

DESARROLLO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA UTILIZANDO RESIDUOS PLÁSTICOS

DIANA MILENA METAUTE HEREDIA

DANIEL MAURICIO CASAS OROZCO

UNIVERSIDAD EAFIT

ESCUELA DE INGENIERÍAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROCESOS

MEDELLÍN

2009

DESARROLLO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA UTILIZANDO RESIDUOS PLÁSTICOS

DIANA MILENA METAUTE HEREDIA

DANIEL MAURICIO CASAS OROZCO

Proyecto de Grado para aspirar al título de Ingenieros de Procesos

Asesor

Julián Vidal V., Esp.

Co-Asesor

Diego Andrés Acosta M., PhD

UNIVERSIDAD EAFIT

ESCUELA DE INGENIERÍAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROCESOS

MEDELLÍN

2009

Nota de Aceptación

Firma Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Medellín, 19 de noviembre de 2009.

La culminación de este proyecto representa el fin de una de las etapas más enriquecedoras y gratificantes de nuestras vidas y nuestro verdadero comienzo en la Ingeniería de Procesos. Agradecemos a Dios, a nuestras familias, a la Universidad, a los invaluable aportes de nuestros profesores, a los amigos que nos tendieron la mano de manera presta y desinteresada y a quienes creyeron en nosotros aún en los momentos más difíciles e inesperados. Nos queda el sentimiento de haber estudiado una carrera maravillosa y con ello, que lo mejor está por venir.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos un sentido agradecimiento a las personas que participaron y aportaron a este proyecto:

- JULIÁN VIDAL VALENCIA. Ingeniero Civil. Especialista en Diseño de Pavimentos Universidad EAFIT. Jefe del Departamento de Ingeniería Civil – Universidad EAFIT. Asesor del proyecto.
- DIEGO ANDRÉS ACOSTA MAYA. Ingeniero Químico, Universidad Pontificia Bolivariana. Ph.D, Oklahoma University. Docente del Departamento de Ingeniería de Procesos, Universidad EAFIT. Co-Asesor del proyecto.
- LUIS ALBERTO GARCÍA. Ingeniero Industrial, Universidad Católica de Oriente. Docente departamentos de Ingeniería de Producción e Ingeniería de Diseño de Producto, Universidad EAFIT.
- JORGE ENRIQUE DEVIA PINEDA. Ingeniero Químico, Universidad de Antioquia. PhD en Química. Universidad de Pittsburgh. Docente del Departamento de Ingeniería de Procesos, Universidad EAFIT.
- MARCO VALENCIA GARCÍA. Ingeniero Metalúrgico, Universidad de Antioquia. Docente de Ciencia de los Materiales, Universidad EAFIT.
- Personal del Laboratorio de Concretos, Suelos y Pavimentos, Universidad EAFIT. Especialmente a VLADIMIR RODRÍGUEZ USECHE, JHON FREDY GONZÁLEZ, ORLANDO ESPINOSA LÓPEZ Y ALEXANDER OQUENDO PENAGOS.
- Dirección de Producción y Laboratorio de Calidad - Pavimentar S.A.
- LUZ MARINA OROZCO PELÁEZ. Socióloga, Universidad de Antioquia. Coordinadora de Gestión Corporativa, ECOSESA.
- LUCELLY CASAS JARAMILLO. Secretaria DIAN.
- Universidad EAFIT y Fondo social Beca ANDI – EAFIT.

CONTENIDO

	pág
Nota de Aceptación	iii
AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT	xv
INTRODUCCIÓN.....	1
1. OBJETIVOS.....	3
1.1 OBJETIVO GENERAL	3
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
2. ALCANCE.....	4
3. MARCO REFERENCIAL.....	5
3.1 MARCO TEÓRICO	5
3.1.1 Pavimento.....	5
3.1.2 Material asfáltico	7
3.1.3 Agregados pétreos.....	9
3.1.5 Marco legal vigente.....	14
3.2 ESTADO DEL ARTE.....	15
3.2.1 Ámbito colombiano	15
3.2.2 Trabajos de investigación	17
3.3 ESPECIFICACIONES INVIAS	21
4. METODOLOGÍA.....	22
4.1 MATERIALES.....	22

4.1.1 Obtención y adecuación de los materiales	22
4.2 MÉTODOS.....	24
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	25
5.1 ENCUESTA	25
5.2 PRUEBAS PRELIMINARES	25
5.2.1 Clasificación.....	25
5.2.2 Punto de fusión	26
5.3 DISEÑO DE EXPERIMENTOS (DDE)	27
5.3.1 Descripción del diseño de experimentos	27
5.3.2 Diseño Marshall	28
5.4 FORMULACIONES ÓPTIMAS, MODELO MATEMÁTICO Y RESULTADOS EXPERIEMETALES.....	34
5.5 PORCENTAJES DE VACÍO	37
5.6 ENSAYOS DINÁMICOS	38
5.6.1 Fatiga.....	39
5.6.2 Módulo dinámico (Ed)	45
5.6.3 Creep.....	49
5.7 DISCUSIÓN.....	52
5.7.1 Material plástico como ligante	52
5.7.2 Margen de Contribución.....	53
5.7.3 Viabilidad técnica.....	55
6. CONCLUSIONES	60
7. RECOMENDACIONES.....	62
8. PARTICIPANTES DEL PROYECTO.....	63
9. CRONOGRAMA	64

10. RECURSOS	65
BIBLIOGRAFÍA.....	66
ANEXOS.....	71

LISTA DE TABLAS

	pág
Tabla 1. Especificaciones del cemento asfáltico	8
Tabla 2. Requisitos de los materiales pétreos – Nivel de tránsito pesado (NT3)	10
Tabla 3. Propiedades del ABS	13
Tabla 4. Propiedades del PS	14
Tabla 5. Criterios de diseño de la mezcla asfáltica en caliente por el método Marshall....	21
Tabla 6. Caracterización del material por tamaño de partícula.....	23
Tabla 7. Probetas diseño Marshall Diskettes	28
Tabla 8. Probetas diseño Marshall Carcasas.....	29
Tabla 9. Resultados Diskettes como Agregado.....	31
Tabla 10. Resultados Carcasas como Agregado	32
Tabla 11. Resultado de estabilidad y flujo para las formulaciones con 5% de polímero. ...	36
Tabla 12. Porcentaje de vacío de las formulaciones escogidas	37
Tabla 13. Ciclos de fractura ensayo de Fatiga	40
Tabla 14. Deformaciones ensayo de Fatiga.....	40
Tabla 15. Módulos Dinámicos (E_d), desviación estándar (S) y Coeficientes de Variación (C_v) de la prueba.....	48
Tabla 16. Resultados de deformación <i>Creep</i> , 700 N.....	50
Tabla 17. Resultados de deformación <i>Creep</i> , 4000 N.....	51
Tabla 18. Evaluación económica de las mezclas óptimas – Alternativa 1	54
Tabla 19. Evaluación económica de las mezclas óptimas – Alternativa 2	54
Tabla 20. Ahorro de materiales por m ³ de mezcla modificada	57
Tabla 21. Propiedades del cemento asfáltico.....	74
Tabla 22. Características del molino de cuchillas.....	75

Tabla 23. Caracterización del material plástico por tamaño de partícula.....	75
Tabla 24. Condiciones del equipo.....	79
Tabla 25. Resultados de los ensayos de punto de fusión	79
Tabla 26. Costo de materiales sólidos	83
Tabla 27. Precio de venta de Mezcla asfáltica	83
Tabla 28. Codificación de las variables del modelo.....	85
Tabla 29. Matriz de correlación de las variables del modelo *	85
Tabla 30. Valores de flujo y de los factores escogidos según codificación.....	86
Tabla 31. Estadísticos de la regresión seleccionada (Ecuación 5)	87
Tabla 32. Análisis de Varianza (ANOVA) de la regresión.....	87
Tabla 33. Coeficientes del modelo (en la Ecuación 5).....	87
Tabla 34. Codificación de las variables del modelo.....	88
Tabla 35. Matriz de correlación de las variables del modelo *	88
Tabla 36. Valores de flujo y de los factores seleccionados según codificación	89
Tabla 37. Estadísticos de la regresión seleccionada (Ecuación 6)	90
Tabla 38. Análisis de Varianza (ANOVA) del modelo.....	90
Tabla 39. Coeficientes del modelo (en la Ecuación 6).....	90

LISTA DE FIGURAS

	pág
Figura 1. Capas constitutivas de un pavimento.....	6
Figura 2. Estructura química del ABS	12
Figura 3. Estructura química del PS.....	13
Figura 4. Cantidad de investigaciones realizadas en Colombia – período 1979 – 2005...	16
Figura 5. Participación de polímeros en los trabajos de modificación de asfalto.	17
Figura 6. Tratamientos DDE	27
Figura 7. Flujo vs Asfalto. Diskettes	33
Figura 8. Flujo vs Asfalto. Carcasas.....	33
Figura 9. Equipo para ensayos dinámicos.	38
Figura 10. Disposición ensayo de fatiga	39
Figura 11. Esquema ciclos de carga	39
Figura 12. Comparación resistencia a la fatiga	41
Figura 13. Comparación de la deformación a 100 kPa.....	42
Figura 14. Comparación de la deformación a 100 kPa, ciclos del 4990 al 5010.....	43
Figura 15. Comparación de la deformación a 200 kPa.....	43
Figura 16. Comparación de la deformación a 200 kPa, ciclos del 490 al 510.....	44
Figura 17. Comparación de la deformación a 400 kPa.....	44
Figura 18. Comparación de la deformación a 400 kPa, ciclos del 290 al 310.....	45
Figura 19. Disposición ensayo de módulo dinámico.....	46
Figura 20. Comparación deformación en el análisis de módulo dinámico.	46
Figura 21. Deformación en los últimos 30 s ensayo de evaluación del módulo dinámico .	47
Figura 22. Disposición ensayo de <i>Creep</i>	49
Figura 23. Comparación de <i>Creep</i> probetas de 100 mm de diámetro x 200 mm de altura	50

Figura 24. Comparación de <i>Creep</i> probetas de 102 mm de diámetro x 63.5 mm de altura	51
Figura 25. Diagrama de bloques - Proceso de producción de Mezcla Asfáltica Modificada	59
Figura 26. Granulometría de los agregados pétreos (muestra patrón)	71
Figura 27. Granulometría de agregados pétreos + agregados plásticos (ABS).....	72
Figura 28. Granulometría de agregados pétreos + agregados plásticos (PS)	73
Figura 29. Espectro infrarrojo – Material de diskettes (color negro, pasta opaca)	76
Figura 30. Espectro infrarrojo – Material de diskettes (color rosa, pasta translúcida)	77
Figura 31. Espectro infrarrojo – Material de referencia (PS).....	78
Figura 32. Termograma DSC – Muestra ABS FR(17)	79
Figura 33. Termograma DSC – ABS FR(17) + PC	80
Figura 34. Termograma DSC – ABS + PC + PS	81
Figura 35. Termograma DSC – Diskettes (Poliestireno).....	82

RESUMEN

En el presente trabajo se estudió el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas con la incorporación de polímeros de origen informático (carcasas de pantallas y material de diskettes en forma de agregados sólidos particulados).

Se investigó el efecto del tamaño de partícula del polímero (fino, grueso -respecto a malla 8-), porcentaje de polímero (6 %, 13 %, 20 %) y porcentaje de material asfáltico (4.3 %, 4.9 %, 5.5 %) respecto a la mezcla total, elaborándose trece formulaciones de mezcla asfáltica modificada, cuyos resultados de estabilidad y flujo se utilizaron como criterio de evaluación y escogencia de formulaciones.

Los resultados muestran que a menor tamaño de partícula el polímero se incorpora mejor a la mezcla; la adición de polímero aumenta el flujo, teniendo que disminuirse la cantidad del mismo para cumplir con el valor máximo reportado en la norma colombiana (3.5 mm). Los valores de estabilidad de las muestras modificadas con carcasas son mayores comparados con las muestras patrón, aunque en general no se observa una tendencia clara de los datos para esta variable con los cambios en los factores evaluados. Los resultados permitieron establecer mezclas posibles con porcentajes menores al 6 % de polímero fino y con 4.9 % de asfalto.

Para una mejor caracterización de las mezclas modificadas se eligieron, para ambos materiales, porcentajes de 5 % de polímero fino y 4.9 % de asfalto para realizarles pruebas de porcentaje de vacíos y un análisis comparativo de fatiga (100 kPa, 200 kPa, 400 kPa, 10 Hz), módulo dinámico (30 s, 1000 N, 4 Hz) y *Creep* (fase 1: 4000 N, fase 2: 100 N) entre ellas y la mezcla patrón, con el fin de vislumbrar su comportamiento dinámico.

Los resultados de las pruebas indican que la muestra elaborada con plástico de carcasas (ABS) tiene el desempeño dinámico más satisfactorio entre las tres muestras evaluadas, para las condiciones de carga más exigentes aplicadas en los tres ensayos.

Esta investigación constituye la primera etapa en el desarrollo de mezclas asfálticas modificadas con residuos electrónicos. Por lo tanto, el resultado es la propuesta de unas

formulaciones que cumplen los requisitos del Instituto Nacional de Vías (INVÍAS) en cuanto a estabilidad y flujo (en tanto lo que se pretende es mejorar las propiedades mecánicas). Sin embargo, es necesario en una investigación posterior, verificar el cumplimiento de toda la normatividad del INVÍAS para mezclas asfálticas y/o demostrar el mejoramiento en el desempeño de la carpeta con la adición de los polímeros.

ABSTRACT

The effect of computational origin polymers (particulate solid material from monitor housing and diskettes) in the mechanical behavior of asphalt mixture was studied.

The effect of particle size, (small, large -regarding to sieve 8-), polymer percentage on the total mixture (6 %, 13 %, 20 %) and asphalt material percentage on the total mixture (4.3 %, 4.9 %, 5.5 %) was investigated. For this purpose, thirteen samples were made, whose stability and flow values were used as evaluation and choosing criterion. Results from these tests showed that the smallest the particles, the more effective incorporation of plastic materials is achieved; polymer incorporation causes the mixture flow to increase, so the quantity of polymer was reduced to obtain a flow value according to Colombian standard (3.5 mm). Stability values for housing – modified samples were larger than the ones belonging to unmodified samples. However, no general tendency for this variable is observed relating to the evaluated factors. Thus, samples 4.9 % asphalt cement and less than 6 % polymer was determined to be able to fulfill the requirements.

For a better characterization of samples, 5 % small – sized polymer and 4.9 % asphalt material formulations were chosen for both housing and diskettes materials to run a void percentage test and a comparative analysis *i.e.* fatigue (100 kPa, 200 kPa, 400 kPa, 10 Hz), dynamic module (30s, 1000 N, 4 Hz) and *Creep* (phase 1: 4000 N, phase 2: 100 N) between them and the standard sample, to determine their dynamic behavior.

Results show that housing plastic (ABS) samples have the best dynamic performance at the highest load conditions, among the evaluated samples.

This research is part of the development of electronic plastic waste – modified asphalt mixtures. Therefore, its result is the proposal of formulations that satisfy INVIAS requirements regarding to flow and stability. However, verification of complete Colombian standards for asphalt mixtures and/or demonstration of the enhancement of asphalt binder performance with polymer addition are necessary in a subsequent investigation.

INTRODUCCIÓN

El diseño, implementación y construcción de estructuras de pavimentos flexibles es la alternativa de pavimentación más económica como técnica en las obras de infraestructura de carreteras para vías de segundo y tercer orden (intermunicipales y veredales). Sin embargo, estas obras han sufrido inconvenientes y fallas que han generado una disminución considerable en su efectividad y durabilidad, lo que ha llevado a buscar nuevas alternativas para los materiales que componen la mezcla asfáltica buscando mejorar su capacidad de respuesta mecánica y dinámica (REYES *et al.*, 2006). Una de estas alternativas es la adición controlada de polímeros, la cual ha demostrado mejorar las propiedades de la carpeta asfáltica (Ver numeral 3.2).

En la actualidad, el problema de los desechos provenientes de computadores en desuso producidos a gran escala en el mundo ha generado un llamado de alerta encabezado por las Naciones Unidas a través de su Programa sobre el Medio Ambiente. Según el informe “Ordenadores y Medio Ambiente”, financiado por la ONU, sólo en Estados Unidos de Norteamérica se descartan entre 14 y 20 millones de ordenadores al año (ASOCIACIÓN REFORESTA, 2004).

En el ámbito colombiano, según el estudio “Gestión de residuos electrónicos en Colombia” (OTT, 2008) en 2006 se generaron 6500 toneladas de residuos de computadores, de los cuales un 27.7 % corresponde a material plástico. Adicionalmente, se hace una proyección a 2013 de una cantidad entre 80.000 y 140.000 toneladas de residuos electrónicos. Esta situación exige una correcta disposición y reciclaje del material, evitando daños al ambiente y a la sociedad.

Buscando mejorar el desempeño de la carpeta asfáltica y con base en que la adición de polímero es una de las técnicas que mejores resultados ha dado, la hipótesis central del trabajo es que es factible incorporar plástico de desecho en la mezcla asfáltica, mejorando

sus propiedades mecánicas. Con este fin, se tuvieron las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Cuál es el mejor método de incorporación del polímero: como agregado (vía seca) o como parte del material asfáltico (vía húmeda) y por qué?
- ¿Qué porcentaje de polímero puede llevar la mezcla?
- ¿Qué ocurre con las propiedades del material asfáltico con la adición del polímero?
- ¿Cuál es la factibilidad técnica y económica del producto final?

De esta manera, se propone una solución conjunta a los problemas de los residuos plásticos provenientes de computadores y a la necesidad de asfaltos con mejor desempeño, obteniendo beneficios como:

- Mejoras en las propiedades mecánicas del material asfáltico.
- Disminución en el uso de asfalto y de agregados.
- Disminución de la contaminación por el aprovechamiento de un residuo abundante, es decir, por el uso de desechos plásticos como materia prima para la obtención de un producto novedoso (*i.e.*, se utiliza un aditivo polimérico que no se acostumbra en la formulación de asfaltos.)
- El impulso de la industria de reciclaje de plásticos generando empleo por el incremento de la demanda de estos materiales.
- El desarrollo de un material a menor costo y con propiedades adecuadas para el uso en carreteras, que es elemento fundamental en la economía, desarrollo y accesibilidad de un país.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Formular una mezcla asfáltica modificada con residuos plásticos de computadores y similares que cumpla con la legislación nacional para este tipo de productos, investigando el efecto de la dosis de polímero incorporada a la mezcla asfáltica y del método de incorporación del polímero sobre las propiedades mecánicas de interés.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la forma de incorporación del material plástico para la obtención de la mezcla asfáltica: como parte de los agregados o dentro del cuerpo del asfalto. Si ambos métodos son posibles, establecer cuál es el mejor y por qué.
- Encontrar el porcentaje óptimo de polímero en la mezcla, con base en los requerimientos del INVIAS (Instituto Nacional de Vías), mediante un diseño de experimentos.
- Establecer el aporte del polímero a las propiedades del producto final por medio del análisis de los resultados de las pruebas de laboratorio, principalmente para la estabilidad y el flujo, con el fin de comprobar los beneficios técnicos que el residuo plástico le aporta al material.
- Evaluar la viabilidad técnica y económica del producto desarrollado por medio de una comparación del proceso empleado y los procesos existentes para la fabricación de pavimentos y a través del margen de contribución del producto final.

2. ALCANCE

El resultado del proyecto será el desarrollo de un proceso y la formulación de mezclas asfálticas que tengan entre sus componentes residuos plásticos de computadores (e.g., carcacas de pantallas y diskettes) verificando que cumplan con los requerimientos del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) respecto a la estabilidad y el flujo, un informe final y un artículo para publicación, donde se dé cuenta del proceso y producto desarrollados.

3. MARCO REFERENCIAL

3.1 MARCO TEÓRICO

3.1.1 Pavimento

El pavimento es una estructura que reposa sobre un suelo de fundación (subrasante) y está constituido por una o más capas construidas con materiales seleccionados y un proceso constructivo (estipulado y controlado), cuya función principal es la de transmitir de manera adecuada los esfuerzos a la subrasante (VIDAL, 2008).

Existen varios tipos de pavimentos: flexibles, rígidos, de adoquines, mixtos y semi-rígidos.

La figura 1 muestra la distribución de capas para dos tipos distintos de pavimentos. En los pavimentos flexibles, la capa superior de materiales (capa de rodadura) está compuesta por una mezcla asfáltica. Los pavimentos mixtos también tienen una carpeta asfáltica como capa de rodadura o antes de ésta (VIDAL, 2008).

La mezcla asfáltica está constituida por materiales pétreos (llamados agregados) y materiales asfálticos (ligantes).

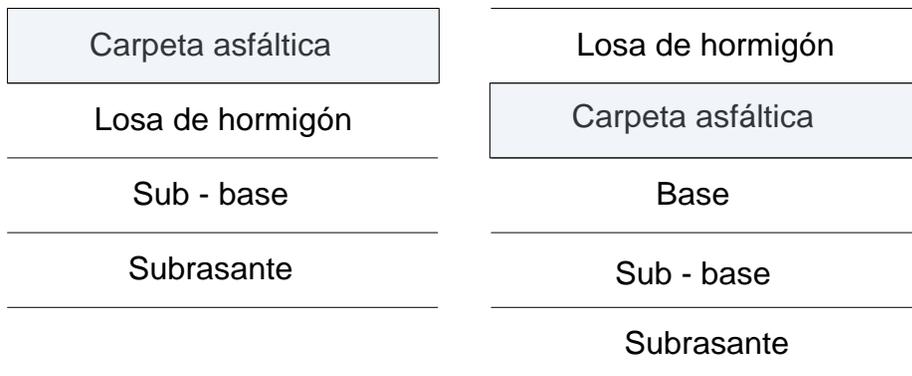
La dosificación material asfáltico - agregado es muy importante y requiere de un control muy riguroso. Una mezcla con exceso de asfalto provoca una superficie inestable y un bajo contenido de éste, produce una capa áspera propensa a la desintegración, disminuyendo sus características de impermeabilidad y durabilidad (VALENZUELA, 2003).

Figura 1. Capas constitutivas de un pavimento

PAVIMENTO FLEXIBLE



PAVIMENTO MIXTO



VIDAL VALENCIA, Julián. Conceptos generales. 2008

La red de carreteras del país está constituida por aproximadamente 164.000 kilómetros, distribuida en 16.776 km de red primaria a cargo de la nación y 147.500 km entre red secundaria y terciaria - vías departamentales y municipales -. (MINISTERIO DE TRANSPORTE, 2008).

De la red vial encargada a la nación (vías arteria y troncales), el 45 % se encuentra en buenas condiciones técnicas (MINISTERIO DE TRANSPORTE, 2008). Por su parte, el

Instituto Nacional de Vías (INVIAS) tiene proyectadas actividades de construcción, mantenimiento y mejoramiento para 827 Km de red vial en el país, que comprenden el período 2008 – 2011 (INVIAS, 2009).

Respecto a la producción de mezcla asfáltica, para el año 2001 Colombia contaba con 135 plantas de producción, cuya capacidad instalada efectiva era de 12.2 millones de toneladas anuales, equivalentes a 5.2 millones de m³ (SEVILLA LEMUS, 2002). Todo lo anterior permite dimensionar el efecto que tendrían mejoras en el proceso y/o producto del cual es objeto el presente trabajo.

3.1.2 Material asfáltico

El material asfáltico, comúnmente denominado asfalto, está compuesto de un conjunto de fases orgánicas de alto peso molecular, que le confieren propiedades de viscosidad, adherencia, color y estabilidad química. De las descripciones hechas por Hergenrogher *et al.* (UNITED STATES PATENT OFFICE, app US 2008/0009567 A1) y TALAVERA *et al.* (2001) puede establecerse la siguiente clasificación de las fases del asfalto:

- **Asfaltenos:** Constituyen del 5 al 25 % del asfalto. Es la fase más pesada, que se compone principalmente de sólidos negros y amorfos los cuales contienen, además de carbono e hidrógeno, nitrógeno, azufre y oxígeno. Esta fase la constituyen compuestos aromáticos altamente polares con pesos moleculares que van desde 4000 g/mol a 7000 g/mol.
- **Maltenos:** es la fase ligera del asfalto, con pesos moleculares de 700 g/mol a 4000 g/mol. En general puede decirse que esta fase diluye a los asfaltenos, los cuales se presentan en forma de micelas o agregados coloidales dispersos. Los maltenos se dividen en:
 - **Resinas:** Constituyen del 15 % al 25 % del asfalto. Son compuestos aromáticos polares con pesos moleculares entre 800 y 2000 g/mol. Son sustancias oscuras, adhesivas y de consistencia sólida o semisólida. La relación resinas/asfaltenos determina el comportamiento reológico del asfalto (sol o gel).

