Universidad de Costa Rica

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil

Evaluación del desempeño de mezclas asfálticas modificadas con PET

Trabajo de Graduación

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

Mauricio Monturiol Arroyo

Director del Proyecto de Graduación:

Ing. José Pablo Aguiar Moya, PhD.

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Costa Rica

Abril, 2019

Ing. José Pablo Aguiar, PhD.

Director del Proyecto de Graduación

Ing. Fabiola Miranda, M.Sc.

Asesora del Proyecto de Graduación

Ing. Ellen Rodríguez

Asesora del Proyecto de Graduación

Mauricio Monturiol Arroyo

Derechos de propiedad intelectual

Fecha: 2019, abril, 15

El suscrito, Mauricio Monturiol Arroyo, cédula 1-1453-0652, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné B04099, manifiesta que es autor del Proyecto Final de Graduación "Evaluación del desempeño de mezclas asfálticas modificadas con PET", bajo la Dirección del PhD. José Pablo Aguiar Moya, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

Nota: De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos Nº 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); "no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales". Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

Reconocimientos

Darle las gracias a Dios por darme salud para terminar esta etapa de mi vida.

A mis padres y hermanos por su apoyo incondicional, consejos y enseñanzas que me han llevado hasta este momento, no sé qué haría sin ustedes.

A Vero por acompañarme durante todo este proceso y ser la persona que más me apoyó y motivó a seguir adelante.

A mis compañeros de carrera en especial a Diego, Mari, Caro y Bryan. Gracias por todas las trasnochadas, historias, alegrías y frustraciones que nos llevaron a ser más que colegas, amigos.

Muchas gracias a mi director José Pablo Aguiar y mis asesoras Ellen Rodríguez y Fabiola Miranda quienes siempre tuvieron la disposición de ayudar y aconsejar a lo largo del proyecto.

A todo el personal del Lanamme por ayudarme en algún momento del proceso, en especial a José Sanabria quien es de las mejores personas que he conocido en mi carrera, siendo además de un excelente profesional un gran amigo.

Dedicatoria

A mis padres por darme amor y mi educación, la mejor herramienta para la vida. Esto es de ustedes.

Índice de Contenido

1. INTRODUCCIÓN 2

1.1 Justificación 2

1.1.1 Problema específico 2

1.1.2 Importancia 3

1.2 Antecedentes teóricos y prácticos del problema 4

1.3 Objetivos 6

1.3.1 Objetivo General 6

1.3.2 Objetivos específicos 6

1.4 Delimitación del problema 6

1.4.1 Alcance 6

1.5 Descripción de la metodología a usar 8

1.5.1 Revisión bibliográfica 9

1.5.2 Desarrollo experimental 9

1.5.3 Análisis de resultados 10

1.5.4 Informe final 11

2. MARCO TEÓRICO 12

2.1 Asfalto 12

2.2 Mezcla asfáltica 12

2.3 Tereftalato de Polietileno (PET) 13

2.4 Asfaltos Modificados 14

2.5 Diseño Superpave 17

2.5.1 Compactador giratorio Superpave 18

2.5.2 Requerimientos de diseño 19

3. ENSAYOS Y EQUIPO PARA ANÁLISIS DE ASFALTOS Y MEZCLAS ASFÁLTICAS 22

3.1 Ensayos en el asfalto y en el PET 22
3.2 Ensayos de mezcla asfáltica 31
4. MÉTODOS DE INCORPORACIÓN 39
4.1 Método Húmedo 40
4.2 Método Seco 46
5. RESULTADOS 48
5.1 Ensayo de espectroscopía infrarroja 48
5.2 Calorimetría de Barrido Diferencial 51
5.3 Análisis termogravimétrico 52
5.4 Asfalto modificado 54
5.4.1 Grado de Desempeño 54
5.4.2 MSCR 56
5.4.3 Barrido de Amplitud Lineal (LAS) 58
5.4.4 Propiedades del ligante asfáltico modificado 61
5.5 Diseño de las mezclas asfálticas 63
5.6 Ensayos a mezcla asfáltica modificada 68
5.6.1 Resistencia Retenida a la Tensión Diametral (RRTD) 68
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 87
6.1 Conclusiones 87
6.2 Recomendaciones 91
7. BIBLIOGRAFÍA 92
8. ANEXOS 96

Índice de Figuras

Figura 1. Esquema metodológico del proyecto 8
Figura 2. Presentaciones del plástico PET en botella. 14
Figura 3. Compactador giratorio Superpave 18
Figura 4**.** Diagrama de los componentes de una mezcla compactada 21
Figura 5. Equipo FTIR-ATR Thermo Nicolet Is50 para análisis infrarrojo 23
Figura 6- Equipo utilizado en prueba de TGA, TA Instruments Q5000IR 24
Figura 7. Equipo utilizado para las pruebas de DSC, TA Q2000 25
Figura 8. Ensayo de recuperación elástica. 25
Figura 9. Ensayo de punto de ablandamiento 26
Figura 10. Equipo utilizado para prueba de viscosidad rotacional. 27
Figura 11. Equipo utilizado para realizar el envejecimiento a corto plazo. 28
Figura 12. Equipo utilizado para realizar el envejecimiento acelerado a presión. 28
Figura 13. Equipo utilizado para realizar el ensayo de MSCR. 29
Figura 14. Esquema de carga para el barrido de amplitud linear 31
Figura 15. Módulo dinámico complejo 32
Figura 16. Representación gráfica del ángulo de fase 33
Figura 17. Equipo utilizado para los ensayos de módulo dinámico y Flow Number. 36
Figura 18. Equipo utilizado para ensayo de Rueda de Hamburgo 37
Figura 19. Equipo utilizado para la falla de tensión diametral. 38
Figura 20. Diagrama de cargas y movimiento de los sujetadores 39
Figura 21. PET utilizado en la primera modificación 40
Figura 22. Equipo modificador de asfalto utilizado 41
Figura 23. Plástico recuperado al final del proceso de modificación 42
Figura 24. Tamaño del plástico molido 42
Figura 25. Partículas de plástico en la mezcla asfáltica 43
Figura 26. Equipo modificador de asfalto grande 44
Figura 27. Asfalto modificado vertido 44
Figura 28. Agregado utilizado para la mezcla 45
Figura 29. Asfalto vertido en la mezcla 45
Figura 30. Mezcla del agregado con el asfalto 45
Figura 31. Mezcla modificada 45

Figura 32. Tamaño del plástico utilizado…… ……. ……47
Figura 33. Inclusión del plástico…… 47
Figura 34. Ensayo de espectroscopía infrarroja 48
Figura 35. Espectro infrarrojo de tereftalato de polietileno 50
Figura 36. Calorimetría de barrido diferencial..... 51
Figura 37. Análisis termogravimétrico del PET..... 53
Figura 38. Comparativa de barrido de amplitud lineal en asfaltos modificados con PET 58
Figura 39. Diseño balanceado según Nf y Jnr3,2 kPa. 60
Figura 40. Granulometría de cada apilamiento. 63
Figura 41. Granulometría para el proyecto..... 64
Figura 42. Granulometría con material de desecho. 65
Figura 43. Comparativa entre carga máxima según método y condición de especímenes..... 70
Figura 44. Diagrama de Black método seco vs control. 74
Figura 45. Diagrama de Black método húmedo vs control. 74
Figura 46. Comparación entre las curvas maestras. 75
Figura 47. Flow Number según método..... 78
Figura 48. Ensayo de vigas de fatiga a 400 ustrains de deformación 80
Figura 49. Ensayo de vigas de fatiga a 600 ustrains de deformación 80
Figura 50. Número de ciclos vs deformación..... 82
Figura 51. Comportamiento del ángulo de fase para 400 ustrains 83
Figura 52. Comportamiento del ángulo de fase para 600 ustrains 83

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Valores mínimos especificados para el VMA 19
Cuadro 2. Requerimientos de Superpave para el VFA..... 20
Cuadro 3. Clasificación por grado de desempeño de acuerdo a ensayo MSCR..... 30
Cuadro 4. Requerimientos estadísticos de calidad de los datos 34
Cuadro 5. Clasificación según Flow Number. 35
Cuadro 6. Diferencia aceptable en ensayo Flow Number. 35
Cuadro 7. Descripción de longitudes de onda del tereftalato de polietileno..... 49
Cuadro 8. Resumen datos de Grado de Desempeño 55
Cuadro 9. Resumen datos de MSCR..... 57
Cuadro 10. Resumen datos de ensayo LAS 59
Cuadro 11. Resumen de propiedades del ligante asfáltico 62
Cuadro 12. Curva granulométrica utilizada en el proyecto 64
Cuadro 13. Resumen de diseño de mezcla para asfaltos modificados y control 66
Cuadro 14. Resumen de prueba de resistencia retenida a la tensión diametral, método húmedo 69
Cuadro 15. ANOVA y comparación por método Tukey, resistencia retenida 72
Cuadro 16. ANOVA y comparación por método Tukey, Módulo Dinámico 76
Cuadro 17. Resultados ensayo de Flow Number 77
Cuadro 18. ANOVA y comparación por método Tukey, Flow Number 79
Cuadro 19. ANOVA y comparación por método Tukey, Fatiga en 4 puntos 84

Monturiol Arroyo, Mauricio
Evaluación del desempeño de una mezcla asfáltica modificada con PET
Proyecto de graduación- Ingeniería Civil-San José, C.R:
M. Monturiol A.,2019
xi, 95, [13]h; ils. col. - 41 refs.

RESUMEN

Ante la cantidad de plástico desechado en el mundo, se identificó la necesidad de buscar soluciones para reciclar y/o reutilizar el material dándole un nuevo uso. Desde el área de la ingeniería civil enfocada en pavimentos, esta se trata del uso de plástico en mezclas asfálticas por lo que el presente trabajo trata acerca de la evaluación del desempeño de mezclas modificadas con plástico PET.

Para ello se revisaron casos de uso de materiales de desecho en mezclas asfálticas a nivel mundial donde se ha demostrado que su implementación altera las propiedades viscoelásticas del asfalto y de desempeño de la mezcla. Además, se llevó a cabo la modificación de dos mezclas asfálticas; una por el llamado método húmedo el cual consiste en añadir el plástico molido al asfalto donde se revuelve por un tiempo determinado hasta homogenizar la mezcla, la cual posteriormente se añade al agregado y el método seco el cual se basa en cambiar parte del agregado fino por plástico, tomando en cuenta la granulometría y la diferencia de densidades.

Para el método húmedo se realizaron algunas pruebas según la clasificación por grado de desempeño a asfaltos modificados con 1, 2,5 y 5% de PET, donde se determinó que de los tres porcentajes el de 2,5% presentaba mejores características para su uso en el resto del proceso de evaluación. A este porcentaje se le realizaron distintas pruebas adicionales para caracterizar el asfalto modificado y compararlo con el asfalto base. En el caso del método seco se decidió usar un 1% de plástico PET en vez del mismo porcentaje de agregado fino proveniente de Río Claro.

A partir de estos métodos de desarrolló el diseño de mezcla asfáltica donde el asfalto modificado mediante el método húmedo utilizó un 6,54% de asfalto sobre la mezcla y el método seco un 6,82%. Una vez definidos los porcentajes a través de los especímenes de diseño y las máximas teóricas se realizaron los especímenes para las pruebas a la mezcla asfáltica cuyos resultados fueron comparados con una mezcla patrón sin modificar.

Con las pruebas realizadas se determinó que el agregado utilizado sufre daño por humedad y que el método seco, a pesar de tener un mayor porcentaje de asfalto, rigidiza la mezcla, volviéndola más resistente a las deformaciones, pero más propensa a fatiga. En caso de ser utilizada se podrían reciclar aproximadamente 150.000 botellas de PET de 330 ml por carril por kilómetro de carretera.

PALABRAS CLAVE: PET, MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA, METODO SECO, METODO HÚMEDO, FATIGA, DAÑO POR HUMEDAD.

Ing. José Pablo Aguiar Moya, Ph. D

Escuela de Ingeniería Civil

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación

1.1.1 Problema específico

Según el (MOPT, 2011) en el Plan Nacional de Transportes de Costa Rica 2011-2035, la Red Vial de Costa Rica, actualmente cuenta con más de 40.000 kilómetros de carretera, de los cuales aproximadamente 10.000 son carreteras pavimentadas y el resto son en lastre. La Red Vial Nacional cuenta con poco más de 7.600 kilómetros de los cuales hay aproximadamente 5.000 pavimentados. Mientras que la Red Vial Cantonal se estima en 32.000 de los que las rutas con lastre se aproximan a los 27.000 kilómetros y las pavimentadas son 5.000.

Los pavimentos, por lo tanto, representan un factor importante en el transporte seguro, eficiente y confortable de personas, bienes y servicios en Costa Rica. Al estar constantemente sometidos a cargas y condiciones climatológicas adversas, estos sufren deformaciones, fisuras y daños por humedad los cuales pueden poner en riesgo su funcionamiento. Es por ello que la mezcla asfáltica utilizada debe de cumplir con los requisitos pertinentes, los cuales varían dependiendo de factores climatológicos y demanda de carga del tránsito.

En Costa Rica, el ente encargado de la compra y distribución de los ligantes asfálticos es la Refinadora Costarricense de Petróleo S.A (RECOPE). Según (LanammeUCR, 2015), se necesitan como mínimo 3 tipos distintos de ligantes asfálticos para cumplir con la demanda del país, sin embargo, actualmente RECOPE solamente distribuye un tipo de ligante asfáltico. Esto obliga a la modificación de las mezclas asfálticas con aditivos y polímeros para cumplir con los requisitos según el lugar en dónde será colocado el pavimento, aumentando así los costos de producción entre un 60% y un 150% (Coomarasamy, 1998). Cuando se trata de proyectos de alta demanda esta situación se vuelve aún más crítica, necesitando una mayor inversión para la implementación de una mezcla asfáltica adecuada. Esto dado que el proceso de modificación de asfalto significa un costo adicional.

El constante aumento en la producción de plásticos a nivel global y la falta de reciclaje han provocado un incremento en la cantidad de residuos sólidos en todo el mundo. Esto lleva a la necesidad de crear alternativas viables de reciclaje para aminorar el daño ambiental producido.

Es por ello que desde todo ámbito se debe de ayudar a reducir la contaminación procedente de productos no reciclados. Desde la ingeniería civil, se deben de tratar de modificar y adaptar las técnicas de construcción y diseño para lograr reducir la cantidad de desechos producidos y aumentar los reciclados.

El presente trabajo pretende aportar conocimientos acerca de la incorporación de materiales reciclados, específicamente el plástico PET (tereftalato de polietileno), utilizado en la fabricación de botellas, en mezclas asfálticas, con el fin de obtener una mezcla de mejores características de desempeño que se pueda utilizar en distintos tipos de climas y demanda, reduciendo el uso de aditivos y costos de fabricación del pavimento y aumentando el reciclaje de plástico.

1.1.2 Importancia

Como se mencionó anteriormente como parte del problema, los pavimentos en Costa Rica se ven afectados tanto por las condiciones climatológicas como por la demanda de flujo vehicular que debe resistir. Dada la falta de variedad de asfaltos disponibles a nivel nacional, se debe de modificar el único tipo de ligante en el mercado para cumplir con la demanda por zona en el país y las cargas que deben de soportar los pavimentos, el PG 64-22 (AC-30). Lo anterior en conjunto con cambios de granulometría, tipos de agregados, aditivos y dosificaciones permite desarrollar mezclas asfálticas que cumplan con los requisitos de desempeño requeridos para la red vial.

Por tanto, como se mencionó anteriormente, la modificación de mezclas asfálticas se vuelve una necesidad que representa un gasto adicional el cual se podría evitar o disminuir con la implementación de nuevas mezclas con materiales considerados de desecho. Estos presentan propiedades que pueden beneficiar a las mezclas asfálticas, reduciendo los costos de producción y mejorando las propiedades y por ende el desempeño. Materiales como las llantas de los vehículos, las bolsas para protección de racimos de bananos, "bumpers" de automóviles o las botellas de plástico son solo algunos de los posibles materiales con los que se han hecho estudios al respecto (Aguiar Moya, y otros, s.f.).

Paralelo a ello, la creciente oferta de plástico provoca la necesidad de implementar maneras de reutilizar, reciclar y disminuir el consumo del mismo. Esto, acompañado de otros motivos ambientales, llevó a Costa Rica en el 2007 a proponer la meta de carbono neutralidad para el

año 2021, sin embargo, el país presenta el desafío de optimizar sus políticas de reciclaje y reutilización de desechos, así como involucrar más a las instituciones en el proceso. (Granados, 2013).

Es a partir de esto que se da la necesidad de dar un enfoque de sostenibilidad en las prácticas ingenieriles, donde el ingeniero civil debería de dirigir sus esfuerzos a la creación de soluciones que implementen políticas de reciclaje y reutilización de materiales que bajo otras circunstancias terminarían contaminando el ambiente.

1.2 Antecedentes teóricos y prácticos del problema

La modificación de asfaltos es una práctica que se ha desarrollado desde hace bastante tiempo. Como lo explica el químico Jorge Salazar Delgado, en su informe "Evaluación de la factibilidad del uso en Costa Rica de polímeros modificantes de asfalto incorporados en planta":

"… *de acuerdo al artículo de King, et al, en 1843 fueron concedidas patentes para modificar asfalto con polímeros naturales y sintéticos. Proyectos piloto se pusieron en marcha en Europa, a principios de los años treinta. En Norteamérica, polímeros fueron introducidos en los años cincuenta y encontraron un mercado pequeño pero constante. Al pasar de los años el uso de los polímeros aumento, especialmente después de la introducción y desarrollo de Autopistas (Strategic Highway Research Program, SHRP), a partir del cual se desarrollaron especificaciones de ligantes asfalticos Superpave Performance Graded (PG) a principios de los años noventa en los EE.UU.*

Dentro de estas, no tan nuevas tendencias en el diseño y construcción, de pavimentos asfálticos se encuentra el uso de sustancias químicas llamadas modificadores, que en su gran mayoría son polímeros o sustancias inertes que combinados químicamente con el asfalto tienen la propiedad de generar un "asfalto modificado" el cual cuenta con propiedades "mejoradas" según las necesidades de servicio, la gran ventaja generalmente es la relación de vida útil contra el costo de inversión del producto final."

La incorporación de materiales reciclados en estructuras es un tema relativamente reciente a nivel mundial, en la mayoría de países se cuentan con pocos estudios y algunas iniciativas como el caso de Holanda con el proyecto de construcción de carreteras hechas de plástico, Colombia y Brasil utilizando llantas en sus mezclas asfálticas o España, a través del proyecto

Polymix el cual trata acerca de la demostración a escala real de nuevas mezclas asfálticas ecológicas modificadas con residuos poliméricos.

En Costa Rica, se realizó un informe respecto a concreto reforzado con fibras de vidrio para uso en losas de pavimento (Sanchez, 2017). En donde se encontró que las fibras hacen que se pierda resistencia a la compresión, pero incrementan la capacidad a flexión de la losa.

Además, Cruz y Porras, en el 2015 investigaron acerca del efecto de materiales de desecho en el comportamiento de la mezcla asfáltica, como trabajo final de graduación. En donde se comparan los efectos de adicionar partículas de parachoques de vehículos y polipropileno a mezclas asfálticas para determinar los cambios en las propiedades de la mezcla.

También, en los últimos años, el Lanamme ha realizado investigaciones, tanto con estos 2 materiales como con poliestireno expandido, bolsas de plásticos de banano y llantas de vehículos. En el informe: "*Use of Waste Products as Bitumen Modifiers in Costa Rica"* realizado por Aguiar y Loría en el 2013, se efectuaron pruebas a los asfaltos modificados con los materiales descritos anteriormente, en donde se observó una reducción en la deformación permanente y un aumento del rango de temperatura a las cual se pueden aplicar los asfaltos, por lo cual se determinó que tanto el estereofón, como el caucho y el polietileno pueden ser utilizados en vías con alto tráfico vehicular.

A pesar de las investigaciones realizadas por el Lanamme, a nivel nacional, no existen investigaciones respecto al uso de plástico PET en mezclas asfálticas, con la excepción de las realizadas por el mismo Lanamme. Es por lo tanto que las pruebas a una mezcla asfáltica con este material se esperan que amplíen los conocimientos respecto al tema, de pie a futuras investigaciones y el desarrollo de una mezcla asfáltica con un desempeño mejorado y a un menor costo de producción.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Evaluar el desempeño de dos mezclas asfálticas modificadas con tereftalato de polietileno mediante distintos métodos de incorporación, para realizar una comparación entre éstas y una mezcla sin modificar.

