraron tendencias distintas. Las diferencias se explicaron debido a la presencia de mayor cantidad de los grupos polares en el asfalto-base oxidado que cambia el proceso de estructuración del ligante durante el envejecimiento y la compatibilidad con polímero.

Sin embargo, en ambos casos, el asfalto modificado con polímeros SBS demostró, en el estado original y envejecido, en los diagramas de “Black”, algunas partes planas que significa los momentos de relajación, cuando los módulos complejos de la fase polimérica son iguales a los de la fase del asfalto en el sistema.

Los polímeros EVA y EBA no presentaron las mismas tendencias, sus curvas en diagramas no tenían partes planas, además parecían superpuestas antes y después del envejecimiento simulado. Este comportamiento se explicó debido a la ausencia de oxidación de los polímeros y la pérdida de compatibilidad de estos con el asfalto después de envejecimiento simulado.

2.2 PROYECTO CORASFALTOS “TAAT”

El proyecto TAAT (Transferencia, Adaptación y Aplicación de Tecnología en Servicios Especializados de Laboratorio para mejorar la Asistencia Técnica brindada por CORASFALTOS, al igual que su Capacidad Investigativa) plantea realizar investigación aplicada sobre el uso y comportamiento de diferentes tipos de ligantes asfálticos (original y modificado) y estudiarles su comportamiento reométrico, dependiendo del grado de formación de su “estructura interna”. También correlacionar estos resultados con el comportamiento de las mezclas asfálticas preparadas con ellos y con un solo tipo de material pétreo.

Para el asfalto original y modificado, se estudiarán las posibles causas que originan el punto de “inflexión” de la curva de servicio de un pavimento, haciendo simulaciones de envejecimiento y estudiando los cambios químicos, y por consiguiente reométricos, dependiendo del tipo de estructura interna originada por

⁵ Lapalu L., Planche J.P., Mouillet V., Dumas P., Durrieu F. Evolution of the rheological properties of polymer-modified bitumens during aging - Memory of 3rd E&E Congress, Paper 210, Vienna, 2004.

el envejecimiento. Todo esto se correlacionará con la compatibilidad del ligante y el agregado pétreo en cada uno de los grados de envejecimiento simulado.

2.2.1 Objetivos del Proyecto TAAT.

2.2.1.1 Objetivo Global.

Transferir, adaptar y desarrollar tecnología para optimizar el mejor uso de los ligantes asfálticos de acuerdo con sus propiedades reométricas y el comportamiento de sus mezclas asfálticas, estableciendo una metodología para caracterizarlos y evaluarlos. Con esta base, recomendar modificaciones a las especificaciones establecidas, en caso que se amerite.

2.2.1.2 Objetivos Específicos.

- Definir la metodología que permita caracterizar los ligantes asfálticos, teniendo en cuenta el grado de formación de su estructura interna.
- Definir las mejores condiciones de fabricación y manejo de la mezcla asfáltica, que den los mejores comportamientos en el pavimento, de acuerdo con el grado de formación de la estructura interna del asfalto.
- Esclarecer el comportamiento de las mezclas asfálticas, dependiendo del grado de formación de la estructura interna del ligante.
- Definir las causas que determinan el grado de inflexión de la curva del nivel de servicio de un pavimento.
- Revisar las especificaciones del INVIAS y recomendar modificaciones en caso que se amerite.
- Dar a conocer los resultados obtenidos mediante la transferencia de tecnología al SENA, presentándolos en eventos nacionales e internacionales, publicándolos en la revista “Asfaltos y Pavimentos” editada por CORASFALTOS e incluyéndolos en los cursos y seminarios dictados por la Corporación.

2.2.2 Metodología del Proyecto TAAT.

El desarrollo metodológico del proyecto TAAT es el siguiente:

- ACTIVIDAD 1. Establecimiento del “Estado del Arte” sobre composición química del asfalto y su relación con su estructura interna, propiedades reométricas y propiedades de superficie.

Aunque para la formulación del proyecto se realizó un “estado del arte”, se requiere ampliar esta información para conocer en detalle los adelantos y

tendencias de esta tecnología que está variando constantemente a medida que se han venido introduciendo nuevas técnicas analíticas, nuevos estudios reométricos y nuevos tipos de asfaltos refinados o modificados, todo motivado por mejorar la competitividad del producto y por cumplir con normas ambientales que son cada vez más exigentes. Igualmente, se analizarán los nuevos adelantos y recomendaciones para la fabricación y colocación de las mezclas asfálticas.

- ACTIVIDAD 2. Caracterización y evaluación de materias primas.

El objeto de esta actividad es determinar las características iniciales de los materiales base para la investigación, con pruebas especializadas, que permitan hacer un análisis de cómo influyen en su comportamiento geométrico, físico y mecánico, la naturaleza de los mismos, y en especial para el ligante asfáltico, su estructura interna.

- ACTIVIDAD 3. Modificación del asfalto original por mezcla y por reacción química y su caracterización.

Realizar, con base en la información disponible, la modificación en la planta piloto del asfalto original, buscando dos tipos de incorporación: una a través de reacción química entre el ligante y el modificador, y otra mediante simple mezcla, buscando preferiblemente la formación de estructuras de modificados dentro del ligante. Además, caracterizar reométrica, química, mecánica y físico-químicamente los ligantes modificados.

- ACTIVIDAD 4. Envejecimiento del asfalto, simulando diferentes años de desempeño, su caracterización química y reométrica, buscando diferentes grados de formación de “estructura interna”.

Simular diferentes grados de envejecimiento de los ligantes asfálticos, a través de los ensayos TFOT y RTFOT para reproducir el que sufren al momento de fabricar la mezcla, con el ensayo PAV para simular un desempeño como pavimento de aproximadamente 8 años y con otros PAV consecutivos para simular mayor tiempo de desempeño como pavimento. Posteriormente, mediante enfriamientos a diferentes gradientes de disminución de temperatura, obtener diferentes grados de formación de las “estructuras internas” de los ligantes y verificar dicha formación a través de análisis por espectroscopia infrarroja (IR), microscopía electrónica (SEM) y difracción de rayos X (DRX). Realizar la caracterización química, reométrica, física y mecánica, para a través de estos resultados evaluar la incidencia de las “estructuras internas”.

- ACTIVIDAD 5. Diseño de mezclas asfálticas con los asfaltos más representativos para simular el comportamiento del pavimento.

Se realizará el diseño de una mezcla asfáltica utilizando el método volumétrico, material pétreo de Pescadero y ligante original de la refinería Barrancabermeja (GCB). Las anteriores características y correlaciones encontradas deben ratificarse en el comportamiento de los pavimentos. Por este motivo se escogerán tres ligantes estudiados, el original y dos modificados, con diferente grado de envejecimiento y diferente “estructura interna” para fabricar mezclas asfálticas (con el porcentaje de asfalto encontrado en el diseño de la mezcla asfáltica con asfalto original) y estudiarles su comportamiento dinámico y susceptibilidad al agua (TSR).

- ACTIVIDAD 6. Medición de las propiedades de superficie de los asfaltos estudiados y de los agregados pétreos.

Una vez se tenga conocimiento sobre la influencia de las “estructuras internas” de los asfaltos en sus propiedades, se determinará para cada uno de ellos la densidad de carga coloidal y su compatibilidad con la densidad de carga del agregado pétreo. Se determinará la influencia de estas estructuras internas y del grado de envejecimiento del asfalto en la compatibilidad con los minerales utilizados en la fabricación de la mezcla asfáltica.

- ACTIVIDAD 7. Revisión de especificaciones INVIAS.

Con base en los resultados del proyecto y teniendo en cuenta las recomendaciones se hará una revisión de las especificaciones del INVIAS y se propondrá un cambio de las mismas. Se justificarán técnicamente los cambios sugeridos y se remitirán al INVIAS para su validación.

- ACTIVIDAD 8. Transferencia de conocimiento.

Con el fin de revertir la experiencia adquirida durante el desarrollo del proyecto se organizarán módulos didácticos que comprenden todos los aspectos relacionados con el manejo técnico, mejoramiento de los asfaltos y mezclas asfálticas, entre otros; éstos módulos incluyen los siguientes temas básicos:

- Asfaltos. Comprende desde la definición hasta el estudio de los métodos más comunes de su obtención industrial.
- Tipos de mezclas asfálticas y sus componentes. Se tratarán temas relativos a la caracterización de los materiales, los métodos de diseño, normas y especificaciones existentes. Se hará énfasis en la fabricación de las mezclas asfálticas teniendo en cuenta el tipo y las características de los ligantes asfálticos.
- Generalidades sobre mejoradotes, en especial los poliméricos y la forma como intervienen en la formación de la estructura interna del asfalto.

Además, cómo influyen estas estructuras en el comportamiento de los ligantes y sus mezclas asfálticas.

- **ACTIVIDAD 9. Informe final.**

Se recopilará toda la experiencia adquirida durante el desarrollo del proyecto en la versión final de un documento que permita plasmar los resultados, las conclusiones y las recomendaciones para posibles estudios futuros. Lo más importante en esta etapa es definir nuevos servicios que CORASFALTOS pueda ofrecer al sector productivo, buscando mejorar su productividad y competitividad al utilizar tecnología y conceptos novedosos en la industria de los pavimentos flexibles.

2.3 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES Y MEZCLAS ASFÁLTICAS

2.3.1 Comportamiento del ligante asfáltico.

El ligante asfáltico por si mismo es un material de construcción atractivo y estimulante con el cual trabajar. Su más importante característica, muchas veces una ventaja, a veces una desventaja, es su susceptibilidad térmica. Esto es, sus propiedades mensurables dependen de la temperatura. Por esta razón, casi todos los ensayos de caracterización de cementos asfálticos y mezclas asfálticas deben especificar la temperatura. Sin una temperatura de ensayo especificada, el resultado del ensayo no puede ser efectivamente interpretado.

El comportamiento del cemento asfáltico depende también del tipo de aplicación de carga. Para la misma carga y el mismo asfalto, diferentes tiempos de aplicación de la carga implicaran propiedades diferentes. Por ello, los ensayos sobre los cementos asfálticos deben también especificar la velocidad de la carga. Como el comportamiento del cemento asfáltico es dependiente de la temperatura y de la duración del tiempo de aplicación de la carga, estos dos factores pueden intercambiarse. Es decir, una baja velocidad de carga puede simularse con temperaturas elevadas y una alta velocidad de carga puede simularse con bajas temperaturas.

El cemento asfáltico es llamado material visco-elástico porque exhibe simultáneamente características viscosas y elásticas. A altas temperaturas, el cemento asfáltico actúa casi como un fluido viscoso. En otras palabras, calentando a temperaturas elevadas (100°C), muestra la consistencia de un lubricante utilizado como aceite para motores. A muy baja temperatura, (0°C), el cemento asfáltico se comporta casi como un sólido elástico, es decir, actúa como un trozo de goma. Cuando es cargado se estira o se comprime adoptando diferentes formas. Cuando es descargado, retoma fácilmente su forma original. A una temperatura intermedia, que es una condición prevista en el pavimento, el

cemento asfáltico tiene característica de ambos estados, un fluido viscoso un sólido elástico.

Al estar compuesto de moléculas orgánicas, reacciona con el oxígeno del medio ambiente. Esta reacción se denomina “oxidación” y cambia la estructura y composición de las moléculas de asfalto. Al reaccionar con el oxígeno, la estructura del asfalto se hace más dura y frágil y da origen al término “endurecimiento por oxidación” o “endurecimiento por envejecimiento”.

La oxidación se produce más rápidamente a altas temperaturas. Es por ello que parte del endurecimiento ocurre durante el proceso de producción, cuando es necesario calentar el cemento asfáltico para permitir el mezclado y compactación. Este es también el motivo por el que la oxidación es más crítica en cementos asfálticos utilizados en pavimentos en climas cálidos y desérticos.

Los ligantes asfálticos modificados son productos concebidos para superar las propiedades del asfalto original, mejorando así el desempeño del pavimento a largo plazo. Si bien los modificadores pueden afectar muchas propiedades la mayoría de ellos intenta reducir la dependencia con la temperatura, el endurecimiento por oxidación del cemento asfáltico y la susceptibilidad a la humedad de la mezcla asfáltica.

2.3.2 Comportamiento del agregado mineral.

Una amplia variedad de agregados minerales ha sido empleada para producir HMA. Algunos materiales son llamados agregados naturales porque simplemente son extraídos de depósitos aluviales o glaciares y utilizados luego sin ningún procesamiento para elaborar la HMA (back-run o pit-run).

Los agregados elaborados pueden incluir a los naturales que han sido separados en distintas fracciones según su tamaño, lavados, triturados o tratados para mejorar ciertas características de comportamiento de la HMA. Sin embargo, en muchos casos el agregado es explotado en canteras y el más importante proceso al que es sometido es la trituración y la separación según sus tamaños.

El agregado sintético es cualquier material no extraído de los depósitos ni explotado en canteras; en muchos casos, es un sub-producto industrial. La escoria de alto horno es un ejemplo. Ocasionalmente se produce un agregado sintético para aportar una característica deseada en el desempeño de la HMA.

Un pavimento existente puede ser removido y procesado para elaborar una nueva HMA. El pavimento reciclado o RAP (“reclaimed asphalt pavement”) es una cada vez más utilizada fuente de agregados para pavimentos asfálticos.

Crecientemente, los residuos son usados como agregados o bien incorporados en los pavimentos asfálticos para resolver un problema ambiental. Neumáticos y vidrios son dos de los más reconocidos residuos con los que se han “rellenado” pavimentos asfálticos. En algunos casos, los residuos pueden realmente aportar una mejora en ciertas características del desempeño de la HMA. En otros casos se ha considerado suficiente resolver el problema de la disposición de los residuos sólidos sin esperar una mejora en el desempeño de la HMA.

Independientemente de la fuente, métodos de procesamiento o mineralogía, se espera que el agregado provea un fuerte esqueleto pétreo para resistir las repetidas aplicaciones de carga.

Agregados de textura rugosa, de buena cubicidad, dan mas resistencia que los redondeados y de textura lisa. Aunque una pieza de agregado redondeado podría poseer la misma resistencia interna de una pieza angular, las partículas angulares tienden a cerrarse más apretadamente, resultando una fuerte masa mineral. Las partículas redondeadas, en vez de trabarse, tienden a deslizarse una sobre otras. Cuando una masa de agregados es cargada, puede generarse dentro de la masa un plano por el que las partículas sean deslizadas o cizalladas unas con respecto de las otras, lo cual resulta en una deformación permanente de la masa. En este plano donde las tensiones de corte exceden a la resistencia al corte de la masa de agregados. La resistencia al corte en los agregados es de crítica importancia en la HMA.

El diferente comportamiento al corte de distintos agregados puede fácilmente observarse en las pilas de acopio, en las cuales los agregados triturados forman pilas más empinadas y estables que las redondeadas. En ingeniería se llama ángulo de reposo ala pendiente de la pila de acopio. El ángulo de reposo de una pila de agregado triturado es mayor que el una pila de agregado redondeado o no triturado.

2.3.3 Comportamiento de la mezcla asfáltica.

El concreto asfáltico, también llamado “mezcla asfáltica en caliente” o simplemente “HMA”= “hot mix asphalt”, es un material vial compuesto por un ligante asfáltico y un agregado mineral. El ligante asfáltico que puede ser un cemento asfáltico o un cemento asfáltico modificado, actúa como un agente ligante que aglutina las partículas en una masa cohesiva. Al ser impermeable al agua, el ligante asfáltico también impermeabiliza la mezcla. El agregado mineral, ligado por el material asfáltico, actúa como un esqueleto pétreo que aporta resistencia y rigidez al sistema.

El comportamiento de una HMA es afectado por las propiedades individuales de cada componente y por la interrelación de aquellos dentro del sistema.

Una forma de entender mejor el comportamiento de las mezclas asfálticas es considerar los tipos básicos de deterioros que el Ingeniero trata de evitar: la deformación permanente, la fisuración por fatiga y la fisuración por baja temperatura.

2.3.3.1 *Deformaciones permanentes.*

El comportamiento de las mezclas asfálticas con respecto a las deformaciones permanentes depende fuertemente del tipo de ligante utilizado, así como de la composición de la mezcla, forma y tamaño de las partículas, calidad de los agregados y aditivos, cuando éstos son empleados.

El ancho de carriles y la velocidad del tránsito también pueden afectar la deformación permanente. La distribución lateral de las huellas de paso de los vehículos está influenciada por la velocidad de tránsito, ancho de carril y profundidad de las huellas. Las velocidades bajas de tránsito, que corresponden a frecuencias de carga más bajas, también contribuyen directamente al desarrollo de deformaciones permanentes en las capas bituminosas.

Después de la fase de consolidación al comienzo de la vida de servicio del pavimento, el índice de deformaciones permanentes normalmente decrece con un incremento en las repeticiones de carga, hasta que se vuelve razonablemente constante. Finalmente, el índice de deformación permanente puede comenzar a incrementarse con un aumento en las repeticiones de cargas. Esta última fase ocurre sobre la vía sólo en situaciones extremas, e indican deterioro total.

La deformación permanente se caracteriza por una sección transversal de la superficie que ya no se encuentra en su posición de diseño. Se le llama permanente porque representa una acumulación de pequeñas cantidades de deformación irrecuperable que ocurre cada vez que se le aplica la carga.

Existen dos principales tipos de ahuellamiento: ahuellamiento por muchas aplicaciones repetidas de carga a la subrasante y ahuellamiento por acumulación de deformaciones en la capa asfáltica.

- *Ahuellamiento por fallas en la subrasante.*

Este tipo de ahuellamiento es causado por un excesivo esfuerzo repetido en las capas inferiores (base o subbase) bajo la capa de asfalto. Si bien los materiales más rígidos pueden reducir parcialmente este tipo de ahuellamiento, es considerado un problema estructural más que de los materiales en sí. Frecuentemente, es el resultado de una sección de pavimento demasiado delgada, sin la suficiente profundidad para reducir, a niveles tolerables, las tensiones sobre la subrasante cuando las cargas son aplicadas. Podría ser

también el resultado de una subrasante debilitada por el ingreso inesperado de humedad. La acumulación de la deformación permanente ocurre más en la subrasante que en las capas asfálticas.

- *Ahuellamiento por fallas en la capa de asfalto.*

El tipo de ahuellamiento que más preocupa a los diseñadores de mezclas asfálticas es el producido por la acumulación de deformaciones en las capas de asfalto. Este tipo de ahuellamiento es causado por una mezcla cuya resistencia al corte es demasiado baja para soportar las cargas pesadas repetidas a las cuales está sometida. A veces el ahuellamiento ocurre en una capa superficial de ella. En otros casos, la capa superficial no es en sí misma propensa al ahuellamiento, pero acompaña la deformación de una inferior más débil.

Cuando una mezcla asfáltica se ahuebla, es evidente que tiene baja resistencia al corte. Cada vez que un camión aplica una carga, una deformación pequeña, pero permanente, se ocasiona. La deformación por corte se caracteriza por un movimiento de la mezcla hacia abajo y lateralmente. Con un número dado de repeticiones de carga aparecerá el ahuellamiento. Los pavimentos asfálticos ahuellados tienen una seguridad deficiente porque los surcos que se forman retienen suficiente agua para provocar hidropneumático o acumulación del hielo.

El ahuellamiento de una mezcla débil ocurre típicamente durante el verano, bajo temperaturas altas del pavimento. Si bien esto podría sugerir que es un problema del cemento asfáltico, es más correcto enfocarlo como un problema conjunto de los agregados minerales y del cemento asfáltico.

Una manera de incrementar la resistencia al corte de las mezclas asfálticas es no sólo utilizar cemento asfáltico más duro, sino que se comporte más como un sólido elástico a altas temperaturas del pavimento. Así, cuando se aplique la carga, el cemento asfáltico actuará como una banda de goma y volverá a su posición original en lugar de deformarse.

Otra manera de generar resistencia al corte en las mezclas asfálticas es, seleccionando un agregado que tenga un alto grado de fricción interna, uno que sea cúbico, que tenga una superficie rugosa y pueda desarrollar un grado de contacto partícula a partícula. Cuando se aplica una carga a una mezcla, las partículas de los agregados se juntan de tal manera que actúan más como una sola, larga y elástica piedra. Como en el cemento asfáltico, los agregados actuarán como una banda de goma que volverá a su forma original cuando es descargado. De esta forma, no se acumula una deformación permanente.

2.3.3.2 *Fisuración por fatiga.*

Aunque generalmente una carga simple no genera fisuras en el pavimento, las repeticiones de carga pueden inducir agrietamientos en las capas confinadas. Los esfuerzos cortantes y de tensión, así como las deformaciones en las capas confinadas, causan la formación de microgrietas. Estas microgrietas acumuladas con la repetición de cargas pueden generar macrogrietas visibles. Este proceso es llamado *fatiga*.

Un signo temprano de fisuramiento por fatiga son los rompimientos intermitentes longitudinales en las huellas de las cargas del tránsito. El fisuramiento por fatiga es progresivo, ya que en algún punto los rompimientos iniciales se unen, causando más rompimientos. Al avanzado fisuramiento por fatiga se le conoce como piel de cocodrilo. En casos extremos, se presentan deformaciones cuando parte de la carpeta es desalojada por el tránsito.

El fisuramiento por fatiga es causado por numerosos factores que ocurren en forma simultánea. Entre ellos, las cargas pesadas repetidas; deflexiones delgadas bajo ruedas pesadas de carga; deflexiones altas aunadas a la tensión horizontal en la superficie de la capa de asfalto y mal drenaje, generado por una construcción pobre y un mal diseño del pavimento.

Frecuentemente, el fisuramiento por fatiga es meramente un signo de que el pavimento ha sobrepasado el número de aplicaciones de carga para el cual fue diseñado y en este caso el pavimento sólo necesitará una rehabilitación planificada. Asumiendo que el fisuramiento por fatiga se dé después del tiempo de diseño, debe considerarse una progresión natural de la estrategia de diseño del pavimento. Si el rompimiento ocurre mucho antes de lo esperado, puede ser un signo de que las cargas del tránsito fueron subestimadas. Consecuentemente, los mejores consejos para prevenir el fisuramiento por fatiga son: una estimación adecuada del tránsito para el periodo de diseño, mantener la subrasante seca, utilizar pavimentos más gruesos, utilizar materiales de pavimentación que no sean excesivamente susceptibles a la humedad, y utilizar mezclas asfálticas elásticas que soporten las deflexiones normales.

Las mezclas asfálticas deben tener la suficiente resistencia para soportar la tensión aplicada a la base de la capa de asfalto y ser lo suficientemente elásticas para soportar la aplicación de carga repetida sin romperse. Además, la mezcla asfáltica debe diseñarse para que se comporte como un material elástico cuando se carga a tensión y se sobreponga al rompimiento por fatiga. Esto está acompañado de un límite en las propiedades de dureza del cemento asfáltico, debido a que el comportamiento a tensión de las mezclas asfálticas está fuertemente influenciado por el cemento asfáltico. En efecto, los asfaltos blandos tienen mejores propiedades con respecto al rompimiento por fatiga que los asfaltos duros.

El fisuramiento también puede ocurrir como resultado de una combinación de los siguientes mecanismos:

- Fisuramiento inducido por el tránsito.
- Fisuramiento por temperatura.
- Fisuramiento por reflexión.

- *Fisuramiento inducido por el tránsito.*

Las cargas del tránsito inducen esfuerzos y deformaciones en las capas del pavimento. Dependiendo de la estructura del pavimento y las propiedades de las capas, los esfuerzos de tensión y cortantes y las deformaciones son inducidas en lugares específicos de las capas confinadas. La aplicación repetida de esos esfuerzos y deformaciones, con el paso repetido del tránsito, inducirá fisuramiento por fatiga en esos puntos.

- *Fisuramiento por temperatura.*

Cuando se presentan temperaturas muy bajas en la superficie del pavimento, se provocan esfuerzos de tensión y deformaciones en el pavimento, debido a la contracción térmica. A temperaturas muy bajas, y especialmente debajo el punto de transición de cristalización del asfalto, la relajación de los esfuerzos de tensión inducidos térmicamente ocurren muy despacio. Consecuentemente los esfuerzos de tensión se incrementan cuando el pavimento se enfría, lo cual puede exceder la resistencia del asfalto. En el asfalto, las fisuras podrían aparecer y propagarse con los ciclos climáticos fríos. Estos esfuerzos de tensión inducidos térmicamente pueden también combinarse con esfuerzos de tensión inducidos por el tránsito causando el fisuramiento.

En general, los ligantes asfálticos duros son más propensos a la fisuración por baja temperatura que los blandos. Los ligantes asfálticos excesivamente oxidados, sea por excesiva propensión a la oxidación o por pertenecer a una mezcla con muy alto porcentaje de vacíos, o por ambas causas, son más susceptibles al fisuramiento por baja temperatura. Así, para evitar la fisuración por baja temperatura, los Ingenieros deben usar un ligante blando, un ligante no muy propenso al envejecimiento, y controlar in situ el contenido de vacíos de aire de forma tal que el ligante no resulte excesivamente oxidado.

- *Fisuramiento por reflexión.*

Los fisuramientos por reflexión ocurren si una capa de asfalto yace sobre una capa con grietas o juntas, lo cual permite movimientos horizontales muy grandes debido a variaciones en la temperatura, o cuando no existe o existe muy poca transferencia de carga a través de las grietas o juntas.

Los fisuramientos por reflexión pueden ser causados por deformaciones horizontales controladas por la temperatura de los materiales subyacentes. Estas

deformaciones provocarán esfuerzos de tensión en la capa superior, llevando a grietas de reflexión, con y sin la presencia del tránsito.

Si la transferencia de cargas a través de las fisuras o juntas es baja, resultando en un gran desplazamiento vertical relativo debido a las cargas generadas por el tránsito, provocará esfuerzos cortantes muy altos en la capa de asfalto alrededor del área de las juntas. Si los esfuerzos cortantes son mayores que la resistencia del asfalto o el número de repeticiones de cargas es suficiente para causar fatiga, las grietas aparecerán en la parte superior de la capa de asfalto en la misma posición de las grietas o juntas de la capa subyacente.

2.4 DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

2.4.1 Método Marshall.

El método de Diseño Marshall es uno de los métodos de diseño para mezclas asfálticas en caliente. Los métodos que se basan en ensayos mecánicos como éste, son los más ampliamente usados.

El diseño de las mezclas asfálticas en caliente mediante el Ensayo Marshall abarca las siguientes etapas:

1. Definición de las especificaciones granulométricas y porcentaje de asfalto a utilizar.
2. Caracterización de los agregados.
3. Caracterización del cemento asfáltico.
4. Fabricación de briquetas Marshall.
5. Determinación del Peso Específico Bulk o Densidad Bulk de las probetas.
6. Análisis de Estabilidad y Flujo.
7. Análisis de Densidad y Vacíos.
8. Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico en la mezcla.
9. Criterios de diseño.

Este análisis garantiza que las importantes proporciones volumétricas de los componentes de la mezcla estén dentro de rangos adecuados para asegurar una mezcla asfáltica en caliente durable.

La estabilidad de la mezcla como una medida de su capacidad para resistir las deformaciones plásticas provocadas por cargas impuestas por el paso de los vehículos, es un parámetro importante que se evalúa especialmente cuando la magnitud de la estabilidad de una mezcla asfáltica es controlada con el fin de evitar ahuellamientos, corrimientos y ondulaciones de las capas de rodadura. De manera similar se evalúa por el Método Marshall el flujo como indicativo de la

capacidad de la mezcla para soportar deformación y así adaptarse a asentamientos graduales y movimientos en la base y en la subrasante, sin quebrarse. El concepto de *Estabilidad Marshall* intenta relacionar dicha estabilidad con la fluencia, cuya relación define prácticamente, un módulo de rigidez, además permite determinar el contenido de asfalto óptimo para cada tipo de mezcla, precisar los niveles de estabilidad, flujo, propiedades volumétricas, sensibilidad a la humedad, entre otros criterios para un agregado definido, establecer la densidad y gravedad.

Los criterios para el diseño de mezclas en caliente por el Método Marshall en Colombia se definen en la Tabla 2.

Tabla 2. Criterios para mezclas asfálticas del Método Marshall.

CARACTERÍSTICAS	TRÁNSITO DE DISEÑO (N) Ejes equivalentes de 80 KN.		
	> 5x10 ⁶	5x10 ⁵ - 5x10 ⁶	< 5x10 ⁵
Compactación, golpes/cara	75	75	75
Estabilidad mínima, Kg.	900	750	600
Flujo, mm.	2 - 3.5	2 - 4	2 - 4
Vacíos con aire:			
Capa de rodadura, %	4 - 6	3 - 5	3 - 5
Base asfáltica, %	4 - 8	4 - 8	4 - 8
Vacíos mínimos en agregados minerales:			
Gradación MDC-0, %	14	14	14
Gradación MDC-1, %	14	14	14
Gradación MDC-2, %	15	15	15
Gradación MDC-3, %	16	16	16
Vacíos llenos de asfalto, %	65 - 75	65 - 78	65 - 80

Fuente: Artículo 450. Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras. INVIAS.

2.4.1.1 Propiedades de la mezcla.

Ecuación 1. Peso específico bulk.

$$G_{bulk} = \frac{A}{C - B}$$

Donde: A = Peso de la briqueta seca en el aire, g.

B = Peso de la briqueta sumergida, g.

C = Peso de la briqueta saturada superficialmente seca, g.

Ecuación 2. Peso específico máximo teórico.

$$G_{mt} = \frac{100}{\frac{\% \text{ Agregados}}{G_{\text{Agregados}}} + \frac{\% \text{ Asfalto}}{G_{\text{Asfalto}}}}$$

Ecuación 3. Peso específico máximo medido – Rice.

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

Donde: A = Peso seco, g.

B = Peso del recipiente con agua, g.

C = Peso del recipiente con agua y muestra, g.

2.4.1.2 Análisis de Densidad y Vacíos.

Ecuación 4. Volumen Bulk.

$$V_{bulk} = \frac{100g}{G_{bulk}}$$

Ecuación 5. Volumen máximo medido.

$$V_{mm} = \frac{100g}{G_{mm}}$$

Ecuación 6. Volumen máximo teórico.

$$V_{mt} = \frac{100g}{G_{mt}}$$

Ecuación 7. Volumen de vacíos.

$$V_v = V_{bulk} - V_{mm}$$

Ecuación 8. Volumen de asfalto.

$$V_a = \frac{\% \text{ Asfalto}}{G_{\text{Asfalto}}}$$

Ecuación 9. Volumen de agregados.

$$V_{agr.} = \frac{\% \text{ Agregados}}{G_{\text{Agregados}}}$$

Ecuación 10. Volumen de asfalto absorbido.

$$V_{aa} = V_{mt} - V_{mm}$$

Ecuación 11. Volumen de asfalto efectivo.

$$V_{ae} = V_a - V_{aa}$$

Ecuación 12. Volumen de vacíos en los agregados minerales.

$$V_{am} = V_v + V_{ae}$$

Ecuación 13. Porcentaje de volumen de vacíos.

$$\%V_v = \left(\frac{V_v}{V_{bulk}} \right) * 100$$

Ecuación 14. Porcentaje de volumen de agregados.

$$\%V_{agr.} = \left(\frac{V_{agr.}}{V_{bulk}} \right) * 100$$

Ecuación 15. Porcentaje de volumen de asfalto efectivo.

$$\%V_{ae} = \left(\frac{V_{vae}}{V_{bulk}} \right) * 100$$

Ecuación 16. Porcentaje de agregados minerales.

$$\%V_{am} = 100 - \%V_{agr.}$$

Ecuación 17. Porcentaje de asfalto.

$$\%V_a = \left(\frac{V_a}{V_{bulk}} \right) * 100$$

Ecuación 18. Porcentaje de vacíos llenos de asfalto.

$$\%V_{FA} = \left(\frac{V_{ae}}{V_{am}} \right) * 100$$

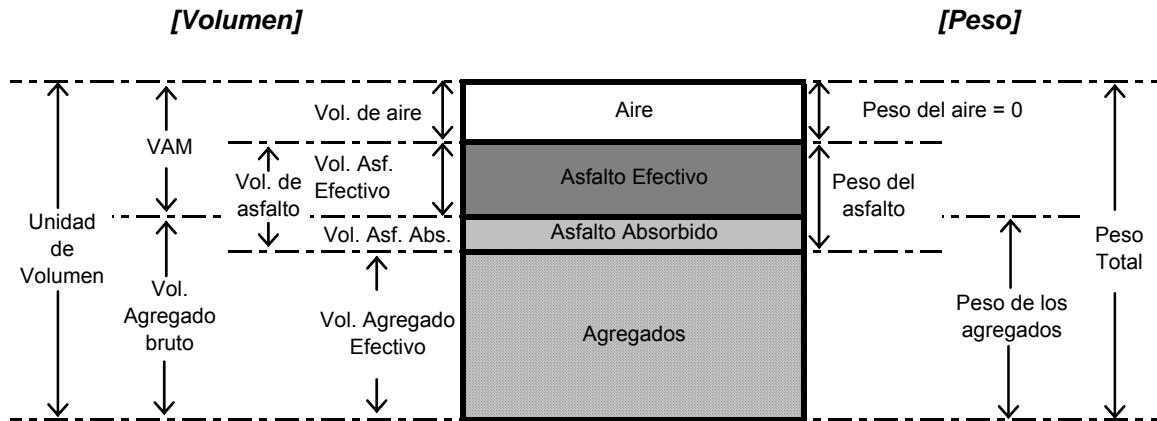
Ecuación 19. Porcentaje en peso de asfalto absorbido respecto al peso de los agregados (%A).

$$\%A = \left(\frac{V_{aa} * G_{asf}}{\%Agr.} \right) * 100$$

Ecuación 20. Porcentaje en peso de asfalto efectivo respecto al peso de la mezcla (%B).

$$\%B = \left(\frac{V_{ae} * G_{asf}}{100} \right) * 100$$

2.4.1.3 Diagrama de fases de una mezcla asfáltica en caliente compactada.



2.4.2 Método Superpave.

Desde octubre de 1987 hasta marzo de 1993, el Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (Strategic Highway Research Program, SHRP) invirtió 50 millones de dólares en una investigación esforzada en el desarrollo de nuevas formas de especificar, ensayar y diseñar materiales asfálticos. El producto final del SHRP es el sistema denominado SUPERPAVE™, que corresponde a la abreviación de “Superior Performing Asphalt Pavements” (Pavimentos asfálticos de desempeño superior). Este representa un sistema mejorado para la especificación de componentes de concreto asfáltico, diseño y análisis de mezcla asfáltica, y predicción del desempeño del pavimento asfáltico⁶.

El nivel 1 de esta metodología incluye cuatro pasos básicos y necesarios para el diseño de la mezcla. Estos son:

- Selección de los materiales (agregado, ligante, modificadores, etc.)
- Selección de la estructura del agregado de diseño
- Selección del contenido de ligante asfáltico de diseño
- Evaluación de la sensibilidad a la humedad de la mezcla diseñada.

Los requisitos necesarios para la selección de los materiales a emplear en la mezcla son el número de ejes simples equivalentes para el carril de diseño, con el cual se categoriza el tránsito y a la vez el nivel de diseño de la mezcla asfáltica, y

⁶ Dr. YILDIRIM, Yetkin. The Superpave Asphalt Research Program. The University of Texas at Austin. 1996.

factores ambientales para el proyecto. A partir de estos, se selecciona el grado de desempeño del ligante asfáltico requeridos para el mismo. La selección se hace en base a la capacidad para satisfacer o superar los criterios establecidos.

Debido al papel importante que juega el agregado mineral en el desempeño de la mezcla se definieron dos tipos de propiedades de los agregados: Propiedades de Consenso y Propiedades de Origen.

Las primeras son aquellas consideradas por los investigadores de SHRP críticas para alcanzar un desempeño alto de la mezcla por lo que se debe aplicar a la combinación de los agregados antes que al individual. Los criterios de satisfacción dependen del nivel de tránsito y de la posición en el paquete estructural del pavimento. Las propiedades de consenso son:

- Angularidad del agregado grueso
- Angularidad del agregado fino
- Partículas alargadas y chatas
- Contenido de arcilla

Buscando con las dos primeras lograr una mezcla con alto grado de fricción interna y así, una alta resistencia al corte y por ende una resistencia al ahuellamiento. Limitando las partículas alargadas se asegura que los agregados de la mezcla serán menos susceptibles a fractura durante el manipuleo, construcción y bajo tránsito. Y la limitación de la cantidad de arcilla en el agregado se fortalece la unión entre el ligante asfáltico y el agregado.

Las propiedades de origen del agregado son aquellas utilizadas frecuentemente para calificar las fuentes locales de los agregados. Estas propiedades son:

- Tenacidad
- Durabilidad
- Materiales deletéreos

La tenacidad se mide con el ensayo abrasión en la Máquina de Los Ángeles. La durabilidad se mide con el ensayo de durabilidad por acción del sulfato de sodio o magnesio. La presencia de materiales deletéreos se mide con el ensayo de determinación de terrones de arcilla y el de partículas friables.

El siguiente paso necesario es la selección de la estructura del agregado. Para lo cual Superpave propone dependiendo del tamaño máximo nominal del agregado en la mezcla una especificación de granulometría donde la gradación propuesta debe contenerse en unos puntos de control además de evitar la zona restringida. La zona restringida se hace con el propósito de evitar mezclas con alta proporción de arenas finas en relacional total de la arena, y para evitar gradaciones que sigan

la línea del exponente 0.45, las cuales normalmente carecen de una adecuada cantidad de vacíos del agregado mineral, VAM.

Para seleccionar la estructura del agregado de diseño, el diseñador calcula la granulometría de las mezclas de prueba por medio de combinaciones matemáticas de las granulometrías individuales de los materiales. La granulometría de la mezcla es luego comparada con los requerimientos de la especificación para los tamices correspondientes. Cualquier granulometría propuesta para la mezcla debe pasar entre los puntos de control sobre los cuatro tamices, y por fuera de la zona restringida.

En un diseño convencional se deben proponer en el paso de la selección de la estructura del agregado por lo menos tres gradaciones que cumplan con la especificación de granulometría Superpave para el tamaño máximo nominal del agregado en uso. Y luego de tener las gradaciones ya combinadas igualmente se someten al proceso de evaluación de las propiedades de consenso y se calculan los pesos específicos bruto, G_{sb} , y aparente, G_{sa} . Una vez aceptadas las tres combinaciones de material pétreo se procede a evaluar las mezclas de prueba mediante la compactación de especímenes y la determinación de las propiedades volumétricas de cada una de ellas. Para cada mezcla, se compacta un mínimo de dos especímenes con el compactador giratorio. El contenido de ligante asfáltico de prueba se determina para cada mezcla de prueba estimando el peso específico efectivo de la mezcla y empleando los cálculos que se muestran a continuación. La gravedad específica efectiva, G_{se} , de la mezcla se estima con:

Ecuación 21. Gravedad específica de la mezcla.

$$G_{se} = G_{sb} + 0.8 (G_{sa} - G_{sb})$$

El factor 0.8 puede ser ajustado a discreción del diseñador. Los agregados absorbentes pueden requerir valores cercanos a 0.5 ó 0.6.

El volumen de ligante asfáltico absorbido, V_{ba} , en el agregado se estima con:

Ecuación 22. Volumen de ligante asfáltico absorbido.

$$V_{ba} = \frac{P_s (1 - V_a)}{\left(\frac{P_b}{G_b} + \frac{P_s}{G_{se}} \right)} * \left(\frac{1}{G_{sb}} - \frac{1}{G_{se}} \right)$$

- Donde:*
- V_{ba} = volumen absorbido delirante, $\text{cm}^3 / \text{cm}^3$ de mezcla
 - P_b = porcentaje de ligante supuesto del 0.05
 - P_s = porcentaje de agregado supuesto 0.95
 - G_b = gravedad específica del ligante
 - V_a = volumen de vacíos de aire, $0.04 \text{ cm}^3 / \text{cm}^3$

El volumen de ligante efectivo, V_{be} , puede determinarse a partir de la ecuación:

Ecuación 23. Volumen de ligante asfáltico efectivo.

$$V_{be} = 0.081 - 0.02931 * [\text{Ln}(\text{Sn})]$$

Donde: Sn es el tamaño del tamiz máximo nominal de la mezcla de agregados en pulgadas.

Y por ultimo se calcula el contenido de prueba inicial del ligante asfáltico con:

Ecuación 24. Porcentaje de prueba inicial de ligante asfáltico.

$$P_{bi} = \frac{G_b(V_{be} + V_{ba})}{G_b(V_{be} + V_{ba}) + W_s} * 100$$

Donde: Pbi = porcentaje del ligante en peso de la mezcla.

Ws = peso de los agregados en gramos.

Ecuación 25. Peso de los agregados, en la mezcla.

$$W_s = \frac{[P_s(I - V_a)]}{\left[\frac{P_b}{G_b} + \frac{P_s}{G_{se}} \right]}$$

Luego se compactan los especímenes por cada mezcla de prueba con su respectiva gradación y porcentaje de bitumen inicial calculado. Se sustrae material de la mezcla para realizar el ensayo de GMM. Los especímenes se preparan y compactan con sus respectivas temperaturas calculadas con el ensayo del viscosímetro rotacional. Una actividad previa a la compactación es un envejecimiento a 135°C durante cuatro horas. Para dar inicio a la compactación se deben haber seleccionado el número de giros inicial, de diseño y máximo de acuerdo a lo propuesto por Superpave en función de la temperatura alta del aire para diseño y el nivel de tránsito.

Usualmente se relacionan de la siguiente manera:

Ecuación 26. Relaciones entre los giros inicial, de diseño y máximo.

$$\text{Log}_{10}(N_{inicial}) = 0.45 * \text{Log}_{10}(N_{diseño})$$

$$\text{Log}_{10}(N_{maximo}) = 1.10 * \text{Log}_{10}(N_{diseño})$$

Cada espécimen se compactara con el máximo número de giros. Durante el proceso de compactación queda registrada la altura. Conociendo el peso de la muestra, el diámetro del molde y la medida de la altura para cualquier giro, la gravedad específica del espécimen puede ser estimada, $G_{mb}(\text{est})$, para cualquier número de giros durante la compactación. La briqueta se deja enfriar y se

desmolda para después determinar la gravedad específica bruta, $G_{mb}(\text{med})$. Surge una diferencia entre el $G_{mb}(\text{med})$ y la $G_{mb}(\text{est})$ para el número de giros máximo que se debe a que durante la compactación la gravedad específica bruta consideró el espécimen como un cilindro liso, lo cual no es real. Por lo que se debe calcular un factor de corrección como se muestra a continuación:

Ecuación 27. Factor de corrección para el G_{mb} .

$$FC = \frac{G_{mb}(\text{medido})}{G_{mb}(\text{est. } N_{\text{max}})}$$

Con lo que se corrige el valor de G_{mb} (est). El último paso es calcular el porcentaje de compactación, $\%G_{mm}$, para cada mezcla de prueba, así:

Ecuación 28. Porcentaje de compactación de la mezcla de prueba.

$$\%G_{mm} = \frac{G_{mb}(\text{corregido})}{G_{mm}}$$

Este porcentaje de compactación se determina para el número de giros inicial, de diseño y máximo principalmente, ya que debe cumplir ciertos requerimientos dados por esta metodología. Se procede a calcular el porcentaje de vacíos de aire, V_a , y vacíos en el agregado mineral, VAM.