- Cíclicos: constituyen la fase de menor peso molecular (entre 2000 y 4000 g/mol). Es el medio de dispersión de los asfaltenos, abarcando entre 45 y 60 % del asfalto. Los compuestos de esta fase son naftalenos con cadenas laterales.
- Saturados: compuesta por hidrocarburos alifáticos con pesos moleculares entre 600 y 1000 g/mol. Comprende de un 5 a un 20 % del asfalto.

Es importante mencionar que los asfaltos usados con polímeros deben poseer bajos contenidos de asfaltenos y suficientes aceites aromáticos que disuelvan parcialmente el polímero a las temperaturas de mezclado (TALAVERA *et al.*, 2001).

Las características que debe cumplir el cemento asfáltico se muestran en la tabla 1. El proveedor de cemento asfáltico fue ECOPETROL, y la ficha técnica de su producto se adjunta en el Anexo A. Debido a que el modo de incorporación del polímero fue como agregado, se trabaja con las características ajustadas a las normas que brinda el proveedor.

Tabla 1. Especificaciones del cemento asfáltico

Característica	Unidad	Norma de ensayo INV	Grado de penetración 60 - 70	
			Mín	Máx
Penetración (25 °C, 100 g, 5 s)	0,1 mm	E - 706	60	70
Índice de penetración	-	E - 724	-1	+1
Viscosidad absoluta (60°C)	P	E - 716 E - 717	1500	-
Ductilidad (5°C, 5cm/min)	cm	E - 702	100	-
Solubilidad en tricloroetileno	%	E - 713	99	-
Contenido de agua	%	E - 704	-	0,2
Punto de ignición mediante la copa abierta Cleveland	°C	E - 709	230	-
Pérdida de masa por calentamiento en película delgada en movimiento (163 °C, 75 min)	%	E - 720	-	1,0
Penetración del residuo luego de la pérdida por calentamiento (E - 720) % de la penetración original	%	E - 706	52	-
Incremento en el punto de ablandamiento luego de la pérdida por calentamiento en película delgada en movimiento (E - 720)	°C	E - 712	-	5

3.1.3 Agregados pétreos

Los materiales pétreos estos están constituidos generalmente por una fracción gruesa, una intermedia, arena y un llenante mineral u otras variaciones que dependen de las características de la fuente de explotación. Preferiblemente deben ser materiales provenientes de depósitos aluviales que posteriormente serán triturados para adecuarlos a la especificación granulométrica requerida. Estos materiales deben ser resistentes y durables, no deben tener presencia de materiales extraños o finos que puedan disminuir la afinidad con el asfalto (VIDAL, 2008).

Se entiende por agregado grueso la porción del material pétreo retenida en el tamiz de 4.75 mm (No.4); agregado fino la porción comprendida entre los tamices de 4.75 mm y 75 μm (No.4 y No.200) y llenante mineral la que pase el tamiz de 75 μm (No.200) (INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, Artículo 400 – 07, 2007)

Los fragmentos de agregado grueso deberán estar limpios y sin exceso de partículas planas, alargadas, blandas o desintegrables. Deberá estar además exento de polvo, tierra, terrones de arcilla u otras sustancias que puedan impedir la adhesión completa del asfalto.

Por su parte, el agregado fino estará constituido por arena de trituración o una mezcla de ella con arena natural. Los granos del agregado fino deberán ser duros, limpios y de superficie rugosa y angular. Asimismo, el material deberá estar libre de cualquier sustancia que impida la adhesión del asfalto (INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, Artículo 400 – 07, 2007). Las características que deben cumplir los agregados se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Requisitos de los materiales pétreos – Nivel de tránsito pesado (NT3)

Tipo de tratamiento o mezcla		Desgaste Los Ángeles	Desgaste Micro - Deval	10% de finos (kN)		Pérdidas en ensayo de solidez		Partículas fracturadas mecánicamente (Agregado grueso) % mínimo 1 cara / 2 caras	Angularidad
				Seco	Relación Húmedo / Seco	Sulfato de sodio	Sulfato de magnesio		
Norma INV		E - 218 E - 219	E - 238	E - 238	E - 224	E - 220	E - 220	E - 227	E - 239
Mezcla densa, semidensa y gruesa en caliente	Agregado grueso	25 % máx	20 % máx	110 min máx	75 % mín	12 % máx	18 % máx	85/70	45 % mín
	Agregado fino					12 % máx	18 % máx		
	Gradación combinada								

INVIAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras. 2007. Artículo 400 - 07

Tabla 2. Requisitos de los materiales pétreos – Nivel de tránsito pesado (NT3) (Continuación)

Tipo de tratamiento o mezcla		Coeficiente de pulimento acelerado	Partículas planas y alargadas (Relación 5:1)	I. P.	Equivalente de arena	Contenido de impurezas (Agregado grueso)
Norma INV		E - 232	E - 240	E - 125 E - 126	E - 133	E - 237
Mezcla densa, semidensa y gruesa en caliente	Agregado grueso	0,45 min	10 % máx	N.P	50 % mín	0,5 % máx
	Agregado fino					
	Gradación combinada					

Tabla 2. Requisitos de los materiales pétreos – Nivel de tránsito pesado (NT3) (Continuación)

Tipo de tratamiento o mezcla		Adhesividad					
		Riedel Webber	Stripping	Bandeja	Resistencia conservada Inm - Comp	Resistencia conservada Tracción indirecta	Pérdidas Cánabro tras inmersión
Norma INV		E - 774	E - 737	E - 740	e - 738	E - 725	E - 760
Mezcla densa, semidensa y gruesa en caliente	Agregado grueso						
	Agregado fino						
	Gradación combinada					80 % mín	

3.1.4 Polímeros

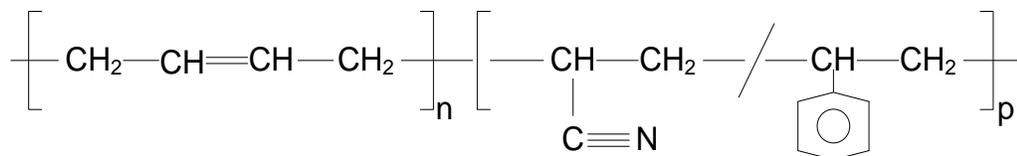
Para material asfáltico, los polímeros que presentan potencial son (UNITED STATES PATENT OFFICE, app US 2008/0009567 A1, 2008):

- Elastómeros tipo polidienos o copolímeros de polidienos con comonómeros no - dienos (e.g. estireno) como el polibutadieno y el poliisopreno.
- Copolímeros en bloque o aleatorios, como estireno – butadieno – caucho (SBR) aleatorio, estireno – butadieno (SB) en bloque, estireno – butadieno – estireno (SBS) en bloque, estireno – isopreno (SI) aleatorio, SI en bloque, estireno – isopreno butadieno (SIB) en bloque, SIB aleatorio, estireno – isopreno – estireno (SIS) en bloque y caucho cloropreno.

ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno)

Los polímeros de la familia del ABS se caracterizan por ser rígidos mas no quebradizos, duros y químicamente resistentes. Se produce mediante la co-polimerización de estireno y acrilonitrilo en presencia de látex de polibutadieno, obteniéndose un copolímero en bloque que se esquematiza en la figura 2 (ROSATO, 1993).

Figura 2. Estructura química del ABS



El ABS ofrece baja absorción de agua, buena estabilidad dimensional, buenas propiedades eléctricas y alta resistencia a la abrasión, por lo que puede encontrarse comercialmente en una variedad amplia de productos, como piezas de automóviles (páneles internos, parachoques), juguetes, electrodomésticos y cubiertas de aparatos electrónicos como computadores y teléfonos (INTERNATIONAL PLASTICS SELECTOR, 1991). Con el fin de mejorar sus propiedades, el ABS contiene aditivos que pueden ser

otros plásticos o sustancias químicas. En la Tabla 3 pueden observarse dos tipos diferentes de ABS reforzado.

Tabla 3. Propiedades del ABS

	ABS-FR(17) + PC *	ABS-FR(17) **
T_{fusión} (°C)	255	221
Densidad (g/cm³)	1,18	1,26
% absorción de H₂O	0,15	0,3
T_{flexión} , 0.46 MPa (°C)	98	93,3
T_{flexión} , 1.8 MPa (°C)	90	87,8
Elongación en la ruptura (%)	60%	>=10%

* INTERNATIONAL PLASTICS SELECTOR. Plastics: Thermoplastics and Thermosets. Referencia: Bayblend FR-1440, Mobay Corp. 1991.

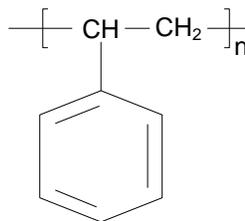
** AUTOMATIC CREATIONS INC. Material Data. RTP 600 FR. RTP Company. 2009.

Poliestireno (PS)

El poliestireno es conocido por su brillo, claridad, dureza, maquinabilidad, facilidad de coloración, excelente estabilidad dimensional y costo relativamente bajo. Existen en el mercado materiales modificados con base en el poliestireno de uso general (General Purpose PS o GPPS) que exhiben varios rangos de resistencia al calor y al impacto (ROSATO, 1993)

En la figura 3 se muestra la estructura química del GPPS.

Figura 3. Estructura química del PS



El poliestireno de alto impacto (*HIPS*), por su proceso de producción, alcanza cierto grado de interacción química con el caucho (que en su mayoría queda disperso en la matriz polimérica), lo cual le confiere resistencia al impacto y ductilidad; por otra parte, disminuye su temperatura de ablandamiento y transparencia (ROSATO, 1993). Sus propiedades se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Propiedades del PS

	PS (FR) - Alto Impacto
T_{fusión} (°C)	230
Densidad (g/cm³)	1,17
% absorción de H₂O	0,04
T_{flexión} , 0.46 MPa (°C)	96,1
T_{flexión} , 1.8 MPa (°C)	69,4
Elongación en la ruptura (%)	>=10%

AUTOMATIC CREATIONS INC. Material Data.RTP 400 HI FR. RTP Company. 2009.

Por sus propiedades, el HIPS es utilizado en la fabricación de juguetes, carcasas, contenedores, señales de tránsito, tazas, tapas, entre otros (INTERNATIONAL PLASTICS SELECTOR, 1991).

3.1.5 Marco legal vigente

En Colombia, lo relacionado con la construcción de infraestructura vial está normalizado por el INVÍAS. En este caso, la especificación a seguir corresponde al Artículo 450-07 del documento técnico “Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras”, la cual reglamenta las especificaciones de mezclas asfálticas en caliente (concreto asfáltico y mezcla de alto módulo).

Para la prueba de *Creep* repetido se consultó la norma AASHTO T – 313 “*Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR)*” de

la Asociación Americana de Autopistas del Estado y Funcionarios del Área del Transporte (AASHTO por sus siglas en inglés).

3.2 ESTADO DEL ARTE

El uso de asfaltos para la adecuación de vías es una práctica que tiene sus orígenes en los principios del siglo XX y exige ahora más atención y desarrollo tecnológico, puesto que el nivel de tránsito de vehículos en la actualidad demanda propiedades mecánicas y físicas que respondan adecuadamente a las nuevas condiciones de servicio.

En la búsqueda de mejores características comenzó, desde la década de los 80, un amplio uso de polímeros de diversas características como material añadido a los asfaltos (WARDLAW, SHULER; 1992).

Se ha demostrado que la oxidación del material asfáltico mejora en alguna medida las propiedades de la mezcla final. Sin embargo, la adición de polímeros ha demostrado ser la alternativa preferible si se quieren mejorar sustancialmente las propiedades mecánicas, en especial la recuperación elástica del material (TALAVERA *et al.* 2001).

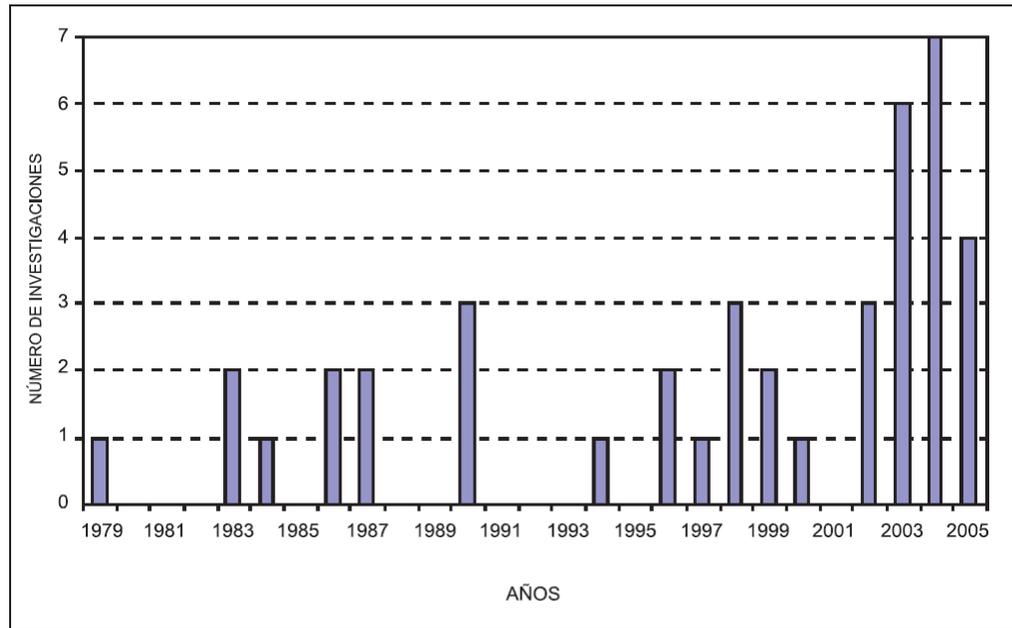
Para un buen desempeño del producto, el polímero debe combinarse bien con el material asfáltico y aportarle ciertas características mecánicas, que incluyen: recuperación elástica más alta, temperatura de ablandamiento más alta, mayor viscosidad, mayor fuerza cohesiva y mayor ductilidad; por otro lado, como asfalto o como agregado, el material plástico debe conferirle a la mezcla total un mayor rango de temperaturas de servicio, mayor tiempo de servicio, mayor resistencia al envejecimiento y a la fatiga, mejorar la seguridad, reducir ruido en las autopistas y disminuir costos de mantenimiento (YILDIRIM, 2005).

3.2.1 Ámbito colombiano

En el período 1979 - 2005, se reportan en la literatura 41 investigaciones referentes al tema de asfaltos modificados, entre las que se destacan la Universidad Industrial de

Santander (UIS), la Universidad Católica de Colombia y la Pontificia Universidad Javeriana (RONDÓN QUINTANA *et al.*, 2007). En la figura 4 se muestra la cantidad de investigaciones realizadas en el período mencionado.

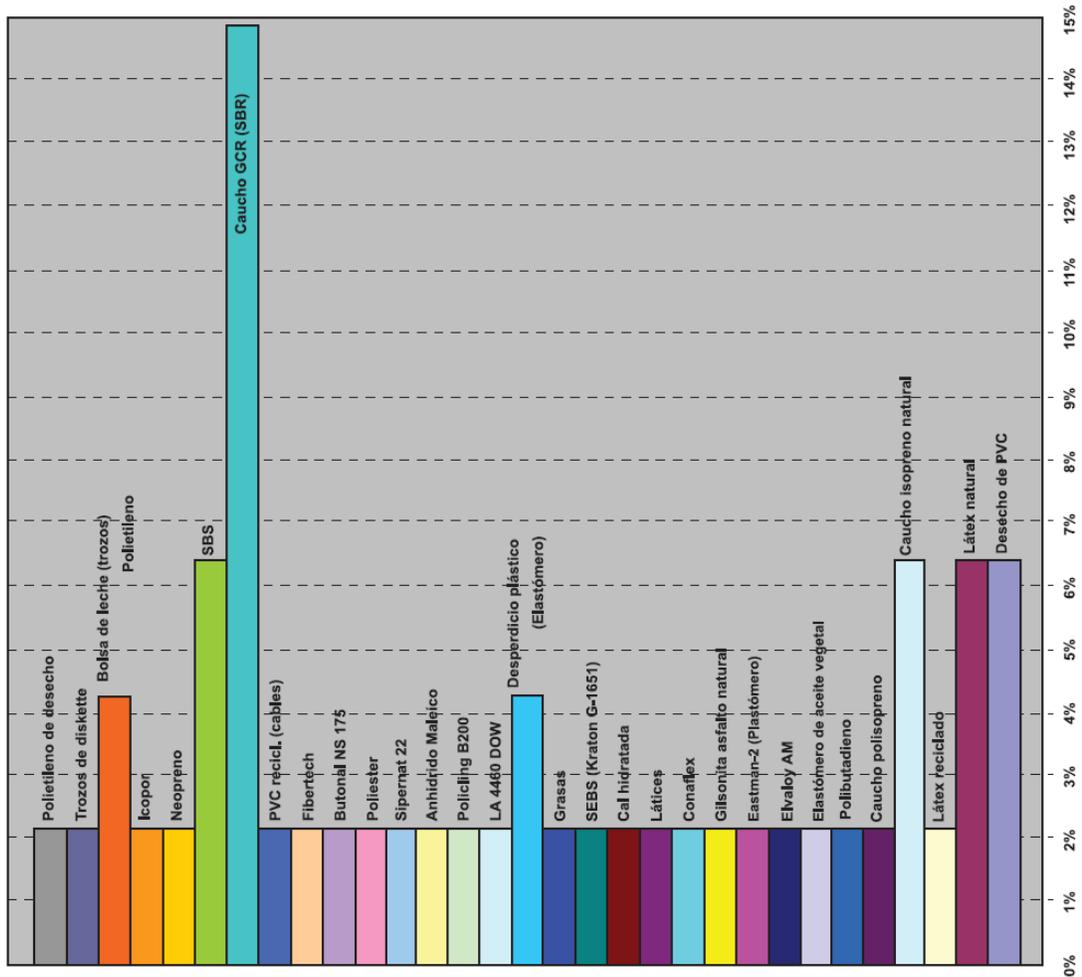
Figura 4. Cantidad de investigaciones realizadas en Colombia – período 1979 – 2005.



RONDÓN QUINTANA, *et al.* Estado del conocimiento del estudio sobre mezclas asfálticas modificadas en Colombia. 2008.

Los plásticos utilizados en su mayoría tienen como origen el reciclaje (suman el 72% de las investigaciones) y se muestran en la figura 5.

Figura 5. Participación de polímeros en los trabajos de modificación de asfalto.



RONDÓN QUINTANA, *et al.* Estado del conocimiento del estudio sobre mezclas asfálticas modificadas en Colombia. 2008.

3.2.2 Trabajos de investigación

A continuación se citan diversas experiencias en el uso de polímeros como material adicionado a mezclas asfálticas.

- En la patente US 6.444.731 B1 desarrollada por Memon (2002), se propone una metodología para la incorporación de caucho dividido finamente o polímero del tipo copolímero en bloque (SBS, SBR). El uso de un agente de dispersión añadido al polímero, como aceite vegetal o furfural, en una primera etapa de proceso, favorece la homogeneidad de la mezcla, que exhibe buena compatibilidad asfalto – polímero

(solubilidad, dispersión). La mezcla polímero – agente de dispersión se realiza por aproximadamente 1 hora con asfalto precalentado. Se incorporan posteriormente a esta mezcla dos activadores (agentes químicos) con un periodo de agitación de 45 min. El uso de éstos últimos reduce los tiempos de mezclado de 4 horas (sin adición) a 1 hora en promedio, aumenta el rango de temperaturas de servicio (PG) y evita la separación de fases y segregación de las propiedades mecánicas.

- En la publicación realizada por TALAVERA *et al.* (2001) se describe el desarrollo de agentes químicos que permiten la efectiva unión polímero – asfalto, evitando separación de fases en el material asfáltico. En este trabajo se sintetizan tres agentes de estabilización: Fenol – Formaldehído, Fenol sulfonado en posición orto y SBS lineal funcionalizado. Después de su caracterización, las pruebas de estabilidad efectuadas sobre las muestras con adición de los agentes mencionados determinan al Fenol sulfonado y al SBS lineal funcionalizado como los más aptos para la homogenización del material, los cuales disminuyen las diferencias en temperatura de ablandamiento, penetración y viscosidad entre dos puntos superior e inferior de las probetas de ensayo.
- En la aplicación de patente US 2008/0009567 A1 (HERGENROTHER *et al.*, 2008) se hace una evaluación completa de diversos polímeros (saturados e insaturados de distintos tipos) y de varios agentes de entrecruzamiento o *crosslink*, que comprenden compuestos fosforados (P_2S_5 , P_2O_5 , H_3PO_4 , PCl_3) ZnS , Al_2S_3 . Los autores sugieren una ruta de proceso que consta de la elaboración separada de un concentrado asfalto polímero y un segundo concentrado asfalto agente de entrecruzamiento, que se mezclan posteriormente a una temperatura de 145 °C a 170 °C para producir el material asfáltico. Se indica un porcentaje de 5 % a 10 % de polímero en el concentrado y de un 0.5 % a un 10 % de agente de entrecruzamiento en su respectivo concentrado para realizar la mezcla final. Las pruebas evidencian el mejor comportamiento de los polímeros insaturados en la respuesta mecánica de las

muestras (recuperación elástica, separación, ángulo de fase). Los porcentajes de polímero sugeridos en la mezcla total son de 1.5 % y 4 %.

- Por su parte en la patente US 7.202.290 B2 (STUART Jr. *et al.*, 2007) se presenta un proceso para elaborar una mezcla asfáltica a partir de termoplástico (polietileno oxidado), elastómero (SBS), agente de entrecruzamiento o *crosslink* (azufre), asfalto y agregado pétreo. Se elaboraron tres premezclas, dos de ellas compuestas por elastómero (E) y termoplástico (T) (Pm_1 : 50 %wt (E) y Pm_2 : 25 %wt (E)) y otra por termoplástico – agente de entrecruzamiento (Pm_3 : 50% (T)) El efecto de los aditivos fue evaluado adicionando por pares estas premezclas de manera simultánea al material asfáltico, *i.e.* combinaciones $Pm_1 - Pm_3$ y $Pm_2 - Pm_3$. Esta modalidad de incorporación disminuye los tiempos de mezclado (dispersión de los componentes en el asfalto), evita emisiones gaseosas y polvo y permite viscosidades adecuadas para el riego en carreteras. Los porcentajes óptimos (en peso) de polímero respecto a la mezcla total fueron: 3 % $Pm_1 - 0.5$ % Pm_3 , 4 % $Pm_1 - 0.5$ % Pm_3 , 3 % $Pm_2 - 0.5$ % Pm_3 y 4 % $Pm_2 - 0.5$ % Pm_3 .
- La patente US 6.407.152 B1 (BUTLER y KELLY, 2002) hace uso de un elastómero termoplástico y un agente de entrecruzamiento compuesto (Tiopolímero + Agente extra). Se diferencian dos agentes extras: uno compuesto por MBT, ZnO y MPTM y otro por ZMBT y DTDM (referenciados en la patente). El proceso se compone de precalentamiento del asfalto a 167 °C, incorporación del polímero (SBS) por medio de mezclado a 2500 RPM por 45min, incorporación de agente de entrecruzamiento por medio de mezclado a 250 RPM por 3 horas y un período final de reposo de 24 horas. Se llega a una mezcla polímero – asfalto con 4% de SBS y con una composición de agente extra óptima de 0.06 % ZnO, 0.06 % MBT y 0.2 % MPTM (respecto a la mezcla polímero asfalto), con resultados satisfactorios respecto al grado de desempeño (PG), DSR (Reómetro Dinámico de Corte) y separación.