1.3.2 Objetivos específicos

- Definir las condiciones de incorporación del PET al asfalto que facilite la adecuada incorporación del mismo
- Determinar el porcentaje óptimo de PET en el asfalto para garantizar el correcto desempeño del material.
- Analizar las propiedades químicas y termodinámicas del PET para asegurar su aporte mecánico al asfalto.
- Preparar una mezcla asfáltica convencional de uso en Costa Rica sin modificantes.
- Preparar dos mezclas asfálticas modificadas con PET mediante distintos métodos de incorporación del mismo.
- Comparar las mezclas asfálticas modificadas con PET y la convencional para identificar el cambio en el desempeño entre mezclas.

1.4 Delimitación del problema

1.4.1 Alcance

El proyecto tiene como alcance la comparación del desempeño de muestras de mezclas asfálticas modificadas con PET contra una sin modificar. Esto mediante la realización de los ensayos correspondientes, para una forma determinada y distintos porcentajes de incorporación del polímero para las mezclas modificadas. El proyecto tiene como proyecciones la continuación en temas de investigación respecto a mezclas asfálticas modificadas con plástico PET y su posible implementación en carreteras de Costa Rica.

Las condiciones a las que se realizarán las pruebas serán las mismas para todos los ensayos (temperatura, humedad) además de que se utilizarán agregados de la misma procedencia y con la misma curva granulométrica para todos los casos. También, se dependerá de la disponibilidad de equipos en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, ubicado en San Pedro, lugar donde se desarrollarán todos los ensayos.

1.4.2 Limitaciones

Al ser la Refinería Costarricense de Petróleo la única distribuidora de ligantes asfálticos y sólo ofrecer un solo tipo de ligante asfáltico, el proyecto se realizará con este ligante (PG 64-22), por lo cual los resultados sólo aplicarán para este tipo y se dependerá de la disponibilidad del mismo.

Además, las condiciones en las que se modifica el asfalto son dependientes del equipo utilizado, siendo este distinto al equipo utilizado en planta. Es por ello que parámetros como cambios de temperatura, mezcla y funcionamiento de los equipos pueden producir cambios entre los resultados obtenidos en el laboratorio con los de una planta modificadora de asfalto.

1.5 Descripción de la metodología a usar

La metodología a seguir para la elaboración del proyecto propuesto se muestra en la Figura 1.

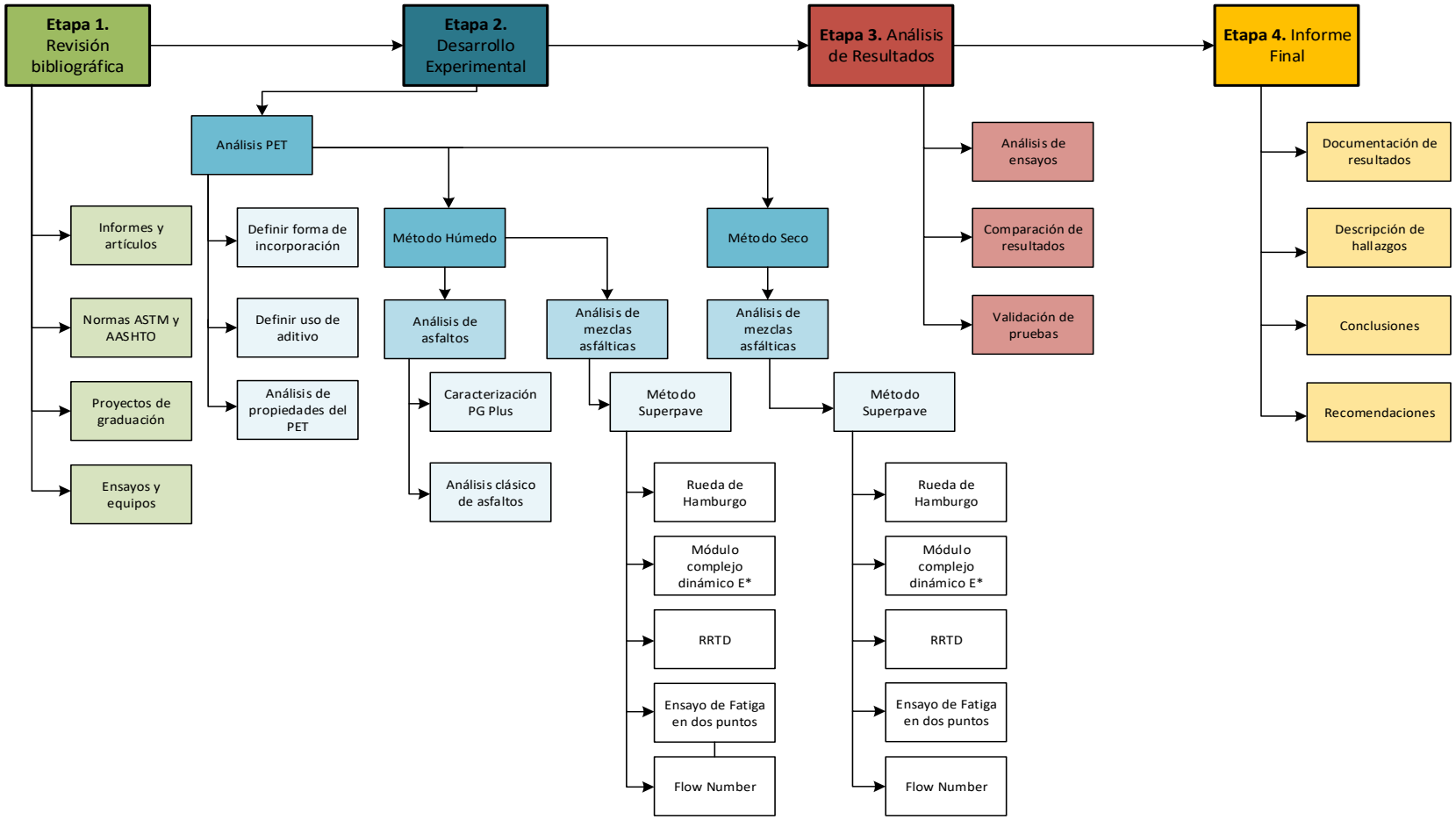

Figura 1. Esquema metodológico del proyecto

1.5.1 Revisión bibliográfica

El proyecto comienza con una extensa revisión bibliográfica para conocer acerca de los temas relacionados e implementaciones que se han realizado en otros países, proyectos de investigación y artículos. Se deben conocer y definir los conceptos básicos a utilizar: tereftalato de polietileno (PET, por sus siglas en inglés), mezclas asfálticas modificadas, los ensayos a realizar y los equipos a utilizar son algunos de los conocimientos básicos que se debieron de tener dominados para dar inicio a la elaboración de ensayos. Posteriormente se revisaron las normas actuales relacionadas con el objeto de estudio, dentro de las cuales se destacan las normas ASTM y AASHTO. Las normas que apliquen se estudiaron y así, se procedió a describir las pruebas asociadas y el equipo necesitado.

1.5.2 Desarrollo experimental

En esta etapa se inicia con la preparación de las muestras que son sometidas a ensayos. Para ello, primeramente, se realizaron análisis al PET para definir tanto su forma de incorporación (para ambos métodos), como sus propiedades químicas y termodinámicas. Se realizó además el análisis químico para saber la composición del material mediante espectometría infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), el análisis termo gravimétrico (TGA, por sus siglas en inglés) y pruebas para determinar su punto de fusión y cristalización mediante el calorímetro de escaneo diferencial (DSC, por sus siglas en inglés).

Además, se definió el uso o no de aditivo y los porcentajes de incorporación del PET y del aditivo promotor de incorporación (en caso de utilizar) para hallar la combinación óptima de ellos.

Para el caso del método húmedo, se llevaron a cabo pruebas para tres porcentajes distintos de PET, donde el contenido óptimo fue el que garantizó el mejor balance de resistencia a la deformación y a la fatiga, características que fueron obtenidas a partir de los ensayos al asfalto modificado mediante los ensayos de la clasificación PG Plus y el ensayo de LAS (Barrido lineal de amplitud, por sus siglas en inglés), buscando además obtener una buena trabajabilidad. Adicionalmente, se hizo el mismo análisis al asfalto sin modificar para así, utilizarla de referencia.

Una vez definido el porcentaje de plástico, se realizaron ensayos adicionales al asfalto modificado (además de los previamente mencionados) para tener una mejor caracterización

del ligante. Los ensayos realizados fueron: Recuperación elástica por torsión, punto de ablandamiento, viscosidad cinemática, viscosidad a 60°C y reómetro de viga a flexión (BBR).

Además, se evaluó la mezcla asfáltica modificada con PET y se comparó con la mezcla convencional. Para realizar esto, se hicieron las pruebas de diseño y máximas teóricas con distintos porcentajes de asfalto hasta obtener un porcentaje de vacío cercano al 4%. Al obtener este porcentaje se procedió con la elaboración de los especímenes para realizar los ensayos de de desempeño. Estos ensayos fueron: módulo dinámico, Flow Number, HWDT o Rueda de Hamburgo, Resistencia Retenida a la Tensión Diametral (RRTD) y el ensayo de fatiga de viga en dos puntos, mencionados previamente.

Paralelamente al método húmedo se realizó el método seco, el cual se basa en la utilización de un asfalto original y en la sustitución de parte del agregado fino con plástico. También se definieron el porcentaje a utilizar y el tamaño de las partículas del PET para así determinar cuál apilamiento del agregado tendría un porcentaje sustituido por el plástico.

Una vez definidos estos parámetros se procedió a realizar el mismo procedimiento de descrito previamente en el método húmedo, tomando en consideración que tanto el porcentaje de asfalto, como otros parámetros explicados posteriormente, afectan de manera directa la elaboración de la mezcla y el desempeño del pavimento modificado.

1.5.3 Análisis de resultados

En la etapa de análisis de resultados inicialmente se estudiaron las características químicas y termodinámicas del tereftalato de polietileno obtenidas en los primeros ensayos. Seguidamente se analizaron los resultados de los ensayos reológicos realizados según la clasificación por grado de desempeño (PG) establecidos en la metodología de diseño Superpave para cada uno de los distintos porcentajes de dosificación del material de desecho.

Posteriormente, se procedió a realizar una comparación entre las mezclas asfálticas obtenidas para los distintos métodos de incorporación y la mezcla original de Costa Rica de 12,5 mm sin modificar. Esto con el fin de determinar si las mezclas modificadas con PET presentan un cambio en el desempeño respecto a la original.

Además, una vez establecidas las características de la nueva mezcla asfáltica se realizó un análisis acerca de su posible validación, este dependiente de las condiciones climatológicas y la demanda por flujo vehicular.

1.5.4 Informe final

Finalmente, a partir del análisis presentado, se redactó el informe final el cual incluye una serie de conclusiones y recomendaciones respecto a la adición de tereftalato de polietileno a mezclas asfálticas.

Una vez concluido el informe final se procedió a la elaboración de la presentación de la defensa pública donde el proyecto se dio por concluido.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Asfalto

El asfalto es un hidrocarburo pesado producto del residuo de destilación del petróleo. El proceso de destilación puede ocurrir de forma natural o bien en una refinería de petróleo. En Costa Rica, el ente encargado de la distribución del asfalto es la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE). El asfalto presenta características físicas que lo diferencian de otros compuestos, tal es el caso de la viscoelasticidad, lo que significa que el material tiene las propiedades elásticas de los sólidos y el comportamiento viscoso de un líquido (Huang, 2004). Un material elástico es el que tiene propiedades que le permiten recuperar su forma inicial, cuando es deformado, mientras que el material viscoso tiene la particularidad de que fluye y su deformación depende del tiempo.

A partir de los años 90, se implementó el sistema de clasificación por desempeño, Superpave. Esta clasificación tiene como objetivo asignar a cada tipo de ligante asfáltico una identificación para su uso adecuado según las condiciones en sitio de acuerdo al estudio de los materiales de manera independiente y combinada, evaluando así los parámetros de desempeño de la mezcla. Para esto, en el asfalto se realizan ensayos para determinar las características reológicas y las variaciones según la temperatura. Se usan ensayos de acondicionamiento que se explican más adelante. La clasificación por grado de desempeño se reporta usando dos números (PG XX-YY), donde el primero (XX) corresponde a la temperatura máxima promedio de siete días en el lugar de colocación del pavimento y el segundo (YY) es la temperatura mínima que se espera en el pavimento (Federal Highway Administration, 2002). A partir de esta clasificación, es posible especificar ligantes asfálticos adecuados para las diferentes situaciones climáticas que se puedan presentar.

2.2 Mezcla asfáltica

La mezcla asfáltica de concreto asfáltico es un material elaborado mediante la combinación y distribución de un ligante asfáltico, un agregado mineral y en algunos casos, modificantes o aditivos para el ligante y para el agregado. El ligante asfáltico puede ser un cemento asfáltico o un cemento asfáltico modificado, el cual aglutina las partículas de agregado en una masa cohesiva, además al ser éste impermeable al agua, restringe la permeabilidad del concreto asfáltico cuando ha sido apropiadamente densificado. El agregado por su parte forma un

esqueleto pétreo que aporta resistencia y rigidez. Los posibles aditivos que se agreguen pueden variar una o varias propiedades físico-mecánicas de la mezcla asfáltica, de acuerdo con las necesidades que se requieran para las condiciones de cada proyecto. Para su uso estructural es sometida a un proceso de compactación, que permite optimizar la fricción del esqueleto granulométrico y la impermeabilidad de la mezcla asfáltica.

El desempeño de la mezcla asfáltica está determinado por las proporciones que se apliquen de agregado, ligante asfáltico, aire y posibles aditivos; por lo que el diseño, producción y colocación de este debe tener el objeto de ciertas propiedades físicas y volumétricas.

Según el proceso de elaboración, las mezclas asfálticas se clasifican como mezclas asfálticas en caliente (ligante asfáltico aplicado en caliente) o mezclas asfálticas en frío (ligante asfáltico aplicado como emulsión asfáltica). En este proyecto se estudiaron únicamente las mezclas en caliente.

2.3 Tereftalato de Polietileno (PET)

Es conocido popularmente por sus siglas en inglés PET (polyethylene terephtalate). Es un polímero termoplástico, lo cual indica que puede ser procesado mediante presión y/o calor. Dentro de sus características más relevantes se destaca su resistencia, transparencia, impermeabilidad, peso, no toxicidad y durabilidad; características que se mantienen luego de ser reciclado.

Dentro de sus principales usos se encuentran la utilización en la industria textil como materia prima del poliéster, envases de bebidas gaseosas, jugos, aceites, comestibles, bandejas, artículos de farmacia, medicamentos, etc.

Es un producto altamente reciclable, desde el punto de vista mecánico y químico. Esto representa una gran ventaja ya que es un producto resistente a la biodegradación dada su alta cristalinidad. Sin embargo, puede ser degradado químicamente, tomando en cuenta sus propiedades física y mecánicas. (Abdelaal, 2008)

Figura 2. Presentaciones del plástico PET en botella.

Fuente: (Plastic Technologies Institute, 2019)

2.4 Asfaltos Modificados

Los asfaltos modificados surgieron con la necesidad de mejorar las propiedades reológicas y químicas de las mezclas asfálticas. Esto dado a que antes los asfaltos sin modificar cumplían con las expectativas, sin embargo, con el incremento de volumen de tránsito, los cambios climatológicos y la presencia de vehículos más pesados, se han tenido que modificar las mezclas para cumplir con la vida útil esperada.

Para ello se utilizan aditivos químicos o "modificadores" que consisten en su mayoría de polímeros o sustancias inertes capaces de mejorar las características del asfalto.

Según estudios del Lanamme y de diversos autores, los asfaltos modificados con polímeros pueden elevar la vida útil de un pavimento de dos a tres veces (según el caso a aplicar), esto por un costo adicional de 25% sobre el costo de la mezcla asfáltica sin modificar, esto dado al costo asociado al polímero y a que la modificación es un proceso adicional con condiciones específicas para cada modificante, sin embargo, a mediano y largo plazo la inversión resulta favorable.

La modificación de asfaltos con polímeros es la norma a nivel mundial para el mejoramiento de la infraestructura vial. Para comprenderla primeramente se debe definir qué es un polímero.

Los polímeros son sustancias de alto peso molecular formados por la unión de cientos o miles de moléculas pequeñas llamadas monómeros (compuestos químicos con moléculas simples).

Se forman así moléculas más grandes que pueden tomar diversas formas: cadenas en forma de escalera, cadenas largas y sueltas, arreglos tridimensionales, etc."

El Centro Nacional para la Tecnología del Asfalto (NCAT por sus siglas en inglés) publicó una lista de razones por las cuales se pueden emplear polímeros en la modificación de mezclas asfálticas. Entre esas razones se encuentran:

- Disminuir la susceptibilidad térmica.
- Aumentar la cohesión interna.
- Mejorar la elasticidad y flexibilidad a bajas temperaturas.
- Mejorar el comportamiento a fatiga.
- Aumentar la durabilidad y resistencia al envejecimiento.
- Incrementar la resistencia al ahuellamiento.
- Mejorar la adherencia entre el asfalto y el agregado.

Además, el NCAT determina que hay dos tipos de polímeros que han dado buenos resultados. Estos se tratan de los homopolímeros, conformados por una sola unidad estructural, y los copolímeros, los cuales constan de varias unidades estructurales y diversas combinaciones de estas. Entre estos últimos se encuentran los:

- Plastómeros: Aquellos que al estirarlos se sobrepasa la tensión de fluencia, por lo tanto, no vuelven a su longitud original. Tienen deformaciones pseudoplásticas con poca elasticidad. Algunos de ellos son:
    - EVA: etileno-acetato de vinilo.
    - PE (Polietileno): el cual tiene buena resistencia a la tracción y buena resistencia térmica, además de buen comportamiento a bajas temperaturas.
    - PP: Polipropileno.
- Elastómeros: son aquellos que, al estirarse, regresan a su posición original. Dentro de ellos se pueden mencionar algunos, tales como:
    - Naturales: como el caso del caucho natural, celulosa, ceras y arcillas.
    - SBS (Estireno-butadieno-estireno): Es el más utilizado para modificar asfaltos ya que tiene el mejor comportamiento durante la vida útil de la mezcla asfáltica.

    - EPDM (polopropileno atáctico): el cual es muy flexible, resistente al calor y a los agentes químicos.
- Termoendurecibles: tienen a nivel molecular muchos enlaces transversales que impiden que puedan volver a ablandarse al calentarse nuevamente. Ejemplo de ellas son las resinas epóxicas. Aun cuando su uso es factible, representan un gran costo.

Los polímeros modificadores de mezclas asfálticas se dividen en 3 tipos dependiendo de las funciones que se quieran mejorar, por ejemplo, los Tipo I mejoran el comportamiento de las mezclas asfálticas tanto a altas como a bajas temperaturas. Los Tipo II mejoran el comportamiento de mezclas asfálticas a bajas temperaturas y los Tipo III mejoran la resistencia a las roderas de las mezclas asfálticas, disminuye la susceptibilidad térmica del cemento asfáltico y mejora su comportamiento a altas temperaturas. No importa el polímero que sea, al agregarse a una mezcla, el principal efecto es el cambio en la relación viscosidad-temperatura (Salazar, Evaluación de la factibilidad del uso en Costa Rica de polímeros modificantes de asfalto incorporados en planta, 2008)

A la hora de realizar el proceso de modificación de asfaltos se deben de tomar en cuenta:

- La temperatura de dispersión y mezclado: es de los aspectos más importantes a considerar ya que determina la incorporación del polímero al asfalto. Entre más líquido, se facilita más.
- El esfuerzo de corte ejercido: dependen de los equipos utilizados por su velocidad y temperatura.
- La fracción de asfaltos presentes: La viscosidad y propiedades reológicas de la mezcla dependerán de la relación asfalto-polímero.
- La aromaticidad de la fase malténica en el asfalto base: juega un papel importante en la viscosidad final del asfalto y su producción.

Además, según (Salazar, Evaluación de la factibilidad del uso en Costa Rica de polímeros modificantes de asfalto incorporados en planta, 2008) a la hora de realizar la modificación del asfalto hay una serie de parámetros que van a influir en el proceso de elaboración de la mezcla. Estos se pueden definir como:

- Naturaleza química del polímero modificador.

- Forma física en condiciones de trabajo del polímero.
- Naturaleza y grado del asfalto.
- Tipo de equipo.
- Perfil del tiempo-temperatura durante la mezcla.

Dos de las características más importantes que van a determinar el comportamiento de la mezcla son la forma física en la que se incorpora el polímero y el tamaño de las partículas. Según Salazar, 2008. Para que la dispersión del polímero sea efectiva, practica y económica, se debe cumplir lo siguiente:

- Costo adecuado.
- Debe ser disponible por volumen por el fabricante.
- Tener afinidad química con el asfalto.
- Ser resistente a las temperaturas de trabajo.
- Mejorar la resistencia al fluir.