Ecuación 29. Porcentaje de vacíos con aire.

$$\%V_a = 100 - \%G_{mm} N_{\text{diseño}}$$

Ecuación 30. Porcentaje de vacíos en el agregado mineral.

$$\%V_{AM} = \frac{100 - (\%G_{mm} N_{\text{diseño}} * G_{mm} * P_s)}{G_{sb}}$$

La consigna de este paso es encontrar la gradación que me proporcione un valor de 4% vacíos al número de giros de diseño y que además cumpla todos los requisitos exigidos. El siguiente cálculo es el del contenido de ligante asfáltico estimado para alcanzar ese 4% de vacíos de aire, así:

Ecuación 31. Porcentaje de asfalto estimado.

$$P_{b,\text{estimado}} = P_{bi} - [0.4 * (4 - V_a)]$$

Para saber, aproximadamente, cuales son las propiedades de la mezcla de prueba si se utilizara la cantidad de ligante que permite alcanzar el 4% de vacíos de aire para N_{diseño}, se procede de la siguiente manera:

Ecuación 32. Propiedades estimadas para la proporción de vacíos ideal (4%).

$$\begin{aligned} \%VAM_{estimado} &= \%VAM_{inicial} + C * (4 - V_a) \\ \%VFA_{estimado} &= 100\% * \left[\frac{(\%VAM_{estimado} - 4)}{\%VAM_{estimado}} \right] \\ \%GMM_{estimado} &= \%Gmm_{prueba} - (4 - V_a) \end{aligned}$$

Donde C es una constante que depende del valor medido de V_a. El valor de %GMM estimado se calcula para el N_{inicial} y el N_{max}. Estos valores de las propiedades volumétricas estimadas de la mezcla asfáltica son comparados con los criterios especificados con la metodología Superpave y el diseñador luego de analizar los datos de las mezclas de prueba seleccionará la estructura de agregado de diseño apropiada. Una vez seleccionada se compactaran especímenes con diferente contenido de ligante asfáltico a partir del P_b, estimado de la gradación aprobada de la siguiente forma:

- Contenido estimado del ligante
- Contenido estimado del ligante ± 0.5%
- Contenido estimado del ligante +1.0%

Las propiedades de la mezcla son luego evaluadas para determinar el contenido de ligante asfáltico óptimo.

2.4.2.1. Compactación Giratoria SUPERPAVE.

En la selección de un método de compactación en el laboratorio, los investigadores de SHRP se plantearon varias metas. La más importante fue diseñar un equipo que pudiera compactar en forma realista los especímenes de mezcla a la densidad alcanzada bajo las condiciones de clima y carga del pavimento. Se necesitaba un dispositivo capaz de compactar mezclas con grandes agregados. Además, se deseaba que brindara una medida de la compactibilidad de modo poder identificar el comportamiento de una potencial mezcla blanda (tender mixture) y otros problemas similares de compactación. Una prioridad esencial de los investigadores de SHRP era lograr un dispositivo apropiado para el control y la verificación de calidad. Ningún compactador en uso corriente satisfacía todos estos objetivos.

Consecuentemente, un nuevo compactador fue desarrollado, el Compactador Giratorio Superpave (SGC - Superpave Gyrotory Compactor).

La base para el SGC fue el compactador giratorio de Texas modificado para aplicar los principios de compactación del compactador giratorio francés. El dispositivo de Texas cumplió los objetivos de densificación realista de los especímenes y era razonablemente portátil. Los moldes de 6 pulgadas de diámetro (finalmente de 150 mm en el SGC) pudieron acomodar mezclas con agregado de un tamaño máximo de hasta 50 mm (37.5 nominal). Los investigadores de SHRP modificaron el dispositivo de Texas reduciendo el ángulo y la velocidad de giro y adicionando un registro en tiempo real de altura. De hecho, buena parte de esta fase de investigación de la mezcla fue realizada sobre una modificación del compactador giratorio de Texas, prestado a SHRP por el Departamento de Transporte de Texas.

- ***Equipo de ensayo.***

El SGC es un dispositivo mecánico que comprende los siguientes sistemas de componentes:

- Un pórtico de reacción, una base rotatoria, y un motor,
- Un sistema de carga, un pistón de carga, y un medidor de presión,
- Un sistema de medida y un registro de altura, y
- Un molde y plato base.

El pórtico de reacción provee una estructura no flexible contra la cual el pistón de carga empuja cuando se compactan los especímenes. La base del SGC rota y esta fijada al pórtico de carga; soporta al molde durante la compactación. Cojinetes reactivos son usados para posicionar el molde a un ángulo de 1.25° (ángulo de compactación del SGC). El motor eléctrico acciona la base rotatoria a una velocidad constante de 30 revoluciones por minuto.

Un sistema mecánico o hidráulico aplica cargas al pistón de carga, el cual somete al espécimen a una presión de compactación de 600 kPa. El diámetro de pistón de carga coincide nominalmente con el diámetro interno del molde (de 150 mm). Un medidor de presión con una señal digital mide la presión durante la compactación. A medida que el espécimen se densifica durante la compactación, el medidor de presión indica al sistema de carga que debe ajustar la posición al pistón de carga de modo que la presión de compactación sea constante durante todo el proceso.

La medición de la altura del espécimen es una importante función del SGC. Conociendo el peso del material contenido en el molde, el diámetro del molde, y altura del espécimen, puede estimarse la gravedad específica del espécimen en todo momento durante el proceso de compactación. La gravedad específica del espécimen es obtenida dividiendo el peso por el volumen del mismo. El volumen del espécimen se calcula como el volumen de un cilindro de superficie lateral lisa

con un diámetro de 150 mm y la altura medida. El registro de la altura se efectúa continuamente, midiendo la posición del pistón antes y durante el ensayo. El cambio vertical en la posición del pistón acompaña al cambio de altura en el espécimen. La señal de altura del espécimen es procesada a través de una conexión de puerto serial vinculada a una computadora personal, una impresora u otro dispositivo que registre la medición de la altura (e indirectamente la densidad) durante el proceso de compactación. Por este método, una función característica de la compactación es desarrollada a medida que el espécimen es compactado.

El SGC usa un molde con un diámetro interno de 150 mm y una altura nominal de 250 mm. Un plato de base se ajusta en el fondo del molde para lograr el confinamiento durante la compactación.

- ***Preparación del espécimen.***

Para la compactación de los especímenes se requiere mezclar y compactar los materiales bajo condiciones de equiviscocidad correspondientes a 0.280 Pa.s y 0.170 Pa.s, respectivamente. El mezclado se efectúa por medio de una mezcladora mecánica. Tras el mezclado, el material es sometido a 4 horas de envejecimiento a corto plazo en un horno de corriente forzada, manteniendo una temperatura de 135°. Durante el envejecimiento a corto plazo, la mezcla suelta debe desparramarse en un espesor tal que resulte de 21 a 22 Kg. por metro cúbico y debe ser revuelto cada hora para asegurar un envejecimiento uniforme. Los moldes de compactación y los platos de base deberían también colocarse en el horno a 135°, por lo menos entre 30 y 40 minutos antes de su uso.

Tres medidas de especímenes son usadas. Si solo se hace la determinación volumétrica, con aproximadamente 4500 g de agregado se podrá elaborar un espécimen de 150 mm de diámetro por aproximadamente 115 mm de altura. En este caso, el espécimen se ensaya sin cortar. Alternativamente, para ensayos de performance se emplean aproximadamente 5500 g de agregado, elaborando un espécimen de 150 mm de diámetro y 135 mm de altura. En este caso, los especímenes serán cortados a 50 mm de altura antes de someterse a los ensayos de SST o IDT. Por lo menos una muestra suelta deberá reservarse para obtenerse la gravedad específica teórica máxima usando la norma AASHTO T 209. Para ejecutar la norma AASHTO T 283, los especímenes son elaborados con una altura de 95 mm, lo cual requiere aproximadamente 3500 g de agregado.

2.4.2.2. Susceptibilidad de la mezcla a la humedad – Ensayo TSR⁷.

El objeto de este ensayo es determinar la susceptibilidad de la mezcla asfáltica a la humedad, mediante la relación de la resistencia a la tracción de un grupo de

⁷ Tensile Strength Ratio (TSR).

briquetas sometidas a humedad respecto a otro grupo seco. Además, este ensayo permite evidenciar problemas de adherencia (Stripping) en la mezcla, lo que conduce a tomar los correctivos necesarios al respecto.

El número mínimo de especímenes a ensayar es de 6, que se subdividen en 3 para ensayar en seco y los 3 restantes se ensayan después de saturación parcial y condición húmeda. Las dimensiones⁸ de los especímenes son: 100 mm (4") de diámetro y 63.5 mm (2.5") de altura.

Los especímenes deben compactarse a $7 \pm 1\%$ de vacíos de aire, o en su defecto, al % de vacíos esperado en campo a la hora de la construcción. Una vez compactados, los especímenes se dejan enfriar a temperatura ambiente y se ensayan dentro de las 24 horas siguientes. Se debe determinar además, el peso específico máximo teórico (Gmm), el peso específico bulk (Gbulk), y se debe chequear la altura de cada uno de los especímenes, así como el contenido de vacíos de aire.

Ecuación 33. Volumen de aire – Ensayo TSR.

$$\text{Volumen de aire} = \text{Volumen del espécimen} \cdot (\% \text{ vacíos de aire})$$

El criterio a seguir para dividir los especímenes en los grupos seco y húmedo, es que el promedio del % de vacíos de cada grupo sea aproximadamente igual.

El grupo seco se guarda a temperatura ambiente hasta que se vaya a ensayar, mientras que los especímenes del grupo húmedo se someten a saturación parcial con agua destilada a temperatura ambiente mediante una cámara de vacío⁹. El grado de saturación a alcanzar es de entre 55 y 80%, para lo cual se requiere usualmente un vacío parcial de 70 kPa ó 525 mmHg, durante unos 5 minutos.

Se procede entonces a determinar el volumen de agua absorbida como sigue:

Ecuación 34. Volumen de agua absorbida – Ensayo TSR.

$$\text{Volumen agua absorbida} = \frac{\text{Peso espécimen sss} - \text{Peso seco en el aire}}{\gamma \text{ agua}}$$

Luego se determina el nivel de saturación¹⁰, de la siguiente forma:

Ecuación 35. Porcentaje de saturación del espécimen – Ensayo TSR.

⁸ Nota: cuando el tamaño máximo del agregado es > 25mm (1"), se usan especímenes de 150 mm (6") de diámetro.

⁹ Nota 1: Cuando se dificulta alcanzar el mínimo grado de saturación (55%), se utiliza agua a 60°C.

¹⁰ Nota 2: Para un promedio de vacíos de aire del grupo saturado, menor del 6.5%, se recomienda un grado de saturación de 70% mínimo.

$$\% \text{ Saturación} = \frac{\text{Volumen agua absorbida}}{\text{Volumen de vacíos de aire}}$$

Conociendo este valor se chequea si:

- % Saturación = 55 % – 80 %, se continua con el ensayo.
- % Saturación < 55 %, se repite el procedimiento usando un vacío parcial ligeramente mayor.
- % Saturación > 80 %, el espécimen debe descartarse.

Los especímenes saturados se someten a humedad por inmersión en agua destilada a 60 ± 1.0 °C durante 24 horas, tiempo después del cual se sumergen en un baño de agua a 25 ± 1.0 °C hasta normalizar temperatura.

Finalizado este periodo, se mide la altura de los especímenes del grupo húmedo y se determina su volumen, para calcular los siguientes parámetros:

- % Saturación de los especímenes. Se aceptan valores > 80%.
- La hinchazón de los especímenes parcialmente saturados:

Ecuación 36. Hinchazón de los especímenes parcialmente saturados – Ensayo TSR.

$$\text{Hinchazón} = \frac{(\text{Vol. esp. parcialmente saturado} - \text{Vol. espécimen})}{\text{Vol. espécimen}}$$

- La hinchazón de los especímenes sometidos a humedad:

Ecuación 37. Hinchazón de los especímenes sometidos a humedad – Ensayo TSR.

$$\text{Hinchazón} = \frac{(\text{Vol. esp. húmedo} - \text{Vol. espécimen})}{\text{Vol. espécimen}}$$

Paralelamente, se ajusta la temperatura del grupo seco por remojo en un baño de agua a 25 ± 1.0 °C durante 20 minutos.

Una vez acondicionados los especímenes como se describió anteriormente, se procede a fallarlos por compresión diametral, aplicando una carga vertical diametral a 50 mm/min., hasta la máxima carga. Además, se permite un periodo de carga mayor, lo suficiente como para fallar el espécimen y romperlo para estimar visualmente el grado aproximado de daño por humedad, si lo hay.

- *Resistencia a la tensión, St.*

Ecuación 38. Resistencia a la tensión - Ensayo TSR.

$$St = \frac{2000 \cdot (P)}{\pi \cdot t \cdot D}$$

Donde: P = Carga máxima, N (lbf).

t = Altura del espécimen, mm (pulg).
D = Diámetro del espécimen, mm (pulg).

- *Relación de Resistencia a la Tensión, TSR.*

Ecuación 39. Relación de resistencia a la tensión, TSR.

$$\% TSR = \left(\frac{St_m}{St_d} \right) \cdot 100$$

Donde:

St_m = Resistencia promedio a la tensión del grupo húmedo, kPa (psi).
St_d = Resistencia promedio a la tensión del grupo seco, kPa (psi).

2.4.2.3. *Ensayo de tracción indirecta para determinación de Módulos Dinámicos.*

El ensayo de tracción indirecta¹¹ sobre especímenes cilíndricos es el más usado para la determinación del módulo dinámico de la mezcla asfáltica sobre briquetas elaboradas en laboratorio o de núcleos extraídos en campo.

Este ensayo permite determinar el módulo de rigidez bajo unas condiciones de ensayo determinadas, las cuales se escogen de acuerdo a las características de operación a la cual estará expuesta la mezcla asfáltica durante su periodo de servicio.

Las dimensiones de los especímenes a ensayar se escogen de acuerdo al tamaño máximo nominal del agregado. De cualquier forma el espesor debe limitarse entre 30 y 75 mm, y además, el diámetro de los especímenes suele ser de 80, 100, 120, 150 ó 200 mm, de acuerdo con el mismo criterio. Usualmente se ensayan 3 especímenes representativos de la mezcla a analizar.

La carga debe tener forma de onda o similar. El rango de carga recomendado es de 100 ms (2 Hz), y deberá encontrarse entre 50 y 150 ms. El tiempo de incremento de la carga es de 124 ± 4 ms, y el periodo de repetición del pulso es de 3.0 ± 1.0 s.

Durante el ensayo, inicialmente se aplica una carga de acondicionamiento al espécimen, mínimo 10 pulsos. Una vez aplicada tal precarga, se procede a aplicar un total de 5 pulsos, para cada uno de los cuales se mide la variación de carga aplicada y la deformación diametral horizontal determinando el factor de área de carga.

El factor de área de carga debe estar entre 0.5 y 0.7 para que los resultados puedan ser validados. De la misma manera, si la deformación diametral horizontal

¹¹ Indirect Tensile Test on cylindrical specimens (IT-CY). Annex C – PrEN 12697-26-2003.

es menor de 3 μm , o mayor de 20 μm ; o la temperatura o el método de ensayo son inadecuados.

Además, si el esfuerzo vertical es menor de 0.5 KN, o la temperatura o el método de ensayo son inadecuados.

- *Cálculo del módulo de rigidez medido.*

Usando las medidas de los 5 pulsos de carga, para cada uno se calcula el módulo así:

Ecuación 40. Módulo de rigidez medido, S_m .

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

Donde:

- S_m = Módulo de rigidez medido, MPa.
- F = Valor pico de la carga vertical aplicada, N.
- z = Amplitud de la deformación horizontal, mm.
- h = Espesor promedio del espécimen, mm.
- v = Relación de Poisson.

Si la relación de Poisson no se determina, se recomienda un valor de $v = 0.35$.

- *Ajuste del módulo de rigidez medido.*

Se debe ajustar el módulo de rigidez medido a un factor de área de carga de 0.60, para lo cual se emplea la siguiente expresión:

Ecuación 41. Módulo de rigidez ajustado, S'_m .

$$S'_m = S_m \cdot [1 - 0,322 \cdot \text{Log}(S_m) - 1,82] \cdot (0,60 - k)$$

Donde:

- S'_m = Módulo de rigidez ajustado, MPa.
- k = Factor de área de carga medido.
- S_m = Módulo de rigidez medido, MPa.

Finalmente, se rota cada espécimen $90 \pm 10^\circ$, se ubica y se repite el ensayo. Luego se calcula el valor medio del Módulo de Rigidez, que debe estar entre +10% y -20% del valor medio registrado en el primer ensayo.

2.4.2.4. Resistencia a la Fatiga por Tracción Indirecta (fatiga a esfuerzo controlado).

El ensayo de resistencia a la fatiga por tracción indirecta¹², permite determinar la vida útil de una mezcla asfáltica en términos del número de aplicaciones de carga, bajo ciertas condiciones normalizadas de aplicación de la misma.

Para éste ensayo se fabrica de 10 a 18 especímenes con una antelación al ensayo de 1 semana como mínimo. En cuanto a las dimensiones de los especímenes se utiliza una de las siguientes configuraciones:

- Para TM = 25 mm (1"): Espesor \geq 40 mm., diámetro = 100 ± 3 mm.
- Para TM = 38 mm (1 $\frac{1}{2}$ "): Espesor \geq 60 mm., diámetro = 150 ± 3 mm.

Las condiciones de ensayo son variables, dependiendo de las condiciones particulares del proyecto, pero se tienen los siguientes rangos para el ensayo:

- Rango de carga mínimo: 0.5 – 10.0 kN,
- Rango de medida del desplazamiento \geq 3.75 μ m, con una precisión mínima de 1 μ m.
- Temperatura de ensayo entre 2 y 20 °C, con precisión mínima de \pm 1 °C.
- Frecuencia mínima de 10 Hz.

Previamente al ensayo, se acondicionan los especímenes a la temperatura de ensayo dentro de una cámara termostática (puede ser la misma del NAT¹³), durante un mínimo de 4 horas.

El ensayo cubre un rango de deformación de entre 100 μ ϵ y 400 μ ϵ , y una vida de fatiga del material ensayado entre 10^3 y 10^6 aplicaciones.

Los especímenes deben ser ensayados para mínimo 3 niveles de esfuerzo, con un mínimo de 3 especímenes por cada nivel cuando son briquetas fabricadas en laboratorio, ó mínimo 5 especímenes cuando son núcleos extraídos en campo.

Una vez acondicionada la temperatura, se ubica cada espécimen en el dispositivo de carga del NAT y se inicia el ensayo con una amplitud de carga de 250 kPa. Además, la carga debe ser senoidal repetida con tiempos de aplicación de 0.1 segundos y tiempos de reposo de 0.4 segundos. De esta forma, si la deformación mostrada en el monitor durante las 10 primeras aplicaciones está fuera del rango de deformación de 100 a 400 μ ϵ , el ensayo debe detenerse inmediatamente y el nivel de carga debe ser ajustado.

Durante el ensayo se monitorea y registra continuamente la carga y deformación horizontal a intervalos preseleccionados hasta cuando el rompimiento es obvio.

¹² PrEN 12697-24, Annex E: Indirect Tensile Test on cylindrical shaped specimens.

¹³ NAT, Nottingham Asphalt Tester.

Para cada espécimen ensayado se determina la *vida de fractura* como el número total de aplicaciones de carga que causan la fractura completa del espécimen. Ésta es la relación entre el logaritmo del número de aplicaciones de carga y la deformación horizontal total.

- *Esfuerzo de tracción en el centro del espécimen, σ_0 .*

Ecuación 42. Esfuerzo de tracción – Ensayo Deformación Permanente.

$$\sigma_0 = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot t \cdot \Omega}$$

Donde:

- σ_0 = Esfuerzo de tracción, MPa.
- P = Carga máxima, N.
- t = Espesor del espécimen, mm.
- Ω = Diámetro del espécimen, mm.

- *Deformación por tracción en el centro del espécimen, ε_0 .*

Ecuación 43. Deformación por tracción – Ensayo Deformación Permanente.

$$\varepsilon_0 = \frac{2 \cdot \Delta H}{\Omega} \cdot \left(\frac{1 + 3 \cdot \mu}{4 + \pi \cdot \mu + \pi} \right)$$

Donde:

- ε_0 = Deformación por tracción, $\mu\varepsilon$.
- ΔH = Deformación horizontal, mm.
- μ = Relación de Poisson.

Si $\mu = 0.35$, entonces la Ecuación 43 se reduce a:

Ecuación 44. Deformación por tracción, para $\mu = 0.35$

$$\varepsilon_0 = 2,1 \cdot \left(\frac{\Delta H}{\Omega} \right)$$

El valor de deformación inicial es calculado como la diferencia entre el promedio de las deformaciones horizontales totales de 5 aplicaciones de carga (recomendado: 98^a – 102^a) y el promedio de las deformaciones horizontales mínimas de 5 aplicaciones de carga (60^a – 64^a).

- *Criterio de Fatiga.*

$$\text{Log}(N_f) = k + n \cdot \text{Log}(\varepsilon_o)$$

Ecuación 45. Número de aplicaciones requeridas para la fatiga del material.

$$N_f = k \cdot \left(\frac{I}{\varepsilon_o} \right)^n$$

Donde:

- N_f = Número de aplicación de cargas.
- k, n = constantes del material.

2.4.2.5. *Deformación Permanente.*

La prueba es útil para identificar el potencial de ahuellamiento de una mezcla asfáltica, teniendo en cuenta los siguientes criterios:

1. Si el porcentaje de deformación axial (relación entre la deformación vertical final y el espesor inicial) es menor que 1%, la mezcla asfáltica no es susceptible al ahuellamiento.
2. La mezcla podrá ser ahuellable si esta deformación axial se encuentra entre el 1% y el 2%.
3. La mezcla es ahuellable cuando esta deformación supera el 2%.

Las condiciones normales del ensayo son:

- Temperatura de ensayo = 40°C,
- Carga de ensayo = 100 kPa,
- Carga de acondicionamiento = 10% de la carga de ensayo = 10 kPa,
- Número de ciclos de carga = 3600,
- Número de ciclos de reposo = 900 al finalizar los 3600 ciclos de carga.

La aplicación de la carga consiste en 3600 ciclos, en donde cada ciclo consta de 1 segundo de carga y 1 segundo de reposo; por lo que este periodo dura 2 horas.

En cuanto a las dimensiones de los especímenes de ensayo, se manejan 2 configuraciones:

- Para TMN ≤ 20 mm: diámetro de 100 mm, altura de 60 mm.
- Para TMN > 20 mm: diámetro de 150 mm, altura variable.

2.5 DURABILIDAD DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS PREPARADAS CON LIGANTES MODIFICADOS CON POLÍMEROS

En función de no contar con experiencias muy válidas en cuanto a la durabilidad de mezclas bituminosas modificadas con polímeros, se hacen necesarios implementar métodos de laboratorio para evaluar el comportamiento a corto y largo plazo de envejecimiento.

Como métodos de envejecimiento de las mezclas en laboratorio a corto y largo plazo se emplean los métodos desarrollados por SHRP (Strategic Highway Research Program).

Hay muy poca información de la degradación que sufren los polímeros componentes de los asfaltos durante su funcionamiento en servicio. En general los ensayos que se realizan para determinar la alteración que sufren los AMP (Asfaltos Modificados con Polímeros) recuperados del pavimento son muy complicados por el hecho de que el calentamiento de la mezcla y posterior disolución con solvente para obtener la muestra para luego ser ensayada, puede afectar las propiedades de ciertos polímeros y alterar los resultados.

Como es bien conocido el envejecimiento o endurecimiento de los asfaltos ocurre durante los procesos de mezclado y colocación de las mezclas (envejecimiento a corto plazo) y durante su vida de servicio en el pavimento (envejecimiento a largo plazo).

- ✓ Para simular el envejecimiento a corto plazo se usan los ensayos TFOT y RTFOT.

El ensayo de Película Delgada en Horno Rotatorio, AASHTO T240, ASTM D2872, fue desarrollado por el departamento de carreteras de California para simular el envejecimiento que ocurre en las plantas durante la elaboración de mezclas de concreto asfáltico en caliente.

El RTFOT es usado por su repetibilidad y porque expone continuamente el ligante al calor y flujo de aire. Su acción rotatoria mantiene en algunos casos los modificadores (como polímeros) dispersos en el asfalto. Otra ventaja del RTFOT es que insume solo 85 minutos.

Un esquema del equipo se muestra en la figura-11. No se selecciono el ensayo de película delgada en horno (AASHTO T179 o ASTM D1754) porque algunos asfaltos modificados forman una capa superficial que obstruye el envejecimiento durante el ensayo; otra desventaja de este ensayo es que su ejecución insume cinco horas.

Este ensayo cubre dos propósitos. Uno es producir un asfalto oxidado que pueda emplearse para ensayos adicionales (DSR y material base para PAV). El otro es determinar la cantidad de volátiles que pierde el asfalto durante el ensayo. La cantidad de volátiles perdidos es indicadora del envejecimiento que puede ocurrir durante el proceso de mezclado y construcción. Algunos asfaltos pueden ganar peso durante el RTFO debido a productos de oxidación que se forman durante el ensayo.

- ✓ Para simular el envejecimiento en servicio, SHRP ha adoptado el envejecimiento PAV.

El envejecimiento de los asfaltos en largos periodos de servicio no era considerado en las especificaciones anteriores a SUPERPAVE. El equipo, usado por muchos años en investigación, fue modificado por los investigadores de SHRP y se desarrollo un nuevo procedimiento para evaluar el envejecimiento en largos periodos de servicio. El equipo (PAV) usa presión y temperatura para reducir el tiempo de ensayo; así un largo periodo de envejecimiento puede ser simulado en solo 20 horas. Los ligantes asfálticos, después del envejecimiento en el RTFO, son colocadas en el PAV y envejecidos por 20 horas. Las propiedades físicas son medidas, como se indico antes, para determinar si el asfalto se comportara adecuadamente luego de varios años de servicio. El ensayo se realiza a distintas temperaturas dependiendo del clima en que el pavimento será construido (N. de la T: 90°C, 100°C, 110°C).

En el caso de las mezclas asfálticas el SHRP ha propuesto para el envejecimiento a corto plazo el ensayo STOA y para el largo plazo el LTOA.

Se han realizado tales ensayos sobre muestras de ligante y mezclas bituminosas modificadas con polímeros llegando a la conclusión que los AMP, tienen un índice de envejecimiento más bajo que los convencionales.

2.5.1 Ventajas.

- Disminuye la susceptibilidad térmica
 - Se obtienen mezclas más rígidas a altas temperaturas de servicio reduciendo el ahuellamiento.
 - Se obtienen mezclas más flexibles a bajas temperaturas de servicio reduciendo el fisuramiento.
- Disminuye la exudación del asfalto: por la mayor viscosidad de la mezcla, su menor tendencia a fluir y su mayor elasticidad.
- Mayor elasticidad: debido a los polímeros de cadenas largas.
- Mayor adherencia: debido a los polímeros de cadenas cortas.
- Mayor cohesión: el polímero refuerza la cohesión de la mezcla.

- Mejora la trabajabilidad y la compactación: por la acción lubricante del polímero o de los aditivos incorporados para el mezclado.
- Mejor impermeabilización: en los sellados bituminosos, pues absorbe mejor los esfuerzos tangenciales, evitando la propagación de las fisuras.
- Mayor resistencia al envejecimiento: mantiene las propiedades del ligante, pues los sitios más activos del asfalto son ocupados por el polímero.
- Mayor durabilidad: los ensayos de envejecimiento acelerado en laboratorio, demuestran su excelente resistencia al cambio de sus propiedades características.
- Mejora la vida útil de las mezclas: menos trabajos de conservación.
- Fácilmente disponible en el mercado.
- Permiten mayor espesor de la película de asfalto sobre el agregado.
- Mayor resistencia al derrame de combustibles.
- Reduce el costo de mantenimiento.
- Disminuye el nivel de ruidos: sobre todo en mezclas abiertas.
- Aumenta el módulo de la mezcla.
- Permite la reducción de hasta el 20% de los espesores por su mayor módulo.
- Mayor resistencia a la flexión en la cara inferior de las capas de mezclas asfálticas.
- Permite un mejor sellado de las fisuras.
- Buenas condiciones de almacenamiento a temperaturas moderadas.
- No requieren equipos especiales.

2.5.2 Desventajas.

- Alto costo del polímero.
- Dificultades del mezclado: no todos los polímeros son compatibles con el asfalto base (existen aditivos correctores).
- Deben extremarse los cuidados en el momento de la elaboración de la mezcla.
- Los agregados no deben estar húmedos ni sucios.
- La temperatura mínima de distribución es de 145°C por su rápido endurecimiento.

Es evidente que la mayor desventaja de estos es el alto costo inicial del asfalto modificado, sin embargo, si hacemos un análisis del costo a largo plazo (es decir, la vida útil de la vía); podemos concluir que el elevado costo inicial queda sobradamente compensado por la reducción del mantenimiento futuro y el alargamiento de la vida de servicio del pavimento.

3. CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS PÉTREOS

3.1 DESCRIPCIÓN DE LOS AGREGADOS PÉTREOS

Los agregados pétreos empleados en la realización del proyecto corresponden a la fuente Pescadero, ubicada a 50 Km. aproximadamente sobre la vía Bucaramanga - San Gil.

La fuente es de origen aluvial y tiene una amplia trayectoria de explotación y utilización de sus materiales para la construcción de carreteras.

3.2 CARACTERIZACION FÍSICO MECÁNICA DE AGREGADOS PÉTREOS

Se determinaron las propiedades de consenso especificada por el Instituto Nacional de Vías en su artículo 400-02.

Tabla 3. Resumen de ensayos a los materiales pétreos fuente Pescadero.

PROPIEDAD	NORMA	VALOR	ESP INVIAS-02
Equivalente de arena	E-133	54%	50% Min.
Porcentaje de caras fracturadas (una o más caras fracturadas)	E-227	85%	75% Min.
Porcentaje de caras fracturadas (dos o más caras fracturadas)	E-227	76%	-
Resistencia en sulfato de sodio	E-220	6.8%	12% Máx.
Contenido de impurezas	E-237	0.37	0.5 Máx.
Desgaste los Ángeles	E-218/219	23.8%	25% Máx.
Índice de alargamiento	E-230	24%	30% Máx.
Índice de aplanamiento	E-230	28%	30% Máx.
Angularidad del Agregado fino	AASHTO T- 304	44%	> 40% (SUPERPAVE)
Peso unitario en tolueno (gr/cm ³)	E - 225	0.81	-
Coeficiente de emulsibilidad	E -776	0.45	-
Concentración crítica del llenante mineral	E -745	0.38	-

Fuente: Reporte Técnico R - G - 06 – 192, Parte 1 de CORASFALTOS.

3.2.1 Granulometría de los Agregados Pétreos

3.2.1.1 Gradación según especificación INVIAS.

Realizadas las granulometrías de las muestras de materiales en forma independiente, se hace la combinación de estos para poderlos ajustar de acuerdo con los requerimientos¹⁴ de las especificaciones INVIAS-02 para una mezcla tipo MDC-2.

La dosificación adecuada para la mezcla es la siguiente:

- Triturado ¾" Fuente Pescadero: 27%
- Arena de Trituración Pasa 3/8": 73%

Debido a que el método Marshall no tiene en cuenta la evaluación de diferentes gradaciones sino que, simplemente, se escoge la gradación de diseño de tal manera que cumpla lo descrito en la especificación, en el caso de este proyecto se subestimo este paso en el diseño Superpave con el propósito de que la estructura de agregados para ambos diseños fuera la misma, aun así debe cumplir con la carta de gradación Superpave. Por lo que siempre se utiliza la combinación 73% de material fino y 27% de material grueso en las dos metodologías de diseño.

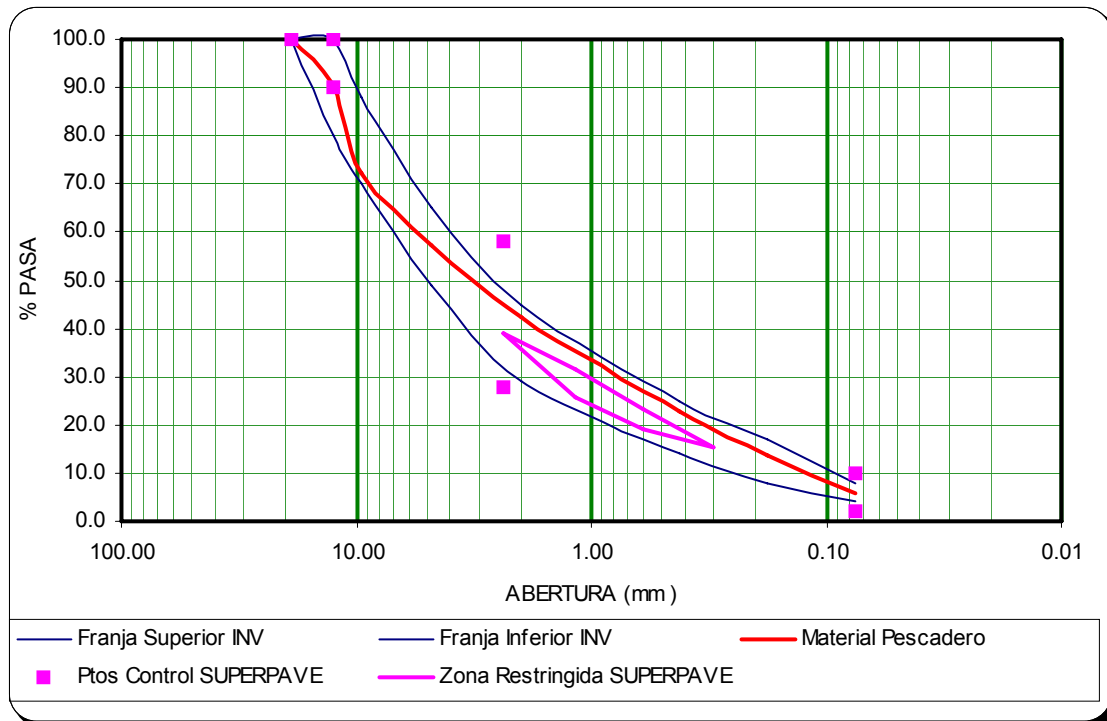
Tabla 4. Gradación de la combinación de los agregados pétreos.

PROPORCIONES DE LOS AGREGADOS			% Pasa
Tamiz	Agregado Fino	Agregado Grueso	
	73%	27%	
¾"	100.00	99.80	99.946
½"	99.80	64.80	90.350
3/8"	92.70	17.10	72.288
No. 4	76.80	5.20	57.468
10	57.00	3.00	42.420
40	30.70	2.10	22.978
80	18.10	1.70	13.672
200	7.30	1.10	5.626

La gráfica 1 muestra la curva granulométrica obtenida de la combinación de los materiales anteriormente citados.

¹⁴ Instituto Nacional de Vías. Artículo 450. Mezcla Densa en Caliente. Numeral 450.2.1. Agregados pétreos y llenante mineral.

Gráfica 1. Curva Granulométrica Agregados Fuente Pescadero, frente a las especificaciones INVIAS para MDC-2.



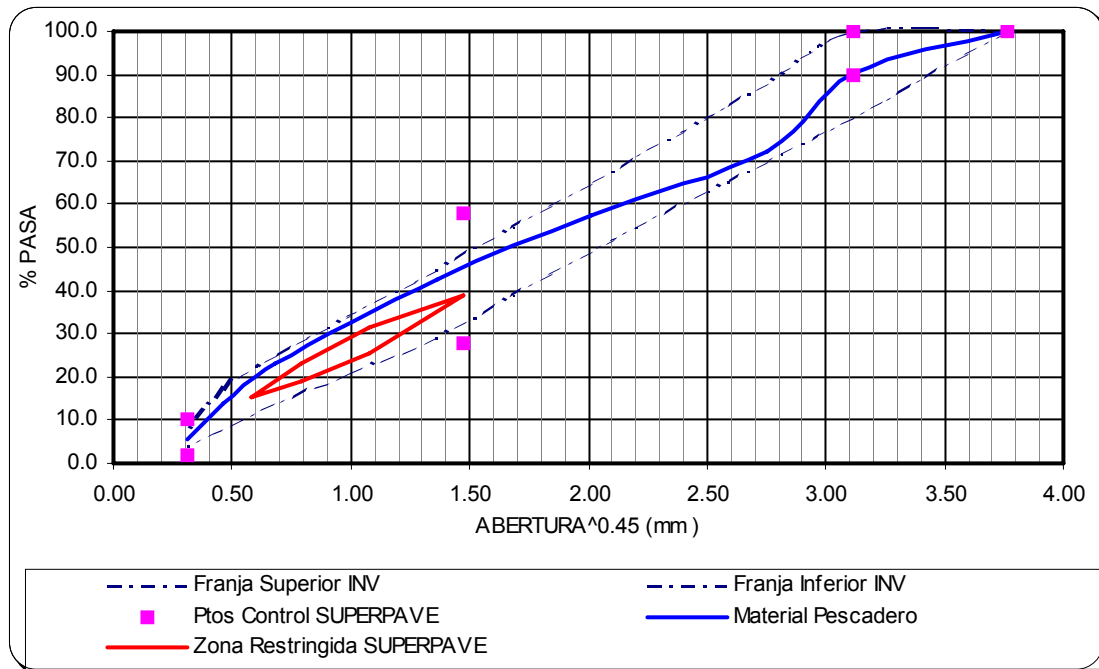
3.2.1.2 Gradación según especificación SUPERPAVE.

Dado que las exigencias de la metodología Superpave son distintas a las de INVIAS, se hace a continuación la verificación del cumplimiento de las mismas para la gradación de diseño escogida para el método Marshall.

Tabla 5. Especificaciones de la gradación según Superpave, para TMN = 1/2".

Tamiz	Abertura ^{0.45} (mm)	% Pasa	Puntos Control		Zona Restringida	
3/4	3.762	99.95		100		
1/2	3.116	90.35	90	100		
3/8	2.754	72.29				
N°4	2.016	57.47				
	1.472	44.39	28	58	39.1	39.1
N°10	1.366	42.42				
	1.077	32.30			25.6	31.5
	0.795	25.14			19.1	23.1
N°40	0.680	22.98				
	0.582	18.23			15.5	15.5
N°80	0.462	13.67				
	0.426	11.37				
N°200	0.312	5.63	2	10		

Gráfica 2. Curva Granulométrica Agregados Fuente Pescadero, frente a las especificaciones Superpave para TMN=1/2”.



La gráfica 2 muestra los puntos de control y la zona restringida para agregados con tamaño máximo nominal de 1/2”. En las abscisas se ubica la abertura del tamiz elevada a la 0.45 tal y como lo recomienda la FHWA¹⁵.

Como se observa, la gradación escogida para el diseño de las mezclas asfálticas cumple con las especificaciones a tener en cuenta en las dos metodologías.

3.2.2 Pesos Específicos de los Agregados

A continuación se presentan los resultados de los ensayos realizados para el cálculo de los pesos específicos de los agregados gruesos, arenas y finos respectivamente.

Tabla 6. Peso específico de los agregados gruesos.

Peso específico agregado grueso (Retenido # 4)					
Peso Material (g)	Peso en agua (g)	Peso SSS (g)	Gsb	Gs Nominal	Absorción (%)
2997.5	1881.4	3021.1	2.63	2.69	0.79

¹⁵ Federal Highway Administration, USA.

Tabla 7. Peso específico de arenas.

Peso específico arena (Pasa #4 – Ret. # 200)						
Peso Material (g)	W Matraz + arena + H2O (g)	W Matraz + H2O (g)	Peso SSS (g)	Gsb	Gs Nominal	Absorción (%)
492.8	2118.5	2428.0	500	2.59	2.69	1.46

Tabla 8. Peso específico del llenante mineral.

Peso especifico filler (Pasa #200)			
Peso Material (g)	W Matraz + filler + H2O (gr)	W Matraz + H ₂ O (gr)	Gsb
224.6	2118.5	2259.0	2.67

3.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA DE AGREGADOS PÉTREOS

3.3.1 Análisis químico elemental (Absorción atómica) de arenas.

En la tabla 9 se muestran los resultados en porcentaje en peso de cada metal cuantificado y el óxido correspondiente en los agregados analizados.

Tabla 9. Análisis elemental de arenas.

Metal	Si (%)	Al (%)	Fe (%)	Mg (%)	K (%)	Na (%)	Ca (%)
	41.25	4.71	2.02	0.43	0.86	1.43	0.72
Óxido	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	CaO (%)
	88.48	8.90	2.89	0.71	1.04	1.93	1.01

3.3.2 Análisis químico elemental (Absorción atómica) de finos.

En la tabla 10 se muestran los resultados en porcentaje en peso de cada metal cuantificado y el óxido correspondiente en el llenante mineral.

Tabla 10. Análisis elemental de finos.

Metal	Si (%)	Al (%)	Fe (%)	Mg (%)	K (%)	Na (%)	Ca (%)
	40.89	5.92	2.93	0.62	0.76	1.31	1.01
Óxido	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	CaO (%)
	87.71	11.18	4.19	1.03	0.92	1.77	1.41

3.3.3 Análisis por Difracción de Rayos-X para finos.

- **Identificación de fases.**

El análisis cualitativo de las fases presentes en la muestra se realizó mediante comparación del perfil observado con los perfiles de difracción reportados en la base de datos PDF-2 del International Center for Diffraction Data (ICDD). La tabla 11 y el Anexo A-1 muestran la identificación de fases presentes en los finos.