- Otro ejemplo de los avances realizados al respecto, es la modificación de cemento para mortero con ABS (acrilonitrilo-butadieno-estireno) reciclado, trabajo publicado con dicho nombre (Palos *et al*, 2001). En esta investigación se analizan mezclas polímero-cemento con relaciones de 8, 15 y 25 % (porcentaje en peso) para determinar la variación en las propiedades de compresión y adhesión a estructuras de acero, encontrándose un incremento en ambas propiedades con la adición del ABS. Sin embargo, para lograr el incremento en la adhesión debieron tratar el polímero con anhídrido maleico; de lo contrario, esta propiedad disminuía con la presencia del ABS en la mezcla.
- En el trabajo hecho por Özen *et al.* (2007) se analizan tres tipos de polímeros: OL (no especificado en el artículo), EL (terpolímero elastómero reactivo) y SB (Estireno Butadieno) como aditivos de la mezcla asfáltica para evaluar la deformación permanente en muestras de mezcla asfáltica con 4.4 % de contenido de material asfáltico. Fueron elaboradas muestras cilíndricas que se sometieron a las pruebas de *Creep* repetido a 5 °C, 25 °C y 40 °C y ahuellamiento o *wheel tracking* a 60 °C. Los resultados a 5 °C y 25 °C muestran un mejor desempeño del SB y EL en lo que respecta a la resistencia a la deformación permanente para ambas pruebas. A 40 °C, el desempeño del material es menor, hecho que se reporta en otras investigaciones citadas en el artículo y que es objeto de investigación.

3.3 ESPECIFICACIONES INVIAS

Los valores de referencia para los resultados del diseño Marshall se muestran en la tabla 5 y hacen parte del Artículo 450 – 07 de las Especificaciones generales de construcción de carreteras del INVIAS.

Tabla 5. Criterios de diseño de la mezcla asfáltica en caliente por el método Marshall

Característica		Norma de ensayo INV	Categoría de tránsito			MEZCLA DE ALTO MÓDULO
			NT1	NT2	NT3	
Compactación		E-748	50	75	75	75
Estabilidad mínima (kg)		E-748	500	750	900	1500
Flujo (mm)		E-748	2 - 4	2 - 4	2 - 3,5	2 - 3
Vacíos con aire (%)	Rodadura	E-736 E-799	3 - 5	3 - 5	4 - 6	-
	Intermedia		4 - 8	4 - 8	4 - 7	4 - 6
	Base			5 - 9	5 - 8	-
Vacíos en los agregados minerales	Mezclas 0	E-799	≥13	≥13	≥13	-
	Mezclas 1		≥14	≥14	≥14	≥14
	Mezclas 2		≥15	≥15	≥15	-
	Mezclas 3		≥16	≥16	≥16	-
% de vacíos en los agregados (Volumen de asfalto efectivo / Vacíos en los agregados)		E-799	65 - 80	65 - 78	65 - 75	63 - 75
Relación llenante / Asfalto efectivo en peso		E-799	0,8 - 1,2			1,2 - 1,4
Relación Estabilidad / Flujo (kg/mm)		---	200 - 400	300 - 500	300 - 600	-

INVIAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras. 2007. Artículo 450 .

4. METODOLOGÍA

A través de todo el proyecto se realizó una búsqueda bibliográfica como guía para el proceso; adicionalmente, se obtuvo información de primera mano por medio de una encuesta a empresas productoras de mezcla asfáltica representativas, con presencia en el Valle de Aburrá, para un mejor diagnóstico de la viabilidad técnica y económica del producto final, y de su posible participación en el mercado.

4.1 MATERIALES

Las materias primas utilizadas fueron agregados pétreos, asfalto, diskettes y carcasas de computador.

Los equipos empleados fueron balanzas digitales, termopares y medidores digitales de temperatura, hornos para el secado de los materiales, sierra sin fin y trituradora de cuchillas para adecuar el tamaño de los plásticos, una estufa para calentar las mezclas, martillo de compactación Marshall, baño de agua caliente, prensa Marshall y triaxial cíclico para las pruebas dinámicas.

Adicionalmente se emplearon utensilios como taras (recipientes para hacer las mezclas), espátulas, moldes de compactación.

4.1.1 Obtención y adecuación de los materiales

El material asfáltico y los agregados pétreos fueron donados por la empresa Pavimentar S.A. (Copacabana, Colombia).

Los agregados pétreos usados corresponden a la gradación MDC 2, que para el caso se alcanzó realizando una mezcla de 35 % de triturado $\frac{3}{4}$ " (T3/4), 20% de arenas trituradas (A.T.) y 45 % de arenas mezcladas (A.M.) (nomenclatura usada para los agregados en Pavimentar S.A.).

Los materiales plásticos se consiguieron en diferentes centros de reciclaje de la ciudad, en la Universidad EAFIT (Medellín, Colombia), en el Departamento de Impuestos y Aduanas Nacionales DIAN, sede Medellín (Colombia) y con la Empresa Cooperativa De Servicios Educativos En Salud ECOSESA (Medellín, Colombia).

Las carcasas fueron lavadas con agua y jabón. Luego se cortaron con una sierra sin fin para ser alimentadas a un molino de cuchillas, donde se llevaron a un tamaño de partícula menor a 9,5 mm.

El material se dividió para obtener dos diferentes tamaños de partícula predominantes. El primero se obtuvo con una sola molienda (denominado como grueso), el segundo con 3 moliendas en el mismo equipo (denominado fino). Ésta caracterización se hizo respecto a la malla 8, de la serie de tamices Tyler, debido a que corresponde al tamaño mayormente afectado con las moliendas. En la tabla 6 se muestran los resultados de tamaño para cada material.

Tabla 6. Caracterización del material por tamaño de partícula

Material	Acumulado menor Malla 8	
	Fino	Grueso
ABS	27	7.9
PS	74.2	30.9

Los diskettes se abrieron para separar la parte polimérica del resto de los componentes. Luego se lavaron en una solución de soda cáustica al 4 % para remover completamente la etiqueta y el adhesivo, para después, ser pasados por el mismo proceso de molienda que las carcasas.

Toda la adecuación, así como el resto de las pruebas se realizaron en laboratorios de la Universidad EAFIT, en donde facilitaron todos los equipos y utensilios mencionados.

Las características de los materiales se muestran en el Anexo A.

4.2 MÉTODOS

La primera pregunta de investigación corresponde al método de incorporación del polímero, así que para determinar la aptitud de emplear los polímeros como materiales ligantes, se clasificaron y, a cada tipo, se le realizó una prueba de punto de fusión (Calorímetro Diferencial de Barrido -DSC-).

El resto de la investigación se realizó siguiendo un diseño de experimentos factorial, con el cual se estudió el porcentaje de polímero en la mezcla, tamaño de partícula (del polímero) y porcentaje de asfalto en la mezcla, con el fin de obtener flujos y estabilidades que cumplieran con la normas del INVÍAS para la construcción de carreteras tipo NT3. Posteriormente, se verificaron los porcentajes de vacío de las mezclas modificadas, y se observó y comparó su comportamiento bajo cargas repetitivas (pruebas dinámicas de Fatiga, Módulo Resiliente y *Creep*).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 ENCUESTA

Con la finalidad de establecer el interés y necesidad del producto en el mercado local, fueron encuestadas las siguientes empresas, ubicadas en el área metropolitana: Conasfaltos S.A., Pavimentar S.A., Asfaltadora Colombia Ltda., Reciclar Pavimentos Ltda. y Asfaltos y Hormigón. Todas las empresas manifestaron interés en tener un producto con un aporte ambiental y justificarían su posible sobre costo (hasta un 15 % de incremento respecto a la mezcla base). Tres de las cinco empresas ya emplean mezclas asfálticas modificadas y todas realizarían inversiones para modificar sus procesos y producir mezcla asfáltica modificada con polímeros.

En promedio, la cantidad en que estarían interesadas en principio es de 500 toneladas/mes de producto, valor que se tomó como base para la estimación del costo de maquinaria.

El formato de la encuesta diseñada se muestra en el Anexo D.

5.2 PRUEBAS PRELIMINARES

5.2.1 Clasificación

Las carcasas de pantallas fueron clasificadas según la nomenclatura que tienen grabada desde su proceso de conformación. Los materiales de este tipo coinciden en estar fabricados con ABS; sin embargo se pudieron identificar tres clases de acuerdo a los aditivos que posee cada material, así: ABS + PC, ABS + PC + PS y ABS FR (17).

La caracterización de la pasta de diskettes se realizó mediante espectroscopía infrarroja en el laboratorio de Química Instrumental de Ingeniería de Procesos (Universidad EAFIT) y se determinó que el poliestireno es predominante, tanto en diskettes traslúcidos como opacos. Los espectros correspondientes se muestran en el Anexo A.

5.2.2 Punto de fusión

Los puntos de fusión de los materiales plásticos fueron determinados mediante un Análisis de Calorimetría Diferencial (DSC por sus siglas en inglés), el cual se llevó a cabo en la Sede de Investigaciones Universitarias (SIU) por el Grupo de Ciencia de los Materiales de la Universidad de Antioquia (Medellín – Colombia).

Los diagramas de calorimetría (Flujo de Calor vs. Temperatura) de los tres tipos de material de carcasas revelan que al ser sometidas a calentamiento, las muestras no alcanzan una temperatura de fusión sino de degradación térmica (ver Anexo A, figuras 32 a 35). En los diagramas se aprecia que los picos de absorción de energía para el calentamiento (250 °C – 309 °C) no se presentan como energía liberada -un pico de la misma magnitud pero en sentido contrario para la misma temperatura- en el enfriamiento de las muestras, lo que indicaría una recristalización del polímero. De esta manera se evidencia un cambio en la naturaleza química de los materiales a las temperaturas en que se observan los picos de absorción (ver Anexo A).

En el caso del material de diskettes (PS), se observa un pico pronunciado como absorción y liberación de energía a 370 °C. Sin embargo, la forma del pico de absorción no es fiable para determinar dicha temperatura como la de fusión (CIENMATE, 2009).

El análisis de punto de fusión permite concluir, también, que los plásticos en cuestión poseen estructuras moleculares totalmente amorfas, por lo que sólo es posible determinar una temperatura de transición vítrea (CIENMATE, 2009).

Los resultados mostrados permiten mezclar los materiales de las carcasas y trabajarlos como uno solo en el caso de incorporación como agregado, ya que en esencia son ABS y sus puntos de fusión no afectan los ensayos en este modo de incorporación.

También permiten descartar el uso del material como ligante, ya que los polímeros utilizados no presentan puntos de fusión en el rango 35 °C – 350 °C, y a temperaturas superiores a los 180 °C el asfalto empieza a perder sus propiedades. Adicionalmente, por cuestiones del proceso (ver numeral 5.7.3) también puede establecerse que es mejor el modo de incorporación como agregado que como asfalto.

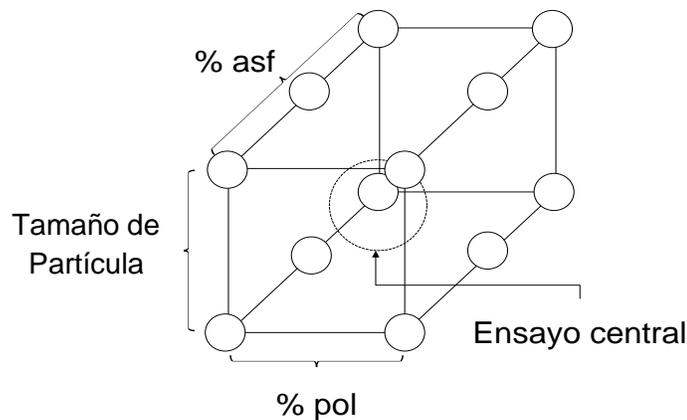
5.3 DISEÑO DE EXPERIMENTOS (DDE)

5.3.1 Descripción del diseño de experimentos

Los experimentos se realizaron siguiendo la metodología de trabajo del DDE factorial, en donde se evaluaron 3 factores (variables a controlar) con 2 niveles para el porcentaje de polímero (6 % y 20 %) y tamaño de partícula (fino y grueso), y 3 niveles para el porcentaje de asfalto (4.3 %, 4.9 % y 5.5 %). El método de incorporación fue como parte de los agregados.

De esta manera, resultan $2 \times 2 \times 3 = 12$ tratamientos, más un ensayo central, esto es 13 tratamientos, cada uno con 2 réplicas; lo que corresponde a 39 probetas para cada polímero (mezcla de carcasas y diskettes), para un total de 78 probetas. En la figura 6 se muestra un esquema general del diseño.

Figura 6. Tratamientos DDE



Las variables respuesta fueron Estabilidad (kg) y Flujo (mm), tomados como los principales criterios a cumplir del diseño Marshall. La elaboración de las probetas se hizo siguiendo los lineamientos de la norma INV E-748-07 (INVIAS, 2007).

5.3.2 Diseño Marshall

Las probetas se elaboraron en el laboratorio de Suelos, Concretos y Pavimentos, de la Universidad EAFIT, con ayuda del personal técnico para su compactación.

Se observó que la presencia de material plástico en las probetas de ensayo provoca una disminución en la densidad respecto a las probetas convencionales. Debido a esto, se debió ajustar la masa de las probetas para los diferentes niveles de % de polímero (y en algunos casos también para los niveles de tamaño de partícula), y así obtener las dimensiones estándar (101,6 mm de diámetro x 63,5 mm de altura); en las tablas 7 y 8 puede verse este cambio, así como los diferentes niveles del experimento.

Tabla 7. Probetas diseño Marshall Diskettes

Tratam.	Probetas		ASFALTO		AGREGADOS					
					Total	POLÍMERO		PÉTREOS*		
	Tamaño de partícula	Peso total (g)	%	Peso (g)	Peso (g)	%	Peso (g)	A.M (45%)	A.T (20%)	T 3/4 (35%)
Estándar	N/A	1200	4,9	58,8	1141,2	0	0	513,5	228,2	399,4
1	Fino	1150	4,3	49,5	1100,6	6	69	464,2	206,3	361,0
2	Grueso	1150	4,3	49,5	1100,6	6	69	464,2	206,3	361,0
3	Fino	840	4,3	36,1	803,9	20	168	286,1	127,2	222,6
4	Grueso	870	4,3	37,4	832,6	20	174	296,4	131,7	230,5
5	Fino	1150	4,9	56,4	1093,7	6	69	461,1	204,9	358,6
6	Grueso	1150	4,9	56,4	1093,7	6	69	461,1	204,9	358,6
7	Fino	890	4,9	43,6	846,4	20	178	300,8	133,7	233,9
8	Grueso	890	4,9	43,6	846,4	20	178	300,8	133,7	233,9
9	Fino	1150	5,5	63,3	1086,8	6	69	458,0	203,6	356,2
10	Grueso	1150	5,5	63,3	1086,8	6	69	458,0	203,6	356,2
11	Fino	890	5,5	49,0	841,1	20	178	298,4	132,6	232,1
12	Grueso	890	5,5	49,0	841,1	20	178	298,4	132,6	232,1
Central	fino-grueso	1005	4,9	49,2	955,8	13	131	371,3	165,0	288,8

* A.M: Arenas mezcladas, A.T: Arenas trituradas, T3/4: Triturado tres cuartos.

Tabla 8. Probetas diseño Marshall Carcasas

Tratam.	Probetas		ASFALTO		AGREGADOS					
					Total	POLÍMERO		PÉTREOS		
	Tamaño de partícula	Peso total	%	Peso (g)	Peso (g)	%	Peso (g)	A.M (45%)	A.T (20%)	T 3/4 (35%)
Estándar	N/A	1200	4,9	58,8	1141,2	0	0	513,5	228,2	399,4
1	Fino	1200	4,3	51,6	1148,4	6	72	484,4	215,3	376,7
2	Grueso	1200	4,3	51,6	1148,4	6	72	484,4	215,3	376,7
3	Fino	940	4,3	40,4	899,6	20	188	320,2	142,3	249,1
4	Grueso	920	4,3	39,6	880,4	20	184	313,4	139,3	243,8
5	Fino	1150	4,9	56,4	1093,7	6	69	461,1	204,9	358,6
6	Grueso	1170	4,9	57,3	1112,7	6	70	469,1	208,5	364,9
7	Fino	905	4,9	44,3	860,7	20	181	305,8	135,9	237,9
8	Grueso	890	4,9	43,6	846,4	20	178	300,8	133,7	233,9
9	Fino	1150	5,5	63,3	1086,8	6	69	458,0	203,6	356,2
10	Grueso	1150	5,5	63,3	1086,8	6	69	458,0	203,6	356,2
11	Fino	890	5,5	49,0	841,1	20	178	298,4	132,6	232,1
12	Grueso	890	5,5	49,0	841,1	20	178	298,4	132,6	232,1
Central	fino-grueso	1005	4,9	49,2	955,8	13	131	371,3	165,0	288,8

Antes de fallar la probeta, se mide, se pesa y se le halla la densidad aplicando las ecuaciones 1 y 2:

$$\text{Gravedad específica Bulk} = \frac{\text{Peso en el aire}}{\text{Peso saturado} - \text{Peso sumergido}} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\text{Peso unitario} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \text{Gravedad específica Bulk} \times 997 \quad \text{Ecuación 2}$$

Posteriormente, se evalúa por medio de compresión, la deformación (flujo) y la carga máxima que resiste (estabilidad) a una temperatura crítica de 60 °C, que corresponde a la mayor temperatura que alcanza una carpeta asfáltica en uso en un día muy soleado a horas del medio día.

El flujo debe estar entre 2 y 3,5 mm, de manera que la mezcla no sea muy rígida (flujo bajo) y se fracture fácilmente, ni tenga un alto ahuellamiento o debilidad frente a las cargas (flujo alto).

La estabilidad por su parte, debe ser mayor a 900 kg, lo que busca asegurar que la mezcla resista un tráfico pesado.

Todos los resultados se presentan en las tablas 9 y 10 para diskettes y carcasas, respectivamente; como podrá verse, existe una alta variabilidad: los resultados de mayor desviación, que pueden considerarse error, no se incluyen en los promedios ni cálculos necesarios para el análisis.

Con el análisis directo de los resultados puede verificarse que la incorporación de polímero a la mezcla asfáltica mejora en casi todos los casos la estabilidad, en comparación con la mezcla estándar y cumpliendo la norma, para la mezcla con poliestireno. En el caso de la adición del ABS, la estabilidad disminuyó, en la mayoría de los tratamientos, respecto a la mezcla patrón.

Por otro lado, la adición de polímero perjudica el flujo; mientras que la norma dice que el máximo debe ser 3.5 mm, la mayoría de los resultados estuvieron por encima de este valor, aumentando con la adición de éstos.

Las mezclas correspondientes al tratamiento 5, para ambos polímeros, arrojaron resultados satisfactorios (buena estabilidad y se encuentran dentro del límite de la norma para el flujo), lo que indica que el porcentaje de polímero debe ser menor o igual al 6%.

Respecto al tamaño de partícula, los resultados muestran que a mayor tamaño mayor es el flujo, la estabilidad por su parte, no presenta una tendencia tan marcada. Otra observación importante respecto a esta variable, es que el volumen de la probeta se incrementa significativamente con el aumento del tamaño de partícula del polímero, generando inestabilidad en el tamaño final esperado de la probeta, lo que se refleja en los resultados, los cuales para material grueso presentan mayor variabilidad.

Con estos resultados se descarta entonces la incorporación de polímero grueso y porcentajes de éste mayores a 6.

Tabla 9. Resultados Diskettes como Agregado

Tratam.	Réplica	Variables			Resultados			
		Tamaño partíc.	% polím.	% Asf.	Peso unitario (kg/m ³)	Flujo (mm)	Carga (kg)	Estabilidad / Flujo (kg/mm)
Probeta de control	1	NA	0	4,9	2460	1,6	1270	787
	2	NA	0	4,9	2453	2,7	1275	465
1	1	fino	6	4,3	2227	4,1	2335	569
	2	fino	6	4,3	2211	4,2	2295	549
	3	fino	6	4,3	2182	4,1	2423	590
2	1	grueso	6	4,3	2182	3,9	1843	468
	2	grueso	6	4,3	2096	3,2	1094	337
	3	grueso	6	4,3	2180	3,8	1843	485
3	1	fino	20	4,3	1619	4,6	812	177
	2	fino	20	4,3	1617	4,1	835	203
	3	fino	20	4,3	1657	4,1	1064	260
4	1	grueso	20	4,3	1706	4,9	1744	356
	2	grueso	20	4,3	1710	5,7	2864	502
	3	grueso	20	4,3	1710	4,7	1679	360
5	1	fino	6	4,9	2206	4,3	2482	579
	2	fino	6	4,9	2160	3,5	2083	597
	3	fino	6	4,9	2154	3,4	2671	789
6	1	grueso	6	4,9	2195	4,9	2278	469
	2	grueso	6	4,9	2166	3,8	1785	467
	3	grueso	6	4,9	2172	3,6	1834	503
7	1	fino	20	4,9	1686	3,4	858	249
	2	fino	20	4,9	1762	4,9	1220	251
	3	fino	20	4,9	1706	3,9	1387	354
8	1	grueso	20	4,9	1656	3,6	1146	320
	2	grueso	20	4,9	1796	3,9	1335	340
	3	grueso	20	4,9	1828	3,6	1363	384
9	1	fino	6	5,5	2217	3,8	2200	573
	2	fino	6	5,5	2256	4,4	2256	518
	3	fino	6	5,5	2213	3,8	1975	525
10	1	grueso	6	5,5	2216	4,8	2305	482
	2	grueso	6	5,5	2262	4,7	2731	585
	3	grueso	6	5,5	2291	5,0	2466	488
11	1	fino	20	5,5	1585	4,7	1147	247
	2	fino	20	5,5	1615	4,8	1489	308
	3	fino	20	5,5	1662	4,5	1236	275
12	1	grueso	20	5,5	1594	4,2	556	131
	2	grueso	20	5,5	1615	3,8	708	185
	3	grueso	20	5,5	1628	4,5	707	156
Central	1	fino-grueso	13	4,9	1850	4,6	886	192
	2	fino-grueso	13	4,9	1942	4,0	2358	591
	3	fino-grueso	13	4,9	1888	3,9	1378	350

Tabla 10. Resultados Carcasas como Agregado

Tratam.	Réplica	Variables			Resultados			
		Tamaño partíc.	% polím.	% Asf.	Peso unitario (kg/m ³)	Flujo (mm)	Carga (kg)	Estabilidad / Flujo (kg/mm)
Probeta de control	1	NA	0	4,9	2460	1,61	1270	787
	2	NA	0	4,9	2453,	2,74	1275	465
1	1	fino	6	4,3	2211	6,16	1552	252
	2	fino	6	4,3	2158	4,00	1595	399
	3	fino	6	4,3	2138	3,89	1201	309
2	1	grueso	6	4,3	2111	4,71	1374	292
	2	grueso	6	4,3	2166	4,17	1582	379
	3	grueso	6	4,3	2197	3,69	1562	424
3	1	fino	20	4,3	1809	3,88	1390	358
	2	fino	20	4,3	1724	4,08	687	168
	3	fino	20	4,3	1722	4,60	863	188
4	1	grueso	20	4,3	1809	5,19	1224	236
	2	grueso	20	4,3	1717	6,11	685	112
	3	grueso	20	4,3	Se desmoronó			
5	1	fino	6	4,9	2199	3,51	1157	330
	2	fino	6	4,9	2210	3,44	1169	339
	3	fino	6	4,9	2188	3,36	1168	348
6	1	grueso	6	4,9	2195	4,21	1601	380
	2	grueso	6	4,9	2166	4,26	1329	312
	3	grueso	6	4,9	2172	4,46	1717	385
7	1	fino	20	4,9	1685	4,20	482	115
	2	fino	20	4,9	1762	4,39	684	156
	3	fino	20	4,9	1706	3,96	603	152
8	1	grueso	20	4,9	1656	5,99	470	79
	2	grueso	20	4,9	1796	5,07	737	145
	3	grueso	20	4,9	1828	6,02	889	148
9	1	fino	6	5,5	2191	4,08	895	220
	2	fino	6	5,5	2240	3,47	1124	324
	3	fino	6	5,5	2260	4,20	1423	339
10	1	grueso	6	5,5	2307	4,27	2015	472
	2	grueso	6	5,5	2281	3,70	2002	541
	3	grueso	6	5,5	2222	3,77	1509	400
11	1	fino	20	5,5	1705	4,22	897	213
	2	fino	20	5,5	1811	5,02	1202	239
	3	fino	20	5,5	1816	4,15	854	206
12	1	grueso	20	5,5	1825	4,64	1003	216
	2	grueso	20	5,5	1750	4,79	645	135
	3	grueso	20	5,5	1787	4,49	680	152
Central	1	fino-grueso	13	4,9	1995	4,51	1432	318
	2	fino-grueso	13	4,9	1936	5,05	971	192
	3	fino-grueso	13	4,9	2013	3,82	1452	380

Para el análisis de la incidencia del porcentaje de asfalto en el flujo de las mezclas, se realizaron gráficas comparativas para cada polímero, tanto en el caso de los gruesos como los finos (figuras 7 y 8).