El asfalto modificado debe presentar las siguientes características finales:

- Mantener sus propiedades físicas y químicas durante el almacenamiento, aplicación y servicio.
- Capaz de ser procesado por medios convencionales.
- Lograr una viscosidad de manipulación adecuada a temperaturas normales de trabajo.

Para lograr una efectiva modificación es recomendable conocer de primera entrada las propiedades químicas y termodinámicas del polímero. Además, se deben de realizar una serie de ensayos de laboratorio, en este caso basándose en el método de diseño de SUPERPAVE, para diseñar, evaluar y clasificar la mezcla obtenida. A continuación, se comentan brevemente los ensayos a realizar.

2.5 Diseño Superpave

El diseño Superpave se inició en 1987 por el SHRP (*Strategic Highway Research Program*). SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavement) fue creado como un nuevo método de diseño de pavimentos donde se contemplan mejoras en la selección de materiales con pruebas específicas al asfalto, a los agregados, establece distintos parámetros de diseño de la mezcla

asfáltica y su análisis, además de tratar de predecir el desempeño de los pavimentos incluyendo nuevos equipos de ensayos. (Federal Highway Administration, 1995)

En el caso de los asfaltos, las pruebas se analizan las propiedades reológicas del asfalto original y envejecido en laboratorio, cambiando las condiciones de la simulación del envejecimiento a corto plazo y agregando una simulación envejecimiento a largo plazo.

2.5.1 Compactador giratorio Superpave

Una de las diferencias más notables entre el método de diseño Marshall y el Superpave es el modo de compactar los especímenes de prueba. Mientras que uno se enfoca en su compactación a partir de golpes, el compactador giratorio Superpave (SGC) se basa en la compactación a partir de amasado, esto con el fin de simular las condiciones reales de compactación en campo.

El SGC usa un molde con un diámetro interno de 150 mm y una altura nominal de 250 mm donde se coloca la mezcla suelta a la temperatura de compactación. Un plato de base se ajusta en el fondo del molde para lograr el confinamiento durante la compactación. El molde es ubicado en el compactador y centrado bajo un pistón que ejerce una presión de 600 kPa (± 18 kPa). El molde se inclina hasta alcanzar un ángulo de giro de 1,23° (± 0,02°) y la compactación empieza, la cual se puede realizar ya sea por número de giros o por altura. (AASHTO PP 60-14, s.f.)

Figura 3. Compactador giratorio Superpave

2.5.2 Requerimientos de diseño

Superpave establece valores específicos para parámetros como volumetría y proporción polvo asfalto como requerimientos para el diseño de mezclas asfálticas.

Entre los parámetros volumétricos establecidos según la FHA de Estados Unidos, se establece:

- Vacíos de aire (VA): el contenido de vacíos de aire es una propiedad importante, ya que es utilizada como la base para la selección del contenido de asfalto. El contenido de VA de diseño debe ser igual a un 4%.
- Vacíos del agregado mineral (VMA): Corresponde a la suma del volumen de los vacíos de aire y del ligante efectivo (asfalto no absorbido) en una muestra compactada. Representa el espacio intergranular ocupado por el asfalto y el aire, es decir, los vacíos entre las partículas del agregado. Para un porcentaje de diseño de VA de 4%, los valores mínimos especificados para el VMA son una función del tamaño máximo nominal del agregado, como se muestra en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Valores mínimos especificados para el VMA

Tamaño máximo nominal (mm)	**VMA mínimo (%)**
9,5 mm	15,0
12,5 mm	14,0
19 mm	13,0
25 mm	12,0
37,5 mm	11,0

Fuente: (Federal Highway Administration, 1995)

- Vacíos llenos con asfalto (VFA): Es el volumen del ligante asfáltico efectivo expresado como un porcentaje del VMA. El rango aceptable del VFA de diseño para 4% de vacíos de aire es una función del nivel de tránsito (Cuadro 2).

Cuadro 2. Requerimientos de Superpave para el VFA

Tránsito (ESALs)	VFA de diseño (%)
$< 3x10^5$	70-80
$< 1x10^6$	65-78
$< 3x10^6$	65-78
$< 1x10^7$	65-75
$< 3x10^7$	65-75
$< 1x10^8$	65-75
$< 3x10^8$	65-75

Fuente: (Federal Highway Administration, 1995)

- Relación Polvo Asfalto (DP): Otro requerimiento de la mezcla es la proporción de polvo, la cual debe estar en un rango de 0,8 a 1,6 para todas las mezclas, según se establece en CR-2010. Se calcula como la relación entre el peso del agregado más fino que el tamiz 0,075 mm y el contenido de asfalto efectivo.

La Figura 4 contiene el diagrama de los componentes de una mezcla asfáltica compactada donde además de los parámetros volumétricos anteriormente explicados, se muestra el volumen de asfalto efectivo y el absorbido.

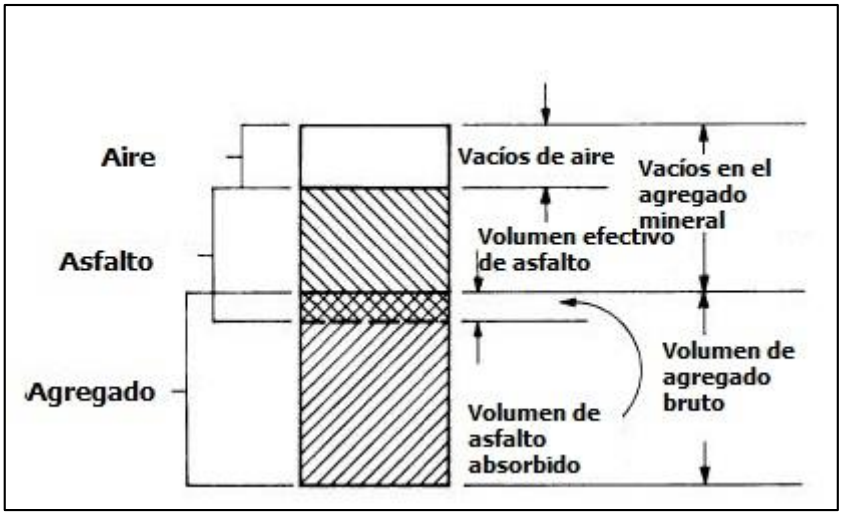

Figura 4**.** Diagrama de los componentes de una mezcla compactada
Fuente: Fuente: (Federal Highway Administration, 1995)

Para la obtención de los parámetros mencionados anteriormente, es necesario determinar también características de la mezcla como su gravedad específica máxima teórica y la gravedad específica bruta de los especímenes compactados:

- Gravedad específica máxima teórica (G_{mm}): Se define como la relación entre el peso de un volumen dado de mezcla asfáltica sin vacíos de aire y la masa de igual volumen de agua, ambos a la misma temperatura.

Gravedad específica bruta (G_{bs}): Es la relación entre el peso de un dado volumen de mezcla asfáltica compactada (incluyendo los vacíos de aire) y el peso de igual volumen de agua, ambos a la misma temperatura.

3. ENSAYOS Y EQUIPO PARA ANÁLISIS DE ASFALTOS Y MEZCLAS ASFÁLTICAS

Para determinar las características, tanto de los materiales como de la mezcla asfáltica realizada, se deben de realizar una serie de ensayos. En lo referente a la caracterización del ligante asfáltico en su estado original, el aditivo modificante, así como el asfalto modificado, se resaltan los siguientes ensayos:

3.1 Ensayos en el asfalto y en el PET

Ensayo de espectroscopia infrarroja (FTIR)

El ensayo es una herramienta útil para la determinar composición química de los materiales individuales y de la mezcla asfalto-polímero, así como el efecto de los acondicionamientos requeridos en la clasificación del asfalto. (Salazar, 2013),

Esto se realiza a partir de que las moléculas absorben la energía de la luz láser infrarroja (IR) en longitudes de onda que varían entre los 400 cm^{-1} y 4000 cm^{-1}. Los enlaces químicos presentes en el material estudiado tienen frecuencias de vibración específicas lo que permite su distinción e identificación.

Es entonces mediante el ensayo de espectroscopia infrarroja que se puede identificar la composición química del material en estudio, siendo esto de gran importancia en la modificación de asfaltos para determinar la calidad del mismo y así poder predecir su afectación en el desempeño del asfalto. (Salazar, 2013)

En la Figura 5 se observa el equipo utilizado para el análisis FTIR.

Figura 5. Equipo FTIR-ATR Thermo Nicolet Is50 para análisis infrarrojo

Análisis termo gravimétrico (Termo gravimetric Analysis, TGA)

Los análisis termogravimétricos han sido utilizados para el estudio de las reacciones primarias en la descomposición de materiales sólidos y líquidos. Con la termogravimetría se analizan procesos de desorción, adsorción y reacciones de descomposición en un ambiente de gas inerte o en presencia de oxígeno (Fraga Grueiro, 2001)

Según (Rodriguez & Villegas, 2012), el análisis termogravimétrico consiste en el registro continuo de la variación de la masa del material en estudio conforme se varía la temperatura a una tasa térmica constante (cambio de temperatura lineal). Este tipo de procedimiento termogravimétrico se conoce como análisis dinámico. Existe la opción de hacer un análisis termogravimétrico isotérmico, en el cual se mantiene la temperatura constante por un periodo establecido.

Como resultado del análisis termogravimétrico se obtienen los datos de cambio de masa con respecto a la temperatura o al tiempo y un termograma, el cual representa gráficamente las variaciones porcentuales de la masa. (Rodriguez & Villegas, 2012)

El equipo utilizado en el proyecto de investigación se observa en la Figura 6.

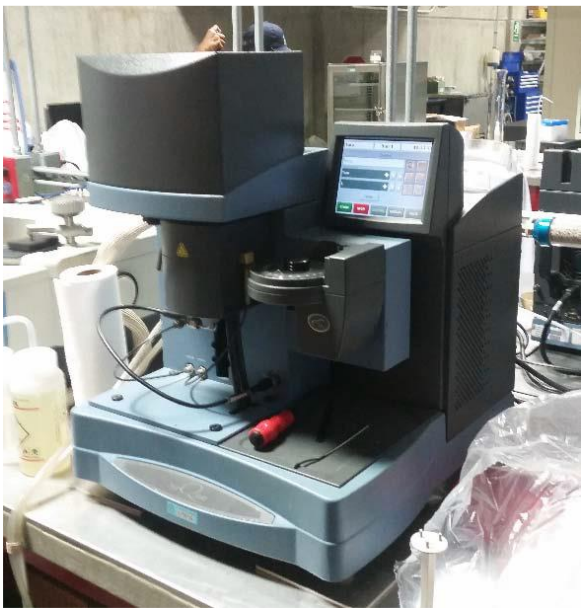

Figura 6- Equipo utilizado en prueba de TGA, TA Instruments Q5000IR

Calorimetría de barrido diferencial (Differential Scanning Calorimetry, DSC)

Permite determinar la cantidad de calor que absorbe o libera una sustancia cuando se mantiene a una temperatura constante durante un tiempo determinado. Además, establece las temperaturas a las cuales el material presenta transiciones térmicas de primer orden (fusión y cristalización) y las de segundo orden (transición vítrea). (Elseifi et al., 2010; Daly et al., 2010)

La prueba consiste en someter el material a procesos de calentamiento o enfriamiento constante para así obtener la variación de flujo de calor en función de la temperatura.

A partir de esta prueba se obtiene la temperatura o punto de cristalización, la cual ocurre cuando el material se transforma en un líquido viscoso o sólido amorfo (con moléculas en un arreglo desordenado), y el punto de fusión, la cual es la temperatura a la cual pasa de estado sólido a líquido. Estos sirven como guía para definir la temperatura apropiada para añadir el material modificador al asfalto durante el proceso de modificación. En la Figura 7 se observa el equipo utilizado para la prueba de DSC.

Figura 7. Equipo utilizado para las pruebas de DSC, TA Q2000

Recuperación elástica (ASTM D6084)

Fue diseñado para determinar la recuperación elástica de un material asfáltico mediante el uso de un ductilímetro y especímenes en briquetas. El espécimen es elongado a una velocidad de 5 cm/min y una temperatura de 25 °C, luego se detiene a una longitud específica de 20 cm. Hecho esto, el material es cortado en el centro del hilo y se permite la recuperación por un periodo de una hora. El material debe cumplir con una recuperación mínima de 50 %.

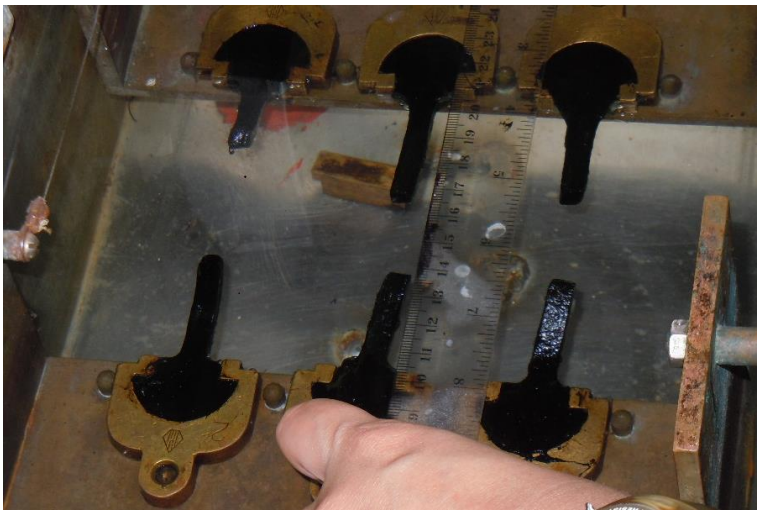

Figura 8. Ensayo de recuperación elástica.

Punto de ablandamiento (AASHTO T-53,/ ASTM D36, 2000)

Como el nombre del método lo indica, se determina el punto de ablandamiento, es decir, el punto donde el asfalto empieza a sufrir deformaciones cambiando así su estado sólido a uno más viscoso. El ensayo se hace en un intervalo de 30 °C a 157 °C utilizando un aparato de anillo y bola. El equipo utilizado se muestra en la figura siguiente.

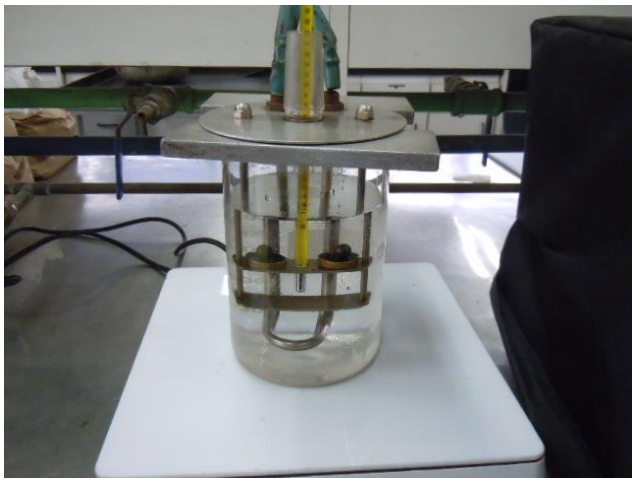

Figura 9. Ensayo de punto de ablandamiento

Viscosidad rotacional (ASTM D 4402)

Se determina la viscosidad rotacional mediante la medición del torque necesario para mantener una velocidad rotacional constante de un eje cilíndrico que gira sumergido en una muestra termostáticamente controlada. Este torque está directamente relacionado a la viscosidad del ligante. Vale la pena destacar que es aplicable a una extensa diversidad de asfaltos, tanto modificados como no modificados. (UNICAUCA, 2007).

La clasificación solicita el valor de viscosidad a 135 °C para determinar la fluidez del asfalto durante el trasvase del almacenamiento a la planta de producción, pues es la temperatura a la cual se almacena normalmente el asfalto. Complementa la información para proponer el rango de temperaturas en la producción de la mezcla asfáltica y su colocación

Figura 10. Equipo utilizado para prueba de viscosidad rotacional.

Ensayo de Envejecimiento a Corto Plazo (ASTM D 2872)

Llamado también método de ensayo estándar para determinar el efecto del calor y aire en una película delgada móvil de asfalto, o RTFO por sus siglas en inglés. Como su nombre lo indica, el ensayo consiste en someter una película delgada de material asfáltico en movimiento rotatorio, a una temperatura de 163 °C durante 85 minutos, donde está expuesta a un flujo constante de aire. Los efectos del ensayo se cuantifican realizando mediciones de las características del material antes y después del procedimiento, midiendo además el cambio de masa de la muestra (ASTM International, 2004). Este ensayo tiene como propósito simular el efecto de envejecimiento producto de la producción y colocación de la mezcla asfáltica.

En la figura siguiente se observa el equipo utilizado para la realización del envejecimiento.

Figura 11. Equipo utilizado para realizar el envejecimiento a corto plazo.

Ensayo de envejecimiento acelerado a presión (PAV) (ASTM D 6521)

Se encarga de simular el envejecimiento a largo plazo de los ligantes asfálticos, exponiendo las muestras de asfalto a 100 °C, a una presión de 2 MPa durante 20 horas. Se utiliza la muestra previamente acondicionada en el RTFO (ASTM International, 2005) ya que el propósito del ensayo es simular el envejecimiento del asfalto producto de un severo proceso de oxidación a lo largo de su vida de servicio posterior a haber sido colocado. En la figura a continuación se muestra el equipo utilizado.

Figura 12. Equipo utilizado para realizar el envejecimiento acelerado a presión.

Multi Stress Creep Recovery (MSCR) o Recuperación Elástica a Diferentes Esfuerzos (ASTM 7405)

Consiste en la medición de las propiedades viscoelásticas (mediante el "creep compliance") de un asfalto envejecido en un horno RTFO al aplicarle un esfuerzo de 100 Pa y 3200 Pa. Se utiliza para estimar la respuesta elástica en un ligante asfáltico sometido a esfuerzos cíclicos a dos niveles de carga consecutivos y a la temperatura alta del proyecto, sin correcciones por tránsito y carga. A continuación, se muestra el equipo utilizado para realizar el ensayo de MSCR.

Figura 13. Equipo utilizado para realizar el ensayo de MSCR.

El ensayo se realiza en ciclos de 1 segundo de carga y 9 segundos de recuperación donde al final de ellos se mide la deformación permanente (creep recovery) acumulada.

Una vez terminada la prueba, se revisan los resultados con los datos presentes en el Cuadro 3 de la cual se define el tipo de tránsito que puede soportar el asfalto. Este ensayo servirá de parámetro para determinar si el asfalto modificado presenta mejores características que el asfalto original.

Cuadro 3. Clasificación por grado de desempeño de acuerdo a ensayo MSCR

ESAL'S (Millones)	Clasificación		$J_{nr\ 3,2\ kPA}$	$J_{nr\ diff}$
< 3	Estándar	S	max 4,0 kPa	max 75 %
3 a 10	Pesado	H	max 2,0 kPa	max 75 %
10 a 30	Muy pesado	VH	max 1,0 kPa	max 75 %
> 30	Extremadamente pesado	E	max 0,5 kPa	max 75 %

Fuente: ASTM D7405-15, s.f.

El parámetro Jnr cuantifica la deformación (compliance) acumulada en el material que le impide regresar a su estado inicial. (D'Angelo, 2009).

Barrido de Amplitud Linear Linear Amplitude Sweep (LAS) (AASHTO TP-101)

Este ensayo sirve para predecir la susceptibilidad al agrietamiento por fatiga del ligante asfáltico al aplicar una carga cíclica. Se usa la muestra después del acondicionamiento en el PAV y se evalúa a temperaturas intermedias. A partir de este ensayo se puede conocer qué tan rápido se presenta el daño por fatiga en un asfalto.

Para realizar esta prueba se utiliza el equipo llamado reómetro de corte dinámico (DSR) el cual brinda las respuestas del asfalto ante la aplicación de cargas cíclicas. En la primera parte de la prueba se conocen las propiedades reológicas del asfalto y en la segunda se mide la resistencia del material donde se obtiene una gráfica de esfuerzo cortante contra deformación.

Para la segunda parte se hace un barrido de amplitud a la temperatura del proyecto usando un esfuerzo oscilatorio a una frecuencia de 10 Hz. Los ciclos de carga se hacen en intervalos de diez segundos y a cada intervalo se le incremento el esfuerzo de acuerdo a como se puede observar en la Figura 14.