Tabla 11. Fases presentes en el material fino (A9TA)

FASE	No. TARJETA PDF-2	NOMBRE	Cuantitativo
$(\text{Na}_{0.98}\text{Ca}_{0.02})(\text{Al}_{1.02}\text{Si}_{2.98}\text{O}_8)$	70 - 3752	Albita	8.98 %
CaCO_3	72 - 1652	Calcita	3.32 %
$(\text{MgFe})_6(\text{SiAl})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	29 - 701	Clinocloro	5.08%
SiO_2	85 - 794	Cuarzo	35.66%
$\text{K}(\text{Si}_{0.75}\text{Al}_{0.25})_4\text{O}_8$	77 - 135	Microclina	4.72%
$(\text{K}_1\text{H}_3\text{O})\text{Al}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$	26 - 911	Illita	1.63%
$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	79 - 2092	Lizardita	10.81%
$\text{Na}_2\text{Mg}_3\text{Fe}_2\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	29 - 1236	Magnesioriebeckita	-
Amorfos			29.80%

3.3.4 Análisis por Difracción de Rayos-X para arenas.

- **Identificación de fases**

El análisis cualitativo de las fases presentes en la muestra se realizó mediante comparación del perfil observado con los perfiles de difracción reportados en la base de datos PDF-2 del International Center for Diffraction Data (ICDD). La tabla 12 y el Anexo A-2 muestran la identificación de fases presentes en las arenas.

Tabla 12. Fases presentes en arenas (A9TB)

FASE	No. TARJETA PDF-2	NOMBRE	Cuantitativo
$(\text{Na}_{0.98}\text{Ca}_{0.02})(\text{Al}_{1.02}\text{Si}_{2.98}\text{O}_8)$	70 - 3752	Albita	10.69 %
CaCO_3	72 - 1652	Calcita	3.04 %
$(\text{Mg}_{2.8}\text{Fe}_{1.7}\text{Al}_{1.2})(\text{Si}_{2.8}\text{Al}_{1.2})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	7 - 76	Clinocloro	2.95%
SiO_2	85 - 794	Cuarzo	37.79%
$\text{K}(\text{Si}_{0.75}\text{Al}_{0.25})_4\text{O}_8$	77 - 135	Microclina	8.23%
$\text{K}_{0.86}\text{Al}_{1.94}(\text{Al}_{0.965}\text{Si}_{2.895}\text{O}_{10})\text{OH}_{1.744}\text{F}_{0.256}$	26 - 911	Moscovita	5.39%
Amorfos			31.91%

4. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA Y DETERMINACIÓN DEL GRADO DE DESEMPEÑO DE LOS ASFALTOS EMPLEADOS

El asfalto base empleado corresponde a un AC 80-100 de la Planta de Barrancabermeja. Así mismo, el proyecto contempla los diseños Marshall y Superpave con 3 tipos de asfaltos, así:

- ✓ **Asfalto Base.**
Clasificación: AC 80-100. Planta de origen: Barrancabermeja.
- ✓ **Asfalto modificado con ELVALOY.**
Este asfalto corresponde al asfalto base modificado con el polímero ELVALOY en un 1.5%, más la adición de un 0.22% de ácido polifosfórico para garantizar la modificación. Por recomendación de la firma Du Pont, la temperatura de modificación es de 160-170°C mediante agitación durante 2 horas y con la utilización del ácido polifosfórico como catalizador.
- ✓ **Asfalto modificado con SBS.**
Corresponde al asfalto base mejorado mediante la adición del polímero SBS (Estireno – Butadieno – Estireno), en un 3%. El SBS se incorpora al asfalto mediante agitación de alto corte y a una alta temperatura. Al disminuir la temperatura, los bloques finales de poliestireno forman dominios insolubles, unidos unos a otros por bloques de butadieno, formando una malla tridimensional a través de la mezcla. La temperatura de modificación con el asfalto empleado es de 180°C, por medio de agitación durante 5 a 6 horas.

4.1 ANÁLISIS QUÍMICO

En la tabla 13 se muestra la composición química (análisis SARA) obtenida para los asfaltos analizados en su estado original, RTFO y PAV. De igual manera se presenta el valor del índice de inestabilidad coloidal (IC).

En el betún, los diferentes constituyentes siguen una ley coloidal expresada por la siguiente relación:

$$IC = \frac{\text{constituyentes floculados}}{\text{constituyentes dispersados}} = \frac{\text{saturados} + \text{asfaltenos}}{\text{aromáticos} + \text{resinas}}$$

Siendo IC el índice de inestabilidad coloidal el cual da una idea del grado de gelificación de los asfaltos o del cambio de la estructura coloidal y de la susceptibilidad térmica, experimentalmente se ha determinado un valor máximo de 0.6; si este valor es mayor, el asfalto se comporta como tipo gel y es más baja su estabilidad coloidal, sin embargo no se conoce un valor óptimo de inestabilidad coloidal para los asfaltos en general.

Tabla 13. Composición química de los asfaltos.

Muestra		Fracción				IC
		Saturados	Aromáticos	Resinas	Asfaltenos	
Base	Original	13.46	51.19	26.83	8.55	0.28
	RTFO	13.95	45.71	31.09	9.25	0.30
	PAV	13.31	36.36	41.06	9.27	0.29
Eivaloy	Original	13.10	48.14	27.52	11.24	0.32
	RTFO	13.21	46.08	30.30	9.92	0.31
	PAV	13.29	40.75	34.72	11.23	0.32
SBS	Original	12.77	37.87	38.99	10.37	0.30
	RTFO	12.51	34.10	41.51	11.88	0.32
	PAV	11.01	28.95	50.93	9.11	0.25

4.2 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS

Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 14.

Tabla 14. Resultados de ensayos fisicoquímicos de los asfaltos.

Ensayos		Asfalto		
		Base	Eivaloy	SBS
Asfalto Original	Penetración a 25°C, 100g, 5s (1/10 mm)	101	90	71
	Ductilidad a 25°C, 5cm/s (cm)	> 130	>130	78.2
	Punto de Ablandamiento (°C)	44.0	50.9	53.3
	Índice de penetración	-1.1	+0.6	+ 0.5
	Peso específico, 25/25°C	1.0058	1.0033	1.0029
	Punto de chispa (°C)	312	304	298
	Recuperación elástica por torsión (%)	N.S.	63	39
	Pérdida de masa, RTFOT (%)	0.218	0.154	0.046
	Densidad de carga	+1.59	+1.02	+1.25
RTFOT	Penetración a 25°C, 100g, 5s (1/10 mm)	62	55	50
	Densidad de carga	+1.36	+0.49	+0.88
	Penetración retenida (%)	61	61	
PAV	Penetración a 25°C, 100g, 5s (1/10 mm)	33	32	30
	Densidad de carga	+0.82	+0.35	+0.96

N.S.: no solicitado¹⁶.

¹⁶ El ensayo de recuperación elástica por torsión usualmente sólo se analiza para asfaltos modificados, pues para asfaltos base es muy baja.

4.3 CURVAS REOLÓGICAS DE LOS ASFALTOS

El tratamiento al cual se somete el asfalto durante la preparación, colocación y posterior compactación de la mezcla asfáltica, es de gran importancia para evitar un recubrimiento deficiente de la superficie del agregado mineral o un envejecimiento prematuro del ligante.

Los datos de viscosidades y sus gráficas se presentan a continuación:

Tabla 15. Datos de la curva reológica del asfalto base en estado original, RTFOT y PAV.

Asfalto Base Original				
Temperatura (°C)	Torque (%) Promedio	Aguja No.	RPM	Viscosidad Promedio (P)
60	98.2	29	9.8	1003.3
80	95.7	29	90.0	106.3
100	41.4	29	200.0	20.7
120	92.6	21	110.0	4.2
140	61.2	21	200.0	1.5
Asfalto Base RTFOT				
Temperatura (°C)	Torque (%) Promedio	Aguja No.	RPM	Viscosidad Promedio (P)
60	98.3	29	4.5	2190.0
80	94.8	29	49.0	193.5
100	97.2	29	19.0	25.5
120	96.3	21	75.0	6.4
140	87.3	21	200.0	2.2
150	55.53	21	200.00	1.4
Asfalto Base PAV				
Temperatura (°C)	Torque (%) Promedio	Aguja No.	RPM	Viscosidad Promedio (P)
60	94.7	29	1.3	7303.3
80	97.8	29	20.0	489.0
100	97.8	29	147.0	66.5
120	97.8	21	47.0	10.4
140	97.6	21	155.0	3.1
160	50.33	21	200.00	1.3

Tabla 16. Datos de la curva reológica del asfalto modificado con Elvaloy en estado original, RTFOT y PAV.

Asfalto modificado con Elvaloy Original				
Temperatura (°C)	Torque (%) Promedio	Aguja No.	RPM	Viscosidad Promedio (P)
60	97.2	29	9.8	5116.7
80	97.2	29	90.0	456.7
100	95.3	29	200.0	71.7
120	96.8	21	110.0	15.8
140	93.4	21	200.0	4.7
160	75.1	21	200	1.9
Asfalto modificado con Elvaloy RTFOT				
Temperatura (°C)	Torque (%) Promedio	Aguja No.	RPM	Viscosidad Promedio (P)
60	84.9	29	4.5	26166.7
80	97.9	29	49.0	1776.7
100	97.3	29	19.0	202.8
120	95.1	21	75.0	37.4
140	97.9	21	200.0	9.6
160	97.23	21	200.00	3.2
Asfalto modificado con Elvaloy PAV				
Temperatura (°C)	Torque (%) Promedio	Aguja No.	RPM	Viscosidad Promedio (P)
60	54.9	29	1.3	54900.0
80	98.4	29	20.0	2590.0
100	97.9	29	147.0	280.3
120	95.2	21	47.0	47.5
140	97.1	21	155.0	9.5
160	94.30	21	200.00	3.2

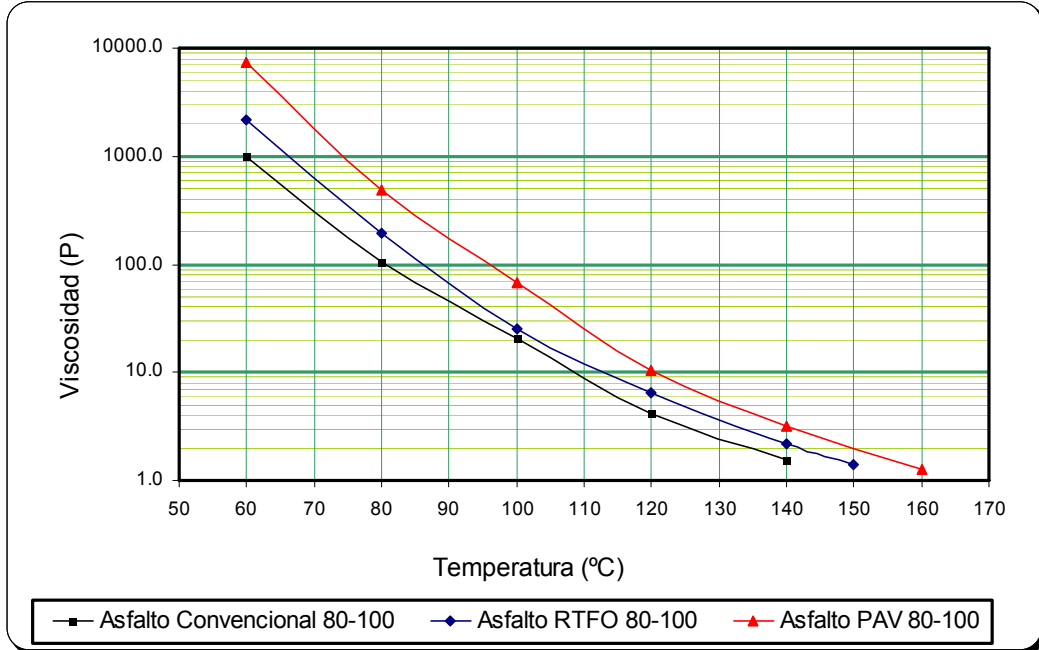
Tabla 17. Datos de la curva reológica del asfalto modificado con SBS en estado original, RTFOT y PAV.

Asfalto modificado con SBS Original				
Temperatura (°C)	Torque (%) Promedio	Aguja No.	RPM	Viscosidad Promedio (P)
60	90.9	29.0	2.0	4173.3
80	97.4	29.0	50.0	191.8
100	93.8	29.0	13.0	36.1
120	95.4	21.0	43.0	11.1
140	98.7	21.0	118.0	4.2
160	75.5	21.0	200.0	1.9
Asfalto modificado con SBS RTFOT				
Temperatura (°C)	Torque (%) Promedio	Aguja No.	RPM	Viscosidad Promedio (P)
60	95.0	29.0	1.3	7293.3
80	96.5	29.0	21.0	459.2
100	98.1	29.0	148.0	66.3
120	99.1	21.0	40.0	12.4
140	98.2	21.0	120.0	4.1
150	98.6	21.0	191.0	2.6
Asfalto modificado con SBS PAV				
Temperatura (°C)	Torque (%) Promedio	Aguja No.	RPM	Viscosidad Promedio (P)
60	88.0	29	1.3	29333.3
80	96.5	29	20.0	1253.3
100	95.3	29	147.0	140.1
120	97.0	21	47.0	19.8
140	96.6	21	155.0	6.3
160	86.97	21	200.00	2.2

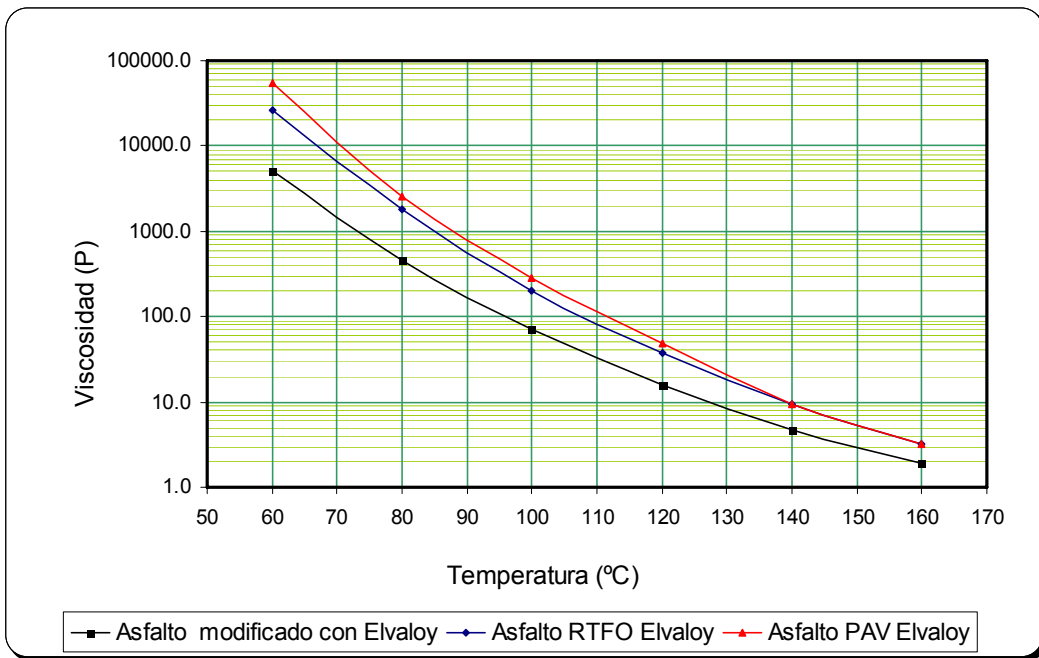
A partir de los datos obtenidos mediante ensayos como penetración, viscosidad y punto de ablandamiento es posible determinar la susceptibilidad de los ligantes a la temperatura¹⁷. Entre los principales parámetros con los que se determina dicha dependencia, se encuentran: el índice de penetración, el número penetración viscosidad y la curva reológica obtenida de la determinación de la variación de la viscosidad con el cambio de temperatura.

¹⁷ Ver Numeral 9.1.

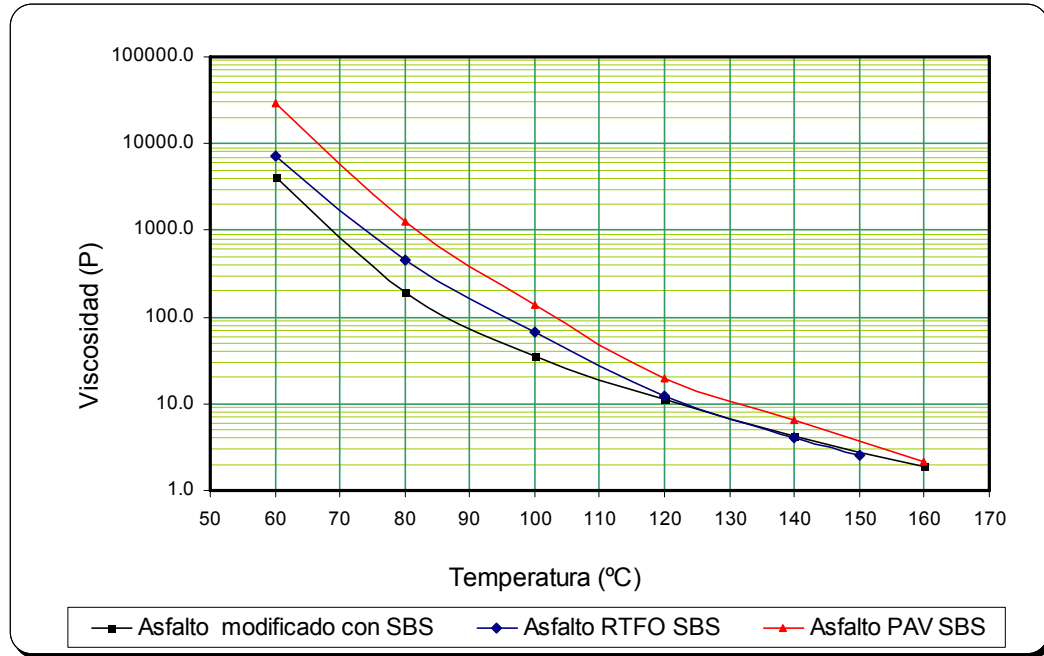
Gráfica 3. Curvas reológicas del asfalto Base.



Gráfica 4. Curvas reológicas del asfalto modificado con Elvaloy.



Gráfica 5. Curvas reológicas del asfalto modificado con SBS.



Los valores de viscosidad a diferentes temperaturas de un asfalto original, permiten obtener las temperaturas óptimas de mezcla en laboratorio y planta, y compactación en el laboratorio. Las temperaturas obtenidas para los tres asfaltos se presentan en la tabla 18.

Para los ligantes empleados, las temperaturas de mezcla y compactación serán las adecuadas para que su viscosidad en el proceso de mezcla sea de: 170 ± 20 cSt y en el de compactación de 280 ± 30 cSt.

Tabla 18. Temperaturas óptimas de mezclado en laboratorio y planta y compactación en el laboratorio.

Temperatura (°C)	Asfalto		
	Base	Elvaloy	SBS
Mezcla	135 - 140	160 - 166	160 - 167
Compactación	126 - 130	148 - 153	147 - 153

4.4 GRADO DE DESEMPEÑO (PG) TECNOLOGÍA SHRP

El grado de desempeño se determina mediante el empleo de los reómetros de corte dinámico (DSR) y de viga de flexión (BBR). El primero se utiliza para determinar las propiedades viscoelásticas del ligante por medio del cálculo del módulo complejo G^* (cantidad de energía necesaria para deformar el asfalto) y el ángulo de fase δ (indicador de las proporciones de las deformaciones recuperable y no recuperable) cuando la muestra es sometida a tensiones de corte oscilante. El segundo se usa para obtener las propiedades de rigidez a la fluencia (S) y la velocidad con la cual cambia dicha rigidez, a bajas temperaturas (disipación de tensiones). Los ensayos en el DSR se realizan sobre el ligante original, envejecido en película delgada (RTFOT) y envejecido a presión (PAV), mientras el ensayo BBR se realiza únicamente sobre el ligante envejecido PAV.

Las especificaciones SUPERPAVE para ligantes asfálticos han sido pensadas en función del control de la deformación permanente, la fisuración por bajas temperaturas y la fisuración por fatiga de los pavimentos asfálticos.

- ***Deformación permanente.***

Esta forma de falla ocurre a temperaturas altas, donde son recomendables altos valores de G^* y valores bajos de δ , para que el asfalto presente buena resistencia a la deformación permanente debida a cargas repetitivas.

La especificación define y establece requisitos para un *factor de ahuellamiento* (rutting factor), $G^*/\text{Sen } \delta$ el cual debe ser como mínimo 1.00 KPa para el ligante asfáltico original y 2.20 KPa como mínimo para el residuo TFOT.

- ***Fisuración por fatiga.***

Dado a que la fatiga sucede a temperaturas del pavimento entre bajas y moderadas, luego de un lapso de servicio, la especificación utiliza los valores de G^* y $\text{Sen } \delta$ pero determinados sobre el residuo del ensayo PAV y a temperaturas intermedias. El *factor de agrietamiento* por fatiga es $G^* \cdot \text{Sen } \delta$ y se establece como máximo un valor de 5000 KPa.



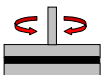
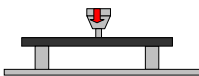
- ***Fisuración por bajas temperaturas.***

A bajas temperaturas los ligantes se comportan como sólidos elásticos. Si la rigidez a la fluencia (S) es muy alta, el asfalto tendrá un comportamiento frágil, y la probabilidad de agrietamiento será mayor; por lo tanto, un límite máximo de 300 MPa se ha fijado para evitar este problema. Por otro lado, es deseable que el asfalto cambie con relativa rapidez su rigidez al someterse a cargas, pues esto significa que tenderá a disipar tensiones que de otro modo se acumularían hasta

un punto en el que el agrietamiento por bajas temperaturas tendría lugar. La especificación exige un mínimo de 0.300 para el valor de m.

En las tablas de la 19 a la 24 se muestran los valores de las propiedades mencionadas anteriormente.

Tabla 19. Grado de desempeño (PG) del asfalto base.

ASFALTO ORIGINAL				
Prueba, Método		Resultados		Especificación
Reómetro de Corte Dinámico (DSR), NTC 5340				
Temperatura (°C)	G* (KPa)	δ (grados)	G* / Sen δ (KPa)	 Mínimo 1.0 KPa
52.0	2.635	82.3	2.659	
57.9	1.004	86.0	1.006	
64.0	0.431	81.2	0.436	
ENVEJECIDO EN PELICULA DELGADA (RTFOT)				
Reómetro de Corte Dinámico (DSR), NTC 5340				
Temperatura (°C)	G* (KPa)	δ (grados)	G* / Sen δ (KPa)	 Mínimo 2.2 KPa
51.9	7.297	83.4	7.345	
58.0	2.914	85.2	2.924	
64.0	1.308	86.3	1.311	
ENVEJECIMIENTO A PRESION (PAV)				
Reómetro de Corte Dinámico (DSR), NTC 5340				
Temperatura (°C)	G* (KPa)	δ (grados)	G* x Sen δ (KPa)	 Máximo 5000 KPa
24.9	5290	57.0	4436.6	
21.6	8700	53.4	6984.5	
18.8	12200	51.9	9600.6	
Reómetro de Viga de Deflexión (BBR), ASTM D 6648 Datos a 60 s de aplicación de carga				
Temperatura (°C)	Propiedad	Valor	Máximo 300 MPa Mínimo 0.300 	
-12	Rigidez, MPa	140		
	m, valor	0.386		
-18	Rigidez, MPa	189		
	m, valor	0.207		
Este asfalto clasifica como un PG 58 - 22				

- **Datos adicionales del ensayo de determinación de la Rigidez a la Flexión por Fluencia utilizando el reómetro de viga flexible**

A continuación se relaciona información adicional de este ensayo para el asfalto base:

Tabla 20. Datos de Rigidez del Asfalto Base a 60 segundos de aplicación de carga.

Temperatura (°C)	Rigidez, S (MPa)		Cambio de rigidez (pendiente, m)	Fuerza (mN)	Deflexión (mm)	Archivo
	Estimada	Medida				
-12	140	140	0.386	985	0.567	0801061
-18	189	189	0.207	970	0.414	0811061

- **Información del envejecimiento a Presión.**

Temperatura de envejecimiento = 100°C

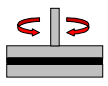
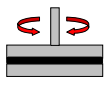
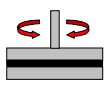
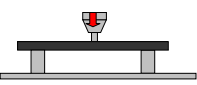
Máxima temperatura registrada = 100.5°C

Mínima temperatura registrada = 99.7°C

Tiempo de envejecimiento = 20 horas y 10 minutos

Tiempo fuera del rango de temperatura = 0 minutos

Tabla 21. Grado de desempeño (PG) del asfalto modificado con Elvaloy.

ASFALTO ORIGINAL				
Prueba, Método		Resultados		Especificación
Reómetro de Corte Dinámico (DSR), NTC 5340				
Temperatura (°C)	G* (KPa)	δ (grados)	G* / Sen δ (KPa)	 Mínimo 1.0 KPa
58.0	3.540	67.9	3.821	
64.0	1.570	67.9	1.694	
70.0	0.730	68.6	0.784	
ENVEJECIDO EN PELICULA DELGADA (RTFOT)				
Reómetro de Corte Dinámico (DSR), NTC 5340				
Temperatura (°C)	G* (KPa)	δ (grados)	G* / Sen δ (KPa)	 Mínimo 2.2 KPa
58.0	4.546	61.8	5.159	
64.0	2.359	63.5	2.637	
70.0	1.381	63.4	1.544	
ENVEJECIMIENTO A PRESION (PAV)				
Reómetro de Corte Dinámico (DSR), NTC 5340				
Temperatura (°C)	G* (KPa)	δ (grados)	G* x Sen δ (KPa)	 Máximo 5000 KPa
24.8	2730.0	44.6	1916.9	
22.0	4240.0	42.0	2837.1	
19.1	8058.8	41.9	5383.1	
Reómetro de Viga de Deflexión (BBR), ASTM D 6648 Datos a 60 s de aplicación de carga				
Temperatura (°C)	Propiedad	Valor	Máximo 300 MPa Mínimo 0.300 	
-12.0	Rigidez, Mpa	135		
	m, valor	0.384		
-18.0	Rigidez, Mpa	193		
	m, valor	0.195		
Este asfalto clasifica como un PG 64 - 22				

- **Datos adicionales del ensayo de determinación de la Rigidez a la Flexión por Fluencia utilizando el reómetro de viga flexible.**

A continuación se relaciona información adicional de este ensayo para el asfalto modificado con Elvaloy:

Tabla 22. Datos de Rigidez del Asfalto modificado con Elvaloy a 60 segundos de aplicación de carga.

Temperatura (°C)	Rigidez, S (MPa)		Cambio de rigidez (pendiente, m)	Fuerza (mN)	Deflexión (mm)	Archivo
	Estimada	Medida				
-12.0	135	135	0.384	964	0.577	0824062
-18.0	192	193	0.195	993	0.416	090463

- **Información del envejecimiento a Presión.**

Temperatura de envejecimiento = 100°C




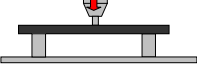
Máxima temperatura registrada = 100.3°C

Mínima temperatura registrada = 100.2°C

Tiempo de envejecimiento = 20 horas y 15 minutos

Tiempo fuera del rango de temperatura = 0 minutos

Tabla 23. Grado de desempeño (PG) del asfalto modificado con SBS.

ASFALTO ORIGINAL				
Prueba, Método		Resultados		Especificación
Reómetro de Corte Dinámico (DSR), NTC 5340				
Temperatura (°C)	G* (KPa)	δ (grados)	G* / Sen δ (KPa)	 Mínimo 1.0 KPa
58.0	3.067	78.0	3.135	
64.0	1.475	79.4	1.501	
70.0	0.673	77.7	0.689	
ENVEJECIDO EN PELICULA DELGADA (RTFOT)				
Reómetro de Corte Dinámico (DSR), NTC 5340				
Temperatura (°C)	G* (KPa)	δ (grados)	G* / Sen δ (KPa)	 Mínimo 2.2 KPa
58.0	4.789	63.9	5.331	
64.0	2.379	64.3	2.640	
70.0	1.321	63.5	1.475	
ENVEJECIMIENTO A PRESION (PAV)				
Reómetro de Corte Dinámico (DSR), NTC 5340				
Temperatura (°C)	G* (KPa)	δ (grados)	G* x Sen δ (KPa)	 Máximo 5000 KPa
24.7	2672.0	45.5	1907.4	
21.6	6015.2	43.5	4138.2	
18.6	11168.8	15.7	7990.3	
Reómetro de Viga de Deflexión (BBR), ASTM D 6648 Datos a 60 s de aplicación de carga				
Temperatura (°C)	Propiedad	Valor	Máximo 300 MPa Mínimo 0.300 	
-18	Rigidez, Mpa	304		
	m, valor	0.299		
-12	Rigidez, Mpa	168		
	m, valor	0.397		
Este asfalto clasifica como un PG 64 -22				

- **Datos adicionales del ensayo de determinación de la Rigidez a la Flexión por Fluencia utilizando el reómetro de viga flexible.**

A continuación se relaciona información adicional de este ensayo para el asfalto modificado con SBS:

Tabla 24. Datos de Rigidez del Asfalto modificado con SBS a 60 segundos de aplicación de carga.

Temperatura (°C)	Rigidez, S (MPa)		Cambio de rigidez (pendiente, m)	Fuerza (mN)	Deflexión (mm)	Archivo
	Estimada	Medida				
-18	304	303	0.299	983	0.262	0904061
-12	165	165	0.397	984	0.481	0912061

- **Información del envejecimiento a Presión.**

Temperatura de envejecimiento = 100°C

Máxima temperatura registrada = 100.5°C

Mínima temperatura registrada = 99.5°C

Tiempo de envejecimiento = 20 horas y 10 minutos

Tiempo fuera del rango de temperatura = 0 minutos

5. DISEÑO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS POR EL MÉTODO MARSHALL

Para establecer el porcentaje óptimo de asfalto, se tomaron los criterios aplicables en el aparte 450.4.2 del artículo 450 de la norma INVÍAS-02 para un tránsito de diseño de 0.5 a 5 millones de ejes equivalentes.

Tabla 25. Requerimientos mezcla asfáltica MDC-2.

CARACTERÍSTICAS	REQUERIMIENTO
Compactación (Golpes/cara)	75
Estabilidad Mínima (Kg-f)	>(750 Kg-f)
Flujo (mm)	(2,0 – 4.0)
Vacíos con Aire (%)	3-5
Vacíos en Agregados Minerales (%)	≥ 15
Vacíos Llenos de Asfalto (%)	65 - 78

5.1 MEZCLA ASFÁLTICA ELABORADA CON ASFALTO BASE 80-100

En el **Anexo B-1**, se presenta el cuadro correspondiente a las características de las briquetas, requeridas para obtener el contenido óptimo de ligante. A continuación se presentan los resultados de la determinación de los contenidos óptimos de ligante.

Del análisis de los datos obtenidos del diseño Marshall se determinan los parámetros para definir el contenido óptimo de ligante en un **5.4%**

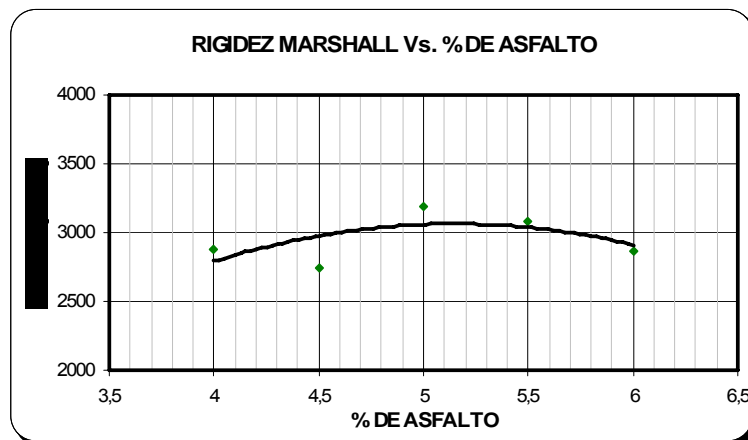
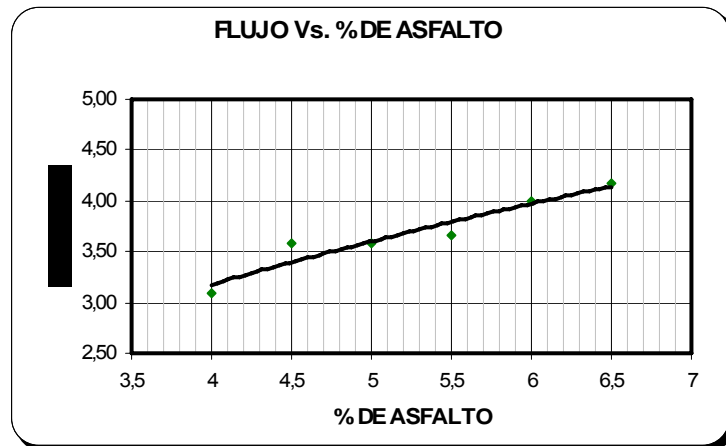
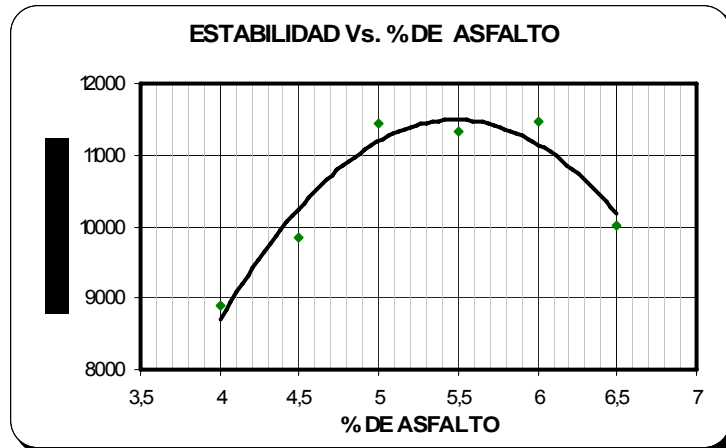
Tabla 26. Obtención del porcentaje óptimo de asfalto base 80-100.

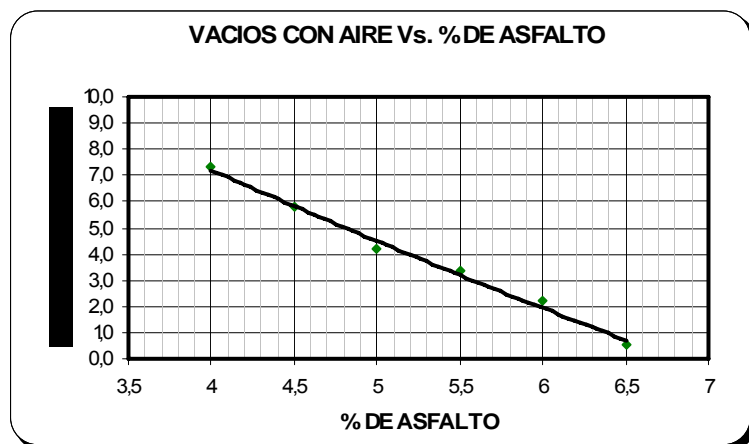
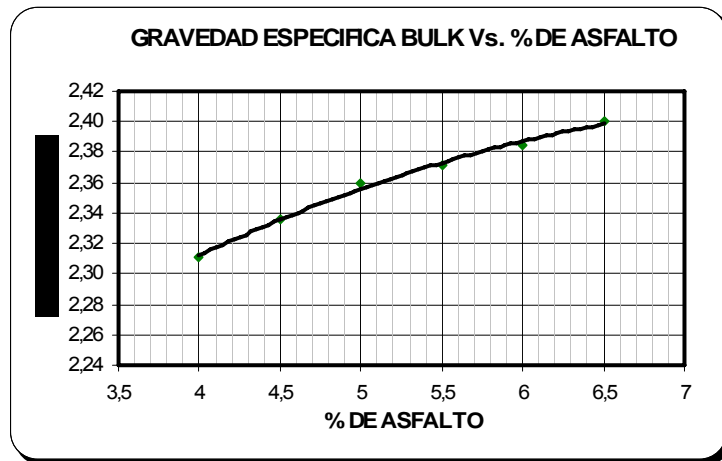
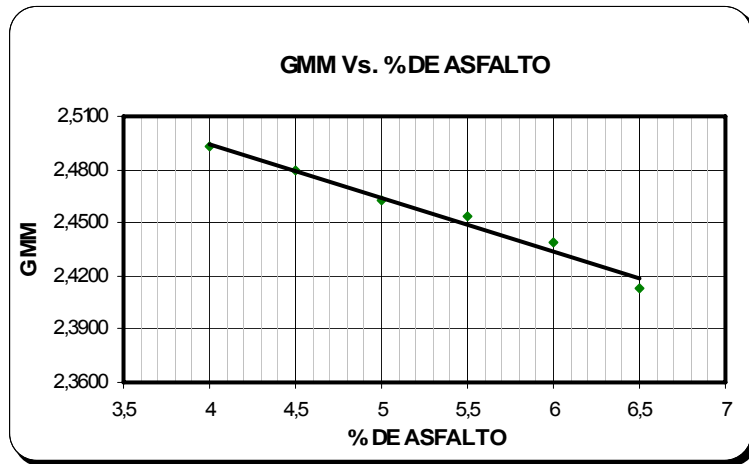
Parámetro	Especificación	% Asfalto que cumple	Valor al Porcentaje Óptimo de 5.4%
Estabilidad (Kg-f)	> 750	4.0 a 6.5	1150
Flujo (mm)	2 a 4.0	4.0 a 6.1	3.8
Vacíos con aire (%)	3 a 5	4.8 a 5.6	3.4
Vacíos en Agregado Mineral (%)	≥15	4.0	14.1
Vacíos llenos con asfalto (%)*	65 a 78	4.8 a 5.5	76.0
Peso específico bulk	-	-	2.370
Gmm	-	-	2.453

** Los vacíos en agregado mineral no se cumplen debido a la falta de un proceso de trituración terciario del agregado pétreo, sin embargo el valor hallado es admisible según criterios del Instituto del Asfalto.

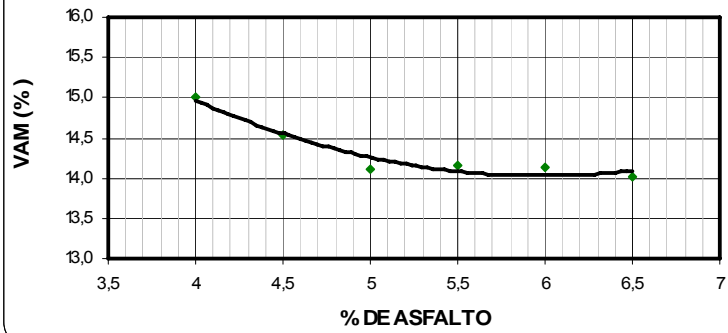
Las gráficas siguientes presentan los comportamientos obtenidos en cada uno de los parámetros analizados en el diseño Marshall.

Gráfica 6. Obtención del porcentaje óptimo de asfalto 80-100 – Método Marshall.

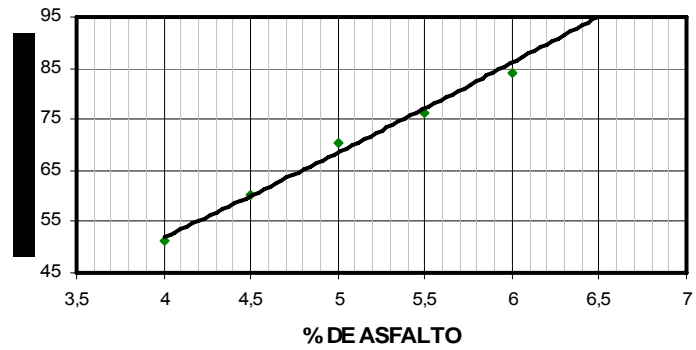




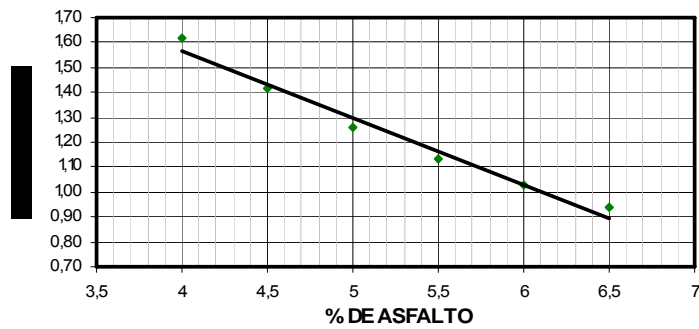
VACIOS EN AGREGADOS MINERALES Vs. %DE ASFALTO

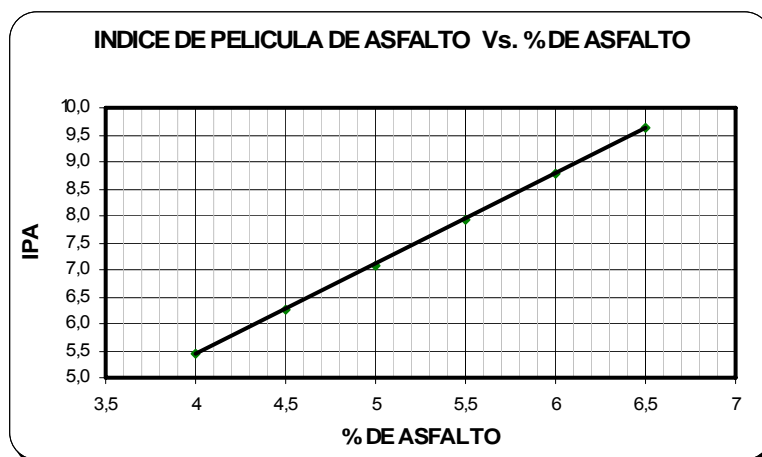


VACIOS LLENOS CON ASFALTO Vs. %DE ASFALTO



LLENANTE / ASFALTO EFECTIVO Vs. %DE ASFALTO





5.2 MEZCLA ASFÁLTICA ELABORADA CON ASFALTO MODIFICADO CON ELVALOY

En el **Anexo B-2**, se presenta el cuadro correspondiente a las características de las briquetas, requeridas para obtener el contenido óptimo de ligante. A continuación se presentan los resultados de la determinación de los contenidos óptimos de ligante.