Puede observarse, para el caso de los diskettes, que alrededor del 4.9 % de asfalto se encuentra el flujo más bajo para la mayoría de los casos. Con las carcasas se da un comportamiento diferente; sin embargo, para la mezcla de 6 % polímero fino, (habiendo descartado polímero grueso y más del 6 % de éste) el flujo más bajo se obtuvo con 4.9 % de asfalto, por lo tanto, éste es el elegido para las mezclas óptimas.

Figura 7. Flujo vs Asfalto. Diskettes

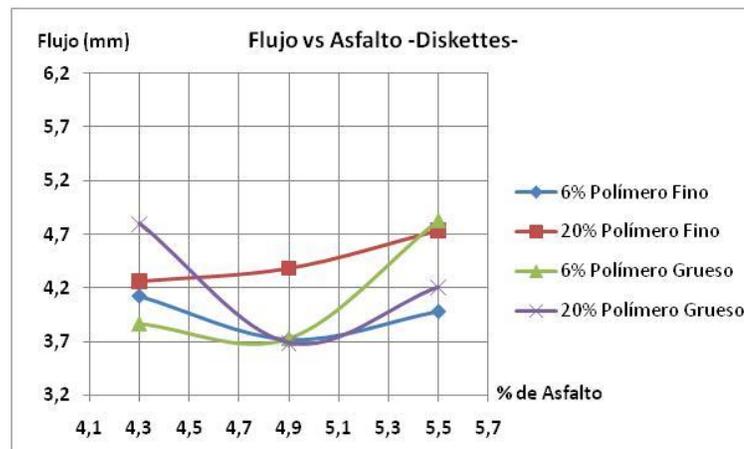
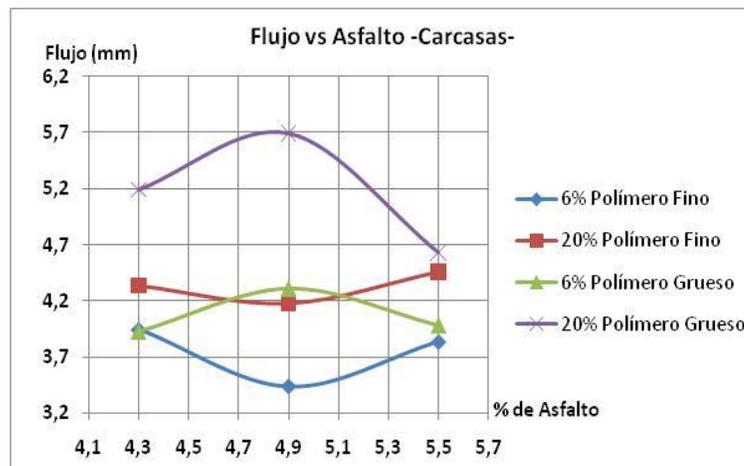


Figura 8. Flujo vs Asfalto. Carcasas



Cabe mencionar que en el caso de las carcasas el polímero grueso causa un máximo en el comportamiento del flujo, razón adicional para el descarte de este tamaño de partícula.

Un análisis más profundo del aporte del asfalto requeriría de al menos 5 diferentes porcentajes de éste, sin embargo, de este trabajo se puede concluir que el porcentaje de asfalto podría variar entre 4,7 y 4,9 aproximadamente. Se trabajó con 4,9%, el mismo porcentaje de la mezcla patrón, pero el ahorro en el uso del asfalto puede ser mayor.

5.4 FORMULACIONES ÓPTIMAS, MODELO MATEMÁTICO Y RESULTADOS EXPERIEMENTALES

Las formulaciones óptimas se determinaron tomando como criterio escoger aquella cuyo flujo estuviera dentro del rango indicado por la especificación (2 mm - 3.5 mm).

Se utilizó el modelo de regresión multivariable para explicar el efecto de los componentes de la mezcla sobre el flujo que presenta.

Con el fin de asegurar la independencia de las variables, fueron definidas de la siguiente manera (W : peso en gramos): W_{pol}/W_{asf} , $W_{agr-petresos}/W_{asf}$, tamaño de partícula y $W_{pol}/W_{agr-petresos}$. Las variables se codificaron tomando su valor máximo como 1 y mínimo como -1 y recibieron los nombres A, B, C y D respectivamente (ver Anexo C).

En primer lugar se probó realizar la regresión de los datos de flujo siguiendo un modelo lineal simple, esto es:

$$Fl = Int + a_1A + a_2B + a_3C + a_4D \mp \varepsilon \quad \text{Ecuación 3}$$

donde Fl: flujo (mm)

Int: intercepto

a_i : coeficientes de la correlación

ε : error experimental ($\pm 3\sigma$)

Se definieron adicionalmente variables cuadráticas y sus interacciones de segundo orden buscando mejorar el ajuste del modelo con una ecuación del tipo:

$$Fl = Int + a_1A + a_2B + a_3C + a_4D + b_1A^2 + b_2B^2 + b_3C^2 + b_4D^2 + c_1AB + c_2AC + c_3AD + c_4BC + c_5BD + c_6CD \mp \varepsilon$$

Ecuación 4

La independencia de todo el conjunto de variables fue verificada mediante un análisis de correlación de las mismas. En el Anexo C se muestran aquellas que fueron descartadas para cada tipo de material, tomando como criterio una correlación de más de 0.9.

El modelo entonces se simplifica respecto al mostrado en la ecuación 4, y para cada material las ecuaciones son:

$$Fl_{carcasas}(mm) = 4.218 + 0.513A + 0.367B + 0.201AC \mp 0.56 \quad \text{Ecuación 5}$$

$$Fl_{diskettes}(mm) = 4.292 + 0.158A + 0.22B + 0.941B^2 - 0.116AC \mp 0.5 \quad \text{Ecuación 6}$$

Los coeficientes de correlación R^2 son 0.687 y 0.404, respectivamente.

Los coeficientes de probabilidad (Tablas 33 y 39) muestran que los factores que más inciden en la variable flujo son, en orden de prioridad, tamaño de partícula y W_{pol}/W_{asf} , para el caso de las carcasas; para los diskettes, los factores más importantes son $W_{agr-petr}/W_{asf}$ (en su forma cuadrática) y la interacción W_{pol}/W_{asf} y $W_{agr-petr}/W_{asf}$, siendo los factores más importantes los más bajos respecto al valor de significancia del modelo (0.5). Los factores mencionados alteran el flujo de manera positiva, es decir, al aumentar los niveles del factor el flujo aumenta también.

Según el análisis estadístico, las variables críticas a controlar difieren en función del polímero empleado. Para el caso de las carcasas, el tamaño de partícula es el factor con más incidencia, mientras que en el de los diskettes este factor es el que tiene menor importancia en la correlación. Estas diferencias pueden ser ocasionadas por las características mecánicas y físicas de los materiales plásticos (rigidez, empaquetamiento, punto de fusión, viscosidad) y por la naturaleza química de las sustancias.

Los coeficientes del modelo, el análisis Marshall y las consideraciones económicas (Ver numeral 5.7.2) sirvieron de criterio para escoger un porcentaje menor de polímero en la elaboración de las probetas óptimas. Se definió entonces evaluar muestras con 5 % de plástico fino y 4.9 % de asfalto. De esta manera, el modelo predice, en el caso de carcasas, un valor de flujo de 3.53 mm y para los diskettes 3.7 mm, contra los valores experimentales 3.2 mm y 3.4 mm, respectivamente.

Respecto a la estabilidad, según la norma colombiana debe ser mayor a 900 kg y la de la mezcla patrón es de 1273 kg. Los resultados experimentales para las probetas óptimas, confirman la mejora en la estabilidad con la adición de polímero, para las carcasas el valor promedio fue de 1452 kg y para los diskettes de 1529 kg.

Para las carcasas, la primera probeta se descarta por su desviación respecto a las otras. En la tabla 11 pueden verse los resultados experimentales mencionados.

Tabla 11. Resultado de estabilidad y flujo para las formulaciones con 5% de polímero.

	Réplica	Tamaño de partícula	% de Polímero	% de Asfalto	Flujo (mm)	Estabilidad (kg)	Relación estabilidad/flujo (kg/mm)
Diskettes	1	fino	5	4,9	3,38	1580	467
	2	fino	5	4,9	3,32	1478	445
	3	fino	5	4,9	3,46	1529	442
Carcasas	1	fino	5	4,9	3,70	1880	508
	2	fino	5	4,9	3,30	1539	466
	3	fino	5	4,9	3,10	1366	440

Igualmente, las mezclas elegidas cumplen el requisito de la relación estabilidad-flujo, estando ambas alrededor de 450, siendo el rango requerido para vías NT3 entre 300 y 600 kg/mm.

5.5 PORCENTAJES DE VACÍO

Para el cálculo de porcentajes de vacío de las formulaciones escogidas se calcularon gravedad específica bulk (INV E - 734 - 07) y gravedad específica máxima teórica (INV E - 735 - 07). El porcentaje de vacío está dado entonces por la expresión:

$$V_a = 100 \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \right) \quad \text{Ecuación 7}$$

Los resultados de esta prueba se muestran en la tabla 12. Según la norma, se consideran mezclas compactas aquellas con un porcentaje máximo de vacíos del 10%. Puede verse que las mezclas modificadas cumplen con este requerimiento,

Tabla 12. Porcentaje de vacío de las formulaciones escogidas

Muestra	Gravedad específica bulk	Gravedad específica máxima teórica	%Vacíos
Patrón	2,500	2,620	4,58
Diskettes	2,260	2,446	7,60
Carcasas	2,280	2,461	7,35

Las especificaciones del INVÍAS (Artículo 450 – 07) para mezclas asfálticas, categoría de tránsito NT3, para capa de rodadura, exigen que los vacíos estén entre 4 % y 6 %. Ambas mezclas modificadas están por encima de la especificación.

Este aumento en los vacíos puede ser producto de la disminución en la densidad de la mezcla con la adición de los polímeros, ya que a la vez que se está reemplazando agregados pétreos (5 %), también hay una disminución adicional de estos materiales producto del incremento en el volumen total, causando que finalmente sobre mezcla en la construcción de las probetas (se necesita menor cantidad por unidad de volumen). De esta manera, deja de usarse mezcla entre la que hay llenante pétreo grueso, y su ausencia aumenta los vacíos.

Es importante mencionar, que este aumento puede también deberse a la forma de los nuevos agregados, que no es la misma de los agregados pétreos. Mientras estos últimos

presentan esfericidad, los polímeros agregados tienen formas planas y ángulos, lo que cambia su acomodación dentro de la mezcla, provocando vacíos.

Aunque las mezclas no cumplen el % de vacíos requerido, se realizó una comparación de comportamiento dinámico, ya que el objetivo del proyecto es observar si se mejoran las propiedades de la mezcla asfáltica, su desempeño, lo que podría ocurrir aun sin cumplir la anterior especificación.

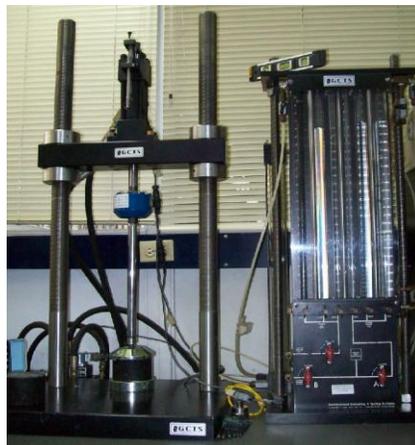
5.6 ENSAYOS DINÁMICOS

Las formulaciones elegidas y la mezcla patrón (la que se ofrece en el mercado) se sometieron a ensayos dinámicos con los cuales se determina la deformación acumulada o permanente y la resistencia a cargas repetitivas.

Por cuestiones de tiempo y costo de las pruebas dinámicas, éstas no se realizaron para diferentes porcentajes de polímero, con lo cual se hubiera podido determinar el efecto de la adición de polímero en la carpeta asfáltica. Se hicieron a modo de comparación para confrontar su desempeño frente a la mezcla común.

El equipo empleado para las tres pruebas es un triaxial cíclico, el cual puede verse en la figura 9.

Figura 9. Equipo para ensayos dinámicos.



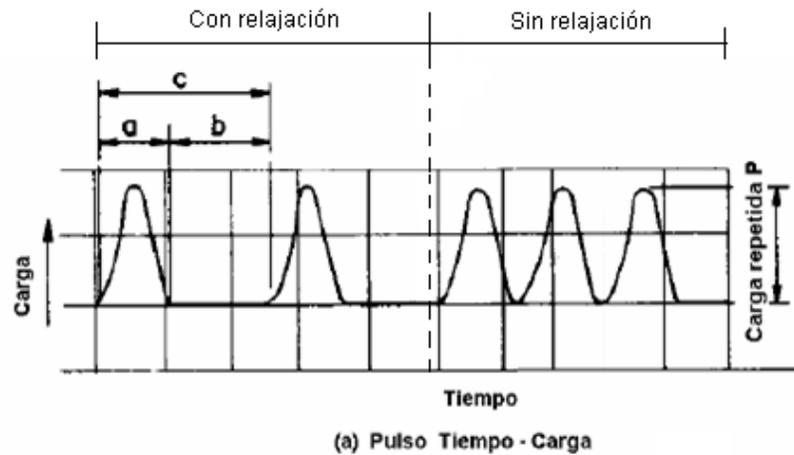
5.6.1 Fatiga

Se fallaron probetas tipo Marshall en para 3 diferentes esfuerzos (100 kPa, 200 kPa y 400 kPa), sin relajación, es decir, sin tiempo de recuperación (llamado “*b*” en la figura 11) y con una frecuencia de 10 Hz, aplicando tracción indirecta. La forma de la prueba puede verse en la figura 10.

Figura 10. Disposición ensayo de fatiga



Figura 11. Esquema ciclos de carga



- a* = duración de carga durante un ciclo de carga
- b* = tiempo de recuperación
- c* = tiempo del ciclo

La temperatura promedio fue de 23.5 °C y humedad higroscópica del 67 %. En las tablas 13 y 14 se muestran los ciclos en los cuales aparecieron las primeras grietas en las probetas y las deformaciones correspondientes, respectivamente. La prueba no tuvo réplicas.

Bajo las condiciones descritas, los resultados fueron que para la carga más baja la mezcla que tiene mejor comportamiento corresponde a la patrón (aquella que se agrieta en el mayor número de ciclos); sin embargo, al aumentar la carga, la mezcla con carcadas iguala prácticamente a la mezcla patrón y finalmente la supera en el ensayo a 400 kPa (ver Tabla 13). La mezcla con diskettes siempre tuvo resultados por debajo de estas dos.

Tabla 13. Ciclos de fractura ensayo de Fatiga

	CICLOS		
	100 kPa	200 kPa	400 kPa
PATRÓN	10400	1000	459
CARCASAS	6550	950	621
DISKETTES	6170	660	356

Tabla 14. Deformaciones ensayo de Fatiga

ESFUERZO MÁXIMO	DEFORMACIÓN (mm)		
	Patrón	Carcadas	Diskettes
100 kPa	0,08	0,07	0,09
200 kPa	0,15	0,16	0,17
400 kPa	0,22	0,24	0,27

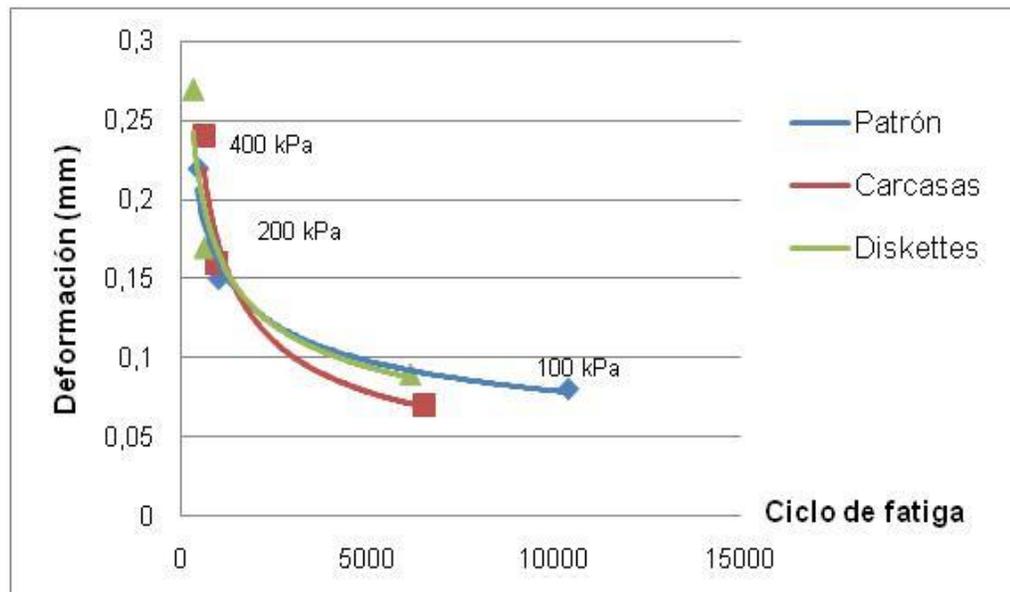
Los resultados mostrados en las tablas 13 y 14 indican un mejor desempeño de la muestra que contiene carcadas cuando se aplican cargas altas, las cuales se presentan con mayor frecuencia una vez instalada la carpeta asfáltica. Por otro lado, se puede observar en esta muestra una mayor deformación respecto a la muestra patrón a 400

kPa. El resultado tiene sentido en cuanto la mezcla con carcasas resistió más ciclos de carga antes de agrietarse.

Los resultados del ensayo de fatiga sirven como una comparación inicial del desempeño de las mezclas desarrolladas; sin embargo, no son concluyentes pues se requeriría de un estudio completo de fatiga para ello, pero podría decirse que la mezcla con polímero, especialmente con ABS, puede competir con la mezcla patrón. Esta prueba se resume en la figura 12.

Los resultados de fatiga no tienen por finalidad la aceptación o el rechazo de la mezcla; no obstante, debe asegurarse que son adecuados para las necesidades de tránsito del lugar donde se utilizará.

Figura 12. Comparación resistencia a la fatiga



Las curvas mostradas se correlacionan mediante las siguientes ecuaciones:

$$d_{f-patrón} = 1.395N^{-0.31} \quad (R^2 = 0,979) \quad \text{Ecuación 8}$$

$$d_{f-carcasas} = 5.264N^{-0.49} \quad (R^2 = 0,975) \quad \text{Ecuación 9}$$

$$d_{f-diskettes} = 1.992N^{-0.36} \quad (R^2 = 0,950) \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde: d_f es la deformación en la fatiga y N los ciclos de carga.

En las figuras 14, 16 y 18, puede verse la comparación entre materiales y los ciclos de carga evaluados, y en las figuras 13, 15 y 17 se presenta el resultado completo para la deformación. En éstas puede observarse las diferencias en el comportamiento de la deformación de las muestras al variar la carga del ensayo.

Las mezclas modificadas presentan mayor porcentaje de vacíos lo que explica su mayor velocidad de deformación.