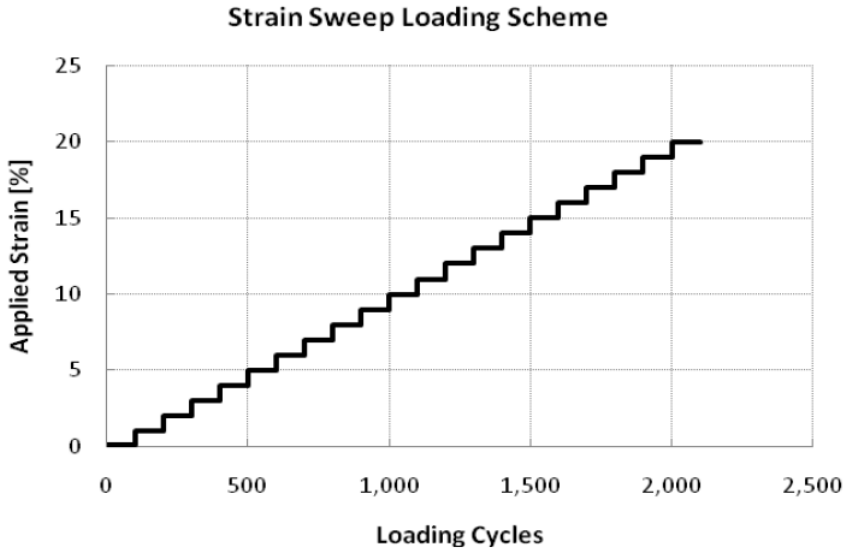

Figura 14. Esquema de carga para el barrido de amplitud linear

Fuente: (Johnson, 2010)

Además, a partir de los datos obtenidos se pueden conocer el número de ciclos de carga para la falla, lo cual ayuda a comprender si se está evaluando un asfalto con una resistencia al agrietamiento adecuada o no. Este se calcula a partir de los parámetros A y B los cuales determinan el valor máximo y la pendiente de la recta representante del número de ciclos y el esfuerzo cortante aplicado. Johnson et al. (2010) establece que entre mayor sea el valor de A y más cercano a cero sea el de B, mayor será el número de ciclos que soporta el asfalto en estudio.

Como parte de la clasificación PG+ se hacen mediciones reológicas al asfalto antes y después del envejecimiento con los equipos de RT y PAV para así conocer el efecto del envejecimiento del asfalto.

3.2 Ensayos de mezcla asfáltica

Además de los ensayos al ligante asfáltico, se realizaron ensayos para determinar el desempeño de la mezcla asfáltica. La mezcla asfáltica utilizada fue compactada a partir de un Compactador Giratorio de Superpave siguiendo los lineamientos de la norma AASHTO PP 60-14, AASHTO T 209-12 para la densidad y la máxima gravedad específica teórica de la mezcla asfáltica.

Creep Dinámico (Flow number) y Módulo complejo dinámico (AASHTO TP 79-15, AASHTO TP 62)

Para materiales viscoelásticos lineales tales como las mezclas asfálticas, la relación esfuerzo deformación bajo carga sinusoidal continua, se define por el módulo complejo dinámico (*E**)

$$E^* = E^{`} + iE^{"} \qquad (1)$$

Dónde:

$E^{`}$: Parte elástica del módulo

$iE^{"}$: Parte compleja del módulo

Basándose en trigonometría básica (Figura 15), cada componente del módulo complejo se puede obtener según las ecuaciones siguientes:

$$E^{´} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} cos\,\varphi \qquad (2)$$

$$E^{"} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} sin\,\varphi \qquad (3)$$

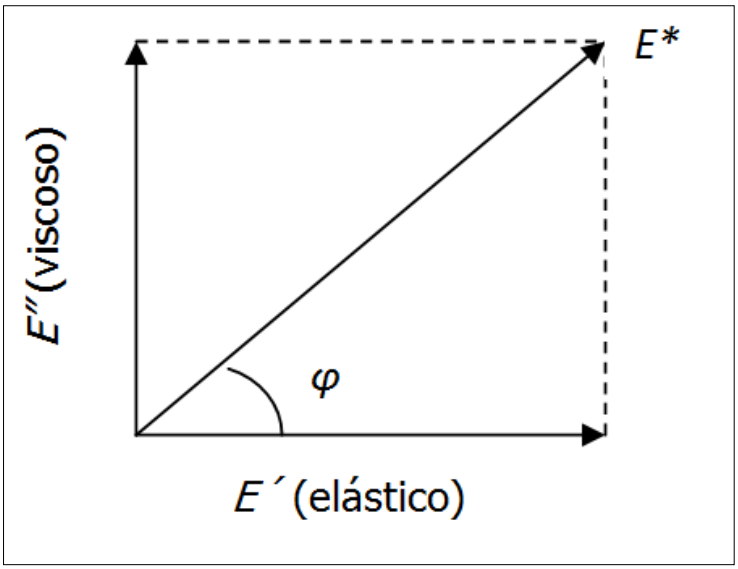

Figura 15. Módulo dinámico complejo

Matemáticamente el módulo dinámico se define como la norma del módulo complejo (|*E**|):

$$|E^*| = \sqrt{\left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} sin\,\varphi\right)^2 + \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} cos\,\varphi\right)^2} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \qquad (4)$$

El módulo dinámico (E*) es la norma obtenida a partir de la división del esfuerzo entre la deformación de un material sujeto a una carga sinusoidal en un espacio confinado. Este valor define las propiedades elásticas de un material de viscosidad lineal. E* representa el módulo viscoelástico del material mientras que el valor absoluto por definición, es el módulo dinámico.

El ángulo de fase (φ) es un indicador de las propiedades viscoelásticas de la mezcla, dado que representa el desfase que hay entre la aplicación de la carga y la respuesta del material. Este desfase se observa en la Figura 16 donde el esfuerzo aplicado está representado por la gráfica color azul y la respuesta del material, que en este caso es la deformación unitaria, se muestra en color rojo. Para materiales elásticos puros este ángulo toma un valor de cero grados mientras que para materiales completamente viscosos el ángulo de fase correspondiente es 90°.

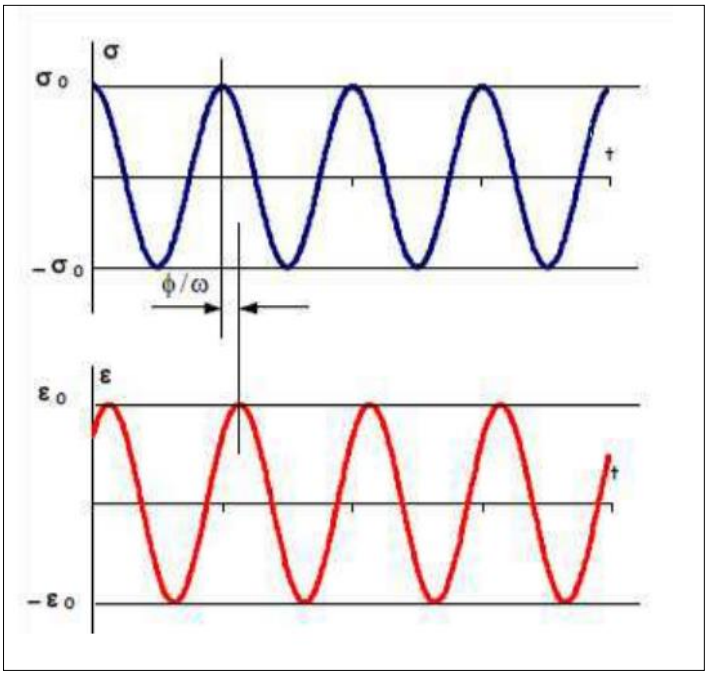

Figura 16. Representación gráfica del ángulo de fase

Fuente: Laboratorio Vial UTN-FRM, 2015.

El esfuerzo aplicado y la deformación axial son medidos como función del tiempo y usados para calcular el módulo dinámico y el ángulo de fase de manera automática por medio del software de la AMPT.

Adicionalmente el sistema reporta datos estadísticos que deben estar dentro del límite establecido según el Cuadro 4 para que los resultados puedan ser aceptados, de lo contrario el ensayo debe ser repetido.

Cuadro 4. Requerimientos estadísticos de calidad de los datos

Requerimiento estadísticos	**Límite**
Error estándar de carga	Menor al 10%
Error estándar de deformación	Menor al 10%
Uniformidad de la deformación	Menor al 30%
Uniformidad de fase	Menor a 3°

Fuente: AASHTO TP 79, 2012.

Una vez que se obtienen resultados satisfactorios dentro de los límites permitidos, se procede con la realización de las curvas maestras (AASHTO PP-61). Estas curvas muestran el módulo en función de la temperatura y la frecuencia de carga. Para esto, la frecuencia calculada a la temperatura de referencia, conocida como frecuencia reducida, equivale a la frecuencia de carga real a la temperatura de ensayo y se obtiene aplicando un factor de desplazamiento. Este factor de ajuste se basa en el principio de superposición tiempo-temperatura donde se busca obtener el mismo resultado para diferentes temperaturas, pero para diferentes tiempos de cargas. Las curvas maestras se construyen a una temperatura de referencia que por lo general es 20 °C y se utilizan para conocer el |E*| a cualquier combinación de temperatura del pavimento y para cualquier velocidad de tránsito. La utilidad de estas curvas maestras recae en que pueden ser empleadas para evaluar la mezcla y caracterizar el módulo dinámico para un diseño de pavimento empírico-mecanicista.

Determinar el cambio en el módulo de la mezcla como resultado del daño por humedad tiene utilidad para fines de predicción de rendimiento, ya que la degradación de módulo juega un papel importante en el daño del pavimento y debe ser incluido en los cálculos que predicen el rendimiento a largo plazo de pavimento flexible. Además, es importante recalcar que el módulo dinámico es uno de los parámetros de entrada para el diseño mecanicista-empírico.

El Flow Number es un ensayo aparte del Módulo Dinámico en el cual se determina el número de ciclos de carga correspondientes a la mínima razón de cambio del esfuerzo axial permanente durante las cargas cíclicas del ensayo.

Se determinan las características de desempeño de la mezcla asfáltica en el cual se obtiene la deformación permanente a través del equipo de ensayos de desempeño (AMPT) aplicando un pulso repetido de esfuerzo en compresión a un espécimen de mezcla asfáltica.

A continuación, en el

Cuadro 5 se muestra la clasificación de las mezclas asfálticas de acuerdo al Flow Number obtenido según el ensayo.

Cuadro 5. Clasificación según Flow Number.

Nivel de tráfico, milliones de ESALS	MAC Mínimo Flow Number promedio	WMA Mínimo Flow Number Promedio
<3	-	-
De 3 a <10	50	30
De 10 a <30	190	105
> 30	740	415

Fuente: AASHTO, TP 79, 2012

Además, en el Cuadro 6 se muestra el rango de variación que puede existir entre los especímenes fallados para así garantizar los estándares del ensayo.

Cuadro 6. Diferencia aceptable en ensayo Flow Number.

TMN del Agregado, mm	**Sr (porcentaje)**	**Diferencia aceptable para promedio de n Especímenes, % del promedio**				
		n=2	**n=3**	**n=4**	**n=5**	**n=6**
9,5	78,1	55	45	39	35	32
12,5	87,5	62	51	44	39	36
19	101,8	72	59	51	46	42
25	111,2	79	64	56	50	45

Fuente: AASHTO, TP 79, 2012

El ensayo consiste en la aplicación de una carga sinusoidal a un espécimen previamente cortado de mezcla asfáltica a distintas temperaturas y frecuencias de carga. Esto es realizado en un

espacio confinado con la presencia de un esfuerzo desviador. En la Figura 17 se muestra el equipo utilizado para realizar dichas pruebas en el proyecto.

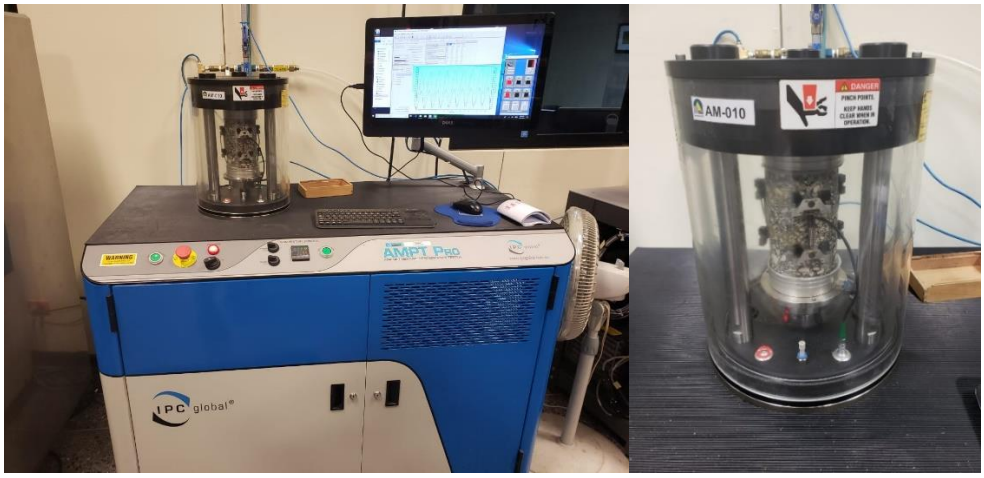

Figura 17. Equipo utilizado para los ensayos de módulo dinámico y Flow Number.

Rueda de Hamburgo (HWDT) (AASHTO T 324-14)

El ensayo de Rueda de Hamburgo sirve para determinar la susceptibilidad a la deformación permanente y el daño por humedad de mezclas asfálticas.

Los especímenes preparados con el compactador giratorio son sumergidos y se les aplica agua hasta estar completamente sumergidos, posteriormente, mediante una rueda oscilante se les aplica una carga durante un número de ciclos o hasta que alcance una deformación establecida previamente. Se mide la deformación del espécimen causada por la carga de la llanta y un aumento abrupto en la tasa de deformación.

El método también es utilizado para determinar la falla prematura de mezclas asfálticas en caliente debidas al debilitamiento de la estructura del agregado, una rigidez inadecuada del ligante asfáltico o bien, el daño por humedad.

A partir de él se puede medir cuán deformado queda el espécimen y la cantidad de ciclos de carga asociados al ahuellamiento. En la Figura 18 se muestra el equipo utilizado para realizar el ensayo.

Figura 18. Equipo utilizado para ensayo de Rueda de Hamburgo

Resistencia retenida a la tensión diametral (AASHTO T283, ASTM D4867)

El ensayo contempla tanto la preparación como la medición de la resistencia diametral de la mezcla asfáltica compactada como resultados de los efectos de la saturación con agua y un acondicionamiento acelerado.

Sirve para determinar la susceptibilidad al daño por humedad de las mezclas asfálticas. A partir de este se puede predecir el desnudamiento a largo plazo.

El procedimiento consta de utilizar la mitad de los especímenes secos y la otra mitad se saturan parcialmente con agua para su acondicionamiento húmedo. En la Figura 19 se observa el equipo utilizado para fallar los especímenes.

Figura 19. Equipo utilizado para la falla de tensión diametral.

Ensayo de fatiga en cuatro puntos (AASHTO T 321-14)

Con este ensayo se determina la vida de fatiga y energía de vigas de mezcla asfáltica de 380 mm de largo, 50 mm de espesor y 63 mm de ancho. A partir de estos datos se puede estimar la vida de fatiga de una capa de asfalto bajo la acción de cargas de tránsito repetitivas.

El ensayo consiste en la aplicación de ciclos de carga sobre una viga con las dimensiones mencionadas anteriormente. Esto se realiza en una cámara que controla de manera adecuada la temperatura y presión a la cual es sometida la muestra. Las vigas son sujetas en cuatro puntos en donde serán aplicadas las cargas cíclicas en los sujetadores centrales, mientras que los extremos presentarán una fuerza de reacción y el centro de la viga una deflexión la cual es medida constantemente durante el ensayo. Estos sujetadores además poseen rotación libre y es sobre ellos donde se aplica la carga. E

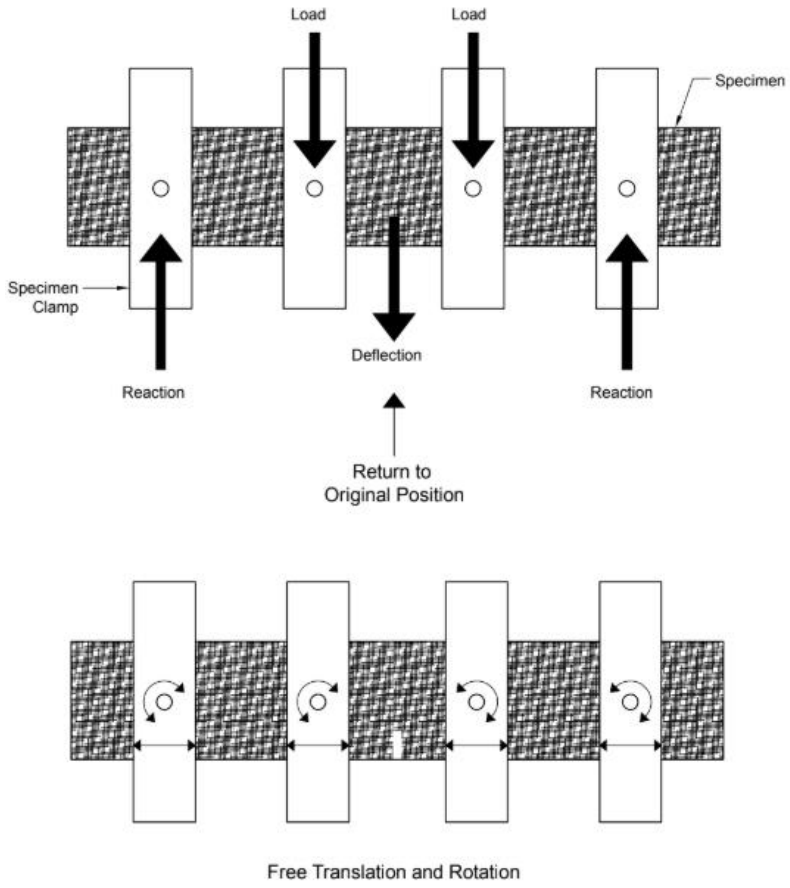

Figura 20. Diagrama de cargas y movimiento de los sujetadores

Fuente: AASHTO T321-2

4. MÉTODOS DE INCORPORACIÓN

A continuación, se explican los procesos llevados a cabo para la modificación de la mezcla asfáltica. Como se mencionó previamente, consisten en dos métodos de incorporación del agente modificante, en este caso, el tereftalato de polietileno. Esto con el fin de determinar cambios en las propiedades de la mezcla asfáltica y analizar cuál de ellos presentan mejores resultados en comparación con una mezcla asfáltica sin modificar.

Para ambos casos, el porcentaje de asfalto utilizado se determina utilizando el porcentaje total sobre el agregado de la mezcla. Además, se utilizó el mismo asfalto, identificado como 2119-16 y, como se mencionó previamente, el mismo tipo de agregado proveniente de Río Claro. Esto con el fin de reducir el número de variables.

4.1 Método Húmedo

Este método consiste en añadir el agente modificante al asfalto en caliente previo a ser mezclado con el agregado. Para ello, se debe de aumentar la temperatura de mezclado del asfalto lo cual implica un costo adicional. Sin embargo, esto puede significar un ahorro a largo plazo en el proceso de construcción de carreteras dados los beneficios en las propiedades de la mezcla.

Para el caso del PET se realizó un análisis termogravimétrico con el fin de obtener las temperaturas de recristalización y de fusión del material para así determinar la temperatura óptima de incorporación y mezcla.

Una vez definida la temperatura se realizaron pruebas con el material en distintos tamaños para determinar cuál es el tamaño óptimo tomando en cuenta criterios de trabajabilidad, incorporación, homogeneidad de la dispersión y mejora de sus propiedades del asfalto.

En un primer intento, se modificó el asfalto con partículas de PET de un tamaño aproximado de 0,5 cm de lado o menor a una temperatura en un rango entre 180 °C y 185 °C y un tiempo de mezclado de 2 horas y media. Esto dado que se quería sobrepasar la temperatura de recristalización, además de asegurarse que la mezcla mejorara su trabajabilidad. En la Figura 21 se observa el tamaño del material utilizado para la primera modificación realizada.

Figura 21. PET utilizado en la primera modificación

El proceso se llevó a cabo en el equipo modificador de asfalto del LanammeUCR mostrado en la Figura 22 y se utilizó en la primer modificación un porcentaje de plástico de 1,5% del peso total del asfalto. Este primer porcentaje se determinó a partir la experiencia dada por la modificación de asfaltos con otros materiales de desecho.

Figura 22. Equipo modificador de asfalto utilizado

Sin embargo, el plástico no se mezcló de la manera deseada ya que las partículas no se derritieron ni se mezclaron de manera homogénea, dejando un porcentaje aproximadamente de 90% del plástico incorporado inicialmente en el fondo del recipiente. A continuación, se muestra la Figura 23 donde se observa el plástico recuperado después del proceso de modificación.