Del análisis de los datos obtenidos del diseño Marshall se determinan los parámetros para definir el contenido óptimo de ligante en un **5.2%**

Tabla 27. Obtención del porcentaje óptimo de asfalto modificado con Elvaloy

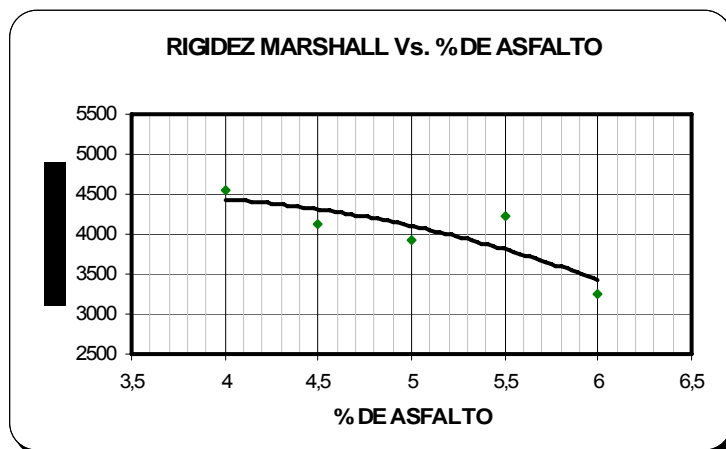
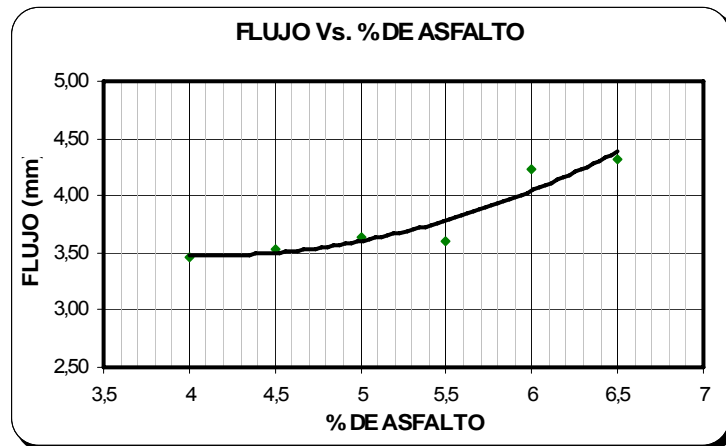
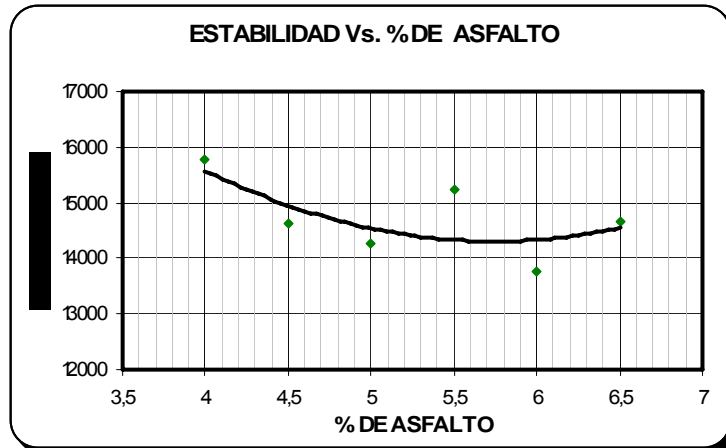
Parámetro	Especificación	% Asfalto que cumple	Valor al Porcentaje Óptimo de 5.2%
Estabilidad (Kg-f)	> 750	4.0 a 6.5	1440
Flujo (mm)*	2 a 4	4.0 a 5.9	3.8
Vacíos con aire (%)	3 a 5	4.6 a 5.2	4.0
Vacíos en Agregado Mineral (%)	≥ 15	4 a 4.4	14.1
Vacíos llenos con asfalto (%)**	65 a 78	4.8 a 5.5	74
Peso específico bulk	-	-	2.350
Gmm	-	-	2.4479

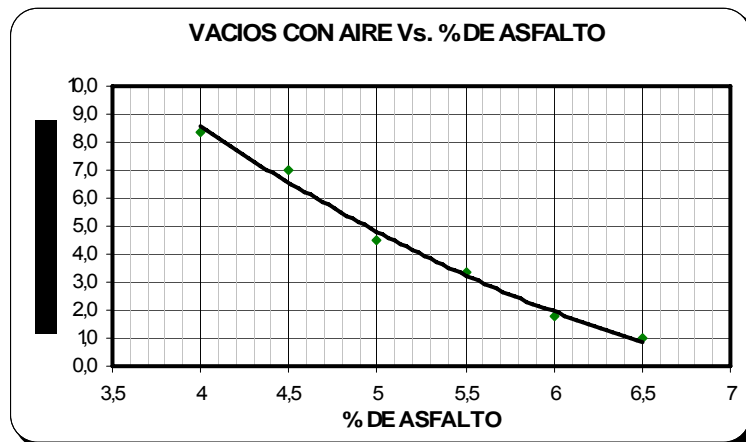
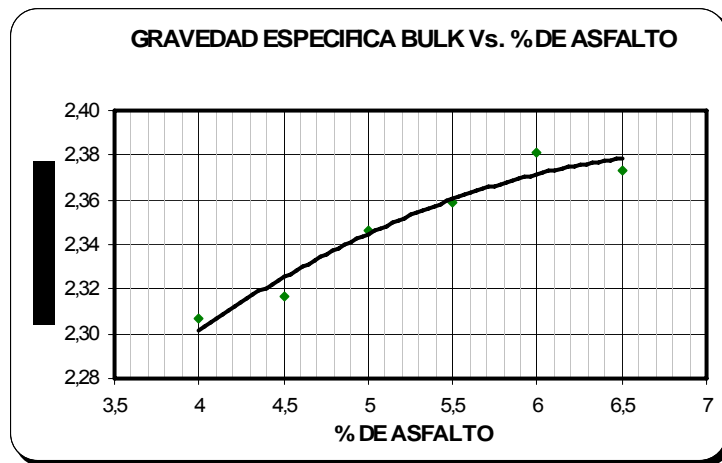
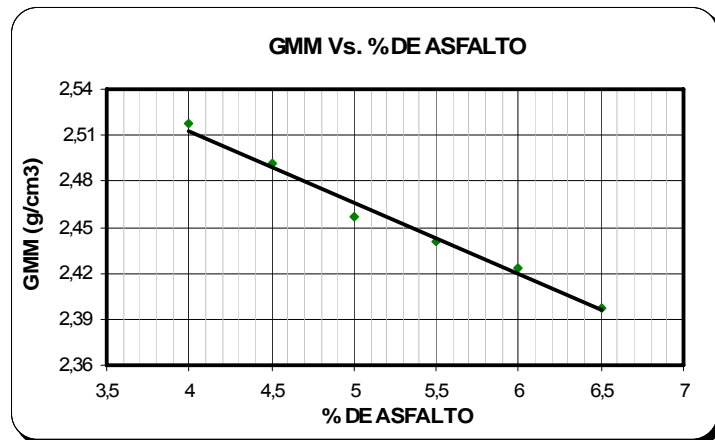
* Por tratarse de una mezcla con asfalto modificado se considera que el valor de flujo es aceptable.

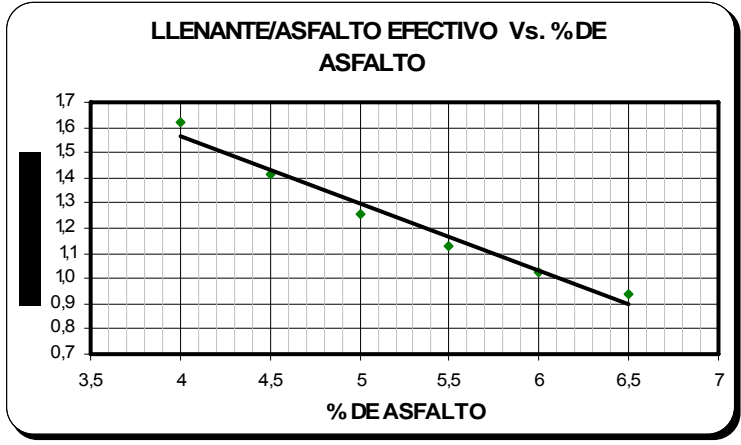
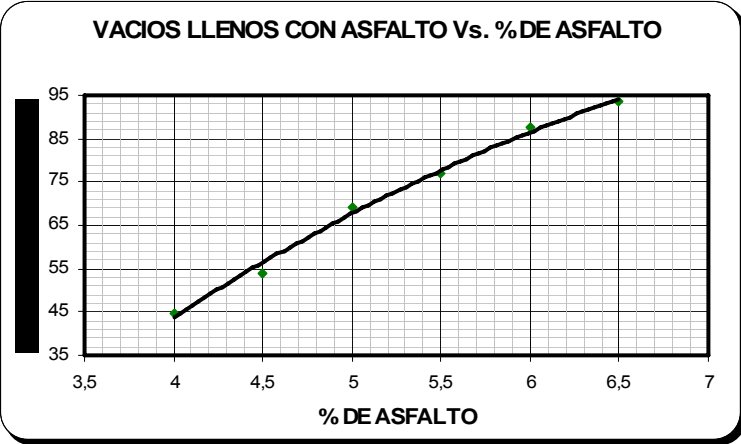
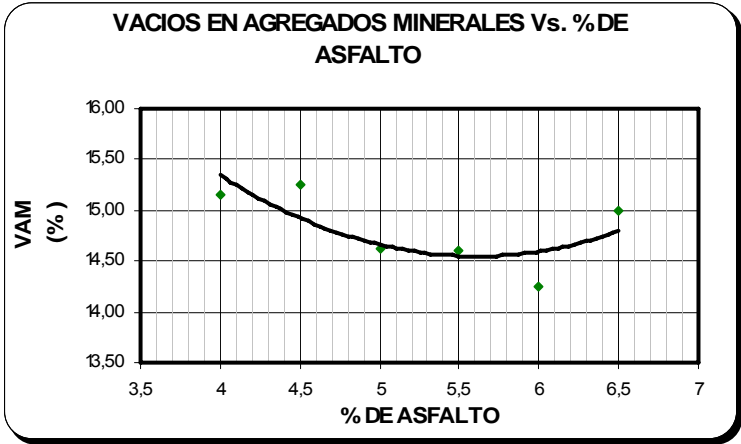
** Los vacíos en agregado mineral no se cumplen debido a la falta de un proceso de trituración terciario del agregado pétreo, sin embargo el valor hallado es admisible según criterios del Instituto del Asfalto.

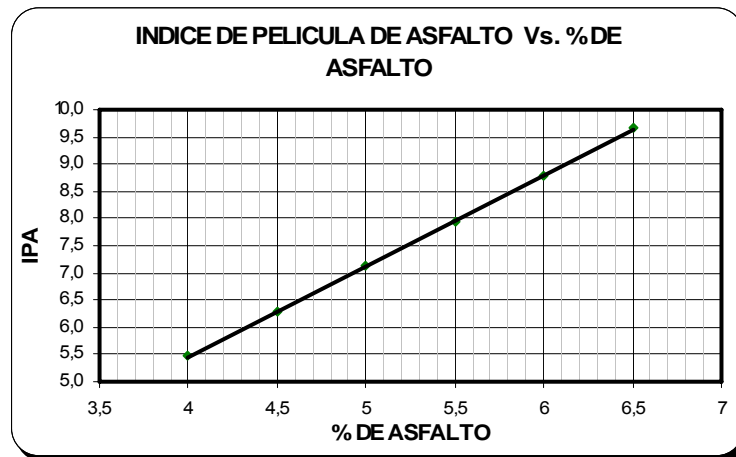
Las gráficas siguientes presentan los comportamientos obtenidos en cada uno de los parámetros analizados en el diseño Marshall.

Gráfica 7. Obtención del porcentaje óptimo de asfalto modificado con Elvaloy – Método Marshall.









5.3 MEZCLA ASFÁLTICA ELABORADA CON ASFALTO MODIFICADO CON SBS

En el **Anexo B-3**, se presenta el cuadro correspondiente a las características de las briquetas, requeridas para obtener el contenido óptimo de ligante. A continuación se presentan los resultados de la determinación de los contenidos óptimos de ligante.

Del análisis de los datos obtenidos del diseño Marshall se determinan los parámetros para definir el contenido óptimo de ligante en un **5.0%**

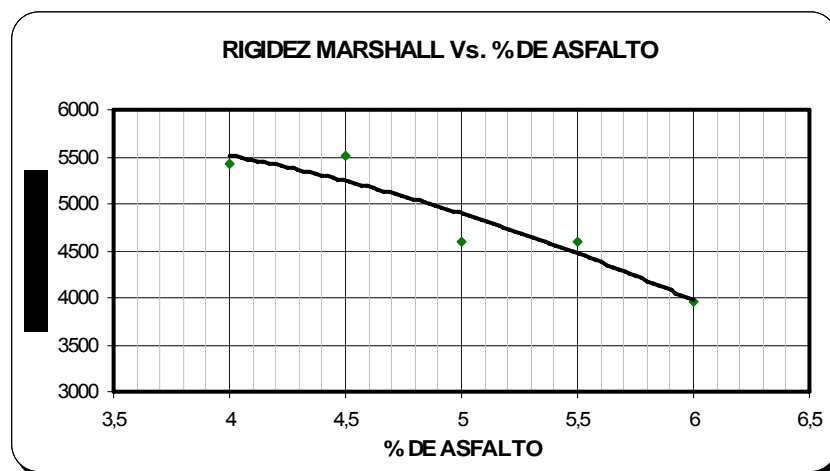
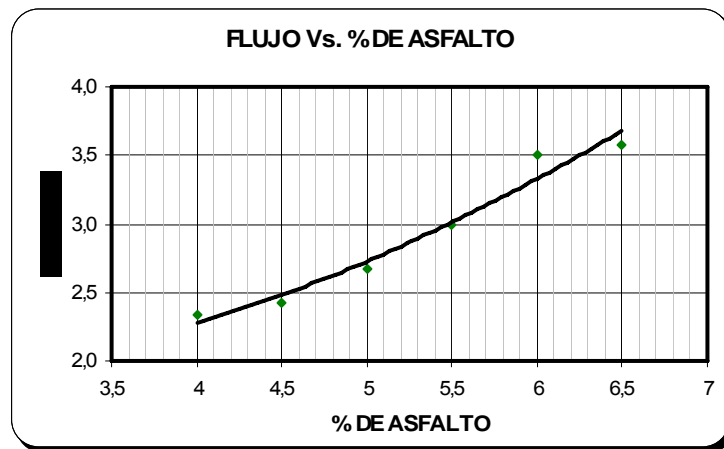
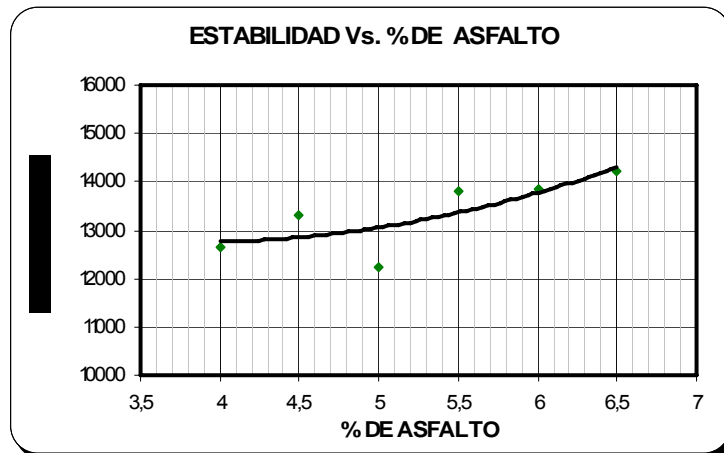
Tabla 28. Obtención del porcentaje óptimo de asfalto modificado con SBS.

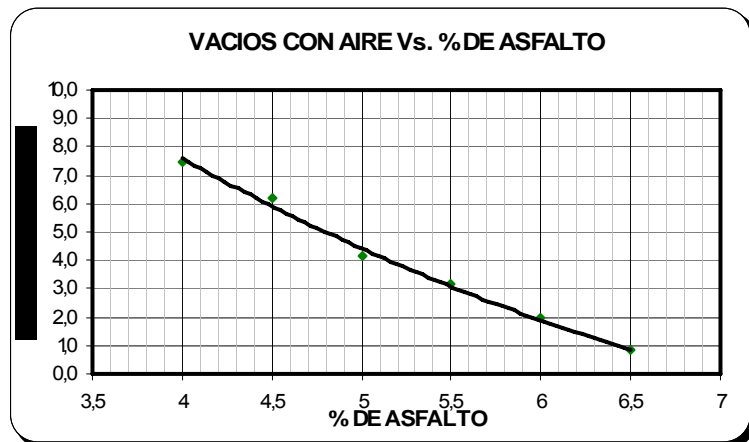
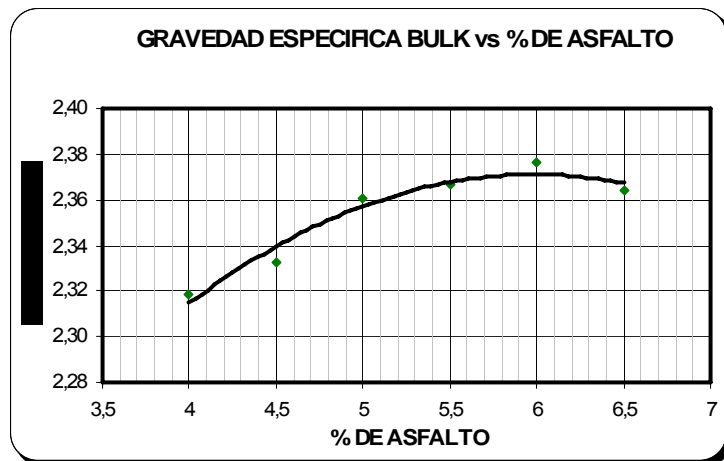
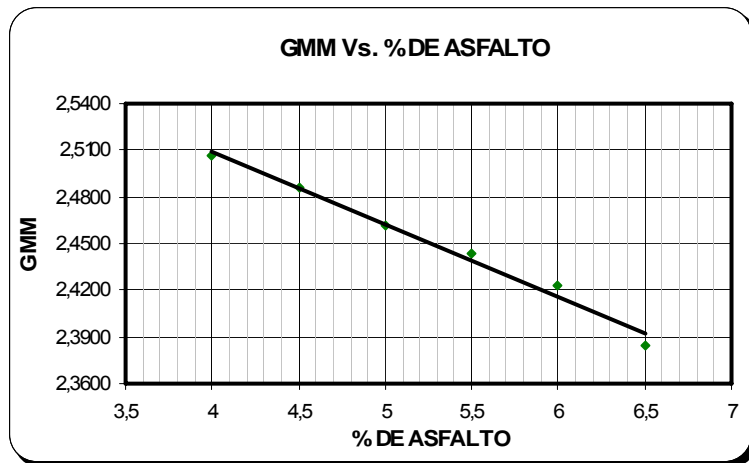
Parámetro	Especificación	% Asfalto que cumple	Valor al Porcentaje Óptimo de 5.0%
Estabilidad (Kg-f)	> 750	4.0 a 6.5	1225
Flujo (mm)	2 a 4	4.0 a 6.2	2.7
Vacíos con aire (%)	3 a 5	4.8 a 5.5	4.1
Vacíos en Agregado Mineral (%)*	≥ 15	6.2 a 6.5	14.1
Vacíos llenos con asfalto (%)	65 a 78	4.8 a 5.5	70
Peso específico bulk	-	-	2.360
Gmm	-	-	2.462

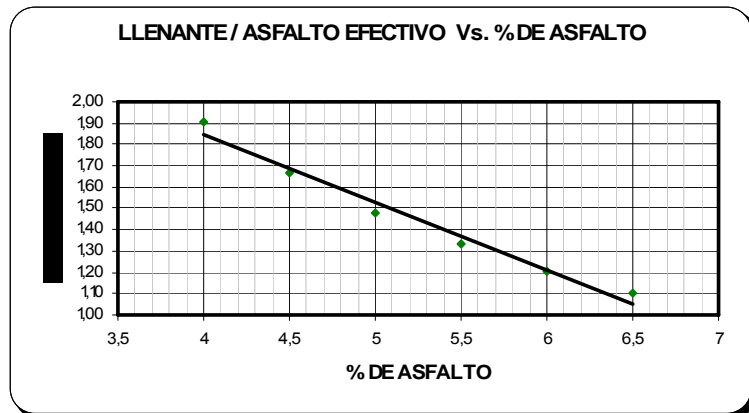
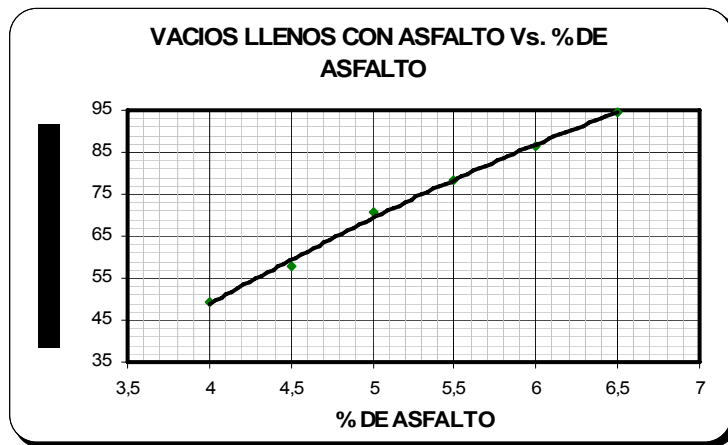
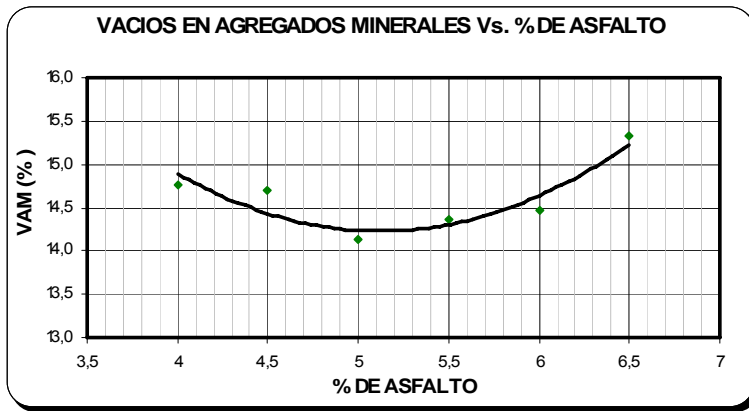
* Los vacíos en agregado mineral no se cumplen debido a la falta de un proceso de trituración terciario del agregado pétreo, sin embargo el valor hallado es admisible según criterios del Instituto del Asfalto.

Las gráficas siguientes presentan los comportamientos obtenidos en cada uno de los parámetros analizados en el diseño Marshall.

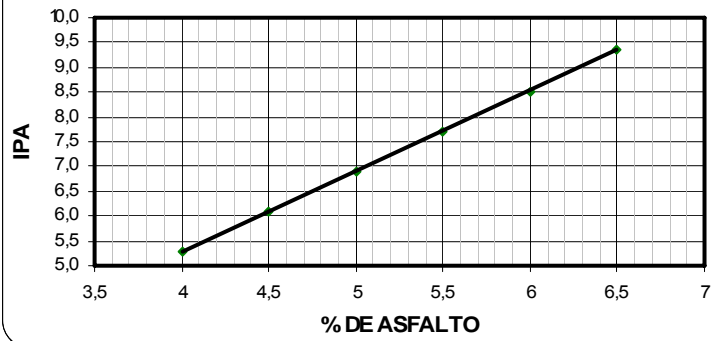
Gráfica 8. Obtención del porcentaje óptimo de asfalto modificado con SBS – Método Marshall.







INDICE DE PELICULA DE ASFALTO Vs. %DE ASFALTO



6. DISEÑO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS POR EL MÉTODO SUPERPAVE

6.1 DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA CON ASFALTO BASE 80-100

6.1.1 Obtención del porcentaje de asfalto estimado, Pb estimado.

Gsb	Gsa	Gse	Gb Barranca
2,610	2,687	2,664	1,0058

Para el cálculo de la gravedad específica efectiva de la mezcla, Gse, se utiliza un factor de 0,7.

Para el diseño de la mezcla se asume el porcentaje de asfalto de 5%, por consiguiente la proporción restante de agregados es del 95%, para un volumen de vacíos de $0.04 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ de mezcla, equivalente al 4%.

Pb =	5,00%
Ps =	95,00%
Va (cm^3/cm^3) =	0,04
Vba (cm^3/cm^3) =	0,017

De acuerdo al tamaño máximo nominal de los agregados, $TM = \frac{3}{4}$ ", se obtiene el volumen de ligante asfáltico efectivo:

$$Vbe = 0,089 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$$

El peso de los agregados en gramos por cm^3 de mezcla será de:

$$Ws = 2,244 \text{ gr}/\text{cm}^3$$

El porcentaje de bitumen inicial del diseño será:

$$Pbi = 4,57\%$$

El diseño de la mezcla asfáltica corresponde a un tránsito de diseño expresado en ejes equivalentes de entre 3 y 10 millones, para lo cual se tiene la siguiente disposición de giros en el proceso de compactación:

Ninicial	Ndiseño	Nmáx
8	100	160

Resumen de la compactación de los especímenes de prueba

MEZCLA	%ASFALTO	%GMM A Nini	%Gmm A Nmáx	%Gmm a Ndis	%Vacíos de aire	%VMA
1	4,57%	88,47%	95,92%	94,82%	5,18%	14,09%

A continuación se muestra el Pb estimado y el resumen de resultados del diseño preliminar, identificando los parámetros y requisitos a cumplir.

Pb estimado		Criterio
%VAM Est	5,04%	> 13%
%VAF Est	71,13%	65% - 75%
%Gmm Est a Nini	89,65%	< 89%
%Gmm Est a Nmáx	97,11%	< 98%

- ✓ **Propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica para el número de giros de diseño, Ndis = 100 giros.**

MEZCLA	%ASFALTO EN MEZCLA DE PRUEBA	%ASFALTO ESTIMADO	%VACIOS CON AIRE	%VMA	%VAF
1	4,57%	5,04%	4,00%	13,85%	71,13%

- ✓ **Relación Filler / Ligante, Dp.**

Se calcula el porcentaje de ligante efectivo estimado,

$$P_{be} \text{ estimado} = 4,30\%$$

De tal forma, la relación filler – ligante será:

$$DP = 1,31 \%$$

El criterio SUPERPAVE para la aceptación o rechazo de esta relación es que debe encontrarse entre 0.6 – 1.6, lo que indica que este criterio se cumple para el presente prediseño.

✓ **Resultados del diseño preliminar:**

Se debe compactar los siguientes especímenes para determinar el porcentaje de ligante óptimo, a partir del Pb estimado de 5,0%.

Número de especímenes	% ligante
2	5,0%
2	5,5%
2	4,5%
2	6,0%

6.1.2 Determinación del Contenido Óptimo de Ligante (Base).

6.1.2.1 *Peso específico teórico máximo de las mezclas fabricadas con los diferentes porcentajes de bitumen.*

Muestra No.	A= Peso seco (g)	B= Peso recipiente con agua (g)	C= Peso recipiente con agua y muestra (g)	D= Peso específico, Gmm
Pbe	1100,1	2119,4	2767,6	2,4344
Pbe + 0.5%	1000,0	2118,6	2702,6	2,4038
Pbe - 0.5%	1000,8	2118,4	2712,2	2,4590
Pbe+1.0 %	900,4	2118,5	2639,9	2,3757

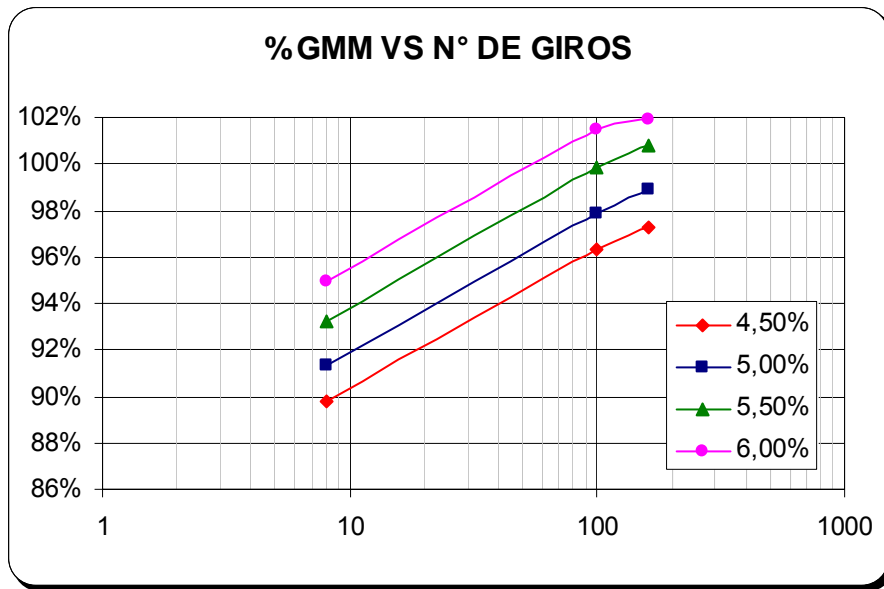
6.1.2.2 *Peso específico aparente y unitario de las diferentes mezclas asfálticas.*

Contenido de Asfalto	Muestra No.	A= Peso seco (g)	B= Peso sumergido (g)	C= Peso sss (g)	D= Peso específico aparente 25/25°C	E = Peso unitario a 25°C (Kg/m ³)	% Absorción agua	% Vacíos
Pbe	1	4604	2690,5	4609	2,400	2392,5921	0,26	1,42
	2	4598	2700,5	4604	2,416	2408,3037	0,32	0,77
Pbe + 0.5%	1	4598	2696,9	4600	2,416	2408,8098	0,11	0,00
	2	4602	2710,5	4606	2,428	2420,5719	0,21	0,00
Pbe - 0.5%	1	4601	2682,6	4608	2,390	2382,4644	0,36	2,82
	2	4598	2684,3	4606	2,393	2385,4951	0,42	2,70
Pbe+1.0 %	1	4595	2701,2	4598	2,423	2415,2336	0,16	0,00
	2	4586	2696,7	4591	2,421	2413,6842	0,26	0,00

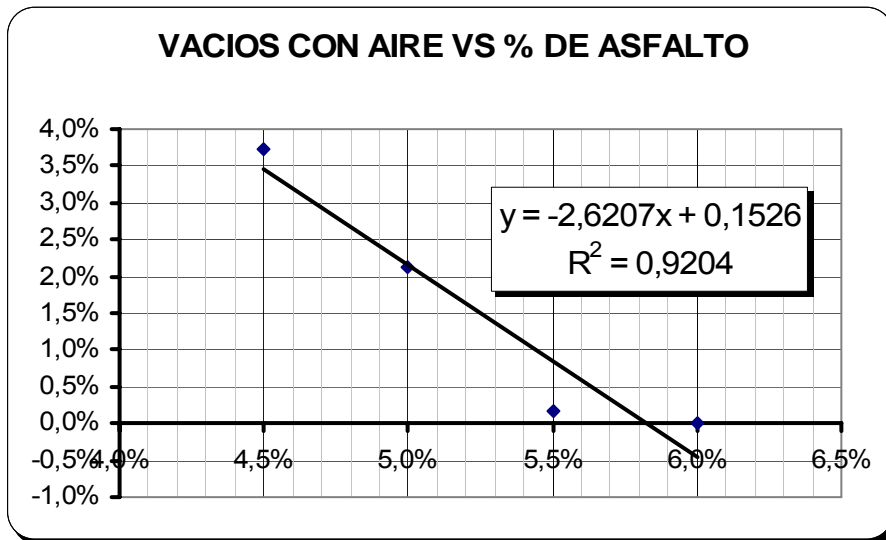
6.1.2.3 Resumen de la compactación de los especímenes de las diferentes mezclas.

% DE ASFALTO		%Gmm a Nini	%Gmm a Nmáx	%Gmm a Ndis	%Vacíos con Aire	% VAM	%VFA
Pbe - 0.5%	4,50%	89,82%	97,24%	96,29%	3,71%	13,99%	73,44%
Pbe	5,00%	91,36%	98,90%	97,88%	2,12%	13,89%	84,71%
Pbe + 0.5%	5,50%	93,21%	100,75%	99,84%	0,16%	13,73%	98,80%
Pbe + 1.0%	6,00%	94,92%	101,94%	101,47%	0,00%	13,80%	110,63%

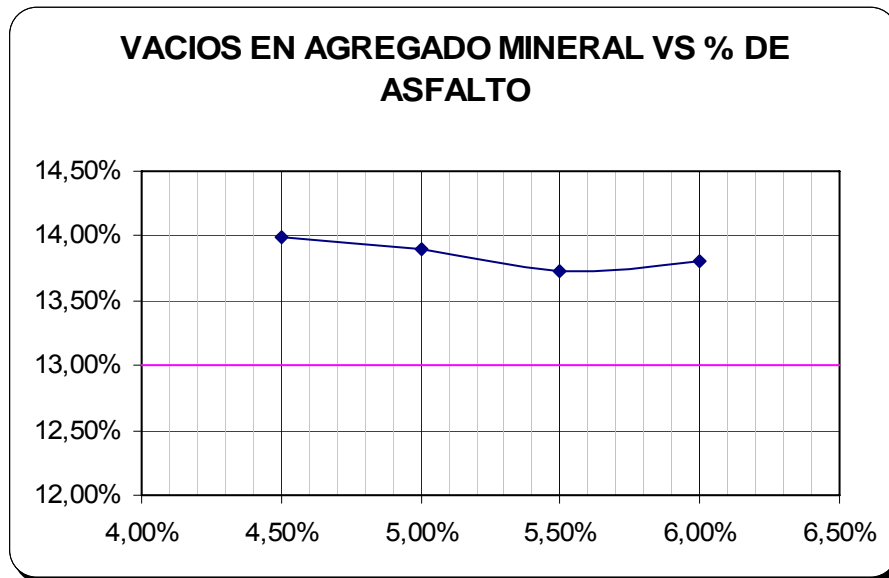
Gráfica 9. Comparación del porcentaje de compactación (%Gmm) para las diferentes proporciones de asfalto base 80-100.



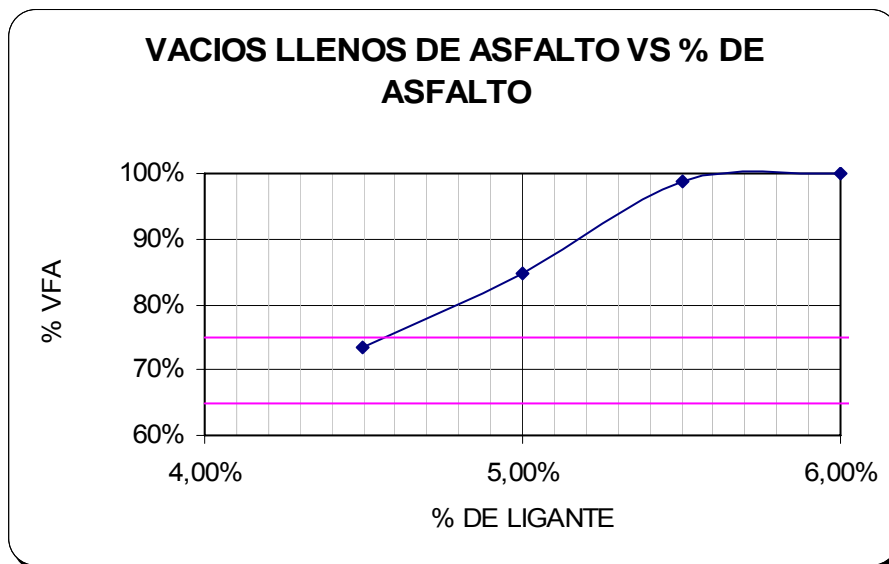
Gráfica 10. Curva de vacíos con aire para la mezcla con asfalto base 80-100.



Gráfica 11. Curva de vacíos en agregado mineral para la mezcla con asfalto base 80-100.



Gráfica 12. Curva de vacíos llenos de asfalto para la mezcla con asfalto base 80-100.



6.1.2.4 Resultados del diseño de la mezcla asfáltica.

Tabla 29. Resumen del diseño de la mezcla con asfalto base 80-100.

PROPIEDAD DE LA MEZCLA	RESULTADO	CRITERIO
% Vacíos de Aire	3,71%	4%
% VAM	13,99%	13% Min
% VFA	73,44%	65 - 75 %
Pb (Final)	4,5%	
Pb (Efectivo)	3,76%	
DP (polvo/ligante)	1,50	0.6 -1.6
% Gmm Ini	89,82%	89% Max
% Gmm Max	97,24%	98% Max

6.2 DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA CON ASFALTO MODIFICADO CON ELVALOY

6.2.1 Obtención del porcentaje de asfalto estimado, Pb estimado.

Gsb	Gsa	Gse	Gb Elvaloy
2,610	2,687	2,664	1,0033

Para el cálculo de la gravedad específica efectiva de la mezcla, Gse, se utiliza un factor de 0,7.

Para el diseño de la mezcla se asume el porcentaje de asfalto de 5%, por consiguiente la proporción restante de agregados es del 95%, para un volumen de vacíos de $0.04 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ de mezcla, equivalente al 4%.

Pb =	5,00%
Ps =	95,00%
Va (cm^3/cm^3) =	0,04
Vba (cm^3/cm^3) =	0,017

De acuerdo al tamaño máximo nominal de los agregados, $TM = \frac{3}{4}$ ", se obtiene el volumen de ligante asfáltico efectivo:

$$V_{be} = 0,089 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$$

El peso de los agregados en gramos por cm^3 de mezcla será de:

$$W_s = 2,244 \text{ gr}/\text{cm}^3$$

El porcentaje de bitumen inicial del diseño será:

$$P_{bi} = 4,56\%$$

El diseño de la mezcla asfáltica corresponde a un tránsito de diseño expresado en ejes equivalentes de entre 3 y 10 millones, para lo cual se tiene la siguiente disposición de giros en el proceso de compactación:

Ninicial	Ndiseño	Nmáx
8	100	160

Resumen de la compactación de los especímenes de prueba

MEZCLA	%ASFALTO	%GMM A Nini	%Gmm A Nmáx	%Gmm a Ndis	%Vacíos de aire	%VMA
1	4,56%	89,14%	96,35%	95,44%	4,56%	13,90%

A continuación se muestra el P_b estimado y el resumen de resultados del diseño preliminar, identificando los parámetros y requisitos a cumplir.

<i>P_b estimado</i>	4,78%	<i>Criterio</i>
%VAM Est	13,79%	> 13%
%VAF Est	70,99%	65% - 75%
%Gmm Est a Nini	89,70%	< 89%
%Gmm Est a Nmáx	96,91%	< 98%

- ✓ **Propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica para el número de giros de diseño, $N_{dis} = 100$ giros.**

MEZCLA	%ASFALTO EN MEZCLA DE PRUEBA	%ASFALTO ESTIMADO	%VACIOS CON AIRE	%VMA	%VAF
1	4,56%	4,78%	4,00%	13,79%	70,99%

- ✓ **Relación Filler / Ligante, D_p .**

Se calcula el porcentaje de ligante efectivo estimado,

$$P_{be} \text{ estimado} = 4,04\%$$

De tal forma, la relación filler – ligante será:

$$DP = 1,39 \%$$

El criterio SUPERPAVE para la aceptación o rechazo de esta relación es que debe encontrarse entre 0.6 – 1.6, lo que indica que este criterio se cumple para el presente prediseño.

✓ **Resultados del diseño preliminar:**

Se debe compactar los siguientes especímenes para determinar el porcentaje de ligante óptimo, a partir del Pb estimado de 4,8%.