Figura 13. Comparación de la deformación a 100 kPa

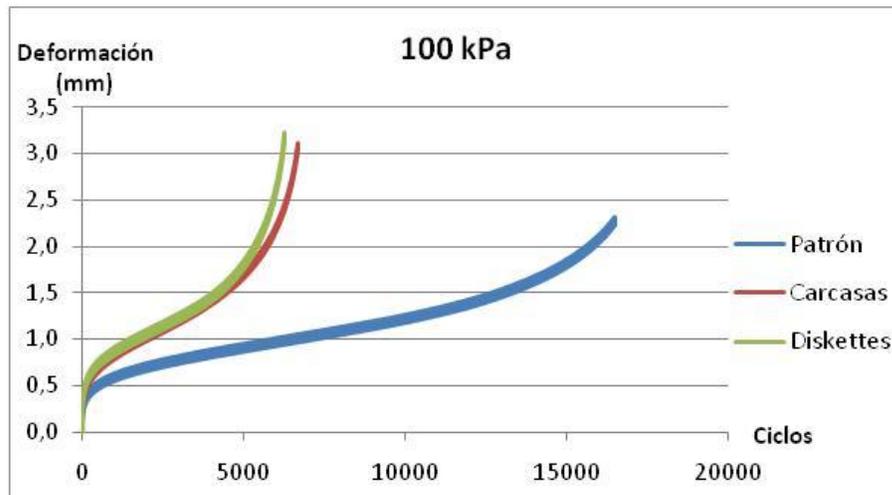


Figura 14. Comparación de la deformación a 100 kPa, ciclos del 4990 al 5010

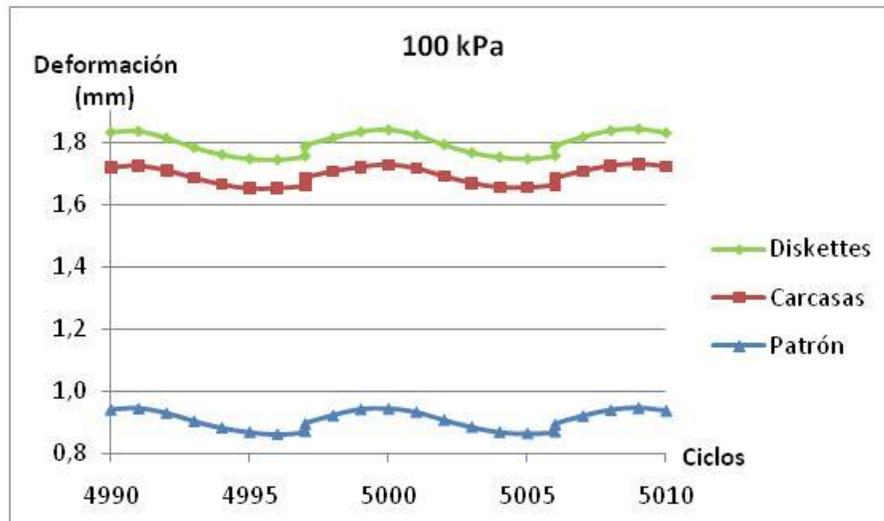


Figura 15. Comparación de la deformación a 200 kPa

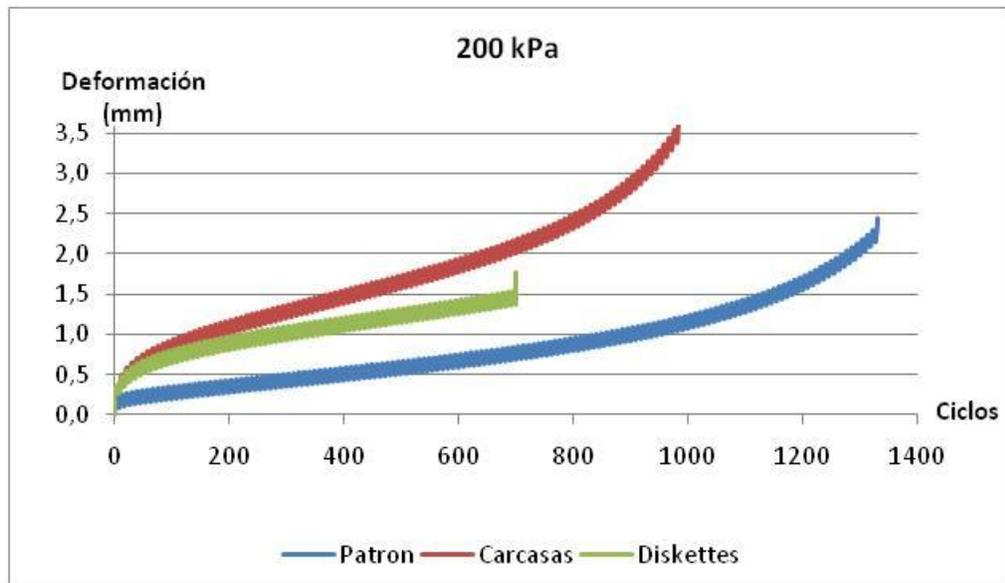


Figura 16. Comparación de la deformación a 200 kPa, ciclos del 490 al 510

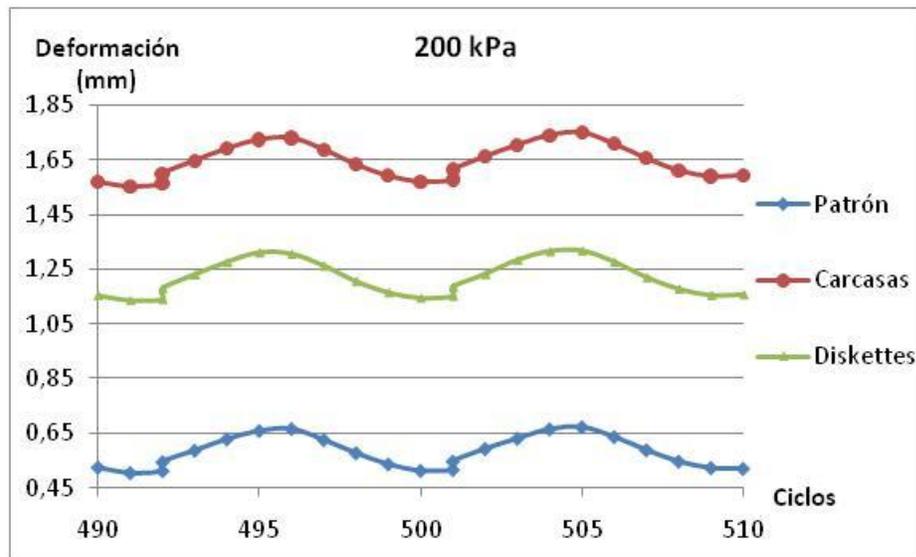


Figura 17. Comparación de la deformación a 400 kPa

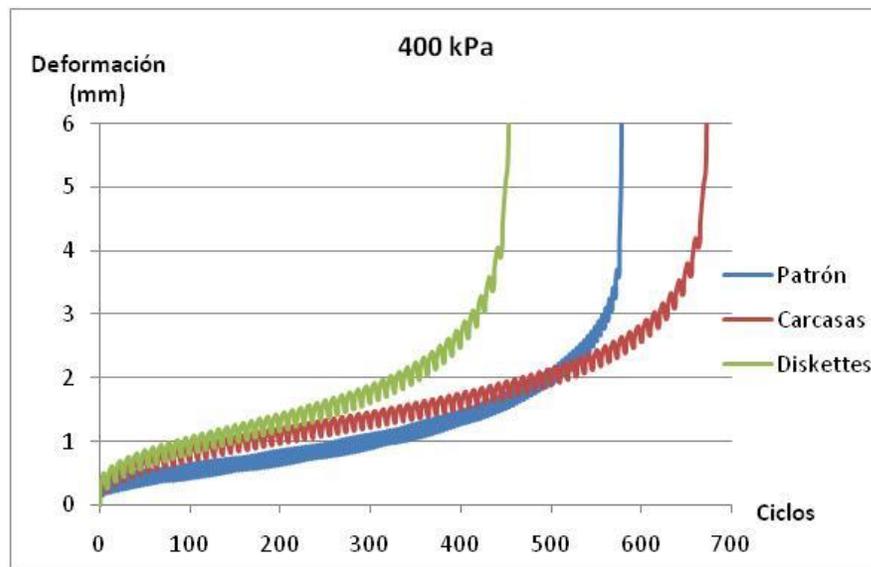
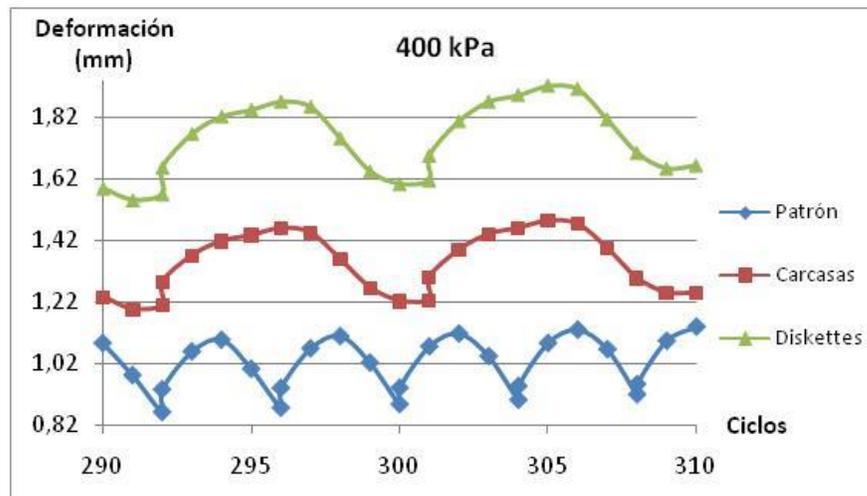


Figura 18. Comparación de la deformación a 400 kPa, ciclos del 290 al 310



5.6.2 Módulo dinámico (E_d)

Esta prueba se llevó a cabo con probetas de 100 x 200 mm (diámetro x altura).

Durante 30 segundos las muestras se sometieron a compresión, bajo una carga aproximada de 1000 N, para obtener un esfuerzo menor a 241 kPa (requisito de la norma), con una frecuencia de 4 Hz. En la figura 19 se presenta la forma de la prueba.

La temperatura fue de 23 °C y humedad del 65 %. Las figuras 20 y 21 muestran el comportamiento de las 3 mezclas con la prueba: puede verse que las mezclas modificadas presentan menor deformación a la mezcla patrón, lo que podría indicar beneficios de menor ahuellamiento en la mezcla final.

Figura 19. Disposición ensayo de módulo dinámico



Figura 20. Comparación deformación en el análisis de módulo dinámico.

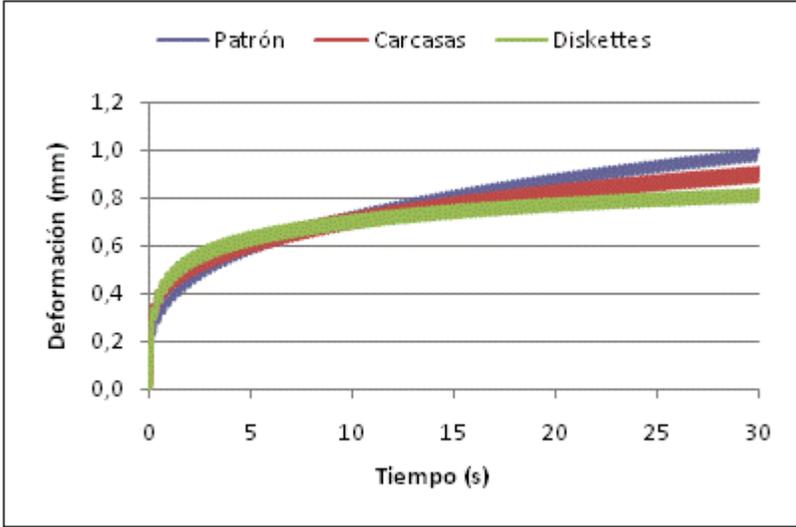
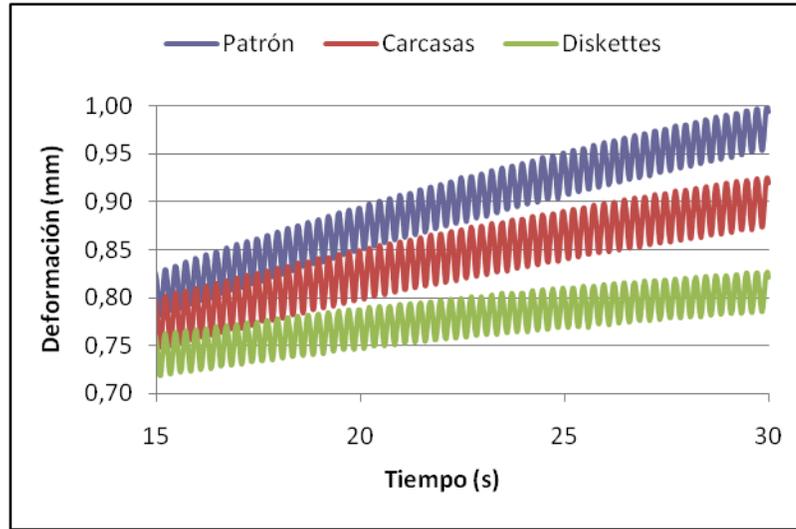


Figura 21. Deformación en los últimos 30 s ensayo de evaluación del módulo dinámico



Los módulos dinámicos calculados equivalen al promedio de los módulos correspondientes los cinco últimos ciclos de ensayo, para cada material separadamente. Se hizo uso de los datos generados por la máquina del ensayo, que registraba continuamente los valores de deformación en cada ciclo.

Modelo de cálculo

Para llegar a los valores de módulo dinámico, se calculan las siguientes cantidades:

- d_{r-i} : deformación recuperada del ciclo i (mm)

$$d_{r-i} = v_{m\acute{a}x} - v_{m\acute{i}n} \quad \text{Ecuación 11}$$

donde $v_{m\acute{a}x}$, $v_{m\acute{i}n}$: valores de deformación máximo y mínimo observados en el ciclo i , respectivamente

- ϵ_{r-i} : deformación unitaria del ciclo i (mm/mm)

$$\epsilon_{r-i} = \frac{d_{r-i}}{h_{muestra}} \quad \text{Ecuación 12}$$

donde $h_{muestra}$: altura de la probeta (204 mm)

- E_{d-i} : módulo dinámico del ciclo i (N/mm²)

$$E_{d-i} = \frac{F/A}{\varepsilon_{r-i}} \quad \text{Ecuación 13}$$

donde F: Fuerza aplicada (1000N); A: área de la probeta (8171.28mm²)

- $\overline{E_d}$: módulo dinámico promedio de la muestra (N/mm²)

$$\overline{E_d} = \frac{\sum_{i=1}^5 E_{d-i}}{5} \quad \text{Ecuación 14}$$

Se calcularon, además, medidas de dispersión de los datos (Desviación estándar – S y Coeficiente de Variación - C_v)

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (E_{d-i} - \overline{E_d})^2}{4}} \quad \text{Ecuación 15}$$

$$C_v = \frac{S}{\overline{E_d}} \quad \text{Ecuación 16}$$

En la tabla 15 se dan los resultados de la prueba para cada material.

Tabla 15. Módulos Dinámicos (E_d), desviación estándar (S) y Coeficientes de Variación (C_v) de la prueba.

	$\overline{E_d}$ (kg/cm ²)	S	C _v
Patrón	6704.1	7	1,2
Carcasas	5714.3	8	1,6
Diskettes	7163.3	20	2,8

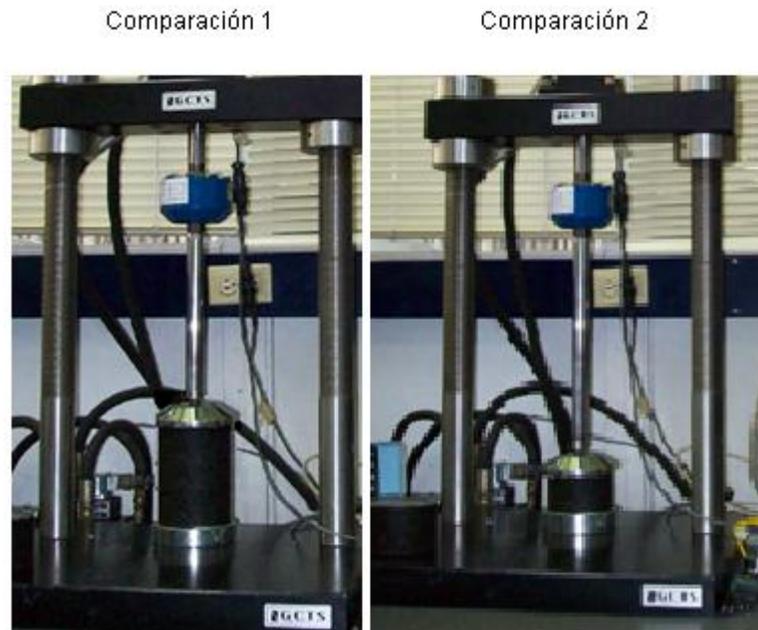
El módulo dinámico es un indicativo de la resistencia a la deformación que experimenta el material bajo una carga cíclica. En esta medida, a mayor módulo dinámico, mayor es la rigidez del material y su tendencia al agrietamiento aumenta. En la tabla 15 se observa que la mezcla con diskettes tienen el módulo dinámico más alto. Esto va en concordancia con los resultados del ensayo de fatiga, donde las muestras con diskettes siempre se agrietaron en ciclos menores a las otras dos mezclas.

Siguiendo el orden de ideas planteado anteriormente, el módulo dinámico de la muestra con material de carcasas indica una menor rigidez del material y se encuentra dentro de un rango aceptable para el módulo dinámico.

5.6.3 Creep

Se realizaron dos análisis comparativos para *Creep*. El primero con probetas de 100 x 200 cm, 700 N de carga máxima y 100 N de relajación. El segundo con probetas de 102 x 63.5 mm, 4000 N de carga máxima y 100 N en la relajación (ver figura 22). La carga máxima y la de relajación se aplicaron durante una hora, para cada una.

Figura 22. Disposición ensayo de *Creep*



Los resultados de cada caso se muestran en las figuras 23 y 24 respectivamente. Las tablas 16 y 17 resumen los resultados.

Figura 23. Comparación de *Creep* probetas de 100 mm de diámetro x 200 mm de altura

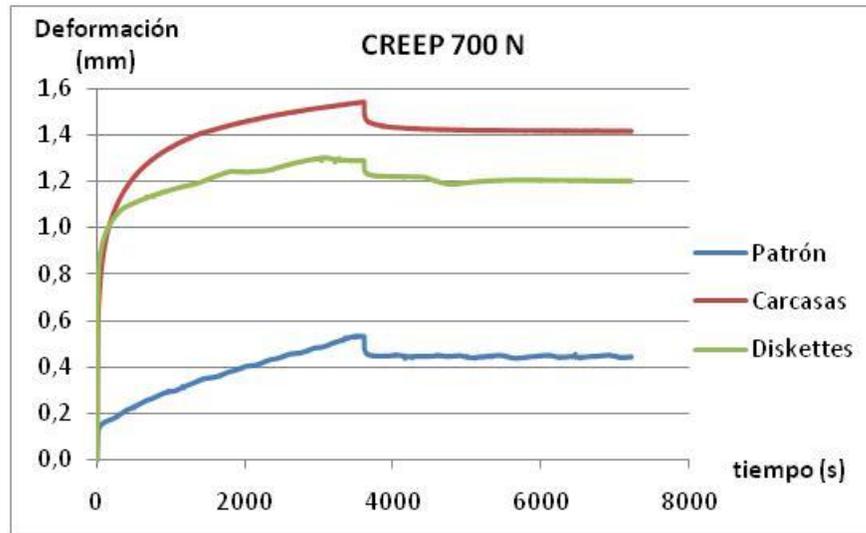


Tabla 16. Resultados de deformación *Creep*, 700 N.

DEFORMACIÓN (mm)	PATRÓN	CARCASAS	DISKETTES
TOTAL	0,53	1,53	1,29
PERMANENTE	0,45	1,41	1,2
RECUPERADA	0,08	0,12	0,09

Figura 24. Comparación de *Creep* probetas de 102 mm de diámetro x 63.5 mm de altura

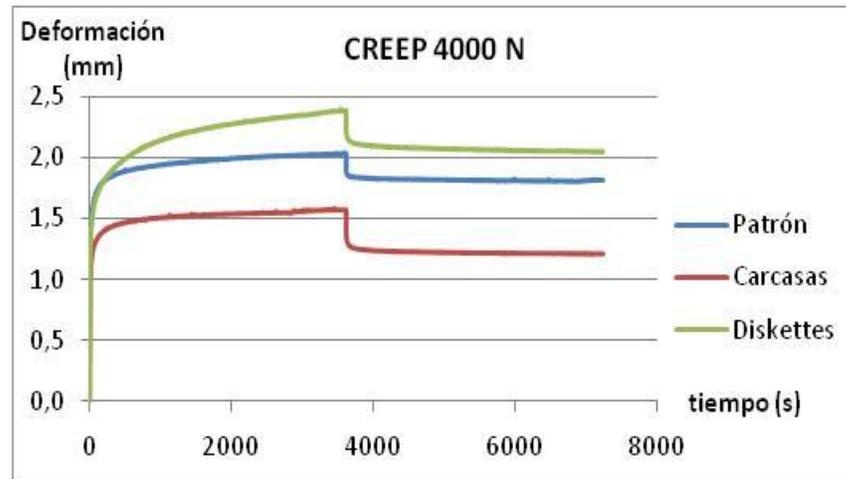


Tabla 17. Resultados de deformación *Creep*, 4000 N.

DEFORMACIÓN (mm)	PATRÓN	CARCASAS	DISKETTES
TOTAL	2,1	1,6	2,4
PERMANENTE	1,82	1,21	2,05
RECUPERADA	0,28	0,39	0,35

En el primer caso, las mezclas modificadas se recuperaron más, pero también tuvieron mayor deformación, y con una diferencia significativa a la mezcla patrón, ya que la deformación de las mezclas modificadas corresponde a más del doble de la de ésta.

En el segundo caso (figura 24), las mezclas modificadas se recuperaron más, pero el orden de deformación varió. La mezcla con ABS, que anteriormente había sido la de mayor deformación, tuvo la menor, siendo la mezcla con poliestireno la de mayor cambio.

Se observó menos diferencia de esta muestra respecto a la mezcla patrón para el valor de deformación que en el ensayo a 700 N y probetas grandes.

Al observarse en conjunto los resultados de las tres pruebas dinámicas efectuadas sobre las muestras escogidas, puede afirmarse que la mezcla desarrollada con carcasas posee un comportamiento dinámico superior en relación con las otras muestras, dando mayor número de ciclos de fatiga, buen módulo dinámico y mayor recuperación *creep* a condiciones de carga altas.

5.7 DISCUSIÓN

5.7.1 Material plástico como ligante

La incorporación del material plástico como ligante en la mezcla asfáltica fue reconsiderada al abordar el problema desde la óptica amplia de los procesos y al compararla además con las ventajas identificadas en el modo de incorporación como agregados.

El uso del material plástico como ligante ofrece ciertas dificultades desde el punto de vista del proceso. Este modo de incorporación requiere una extrusora para el calentamiento, transporte y mezcla efectiva del plástico fundido con el material asfáltico, y para asegurar un medio libre de aire que evite la oxidación y demás reacciones que pueden desatarse en el proceso de calentamiento del polímero. Por su parte, la incorporación como agregados sólo necesita una mezcla homogénea de materiales sólidos con el ligante, lo cual se consigue en una mezcladora estándar de asfalto.

Teniendo en cuenta la disponibilidad de insumos, la incorporación de polímeros como material asfáltico siempre está complementada con la mezcla de aditivos que evitan la separación de fases de la mezcla en condiciones de almacenamiento prolongado o temperaturas de almacenamiento elevadas (TALAVERA *et al.*, 2001). Estos aditivos son

por lo general sustancias de poca presencia en el comercio y su uso y formulación constituyen en sí mismos un estudio completo.

Otro punto analizado fue aquel en relación con el reemplazo de materiales en la mezcla asfáltica. Como agregado, es posible la adición de una mayor cantidad de material plástico que como parte del asfalto (como ligante, las cantidades utilizadas oscilan entre un 3 % y un 5 % respecto al material asfáltico, según la literatura consultada). Pueden alcanzarse ahorros más visibles por concepto de materia prima respecto a los agregados e igualmente respecto al asfalto; esto último debido a que la densidad del producto final baja, con lo cual se requiere menos mezcla para la pavimentación de un área determinada y finalmente menos uso de material asfáltico.

5.7.2 Margen de Contribución

En la evaluación del margen de contribución se presentan dos alternativas para la obtención del plástico y asimismo dos márgenes de contribución del producto. La primera alternativa es conseguir el material en el mercado, cuyo costo varía entre \$300/kg y \$500/kg. En la segunda alternativa, los materiales se obtienen y se trituran por la empresa misma, con lo cual su costo corresponde al consumo de energía del molino de cuchillas y al operario de la máquina.

Para evaluar la segunda alternativa, se asumirá una producción de 500 Ton/mes (según el interés inicial del mercado, ver numeral 5.1). Para esta cantidad de mezcla, se necesita triturar 25 Ton/mes de polímero. Si se producen lotes de mezcla modificada dos días a la semana, la máquina procesaría 3.125 Ton/día de plásticos, que para un turno de trabajo equivale a 0.391 Ton/h. Para el cumplimiento de esta producción existen equipos con una potencia promedio de 28 HP (20.9 KW – h) que admiten flujos entre 200 y 700 kg/h de material (RONE, 2009). El consumo energético de la máquina sería de 53.6KW-h/Ton (\$281.13/KW-h), que equivalen a \$15057/Ton. El costo de mano de obra equivale a \$2333/h (un salario de \$560000), es decir, \$5967/Ton. El plástico tendría finalmente un costo de \$21024/Ton al tratarlo en la misma unidad de producción.

En las tablas 18 y 19 se comparan los costos de las formulaciones óptimas para los dos tipos de material. La evaluación económica se realizó con base en el peso y también con

base en el volumen, con el fin de tener en cuenta el efecto del cambio en la densidad del material con polímero.

Tabla 18. Evaluación económica de las mezclas óptimas – Alternativa 1

	Óptimo Mezclas Modificadas			Base		
	% peso	Cantidad (kg)	Costo (\$)	% peso	Cantidad (kg)	Costo (\$)
Asfalto	5	49	36260	5	49	36260
Triturado 3/4"	32	315	9987	33	333	10541
Arena triturada	18	180	6229	19	190	6575
Arena mezclada	41	405	14016	43	428	14793
Plástico	5	50	15000		---	---
Total	100	1000	\$ 81.491	100	1000	\$ 68.169
Margen de Contribución (peso)	\$ 71.010			\$ 84.332		
Peso 1 m ³ - Carcasas (kg)	2230			2457		
Peso 1 m ³ - Diskettes (kg)	2205					
Costo m ³ - Carcasas (\$)	\$ 181.725			\$ 167.463		
Costo m ³ - Diskettes (\$)	\$ 179.688					
Margen de Contribución Carcasas (volumen)	\$ 92.057			\$ 106.319		
Margen de Contribución Diskettes (volumen)	\$ 94.094					

Tabla 19. Evaluación económica de las mezclas óptimas – Alternativa 2

	Óptimo Mezclas Modificadas			Base		
	% peso	Cantidad (Kg)	Costo (\$)	% peso	Cantidad (Kg)	Costo (\$)
Asfalto	5	49	36260	5	49	36260
Triturado 3/4"	32	315	9987	33	333	10541
Arena triturada	18	180	6229	19	190	6575
Arena mezclada	41	405	14016	43	428	14793
Plástico	5	50	1051		---	---
Total	100	1000	\$ 67.542	100	1000	\$ 68.169
Margen de Contribución (peso)	\$ 84.959			\$ 84.332		
Peso 1 m ³ (Kg)	2230			2457		
Peso 1 m ³ - Diskettes (Kg)	2205					
Costo m ³	\$ 150.620			\$ 167.463		
Costo m ³ - Diskettes (\$)	\$ 148.931					
Margen de Contribución Carcasas (volumen)	\$ 123.162			\$ 106.319		
Margen de Contribución Diskettes (volumen)	\$ 124.851					

La tabla 18 muestra que el uso de plásticos como agregados en la mezcla asfáltica disminuye el margen de contribución del producto respecto a la mezcla sin polímero (tanto en base al peso como al volumen). Esto se debe a que el costo por kilogramo de agregados pétreos es mucho menor que el costo de los plásticos reciclados (\$32.000/Ton de agregados pétreos contra \$300.000/Ton de plástico). Se obtiene para las dos mezclas modificadas un aumento en el costo por metro cúbico del 7 %.

En la tabla 19 se observa cómo mejora el margen de contribución cuando se asume la obtención y tratamiento de los materiales plásticos. En ambos casos los requerimientos de material por metro cúbico disminuyen si se comparan con los evaluados usando el peso (debido al menor peso unitario de las mezclas modificadas), obteniéndose un aumento considerable en el margen de contribución, que en el caso de la alternativa 2 supera al de la mezcla base. Se obtiene además que el costo de producción por metro cúbico disminuye un 11 % respecto al de la mezcla base.

5.7.3 Viabilidad técnica

Producto

Los resultados de este trabajo corresponden al comienzo de una investigación más profunda para poder determinar si la mezcla puede o no emplearse para la pavimentación de carreteras.