Figura 23. Plástico recuperado al final del proceso de modificación

Es por ello que se decidió reducir el tamaño de partícula para así lograr una mejor incorporación entre el asfalto y el PET, además de aumentar el tiempo de mezclado a 3 horas. Para ello se utilizó el molino del LanammeUCR para reducir el tamaño del plástico a un máximo de 0,5 mm de diámetro aproximadamente. En la Figura 24 se muestra el tamaño del PET utilizado para la segunda modificación realizada.

Figura 24. Tamaño del plástico molido

La modificación realizada con el plástico molido demostró una mejora importante en la homogeneidad de la dispersión asfáltica, sin embargo, no se incorporó totalmente, provocando una separación entre el asfalto y el plástico al detener la agitación lo cual lleva a la sugerencia de mantenerlo en constante agitación hasta el momento de su uso. En la Figura 25 se muestran las partículas de plástico presentes en la mezcla.

Figura 25. Partículas de plástico en la mezcla asfáltica

La primera modificación realizada con el PET molido se llevó a cabo utilizando un 2,5% de plástico respecto al peso del asfalto. Este procedimiento presentó mejores resultados que el realizado anteriormente para el plástico con mayor tamaño de partícula por lo cual, se decidió proceder con la modificación de asfalto con el plástico molido.

Este proceso se realizó para tres porcentajes distintos de plástico, siendo estos 1,5%, 2,5% y 5% para así tener puntos de comparación y decidir así el que presenta mejores características en cuanto a desempeño y trabajabilidad.

Una vez realizadas las modificaciones se decidió proseguir con la mezcla modificada con un 2,5% de PET. Las razones por las cuales se escogió este porcentaje se detallan más adelante. A este asfalto se le hicieron las pruebas según la clasificación por grado de desempeño PG, además de ensayos incluidos en la especificación nacional y en ensayo de LAS para predecir el comportamiento a la fatiga. Estas modificaciones se llevaron a cabo en un equipo modificador de asfalto de mayor tamaño obteniendo tres galones de asfalto modificado por bache. En la Figura 26 y 7 se observa

Figura 26. Equipo modificador de asfalto grande *Figura 27. Asfalto modificado vertido*

Para el diseño de la mezcla se llevó a cabo siguiendo la metodología establecida, sin ningún paso extra, solamente considerando el porcentaje de asfalto modificado. Para ello se mezclaron especímenes a distintos porcentajes de asfalto, siendo estos 6% y 6,5% para así calcular el porcentaje óptimo de asfalto a partir de las mediciones de la gravedad específica, capacidad de absorción y porcentaje de vacíos de cada espécimen.

Una vez obtenido este porcentaje, se procedió a calcular el diseño de le mezcla y a realizar los especímenes necesarios para las pruebas requeridas para evaluar el desempeño de la mezcla asfáltica.

A continuación, se muestran imágenes de distintas partes del proceso de mezclado del asfalto con el agregado utilizado.

Figura 28. Agregado utilizado para la mezcla

Figura 29. Asfalto vertido en la mezcla

Figura 30. Mezcla del agregado con el asfalto

Figura 31. Mezcla modificada

Las mezclas realizadas se dejaron curando por un período de 2 horas a una temperatura de 165 °C. Una vez transcurrido este tiempo, se procede al cálculo del porcentaje de vacíos de cada espécimen donde debe de cumplir un porcentaje de 4,0 % ± 0,5 % para el caso de los especímenes de diseño y de 7,0 % ± 0,5% para el resto de muestras necesarias para evaluar el desempeño de la mezcla elaborada con el asfalto modificado con PET.

4.2 Método Seco

Este método se diferencia del húmedo por el momento y forma de incorporación del plástico al asfalto. Como se comentó previamente, mediante el método húmedo el asfalto es al que se le adiciona el modificante, en este caso, el plástico, bajo condiciones específicas, mientras que el método seco consiste en la sustitución de parte del agregado fino y el uso de asfalto sin modificar.

Para este método se realizó la mezcla a una temperatura de 165 °C ya que no se desea que el plástico modifique su estado, más bien que éste actúe como el agregado fino y se utilizó un tiempo de curado de dos horas a 150 °C.

Un cuidado adicional que se debe de tener es que al sustituir parte del agregado fino por plástico u otro agente modificante, hay que tomar en consideración la diferencia del peso de estos materiales ya que no es lo mismo en cuanto a volumen una cantidad de plástico que de agregado. Es por ello que se debe de realizar una corrección por volumen a partir de la densidad de cada material para así al sustituir por ejemplo un 1% de agregado fino por el mismo porcentaje de plástico, no se incurra en el error de añadir un mayor volumen de plástico lo cual afecta la mezcla ya que las partículas no se adhieren entre sí de la manera deseada lo cual produce que los especímenes no mantengan su forma ni el porcentaje de vacíos al ser compactados.

Para este proyecto, se utilizaron partículas de plástico pasando a la malla No. 4, es decir, menores a 4,75 mm de lado.

Al realizar la mezcla, se coloca el agregado caliente en el recipiente donde posteriormente se añade el plástico frío. Ambos materiales se mezclan para homogenizar antes de verter el asfalto. Una vez realizado este paso adicional, el proceso de mezclado con el asfalto original es igual al usualmente utilizado.

En la Figura 32 y la 35 se muestra el plástico utilizado y el agregado junto con este, en donde se aprecia que el plástico tiene un tamaño menor en comparación a los agregados de mayor tamaño que son de hasta 12 mm.

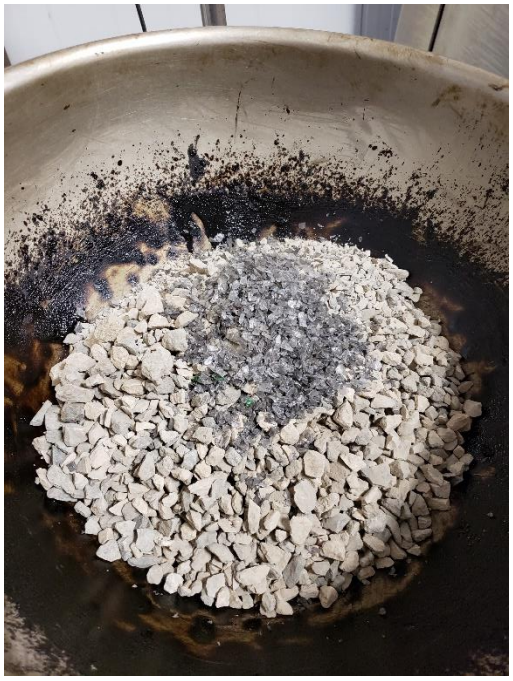

Figura 32. Tamaño del plástico utilizado *Figura 33. Inclusión del plástico*

Para ambos métodos se utilizó un tiempo de curado de dos horas a la temperatura de compactación, siendo esta mayor para el método húmedo en comparación con el método seco y el de control.

5. RESULTADOS

5.1 Ensayo de espectroscopía infrarroja

Como se comentó previamente, el ensayo de espectroscopía infrarroja sirve para conocer la composición química del material haciendo pasar una luz láser IR en longitudes de onda determinados.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el tereftalato de polietileno proveniente de una botella de 350 ml.

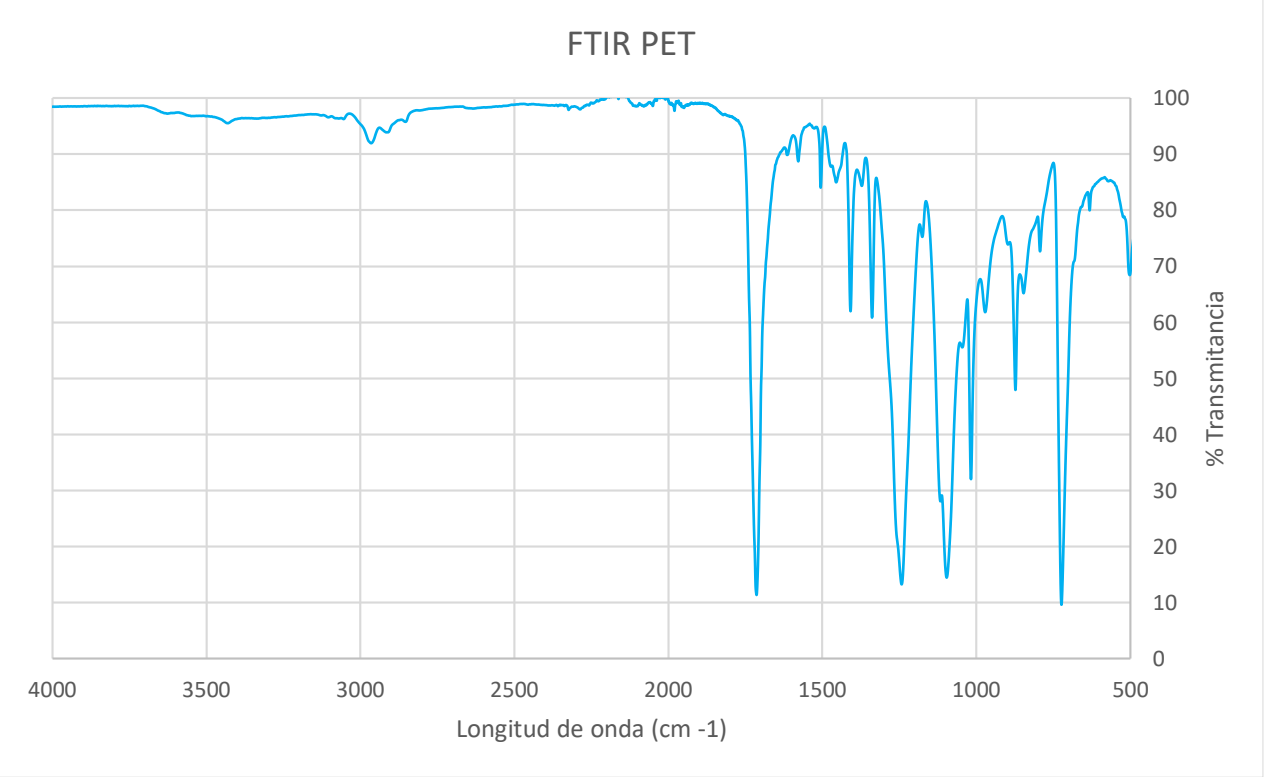

Figura 34. Ensayo de espectroscopía infrarroja

Las longitudes de onda presentes en el espectro anterior son descritas en el Cuadro 7 adjunto a continuación.

Cuadro 7. Descripción de longitudes de onda del tereftalato de polietileno.

Longitud de onda (cm^{-1})	**Descripción**
2970-2950	Bandas de baja intensidad a tensión, indican uniones C-H de compuestos saturados
1960-975	Bandas relacionadas con vibraciones de H aromáticos adyacentes en compuestos sustituidos y bandas aromáticas
1725-1700	Banda alta intensidad a tensión, característica del grupo carbonilo
1505 y 1407	Estiramiento C-O baja intensidad
1242	Estiramiento C-C intensa del grupo fenilo
1117 y 1096	Se relaciona con vibraciones –C-O-C. En el caso de PET se relaciona con el grupo Tereftalato ($OOCC_6H_4$-COO)
723	Enlaces C-O-C anti simétricos de intensidad alta
650-900	$\gamma(CH)$ y $\gamma(CH_2)$ del grupo fenilo

El espectro encontrado no varía en demasía con espectros encontrados de tereftalato de polietileno en artículos investigados. A continuación en la Figura 35 se muestra uno de esos espectros encontrados.

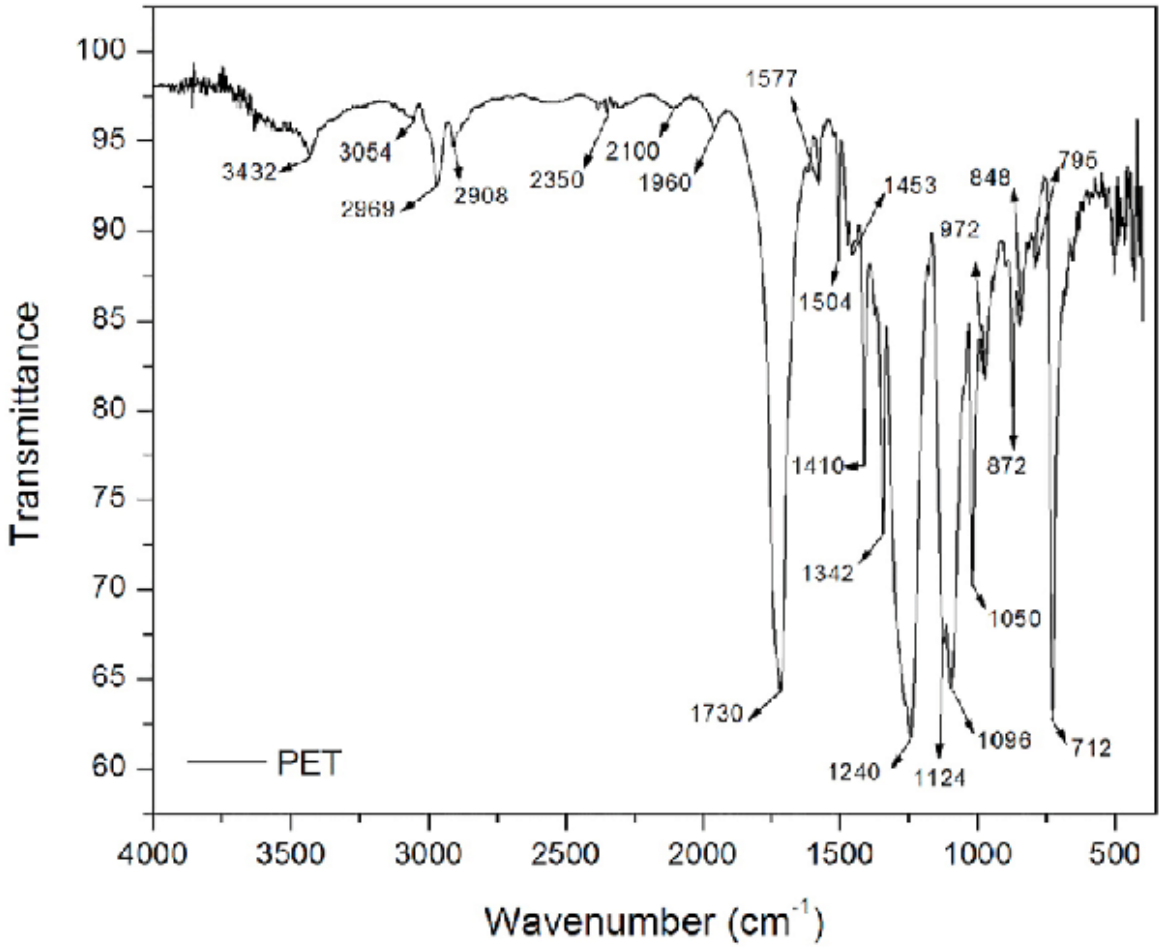

Figura 35. Espectro infrarrojo de tereftalato de polietileno

Fuente: (dos Santos Pereira, Prado da Silva, Lima Júnior, Anderson dos Santos, & James Tommasini, 2017)

Como se puede observar al comparar ambos espectros, se nota una diferencia en las curvas sobre las longitudes de onda entre 3000 cm^{-1} y 3500 cm^{-1}. Sin embargo, aparte de ellas, el espectro se comporta de manera similar por lo cual se concluye que el material efectivamente se trata de plástico hecho de tereftalato de polietileno.

Las diferencias que se muestran pueden haber sido originadas por factores como el equipo utilizado, el origen del plástico, si este ha sido reciclado, el hecho de que fue utilizada una botella de 350 ml la cual presenta un color distinto de otras botellas de plástico y principalmente el factor principal es que la botella ya había sido utilizada por lo cual cabe la posibilidad de que estuviese contaminada con partículas del líquido o de otras sustancias. Además según (Govind

Prasad, De, & De, 2011) la radiación produce cambios en el espectro infrarrojo del plástico por lo cual, dependiendo también de la exposición a radiación, el material de desecho utilizado puede variar con respecto a otro.

El principal objetivo con este ensayo es comprobar que el plástico utilizado es efectivamente tereftalato de polietileno lo cual se verificó, sin embargo, cabe destacar que el propósito del trabajo de investigación es poder utilizar el plástico en la mezcla asfáltica sin que este pase por un proceso de esterilización o limpieza profunda. Por lo cual, para fines de los ensayos realizados se procederá utilizando plástico sin esterilizar intentando asemejar el proceso que recibiría el plástico en una planta productora de mezcla asfáltica.

5.2 Calorimetría de Barrido Diferencial

Para la realización del ensayo de calorimetría de barrido diferencial se utilizó el material proveniente de la misma botella de plástico PET utilizada en el ensayo de FTIR. Los resultados obtenidos se observan en la Figura 36 en donde se analiza el flujo de calor que presenta el plástico en un rango amplio de temperaturas.

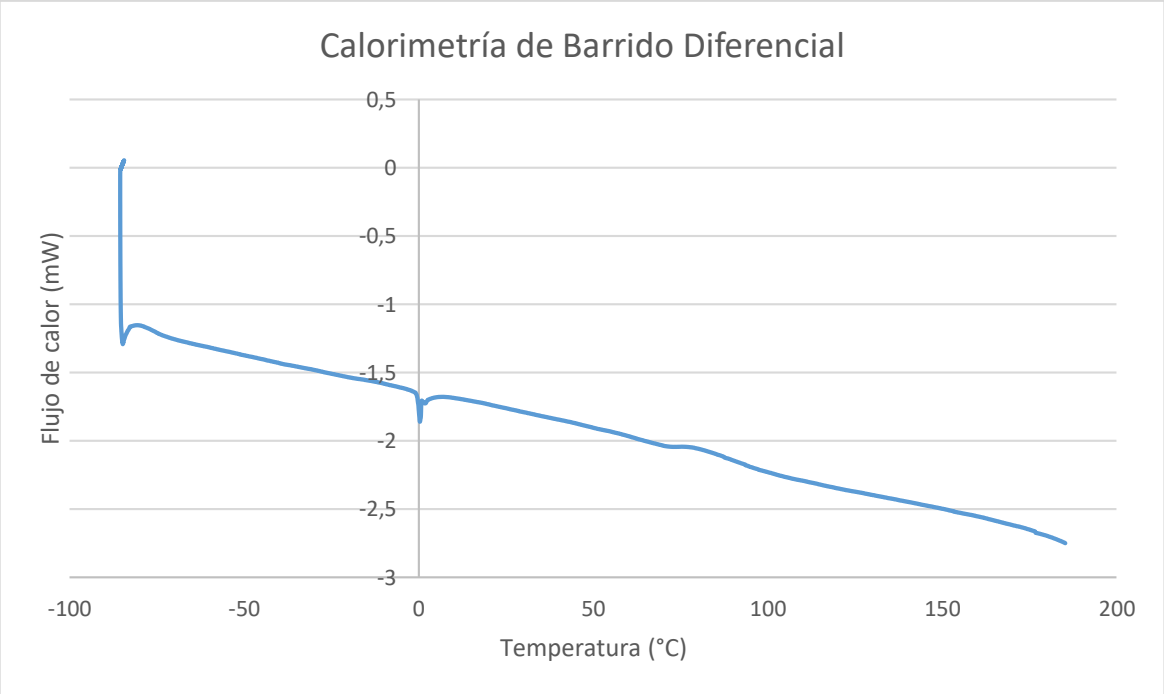

Figura 36. Calorimetría de barrido diferencial

Como se aprecia en la figura anterior, el material de prueba fue sometido a temperaturas desde los -50 °C hasta casi los 200 °C. Se observa que el flujo de calor varía y presenta tres puntos en específico; en el caso de la primera variación se trata de una transición sólido-sólido de primer orden cerca de los 0 °C la cual se trata de una reacción endotérmica.

Posteriormente, cerca de los 80 °C se produce otra reacción endotérmica la cual se trata de una transición vítrea en donde el material se empieza a reblandecer hasta alcanza la fusión y una vez alcanzada una temperatura de aproximadamente 160 °C se da un proceso exotérmico el cual puede tratarse de la recristalización del material o un acomodo cristalino previo a que se alcance la temperatura de fusión la cual ronda los 248 °C. Este proceso exotérmico es causado generalmente por enfriamientos no controlados a la hora de realizar los procesos productivos.

Es importante tomar en consideración que estas reacciones son para el plástico PET analizado y sirve para dar una idea general del comportamiento del material a través de un incremento de temperatura. Esto dado a que los reprocesos utilizados para el reciclado del plástico pueden tener efectos en las propiedades del material y por ende en su comportamiento. Por lo cual es recomendable conocer el proceso utilizado para poder generar un análisis más acertado del material. Sin embargo, al querer utilizar plástico desechado de distintas fuentes y sin un proceso de limpieza o esterilización aplicado al producto, el objetivo del ensayo DSC se establecer un valor de inicio para temperatura de modificación.