Número de especímenes	% ligante
2	4,8%
2	5,3%
2	4,3%
2	5,8%

6.2.2 Determinación del Contenido Óptimo de Ligante (Elvaloy).

6.2.2.1 *Peso específico teórico máximo de las mezclas fabricadas con los diferentes porcentajes de bitumen.*

Muestra No.	A= Peso seco (g)	B= Peso recipiente con agua (g)	C= Peso recipiente con agua y muestra (g)	D= Peso específico, Gmm
Pbe	1100	2118.2	2767.1	2.4385
Pbe + 0.5%	1100.2	2118.1	2762.9	2.4159
Pbe - 0.5%	1100.1	2118.4	2772.2	2.4649
Pbe+1.0 %	1100	2117.9	2761.6	2.4107

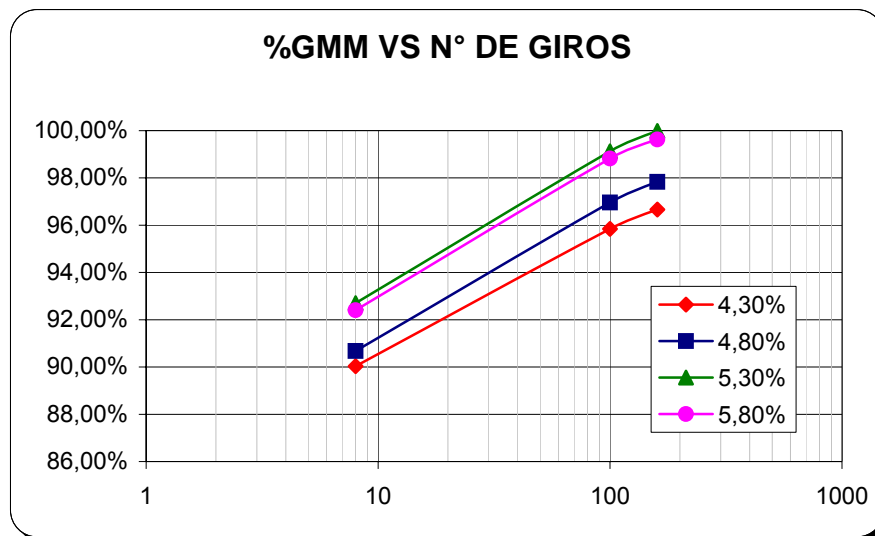
6.2.2.2 *Peso específico aparente y unitario de las diferentes mezclas asfálticas.*

Contenido de Asfalto	Muestra No.	A= Peso seco (g)	B= Peso sumergido (g)	C= Peso sss (g)	D= Peso específico aparente 25/25°C	E = Peso unitario a 25°C (Kg/m ³)	% Absorción agua	% Vacios
Pbe	1	4598	2683,3	4603	2,395	2387,9804	0,26	1,78
	2	4602	2674,3	4611	2,376	2369,0783	0,46	2,55
Pbe + 0.5%	1	4594	2700,5	4597	2,422	2415,0899	0,16	0,00
	2	4596	2695	4603	2,409	2401,5786	0,37	0,29
Pbe - 0.5%	1	4609	2688,6	4621	2,385	2377,9616	0,62	3,24
	2	4603	2675,2	4609	2,380	2373,1467	0,31	3,43
Pbe+1.0 %	1	4597	2695,8	4602	2,412	2404,3694	0,26	0,00
	2	4599	2680,3	4603	2,392	2384,7730	0,21	0,78

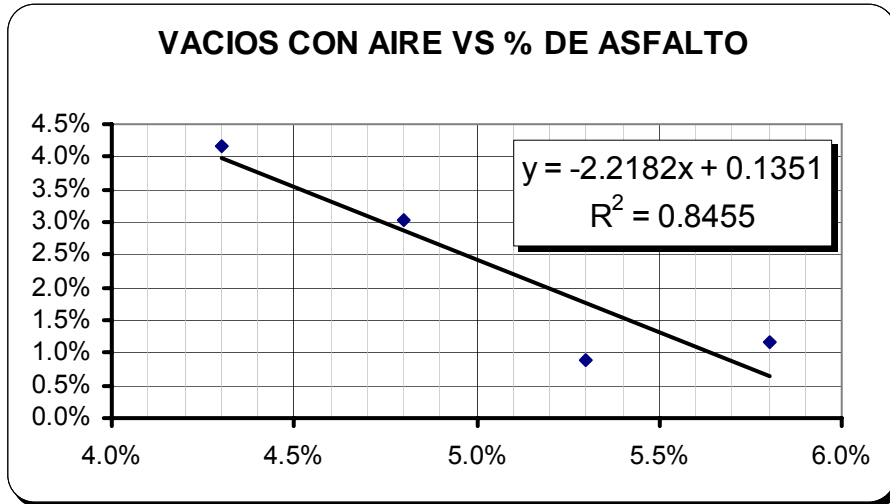
6.2.2.3 *Resumen de la compactación de los especimenes de las diferentes mezclas.*

% DE ASFALTO		%Gmm a Nini	%Gmm a N _{máx}	%Gmm a N _{dis}	%Vacios con Aire	% VAM	%VFA
Pbe - 0.5%	4.30%	90.04%	96.66%	95.85%	4.15%	13.99%	70.32%
Pbe	4.80%	90.68%	97.83%	96.96%	3.04%	14.38%	78.86%
Pbe + 0.5%	5.30%	92.70%	99.99%	99.13%	0.87%	13.73%	93.64%
Pbe + 1.0%	5.80%	92.41%	99.63%	98.82%	1.18%	14.63%	91.95%

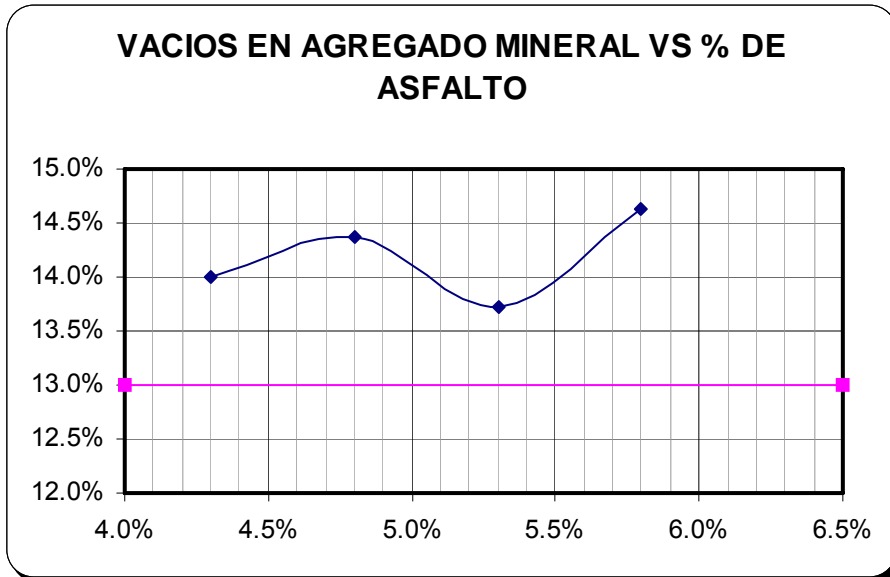
Gráfica 13. Comparación del porcentaje de compactación (%Gmm) para las diferentes proporciones de asfalto modificado con Elvaloy.



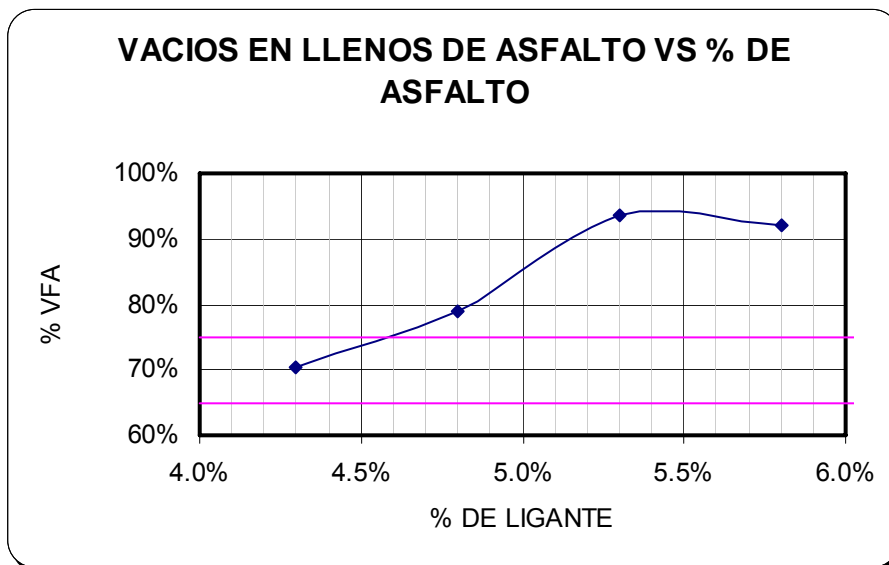
Gráfica 14. Curva de vacíos con aire para la mezcla con asfalto modificado con Elvaloy.



Gráfica 15. Curva de vacíos en agregado mineral para la mezcla con asfalto modificado con Elvaloy.



Gráfica 16. Curva de vacíos llenos de asfalto para la mezcla con asfalto modificado con Elvaloy.



6.2.2.4 Resultados del diseño de la mezcla asfáltica.

Tabla 30. Resumen del diseño de la mezcla con asfalto modificado con Elvaloy.

PROPIEDAD DE LA MEZCLA	RESULTADO	CRITERIO
% Vacíos de Aire	4,15%	4%
% VAM	13,99%	13% Min
% VFA	70,32%	65 - 75 %
Pb (Final)	4,3%	
Pb (Efectivo)	3,56%	
DP (polvo/ligante)	1,58	0.6 -1.6
% Gmm Ini	90,04%	89% Max
% Gmm Max	96,66%	98% Max

6.3 DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA CON ASFALTO MODIFICADO CON SBS

6.3.1 Obtención del porcentaje de asfalto estimado, Pb estimado.

Gsb	Gsa	Gse	Gb SBS
2,610	2,687	2,664	1,0029

Para el cálculo de la gravedad específica efectiva de la mezcla, G_{se} , se utiliza un factor de 0,7.

Para el diseño de la mezcla se asume el porcentaje de asfalto de 5%, por consiguiente la proporción restante de agregados es del 95%, para un volumen de vacíos de $0.04 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ de mezcla, equivalente al 4%.

Pb	5,00%
Ps	95,00%
Va (cm^3/cm^3) =	0,04
Vba (cm^3/cm^3) =	0,017

De acuerdo al tamaño máximo nominal de los agregados, $T_M = \frac{3}{4}$ ", se obtiene el volumen de ligante asfáltico efectivo:

$$V_{be} = 0,089 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$$

El peso de los agregados en gramos por cm^3 de mezcla será de:

$$W_s = 2,244 \text{ gr}/\text{cm}^3$$

El porcentaje de bitumen inicial del diseño será:

$$P_{bi} = 4,55\%$$

El diseño de la mezcla asfáltica corresponde a un tránsito de diseño expresado en ejes equivalentes de entre 10 y 30 millones, para lo cual se tiene la siguiente disposición de giros en el proceso de compactación:

Ninicial	Ndiseño	Nmáx
8	100	160

Resumen de la compactación de los especímenes de prueba

MEZCLA	%ASFALTO	%GMM A Nini	%Gmm A Nmáx	%Gmm a Ndis	%Vacíos de aire	%VMA
1	4,55%	90,32%	97,92%	96,90%	3,10%	13,64%

A continuación se muestra el P_b estimado y el resumen de resultados del diseño preliminar, identificando los parámetros y requisitos a cumplir.

Pb estimado	4,2 %	Criterio
%VAM Est	13,73%	> 13%
%VAF Est	70,88%	65% - 75%
%Gmm Est a Nini	89,42%	< 89%
%Gmm Est a N _{máx}	97,02%	< 98%

- ✓ **Propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica para el número de giros de diseño, N_{dis} = 100 giros.**

MEZCLA	%ASFALTO EN MEZCLA DE PRUEBA	%ASFALTO ESTIMADO	%VACIOS CON AIRE	%VMA	%VAF
1	4,55%	4,19%	4,00%	13,73%	70,88%

- ✓ **Relación Filler / Ligante, D_p.**

Se calcula el porcentaje de ligante efectivo estimado,

$$P_{be} \text{ estimado} = 3,45\%$$

De tal forma, la relación filler – ligante será:

$$DP = 1,63 \%$$

El criterio SUPERPAVE para la aceptación o rechazo de esta relación es que debe encontrarse entre 0.6 – 1.6, lo que indica que este criterio no se cumple para el presente prediseño.

- ✓ **Resultados del diseño preliminar:**

Se debe compactar los siguientes especímenes para determinar el porcentaje de ligante óptimo, a partir del P_b estimado de 4,2%.

Número de especímenes	% ligante
2	4,2%
2	4,7%
2	3,7%
2	5,2%

6.3.2 Determinación del Contenido Óptimo de Ligante (SBS).

6.3.2.1 *Peso específico teórico máximo de las mezclas fabricadas con los diferentes porcentajes de bitumen.*

Muestra No.	A= Peso seco (g)	B= Peso recipiente con agua (g)	C= Peso recipiente con agua y muestra (g)	D= Peso específico, Gmm
Pbe	1100,0	2118,6	2770,9	2,4570
Pbe + 0.5%	1100,0	2118,5	2766,3	2,4326
Pbe - 0.5%	1100,0	2118,0	2773,8	2,4764
Pbe+1.0 %	1100,1	2118,2	2763,1	2,4167

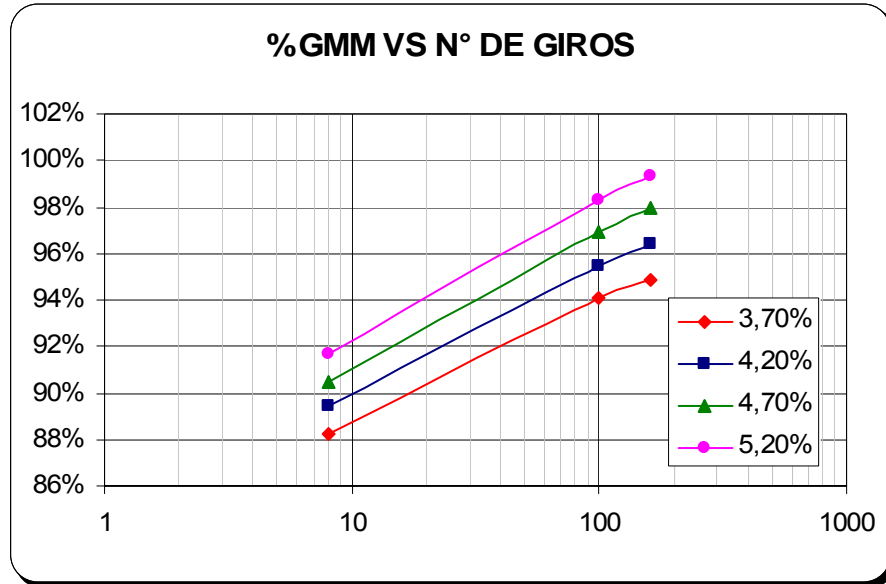
6.3.2.2 *Peso específico aparente y unitario de las diferentes mezclas asfálticas.*

Contenido de Asfalto	Muestra No.	A= Peso seco (g)	B= Peso sumergido (g)	C= Peso sss (g)	D= Peso específico aparente 25/25°C	E = Peso unitario a 25°C (Kg/m ³)	% Absorción agua	% Vacios
Pbe	1	4599	2673,3	4611	2,373	2366,3121	0,62	3,40
	2	4600	2668,0	4613	2,365	2357,9434	0,67	3,74
Pbe + 0.5%	1	4602	2679,3	4610	2,384	2376,4407	0,41	2,01
	2	4605	2676,6	4610	2,382	2374,6690	0,26	2,09
Pbe - 0.5%	1	4596	2659,4	4614	2,351	2344,3221	0,92	5,05
	2	4590	2656,8	4613	2,346	2339,3467	1,18	5,25
Pbe+1.0 %	1	4593	2689,0	4598	2,406	2398,7538	0,26	0,45
	2	4584	2674,0	4588	2,395	2387,7994	0,21	0,90

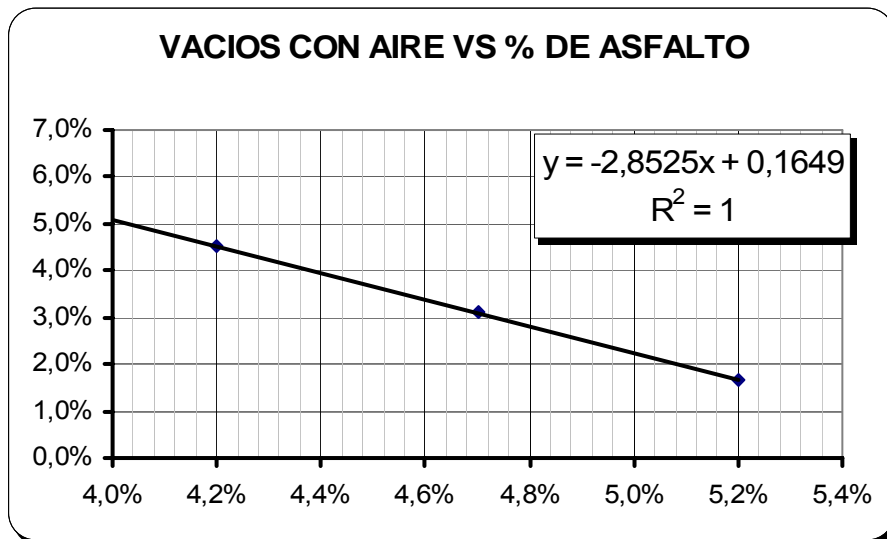
6.3.2.3 *Resumen de la compactación de los especímenes de las diferentes mezclas.*

% DE ASFALTO		%Gmm a Nini	%Gmm a Nmáx	%Gmm a Ndis	%Vacios con Aire	% VAM	%VFA
Pbe - 0.5%	3,70%	88,25%	94,85%	94,06%	5,94%	14,67%	59,52%
Pbe	4,20%	89,47%	96,43%	95,49%	4,51%	14,50%	68,89%
Pbe + 0.5%	4,70%	90,51%	97,95%	96,91%	3,09%	14,54%	78,72%
Pbe + 1.0%	5,20%	91,65%	99,33%	98,34%	1,66%	14,29%	88,40%

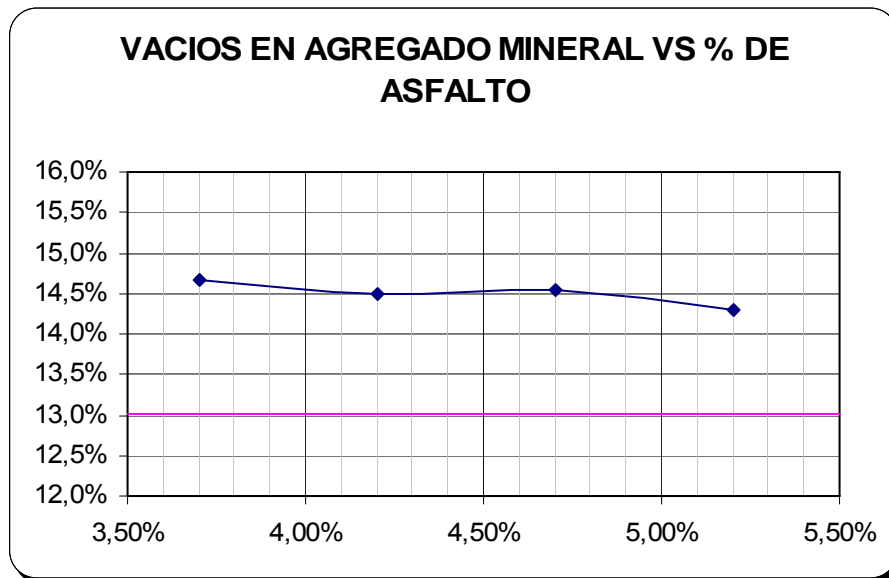
Gráfica 17. Comparación del porcentaje de compactación (%Gmm) para las diferentes proporciones de asfalto modificado con SBS.



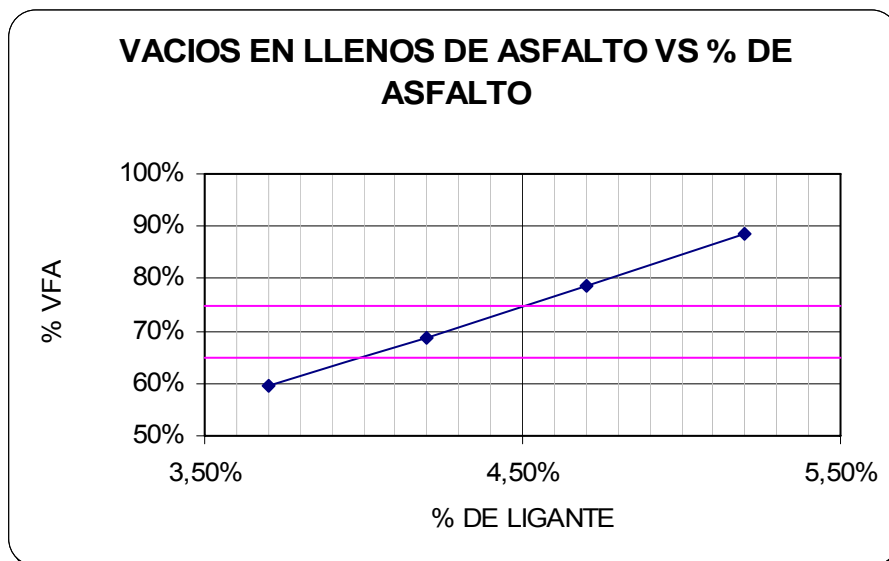
Gráfica 18. Curva de vacíos con aire para la mezcla con asfalto modificado con SBS.



Gráfica 19. Curva de vacíos en agregado mineral para la mezcla con asfalto modificado con SBS.



Gráfica 20. Curva de vacíos llenos de asfalto para la mezcla con asfalto modificado con SBS.



6.3.2.4 Resultados del diseño de la mezcla asfáltica.

Tabla 31. Resumen del diseño de la mezcla con asfalto modificado con SBS.

PROPIEDAD DE LA MEZCLA	RESULTADO	CRITERIO
% Vacíos de Aire	4,51%	4%
% VAM	14,50%	13% Min
% VFA	68,89%	65 - 75 %
Pb (Final)	4,2%	
Pb (Efectivo)	3,46%	
DP (polvo/ligante)	1,63	0.6 -1.6
% Gmm Ini	89,25%	89% Max
% Gmm Max	97,10%	98% Max

7. DETERMINACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL HUMEDECIMIENTO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS DISEÑADAS POR EL MÉTODO MARSHALL

Una vez fueron determinados los porcentajes óptimos de asfalto para cada tipo de mezcla se procedió a evaluar la susceptibilidad al humedecimiento de las mismas, mediante el ensayo de TSR (Tensile Strength Ratio), para el cual se compactan al menos seis especímenes por amasado en el compactador giratorio SUPERPAVE a un nivel de vacíos con aire comprendido entre el 6% y el 8%, una vez compactados, estos se dividen en dos subgrupos: seco y húmedo respectivamente. El subgrupo húmedo se acondiciona saturando con agua entre un 55% y 80% del volumen de vacíos con aire que ocupa la mezcla, después de este acondicionamiento se somete durante 24 horas a una inmersión en un baño de agua controlado a 60° Celsius. Después de dejar enfriar a temperatura ambiente estos especímenes, se fallan a compresión diametral y se toma la relación de esfuerzos de tensión, TSR. Las tablas 32, 33 y 34 muestran los valores correspondientes al TSR de cada una de las mezclas analizadas.

Tabla 32. Resultados de TSR sobre la mezcla con asfalto base (80-100).

SUSCEPTIBILIDAD A LA HUMEDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS - TSR				
SUBGRUPO HÚMEDO				
PROBETA	% DE VACIOS	% SATURACIÓN PARCIAL	% SATURACIÓN TOTAL	RESISTENCIA A TRACCIÓN (Kpa)
1	6.98	80.03	79.25	165.7
2	7.50	77.41	81.47	150.4
3	6.87	77.53	80.13	211.3
PROMEDIO	7.12	78.25	80.28	175.8
Desviación Estándar de la resistencia a tracción (KPa) *		31.68	Diferencia de Esfuerzos de tensión (Kpa)**	60.9
SUBGRUPO SECO				
4	7.16	-	-	352.2
5	7.44	-	-	379.6
6	6.67	-	-	368.6
PROMEDIO	7.09	-	-	366.8
Desviación Estándar de la resistencia a tracción (KPa) *		13.78	Diferencia de Esfuerzos de tensión (KPa)**	27.4
VALOR DE TSR = 48%				
INSPECCION VISUAL: Se evidencia stripping en la mezcla asfáltica				
GRADO DE FRACTURAMIENTO: No se evidencia fracturamiento				
% de Expansión durante saturación inicial = 0.18				
% de Expansión después del ciclo de humedecimiento = 0.66%				

Tabla 33. Resultados de TSR sobre la mezcla elaborada con asfalto base 80–100 modificado con Elvaloy.

SUSCEPTIBILIDAD A LA HUMEDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS - TSR				
SUBGRUPO HUMEDO				
PROBETA	% DE VACIOS	% SATURACIÓN PARCIAL	% SATURACIÓN TOTAL	RESISTENCIA A TRACCIÓN (Kpa)
1	7.00	75.99	68.86	606.7
3	7.13	78.46	68.21	612.0
5	6.96	70.00	61.98	637.3
8	6.67	72.50	62.10	684.1
10	7.08	72.25	64.95	673.8
PROMEDIO		73.84	65.22	642.78
Desviación Estándar de la resistencia a tracción (KPa) *		35.15	Diferencia de Esfuerzos de tensión (Kpa)**	77.4
SUBGRUPO SECO				
2	7.04	-	-	617.8
4	7.13	-	-	642.8
6	7.28	-	-	689.1
7	6.47	-	-	723.1
9	6.67	-	-	697.9
PROMEDIO	6.92	-	-	674.14
Desviación Estándar de la resistencia a tracción (KPa) *		42.85	Diferencia de Esfuerzos de tensión (KPa)**	105.3
VALOR DE TSR = 95%				
INSPECCION VISUAL: No se evidencia stripping en la mezcla asfáltica				
GRADO DE FRACTURAMIENTO: No se evidencia fracturamiento				
% de Expansión durante saturación inicial = 0.09%				
% de Expansión después del ciclo de humedecimiento = 0.08%				

Tabla 34. Resultados de TSR sobre la mezcla elaborada con asfalto base 80-100 modificado con SBS.

SUSCEPTIBILIDAD A LA HUMEDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS - TSR				
SUBGRUPO HUMEDO				
PROBETA	% DE VACIOS	% SATURACIÓN PARCIAL	% SATURACIÓN TOTAL	RESISTENCIA A TRACCIÓN (Kpa)
2	6.59	66.55	65.38	371.3
4	6.73	76.08	71.22	371.7
7	6.46	74.35	76.44	464.2
8	7.00	70.50	69.13	373.0
11	7.41	79.45	68.03	376.0
PROMEDIO	6.84	75.09	71.21	391.3
Desviación Estándar de la resistencia a tracción (KPa) *		40.7	Diferencia de Esfuerzos de tensión (Kpa)**	92.4
SUBGRUPO SECO				
5	6.63	-	-	607.0
6	7.18	-	-	612.1
9	6.50	-	-	634.3
10	7.55	-	-	611.8
12	6.43	-	-	645.2
PROMEDIO	6.86	-	-	622.07
Desviación Estándar de la resistencia a tracción (KPa) *		16.70	Diferencia de Esfuerzos de tensión (KPa)**	38.17
VALOR DE TSR = 63%				
INSPECCION VISUAL: Se evidencia stripping en la mezcla asfáltica				
GRADO DE FRACTURAMIENTO: No se evidencia fracturamiento				
% de Expansión durante saturación inicial = 1.23%				
% de Expansión después del ciclo de humedecimiento = 3.53%				

Se puede concluir que la mezcla preparada con el asfalto base tiene alta probabilidad de sufrir desprendimiento de partículas, por su alta susceptibilidad a la humedad.

Por otra parte, la mezcla preparada con el asfalto modificado con Elvaloy presenta una mejora sustancial en la interacción con el agua, pues supera ampliamente las especificaciones respecto al parámetro TSR.

Finalmente, aunque el polímero SBS otorga una mejora, la mezcla preparada con este asfalto modificado sigue siendo propensa a presentar stripping.

8. CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS DISEÑADAS POR EL MÉTODO MARSHALL

8.1 MÓDULOS DINÁMICOS

La evaluación de módulos dinámicos de las mezclas analizadas se realizó a temperaturas de 5°, 25° y 40° Celsius, y una frecuencia de aplicación de cargas de 2.5 Hz, lo cual simula el paso de un vehículo a una velocidad aproximada de 20 Km/hora. Las tablas 35, 36 y 37 muestran los datos de módulos dinámicos para cada una de las mezclas analizadas¹⁸.

Este análisis se realiza a ésta velocidad, porque representa la condición más crítica al significar un mayor tiempo de aplicación de la carga sobre la estructura de pavimento; teniendo en cuenta que las especificaciones para éste ensayo permiten el análisis a frecuencias de 2.5, 5.0 y 10.0 Hz, equivalentes a velocidades de paso 20, 40 y 80 Km./h respectivamente.

Ecuación 46. Relación Frecuencia – Velocidad de aplicación de carga.

$$f(\text{Hz}) \approx \frac{V(\text{Km}/h)}{8}$$

**Tabla 35. Módulos dinámicos a 3 temperaturas y 1 frecuencia.
MDC-2 elaborada con asfalto base 80-100.**

Briqueta	19	20	19	20	19	20
Frecuencia	2.5 Hz					
Temperatura	5.0°C		25°C		40°C	
Módulo Dinámico (MPa)	12020	14199	1481	1646	285	248
	12182	13300	1409	1750	255	249
Promedio	12101	13750	1445	1698	270	249
Promedio	12925		1572		259	
Error (%)*	1.35	-6.33	-4.86	6.32	-1053	0.40

¹⁸ Ver: Anexo D, donde se ilustran los reportes del NAT para la determinación de los Módulos Dinámicos a diferentes temperaturas.

**Tabla 36. Módulos dinámicos a 3 temperaturas y 1 frecuencia.
MDC-2 elaborada con asfalto base 80-100 modificado con Elvaloy.**

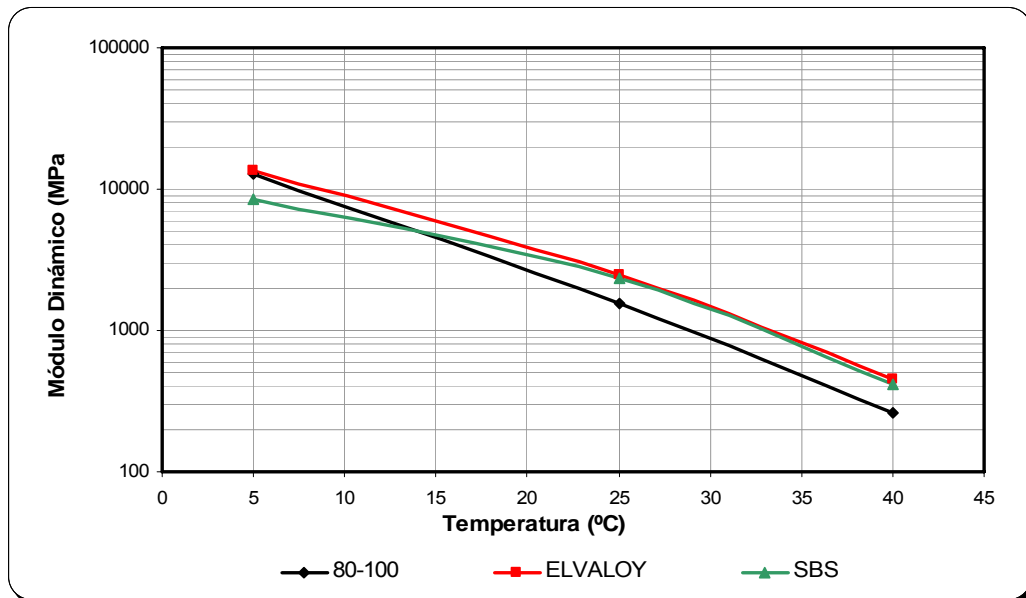
Briqueta	19	20	19	20	19	20
Frecuencia	2.5 Hz					
Temperatura	5.0°C		25°C		40°C	
Módulo Dinámico (MPa)	14166	14590	2694	2241	412	527
	13469	11754	2562	2268	409	453
Promedio	13818	13172	2628	2255	411	490
Promedio	13495		2441		450	
Error (%)*	-4.92	-19.44	-4.90	1.20	-0.73	-14.04

**Tabla 37. Módulos dinámicos a 3 temperaturas y 1 frecuencia.
MDC-2 elaborada con asfalto base 80-100 modificado con SBS.**

Briqueta	12	15	12	15	12	15
Frecuencia	2.5 Hz					
Temperatura	5.0°C		25°C		40°C	
Módulo Dinámico (MPa)	8379	8638	2399	2363	377	451
	8176	8451	2336	2319	397	459
Promedio	8278	8545	2368	2341	387	455
Promedio	8411		2354		421	
Error (%)	-2.42	-2.16	-2.63	-1.86	5.31	1.77

La gráfica 21 muestra el comportamiento dinámico de las tres mezclas asfálticas analizadas en su estado original (sin envejecimiento).

Gráfica 21. Módulos dinámicos de las mezclas asfálticas.



8.2 DEFORMACIÓN PERMANENTE

La prueba es útil para identificar el potencial de ahuellamiento de una mezcla asfáltica, teniendo en cuenta los siguientes criterios:

1. La mezcla no será ahuellable si al cabo de los 3600 ciclos de carga el porcentaje de deformación axial (relación entre la deformación vertical final y el espesor inicial) en los especímenes es menor del 1%.
2. La mezcla podrá ser ahuellable si esta deformación axial se encuentra entre el 1% y el 2%.
3. La mezcla es ahuellable cuando esta deformación supera el 2%.

Las tablas 38, 39 y 40 muestran los valores correspondientes a la deformación permanente de las mezclas analizadas.

Tabla 38. Deformación permanente (RLA) para la mezcla asfáltica elaborada con asfalto base 80-100.

Espécimen	11	19
Altura (mm)	55.0	55.0
Diámetro (mm)	100.0	100.0
Temperatura de ensayo (Celsius)	40	40
Esfuerzo de ensayo (100 Kpa)	100	100
Duración del ensayo (pulsos)	3600	3600
Esfuerzo de acondicionamiento (Kpa)	10	10
Período de acondicionamiento (seg.)	120	120
Porcentaje de deformación axial después de acondicionamiento	0.0890	0.1320
Porcentaje de deformación axial después de 10 Pulsos	0.6447	0.3683
Porcentaje de deformación axial después de 100 Pulsos	1.0342	0.6068
Porcentaje de deformación axial después de 1000 Pulsos	1.4915	1.5909
Porcentaje de deformación axial después de 1400 Pulsos	1.5496	2.2329
Porcentaje de deformación axial después de 1800 Pulsos	1.5789	2.3473
Porcentaje de deformación axial después de 3600 Pulsos	1.6335	3.0516
Promedio de deformación axial % : 2.3426		

De la tabla 38 se puede predecir que la mezcla asfáltica preparada con asfalto base 80-100, será susceptible al ahuellamiento, al presentar un porcentaje de deformación axial superior a 2%.

Tabla 39. Deformación permanente (RLA) para la mezcla asfáltica elaborada con asfalto base 80-100 modificado con Elvaloy.

Espécimen	7	20
Altura (mm)	55.0	55.0
Diámetro (mm)	100.0	100.0
Temperatura de ensayo (Celsius)	40	40
Esfuerzo de ensayo (100 Kpa)	100	100
Duración del ensayo (pulsos)	3600	3600
Esfuerzo de acondicionamiento (Kpa)	10	10
Período de acondicionamiento (seg.)	120	120
Porcentaje de deformación axial después de acondicionamiento	0.1679	0.1050
Porcentaje de deformación axial después de 10 Pulsos	0.5081	0.2479
Porcentaje de deformación axial después de 100 Pulsos	0.6363	0.3440
Porcentaje de deformación axial después de 1000 Pulsos	0.7604	0.3929
Porcentaje de deformación axial después de 1400 Pulsos	0.7679	0.3950
Porcentaje de deformación axial después de 1800 Pulsos	0.7774	0.3945
Porcentaje de deformación axial después de 3600 Pulsos	0.8090	0.3805
Promedio de deformación axial % : 0.5948		

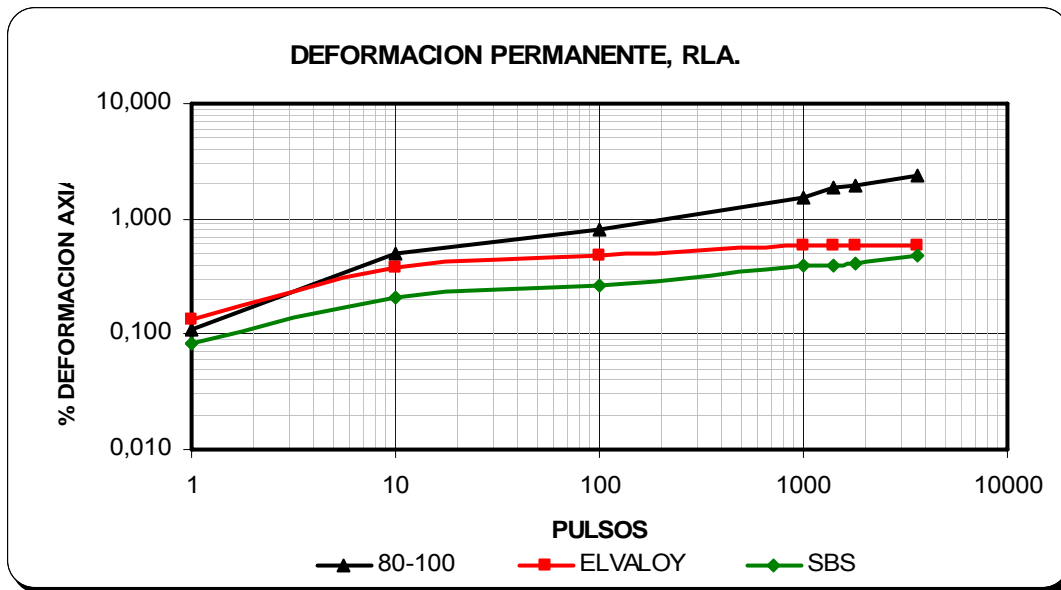
El promedio de deformación axial que presenta la mezcla elaborada con asfalto modificado con Elvaloy deja ver la contribución a las propiedades de la misma que tiene éste polímero, pues al ser menor del 1%, la mezcla no es susceptible a la deformación permanente.

Tabla 40. Deformación permanente (RLA) para la mezcla asfáltica elaborada con asfalto base 80-100 modificado con SBS.

Espécimen	4	8
Altura (mm)	55.0	55.0
Diámetro (mm)	100.0	100.0
Temperatura de ensayo (Celsius)	40	40
Esfuerzo de ensayo (100 Kpa)	100	100
Duración del ensayo (pulsos)	3600	3600
Esfuerzo de acondicionamiento (Kpa)	10	10
Período de acondicionamiento (seg.)	120	120
Porcentaje de deformación axial después de acondicionamiento	0.1281	0.0412
Porcentaje de deformación axial después de 10 Pulsos	0.3092	0.1001
Porcentaje de deformación axial después de 100 Pulsos	0.4076	0.1221
Porcentaje de deformación axial después de 1000 Pulsos	0.5039	0.2930
Porcentaje de deformación axial después de 1400 Pulsos	0.5137	0.2884
Porcentaje de deformación axial después de 1800 Pulsos	0.5223	0.2930
Porcentaje de deformación axial después de 3600 Pulsos	0.5475	0.4061
Promedio de deformación axial % : 0.4768		

Igualmente, el polímero SBS tiene un importante efecto en la mezcla asfáltica pues no permite que sea susceptible al ahuellamiento, con un promedio de deformación axial menor de 0.5%.

Gráfica 22. Deformación permanente en mezclas asfálticas.



8.3 FATIGA A ESFUERZO CONTROLADO

Los resultados de las pruebas de resistencia a la fatiga y módulo dinámico por esfuerzo controlado se presentan en las tablas 41 y 42.

Las condiciones normales de ensayo son 20°C de temperatura y frecuencia de 2.5 Hz.

El criterio de falla utilizado fue hasta la ruptura completa del material.

Tabla 41. Resultados del ensayo de fatiga de la mezcla elaborada con asfalto base 80-100.

Probeta	$\sigma_{\chi_{max}}$ (kPa)	Módulo** (MPa)	No. CICLOS	Strain ($\mu\epsilon$)	Factor de área
1	90	1582	12174	116.6	0.61
2	90	1791	17905	103.0	0.60
3	90	1781	16100	103.6	0.60
4	130	1625	8780	164.0	0.60
5	130	1763	10786	151.2	0.61
6	130	1280	5681	208.2	0.61
7	150	1214	4486	253.3	0.61
8	150	1373	5138	224.0	0.61
9	150	1632	4798	188.4	0.61
10	200	1434	2632	285.9	0.63
11	200	2211	3516	185.4	0.62
13	330	1973	1027	342.9	0.57
14	320	1926	965	340.6	0.60
15	330	2013	898	336.1	0.60
16	320	1714	845	382.7	0.57
17	350	2038	647	352.1	0.59
18	350	2051	521	349.8	0.60

**Módulo determinado por tracción Indirecta.

Tabla 42. Resultados del ensayo de fatiga de la mezcla elaborada con asfalto base 80-100 modificado con Elvaloy.

Probeta	$\sigma_{x_{max}}$ (kPa)	Módulo** (MPa)	No. CICLOS	Strain ($\mu\epsilon$)	Factor de área
1	150	2675	60628	115.0	0.61
2	150	2250	28258	136.7	0.60
3	150	2970	99268	103.5	0.60
4	250	2609	13053	196.4	0.60
5	200	3219	55047	127.4	0.61
6	200	2616	23210	156.7	0.61
7	250	2735	14950	187.4	0.61
8	250	2673	17340	191.7	0.61
9	350	2632	4417	272.6	0.61
15	400	2448	3248	335.0	0.63
12	400	1860	615	440.9	0.62

En la Tabla 43 se presentan los resultados de la regresión lineal de los datos de las leyes de fatiga para el material, que corresponden a la ecuación de la ley de fatiga representada de la siguiente forma:

$$\text{Log}(y) = a \cdot \text{Log}(x) + b$$

Donde:

y = strain ($\mu\epsilon$)

x = número de ciclos de falla.

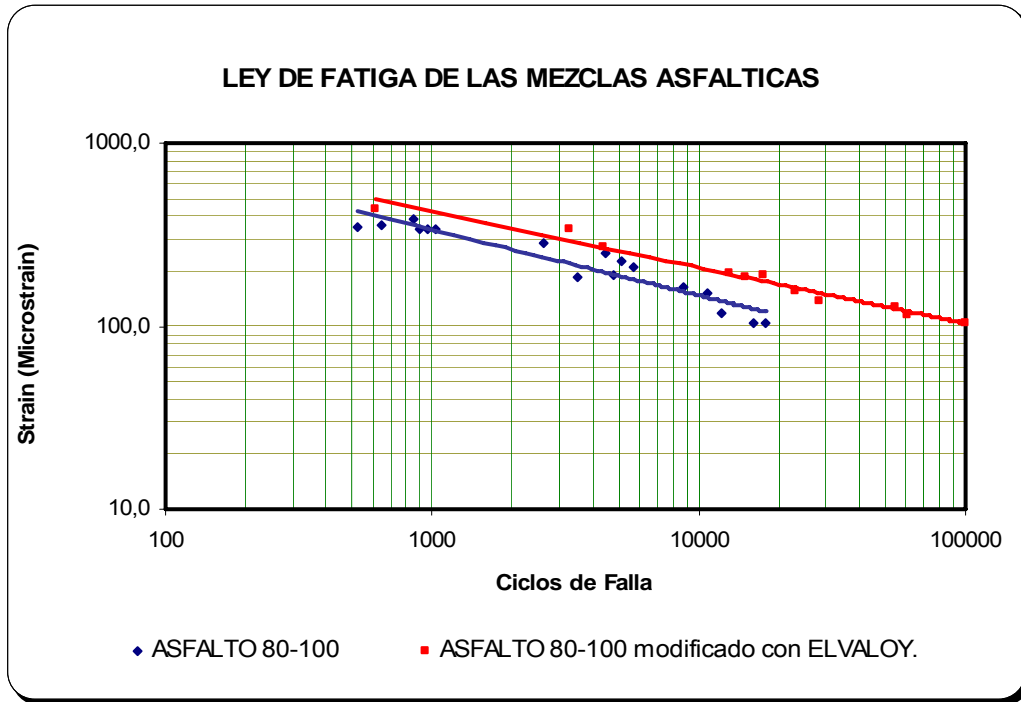
Tabla 43. Constantes de ecuación de ley de fatiga.

Ley	A	b	R ²
Asfalto base 80-100	-0.358	3.600	0.901
Asfalto modificado con ELVALOY	-0.305	3.539	0.976

En la gráfica 23 se observa la ley de fatiga para las mezclas asfálticas evaluadas. Obsérvese que la adición de Elvaloy proporciona mayor resistencia a la fatiga frente al asfalto original.¹⁹

¹⁹ La ley de fatiga solamente fue analizada para especímenes fabricados con asfalto original y modificado con Elvaloy. Puesto que en el momento de la finalización de la práctica empresarial no se contaba con los resultados de esta prueba para dicha mezcla.

Gráfica 23. Leyes de fatiga de las mezclas asfálticas.



9. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

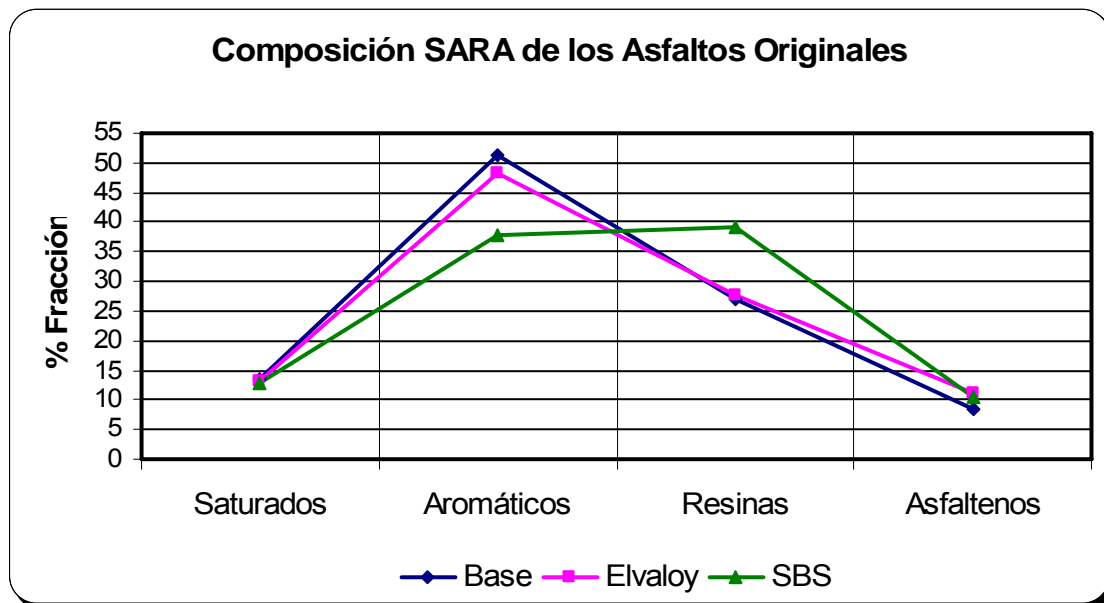
9.1 COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS 3 ASFALTOS ESTUDIADOS

9.1.1 Composición química de los Asfaltos.

La estructura interna del asfalto se ve modificada en la medida que se le adicione algún tipo de aditivo o mejorador, y de la misma forma en la medida que este se oxide o envejezca por los procesos de producción de la mezcla, y después de la puesta de la carpeta asfáltica.

En la gráfica 24 se muestra la composición química de cada uno de los 3 asfaltos utilizados en el estudio, discriminada en las 4 fracciones SARA (Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfaltenos), identificándose un cambio evidente del asfalto base 80-100, que fue modificado con los polímeros Elvaloy y SBS. El cambio en la proporción de las fracciones es mucho mayor para el asfalto modificado con SBS, pues se observa una clara disminución de compuestos aromáticos que se transformaron en resinas por el mismo proceso de modificación.

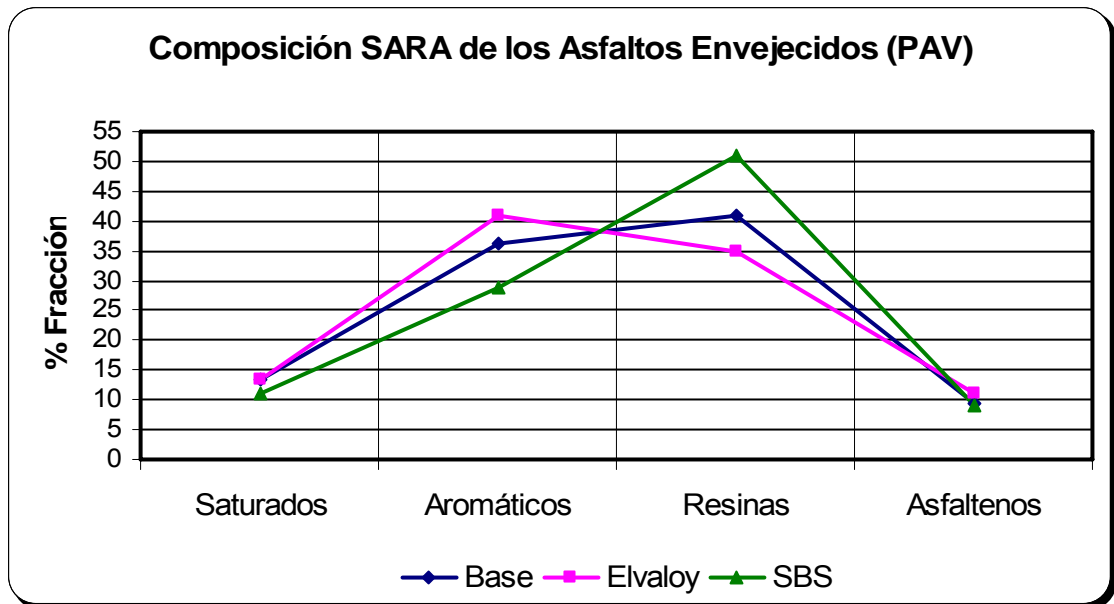
Gráfica 24. Comparación de las fracciones SARA – Estado Original.



La transformación que presenta el asfalto al ser modificado con SBS también tiene que ver con un envejecimiento previo que sufre durante tal proceso, pues se somete a una temperatura de 180°C durante 6 horas.

Después del envejecimiento simulado en el ensayo PAV, los tres tipos de asfalto muestran la misma tendencia mencionada anteriormente, disminuyendo la proporción de aromáticos y aumentando la de resinas. Nuevamente, el cambio más evidente se presentó en el asfalto modificado con SBS.

Gráfica 25. Comparación de las fracciones SARA después de ensayo PAV.

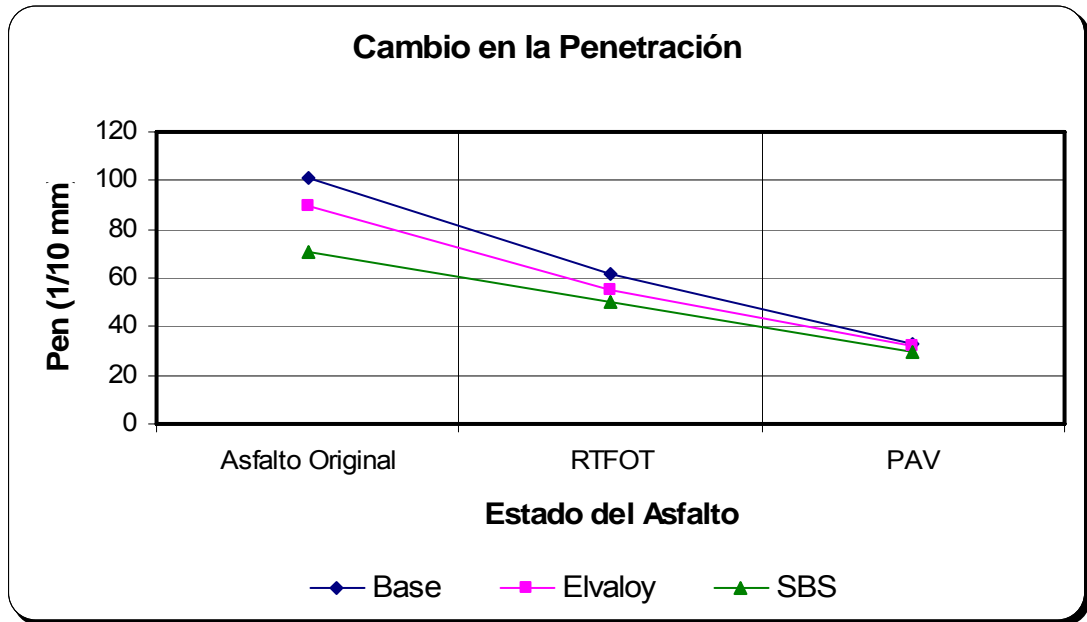


En la gráfica 25 se evidencia que la estructura del asfalto original y la del modificado con Elvaloy después del ensayo PAV, presenta una composición de las fracciones SARA muy similar a la que tiene en estado original el asfalto modificado con SBS.

9.1.2 Consistencia de los asfaltos estudiados.

Si se analiza el comportamiento de los tres asfaltos desde el punto de vista de la consistencia, a parte de la viscosidad, la penetración es otra opción para compararlos. Así, en la gráfica 26 se observa que la adición de los polímeros otorga una condición más dura al asfalto original, aunque si se analiza después de la simulación de envejecimiento en la vida de servicio, el comportamiento de los tres tipos de asfalto es muy similar; claro está, bajo las condiciones estandarizadas con las que se realizó el ensayo de penetración, es decir, bajo una temperatura de 25°C.

Gráfica 26. Comparación de la consistencia por penetración de los 3 asfaltos, en las diferentes etapas de envejecimiento.

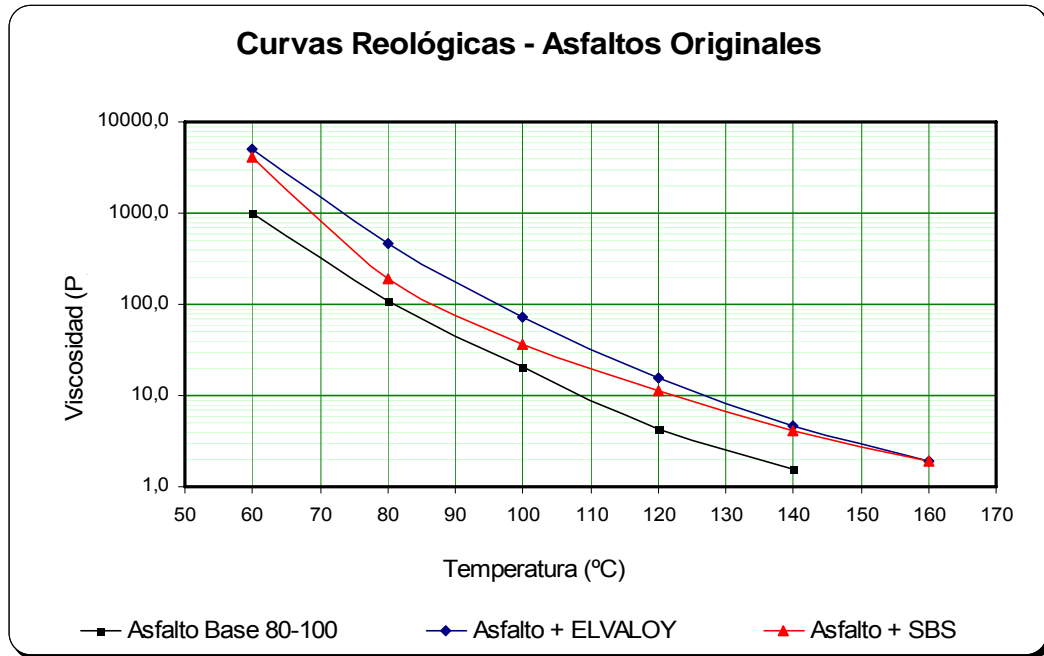


Nótese también que el asfalto base al tener una mayor pendiente en la curva de penetración (gráfica 26), pierde más rápidamente sus propiedades, al tener una mayor velocidad de envejecimiento.

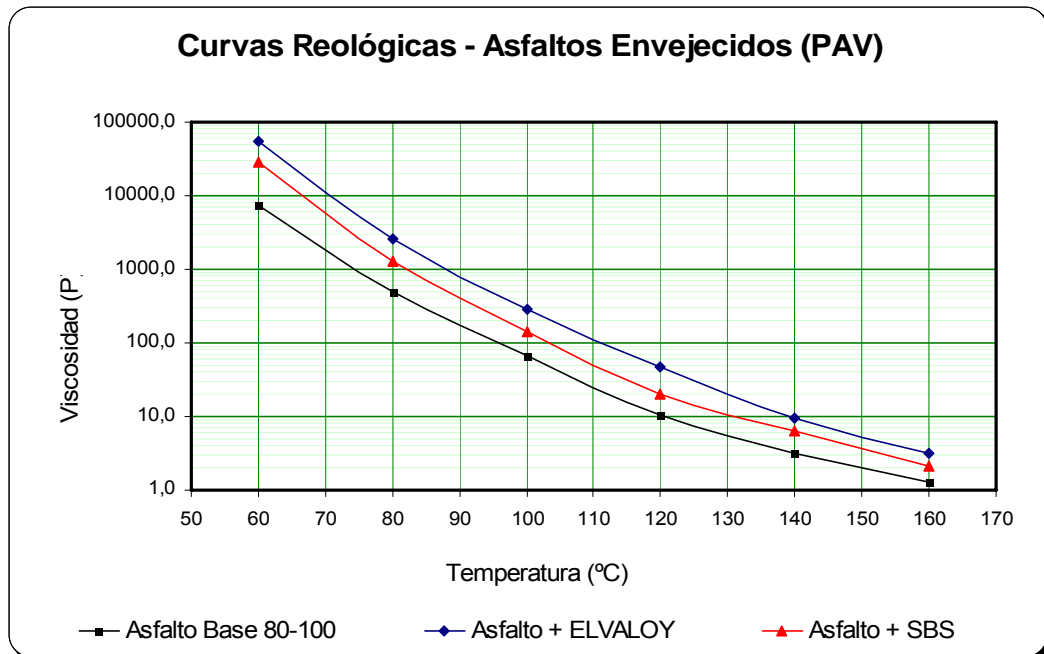
Si se analiza la consistencia a altas temperaturas, a partir de la viscosidad de los tres tipos de asfalto, tanto en el estado original como después de la simulación de envejecimiento (gráficas 27 y 28 respectivamente), se evidencia un claro aporte de los polímeros aumentando la dureza del asfalto a partir de temperaturas cercanas a la máxima de servicio en verano (60°C), lo que sin duda disminuirá la probabilidad de que la mezcla una vez preste su servicio al tránsito se ahuelle, o presente otros daños como corrimientos.

Igualmente, la gráfica 28 muestra como los tres asfaltos tienen aproximadamente la misma dependencia a la temperatura, pero su consistencia es muy distinta. Siendo el asfalto modificado con Elvaloy el más duro, respecto a los otros dos asfaltos.

Gráfica 27. Comparación de la consistencia por viscosidad de los 3 asfaltos, en estado original.



Gráfica 28. Comparación de la consistencia por viscosidad de los 3 asfaltos, con envejecimiento PAV.



9.1.3 Susceptibilidad térmica de los asfaltos estudiados.

Debido al comportamiento termoplástico de los asfaltos se debe determinar que tan susceptible es a la temperatura. Partiendo de la caracterización física química del asfalto se calcula a continuación el índice de penetración. A partir de este valor se deduce la susceptibilidad térmica del asfalto y si este puede ser de uso vial.

Ecuación 47. Índice de Penetración.

$$IP = \frac{20 - 500A}{1 + 50A}$$

Donde:

$$A = \frac{\log [\text{Pen (Temp. Pto. Abland.)}] - [\log \text{Pen (25°C)}]}{(\text{Temp. Pto. Abland.}) - 25^\circ\text{C}}$$

Para el caso en estudio se tiene en la siguiente tabla los resultados del IP.

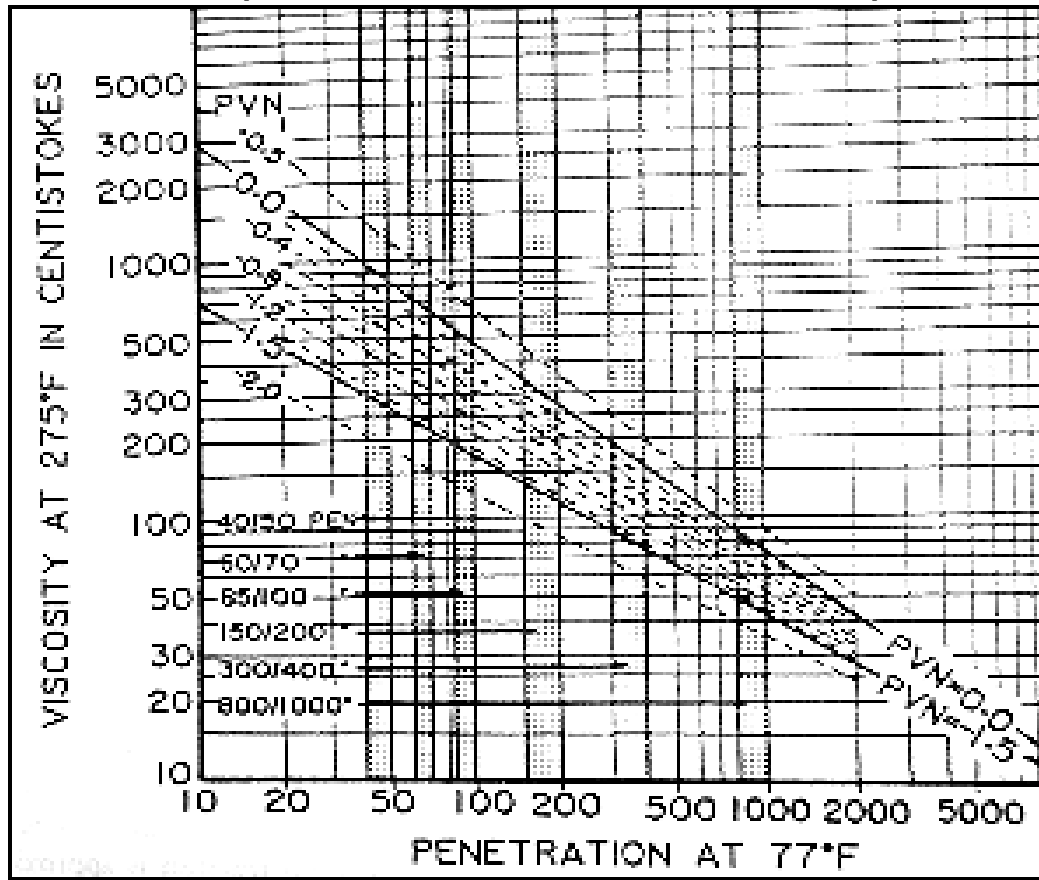
TIPO DE ASFALTO	T P.AB. °C	T PEN. °C	PEN (T P. AB.) 1/10mm	PEN (T P.) 1/10 mm	FACTOR A	IP
80-100	44,0	25	800	101	0,04730361	-1,085
ELVALOY	50,9	25	800	90	0,03663504	0,594
SBS	53,3	25	800	71	0,0371672	0,495

A medida que sea más bajo sea el valor del IP en un cemento asfáltico, mayor será la temperatura de susceptibilidad. Los asfaltos usados en pavimentos deben tener un valor de IP comprendido entre +1 y -1, y si este valor es menor de -2 son asfaltos muy susceptibles a la temperatura y muestran fragilidad a bajas temperaturas además de ser propensos al fisuramiento transversal en climas fríos²⁰. Al ver los resultados arrojados por los asfaltos en estudio puede decirse que responderán de buena manera a la temperatura en usos viales.

Otro valor calculado para dilucidar acerca de la temperatura de susceptibilidad es el PVN (Número Penetración – Viscosidad). Para hallar este valor es necesario basarse en la carta para determinación de valores de PVN en cementos asfálticos mostrada en la gráfica 29.

²⁰ NAPA – NCAT. Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction. Second Edition, 1996.

Gráfica 29. Carta para la determinación de valores de PVN para asfaltos.



Fuente: McLEOD, N.W. Asphalt Cements. Vol. 4. 1976.

Ecuación 48. Número Penetración – Viscosidad, PVN.

$$PVN = \frac{L - X}{L - M} * (-1.5)$$

Donde:

X= log de la viscosidad en centistokes medida a 135°C

L= log de la viscosidad a 135°C para PVN= 0.0

M= log de la viscosidad a 135°C para PVN= -1.5

Los datos que se obtuvieron son los siguientes:

Tabla 44. PVN para cada tipo de asfalto.

TIPO DE ASFALTO	PEN (T.P.) 1/10 mm	VISCOSIDAD 135°C (P)	PESO ESPECIFICO g/cm3	VISCOSIDAD 135°C (cSt)	L	M	X	PVN
80-100	101	2,2	1,0058	221,276	2,653	2,255	2,344	-1,162
ELVALOY	90	7,45	1,0033	747,458	2,716	2,204	2,873	0,461
SBS	71	5,9	1,0029	591,711	2,785	2,342	2,772	-0,044

Igualmente a medida que sea más bajo sea el valor del PVN en un cemento asfáltico, mayor será la temperatura de susceptibilidad. Para asfaltos de uso vial el valor de PVN debe estar comprendido entre +0.5 y -2.0²¹.

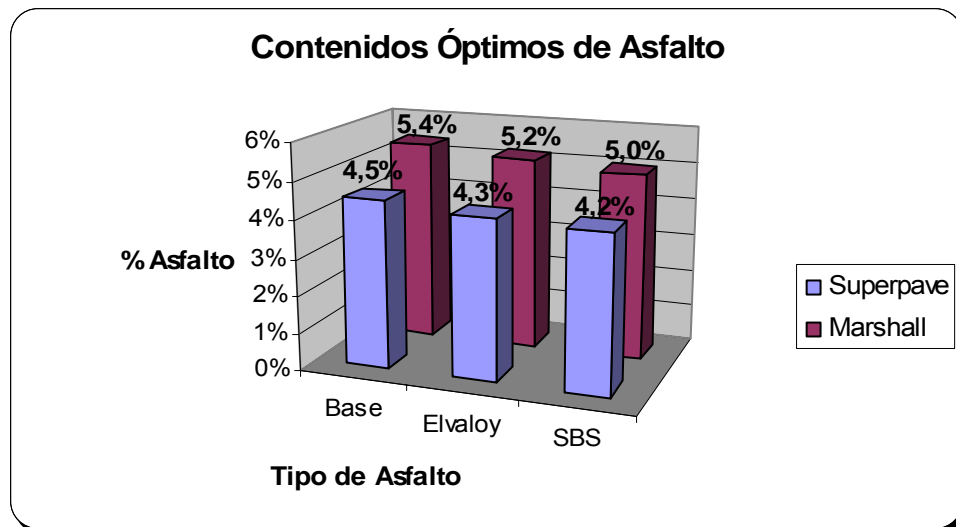
Ya que los valores de IP y PVN están comprendidos en los rangos estipulados puede decirse que el asfalto 80-100 de Barrancabermeja en estado base y modificado con los polímeros Elvaloy y SBS no son susceptibles a la temperatura y que pueden usarse en mezclas asfálticas de tipo vial.

9.2 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR LOS DOS MÉTODOS DE DISEÑO: MARSHALL Y SUPERPAVE

En cuanto a los contenidos óptimos de asfalto encontrados por las dos metodologías, se observa que por el Método Marshall dichas proporciones son más altas, cerca del 20% mayor que por el Método Superpave.

La diferencia en los contenidos óptimos encontrados se debe a la diferencia de criterios que maneja cada método para su obtención; además del tipo de compactación, pues como es bien conocido, la compactación giratoria Superpave brinda una mayor veracidad de lo que sucede realmente en campo, a la hora de la puesta de la carpeta asfáltica.

Gráfica 30. Comparación de los contenidos óptimos de asfalto encontrados.



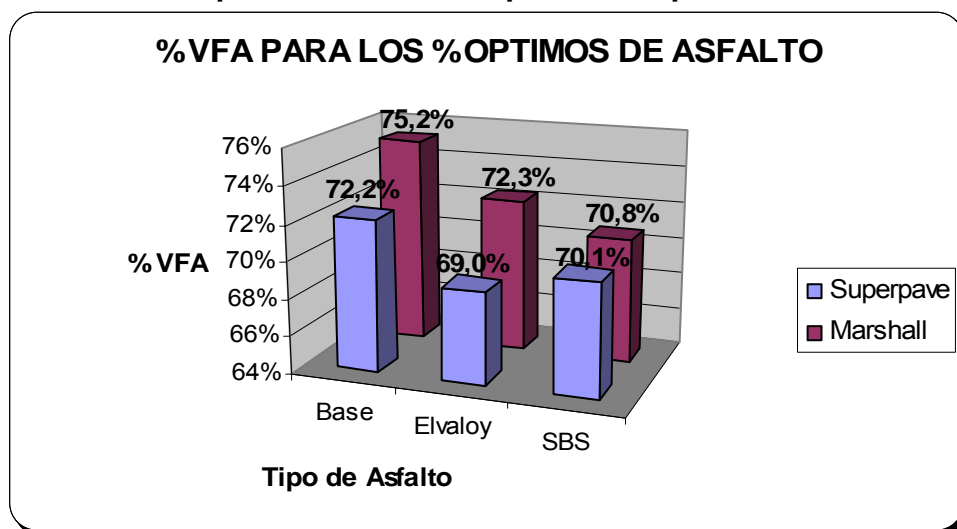
Además, en la gráfica 30 se observa que los asfaltos modificados con polímeros requieren menor proporción dentro de la mezcla, tal y como se espera, pues la

²¹ IDEM.

función de éstos es ser mejoradores de la adherencia entre el asfalto y los agregados, por lo que se alcanza un mayor recubrimiento de las partículas.

Lo anterior se evidencia en el comportamiento de los vacíos llenos de asfalto, como se muestra en la gráfica 31, donde se comparan las proporciones de VFA para cada diseño con su tipo de asfalto. De esto se puede deducir que el polímero permite que el asfalto recubra de mejor manera las partículas y así mismo quedará una menor cantidad de asfalto en los intersticios del cuerpo mineral. De la misma forma, la técnica de amasado del método Superpave, permite mayor recubrimiento de las partículas frente a la compactación por impacto del método Marshall.

Gráfica 31. Comparación de %VFA para el %Óptimo de cada asfalto.



9.3 ANÁLISIS DE LA CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS DISEÑADAS POR EL MÉTODO MARSHALL

La evaluación de las diferentes mezclas en cuanto a la susceptibilidad frente a la acción de la humedad, medida mediante el ensayo de TSR arrojó los siguientes valores:

Mezcla con Asfalto	Valor de TSR	Stripping
Base	48,0%	SI
Elvaloy	95,0%	NO
SBS	63,0%	SI

De esto se puede concluir que las mezclas elaboradas con asfalto base y la modificada con SBS mostraron susceptibilidad a la humedad y presentaron

disminución en la adherencia entre el ligante y el agregado, debido a que el valor de la relación de resistencias a la tensión es menor al 80%, tal y como lo estipula la norma ASTM D 4867-96.

Debe tenerse en cuenta que el efecto del agua en la mezcla depende tanto de la naturaleza del asfalto como de la naturaleza del agregado mineral, aunque como en el proyecto sólo se consideró un tipo de agregados, debe analizarse esta propiedad desde el punto de vista de los asfaltos. Por lo mismo, es evidente que el polímero Elvaloy brinda mayor adherencia al asfalto con el agregado mineral, lo que impermeabiliza más la mezcla y evita el daño que causa el agua.

Según la gráfica 21 (Numeral 8.1), se deduce que el efecto de los polímeros Elvaloy y SBS es sustancial en el módulo dinámico de las respectivas mezclas asfálticas respecto a la mezcla elaborada con el asfalto base 80-100 de Barrancabermeja.

Es de anotar que se encontró un efecto negativo en el comportamiento del módulo dinámico de la mezcla modificada con SBS para temperaturas menores a 15°C. No obstante, a partir de una temperatura de 25°C, las mezclas modificadas muestran un comportamiento muy similar entre ellas, y considerablemente superior a la mezcla elaborada con el asfalto base.

En cuanto al comportamiento de las mezclas ante la deformación permanente, se encontró que la mezcla elaborada con el asfalto base presentó susceptibilidad al ahuellamiento; mientras que al ser modificada con cualquiera de los polímeros la probabilidad de tal daño pasó a ser muy baja, pues tanto para Elvaloy como para SBS el porcentaje de deformación axial fue menor al 1%.

En la tabla 43 y gráfica 23 se evidencia la notable mejora que ofrece la alternativa de modificación del asfalto con Elvaloy en el comportamiento de la mezcla ante la fatiga, en este caso por esfuerzo controlado. Esto se justifica si se tiene en cuenta que la cohesión de la mezcla aumenta notablemente y por lo tanto le otorga mayor durabilidad.

10. ANÁLISIS DE LOS MÉTODOS DE DISEÑO SUPERPAVE Y MARSHALL UTILIZANDO PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA METODOLOGÍA RAMCODES

10.1 LA METODOLOGÍA RAMCODES

RAMCODES es el acrónimo de Rational Methodology for Compacted Geomaterial's Densification and Strength Analysis. Es una metodología que liga racionalmente las especificaciones de diseño con los criterios de control en campo mediante el uso del polígono de vacíos que define un área donde se cumplen todas las propiedades volumétricas de la mezcla, V_a , VMA y VFA. Los vacíos son función del contenido de asfalto en la mezcla y del peso específico bulk de cada mezcla compactada y se presenta en mapas como isolíneas para los valores permitidos, la intersección de estas líneas produce una construcción gráfica en el espacio %CA Vs. Gmb, que da lugar al polígono.

Teniendo en cuenta que anteriormente se describió cada metodología de diseño de la mezcla y la forma como se alcanzó el porcentaje óptimo de asfalto para cada uno de los asfaltos utilizados, 80-100, modificado con Elvaloy y modificado con SBS, se pretende mostrar en este análisis como en la metodología de diseño Marshall y Superpave existe un rango de valores de contenido de asfalto que cumple con los criterios exigidos en cada una de ellas.

10.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA LAS MEZCLAS POR CADA TIPO DE ASFALTO

El análisis se implementó para los datos obtenidos de los diseños realizados por los dos métodos: Marshall y Superpave; pero no como lo propone la metodología de Sánchez Leal F.J.²², en donde se hacen experimentos factoriales para varios niveles de compactación y se determinan superficies para los diferentes parámetros volumétricos que determinan la zona que cumple las diferentes especificaciones al respecto de dichos parámetros. Es decir, que solamente se encontraron los vértices de los puntos a partir de las curvas de V_a , VAM y VFA Vs. Contenido de asfalto, para ubicarlas como isolíneas en el espacio Gmb Vs. Contenido de asfalto.

10.2.1 Polígono de vacíos para el diseño de la mezcla con asfalto base.

El contenido de ligante óptimo obtenido por el método Superpave para el diseño de esta mezcla es de 4.5%, se dedujo a partir de los datos y criterios presentes en la tabla 45.

²² SÁNCHEZ LEAL, F.J. Metodología Racional para el Diseño de Mezclas Asfálticas Compactadas. Memorias de las Cuartas Jornadas Internacionales del Asfalto. Cartagena, 2004.

Tabla 45. Reporte final para el diseño Superpave con asfalto base 80-100.

Property	-0,5	0	0,5	1	Criteria	
%AC	4,5	5	5,5	6		
%Air Voids (Va)	3,71	2,12	0,16	-1,47	4	%
%VMA	13,37	13,27	13,11	13,18	13	% Min.
%VFA	72,21	84,00	98,74	111,13	65	% Min.
Max. Specific Gravity (Gmm)	2,459	2,434	2,404	2,376		
Bulk Specific Gravity (Gmb)	2,391	2,408	2,422	2,422		

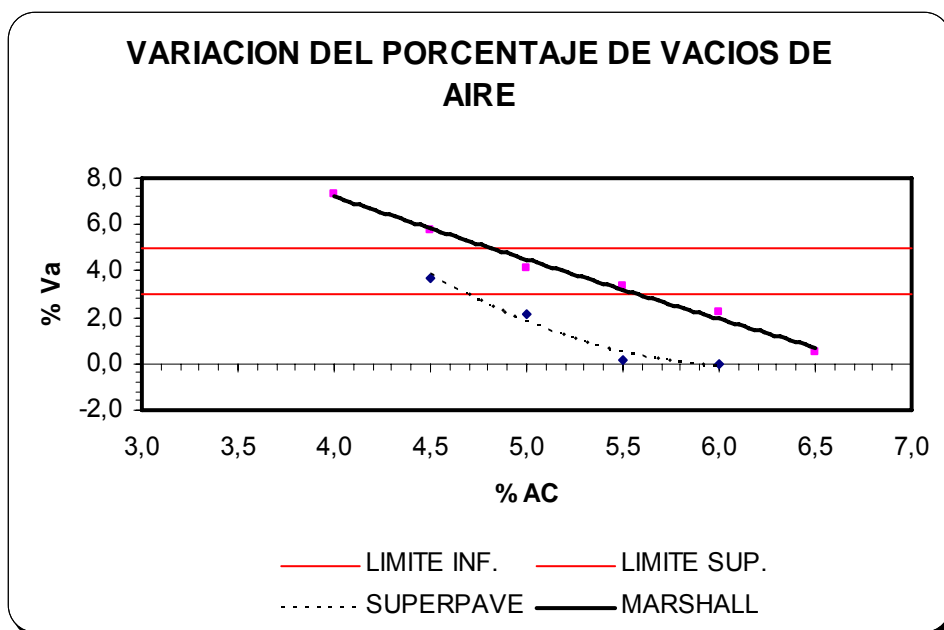
El contenido óptimo de ligante para el mismo tipo de asfalto a través de la metodología de diseño Marshall es de 5.4%. Los valores dados por las pruebas de ensayo se muestran en la tabla 46.

Tabla 46. Reporte final para el diseño Marshall con asfalto base 80-100

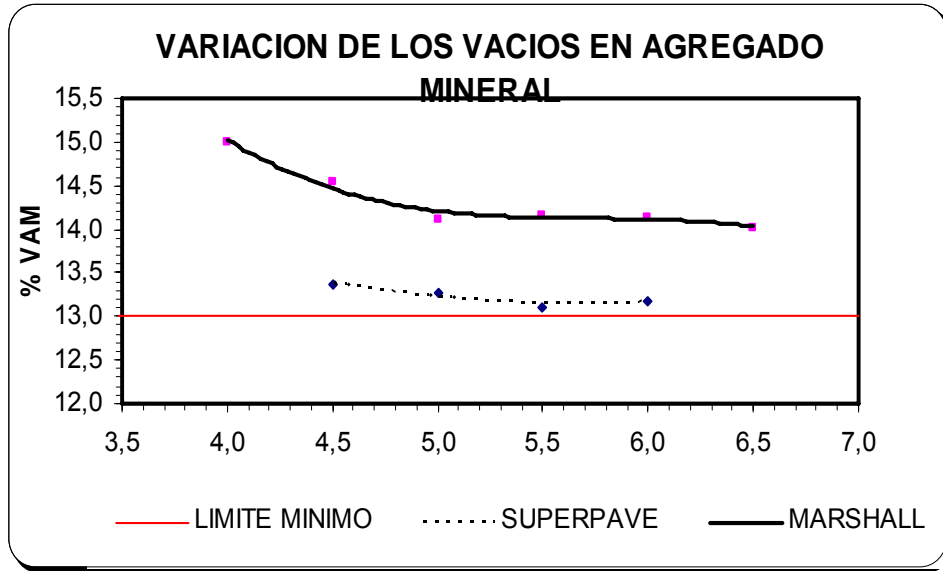
%AC	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
%Air Voids (Va)	7,314	5,795	4,161	3,344	2,243	0,509
%VMA	15,004	14,544	14,120	14,155	14,137	14,019
%VFA	51,275	60,157	70,534	76,406	84,133	96,379
Max. Specific Gravity (Gmm)	2,4934	2,4794	2,4621	2,4532	2,4390	2,4126
Bulk Specific Gravity (Gmb)	2,311	2,336	2,360	2,371	2,384	2,400

Las gráficas de la 32 a la 35 muestran como varían las propiedades volumétricas para cada contenido de asfalto dependiendo de la metodología con la que fue diseñada.

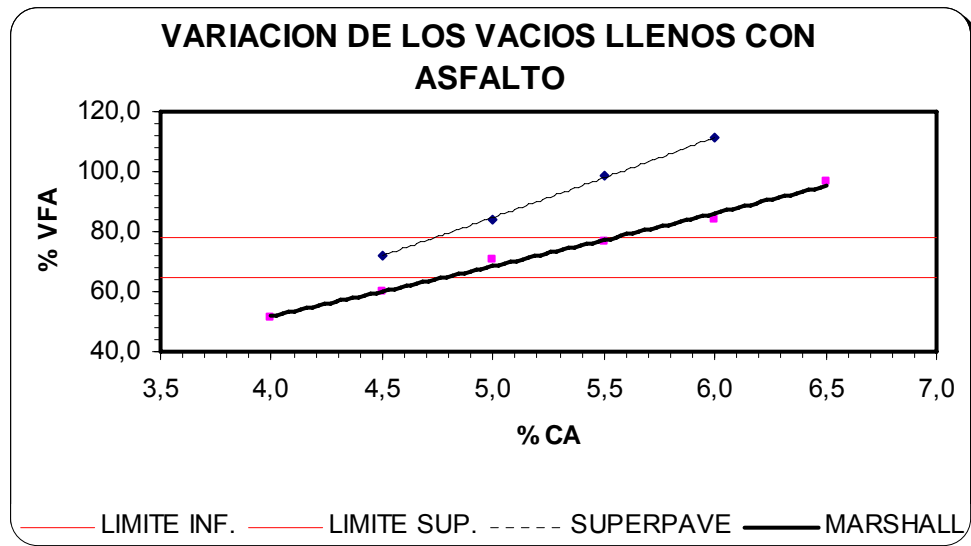
Gráfica 32. Comparación de la variación del contenido de vacíos con aire en la mezcla elaborada con asfalto base 80-100.



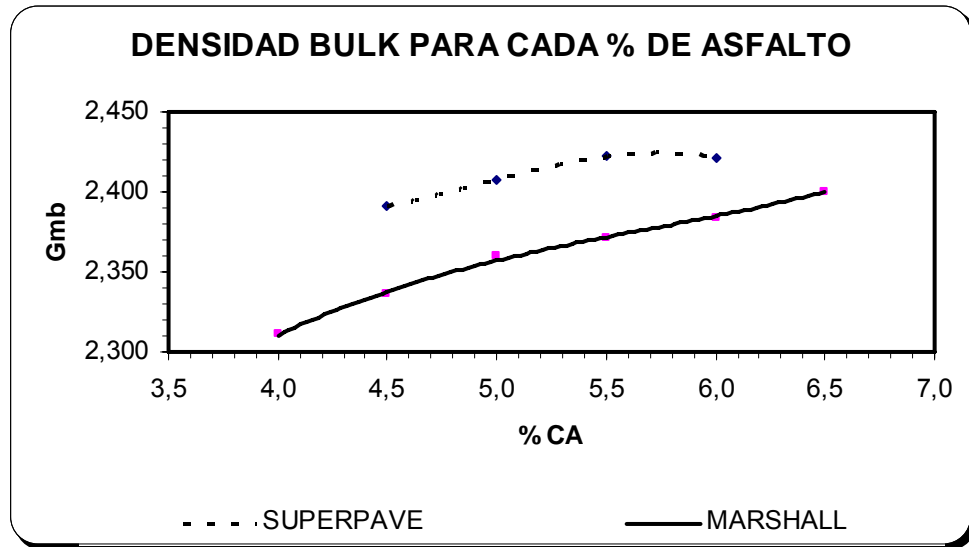
Gráfica 33. Comparación de la variación del contenido de vacíos en agregado mineral en la mezcla elaborada con asfalto base 80-100.



Gráfica 34. Comparación de la variación del contenido de vacíos llenos con asfalto en la mezcla elaborada con asfalto base 80-100.

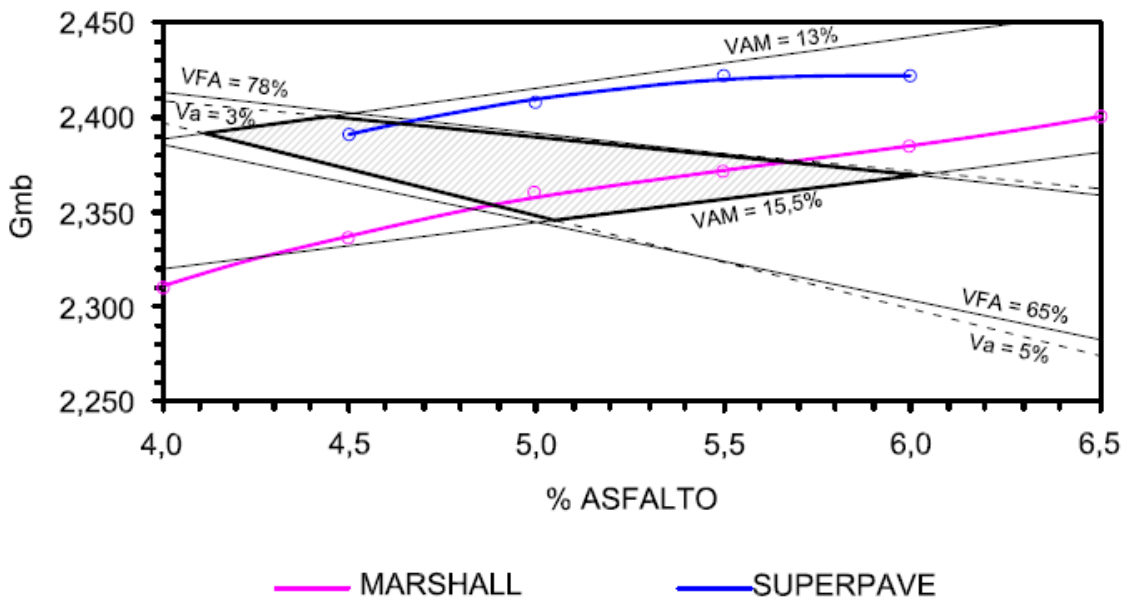


Gráfica 35. Comparación de la variación de la densidad Bulk en la mezcla elaborada con asfalto base 80-100.



Con los valores de las anteriores gráficas y teniendo en cuenta los criterios de los parámetros volumétricos se dibujan las isolíneas que producen la construcción del polígono de vacíos, lo cual nos lleva a demostrar que tanto para el diseño Marshall como el Superpave existe un rango de contenido de asfalto, no solo un valor óptimo, que cumple los requisitos volumétricos.

Gráfica 36. Polígono de vacíos de la mezcla elaborada con asfalto 80-100.



10.2.2 Polígono de vacíos para el diseño de la mezcla con asfalto modificado con Elvaloy.

El contenido de ligante óptimo obtenido por el método Superpave para el diseño de esta mezcla es de 4.3%, se dedujo a partir de los datos y criterios presentes en la tabla 47.

Tabla 47. Reporte final para el diseño Superpave con asfalto modificado con Elvaloy.