Hasta el momento se diseñó una mezcla y se propone una fórmula de trabajo, con la que puede decirse que la adición de polímero trae beneficios mecánicos a la mezcla asfáltica, buen flujo y alta estabilidad; además, las comparaciones dinámicas indican un buen comportamiento. Sin embargo, como se vio en el desarrollo del trabajo, las mezclas no cumplen los requisitos de porcentaje de vacíos. Adicionalmente, hace falta verificar el cumplimiento de todas las especificaciones del INVÍAS, tanto para mezclas asfálticas como para los agregados, lo que correspondería a un nuevo proyecto (por cuestión de costos y tiempo). En una última etapa, se probaría la mezcla: pruebas de desempeño y estudio dinámico completo, trabajo en planta y en campo, para poder concluir con certeza si la mezcla es apta o no.

Si se obtiene una mezcla que mejora –o iguala- la calidad de la mezcla estándar, habría que hacer modificaciones buscando cumplir la norma, o incluso podría ser aceptada por el INVÍAS si se demuestra su buen desempeño, sumado a los beneficios económicos y ambientales.

Las mezclas modificadas corresponden a nuevos materiales para los cuales no se tienen métodos de pruebas diseñados específicamente para ellos, y hay que regirse por el marco normativo convencional. Se tienen algunos estándares para asfalto modificado, pero el producto desarrollado es una modificación de la mezcla asfáltica completa.

Proceso

I. Disponibilidad de materias primas

Es importante analizar este punto en cuanto a la disponibilidad de material plástico de desecho (ABS y/o Poliestireno en este caso) para realizar a nivel industrial las mezclas modificadas.

En Colombia, solo este año se empezaron campañas de reciclaje de desechos informáticos, anteriormente (y todavía), se descartan con los residuos ordinarios. De esto también se desprende que no hay empresas que los procesen para ser reutilizados. Sin embargo, es un servicio que puede solicitarse a empresas de reciclaje comunes, con un costo mínimo de 300 pesos por kilogramo, el cual varía con la demanda del material. Debido a esto, en el presente trabajo se propone la alternativa del reciclaje dentro de la planta de mezcla (Margen de Contribución 5.7.2).

Con la encuesta realizada a las empresas productoras de mezcla asfáltica, se estableció que su interés inicial es producir, en promedio, 500 Ton/mes de mezcla modificada. Con el trabajo se determinó que el máximo porcentaje de polímero que puede llevar la mezcla es del 6%, equivalente a 30 Ton/mes. Para satisfacer la necesidad de, al menos, las empresas encuestadas, se requerirían 150 Ton/mes (1800 Ton/año) de desechos informáticos poliméricos (ABS y/o Poliestireno). Las proyecciones al año 2013 dicen que se generarán en Colombia, entre 24000 y 42000 Ton/año de estos residuos.

Respecto a los agregados pétreos y el asfalto, como se explicó anteriormente, se reducen las cantidades necesarias en la mezcla al incorporar polímero, lo que trae beneficios en cuanto a disponibilidad de estos materiales, ambos de tipo no renovable. El impacto sobre los agregados reduce la presión por recursos de cantera y permite extender el tiempo de vida de las mismas; por su parte, la disminución de asfalto constituye un ahorro sustancial al uso de materiales de origen petroquímico. En la tabla 20 se muestran los ahorros alcanzados al incorporar agregados plásticos a las mezclas asfálticas.

Tabla 20. Ahorro de materiales por m³ de mezcla modificada

	Material asfáltico	Agregados pétreos
Carcasas	9%	14%
Diskettes	10%	15%

De esta manera, puede concluirse que el proceso no tendría inconvenientes en cuanto a disponibilidad de sus materias primas.

II. Proceso productivo

El proceso de producción del producto desarrollado consta de la adecuación separada de las tres materias primas, mezclado y control ambiental de las emisiones del proceso. El material asfáltico se calienta hasta una temperatura entre 145 y 156 °C. La preparación de los agregados pétreos comprende un secado de los materiales y un calentamiento hasta una temperatura en el rango 159 – 166 °C. La preparación del material plástico incluye un lavado con soda cáustica diluida, secado y molienda del material de acuerdo a la granulometría requerida.

Se consideraron dos etapas de mezcla. En la primera se homogenizan los agregados pétreos con el plástico para asegurar una distribución uniforme de los agregados sólidos en la etapa de incorporación del ligante asfáltico.

La agitación y temperaturas de las mezclas causan emisiones gaseosas (solventes orgánicos, aditivos de los plásticos, polvo) por lo que se incluyó una etapa de tratamiento de gases. La soda diluida que sale del lavado de los plásticos se recupera en una etapa

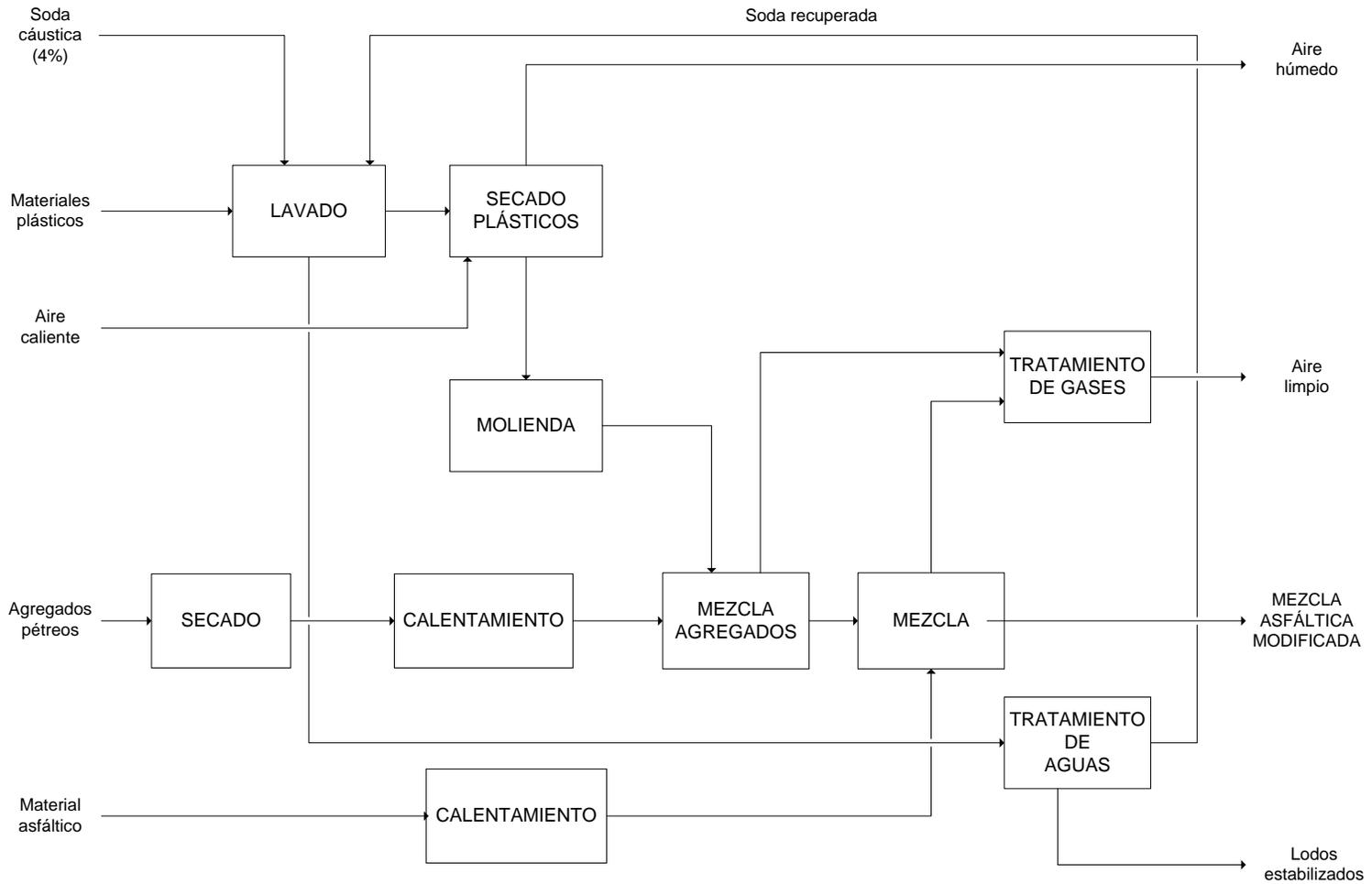
de tratamiento, con lo que se disminuye el consumo de agua fresca en el proceso. Este tratamiento haría uso de tecnologías como la filtración y la floculación para la purificación del caudal tratado.

El proceso varía del normalmente desarrollado para mezclas asfálticas en la preparación del polímero antes de entrar a la mezcla de agregados; esta etapa adicional consta de procedimientos comunes de lavado y molienda, por lo tanto, no representan un impedimento técnico para la implementación del proceso. En la figura 25 se muestra un diagrama del proceso descrito. Llegado a tal punto, de la adaptación en planta, sería necesario un estudio de en qué momento adicionar el polímero a los agregados.

III. Implementación de la mezcla

Hasta el momento no se han detectado posibles dificultades cuando se piensa en el empleo final de la mezcla, como requerimientos de maquinaria diferente a la convencional.

Figura 25. Diagrama de bloques - Proceso de producción de Mezcla Asfáltica Modificada



6. CONCLUSIONES

- De acuerdo a los puntos de fusión de los polímeros y a la viabilidad del proceso, el mejor método de incorporación del material polimérico a la mezcla asfáltica es como parte de los agregados.
- Las formulaciones que cumplen con los intervalos permitidos por norma INVIAS respecto a las variables estabilidad y flujo corresponden a aquellas construidas con menos del 6% de polímero fino, como agregado, y un porcentaje de asfalto entre 4,7 y 4,9 (para ambos materiales), de acuerdo con los resultados del diseño Marshall.
- Las mezclas desarrolladas tienen un porcentaje de vacíos por encima del reglamentado; sin embargo, se realizó la comparación dinámica, y se recomienda continuar el proyecto, porque podría darse el caso de que se mejore el desempeño de la mezcla comercial, aun sin cumplir éste parámetro.
- Se escogieron la estabilidad y el flujo, como punto de partida en el diseño de las mezclas modificadas, debido a que lo que se pretende es mejorar las propiedades mecánicas; sin embargo, es necesaria una investigación posterior que evalúe todo el conjunto de requerimientos técnicos de los materiales constitutivos por separado y de las mezclas como tales. Aspectos relativos a costos, tiempo y operatividad de los ensayos de laboratorio llevaron a delimitar de esta manera el alcance de las pruebas ejecutadas.
- Los resultados del diseño Marshall muestran el aporte positivo de los factores del diseño de experimentos a la variable flujo. Respecto a la estabilidad, no se observó una tendencia como respuesta a los factores evaluados, aunque para el material de diskettes la mayoría de las formulaciones tuvieron valores de estabilidad mayores a los de las muestras patrón. Se determinó que las muestras con agregado fino responden de manera más acorde al rango de flujos reportado en la norma y fue elegido este tamaño de partícula para los análisis posteriores.

- La adquisición de materiales en el mercado informal del reciclaje sumó significativamente en los costos del producto final, causando que el margen de contribución fuera menor que el de la mezcla patrón. Sin embargo, al considerar el tratamiento del material plástico en la misma planta de producción, se observa una disminución sustancial en los costos, lo que hace competitivo al producto frente a la mezcla sin modificar.
- La investigación del entorno mostró la disponibilidad de materias primas en el país, dada la generación actual de residuos y las proyecciones futuras de consumo y descarte de equipos informáticos.
- Al analizar las etapas de proceso adicionales, necesarias en la producción de mezcla asfáltica modificada, pudo verse que no constituyen un impedimento técnico para su implementación, debido a que demandan tecnología disponible en el medio con relativa facilidad.

7. RECOMENDACIONES

- Dados los altos precios de la pasta (plásticos rígidos) en el mercado, es de vital importancia el establecimiento de alianzas estratégicas con el fin de disminuir los costos agilizar las actividades de recolección, selección, limpieza y transporte de los materiales plásticos. Una opción posible es gestionar el manejo de éstos a través de las empresas de servicio de aseo metropolitanas, pactando un costo que, sumado al calculado para el margen de contribución, (ver numeral 5.7.2) sea atractivo para el producto.
- Se encontraron formulaciones que cumplen las especificaciones de la norma INVIAS respecto a estabilidad y flujo, pero falta abordar el diseño de experimentos completo para el análisis de las variables dinámicas, en cuanto son éstas las que más se acercan a una descripción del comportamiento real de las mezclas modificadas con polímeros (OZEN et al., 2007).
- El presente trabajo constituye el primer avance en la investigación con el fin de llevar las mezclas formuladas a campo. El alcance del proyecto fue verificar el cumplimiento de las variables flujo y estabilidad tomando como referentes los lineamientos del INVIAS. Se propone continuar con la investigación planteada para verificar el cumplimiento de todos los parámetros mostrados en las tablas 2 y 5 (requerimientos técnicos de agregados y criterios del diseño Marshall) de las Especificaciones generales de construcción de carreteras (INVIAS, 2007).

8. PARTICIPANTES DEL PROYECTO

- Responsables:** Diana Milena Metaute Heredia. Estudiante Ingeniería de Procesos.
Universidad EAFIT
- Daniel Mauricio Casas Orozco. Estudiante Ingeniería de Procesos.
Universidad EAFIT
- Asesor:** Julián Vidal Valencia. Jefe de Departamento, Ingeniería Civil.
Universidad EAFIT
- Co – asesor:** Diego Andrés Acosta Maya. Profesor, Ingeniería de Procesos.
Universidad EAFIT

9. CRONOGRAMA

ACTIVIDAD	Año	2009																																																
	Mes	Enero				Febrero				Marzo				Abril					Mayo				Junio				Julio				Agosto				Septiembre				Octubre											
	Semana	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4								
Búsqueda bibliográfica		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x												
Estudio de mercado		x	x	x	x	x	x																																											
Consecución de materiales		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x																						
Adecuación de materiales		x	x																																															
Caracterización y Pruebas preliminares		x	x	x	x	x	x	x	x																																									
Planeación del diseño de experimentos		x	x	x	x	x	x																																											
Ensayos de laboratorio																																																		
Análisis de resultados																																																		
Pruebas finales																																																		
Elaboración del informe																																																		

10. RECURSOS

Ensayos y pruebas de laboratorio		\$ 14.106.000,00
Densidad		
Estabilidad		\$ 5.266.000,00
Flujo		
Módulo dinámico		
Fatiga		\$ 8.760.000,00
Creep		
Espectroscopía infraroja		\$ 80.000,00
Máquinas		\$ 3.750,00
Molino de cuchillas		\$ 3.750,00
Asesor		\$ 4.500.000
288 h		
Investigadores		\$ 5.000.000
Investigador 1: 950 h		\$ 2.500.000
Investigador 2: 950 h		\$ 2.500.000
Materiales utilizados		\$ 8.036
Polímeros		
Carcasas	\$	1.476
Diskettes	\$	1.439
Agregados pétreos		
Arenas mezcladas	\$	1.031
Arenas trituradas	\$	458
Triturado 3/4"	\$	735
Asfalto	\$	2.897
Gastos generales		\$ 700.000
Transporte		
Papelería y otros		
COSTO TOTAL		\$ 23.617.786

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). Norma AASHTO T – 313: *“Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR)”*

ASOCIACIÓN REFORESTA, FCPN (FEDERACIÓN DE ASOCIACIONES CPN). El problema de la nueva basura tecnológica. El Correo del Medio Ambiente [en línea]. no. 27. p. 4, col.1. Junio, 2004. Disponible en <www.fcpn.es/elcorreoma/correo27.pdf>

AUTOMATIC CREATIONS INC. Material Data: RTP Company RTP 400 HI FR: Polystyrene (PS), High Impact - Flame Retardant. Blacksburg, Virginia. [en línea]: <www.matweb.com> (requiere suscripción). Visitado el 3 de Septiembre de 2009.

AUTOMATIC CREATIONS INC. Material Data: RTP Company RTP 600 FR Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), Flame Retardant. Blacksburg, Virginia. [en línea]: <www.matweb.com> (requiere suscripción). Visitado el 3 de Septiembre de 2009.

CIENMATE (GRUPO DE CIENCIA DE LOS MATERIALES). Análisis de punto de fusión por Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC). Universidad de Antioquia. Sede de Investigaciones Universitarias (SIU). Septiembre de 2009.

ECOPETROL. Asfaltos [en línea]. Marzo, 2005. Disponible en <www.ecopetrol.com.co>

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras [en línea]. Artículo 400 – 07: Disposiciones generales para la ejecución de riegos de imprimación, liga y curado, tratamientos superficiales, sellos de arena asfalto, lechadas asfálticas, mezclas asfálticas en frío y en caliente y reciclado de pavimentos asfálticos. Bogotá D.C. [en línea]: El Instituto, 2007. 26 p. Disponible en <www.invias.gov.co>

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras [en línea]. Artículo 450 – 07: Mezclas asfálticas en caliente (Concreto asfáltico

y mezcla de alto módulo). Bogotá D.C. [en línea]: El Instituto, 2007. 26 p. Disponible en <www.invias.gov.co>

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo para Materiales de Carreteras [en línea]. INV E-733-07: Gravedad específica bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados y superficie seca. Bogotá D.C. [en línea]: El Instituto, 2007. 9 p. Disponible en <www.invias.gov.co>

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo para Materiales de Carreteras [en línea]. INV E-734-07: Gravedad específica bulk y Densidad de mezclas asfálticas compactadas empleando especímenes parafinados. Bogotá D.C. [en línea]: El Instituto, 2007. 17 p. Disponible en <www.invias.gov.co>

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo para Materiales de Carreteras [en línea]. INV E-735-07: Gravedad específica máxima teórica (G_{mm}) y densidad de mezclas asfálticas para pavimentos. Bogotá D.C. [en línea]: El Instituto, 2007. 17 p. Disponible en <www.invias.gov.co>

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo para Materiales de Carreteras [en línea]. INV E-736-07: Porcentaje de vacíos de aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas. Bogotá D.C. [en línea]: El Instituto, 2007. 4 p. Disponible en <www.invias.gov.co>

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo para Materiales de Carreteras [en línea]. INV E-748-07: Resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall. Bogotá D.C. [en línea]: El Instituto, 2007. 15 p. Disponible en <www.invias.gov.co>

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo para Materiales de Carreteras [en línea]. INV E-784-07: Determinación de las leyes de fatiga de mezclas asfálticas

compactadas en caliente sometidas a flexión dinámica. Bogotá D.C. [en línea]: El Instituto, 2007. 8 p. Disponible en <www.invias.gov.co>

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Programa de rehabilitación - Red vial nacional no concesionada. Informe de avance. Bogotá D.C. [en línea]: El Instituto, 2009. 20 p. Disponible en <www.invias.gov.co>

INTERNATIONAL PLASTICS SELECTOR. Plastics: Thermoplastics and Thermosets. 12 ed. Estados Unidos. Nancy L. Burgerson Editora. 1991. 1108 p.

LORIA SALAZAR, Luis Guillermo. Evaluación de asfaltos modificados en laboratorio con distintos polímeros. En: Infraestructura Vial. Febrero, 2007. no. 17, p. 46 – 53.

MINISTERIO DE TRANSPORTE. Diagnóstico del Sector Transporte 2008. Bogotá D.C. [en línea]: El Instituto, 2008. 204 p. Disponible en <http://www.mintransporte.gov.co/Servicios/Estadisticas/DIAGNOSTICO_TRANSPORTE_2008.pdf>

OTT, Daniel. Gestión de Residuos electrónicos en Colombia. Diagnóstico de Computadores y Teléfonos celulares [en línea]. Informe final. Medellín. Centro Nacional de Producción Más Limpia (CNPML) y Materials and Science Technology (EMPA). 31 de Marzo de 2008. Disponible en <http://www.cnpml.org/html/guias_y_documentos.asp>

ÖZEN, Halit; AKSOY, Atakan; TAYFUR, SÜREYYA; ÇELİK, Fazil. Laboratory performance comparison of the elastómer – modified asphalt mixtures. En: Building and Environment. Marzo 2007. no. 43. p. 1270 – 1277.

PALOS, Artemio; SOUZA, Nandika Anne De; SNIVELY, Todd; REIDY, Richard. Modification of cement mortar with recycled ABS. En: Cement and Concrete research. Abril 2001. no. 31. p. 1003 – 1007.

PAVIMENTAR S.A. Ensayos de Granulometría. Elaborado por Elkin Marín, aprobado por Ingeniero Conrado Lopera. 2009.

PAVIMENTAR S.A. Lista de Precios: Materiales Pétreos en Planta. Aprobado por Gerente Dionisio Isaza. 2008.

RONE (Compañía de molinos). Molinos LÍNEA F con una cuchilla fija. Tabla de especificaciones de equipos. Carapicuíba - SP – Brasil. 2009. Disponible en <www.rone.com.br>

REYES ORTIZ, Oscar Javier; TRONCOSO RIVERA, Juan Ricardo y CAMACHO TAUTA, Javier Fernando. Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de cenizas volantes [en línea]. En: Ingeniería y Universidad: Revista de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana [en línea]. Junio 2006. vol. 10, no. 001, p. 1 – 17. Disponible en <<http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/477/47710102.pdf>>

RONDÓN QUINTANA, *et al.* Estado del conocimiento del estudio sobre mezclas asfálticas modificadas en Colombia. En: Infraestructura Vial. Febrero, 2008. no. 19, p. 10 – 20.

ROSATO, Dominick V. Rosato's Plastics Encyclopedia and Dictionary. Estados Unidos. Hanser Publishers. 1993. 818 p. ISSN 3446164901.

SEVILLA LEMUS, Maria Eugenia. Evaluación de la capacidad instalada de plantas de mezcla asfáltica en Colombia. En: Terceras Jornadas Internacionales del Asfalto (3: 21 – 23, Agosto. Popayán – Cauca). Universidad del Cauca. 2002. 12 p.

TALAVERA RODRÍGUEZ, Rogelio; CASTAÑO MENESES, Victor Manuel; MARTÍNEZ MADRID, Miguel; HERNÁNDEZ PADRÓN, Genoveva. Desarrollo de aditivos para asfaltos modificados con bajos contenidos de hule. México. 2001. Publicación técnica No. 160. ISSN 0188-7297

UNITED STATES PATENT OFFICE. Method for preparing asphalt and polymer compositions incorporating multi – component crosslinking agents. Inventores: BUTLER, James R., KELLY, Kevin P. US 6.407.152 B1. Fecha de solicitud: 28, Noviembre, 2000. Estados Unidos. Fecha de publicación: 18, Junio, 2002.

UNITED STATES PATENT OFFICE. Modified Asphalt. Inventor: G. MOHAMMED MEMON. US 6.444.731 B1. Fecha de solicitud: 24, Mayo, 2000. Estados Unidos. Fecha de publicación: 3, Septiembre, 2002.

UNITED STATES PATENT OFFICE. Modified Asphalt Compositions. Inventores: R. K. STUART Jr.; J. LYNN PRESLEY; K. F. GRZYBOWSKY. US 7.202.290 B2. Fecha de solicitud: 12, Noviembre, 2003. Estados Unidos. Fecha de publicación: 10, Abril, 2007.

UNITED STATES PATENT OFFICE. Modified Asphalt Binders and Asphalt Paving Compositions. Inventor: W. HERGENROTHER, P. BOERNER, D. GRAVES, C, RADEMACHER, T. REECE, H, WISSEL. Aplicación de patente. US 2008/0009567 A1. Fecha de solicitud: 20, Junio, 2007. Estados Unidos. Fecha de publicación: 10, Enero, 2008.

VALENZUELA, Mariana. El asfalto en la conservación de pavimentos. Trabajo de Grado de Ingeniero Civil. Valdivia: Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Escuela de Construcción Civil, 2003, 97 p.

VIDAL VALENCIA, Julián. Conceptos generales. En: Pavimentos Básico. Notas de clase. Medellín: s.n., 2008. p. 1 – 14.

WARDLAW, Kenneth; SCHULER, Scott. Polymer modified asphalt binders. Estados Unidos. ASTM, 1992. 361 p. ISBN 0803114133, 9780803114135

YILDIRIM, Yetkin. Polymer modified asphalt binders. En: Construction and Building Materials. Agosto 2005. no. 21, p. 328 – 337.