5.3 Análisis termogravimétrico

A partir del análisis termogravimétrico, y como se puede observar en la Figura 37, se determina el cambio en la masa del tereftalato de polietileno cuando este se somete a temperaturas elevadas.

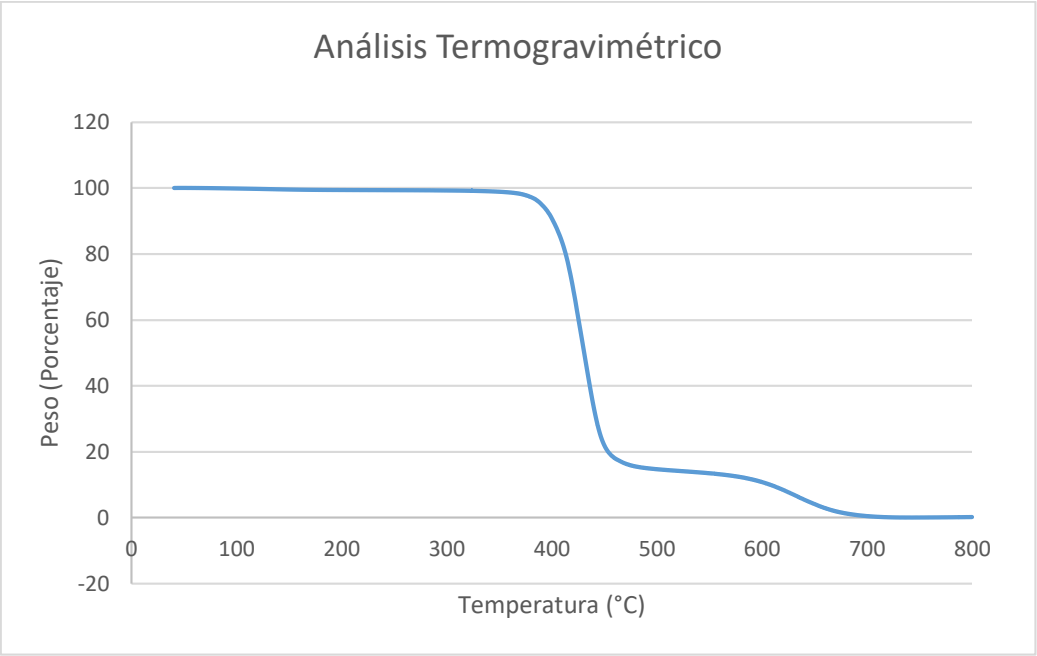

Figura 37. Análisis termogravimétrico del PET

Como se aprecia en la figura anterior, se producen tres grandes pérdidas de masa. La primera de ellas se dio aproximadamente a los 150-200 °C y es producto de una pérdida de volátiles o agua superficial presente en el material, esta se puede deber a que el material no fue esterilizado previo a su análisis por lo cual podría tener residuos del líquido que contenía y este fue evaporado a una temperatura mayor a la de ebullición del agua por lo que no representa un mayor cambio en la masa de la muestra, siendo la pérdida menor al 1 %.

La segunda pérdida de PET es la mayor, siendo esta un 85% del total de la masa. Esta comienza aproximadamente a los 300 °C y termina cerca de los 500 °C y es donde se genera el proceso de degradación termo-oxidativa ya que se dio en presencia de oxígeno. En esta se perdió casi la totalidad del material dejando sólo compuestos hidrocarbonados que no producen volátiles y sales no oxidables.

La última pérdida de la muestra representa un 14 % del total de la muestra. Esta se puede deber a la combinación de residuos o la combinación del material con otros tipos de polímeros dejando así al final sales no oxidables como residuo del análisis.

El proceso de modificación de asfalto no se desarrolla a temperaturas mayores de los 200 °C por lo cual no se espera que no se pierda un porcentaje considerable del material, sin embargo, al modificar el asfalto con material no lavado, el cambio en las propiedades del asfalto no será

producto meramente del plástico PET, sino también de los residuos que presente el desecho utilizado los cuales en su mayoría serán partículas de refrescos azucarados.

5.4 Asfalto modificado

Una vez analizadas algunas de las propiedades del agente modificante, se procedió con la modificación del asfalto el cual es el primer paso del método húmedo, uno de las maneras de elaborar la mezcla asfáltica modificada en este proyecto.

A continuación, se presentan los resultados de los distintos porcentajes de PET utilizados en aras de obtener un asfalto modificado con mejores características que un asfalto original. Cabe destacar que el enfoque del proyecto no es obtener el porcentaje óptimo de PET ni la combinación de este con otros aditivos para modificar asfalto, por lo cual, la metodología y criterio utilizados consistieron en modificar tres pruebas de asfalto con distintos porcentajes de plástico y realizarles las pruebas de grado de desempeño (PG), MSCR y LAS para así a partir de los resultados obtenidos y de parámetros como trabajabilidad, funcionalidad y eficiencia determinar el porcentaje óptimo del agente modificante para proceder con el resto de pruebas del método húmedo.

El primer porcentaje utilizado fue de 1,5% de PET sobre el peso del asfalto, a partir de los resultados obtenidos se decidió aumentar la cantidad a un 2,5% ya que parte de las metas del proyecto es utilizar la mayor cantidad de plástico posible sin ver afectado el rendimiento del asfalto. Una vez realizada esta prueba se procedió a aumentar la cantidad de plástico a un 5% ya que los resultados obtenidos hasta el momento no estaban disminuyendo el rendimiento del asfalto por lo cual se tomó la decisión de aumentarlo considerablemente con el fin de conocer si era factible una cantidad alta de plástico en la mezcla.

Una vez obtenido el porcentaje óptimo se realizaron diversas pruebas para tener una mejor idea de las propiedades del asfalto modificado con tereftalato de polietileno.

5.4.1 Grado de Desempeño

Uno de los principales parámetros para elegir el porcentaje de plástico por utilizar fue el grado de desempeño el cual, como se comentó previamente, es un criterio diseñado por el método Superpave el cual consiste en evaluar el comportamiento del asfalto bajo las condiciones a las que verdaderamente va a ser utilizado. Esto dado que la caracterización utilizada previamente

se basaba en el grado de viscosidad y la penetración, mientras que el PG (Performance Grade) considera las condiciones climatológicas, la carga de tránsito y el tipo de tránsito en distintas condiciones del envejecimiento del asfalto durante la producción de mezcla asfáltica y el tiempo en servicio de una manera más precisa y fiel al verdadero comportamiento del asfalto colocado.

En el Cuadro 8 se muestra un resumen de los resultados obtenidos tanto para el asfalto original, es decir, sin envejecer y el envejecido en el horno de película delgada (RTFO) para los tres porcentajes de PET utilizados.

El parámetro G*/sin(delta) es utilizado para determinar el límite superior del rango de temperaturas a la cual el asfalto mantiene sus características. Para el caso del asfalto sin envejecer, el punto de control es cuando el valor es menor a 1 kPa, mientras que para el asfalto envejecido se define cuando el valor es menor a 2,2 kPa. Si el valor de G*/sin(delta) es menor que el punto de control el límite superior de la temperatura es el valor previo. A continuación, se muestran los resultados obtenidos.

Cuadro 8. Resumen datos de Grado de Desempeño

Resumen PG			
G*/sin(delta) > 1 kPa, Asfalto original			
Porcentaje de PET	64°C	70°C	76°C
1,5%	4,42	1,95	0,92
2,5%	4,30	1,97	0,94
5,0%	4,35	1,97	0,95
G*/sin(delta) > 2,2 kPa, Asfalto envejecido en RTFO			
Porcentaje de PET	64°C	70°C	76°C
1,5%	8,41	3,75	1,76
2,5%	8,60	3,79	1,76
5,0%	8,65	3,92	1,84

Como se observa en el cuadro anterior, para los tres porcentajes de plástico utilizados, el valor del límite superior del grado de desempeño es de 70 °C, tanto para el asfalto previo a ser acondicionado como para el envejecido.

A partir de esto se puede concluir que el asfalto modificado no sufre una pérdida o modificación de su temperatura superior al someterse al envejecimiento. Además, el valor para los tres porcentajes de asfalto es igual al asfalto de control utilizado para el proyecto y mayor al asfalto típico utilizado en Costa Rica el cual tiene un valor del grado de desempeño superior de 64°C, por lo cual, aunque no hubo una mejora en la resistencia del asfalto a altas temperaturas, este valor no disminuyó a la hora de introducir más plástico a la mezcla por lo que a partir de este parámetro se podría considerar la opción de añadir plástico al asfalto original ya que éste no ve afectado su grado de desempeño.

Al tener un valor superior del grado de desempeño de 70 °C el asfalto puede ser utilizado en lugares con condiciones climatológicas cálidas y con cargas de tránsito pesadas en donde asfaltos con menor valor pueden llegar a sufrir daños por ahuellamiento debido al efecto de las temperaturas elevadas o al paso de vehículos pesados

En el caso de Costa Rica y tomando en consideración sólo este parámetro, este tipo de asfalto podría ser utilizado en cualquier parte del país sin embargo sería recomendable para lugares cálidos como la zona de Guanacaste.

5.4.2 MSCR

Como se comentó previamente, el ensayo de recuperación elástica a esfuerzos múltiples (Multi Stress Creep Recovery), trata acerca de la medición de las propiedades viscoelásticas que presenta un asfalto envejecido cuando se le aplica un esfuerzo. A partir de éste se determinó la respuesta elástica del asfalto modificado con los tres porcentajes de plástico en cuestión.

A continuación, en el Cuadro 9, se muestra al resumen de los datos obtenidos para los tres porcentajes de plástico PET utilizados en el proyecto así como su clasificación según el Cuadro 3 mostrado previamente y la cantidad de ejes equivalentes de carga.

Cuadro 9. Resumen datos de MSCR

Resumen MSCR				
Porcentaje de PET	**Jnr3.2 (kPa)**	**Jnr diff**	**Clasificación**	**ESAL's (millones)**
1,5%	0,98	8,805	Muy pesado (VH)	10 a 30
2,5%	1,00	8,858	Muy pesado (VH)	10 a 30
5,0%	1,02	13,970	Pesado (H)	3 a 10
Control	3,286	12,57	Standard (S)	< 3

Como se observa, para los porcentajes de 1,5% y 2,5% de PET, se tiene una clasificación de VH (vehículos muy pesados) con una diferencia mínima en el parámetro mientras que para el porcentaje mayor se disminuye a una clasificación de pesados, entrando también en otra clasificación en cuanto a la cantidad de ejes equivalentes que podría soportar un pavimento fabricado con ese asfalto.

Se debe tomar en consideración que otros parámetros del diseño de un pavimento como son el caso del porcentaje de asfalto, tipo, calidad y tamaño del agregado, granulometría, volumen y velocidad de tránsito también afectan la cantidad de ejes equivalentes que soporta un pavimento, pero el ensayo de MSCR da una idea de esta cantidad.

Al comparar los asfaltos modificados con el asfalto control se nota una diferencia en cuanto al valor de Jnr @3,2 kPa. Al ser un valor mucho mayor para el caso del asfalto original se sabe que éste tiene una mayor capacidad de deformarse en relación con los modificados, reduciendo así su posibilidad de ser utilizado en zonas con alto flujo vehicular o zonas de tránsito pesado. Mientras que, por otro lado, los asfaltos modificados con 1,5% y 2,5% de plástico son de comportamiento más rígido, aumentando así su resistencia a la deformación y por ende, a cargas de tránsitos constantes.

Además, a partir de este ensayo se nota una diferencia entre el asfalto modificado con la mayor cantidad de plástico y los otros dos, perteneciendo este a otra categoría según el Cuadro 3. Esto se puede deber a que, a la hora de realizar la modificación se notó que para este contenido de plástico se da una sedimentación considerable del material, lo cual conlleva a pensar que el asfalto no se modificó al mismo nivel que los otros que tenían un menor porcentaje ya que éste podría haber superado el límite admisible del agente modificador. Además, se nota una tendencia a tener un valor más elevado de Jnr diff conforme se aumenta el contenido de

plástico lo cual se podría interpretar como un aumento en su capacidad de deformarse lo que lo alejan de ser el porcentaje ideal de plástico. Sin embargo, como se comentó previamente, el porcentaje óptimo de PET, así como su límite admisible se salen del alcance del proyecto.

5.4.3 Barrido de Amplitud Lineal (LAS)

Como se mencionó anteriormente, el ensayo de LAS o barrido de amplitud lineal trata acerca de la medición de la resistencia a la fatiga de un ligante asfáltico. En el caso del trabajo de investigación, se realizó el ensayo para los tres porcentajes dichos previamente para así comparar su comportamiento ante un esfuerzo cortante.

A partir del barrido realizado se obtuvieron los datos mostrados en la Figura 38 donde se puede apreciar el porcentaje de deformación para los tres asfaltos modificados.

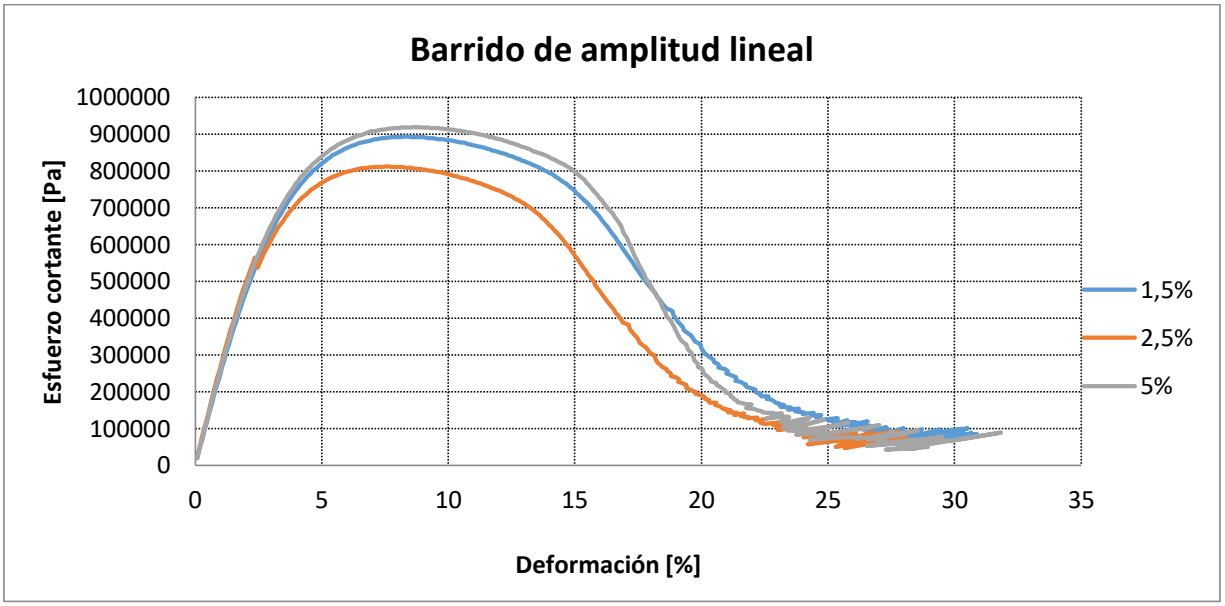

Figura 38. Comparativa de barrido de amplitud lineal en asfaltos modificados con PET

Como se muestra en la figura anterior, los tres asfaltos presentan un comportamiento similar, sin embargo, se nota que el de 1,5% y el de 5% son similares mientras que el asfalto modificado con un 2,5% de PET presenta un menor porcentaje de deformación para el mismo esfuerzo cortante aplicado por lo cual se concluye que este tiende a deformarse menos en comparación con los otros dos. Sin embargo, esto quiere decir que presenta una peor resistencia a la fatiga ya que se tendría un asfalto más rígido que los otros dos lo cual puede significar problemas ante un flujo vehicular pesado a altas velocidades.

Cabe destacar que el barrido de amplitud lineal en estos casos no tiene el comportamiento típico de un asfalto. Esto puede ser producto de las partículas de plástico en la mezcla las cuales no se mezclaron completamente con el asfalto, produciendo así alteraciones en los resultados producto de esa falta de homogeneidad en el asfalto modificado.

A continuación, en el Cuadro 10. Resumen datos de ensayo LAS se muestran los resultados en cuanto a los parámetros A y B así como la cantidad de ciclos de carga que soportaría cada asfalto.

Cuadro 10. Resumen datos de ensayo LAS

Resultados LAS			
Porcentaje de PET	**A**	**B**	**Nf**
1,5%	3705539	-4,29	72.443
2,5%	2045403	-4,17	44.648
5,0%	4219445	-4,31	81.081

Como se observa, el asfalto modificado con la menor cantidad de ciclos de carga es el que tuvo una menor deformación respecto al esfuerzo cortante, reafirmando así que es el asfalto más rígido entre los tres en prueba. Además, es interesante ver cómo el comportamiento de los asfaltos no tiene una tendencia fija ya que para el de 5% se vuelve a presentar un aumento en el valor de Nf siendo este inclusive mayor al de 1,5%.

Sin embargo, como se comentó previamente, al realizar el proceso de mezcla se notó como una proporción importante de partículas de plástico se asentaron en el fondo del recipiente por lo que el asfalto no se modificó de manera homogénea. Esto lleva a la conclusión de que el asfalto modificado no presenta una tendencia marcada debido al asentamiento de partículas lo cual significa que las características del producto modificado van a depender de la porción tomada del bache. Por lo cual el asfalto tiene un comportamiento aleatorio respecto a su resistencia a la fatiga debido a la proporción de PET presente en la muestra analizada.

Sin embargo, es de esperar que entre mayor sea el porcentaje de PET utilizado, mayor sea la rigidez de la mezcla, disminuyendo así su resistencia al agrietamiento y su susceptibilidad a la deformación.

Con los datos obtenidos en el ensayo de MSCR y de LAS se realizó un gráfico de diseño balanceado donde se puede visualizar la tendencia de las curvas de acuerdo al porcentaje de

plástico utilizado tanto para la cantidad de ciclos de carga como para el valor del "creep compliance" no recuperable, Jnr3,2 kPa el cual es calculado a partir de la deformación al final del tiempo de recuperación (a los 10 segundos) de cada ciclo dividido entre la carga aplicada de 3,2 kPa y como se comentó previamente se define como el porcentaje de deformación unitaria residual después de la aplicación de carga y recuperación dividido entre el esfuerzo aplicado.

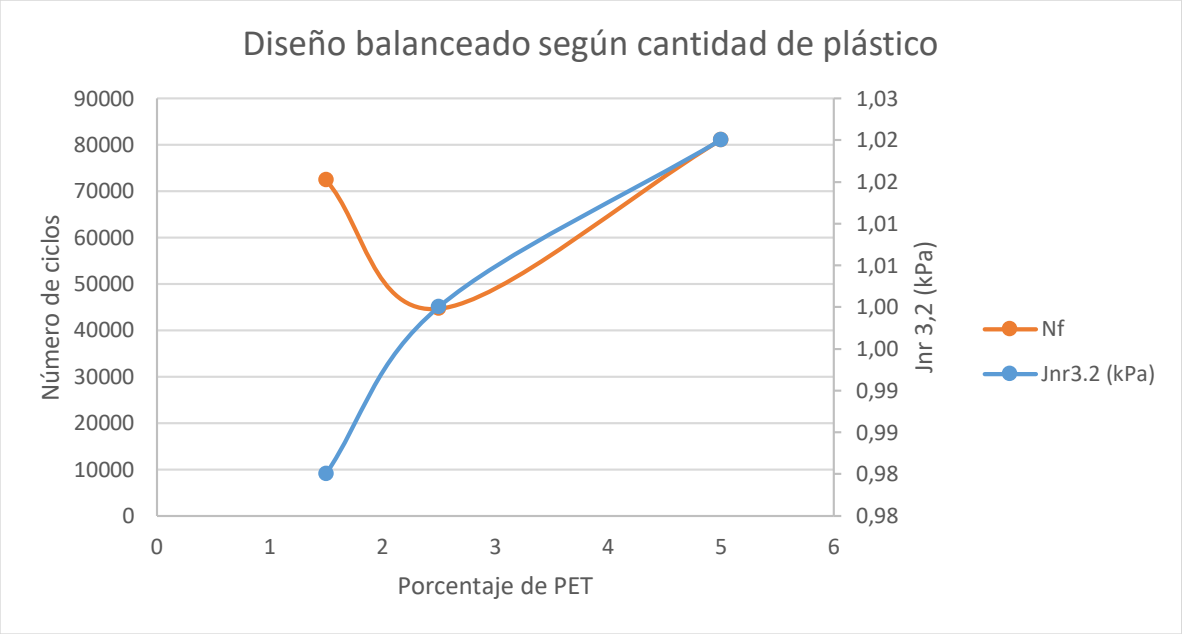

Figura 39. Diseño balanceado según Nf y Jnr3,2 kPa.