Property	-0,5	0	0,5	1	Criteria	
%AC	4,3	4,8	5,3	5,8		
%Air Voids (Va)	4,1	3,2	1,0		4,0	%
%VMA	13,4	13,9	13,2		13,0	% Min.
%VFA	69,0	77,2	92,4		65,0	% Min.
Max. Specific Gravity (Gmm)	2,465	2,438	2,416	2,411		
Bulk Specific Gravity (Gmb)	2,383	2,386	2,416	2,402		

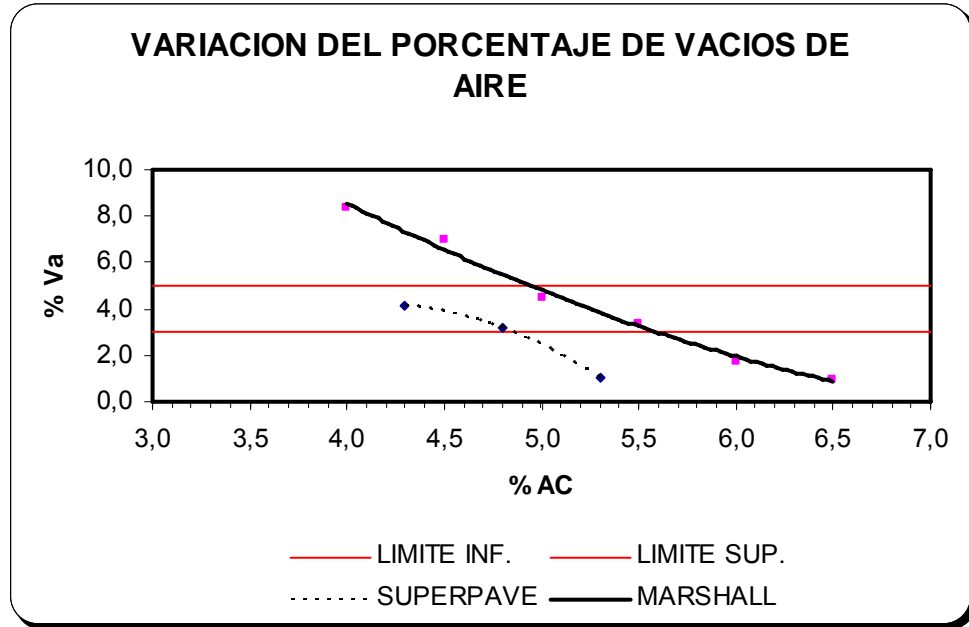
El contenido óptimo de ligante para el mismo tipo de asfalto a través de la metodología de diseño Marshall es de 5.2%. Los valores dados por las pruebas de ensayo se muestran en la tabla 48.

Tabla 48. Reporte final para el diseño Marshall con asfalto modificado con Elvaloy.

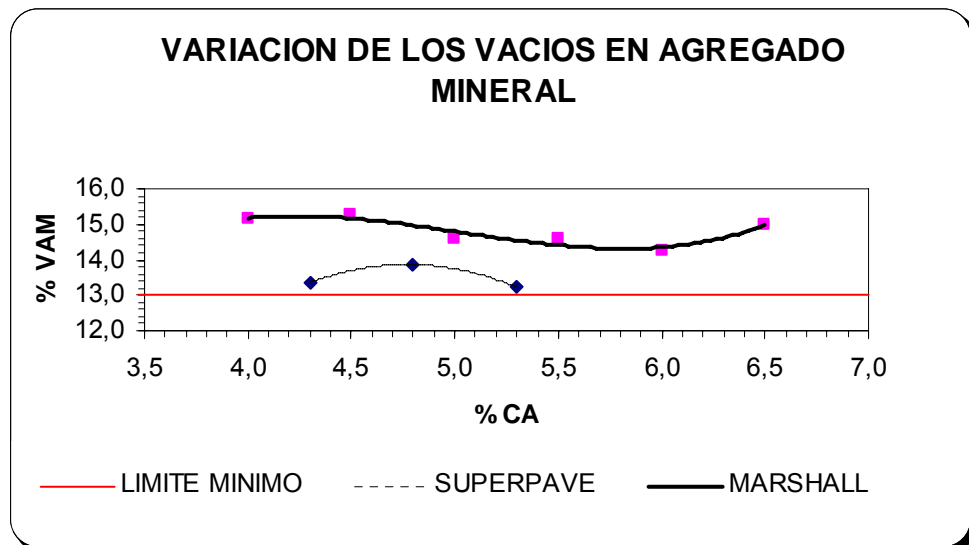
%AC	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
%Air Voids (Va)	8,351	7,012	4,498	3,370	1,754	0,986
%VMA	15,156	15,249	14,617	14,611	14,245	14,988
%VFA	44,911	54,048	69,235	76,971	87,735	93,470
Max. Specific Gravity (Gmm)	2,5171	2,4911	2,4565	2,4408	2,4238	2,3969
Bulk Specific Gravity (Gmb)	2,307	2,316	2,346	2,359	2,381	2,373

Las gráficas de la 37 a la 40 muestran como varían las propiedades volumétricas para cada contenido de asfalto dependiendo de la metodología con la que fue diseñada.

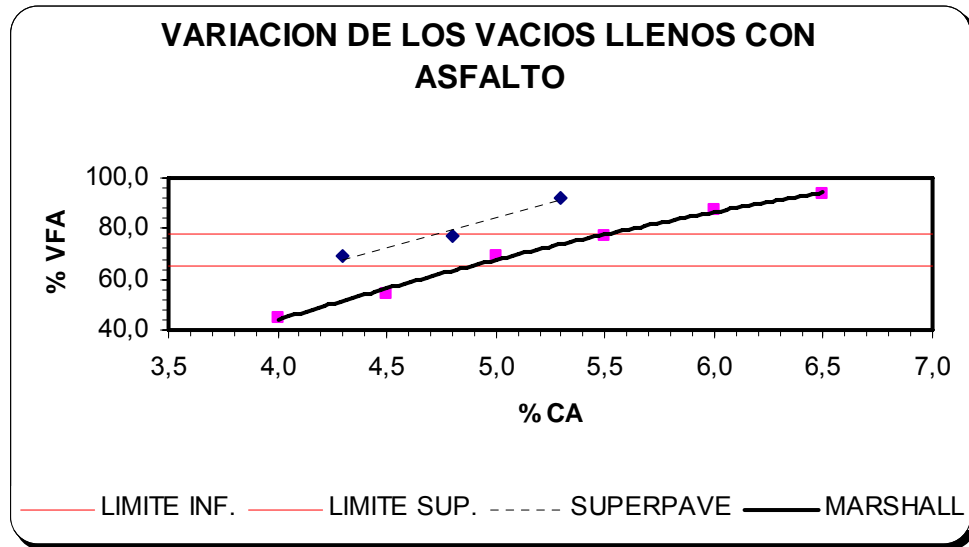
Gráfica 37. Comparación de la variación del contenido de vacíos con aire en la mezcla elaborada con asfalto modificado con Elvaloy.



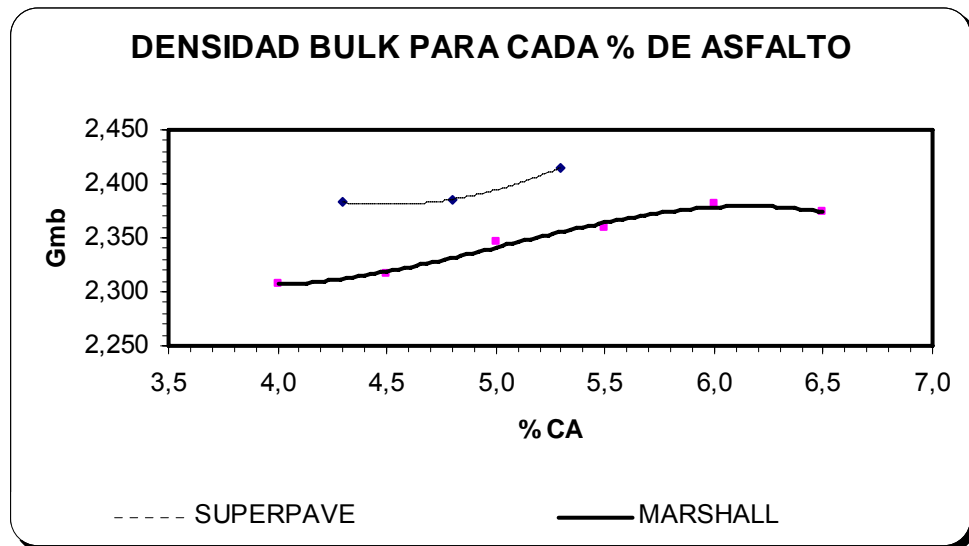
Gráfica 38. Comparación de la variación del contenido de vacíos en agregado mineral en la mezcla elaborada con asfalto modificado con Elvaloy.



Gráfica 39. Comparación de la variación del contenido de vacíos llenos con asfalto en la mezcla elaborada con asfalto modificado con Elvaloy.

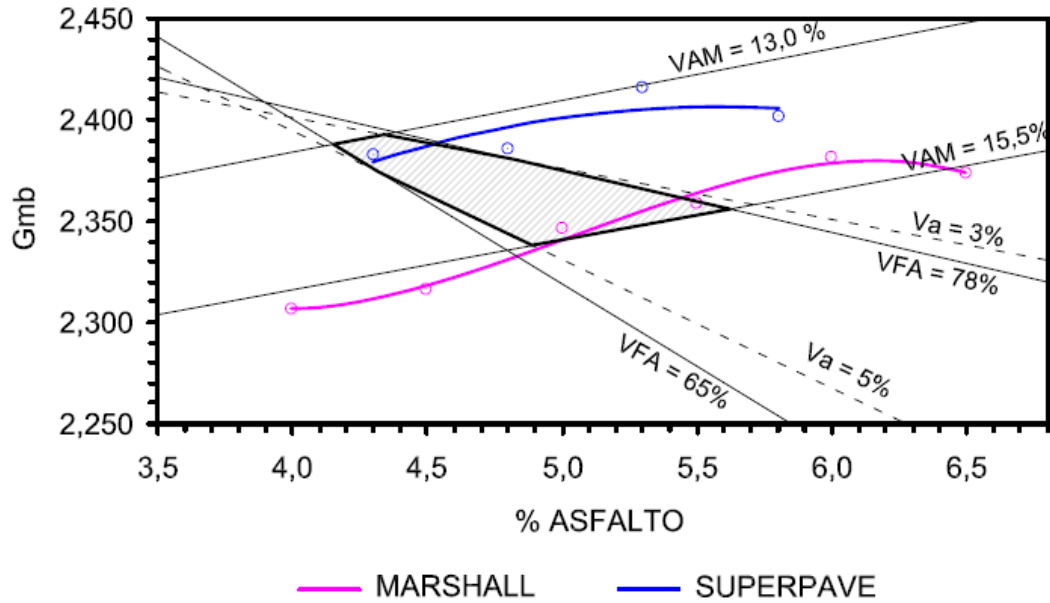


Gráfica 40. Comparación de la variación de la densidad Bulk en la mezcla elaborada con asfalto modificado con Elvaloy.



Con los valores de las anteriores gráficas y teniendo en cuenta los criterios de los parámetros volumétricos se dibujan las isóneas que producen la construcción del polígono de vacíos lo cual lleva a demostrar que tanto para el diseño Marshall como el Superpave existe un rango de contenido de asfalto, no solo un valor óptimo, que cumple los requisitos de estos requisitos volumétricos.

Gráfica 41. Polígono de vacíos de la mezcla elaborada con asfalto modificado con Elvaloy.



10.2.3 Polígono de vacíos para el diseño de la mezcla con asfalto modificado con SBS.

El contenido de ligante óptimo obtenido por el método Superpave para el diseño de esta mezcla es de 4.2%, se dedujo a partir de los datos y criterios presentes en la tabla 49.

Tabla 49. Reporte final para el diseño Superpave con asfalto modificado con SBS.

Property	-0,5	0	0,5	1	Criteria	
%AC	3,7	4,2	4,7	5,2	% % Min. % Min. % Max.	
%Air Voids (Va)	5,9	4,0	3,1	1,6		4,0
%VMA	14,1	13,4	13,9	13,6		13,0
%VFA	57,7	70,1	77,8	88,2		65,0
						75,0
Max. Specific Gravity (Gmm)	2,476	2,457	2,433	2,417		
Bulk Specific Gravity (Gmb)	2,349	2,382	2,383	2,402		

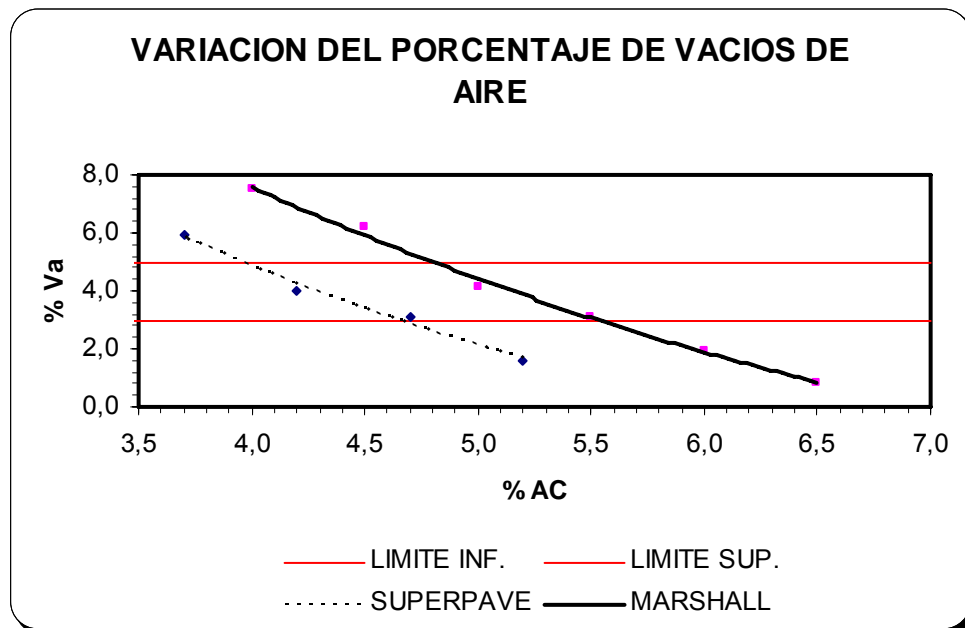
El contenido óptimo de ligante para el mismo tipo de asfalto a través de la metodología de diseño Marshall es de 5.0%. Los valores dados por las pruebas de ensayo se muestran en la tabla 50.

Tabla 50. Reporte final para el diseño Marshall con asfalto modificado con SBS.

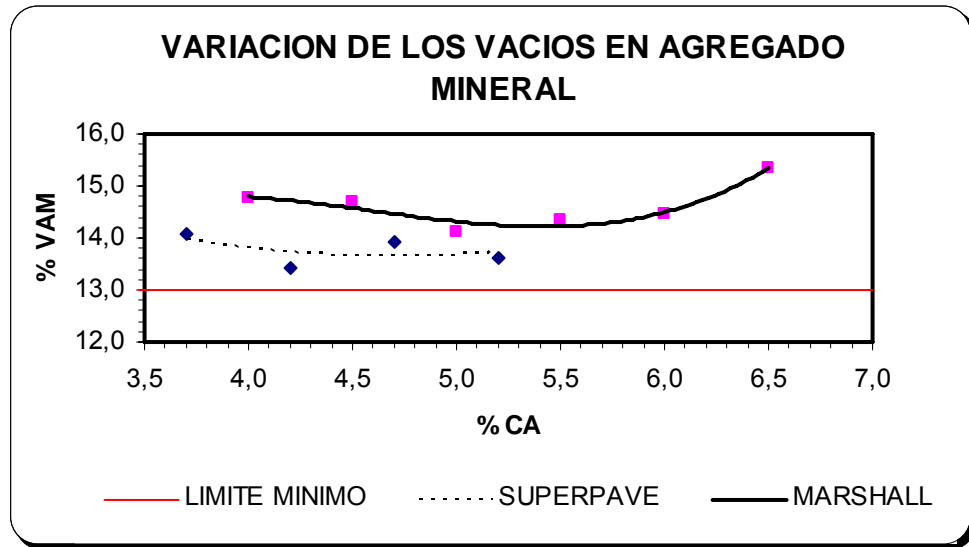
%AC	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
%Air Voids (Va)	7,487	6,187	4,131	3,137	1,938	0,825
%VMA	14,761	14,699	14,123	14,355	14,460	15,334
%VFA	49,282	57,919	70,766	78,156	86,613	94,652
Max. Specific Gravity (Gmm)	2,5060	2,4860	2,4620	2,4430	2,4230	2,3840
Bulk Specific Gravity (Gmb)	2,318	2,332	2,360	2,366	2,376	2,364

Las gráficas de la 42 a la 45 muestran como varían las propiedades volumétricas para cada contenido de asfalto dependiendo de la metodología con la que fue diseñada.

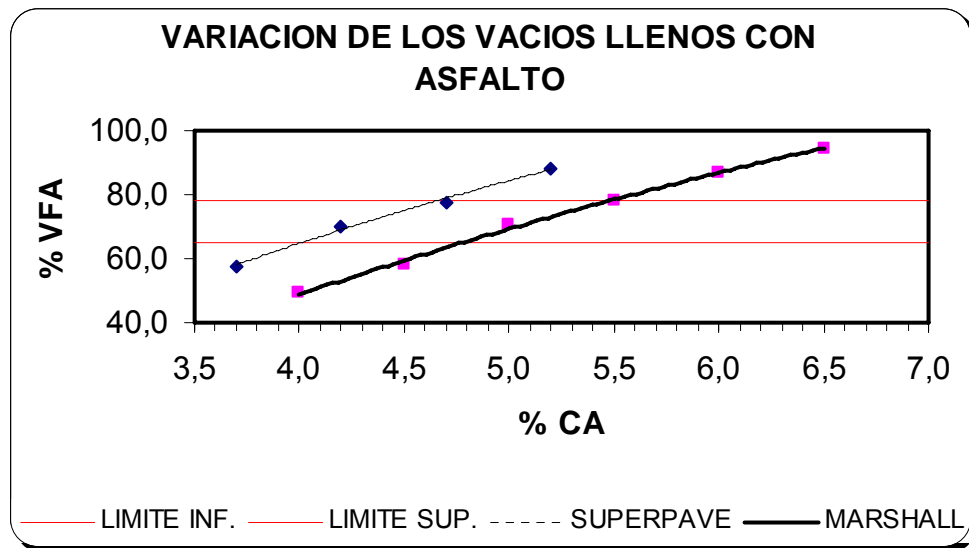
Gráfica 42. Comparación de la variación del contenido de vacíos con aire en la mezcla elaborada con asfalto modificado con SBS.



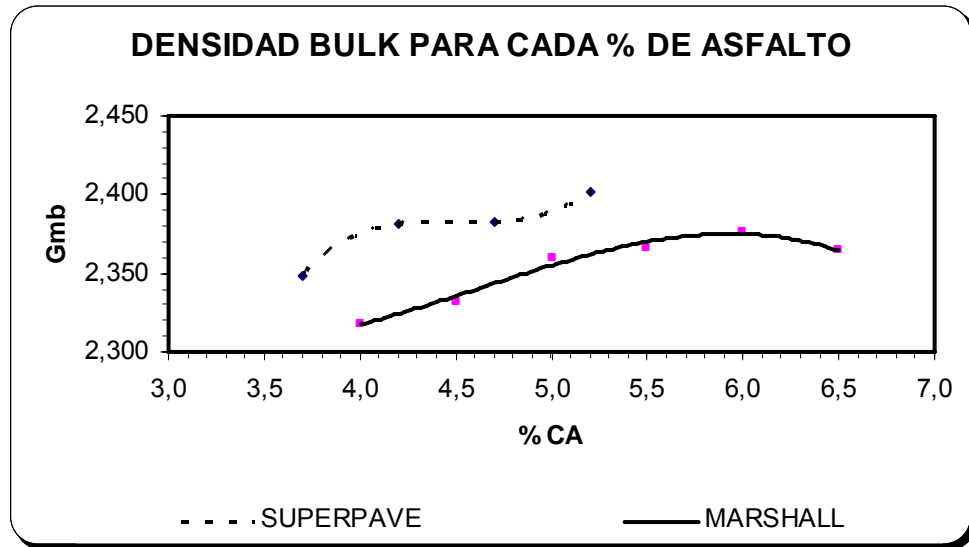
Gráfica 43. Comparación de la variación del contenido de vacíos en agregado mineral en la mezcla elaborada con asfalto modificado con SBS.



Gráfica 44. Comparación de la variación del contenido de vacíos llenos con asfalto en la mezcla elaborada con asfalto modificado con SBS.

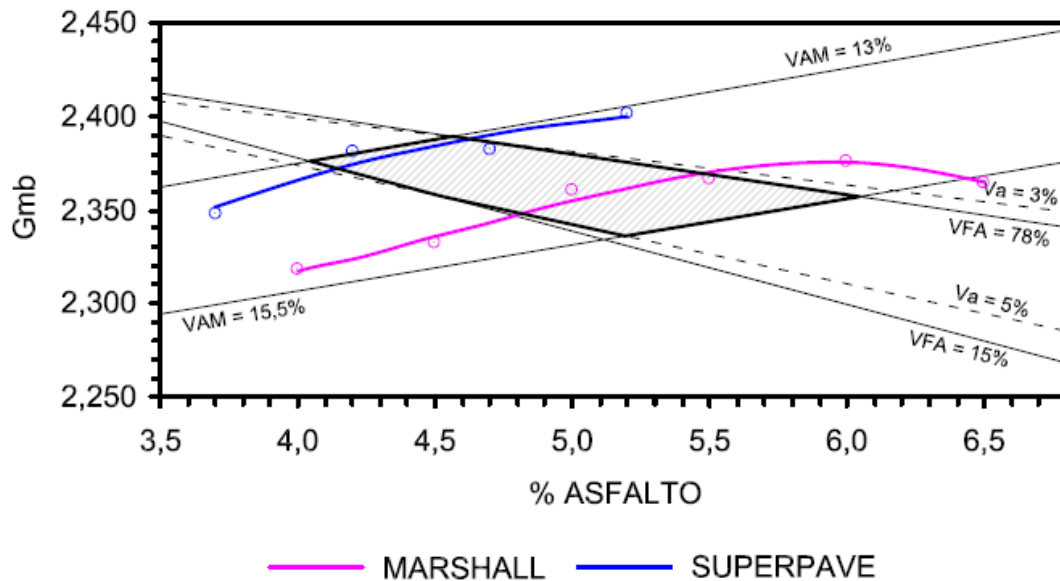


Gráfica 45. Comparación de la variación de la densidad Bulk en la mezcla elaborada con asfalto modificado con SBS.



Con los valores de las anteriores gráficas y teniendo en cuenta los criterios de los parámetros volumétricos se dibujan las isólineas que producen la construcción del polígono de vacíos lo cual nos lleva a demostrar que tanto para el diseño Marshall como el Superpave existe un rango de contenido de asfalto, no solo un valor óptimo, que cumple los requisitos volumétricos.

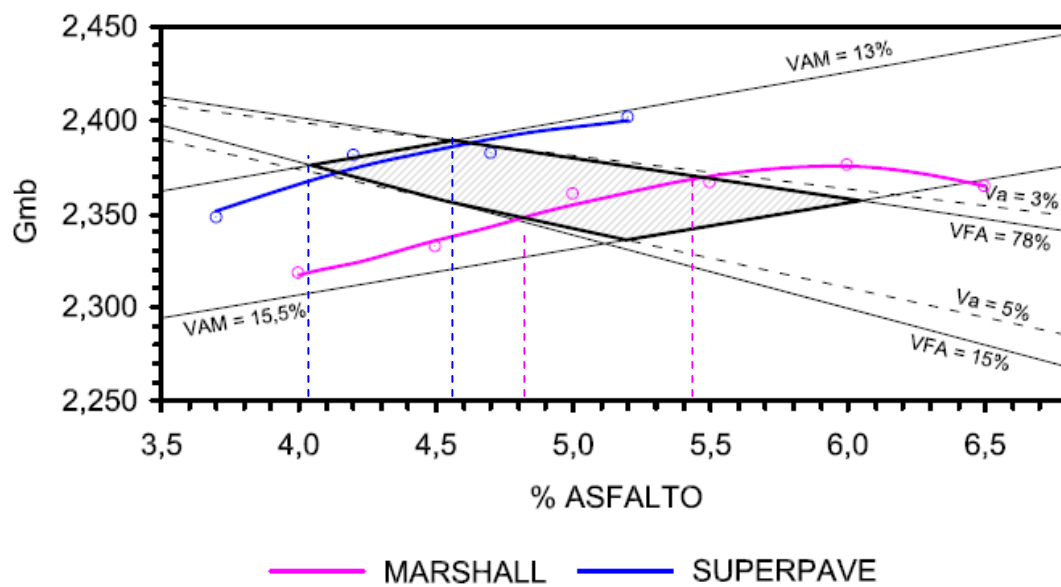
Gráfica 46. Polígono de vacíos de la mezcla elaborada con asfalto modificado con SBS.



Como se dijo anteriormente el polígono de vacíos hallado por medio de esta metodología es la zona donde se cumplen todas las propiedades volumétricas de la mezcla. Innegablemente se observa en cada gráfica del Polígono de vacíos de la mezcla elaborada con cada uno de los asfaltos objeto de este estudio que dentro de la figura sombreada se encuentran los porcentajes óptimos hallados por cada metodología y alrededor de este valor existe un rango de valores que también cumple con los criterios de propiedades volumétricas, lo cual nos permite concluir que estas metodologías de diseño de mezclas asfálticas admiten un rango óptimo de contenido de asfalto en la mezcla.

Como ejemplo, en la gráfica 47 se observa que el rango óptimo de cemento asfáltico es {4.1% - 4.6%} para el diseño Superpave y el del Marshall es {4.8% - 5.4%}.

Gráfica 47. Ejemplo del rango óptimo del contenido de asfalto en la mezcla.



11. CONCLUSIONES

- El método Superpave arroja porcentajes óptimos de asfalto en las mezclas menores a los que se obtienen por el método Marshall, por el tipo de compactación por amasado que emplea el método Superpave.
- En cuanto a qué método resulta mejor, depende del tipo de proyecto y lo que se espere del mismo; por ejemplo, el método Marshall utiliza equipos más versátiles que permiten llevar a cabo control de calidad en la obra. Por su parte, aunque la metodología Superpave es mucho más elaborada, requiere equipos que no son fácilmente desplazables y a su vez conllevan costos mayores; de cualquier forma, los resultados obtenidos por éste método ofrecen mayor confianza frente a las situaciones que ocurren en campo y además el diseño es más cercano al óptimo.
- Dadas las diferencias ya mencionadas entre los criterios de diseño en el laboratorio y los de control de campo, puede presentarse el rechazo de mezclas con características apropiadas y/o la aceptación de otras con propiedades volumétricas que no cumplen los criterios de diseño.
- Por la modificación del asfalto base con los dos polímeros utilizados, el grado de desempeño aumenta en el límite superior, pasando de un PG 54-22 a 64-22, lo que le otorga a los asfaltos modificados un comportamiento adecuado a una temperatura más alta.
- De los polímeros utilizados, el SBS le confiere una mayor dureza al asfalto base, lo que se ve reflejado en la penetración a través de los diferentes estados de envejecimiento que se evaluó.
- Los asfaltos modificados presentaron un aumento considerable en su viscosidad, reflejado esto en las diferentes curvas reológicas, lo que influye directamente en las temperaturas de mezcla y compactación debido a la menor manejabilidad que adquieren.
- La susceptibilidad térmica analizada con el índice de penetración permite observar que el asfalto base se encuentra en el límite de lo recomendado para ser utilizado en mezclas para pavimentación, pero al ser modificado con los polímeros este valor se ubica dentro del rango más confiable; garantizando así un buen comportamiento frente a los cambios de temperatura.

- El número penetración viscosidad es una medida del grado de susceptibilidad térmica de los asfaltos, que combina los dos parámetros fundamentales utilizados para tal calificación; por lo que brinda mayor confianza del comportamiento general que tendrá el ligante. De esta forma, se encontró que los tres ligantes estudiados resultan poco susceptibles a la temperatura y son aptos para usarse en proyectos viales.
- Los asfaltos modificados con polímeros requieren una menor proporción dentro de la mezcla, pues con una menor cantidad de los mismos se alcanza el recubrimiento total de las partículas del agregado mineral con una buena adherencia, y la suficiente película superficial para otorgar la cohesión necesaria entre componentes que le ofrece el comportamiento en conjunto de acuerdo a los criterios y especificaciones de diseño.
- En el diseño Marshall se encontró un incremento de la estabilidad Marshall del 26% para la mezcla elaborada con Elvaloy, y del 13% para la mezcla elaborada con SBS, frente a la estabilidad presentada con la mezcla elaborada con el asfalto base. Esto se explica por la mayor complejidad de las moléculas que se forman al modificar el asfalto con Elvaloy, pues éste polímero está compuesto por heteroátomos que al reaccionar con el asfalto permiten la formación de cadenas más grandes con algunos compuestos del grupo de los asfaltenos y las resinas; lo que a su vez otorga mayor cohesión a la mezcla.
- Si se contrasta la información obtenida sobre la susceptibilidad térmica de los tres asfaltos estudiados frente a los módulos dinámicos de las respectivas mezclas asfálticas, se nota una relación directa entre estas dos propiedades; pues a menor susceptibilidad mayor módulo dinámico.
- La mezcla elaborada con el asfalto modificado con Elvaloy presenta una mayor resistencia a la fatiga frente al comportamiento de la mezcla elaborada con el asfalto base; esto puede entenderse si se tiene en cuenta lo ya mencionado acerca de la estructura interna que adquiere el asfalto después de modificarse.
- En cuanto al comportamiento de las diferentes mezclas frente al ahuellamiento, se encontró que definitivamente la mezcla elaborada con el asfalto base es propensa a éste daño. Por su parte, las mezclas elaboradas con los asfaltos modificados presentan un comportamiento muy similar entre sí, de las que se puede esperar una respuesta satisfactoria a la deformación permanente una vez presten su servicio al tránsito.

- La relación de resistencia a la tracción, TSR, de la mezcla elaborada con Elvaloy es un 98% mayor respecto a la resistencia presentada por la mezcla con asfalto base. Por su parte, el polímero SBS le otorga un 31% más de resistencia frente a la mezcla con asfalto base. Como es evidente, los dos polímeros mejoran las condiciones de adhesión y cohesión en la mezcla; pero el polímero Elvaloy lo hace de manera considerable por su misma naturaleza química debido a la formación de enlaces de hidrógeno con el asfalto, lo que garantiza mayor adherencia con el mineral y por lo mismo aumenta la impermeabilidad y el espesor de la película que recubre las partículas, siendo así más resistente al ataque del agua.
- Los principios utilizados de la metodología Ramcodes resultan muy útiles para verificar los resultados obtenidos por cualquiera de los dos métodos de diseño de mezclas asfálticas, y además para validar los criterios de control de campo frente a los criterios de diseño en el laboratorio, mediante la implementación del polígono de vacíos que ofrece un rango prudencial en donde se cumplen todas las especificaciones volumétricas para la mezcla. De tal forma, al existir un mayor rango de aceptación, es importante optimizar la dosificación de la mezcla asfáltica y es allí donde la metodología Superpave juega un papel importante, pues como ya se ha dicho, contempla procedimientos más fieles a los que se realizan en campo.
- El asfalto que mejor se comporta dentro de la mezcla asfáltica es el modificado con Elvaloy, pues responde mejor a las exigencias de evaluación.
- La realización de la presente práctica empresarial, trajo consigo un amplio crecimiento personal y profesional al permitir el contacto directo y la vinculación a un medio competitivo con altos estándares de calidad, en el préstamo de servicios de laboratorio de Suelos y Mezclas Asfálticas.
- La participación en un proyecto de investigación de amplia envergadura como el TAAT, permitió la adquisición de habilidades y destrezas en temas de avanzada como la Metodología Superpave para la caracterización de ligantes y el diseño de las mezclas asfálticas en caliente.

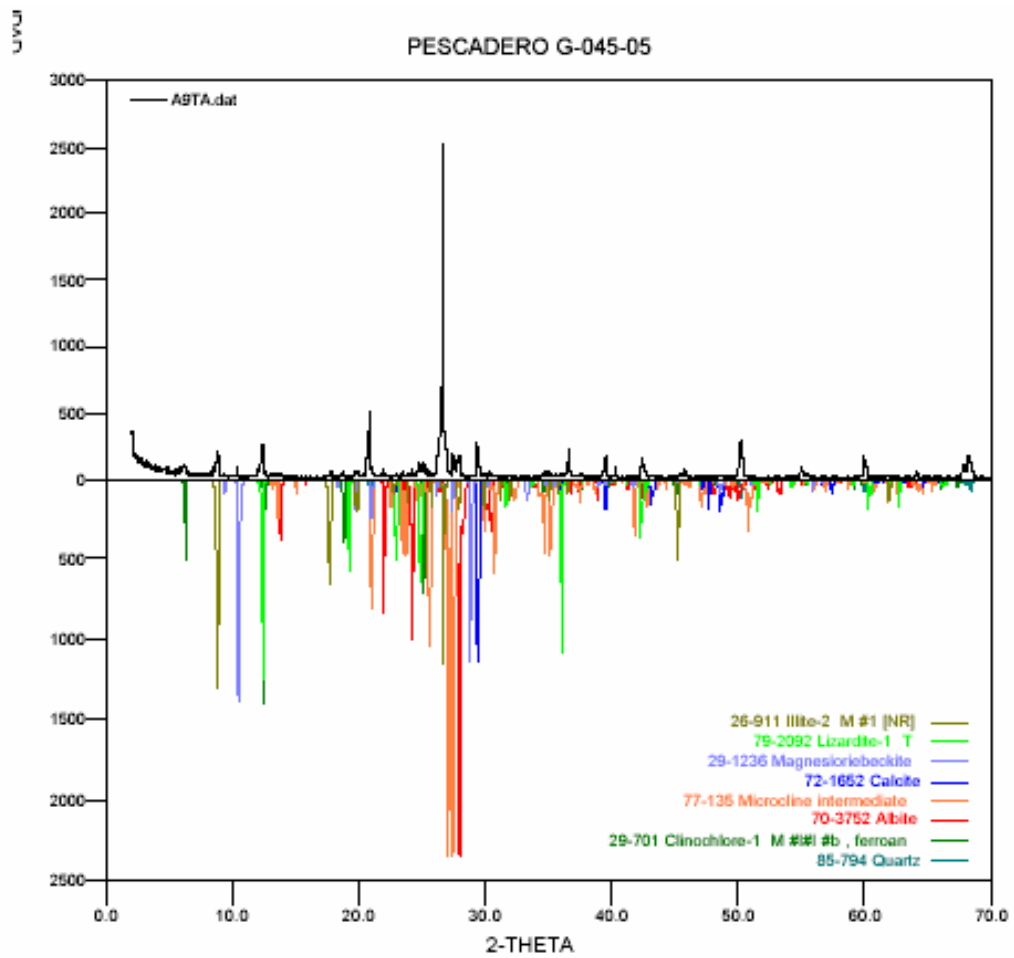
12. RECOMENDACIONES

- El uso de una u otra metodología de diseño de mezclas asfálticas, está ligado a las condiciones particulares del proyecto. De tal forma, se recomienda el método Superpave para los estudios en laboratorio, siempre y cuando se tenga acceso a la tecnología necesaria. Por otra parte, el método Marshall es más aconsejable para acciones de control en campo, por la versatilidad de los equipos empleados.
- En caso de implementar un polímero como mejorador de las propiedades de determinado ligante, es necesario tener en cuenta las condiciones específicas de la región donde se desarrollará el proyecto; pues dependiendo esto se tomará la decisión adecuada respecto a los criterios de diseño. Así, un polímero como Elvaloy ofrece grandes mejoras al comportamiento general de la mezcla asfáltica, pero a cambio presenta inconvenientes y restricciones como la dificultad en el proceso de mezclado, el uso de un reactivo que actúa como catalizador, entre otras.
- Cuando se piense en la utilización de un asfalto modificado con polímeros, es recomendable hacer un análisis de costos a largo plazo, es decir, hacia el final de la vida útil del pavimento, pues aunque el costo de estos asfaltos modificados es elevado inicialmente, se ve compensado por la reducción del mantenimiento durante el periodo de servicio y el alargamiento del mismo.
- Es importante la implementación de la metodología Ramcodes completa en caso de necesitarse una comparación más a fondo de los Métodos de Diseño Marshall y Superpave, y en general para encontrar el polígono de vacíos que cumple no sólo con los parámetros volumétricos, sino, entre otros, con los criterios de comportamiento dinámico.

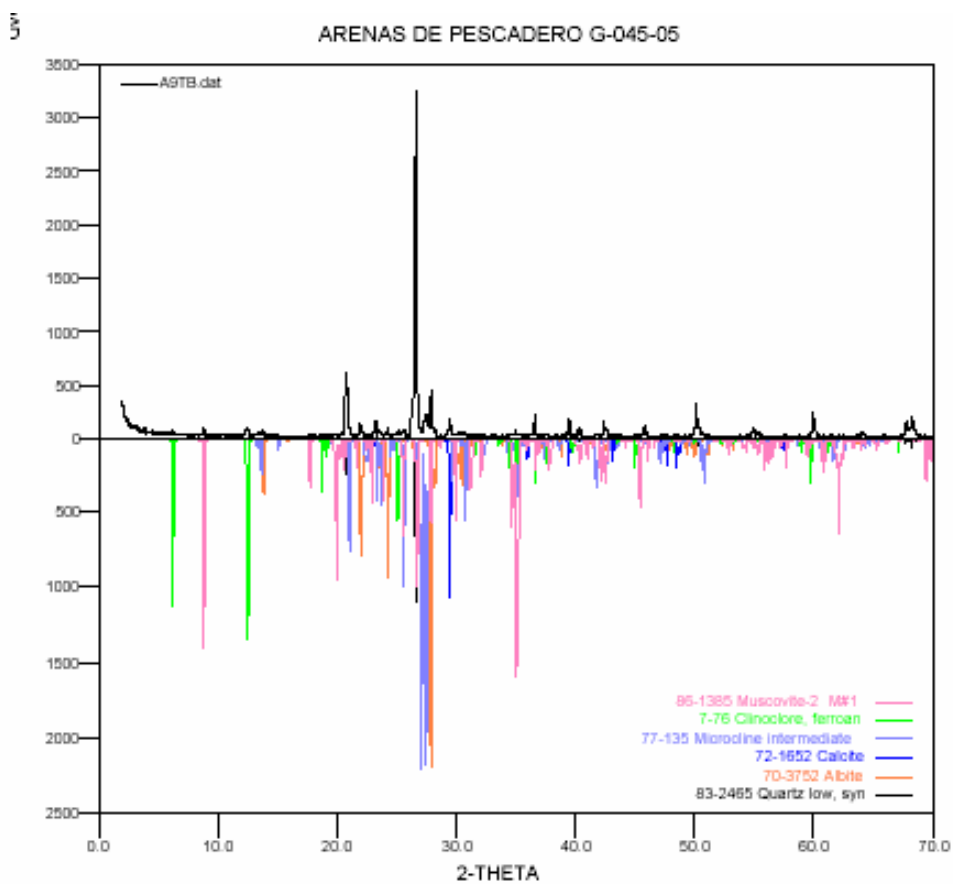
13. ANEXOS

13.1 ANEXO A – DIFRACTOGRAMAS

ANEXO A – 1: Fases presentes en finos.



ANEXO A – 2: Fases presentes en arenas.



13.2 ANEXO B – CUADROS RESUMEN DE LOS DISEÑOS MARSHALL

A continuación se presenta el resumen de los cálculos efectuados para los diseños por el Método Marshall, para los tres tipos de asfalto analizados.

ANEXO B-1: Cuadro Resumen Diseño Marshall con Asfalto Base 80-100.

ANEXO B-2: Cuadro Resumen Diseño Marshall con Asfalto Modificado con ELVALOY.

ANEXO B-3: Cuadro Resumen Diseño Marshall con Asfalto Modificado con SBS.

ANEXO B-1: Cuadro Resumen Diseño Marshall con Asfalto Base 80-100.

Gradacion	%	Gsb	Gb 1,0058
Ret No. 4	42,50	2,630	
Pasa 4- Ret 200	51,87	2,588	
Filler	5,63	2,670	
Material total	100	2,610	

Probeta No.	Contenido de asfalto (%)	Espesor (mm)	Peso Seco (gr)	Peso SSS (gr)	Peso Sumergido (gr)	Volumen (cc)	Peso Especifico Bulk g/cm3	Densidad máxima medida gm/cm3	Vacios con aire %	Vacios en agregados Minerales %	Vacios llenos con asfalto %	Estabilidad Medida (N)	Factor de corrección	Estabilidad corregida (N)	Flujo (mm)	Llenante / Asf. Efectivo	IPA
1	4	64,0	1181,6	1187,8	675,7	512,1	2,307	2,4934	7,461	15,139	50,715	8034	0,99	7989	3,00	1,62	5,44
2	4	64,1	1184,9	1188,2	677,8	510,4	2,322		6,894	14,619	52,843	9830	0,99	9746	3,00	1,62	5,44
3	4	64,0	1183,0	1192,8	679,4	513,4	2,304		7,586	15,254	50,266	8976	0,99	8926	3,25	1,62	5,44
Promedio							2,311		7,314	15,004	51,275	8946,67			8887	3,08	1,62
4	4,5	64,1	1183,5	1187,5	680,5	507,0	2,334	2,4794	5,851	14,595	59,907	10408	0,99	10319	3,50	1,42	6,26
5	4,5	63,3	1180,6	1183,8	679,3	504,5	2,340		5,617	14,382	60,945	8829	1,02	9957	3,50	1,42	6,26
6	4,5	63,2	1182,2	1184,9	678,1	506,8	2,333		5,918	14,655	59,619	9103	1,02	9270	3,75	1,42	6,26
Promedio							2,336		5,795	14,544	60,157	9446,67			9849	3,58	1,42
7	5	62,5	1178,9	1179,1	680,1	499,0	2,363	2,4621	4,044	14,015	71,144	11301	1,04	11753	3,75	1,26	7,09
8	5	62,9	1184,3	1185,8	683,6	502,2	2,358		4,219	14,172	70,230	11566	1,03	11902	3,50	1,26	7,09
9	5	63,1	1181,0	1183,1	682,3	500,8	2,358		4,219	14,172	70,230	10457	1,02	10680	3,50	1,26	7,09
Promedio							2,360		4,161	14,120	70,534	11108,00			11445	3,58	1,26
10	5,5	62,9	1183,3	1184,0	683,0	501,0	2,362	2,4532	3,723	14,491	74,311	10742	1,03	11038	3,75	1,13	7,93
11	5,5	62,2	1182,3	1183,0	684,6	498,4	2,372		3,302	14,118	76,610	9820	1,05	10306	3,75	1,13	7,93
12	5,5	62,2	1175,2	1176,2	682,3	493,9	2,379		3,007	13,856	78,297	12007	1,05	12601	3,50	1,13	7,93
Promedio							2,371		3,344	14,155	76,406	10856,33			11315	3,67	1,13
13	6	62,2	1177,0	1177,5	684,0	493,5	2,385	2,4390	2,214	14,111	84,311	10997	1,05	11541	4,00	1,03	8,78
14	6	62,3	1179,3	1179,6	685,1	494,5	2,385		2,221	14,117	84,268	10330	1,05	10808	4,00	1,03	8,78
15	6	62,2	1179,6	1180,3	685,3	495,0	2,383		2,295	14,182	83,819	11468	1,05	12035	4,00	1,03	8,78
Promedio							2,384		2,243	14,137	84,133	10931,67			11462	4,00	1,03
16	6,5	62,3	1173,7	1174,3	686,4	487,9	2,406	2,4126	0,289	13,829	97,907	9692	1,05	10141	4,00	0,94	9,63
17	6,5	62,3	1172,0	1172,3	683,3	489,0	2,397		0,658	14,148	95,350	8799	1,05	9206	4,00	0,94	9,63
18	6,5	62,2	1172,2	1172,5	683,8	488,7	2,399		0,580	14,080	95,881	10183	1,05	10687	4,50	0,94	9,63
Promedio							2,400		0,509	14,019	96,379	9558,00			10011	4,17	0,94

ANEXO B-2: Cuadro Resumen Diseño Marshall con Asfalto Modificado con ELVALOY.