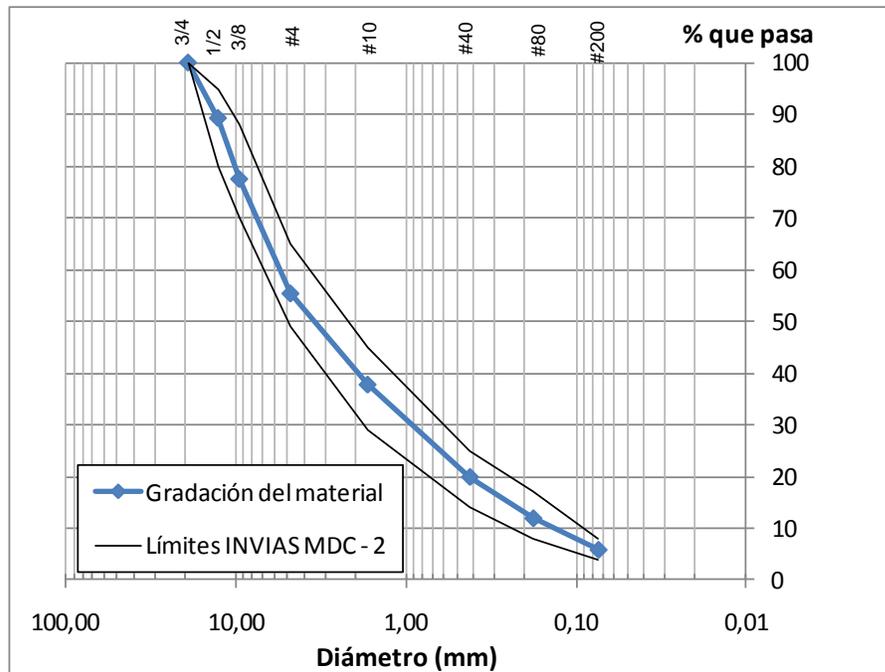
ANEXOS

ANEXO A CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

A.1 MATERIALES SÓLIDOS

Se utilizaron agregados pétreos con distribución granulométrica INV MDC – 2, cuyos valores se muestran en la figura 26. Debido a la adición de polímeros triturados, se genera una nueva gradación de agregados sólidos en las mezclas modificadas. En las figuras 27 y 28 se muestran las gradaciones modificadas con la adición de 5 % de polímero (ABS y PS, respectivamente), las cuales cumplen con los valores límite para mezclas MDC - 2

Figura 26. Granulometría de los agregados pétreos (muestra patrón)



Basado en PAVIMENTAR. Ensayos de Granulometría. 2009.

Figura 27. Granulometría de agregados pétreos + agregados plásticos (ABS)

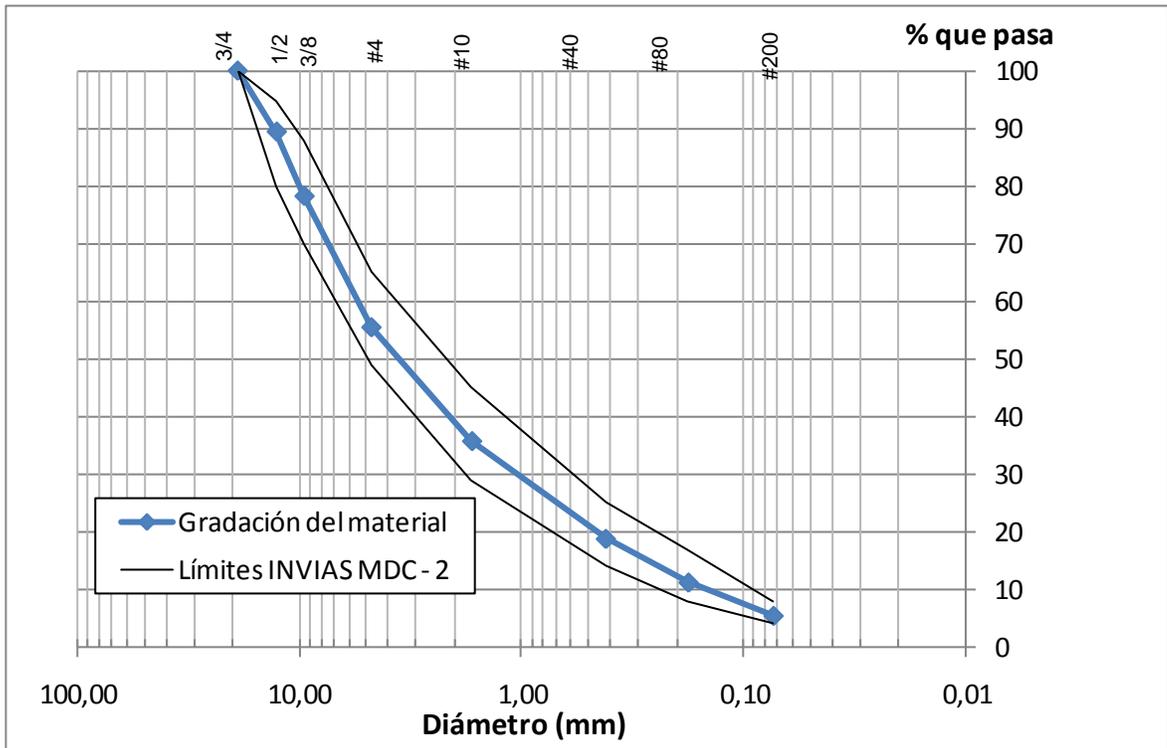
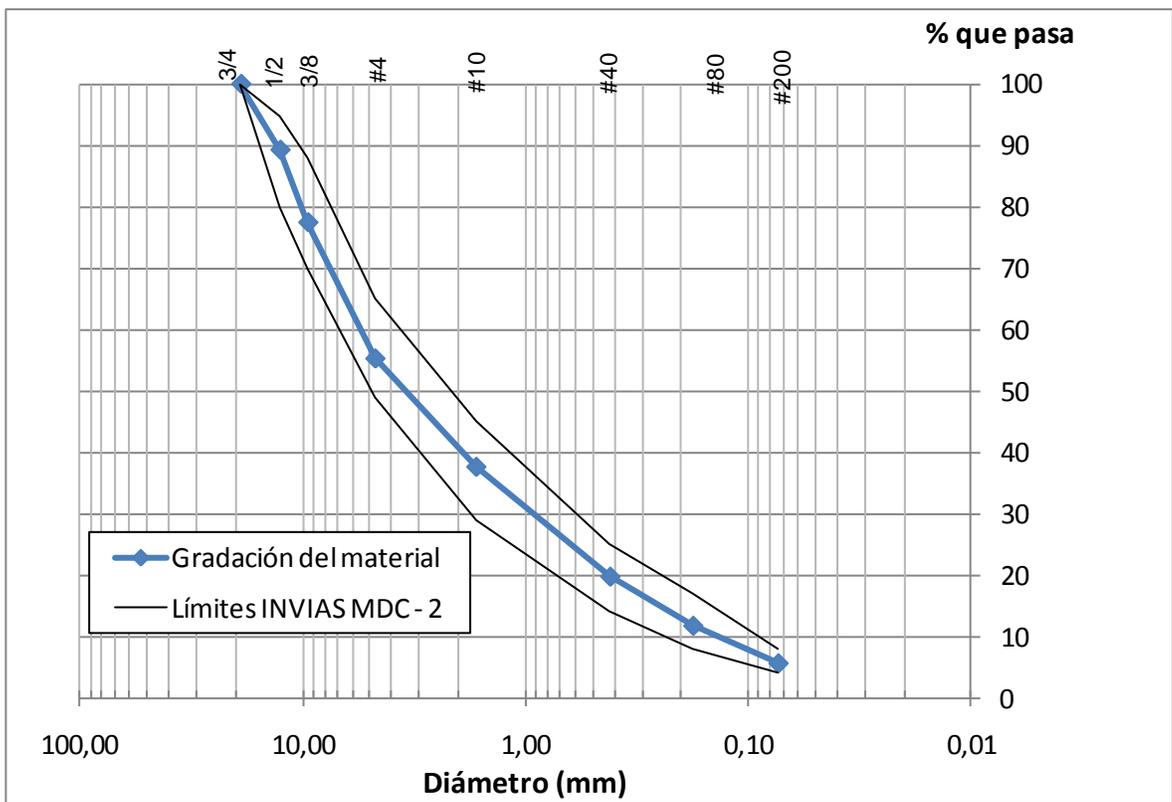


Figura 28. Granulometría de agregados pétreos + agregados plásticos (PS)



A.2 MATERIAL ASFÁLTICO

El material asfáltico utilizado proviene de la planta de refinación de Ecopetrol (Barrancabermeja), tipo AC 60/70. En la tabla 21 se listan sus propiedades.

Tabla 21. Propiedades del cemento asfáltico.

Características	Unidades	Métodos*	Mínimo	Máximo
Ductibilidad a 25°C, 5 cm/min	cm	D 113	100	
Penetración a 25°C, 100 g, 5s	mm/10	D 5	60	70
Punto de ablandamiento	°C	D 36	45	55
Punto de inflamación	°C	D 92	232	
Solubilidad en Tricloroetileno	g/100g	D 2042	99	
Pérdida de masa	g/100g	D 2872		1,0

ECOPETROL. Asfalto.

* Los métodos de ensayo hacen parte de las normas ASTM y se listan a continuación:

- ASTM D113 - 07 Standard Test Method for Ductility of Bituminous Materials
- ASTM D5 - 06e1 Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials
- ASTM D36 - 06 Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)
- ASTM D92 - 05a Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester
- ASTM D2042 - 09 Standard Test Method for Solubility of Asphalt Materials in Trichloroethylene
- ASTM D2872 - 04 Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)

A.3 MATERIALES PLÁSTICOS

Las características del equipo se usado para la molienda del material se muestran en la tabla 22.

Tabla 22. Características del molino de cuchillas

Tipo	Molino de cuchillas
Marca	The Ball and Jewell Co.
Potencia	4 HP
Número de cuchillas móviles	3
Número de cuchillas fijas	2
Ancho de cuchillas	20 cm
Diámetro del rotor	20 cm
Velocidad	800RPM
Diámetro de la criba	8,7mm
Espesor de la criba	6,9mm

El molino está ubicado en el laboratorio de Procesamiento de Plásticos de Ingeniería de Producción (Universidad EAFIT).

A.3.1 Granulometría

Tabla 23. Caracterización del material plástico por tamaño de partícula

Material	Acumulado menor Malla 8	
	Fino	Grueso
ABS	27	7.9
PS	74.2	30.9

A.3.2 Identificación (Espectroscopía IR) (Falta espectro del poliestireno)

Figura 29. Espectro infrarrojo – Material de diskettes (color negro, pasta opaca)

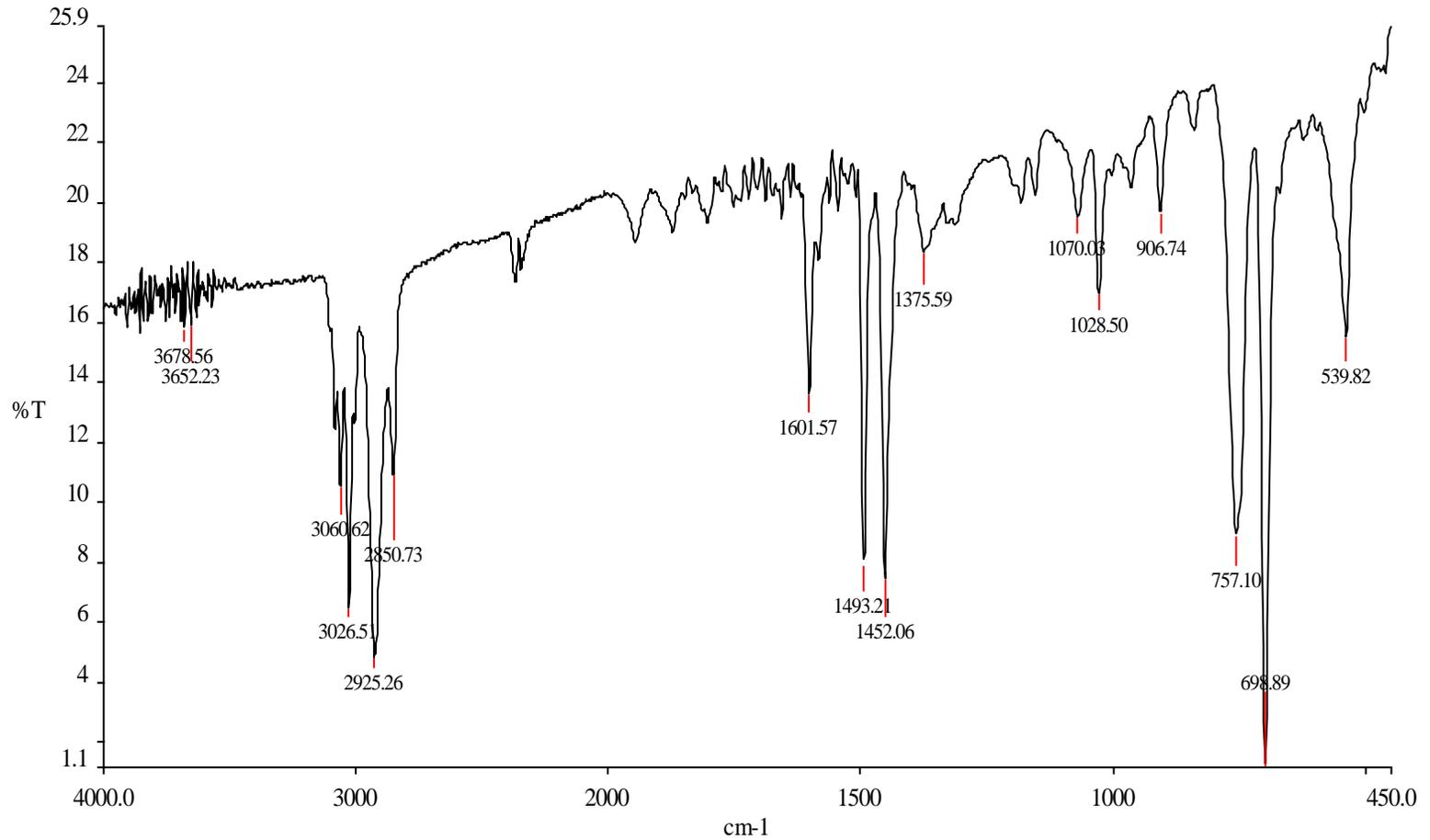


Figura 30. Espectro infrarrojo – Material de diskettes (color rosa, pasta translúcida)

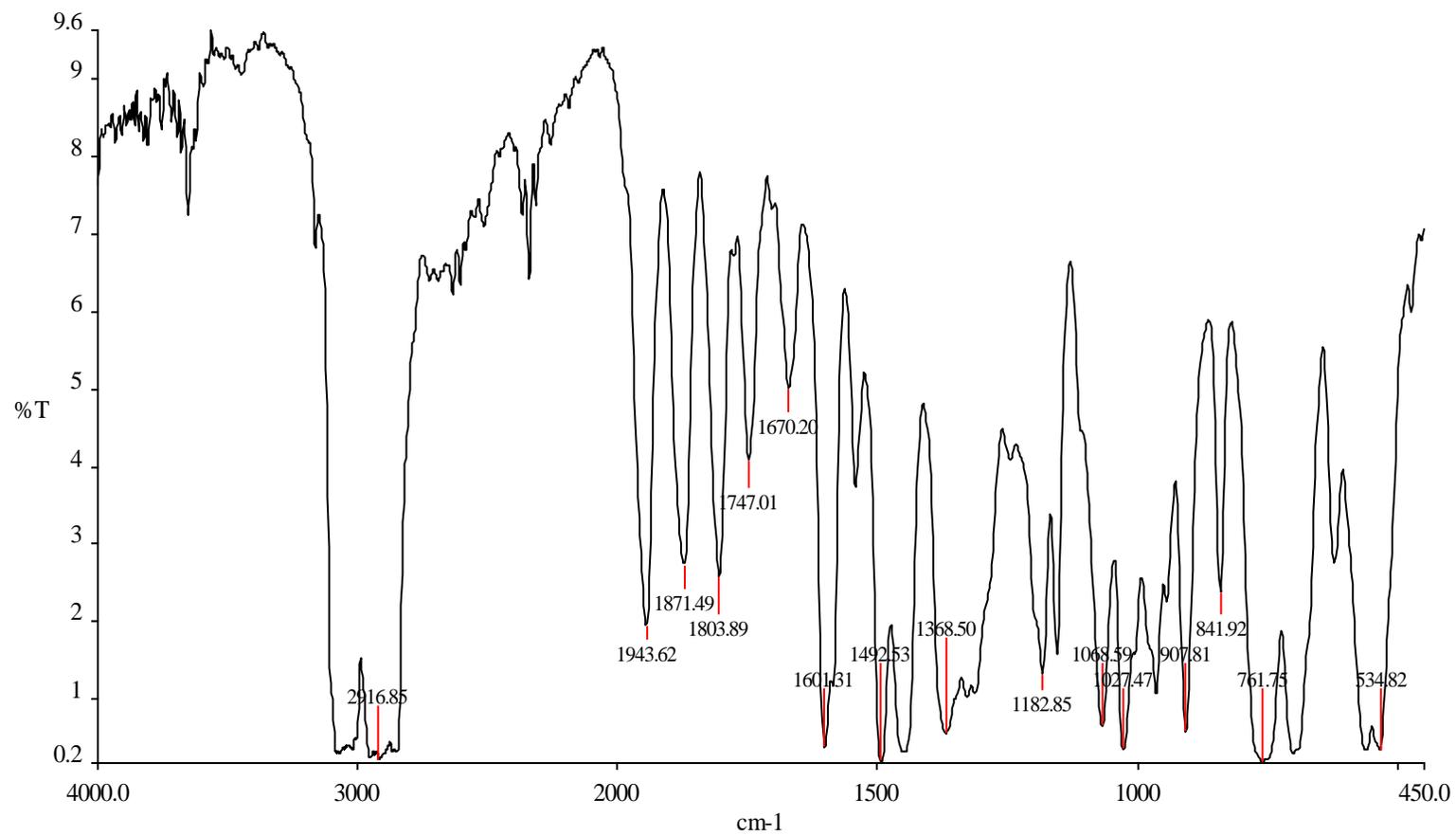
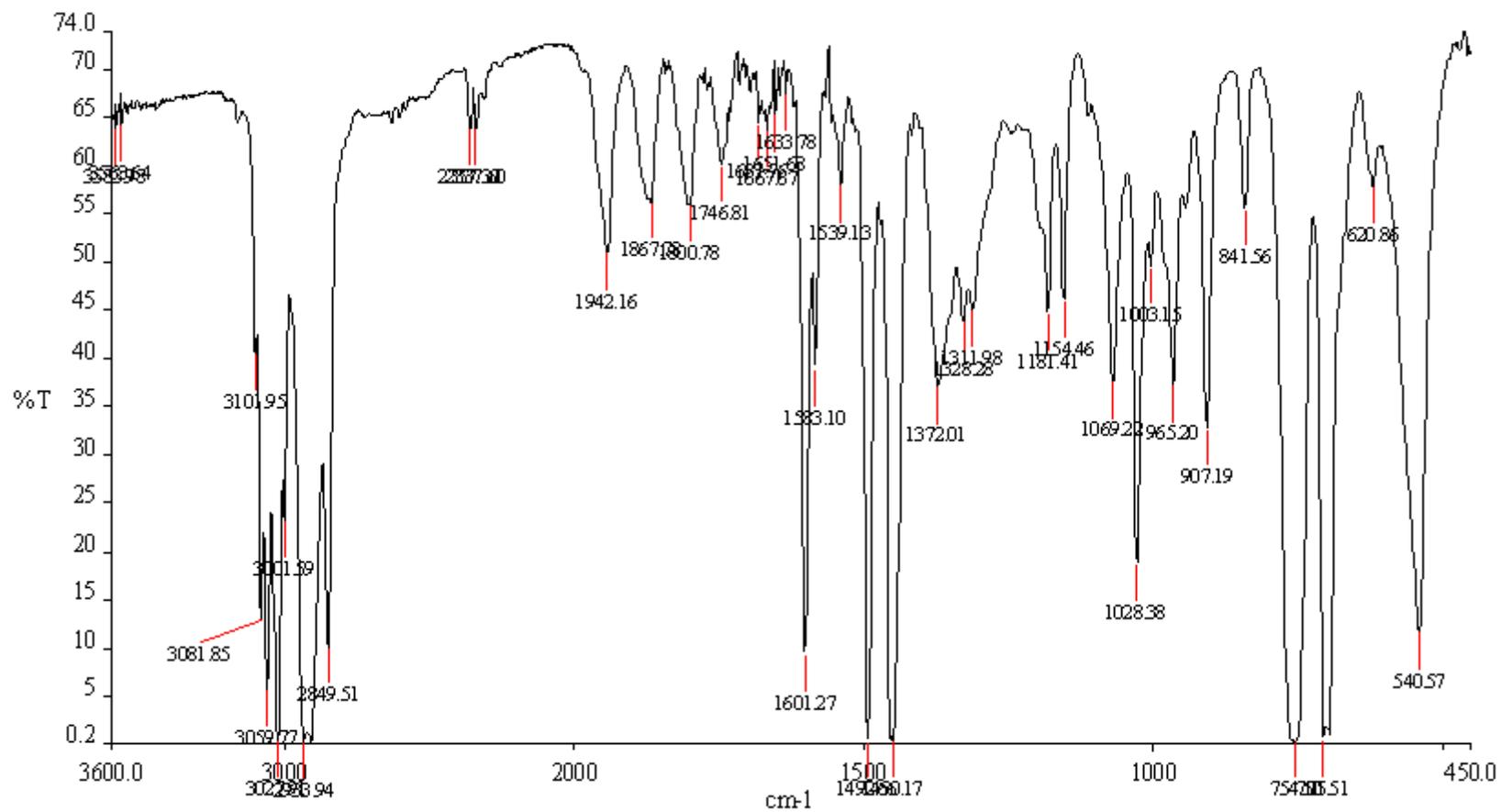


Figura 31. Espectro infrarrojo – Material de referencia (PS)



A.3.3 Determinación del punto de fusión – Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

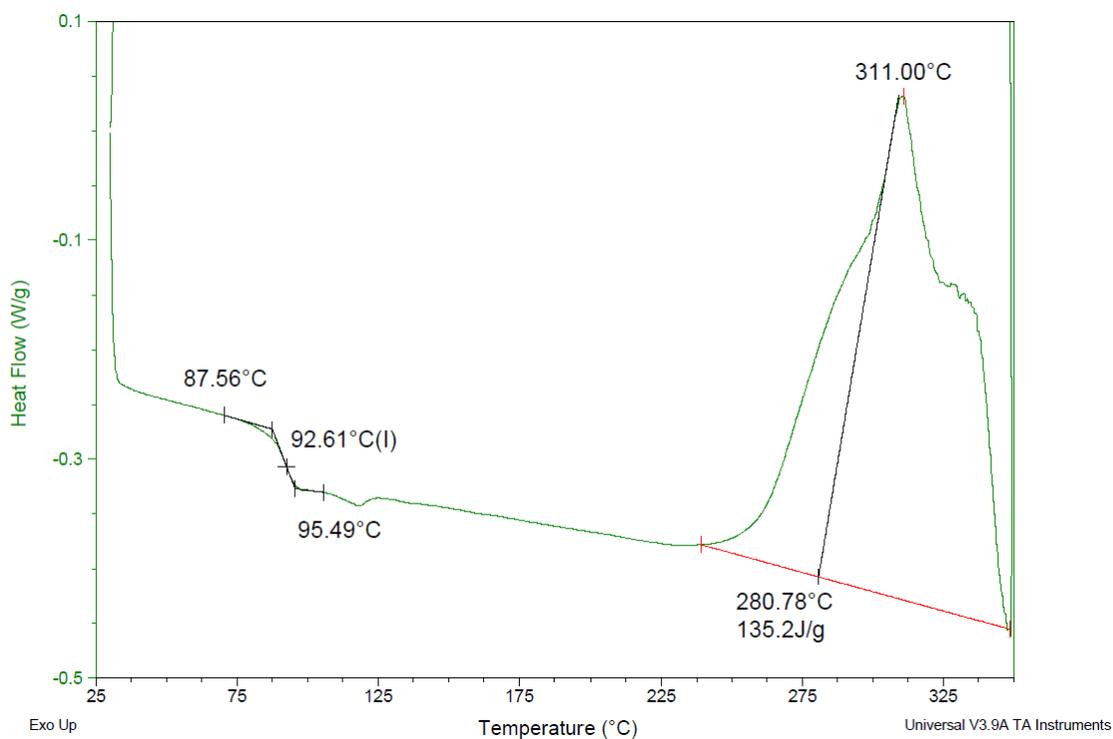
Tabla 24. Condiciones del equipo

Equipo	TA Instruments Q100
Tipo	Calorímetro Diferencial de Barrido con Temperatura Modulada
Rango de temperaturas (°C)	35 – 350
Rampa de calentamiento (°C/min)	10