Como se aprecia en la figura anterior, el punto de inflexión del número de ciclos y del "creep compliance" se encuentra cerca del 2,5% de PET. Sin embargo, como se comentó previamente, el plástico tendió a asentarse al realizar las modificaciones, por lo tanto, no se considera que los resultados marquen una tendencia fija del comportamiento del asfalto al ser modificado con plástico.

A partir de estos ensayos se determinó que el porcentaje de asfalto a utilizar es de 2,5%. Esto a pesar de que el asfalto modificado con 1,5% de PET presenta mejores características en especial en el ensayo de LAS, sin embargo, se decidió utilizar el 2,5% ya que presenta una mayor proporción de plástico y, a pesar de ser un asfalto más rígido, puede ser utilizado para

el resto de pruebas sin que se comprometan factores como la trabajabilidad o la homogeneidad de la mezcla.

En el caso de la clasificación por grado de desempeño se tiene la misma clasificación para los tres baches por lo cual no se tomó como un criterio de escogencia. Sin embargo, no se empeoró la clasificación del asfalto original por lo cual, al obtener un asfalto de la misma calidad con el adicional de haberle añadido plástico, se considera que sí se puede utilizar para realizar el resto de ensayos.

En el caso del ensayo MSCR se notó que el asfalto modificado con 5% tiene una clasificación menor, lo cual, junto con su trabajabilidad y propensión al asentamiento, hacen que sea un asfalto con peores características para ser utilizado en el resto de pruebas.

Para la prueba de LAS que el asfalto modificado con 2,5% de PET tiene un comportamiento más rígido por lo cual se considera que cumple tanto en expectativas de cantidad de plástico por utilizar, como en propiedades para la mezcla asfáltica.

5.4.4 Propiedades del ligante asfáltico modificado

Una vez definido este porcentaje de PET, se realizaron diversos ensayos para determinar las características de la mezcla asfáltica modificada y realizar una comparación entre ellas y el asfalto original para así determinar el cambio (si existe) en dichas propiedades. Estas se observan en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Resumen de propiedades del ligante asfáltico

Ensayo	T (°C)	Método de ensayo		Asfalto	Resultados			Unidades	Especific.
		AASHTO	ASTM						
Densidad	25	T 228	D 70	Original	1,029	±	0,0006	g/cm^3	-
				Modificado	1,031	±	0,0013		
Gravedad específica	25	T 228	D 70	Original	1,032	±	0,0006	-	-
				Modificado	1,034	±	0,0013	-	
Punto de ablandamiento	-	T53	D36	Original	49,700	±	0,1414	ºC	
				Modificado	51,750	±	0,3536	ºC	
Punto de inflamación para asfaltos	-	T48	D92	Original	355,3	±	3,8	ºC	mín 232
				Modificado	330	±	2,7537	ºC	
Recuperación elástica	-		D 6084	Original	1,500	±	0,0000	%	-
				Modificado	3,333	±	0,2887	%	
Viscosidad dinámica de asfaltos	135	T316	D 4402	Original	544,7	±	3,3	mPa·s	mín 350
				Modificado	648,0	±	2,7	mPa·s	
Viscosidad cinemática de asfaltos	135	T416	D 4402	Original	529,5	±	3,2	cSt	mín 350
				Modificado	628,3	±	2,6	cSt	

Como se observa en el cuadro anterior, propiedades como la densidad, la gravedad específica y el punto de ablandamiento, no presentan una mayor diferencia entre el asfalto original y el modificado, sin embargo, en propiedades como la recuperación elástica y la viscosidad cinemática se observa que el asfalto modificado presenta magnitudes mayores en ambos casos tratándose así de un asfalto más viscoso y con mayor porcentaje de recuperación elástica con respecto al original.

Por lo cual, el uso del plástico en la mezcla asfáltica propició un aumento en la capacidad del pavimento para recuperar su forma inicial y aumenta la viscosidad del asfalto haciendo a su vez que sea más rígido, aumentando su capacidad de resistir deformaciones, pero también la posibilidad de fallar por fatiga.

5.5 Diseño de las mezclas asfálticas

Una vez determinadas las propiedades del asfalto se procedió con el diseño de la mezcla asfáltica. Para ello se utilizaron agregados provenientes de Río Claro con un tamaño máximo nominal de 12,5 mm. Los apilamientos tienen una combinación de agregados tanto cálcicos como silícicos lo cual propicia a que la mezcla asfáltica tenga una combinación de capacidad de resistir fatiga gracias al agregado cálcico y mejorar el entrabamiento en la mezcla y disminuir el pulimiento de agregados gracias al silícico esto con el fin de contrarrestar los efectos negativos de utilizar estos agregados como son el pulimiento o la poca resistencia a fatiga. Por ello, los agregados son combinados homogéneamente en porcentajes iguales los cuales están divididos según su tamaño máximo nominal en cuatro apilamientos; grueso, intermedio A (Cuartilla), intermedio B (Quintilla) y fino.

La granulometría de cada apilamiento se muestra en la Figura 40. Además, en esa misma figura se muestra la granulometría del material de desecho.

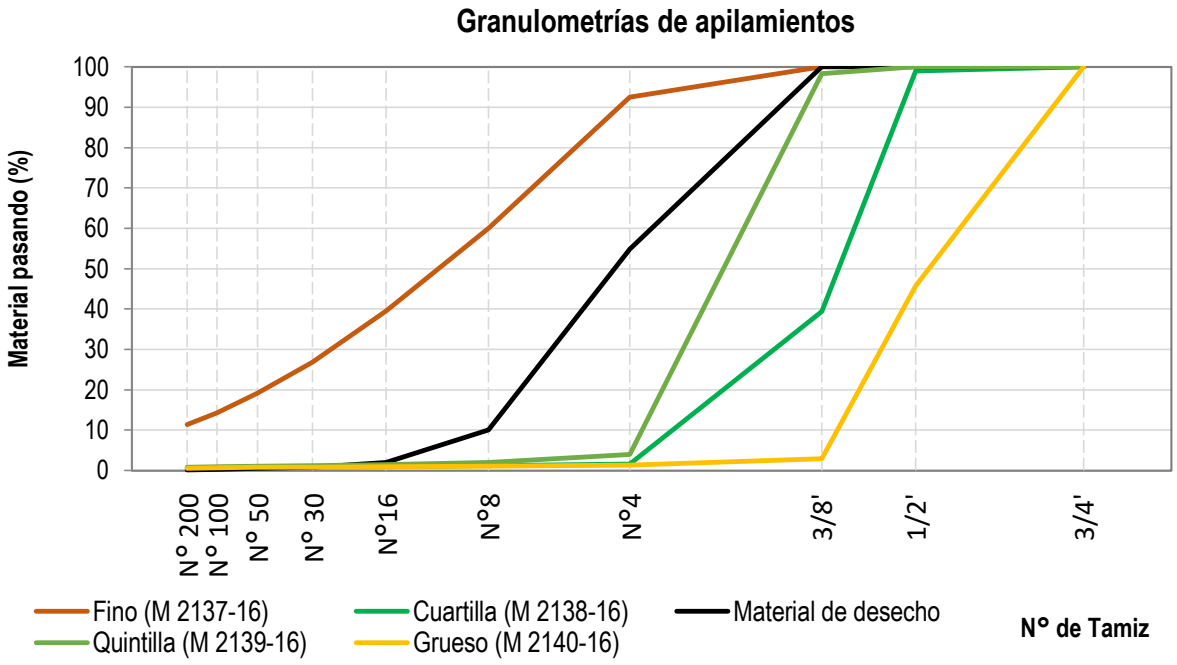

Figura 40. Granulometría de cada apilamiento.

Los porcentajes de combinación de los distintos de apilamientos, así como los puntos de control según la metodología de Superpave se muestran en el Cuadro 12. Estos puntos de control se pueden encontrar en las Tablas 3 y 4 de AASHTO M323, adjunta también en el Anexo A.

En la Figura 41 se muestra el gráfico con la granulometría utilizada para el proyecto. A partir de ella se hicieron los especímenes para el asfalto original y el modificado mediante el método húmedo.

Cuadro 12. Curva granulométrica utilizada en el proyecto

Muestra		2137-16	2138-16	2139-16	2140-16	**TOTAL**		
Dosificación		**47**	**10**	**33**	**10**	**100**	**Puntos de control**	
Malla (US)	**Malla (mm)**	**Fino**	**Cuartilla**	**Quintilla**	**Grueso**	**Mezcla**	**Mínimo**	**Máximo**
3/4"	19,0	100,0	100,0	100,0	100,0	**100,0**	100	
1/2"	12,5	100,0	99,0	100,0	45,8	**94,5**	90	100
3/8"	9,5	100,0	39,4	98,3	2,9	**83,7**		90
N° 4	4,75	92,5	1,7	3,9	1,3	**45,1**		
N° 8	2,36	60,0	1,2	1,9	1,1	**29,1**	28	58
N° 16	1,18	39,5	1,0	1,4	0,9	**19,2**		
N° 30	0,600	26,8	0,8	1,2	0,8	**13,1**		
N° 50	0,300	19,2	0,7	1,0	0,7	**9,5**		
N° 100	0,150	14,3	0,6	0,9	0,7	**7,1**		
N° 200	0,075	11,4	0,5	0,8	0,6	**5,7**	2	10

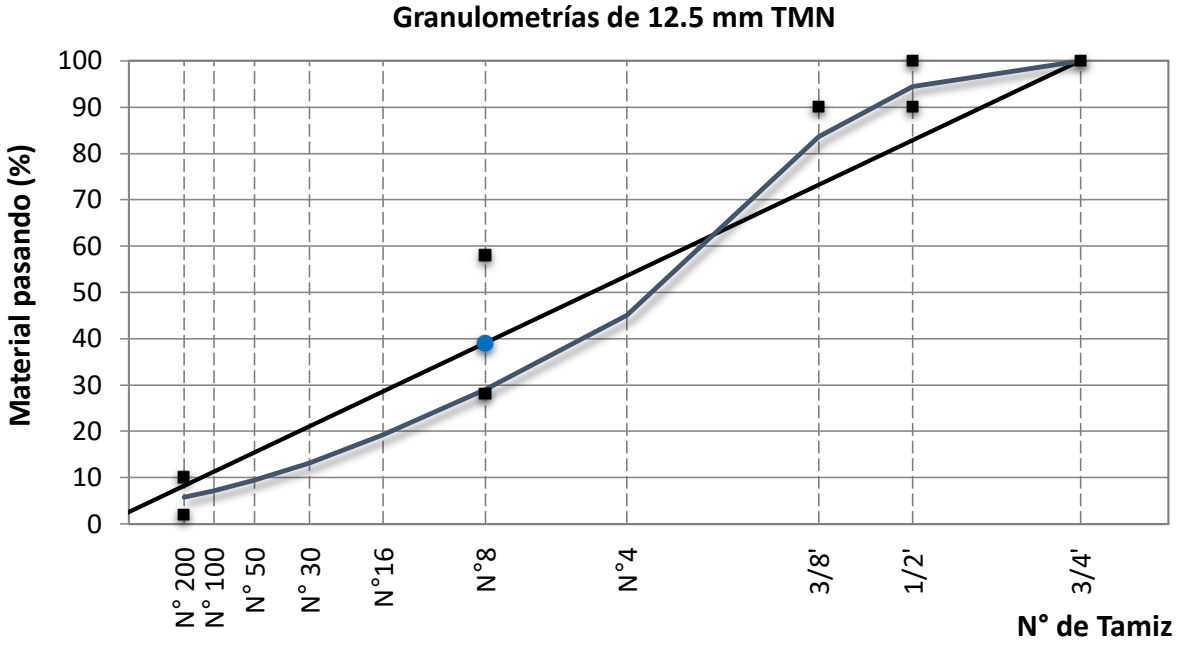

Figura 41. Granulometría para el proyecto

Para el caso del asfalto modificado por el método seco, como se explicó previamente este consiste en sustituir parte del agregado fino por plástico que pasa la malla N° 4. Este material fue tamizado para así saber su granulometría y a partir de ello se procedió a realizar la sustitución de 1% del agregado fino por un 1% de PET.

A continuación, en la Figura 42 se muestra la comparación entre la curva granulométrica patrón y la modificada con PET mediante el método seco.

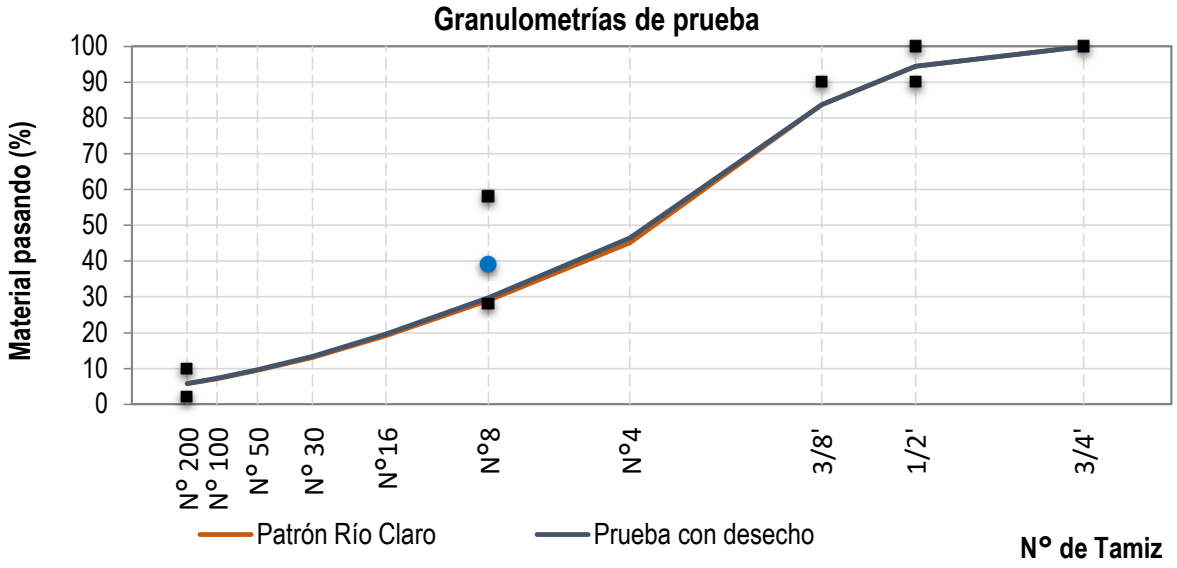

Figura 42. Granulometría con material de desecho.

Como se observa, la diferencia entre ambas curvas granulométricas es mínima, sin embargo, en el diseño del pavimento este lleva diferencias ya que, al tener el plástico una densidad distinta que la del agregado de Río Claro, se realizó una modificación por volumen a las mezclas. Esta se basa corrigiendo según la densidad de cada material para así conocer la verdadera cantidad de plástico necesaria. Esto se notó ya que al añadir el peso del PET sin corregir por volumen, la mezcla presentó problemas de adhesión a la hora de ser compactada dado que, al tener una densidad más baja, se necesita un mayor volumen de plástico para sustituir un peso de agregado determinado.

Una vez determinada la granulometría a utilizar, se procedió a realizar los especímenes utilizando los métodos de incorporación descritos en el Capítulo 4 para así encontrar el punto de contenido de asfalto adecuado.

En el caso de las pastillas de diseño y las máximas teóricas de cada método, se realizó el proceso para obtener un porcentaje de vacíos óptimo de 4% ya que este es el porcentaje teórico de una mezcla compactada tanto por el proceso de colocación y compactación como por el paso vehicular.

Para ello se mezclaron baches con porcentajes de asfalto entre 6% y 6,5%, esperando que el óptimo se encontrara entre estos valores. Una vez obtenidos los vacíos para las dos pruebas se procedió a calcular el punto óptimo con el uso de los gráficos adjuntos en el Anexo B.

A continuación, en el Cuadro 13, se muestran los resultados obtenidos para el asfalto óptimo y demás propiedades tanto para los asfaltos modificados como para el asfalto de control, es decir, sin modificar. Cabe destacar que en el caso del método seco el valor del porcentaje de asfalto óptimo fue de 6,93%. Sin embargo, se hizo el cálculo con 6,83% de asfalto y los resultados estuvieron dentro del rango aceptable en cada propiedad por lo cual se decidió proseguir con este valor para así disminuir en un 0,1% la cantidad de asfalto en la mezcla, esto principalmente pensando en el costo económico que representa para una empresa el asfalto.

Cuadro 13. Resumen de diseño de mezcla para asfaltos modificados y control

Propiedades de la mezcla	**Resultados**			**Requisitos según CR-10**
	Seco	**Húmedo**	**Control**	
% AC (PTM)	6,83	6,52	6,3	-
% VTM	4,2	4	4	4
%VMA	17,5	15,36	14,9	>14
%VFA	74,3	73,84	73,3	65 - 75
Polvo/Asfalto	0,97	1,14	1,2	0.6 - 1.3
Temperatura de mezcla, °C	165-170	180-185	156-161	-
Temperatura de compactación, °C	150-155	160-165	146-151	-

Como se observa, el asfalto modificado mediante el método seco tiene una cantidad de asfalto considerablemente mayor en comparación con los otros dos. Esto implicaría un costo económico mucho más elevado por lo cual las plantas productoras de mezcla asfáltica verían poco factible su aplicación, sin embargo, se procedieron a realizar el resto de pruebas con este porcentaje para conocer más características de esta mezcla y tener una idea de la aplicación de plástico PET mediante este método.

Para el caso del método húmedo se observa que el aumento en el contenido de asfalto es un poco menor al 0,2% por lo cual a pesar de necesitar más asfalto no es una cantidad abultada la necesaria para obtener un 4% de vacíos. Cabe destacar como para ambos métodos la cantidad de asfalto necesaria fue mayor que para el asfalto control.

De investigaciones pasadas realizadas por el LanammeUCR se conoce que los asfalto modificados requieren de una mayor cantidad de asfalto para llegar al punto óptimo. En el caso del método seco, se sustituyó parte del agregado fino por plástico el cual tenía una graduación distinta con una cantidad menor de finos pasando la malla N° 200, por consecuencia, los vacíos que antes se llenaban con polvo y agregado fino se llenaron con asfalto, aumentando así la cantidad necesaria para obtener el punto óptimo.

Esto se refleja de igual manera en la relación polvo asfalto donde en ambos métodos se ve una diminución en este valor. Esto se da ya que la cantidad de polvo disminuyó con respecto al asfalto control por lo cual es necesario aumentar la cantidad de este.

En el caso del asfalto modificado mediante el método húmedo, se nota un aumento además en la temperatura tanto de mezcla como de compactación. Esta es mayor dado que se quería dar una mejor incorporación del PET al ligante y para ello se decidió llevarlo hasta una temperatura mayor al punto de recristalización encontrado mediante el ensayo de calorimetría de barrido diferencial. Además, por investigaciones previas se conocía que para asfalto modificados la temperatura de modificación, mezcla y compactación es mayor que la del asfalto sin modificar.

Sin embargo, como se comentó previamente, por más que se cambiara el tamaño de la partícula de plástico añadida al asfalto, esta no llegó a un punto de fusión con él por lo cual se decidió reducir su tamaño lo máximo posible para así obtener una mezcla lo más homogénea posible. Para futuras investigaciones se recomienda utilizar una temperatura menor para probar si hay diferencia entre ambos casos dado que el aumento de 20 °C aproximadamente implica un costo económico elevado.

Cabe destacar que el porcentaje de vacíos de 4% para los especímenes de diseño y de 7% para el caso del resto de pruebas realizadas a la mezcla asfáltica son obtenidos mediante investigación en asfalto no modificados. Para el caso de los modificados hay poca investigación

por lo cual puede que los puntos óptimos sean distintos, sin embargo, eso queda fuera del alcance del proyecto.

5.6 Ensayos a mezcla asfáltica modificada

Una vez obtenido el punto óptimo de asfalto para los tres métodos, se procedió con la realización de especímenes para las pruebas mencionadas en el marco teórico. Cabe destacar que estas pruebas se hicieron tratando de obtener un porcentaje de vacíos cercano al 7% el cual es el punto óptimo para mezcla colocada y compactada. Para ello se realizaron varios especímenes con el porcentaje de asfalto mostrado en el Cuadro 13 hasta que se obtuvieron valores de vacíos de 7% ± 0,5%.

Los pesos utilizados para cada bache por ensayo junto con la cantidad de giros utilizados en el compactador giratorio de Superpave se encuentran en el

Anexo ***C***.

5.6.1 Resistencia Retenida a la Tensión Diametral (RRTD)

La prueba de resistencia retenida a la tensión diametral se realiza para determinar el daño por humedad de la mezcla asfáltica. En el caso del proyecto se quería determinar si el agregado de la planta de MECO en Río Claro se iba a ver afectado con la presencia de agua ya que se tenía la referencia de estudios pasados que este es susceptible al daño por humedad.