Gradacion	%	Gsb
Ret No. 4	42,50	2,630
Pasa 4- Ret 200	51,87	2,588
Filler	5,63	2,670
Material total	100,00	2,610

Gb
1,0033

Probeta No.	Contenido de asfalto (%)	Espesor (mm)	Peso Seco (gr)	Peso SSS (gr)	Peso Sumergido (gr)	Volumen (cc)	Peso Especifico Bulk g/cm3	Densidad máxima medida gm/cm3	Vacios con aire %	Vacios en agregados Minerales %	Vacios llenos con asfalto %	Estabilidad Medida (N)	Factor de corrección	Estabilidad corregida (N)	Flujo (mm)	Llenante / Asf. Efectivo	IPA
1	4	58,7	1079,2	1080,9	614,2	466,7	2,312	2,5171	8,132	14,953	45,617	15060	1,17	17662	3,30	1,62	5,46
2	4	58,9	1074,9	1078,2	612,9	465,3	2,310		8,223	15,037	45,317	13360	1,16	15543	3,80	1,62	5,46
3	4	65,3	1179,4	1183,5	670,3	513,2	2,298		8,699	15,479	43,797	14730	0,96	14122	3,30	1,62	5,46
Promedio							2,307		8,351	15,156	44,911	14383,33			15775	3,47	1,62
4	4,5	64,0	1184,9	1186,1	677,3	508,8	2,329	2,4911	6,515	14,796	55,970	15430	0,99	15343	3,80	1,42	6,28
5	4,5	64,4	1182,3	1184,2	672,4	511,8	2,310		7,267	15,481	53,063	12690	0,98	12471	3,80	1,42	6,28
6	4,5	70,0	1280,2	1283,6	729,5	554,1	2,310		7,253	15,469	53,112	19090	0,84	16025	3,00	1,42	6,28
Promedio							2,316		7,012	15,249	54,048	15736,67			14613	3,53	1,42
7	5	63,4	1178,3	1180,2	677,5	502,7	2,344	2,4565	4,582	14,692	68,812	12720	1,01	12895	3,30	1,26	7,11
8	5	63,7	1182,4	1185,1	680,2	504,9	2,342		4,667	14,768	68,396	12370	1,00	12429	3,80	1,26	7,11
9	5	63,3	1184,1	1185,7	682,3	503,4	2,352		4,246	14,391	70,497	17170	1,02	17432	3,80	1,26	7,11
Promedio							2,346		4,498	14,617	69,235	14086,67			14252	3,63	1,26
10	5,5	62,8	1181,4	1182,7	683,3	499,4	2,366	2,4408	3,079	14,355	78,549	15710	1,03	16191	3,56	1,13	7,95
11	5,5	62,7	1177,7	1178,3	676,7	501,6	2,348		3,807	14,998	74,618	13290	1,03	13738	3,75	1,13	7,95
12	5,5	62,7	1180,6	1181,5	681,7	499,8	2,362		3,223	14,482	77,747	15230	1,03	15744	3,50	1,13	7,95
Promedio							2,359		3,370	14,611	76,971	14743,33			15224	3,60	1,13
13	6	58,0	1110,6	1111,2	644,2	467,0	2,378	2,4238	1,883	14,357	86,884	12510	1,20	14984	3,81	1,03	8,80
14	6	62,4	1167,1	1167,7	680,0	487,7	2,393		1,268	13,820	90,826	12940	1,04	13498	4,32	1,03	8,80
15	6	62,7	1173,5	1174,4	679,8	494,6	2,373		2,111	14,557	85,495	12400	1,03	12818	4,57	1,03	8,80
Promedio							2,381		1,754	14,245	87,735	12616,67			13767	4,23	1,03
16	6,5	62,4	1173,5	1178,9	683,5	495,4	2,369	2,3969	1,173	15,148	92,259	14530	1,04	15180	4,58	0,94	9,66
17	6,5	62,0	1181,4	1182,8	687,6	495,2	2,386		0,467	14,543	96,788	14740	1,06	15564	4,32	0,94	9,66
18	6,5	62,4	1177,2	1177,9	680,2	497,7	2,365		1,319	15,274	91,363	12660	1,04	13206	4,06	0,94	9,66
Promedio							2,373		0,986	14,988	93,470	13976,67			14650	4,32	0,94

ANEXO B-3: Cuadro Resumen Diseño Marshall con Asfalto Modificado con SBS.

Gradacion	%	Gsb
Ret No. 4	42,50	2,630
Pasa 4- Ret 200	51,87	2,588
Filler	5,63	2,670
Material total	100	2,610

Gb
1,0029

Probeta No.	Contenido de asfalto (%)	Espesor (mm)	Peso Seco (gr)	Peso SSS (gr)	Peso Sumergido (gr)	Volumen (cc)	Peso Especifico Bulk g/cm3	Densidad máxima medida gm/cm3	Vacios con aire %	Vacios en agregados Minerales %	Vacios llenos con asfalto %	Estabilidad Medida (N)	Factor de corrección	Estabilidad corregida (N)	Flujo (mm)	Llenante / Asf. Efectivo	IPA
1	4	64,4	1188,6	1191,7	680,4	511,3	2,325	2,5060	7,236	14,503	50,105	13800	0,98	13562	2,50	1,62	5,27
2	4	64,6	1190,0	1193,7	679,6	514,1	2,315		7,633	14,868	48,664	12170	0,98	11890	2,00	1,62	5,27
3	4	64,6	1191,2	1194,8	680,4	514,4	2,316		7,593	14,832	48,804	12850	0,98	12555	2,50	1,62	5,27
Promedio							2,318		7,487	14,734	49,191	12940,00			12669	2,33	1,62
4	4,5	63,2	1174,3	1177,1	674,6	502,5	2,337	2,4860	5,997	14,500	58,641	12930	1,02	13187	3,00	1,42	6,06
5	4,5	60,4	1115,6	1119,4	639,6	479,8	2,325		6,471	14,931	56,661	11710	1,11	13011	2,25	1,42	6,06
6	4,5	63,5	1180,1	1182,5	677,0	505,5	2,335		6,093	14,587	58,229	13620	1,01	13766	2,00	1,42	6,06
Promedio							2,332		6,187	14,673	57,843	12753,33			13321	2,42	1,42
7	5	63,5	1183,7	1185,4	685,2	500,2	2,366	2,4620	3,881	13,872	72,024	12460	1,01	12575	3,00	1,26	6,86
8	5	63,5	1176,3	1178,7	678,8	499,9	2,353		4,424	14,359	69,188	11030	1,01	11149	2,50	1,26	6,86
9	5	62,4	1174,3	1175,6	678,3	497,3	2,361		4,088	14,058	70,920	12490	1,04	13029	2,50	1,26	6,86
Promedio							2,360		4,131	14,097	70,711	11993,33			12251	2,67	1,26
10	5,5	62,8	1185,1	1186,3	685,2	501,1	2,365	2,4430	3,193	14,378	77,794	13030	1,03	13429	2,75	1,13	7,67
11	5,5	62,0	1175,0	1175,8	680,2	495,6	2,371		2,953	14,166	79,156	13740	1,06	14530	2,50	1,13	7,67
12	5,5	62,2	1174,3	1174,9	678,0	496,9	2,363		3,264	14,441	77,396	12820	1,05	13475	3,75	1,13	7,67
Promedio							2,366		3,137	14,329	78,115	13196,67			13811	3,00	1,13
13	6	62,3	1183,5	1184,4	685,0	499,4	2,370	2,4230	2,194	14,657	85,032	14000	1,05	14670	3,50	1,03	8,49
14	6	63,1	1191,9	1192,6	691,0	501,6	2,376		1,932	14,428	86,612	11910	1,02	12164	3,50	1,03	8,49
15	6	60,9	1151,5	1152,5	669,1	483,4	2,382		1,689	14,216	88,122	13430	1,09	14691	3,50	1,03	8,49
Promedio							2,376		1,938	14,434	86,589	13113,33			13842	3,50	1,03
16	6,5	61,3	1172,5	1173,0	678,5	494,5	2,371	2,3840	0,542	15,066	96,403	15740	1,08	16980	3,50	0,94	9,32
17	6,5	62,0	1176,1	1177,0	680,2	496,8	2,367		0,698	15,200	95,406	12680	1,06	13389	3,25	0,94	9,32
18	6,5	62,2	1137,5	1138,7	655,6	483,1	2,355		1,234	15,657	92,120	11660	1,05	12237	4,00	0,94	9,32
Promedio							2,364		0,825	15,308	94,643	13360,00			14202	3,58	0,94

13.3 ANEXO C – REPORTES RESUMEN DE LOS DISEÑOS SUPERPAVE

ANEXO C-1: Reporte Resumen de la Mezcla con Asfalto Base 80-100.

Mixture Summary Report for Varying %AC Analysis					
Project Name:	Asfalto 80-100 TAAT	N Initial:	8		
Workbook Name:	Análisis optimo.xls	N Design:	100		
Technician:	Edgar Peña, Ricardo Medina	N Max:	160		
Date:		Nom. Sieve Size:	19 mm		
Asphalt Grade:		Compaction Temperature:	128 °C		
Design ESAL's (millions):	5	Mixture Temperature:	138°C		
Design Temperature:	38°C	Depth from Surface (mm):	10		
		Mold Size:	150 mm		

Property	Results				Criteria
	Pb-0.5	Pb	Pb+0.5	Pb+1.0	
%AC	4,5	5,0	5,5	6,0	
%Air Voids (V_a)	3,7	2,1	0,2	-1,5	4,0 %
%VMA	13,4	13,3	13,1	13,2	13,0 % Min.
%VFA	72,2	84,0	98,7	111,1	65,0 % Min. 75,0 % Max.
Dust/Asphalt Ratio	1,4	1,2	1,0	0,9	0.6-1.6 %
Max. Specific Gravity (G_{mm})	2,459	2,434	2,404	2,376	
Bulk Specific Gravity (G_{mb})	2,391	2,408	2,422	2,422	
% G_{mm} @ N_{ini}	89,8	91,4	93,2	94,9	89,0 % Max.
% G_{mm} @ N_{max}	97,2	98,9	100,8	101,9	98,0 % Max.
Effective Sp. Gravity of Blend (G_{se})	2,639	2,631	2,615	2,602	---
Sp. Gravity of Binder (G_b)	1,006	1,006	1,006	1,006	---
Sp. Gravity of Aggregate (G_{sb})	2,610	2,610	2,610	2,610	---

ANEXO C-2: Reporte Resumen de la Mezcla con Asfalto Modificado con ELVALOY.

Mixture Summary Report for Varying %AC Analysis

Project Name:	Asfalto 80-100+ELVALOY - TAAT	N Initial:	8
Workbook Name:	analizar optimo.xls	N Design:	100
Technician:	EDGAR PEÑA, RICARDO MEDINA	N Max:	160
Date:		Nom. Sieve Size:	19 mm
Asphalt Grade:		Compaction Temperature:	150 °C
Design ESAL's (millions):	5	Mixture Temperature:	163°C
Design Temperature:	38°C	Depth from Surface (mm):	10
		Mold Size:	150 mm

Property	Results				Criteria
	Pbe-0.5	Pbe	Pbe+0.5	Pbe+1.0	
%AC	4,3	4,8	5,3	5,8	
%Air Voids (V_a)	4,1	3,2	1,0		4,0 %
%VMA	13,4	13,9	13,2		13,0 % Min.
%VFA	69,0	77,2	92,4		65,0 % Min. 75,0 % Max.
Dust/Asphalt Ratio	1,4	1,2	1,1	1,0	0.6-1.6 %
Max. Specific Gravity (G_{mm})	2,465	2,438	2,416	2,411	
Bulk Specific Gravity (G_{mb})	2,383	2,386	2,416	2,402	
% G_{mm} @ N_{ini}	#¡VALOR!	#¡VALOR!	92,3		89,0 % Max.
% G_{mm} @ N_{max}	#¡VALOR!	#¡VALOR!	100,0		98,0 % Max.
Effective Sp. Gravity of Blend (G_{se})	2,638	2,628	2,623	2,639	---
Sp. Gravity of Binder (G_b)	1,003	1,003	1,003	1,003	---
Sp. Gravity of Aggregate (G_{sb})	2,610	2,610	2,610	2,610	---

ANEXO C-3: Reporte Resumen de la Mezcla con Asfalto Modificado con SBS.

Mixture Summary Report for Varying %AC Analysis

Project Name:	Asfalto 80-100 + SBS -- TAAT	N Initial:	8
Workbook Name:	analizar optimo.xls	N Design:	100
Technician:	Edgar Peña, Ricardo Medina	N Max:	160
Date:	07.01.20	Nom. Sieve Size:	19 mm
Asphalt Grade:		Compaction Temperature:	164 °C
Design ESAL's (millions):	5	Mixture Temperature:	150°C
Design Temperature:	38°C	Depth from Surface (mm):	10
		Mold Size:	150 mm

Property	Results				Criteria
	-0,5	0	0,5	1	
%AC	3,7	4,2	4,7	5,2	
%Air Voids (V _a)	5,9	4,0	3,1	1,6	4,0 %
%VMA	14,1	13,4	13,9	13,6	13,0 % Min.
%VFA	57,7	70,1	77,8	88,2	65,0 % Min. 75,0 % Max.
Dust/Asphalt Ratio	1,6	1,4	1,2	1,1	0.6-1.6 %
Max. Specific Gravity (G _{mm})	2,476	2,457	2,433	2,417	
Bulk Specific Gravity (G _{mb})	2,349	2,382	2,383	2,402	
%G _{mm} @ N _{ini}	88,2	89,9	90,5	91,7	89,0 % Max.
%G _{mm} @ N _{max}	94,9	96,9	98,0	99,4	98,0 % Max.
Effective Sp. Gravity of Blend (G _{se})	2,625	2,624	2,617	2,619	---
Sp. Gravity of Binder (G _b)	1,003	1,003	1,003	1,003	---
Sp. Gravity of Aggregate (G _s)	2,610	2,610	2,610	2,610	---

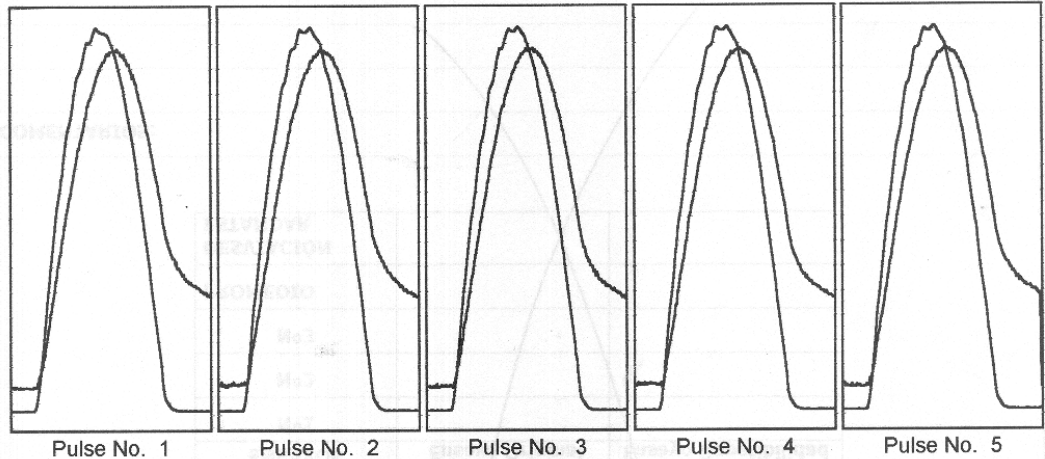
13.4 ANEXO D – ILUSTRACIÓN DE LOS REPORTES DE ENSAYO DE MÓDULOS DINÁMICOS EN EL EQUIPO NAT

ANEXO D-1: Reporte del NAT, Ensayo de Módulos Dinámicos a T= 5°C

INDIRECT TENSILE STIFFNESS MODULUS TEST

(Stiffness modulus test to DD213)

Date: 21:10:2006	CORASFALTOS
Operator: Ing. Sergio Cifuentes	Luis Enrique Sanabria
Specimen ref: G-186-06-03 B12	Director Ejecutivo
Target (actual) test temperature: 5°C (5.0°)	Sergio Cifuentes Mosquera
Specimen diameter: 100 mms	Ing. Jefe de Laboratorio
Specimen thickness: 55 mms	Telefonos: 6550806-6551399
Poisson's ratio: 0.25	e-mail: info@corasfaltos.com
Target risetime: 124 m.secs	
Target horiz defm: 5 microns	



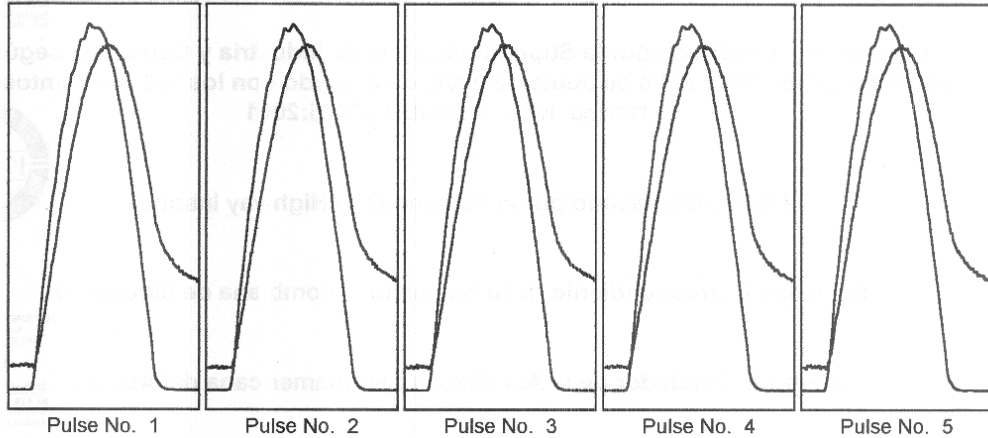
Pulse No.	Vertical force (kN)	Horiz Stress (kPa)	Load area factor		Horiz defm (microns)		Rise Time (m.secs)		Stiffness modulus (MPa) 1st diameter	
			Target	Actual	Target	Actual	Target	Actual	Measured	Adjusted
1	4.17	482.2	0.60	0.63	5.0	4.9	124	118.0	7985	8129
2	4.15	480.4	0.60	0.67	5.0	4.8	124	134.0	8110	8482
3	4.16	481.0	0.60	0.67	5.0	4.8	124	133.0	8131	8487
4	4.14	479.3	0.60	0.67	5.0	4.9	124	135.0	8067	8457
5	4.15	480.9	0.60	0.67	5.0	4.9	124	134.0	7978	8340
Mean	4.15	480.8	0.60	0.66	5.0	4.9	124	130.8	8054	8379

INDIRECT TENSILE STIFFNESS MODULUS TEST

(Stiffness modulus test to DD213)

Date: 21:10:2006
 Operator: Ing. Sergio Cifuentes
 Specimen ref: G-186-06-03 B12
 Target (actual) test temperature: 5°C (5.0°)
 Specimen diameter: 100 mms
 Specimen thickness: 55 mms
 Poisson's ratio: 0.25
 Target risetime: 124 m.secs
 Target horiz defm: 5 microns

CORASFALTOS
 Luis Enrique Sanabria
 Director Ejecutivo
 Sergio Cifuentes Mosquera
 Ing. Jefe de Laboratorio
 Telefonos: 6550806-6551399
 e-mail: info@corasfaltos.com



Pulse No.	Vertical force (kN)	Horiz Stress (kPa)	Load area factor		Horiz defm (microns)		Rise Time (m.secs)		Stiffness modulus (MPa) 2nd diameter	
			Target	Actual	Target	Actual	Target	Actual	Measured	Adjusted
1	4.19	484.5	0.60	0.62	5.0	5.0	124	119.0	7963	8074
2	4.19	485.4	0.60	0.65	5.0	5.0	124	130.0	7869	8160
3	4.19	485.1	0.60	0.66	5.0	5.0	124	131.0	7931	8242
4	4.18	483.8	0.60	0.67	5.0	5.0	124	133.0	7858	8202
5	4.18	484.4	0.60	0.66	5.0	5.0	124	132.0	7873	8202
Mean	4.19	484.6	0.60	0.65	5.0	5.0	124	129.0	7899	8176

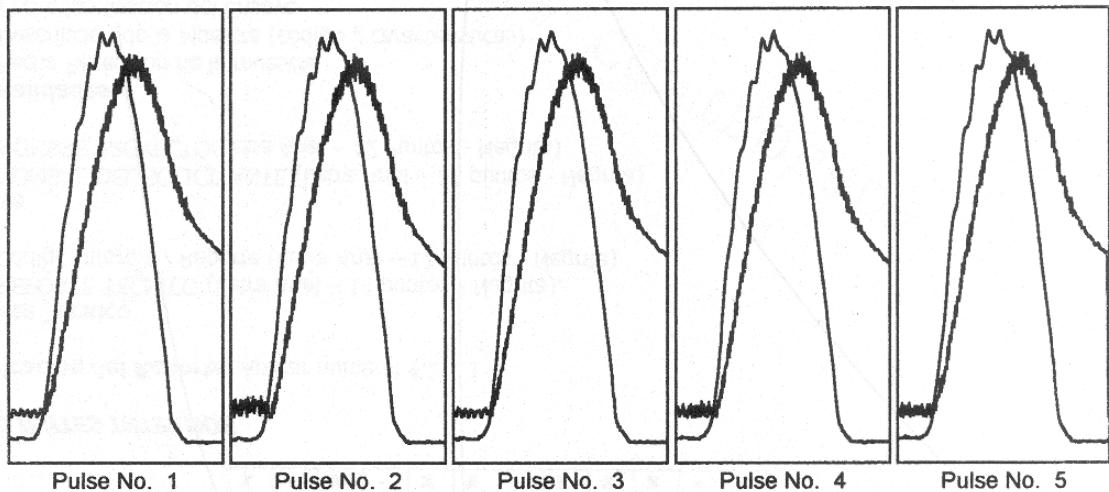
ANEXO D-2: Reporte del NAT, Ensayo de Módulos Dinámicos a T= 25°C

INDIRECT TENSILE STIFFNESS MODULUS TEST

(Stiffness modulus test to DD213)

Date: 22:10:2006
 Operator: Ing. Sergio Cifuentes
 Specimen ref: G-186-06-03 B12
 Target (actual) test temperature: 25°C (25.0°)
 Specimen diameter: 100 mms
 Specimen thickness: 55 mms
 Poisson's ratio: 0.35
 Target risetime: 124 m.secs
 Target horiz defm: 5 microns

CORASFALTOS
 Luis Enrique Sanabria
 Director Ejecutivo
 Sergio Cifuentes Mosquera
 Ing. Jefe de Laboratorio
 Telefonos: 6550806-6551399
 e-mail: info@corasfaltos.com



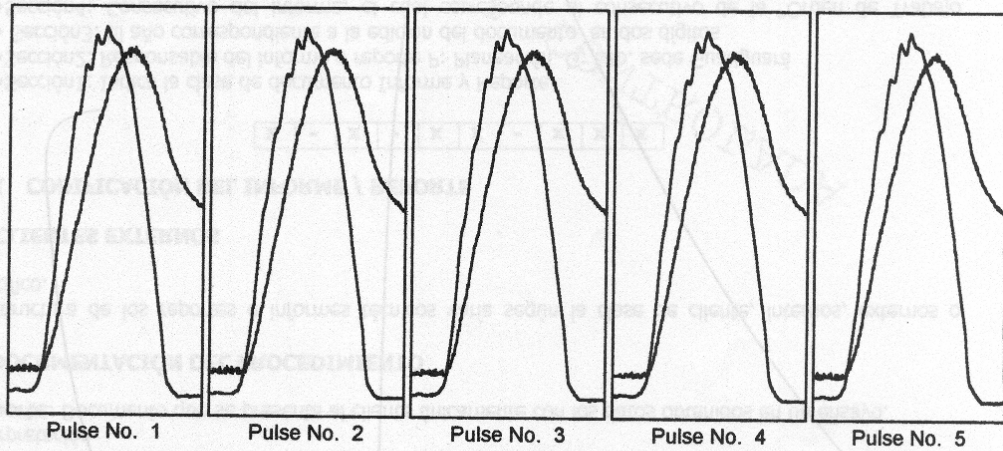
Pulse No.	Vertical force (kN)	Horiz Stress (kPa)	Load area factor		Horiz defm (microns)		Rise Time (m.secs)		Stiffness modulus (MPa) 1st diameter	
			Target	Actual	Target	Actual	Target	Actual	Measured	Adjusted
1	0.97	112.2	0.60	0.59	5.0	4.7	124	112.0	2313	2299
2	0.97	111.8	0.60	0.63	5.0	4.5	124	126.0	2433	2474
3	1.00	115.7	0.60	0.64	5.0	4.7	124	117.0	2400	2445
4	0.99	114.8	0.60	0.64	5.0	4.7	124	117.0	2405	2457
5	0.97	112.3	0.60	0.58	5.0	4.7	124	110.0	2340	2319
Mean	0.98	113.4	0.60	0.62	5.0	4.6	124	116.4	2378	2399

INDIRECT TENSILE STIFFNESS MODULUS TEST

(Stiffness modulus test to DD213)

Date: 22:10:2006
 Operator: Ing. Sergio Cifuentes
 Specimen ref: G-100-06-03 B12
 Target (actual) test temperature: 25°C (25.0°)
 Specimen diameter: 100 mms
 Specimen thickness: 55 mms
 Poisson's ratio: 0.35
 Target risetime: 124 m.secs
 Target horiz defm: 5 microns

CORASFALTOS
 Luis Enrique Sanabria
 Director Ejecutivo
 Sergio Cifuentes Mosquera
 Ing. Jefe de Laboratorio
 Telefonos: 6550806-6551399
 e-mail: info@corasfaltos.com



Pulse No.	Vertical force (kN)	Horiz Stress (kPa)	Load area factor		Horiz defm (microns)		Rise Time (m.secs)		Stiffness modulus (MPa) 2nd diameter	
			Target	Actual	Target	Actual	Target	Actual	Measured	Adjusted
1	0.97	112.7	0.60	0.63	5.0	4.8	124	131.0	2272	2306
2	0.99	114.2	0.60	0.61	5.0	4.7	124	129.0	2343	2353
3	1.01	116.4	0.60	0.62	5.0	4.9	124	121.0	2330	2348
4	1.01	116.7	0.60	0.63	5.0	4.9	124	120.0	2307	2344
5	1.00	115.6	0.60	0.61	5.0	4.9	124	133.0	2314	2329
Mean	1.00	115.1	0.60	0.62	5.0	4.8	124	126.8	2313	2336

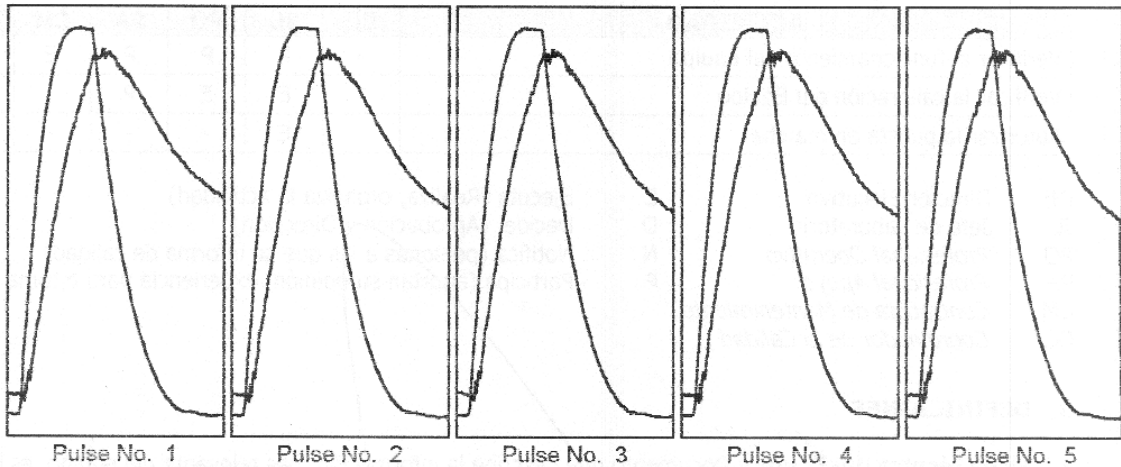
ANEXO D-3: Reporte del NAT, Ensayo de Módulos Dinámicos a T= 40°C

INDIRECT TENSILE STIFFNESS MODULUS TEST

(According to Draft for development: DD 213)

Date: 24:10:2006
 Operator: Ing. Sergio Cifuentes
 Specimen ref: G-186-06-03 B12
 Target (actual) test temperature: 40°C (40.0°)
 Specimen diameter: 100 mms
 Specimen thickness: 55 mms
 Poisson's ratio: 0.40
 Target risetime: 124 m.secs
 Target Horiz defm: 2 microns

CORASFALTOS
 Luis Enrique Sanabria
 Director Ejecutivo
 Sergio Cifuentes Mosquera
 Ing. Jefe de Laboratorio
 Telefonos:6550806-6551399
 email:info@corasfaltos.com



Pulse No.	Vertical force (kN)	Horiz Stress (kPa)	Load area factor		Horiz defm (microns)		Rise Time (m.secs)		Stiffness modulus (MPa) 1st diameter	
			Target	Actual	Target	Actual	Target	Actual	Measured	Adjusted
1	0.35	40.4	0.60	0.73	2	12.3	124	112.0	346	357
2	0.35	40.1	0.60	0.71	2	11.7	124	102.0	359	368
3	0.35	40.1	0.60	0.71	2	11.5	124	102.0	367	377
4	0.35	40.5	0.60	0.72	2	11.3	124	106.0	377	387
5	0.34	39.9	0.60	0.71	2	11.0	124	106.0	383	394
Mean	0.35	40.2	0.60	0.71	2	11.6	124	105.6	367	377

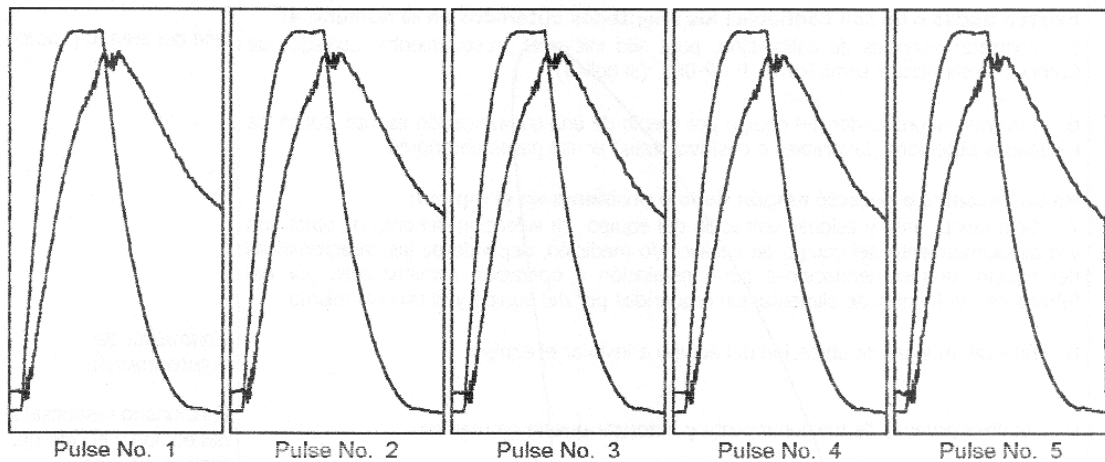
Note: Stiffness adjusted to a load area factor of 0.60 and the difference between target and actual sample temperature.

INDIRECT TENSILE STIFFNESS MODULUS TEST

(According to Draft for development: DD 213)

Date: 24:10:2006
 Operator: Ing. Sergio Cifuentes
 Specimen ref: G-186-06-03 B12
 Target (actual) test temperature: 40°C (40.0°)
 Specimen diameter: 100 mms
 Specimen thickness: 55 mms
 Poisson's ratio: 0.40
 Target risetime: 124 m.secs
 Target Horiz defm: 2 microns

CORASFALTOS
 Luis Enrique Sanabria
 Director Ejecutivo
 Sergio Cifuentes Mosquera
 Ing. Jefe de Laboratorio
 Telefonos: 6550806-6551399
 email: info@corasfaltos.com



Pulse No.	Vertical force (kN)	Horiz Stress (kPa)	Load area factor		Horiz defm (microns)		Rise Time (m.secs)		Stiffness modulus (MPa) 2nd diameter	
			Target	Actual	Target	Actual	Target	Actual	Measured	Adjusted
1	0.35	40.1	0.60	0.79	2	11.4	124	146.0	370	387
2	0.35	40.4	0.60	0.80	2	11.1	124	150.0	383	402
3	0.35	40.6	0.60	0.80	2	11.1	124	150.0	383	402
4	0.35	40.7	0.60	0.80	2	11.2	124	148.0	381	399
5	0.35	40.4	0.60	0.70	2	11.1	124	100.0	384	394
Mean	0.35	40.4	0.60	0.78	2	11.2	124	138.8	380	397

Note: Stiffness adjusted to a load area factor of 0.60 and the difference between target and actual sample temperature.

13.5 ANEXO E – ILUSTRACIÓN DE LOS REPORTES DE ENSAYO DE DEFORMACIÓN PERMANENTE (RLA), EN EL EQUIPO NAT

Repeated Load Axial Test

01-10-2006

Ing. Sergio Cifuentes	Name operator
G-186-06-03 B8	Specimen name/ref
40	Test Temperature (°C)
100	Diameter (mm)
55	Thickness (mm)
100	Test stress (kPa)
3600	Test period (pulses)
10	Conditioning stress (kPa)
120	Conditioning period (secs)
4123	Microstrain during conditioning period

Pulse No	Ax ustrain	StresskPa	TC1_degC	TC2_degC
5	952	45.2	39.8	39.0
10	1001	105.2	39.7	39.0
20	1013	41.3	39.7	39.1
30	1037	41.8	39.7	39.1
40	1052	106.3	39.7	39.2
50	1099	142.3	39.6	39.2
60	1083	96.8	39.6	39.5
70	1094	99.3	39.5	39.3
80	1114	112.1	39.5	39.3
100	1221	122.1	39.6	39.3
200	1220	107.5	39.6	39.4
300	1649	107.4	39.7	39.5
400	2357	92.3	39.7	39.3
500	2352	91.7	39.7	39.5
600	2343	101.7	39.9	39.5
700	2316	99.4	39.8	39.6
800	2280	98.5	39.8	39.5
900	2949	114.4	39.8	39.5
1000	2930	101.4	39.8	39.5
1100	2942	117.8	39.8	39.7
1200	2914	100.7	39.7	39.6
1300	2909	101.1	39.8	39.4
1400	2884	98.1	40.0	39.7
1500	2876	97.4	39.9	39.9
1600	2875	94.2	39.9	39.7
1700	2842	97.5	39.9	39.5
1800	2830	99.9	39.8	39.6
1900	3266	89.7	39.8	39.6
2000	3244	86.2	39.6	39.6
2100	3220	87.9	39.9	39.6
2200	3200	98.3	39.8	39.6
2300	3617	97.6	39.8	39.6
2400	3662	110.7	39.8	39.5
2500	3661	103.5	39.8	39.5
2600	3626	98.8	39.8	39.5
2700	3625	95.0	39.8	39.5
2800	3921	117.4	39.8	39.6
2900	3901	97.5	39.8	39.6
3000	3900	105.2	39.8	39.6
3100	3891	95.2	39.7	39.6
3200	3883	112.9	39.9	39.6
3300	3871	83.8	39.9	39.7
3400	3855	98.5	39.9	39.6
3500	3825	100.3	39.9	39.6
3600	4061	88.7	39.8	39.7

13.6 ANEXO F – ILUSTRACIÓN DE LOS REPORTES DE ENSAYO DE FATIGA POR TRACCIÓN INDIRECTA, EN EL EQUIPO NAT

Indirect Tensile Fatigue Test

07-10-2006
 Ing. Sergio Cifuentes
 G-186-06-02 B12

20 Temperature (°C)
 100 Diameter (mm)
 55 Thickness (mm)
 400 Horizontal Stress
 124 Risetime

Pulses	V.defm	H.stress	Risetime
10	0.42	399.7	116
10	0.42	399.7	116
20	0.50	401.5	132
20	0.50	401.5	132
30	0.56	400.6	119
30	0.56	400.6	119
40	0.59	400.6	137
40	0.59	400.6	137
50	0.61	398.3	119
50	0.61	398.3	119
60	0.63	403.4	127
60	0.63	403.4	127
70	0.66	401.8	127
70	0.66	401.8	127
80	0.68	401.1	123
80	0.68	401.1	123
90	0.70	399.3	135
90	0.70	399.3	135
100	0.73	398.9	120
100	0.73	398.9	120
110	0.76	401.0	124
120	0.77	401.8	137
130	0.79	400.5	123
140	0.79	398.7	118
150	0.82	399.3	122
160	0.82	399.3	135
170	0.83	398.5	119
180	0.84	398.8	121
190	0.84	399.5	121
200	0.88	401.2	123
200	0.88	401.2	123
210	0.90	400.9	121
220	0.90	400.2	119
230	0.92	398.4	119
240	0.93	399.7	135
250	0.94	397.2	115
260	0.96	401.6	119
270	0.97	399.9	123
280	0.98	399.4	121

13.7 ANEXO G – GALERÍA FOTOGRÁFICA DE EQUIPOS

Fotografía 1. Horno de película delgada rotativa (RTFO).



Fotografía 2. Reómetro de viga a flexión (BBR).



Fotografía 3. Reómetro de corte dinámico (DSR).



Fotografía 4. Aparato Marshall.



Fotografía 5. Compactador Giratorio Superpave.



Fotografía 6. Prensa multifuncional ANDITEST.



Fotografía 7. Equipo NAT Servohidráulico.



Fotografía 8. Equipo NAT Neumático.



BIBLIOGRAFÍA

- ARENAS LOZANO, Hugo León. Tecnología del Cemento Asfáltico. Segunda Edición. Universidad del Cauca. FAID Editores. Popayán, mayo de 2000.
- ASPHALT INSTITUTE. The Asphalt Handbook. Manual Series No. 4 (MS-4). Edition 1981.
- ----- . Antecedentes de los Métodos de Ensayo de Ligantes Asfálticos de SUPERPAVE. Traducción suministrada por el Instituto Panamericano de Carreteras – IPC. 1998.
- ----- . Antecedentes del Diseño y Análisis de Mezclas Asfálticas de SUPERPAVE. Traducción suministrada por el Instituto Panamericano de Carreteras – IPC. 1996.
- CHIMAN A., SANABRIA L., HERNÁNDEZ L., CHIMAN L. Evaluación de las Propiedades de Asfaltos Modificados con Polímeros Activados. Corporación para la Investigación y Desarrollo en Asfaltos en el Sector de Transporte e Industrial - CORASFALTOS.
- CORASFALTOS. Desarrollo de una metodología para la evaluación de asfaltos para pavimentos. Piedecuesta, Santander. 2005.
- CORASFALTOS – ICP. Estado del arte tecnológico del sector responsable de la construcción y conservación de pavimentos flexibles. “Fabricación, colocación, compactación y tendencias nacionales e internacionales de mezclas asfálticas”. Piedecuesta, abril de 2005.
- DELGADO ALAMILLA, Horacio. Análisis comparativo de las propiedades volumétricas de mezclas asfálticas elaboradas con las metodologías Marshall y Superpave. Instituto Mexicano del Transporte.
- GARNICA ANGUAS, Paul. Mecánica de Materiales para Pavimentos. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Instituto Mexicano de Transporte. Publicación Técnica No. 197. Sanfandila, Qro. 2002.
- GARNICA ANGUAS, Paul; DELGADO ALAMILLA, Horacio y SANDOVAL SANDOVAL, Carlos Daniel. Análisis comparativo de los Métodos Marshall y

- Superpave para compactación de mezclas asfálticas. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 271. Sanfandila, Qro. 2005.
- MORALES, Pedro; RODRIGUEZ SALAH, Luz Ángela y PAREJA URIBE, Carlos Alberto. Fundamentos teóricos de las interacciones químicas entre el asfalto y el agregado mineral. Monografía Universidad Industrial de Santander.
 - National Asphalt Pavement Association – NAPA, and National Center for Asphalt Technology – NCAT. Hot mix asphalt materials, mixture design and construction. Second Edition, 1996.
 - SHELL BITUMEN. Asfaltos Modificados. Memorias de conferencia.
 - VILLAMIZAR LEAL, Sandra y LONDOÑO CALA, Jairo Alberto. Evaluación de la caracterización de agregados para capas de pavimentos. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. 1997.

INFOGRAFÍA

- www.monografías.com
TONDA, Mauricio. Asfaltos Modificados con Polímeros.
- www.cedex.es
Equipos de Ensayo en Laboratorio.
- www.invias.gov.co
Estado de la red vial por observación visual a junio de 2004.
- www.colciencias.gov.co
Una mirada a las vías de Colombia. Vías para la paz...Febrero, 2005.
- www.eclac.cl/estadisticas/
- www.mop.go.sv
Incidencia de los agregados en el comportamiento de las mezclas asfálticas.pdf
- www.ucc.cl
SALGADO TORRES, Mauricio. Análisis del Comportamiento y desempeño de las Mezclas Asfálticas. Pontificia Universidad Católica de Chile. Laboratorio de Pavimentos. Apuntes de clase.