Tabla 25. Resultados de los ensayos de punto de fusión

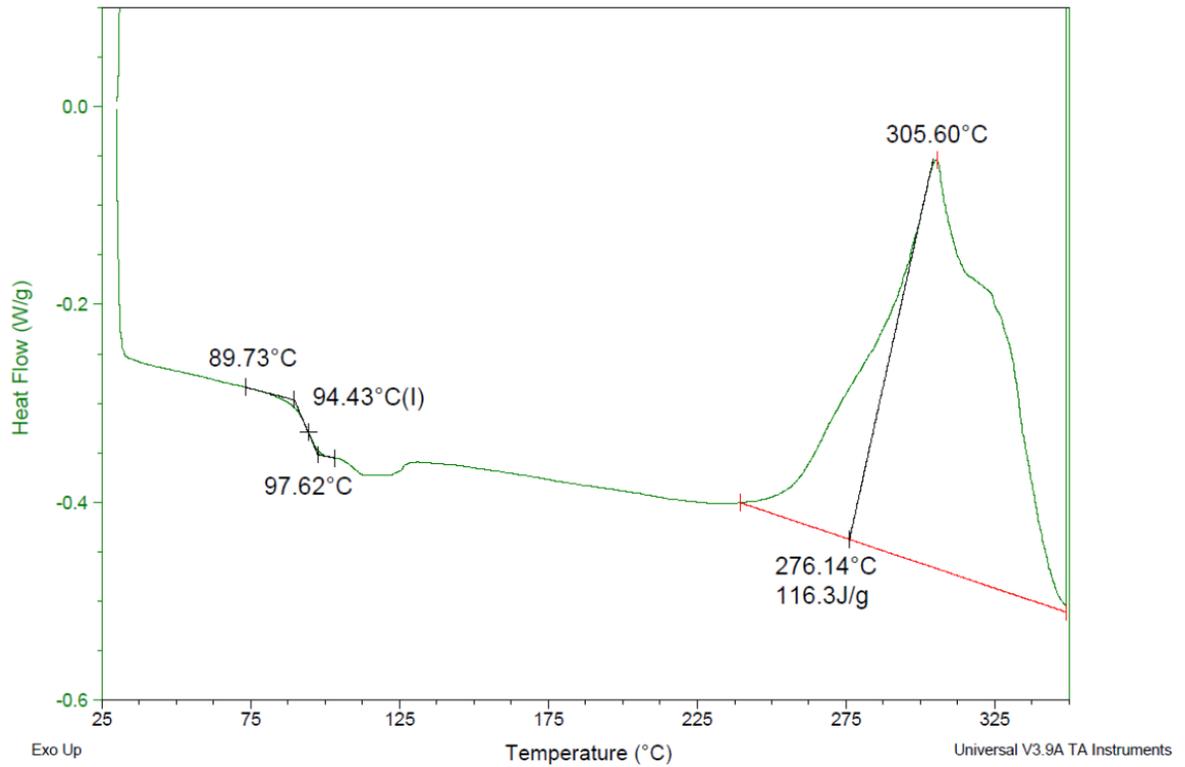
Muestra	T_g (°C)	T_{deg} (°C)
ABS-FR(17)	88 - 95	250
ABS-FR(17)+PC	90 - 98	306
ABS+PC+PS	89 - 96	309
Diskettes (PS)	91 - 104	356

Figura 32. Termograma DSC – Muestra ABS FR(17)



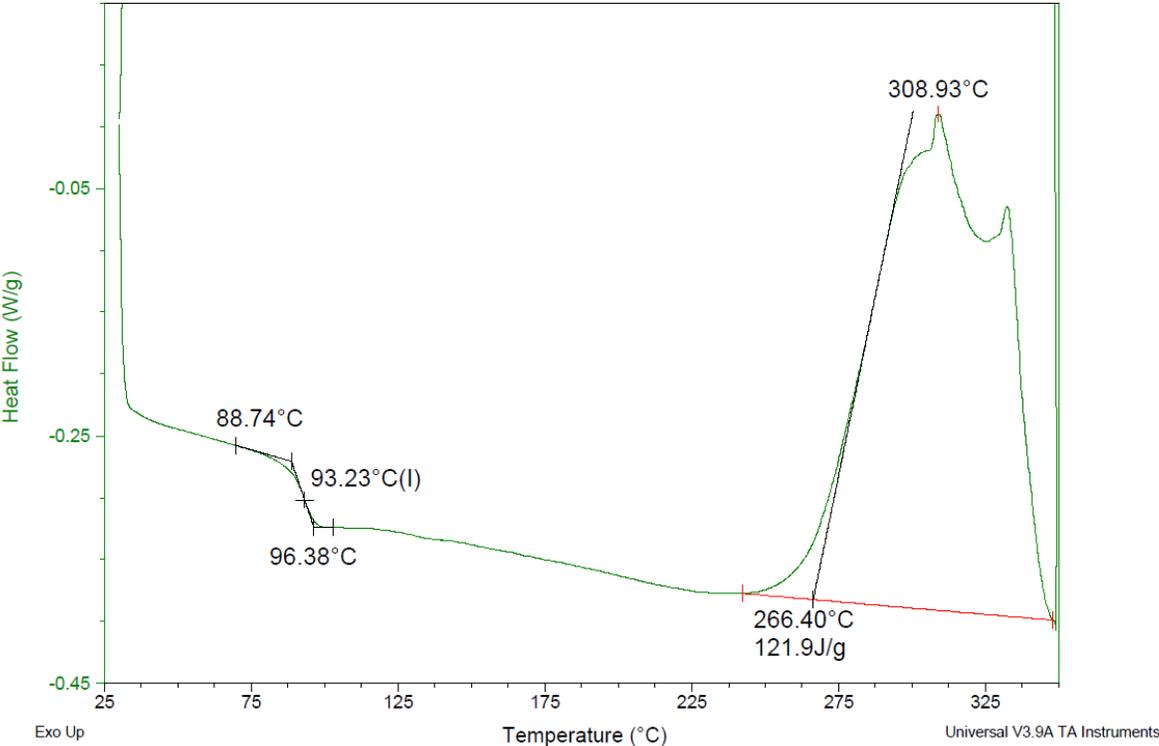
CIENMATE. Análisis de punto de fusión por Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC). 2009.

Figura 33. Termograma DSC – ABS FR(17) + PC



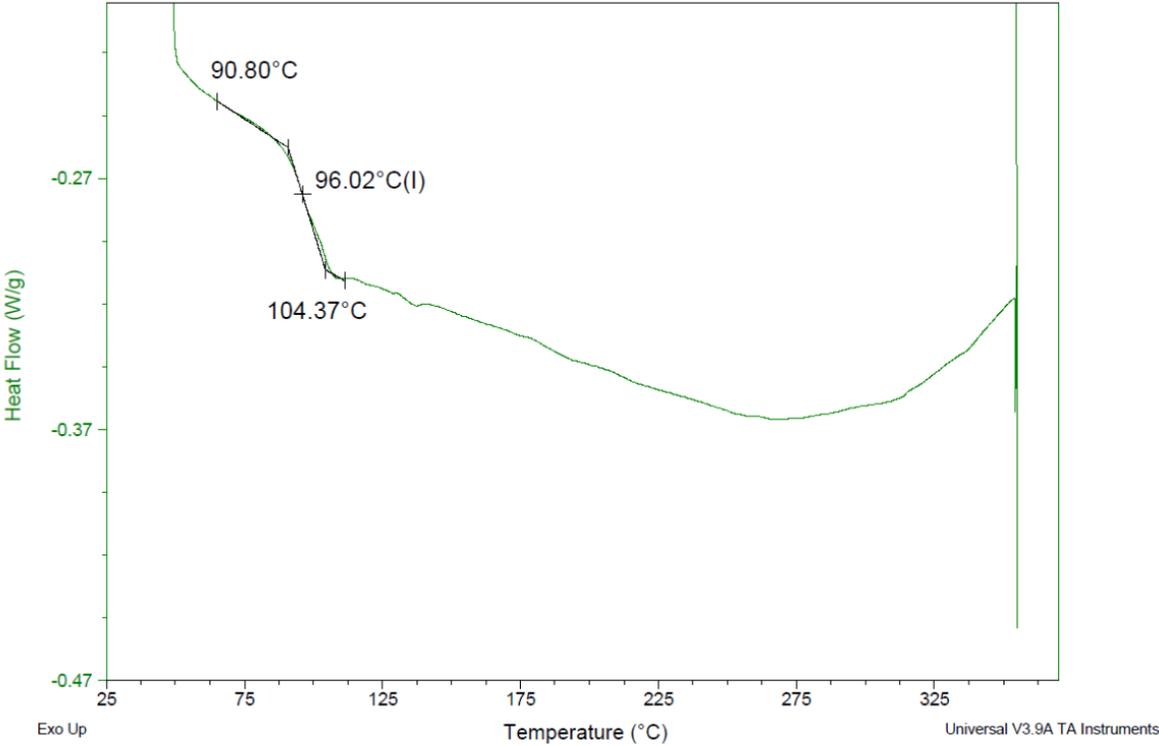
CIENMATE. Análisis de punto de fusión por Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC). 2009.

Figura 34. Termograma DSC – ABS + PC + PS



CIENMATE. Análisis de punto de fusión por Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC). 2009.

Figura 35. Termograma DSC – Diskettes (Poliestireno)



CIENMATE. Análisis de punto de fusión por Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC). 2009.

ANEXO B

En este apartado se presentan los datos con los cuales se realizó la evaluación económica del producto

El costo del material asfáltico se encuentra en la base de datos [en línea] de ECOPETROL y los datos correspondientes a agregados pétreos y precio de venta de mezcla asfáltica fueron aportados por la empresa Pavimentar S.A.

Tabla 26. Costo de materiales sólidos

Material	Costo (\$/Ton)
Material asfáltico	740000
Triturado 3/4"	31668
Arena triturada	34568
Arena mezclada	34568
Plástico comprado	300000
Plástico procesado	21024

Tabla 27. Precio de venta de Mezcla asfáltica

Precio de venta (MCD 2 - AC 60/70)	
(\$/Ton)	(\$/m ³)
\$ 152.501	\$ 273.782

ANEXO C
ANÁLISIS DE REGRESIÓN

El tratamiento estadístico de los datos se realizó en el software Microsoft Excel ® con un nivel de significancia del 95%.

C.1 CARCASAS

Tabla 28. Codificación de las variables del modelo

	A	B	C	D
-1	1.09	13.55	-1.00	0.07
1	4.65	20.86	1.00	0.27

Tabla 29. Matriz de correlación de las variables del modelo *

	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>A</i> ²	<i>B</i> ²	<i>C</i> ²	<i>D</i> ²	<i>AB</i>	<i>AC</i>	<i>AD</i>	<i>BC</i>	<i>BD</i>	<i>CD</i>
<i>A</i>	1.00													
<i>B</i>	-0.56	1.00												
<i>C</i>	-0.08	0.04	1.00											
<i>D</i>	0.98	-0.70	-0.07	1.00										
<i>A</i> ²	-0.44	0.53	0.01	-0.54	1.00									
<i>B</i> ²	0.07	-0.06	-0.02	0.16	-0.48	1.00								
<i>C</i> ²	0.00	0.00	-0.02	0.02	0.50	0.24	1.00							
<i>D</i> ²	-0.07	0.01	-0.01	-0.03	0.47	0.29	0.99	1.00						
<i>AB</i>	-0.01	-0.29	-0.02	-0.04	0.39	-0.77	-0.21	-0.26	1.00					
<i>AC</i>	-0.07	0.01	-0.16	-0.06	-0.03	0.01	-0.02	-0.01	-0.04	1.00				
<i>AD</i>	-0.39	0.47	0.01	-0.47	0.96	-0.30	0.71	0.69	0.19	-0.02	1.00			
<i>BC</i>	0.03	-0.08	-0.19	0.05	-0.08	0.09	0.01	0.02	-0.04	-0.51	-0.06	1.00		
<i>BD</i>	-0.17	0.04	0.01	-0.26	0.57	-0.90	-0.24	-0.29	0.93	-0.02	0.36	-0.08	1.00	
<i>CD</i>	-0.07	0.04	-0.01	-0.07	0.01	-0.02	-0.02	-0.01	-0.02	0.97	0.01	-0.68	0.01	1.00

* Se muestran los valores de correlación mayores a 0.9 y los factores descartados

Tabla 30. Valores de flujo y de los factores escogidos según codificación

TTO	A	B	C	A ²	B ²	C ²	AB	AC	BC	Flujo (mm)
1	-0.83	1.00	-1	0.69	1.00	1	-0.83	0.83	-1.00	4.00
	-0.83	1.00	-1	0.69	1.00	1	-0.83	0.83	-1.00	3.89
2	-0.83	1.00	1	0.69	1.00	1	-0.83	-0.83	1.00	4.17
	-0.83	1.00	1	0.69	1.00	1	-0.83	-0.83	1.00	3.69
3	1.00	0.11	-1	1.00	0.01	1	0.11	-1.00	-0.11	4.08
	1.00	0.11	-1	1.00	0.01	1	0.11	-1.00	-0.11	4.60
4	1.00	0.11	1	1.00	0.01	1	0.11	1.00	0.11	5.19
5	-0.92	0.27	-1	0.86	0.07	1	-0.25	0.92	-0.27	3.51
	-0.92	0.27	-1	0.86	0.07	1	-0.25	0.92	-0.27	3.44
	-0.92	0.27	-1	0.86	0.07	1	-0.25	0.92	-0.27	3.36
6	-0.92	0.27	1	0.86	0.07	1	-0.25	-0.92	0.27	4.21
	-0.92	0.27	1	0.86	0.07	1	-0.25	-0.92	0.27	4.26
	-0.92	0.27	1	0.86	0.07	1	-0.25	-0.92	0.27	4.46
7	0.68	-0.51	-1	0.46	0.26	1	-0.35	-0.68	0.51	4.20
	0.68	-0.51	-1	0.46	0.26	1	-0.35	-0.68	0.51	4.39
	0.68	-0.51	-1	0.46	0.26	1	-0.35	-0.68	0.51	3.96
8	0.68	-0.51	1	0.46	0.26	1	-0.35	0.68	-0.51	5.99
	0.68	-0.51	1	0.46	0.26	1	-0.35	0.68	-0.51	5.07
	0.68	-0.51	1	0.46	0.26	1	-0.35	0.68	-0.51	6.02
9	-1.00	-0.30	-1	1.00	0.09	1	0.30	1.00	0.30	3.47
	-1.00	-0.30	-1	1.00	0.09	1	0.30	1.00	0.30	4.20
10	-1.00	-0.30	1	1.00	0.09	1	0.30	-1.00	-0.30	4.27
	-1.00	-0.30	1	1.00	0.09	1	0.30	-1.00	-0.30	3.70
11	0.43	-1.00	-1	0.18	1.00	1	-0.43	-0.43	1.00	4.22
	0.43	-1.00	-1	0.18	1.00	1	-0.43	-0.43	1.00	5.02
	0.43	-1.00	-1	0.18	1.00	1	-0.43	-0.43	1.00	4.15
12	0.43	-1.00	1	0.18	1.00	1	-0.43	0.43	-1.00	4.79
	0.43	-1.00	1	0.18	1.00	1	-0.43	0.43	-1.00	4.49
13	-0.12	-0.12	0	0.01	0.01	0	0.01	0.00	0.00	4.51
	-0.12	-0.12	0	0.01	0.01	0	0.01	0.00	0.00	3.82

Tabla 31. Estadísticos de la regresión seleccionada (Ecuación 5)

Coefficiente de correlación múltiple	0.829
Coefficiente de determinación R ²	0.687
R ² ajustado	0.520
Error típico	0.433
Observaciones	30

Tabla 32. Análisis de Varianza (ANOVA) de la regresión

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	9	8.628	0.959	5.763	0.001
Residuos	21	3.930	0.187*		
Total	30	12.558			

* $\alpha^2=0.187$

Tabla 33. Coeficientes del modelo (en la Ecuación 5)

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepto	4.218	0.308	13.714	0.000
A	0.513	0.132	3.886	0.001
B	-0.119	0.196	-0.605	0.552
C	0.367	0.089	4.138	0.000
A²	0.000	0.000	65535.000	---
B²	-0.184	0.346	-0.534	0.599
C²	0.190	0.327	0.581	0.567
AB	-0.257	0.458	-0.561	0.581
AC	0.201	0.126	1.600	0.124
BC	0.052	0.160	0.324	0.749

* Los factores cuya probabilidad se encuentra marcada ($p < 0.05$) aportan significativamente a la variable flujo y se incluyen como términos en la ecuación 5.

C.2 DISKETTES

Tabla 34. Codificación de las variables del modelo

A	B	C	D
1.091	13.545	-1.000	0.067
4.651	20.860	1.000	0.268

Tabla 35. Matriz de correlación de las variables del modelo *

	A	B	C	D	A ²	B ²	C ²	D ²	AB	AC	AD	BC	BD	CD
A	1.00													
B	-0.46	1.00												
C	0.05	-0.10	1.00											
D	0.97	-0.62	0.06	1.00										
A ²	-0.34	0.49	-0.07	-0.47	1.00									
B ²	0.01	-0.03	0.00	0.12	-0.53	1.00								
C ²	0.00	0.00	-0.02	0.02	0.47	0.22	1.00							
D ²	-0.08	0.00	-0.01	-0.04	0.42	0.29	0.99	1.00						
AB	0.01	-0.30	0.02	-0.02	0.47	-0.80	-0.16	-0.22	1.00					
AC	-0.09	0.05	-0.14	-0.08	-0.03	0.04	0.01	0.03	-0.10	1.00				
AD	-0.34	0.46	-0.06	-0.44	0.96	-0.36	0.68	0.64	0.28	-0.01	1.00			
BC	0.02	-0.08	-0.18	0.03	0.00	-0.05	-0.02	-0.02	0.09	-0.43	-0.02	1.00		
BD	-0.12	0.01	0.00	-0.22	0.63	-0.91	-0.19	-0.25	0.94	-0.07	0.43	0.06	1.00	
CD	-0.07	0.04	0.00	-0.06	-0.03	0.04	0.02	0.03	-0.09	0.97	0.00	-0.61	-0.07	1.00

* Se muestran los valores de correlación mayores a 0.9 y los factores descartados

Tabla 36. Valores de flujo y de los factores seleccionados según codificación

TTO	A	B	C	A ²	B ²	C ²	AB	AC	BC	FI
1	-0.83	1.00	-1	0.69	1.00	1	-0.83	0.83	-1.00	4.10
	-0.83	1.00	-1	0.69	1.00	1	-0.83	0.83	-1.00	4.18
	-0.83	1.00	-1	0.69	1.00	1	-0.83	0.83	-1.00	4.11
2	-0.83	1.00	1	0.69	1.00	1	-0.83	-0.83	1.00	3.94
	-0.83	1.00	1	0.69	1.00	1	-0.83	-0.83	1.00	3.80
3	1.00	0.11	-1	1.00	0.01	1	0.11	-1.00	-0.11	4.59
	1.00	0.11	-1	1.00	0.01	1	0.11	-1.00	-0.11	4.12
	1.00	0.11	-1	1.00	0.01	1	0.11	-1.00	-0.11	4.09
4	1.00	0.11	1	1.00	0.01	1	0.11	1.00	0.11	4.91
	1.00	0.11	1	1.00	0.01	1	0.11	1.00	0.11	4.66
5	-0.92	0.27	-1	0.86	0.07	1	-0.25	0.92	-0.27	4.29
	-0.92	0.27	-1	0.86	0.07	1	-0.25	0.92	-0.27	3.49
	-0.92	0.27	-1	0.86	0.07	1	-0.25	0.92	-0.27	3.39
6	-0.92	0.27	1	0.86	0.07	1	-0.25	-0.92	0.27	3.82
	-0.92	0.27	1	0.86	0.07	1	-0.25	-0.92	0.27	3.65
7	0.68	-0.51	-1	0.46	0.26	1	-0.35	-0.68	0.51	4.86
	0.68	-0.51	-1	0.46	0.26	1	-0.35	-0.68	0.51	3.91
8	0.68	-0.51	1	0.46	0.26	1	-0.35	0.68	-0.51	3.58
	0.68	-0.51	1	0.46	0.26	1	-0.35	0.68	-0.51	3.93
	0.68	-0.51	1	0.46	0.26	1	-0.35	0.68	-0.51	3.55
9	-1.00	-0.30	-1	1.00	0.09	1	0.30	1.00	0.30	3.84
	-1.00	-0.30	-1	1.00	0.09	1	0.30	1.00	0.30	4.36
	-1.00	-0.30	-1	1.00	0.09	1	0.30	1.00	0.30	3.76
10	-1.00	-0.30	1	1.00	0.09	1	0.30	-1.00	-0.30	4.78
	-1.00	-0.30	1	1.00	0.09	1	0.30	-1.00	-0.30	4.67
	-1.00	-0.30	1	1.00	0.09	1	0.30	-1.00	-0.30	5.05
11	0.43	-1.00	-1	0.18	1.00	1	-0.43	-0.43	1.00	4.65
	0.43	-1.00	-1	0.18	1.00	1	-0.43	-0.43	1.00	4.83
	0.43	-1.00	-1	0.18	1.00	1	-0.43	-0.43	1.00	4.49
12	0.43	-1.00	1	0.18	1.00	1	-0.43	0.43	-1.00	4.25
	0.43	-1.00	1	0.18	1.00	1	-0.43	0.43	-1.00	3.83
	0.43	-1.00	1	0.18	1.00	1	-0.43	0.43	-1.00	4.54
13	-0.12	-0.12	0	0.01	0.01	0	0.01	0.00	0.00	4.62
	-0.12	-0.12	0	0.01	0.01	0	0.01	0.00	0.00	3.94

Tabla 37. Estadísticos de la regresión seleccionada (Ecuación 6)

Coefficiente de correlación múltiple	0.636
Coefficiente de determinación R²	0.404
R² ajustado	0.174
Error típico	0.407
Observaciones	34

Tabla 38. Análisis de Varianza (ANOVA) del modelo

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	9	2.811	0.312	2.121	0.068
Residuos	25	4.141	0.166*		
Total	34	6.952			

* $\alpha^2=0.166$

Tabla 39. Coeficientes del modelo (en la Ecuación 6)

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad*
Intercepción	4.29	0.31	14.05	0.00
A	0.16	0.10	1.52	0.14
B	0.22	0.21	1.04	0.31
C	-0.01	0.08	-0.09	0.93
A²	-0.18	0.36	-0.51	0.61
B²	0.94	0.32	2.90	0.01
C²	0.00	0.00	65535.00	---
AB	1.40	0.47	2.95	0.01
AC	-0.12	0.10	-1.16	0.26
BC	0.01	0.13	0.06	0.95

* Los factores cuya probabilidad se encuentra marcada ($p < 0.05$) aportan significativamente a la variable flujo y se incluyen como términos en la ecuación 6

ANEXO D
FORMATO DE ENCUESTA



ENCUESTA PARA EL DESARROLLO DE UN NUEVO PRODUCTO
MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON
POLÍMEROS

- | | | |
|---|----|----|
| 1. ¿Le interesaría que su producto tenga un aporte ambiental? | SI | NO |
| 2. ¿Utiliza mezclas asfálticas modificadas? | SI | NO |
| 3. ¿Justifica el sobre costo de utilizarlos? | SI | NO |
| 4. ¿Le interesaría contribuir al reciclaje, por medio de la incorporación de plástico en su producto? | SI | NO |
| 5. ¿Haría una inversión para utilizar una mezcla asfáltica modificada con polímeros? | SI | NO |
| 6. ¿Qué espera de un asfalto modificado (condiciones técnicas, de proceso, económicas, otras.)? | | |

- | | | |
|---|----|----|
| 7. ¿Modificaría su proceso de fabricación para emplearlos? | SI | NO |
| 8. ¿Qué cantidad produciría o compraría? | SI | NO |
| 9. ¿Aproximadamente, cuál es su producción de mezcla asfáltica? | SI | NO |

Comentarios:

Empresa

Persona que respondió la encuesta

Cargo

e-mail y/o teléfono