Las pruebas realizadas para los especímenes se diferencias de la norma AASHTO T 283-07 en que los especímenes del proyecto no fueron sometidos a los ciclos de congelamiento. Solamente a la saturación de la mitad de las muestras para así tener una idea del daño por humedad que podrían sufrir en condiciones climatológicas presentes en Costa Rica. Sin embargo, las pruebas realizadas a los especímenes de control sí fueron congeladas ya que estas formaban parte de una investigación mayor del LanammeUCR por lo cual las condiciones en que estas son comparadas son desiguales. Aun así, se considera que el ensayo sirve para determinar la susceptibilidad del daño por humedad bajo las tres clases de mezclas presentes.

A continuación, se muestran los cuadros resumen con los datos respectivos al método húmedo, seco y al asfalto control sometidos a la prueba de resistencia a la tensión diametral.

Cuadro 14. Resumen de prueba de resistencia retenida a la tensión diametral, método húmedo

Método Húmedo						
	Diámetro promedio	Altura promedio	% Saturación	Carga máxima (N)	Tensión (kPa)	Resistencia Retenida
Secos	149,84	95,03	-	16076	718,74	-
	150,63	95,1	-	15306	680,22	
	150,32	94,89	-	17034	760,26	
Promedio	150,26	95,01	-	16138,67	719,74	
Desviación Estándar	0,398	0,107	-	865,7	40,03	
Saturados	149,84	95,03	74,2	14314	639,96	0,862
	150,63	95,1	74,9	13135	583,74	
	150,32	94,89	76,3	14262	636,54	
Promedio	150,26	95,01	75,13	13903,7	620,08	
Desviación Estándar	0,40	0,11	1,07	666,19	31,52	
Método Seco						
	Diámetro promedio	Altura promedio	% Saturación	Carga máxima (N)	Tensión (kPa)	Resistencia Retenida
Secos	149,84	95,24	-	13129	585,69	-
	150,63	95,12	-	13276	589,88	
	150,32	95,14	-	13321	592,98	
Promedio	150,26	95,17	-	13242,00	589,51	
Desviación Estándar	0,398	0,064291005	-	100,4	3,66	
Saturados	149,84	95,11	75,6	12217	545,75	0,925
	150,63	95,04	74,1	12217	543,28	
	150,32	94,91	76,3	12320	549,75	
Promedio	150,26	95,02	75,33	12251,3	546,26	
Desviación Estándar	0,40	0,10	1,12	59,47	3,26	

Control						
	Diámetro promedio	Altura promedio	% Saturación	Carga máxima (N)	Tensión (kPa)	Resistencia Retenida
Secos	149,87	95,01	-	15.004	671	-
	150,37	95,07	-	15.810	704	
	150,18	94,80	-	14.331	641	
Promedio	150,14	94,96	-	15048,33	672,00	
Desviación Estándar	0,252	0,142	-	740,496	31,512	
Saturados	149,87	95,32	76,8	11.920	531	0,836
	150,37	95,00	75,1	12.578	561	
	150,18	95,14	75,2	13.221	589	
Promedio	150,14	95,15	75,70	12573,0	560,33	
Desviación Estándar	0,25	0,16	0,95	650,51	29,01	

Además, en la Figura 43. Comparativa entre carga máxima según método y condición de especímenes se muestra la comparación entre los promedios de resultados de los métodos en estudio junto con su dispersión.

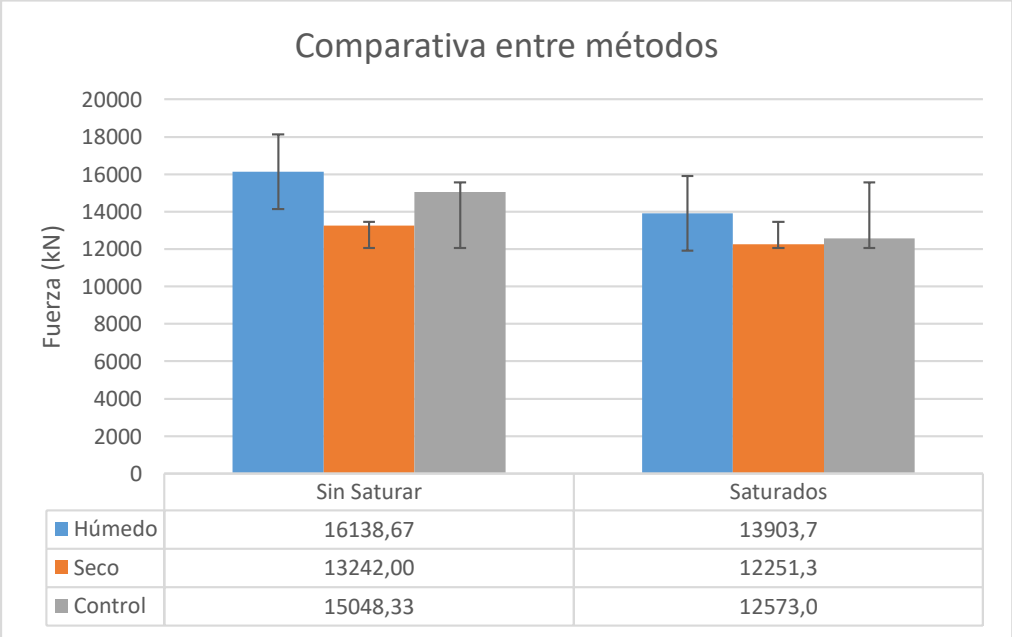

Figura 43. Comparativa entre carga máxima según método y condición de especímenes

Como se puede observar en los cuadros y figuras anteriores, el método húmedo es el que presenta una mayor resistencia a la tensión diametral, soportando cargas de alrededor de

16000 kN para el caso de los especímenes sin acondicionar, mientras que de alrededor de 14000 kN para los especímenes saturados.

A pesar de ser diferencias pequeñas, cabe destacar que el método seco presenta las menores resistencias comparadas con las otras dos. Esto se puede deber a que la combinación del plástico en partículas de tamaños hasta de 4,75 mm con el resto del agregado y del asfalto ya que, al ser un material distinto al agregado, puede generar problemas de adhesión entre partículas y facilitar el deterioro por humedad de la mezcla asfáltica. Además, el plástico tiene una menor resistencia a la tensión en comparación con el agregado, por lo cual, al disminuir la cantidad de agregado y sustituirla por plástico, puede presentarse una disminución en la capacidad de soportar cargas de tensión en la mezcla asfáltica.

Sin embargo, una ventaja en comparación con los otros dos métodos es que presenta un menor daño por humedad ya que al ser sometido al proceso de saturación conservó un 92,5% de su resistencia inicial lo cual puede atribuirse a que el agregado utilizado es más propenso al daño por humedad que el plástico PET ya que este último es hidrofóbico lo cual conlleva a no deteriorarse ante la presencia del agua. Esto dado a que en los otros dos asfaltos se obtuvo un cambio en su resistencia mayor al ser sometido a la humedad.

Sin embargo, como se mencionó previamente, el asfalto control fue sometido también a ciclos de congelamiento por lo cual no se pueden comparar los métodos directamente, sin embargo, los especímenes sin saturar (secos) sí pueden compararse y los saturados sirven para dar una idea general del comportamiento de la mezcla al ser sometida a humedad.

A continuación, se adjunta el análisis estadístico por el método ANOVA para los resultados en estudio.

Cuadro 15. ANOVA y comparación por método Tukey, resistencia retenida

Resistencia Retenida					
Hipótesis nula: Todas las medias son iguales					
Hipótesis alternativa: Al menos una media es diferente					
Nivel de significancia: α= 0,05					
Fuente	Grados de libertad	Suma Cuadrados	Cuadrados Medio	Valor F	Valor p
Método	2	7494314	3747157	6,45	0,032
Error	6	3483176	580529		
Total	8	10977490			
Comparación por método Tukey con 95% de confianza					
	Método	N	Media	Agrupación	
	Húmedo	3	16139	A	
	Control	3	15048	AB	
	Seco	3	13904	B	
Las medias que no comparten una letra son significativamente distintas.					

Como parte del método ANOVA se definió como la hipótesis nula que las medias de los métodos en estudio son iguales. Como se puede observar en el Cuadro 15, el valor de p es menor a 0,05 por lo cual se rechaza la hipótesis nula, dando como resultado que los resultados de los métodos son distintos entre sí con un nivel de significancia del 95% lo cual reafirma los resultados obtenidos previamente. Cabe destacar que la comparación por el método de Tukey determina que las media tanto del método húmedo como del seco son significativamente distintas entre ellas, comprobando así no sólo que el efecto de añadir el plástico cambia las propiedades de la mezcla, sino también que el método de incorporación afecta también la modificación.

5.6.2 Rueda de Hamburgo

El ensayo de rueda de Hamburgo fue realizado para el caso del método húmedo, sin embargo, problemas de software del equipo empleado resultaron en la pérdida de los resultados y la cancelación del ensayo para el método seco por lo cual se decidió remover el ensayo del proyecto de investigación.

Cabe destacar que el ensayo sirve para determinar el daño por humedad que presenta la mezcla asfáltica. Por lo cual, junto con el ensayo de resistencia retenida la tensión diametral, se puede tener una idea de qué tan propenso es a deteriorarse un pavimento.

En el caso de la mezcla control y la modificada mediante el método húmedo, ninguna de las dos alcanzó los veinte mil ciclos de carga a los cuales finaliza el ensayo ya que tuvieron una deformación mayor a 3 mm cuando alcanzaban aproximadamente los trece mil ciclos de cargas por lo cual se comprobó que el tipo de agregado se ve afectado considerablemente por la humedad.

5.6.3 Módulo Dinámico

Para el ensayo del módulo dinámico se mezclaron y compactaron 3 especímenes de 174 mm de altura para cada tipo de método de mezcla de los cuales se extrajeron tres especímenes de 150 mm de altura aproximadamente para realizar la prueba del módulo dinámico y posteriormente el Flow Number.

Los especímenes fueron compactados para obtener un 7 % de vacíos a los cuales se les aplicaron temperaturas de 4,4 °C, 21, 1 °C, 37, 8 °C y 54,4 °C y frecuencias de 25, 10, 5, 1, 0,5, 0,1, 0,01 Hz. Una vez realizada la prueba se procedió a verificar la precisión de los resultados a partir del uso de la Tabla 3 de la norma AASHTO TP 79, adjunta en el Anexo D.

A partir de los datos resultantes se realizaron las curvas en el espacio de Black las cuales representan los valores de módulo bajo y la disminución del ángulo de fase para altas temperaturas.

Como se observa en la Figura 44 y en la Figura 45, el valor de ajuste R^2 es mayor a 0,95 por lo cual tanto para la mezcla de control como para las modificadas se verifica el comportamiento viscoelástico.

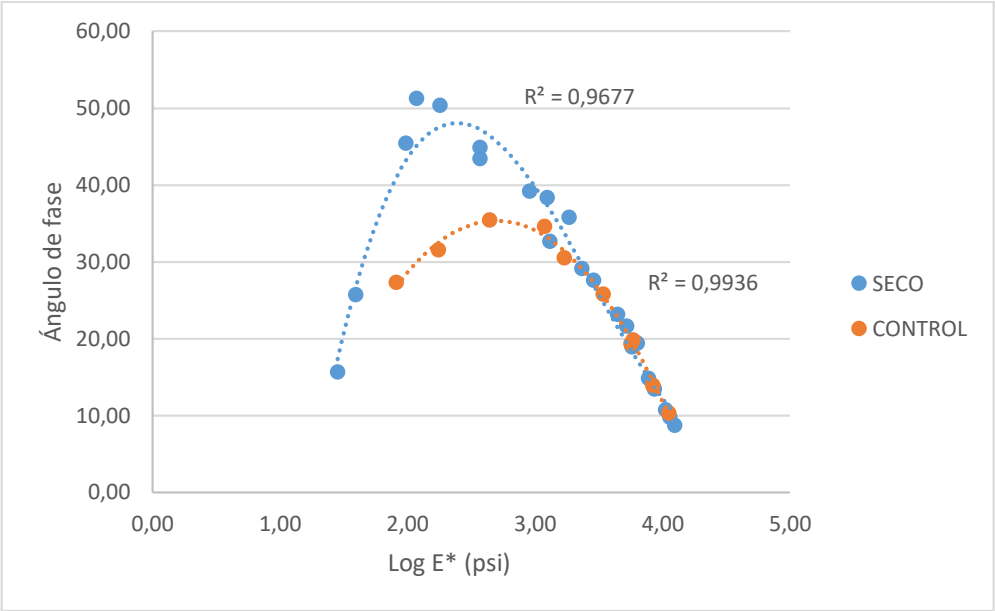

Figura 44. Diagrama de Black método seco vs control.

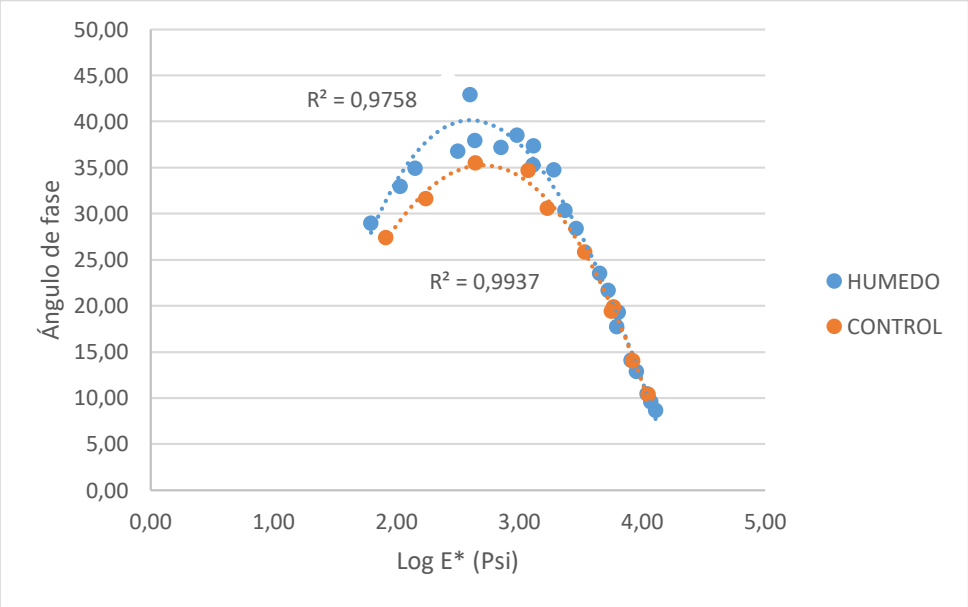

Figura 45. Diagrama de Black método húmedo vs control.

Sin embargo, tanto para el método húmedo como para el seco, se observa una diferencia en cuanto a la tendencia de los valores, ya que en el caso del asfalto control se observa como conforme se varían las temperaturas y las frecuencias el comportamiento de la curva sigue una tendencia. A diferencia de los otros dos métodos donde se ve una ligera dispersión de los valores. Esto se puede deber a una mala interacción entre el material plástico, el agregado y

el asfalto. Así como también a una mala homogenización a la hora de mezclar el agregado con el asfalto y el plástico lo cual produzca un comportamiento distinto.

La sección de las curvas donde se dan las mayores variaciones respecto a la mezcla control es cerca del punto de inflexión en donde se tiene una combinación de temperaturas elevadas y frecuencias cortas lo cual indica que la mezcla asfáltica presenta variaciones en su comportamiento al ser sometida a temperaturas elevadas y vehículos transitando a altas velocidades.

Adicionalmente, a partir de los datos obtenidos se desarrollaron las curvas maestras para cada método junto con la de la mezcla control. Estas se realizaron utilizando el software creado por el LanammeUCR, Pitra-ImoDin. Las figuras con dichas curvas se encuentran en el Anexo F.

A partir de las curvas maestras se desea evaluar la mezcla para distintas temperaturas y frecuencias además de comparar los resultados obtenidos en los distintos métodos de incorporación del PET. Esta comparativa se encuentra en la Figura 46.

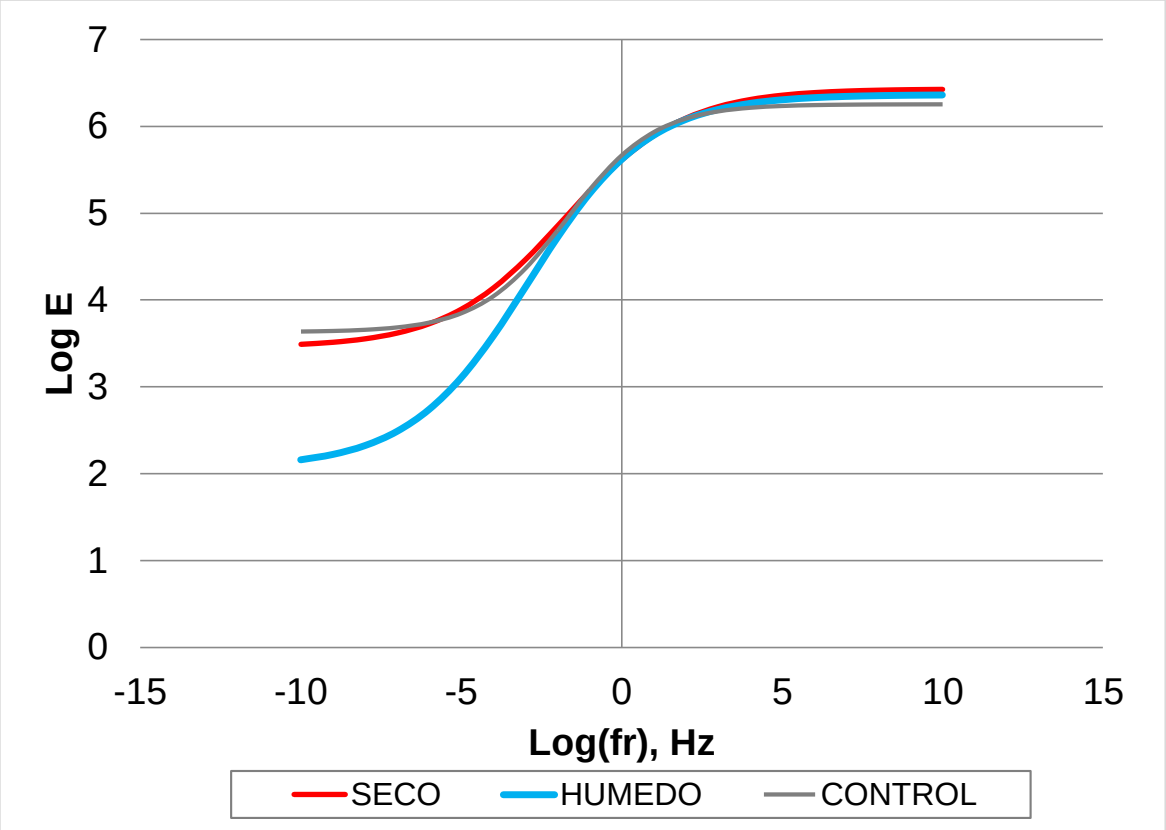

Figura 46. Comparación entre las curvas maestras.

Como se observa en la figura anterior, el comportamiento de las curvas maestras para el método seco y la mezcla de control son prácticamente iguales. Se nota una ligera diferencia para las frecuencias bajas, sin embargo, no llama tanto la atención como la diferencia del método húmedo. Este disminuye el valor de su módulo para las frecuencias bajas en este caso un 50% del valor de la mezcla control lo cual se puede considerar como que la mezcla modificada mediante este método no es apta para temperaturas altas y frecuencias bajas por lo cual no se considera recomendable su uso en climas cálidos y/o en carreteras con un flujo vehicular a altas velocidades.

Aunado a esto si se consideran los resultados obtenidos en la prueba de resistencia retenida y conociendo además que el pavimento sufre daño por humedad, se determina que el asfalto modificado mediante el método húmedo no es apto para su uso en carreteras.

De manera adicional, se realizó un análisis estadístico ANOVA para determinar si las diferencias entre las medias de los módulos son estadísticamente iguales tomando en consideración también las frecuencias y temperaturas del ensayo. Los resultados se adjuntan a continuación en el Cuadro 16.

Cuadro 16. ANOVA y comparación por método Tukey, Módulo Dinámico

Módulo dinámico					
Hipótesis nula: Todas las medias son iguales					
Hipótesis alternativa: Al menos una media es diferente					
Nivel de significancia: α= 0,05					
Fuente	Grados de libertad	Suma Cuadrados	Cuadrados Medio	Valor F	Valor p
Método	2	1,958	0,9789	0,83	0,45
Error	60	110,948	1,8491		
Total	62	112,906			
Comparación por método Tukey con 95% de confianza					
	Método	N	Media	Agrupación	
	Húmedo	21	5,194	A	
	Control	21	5,155	A	
	Seco	21	4,802	A	
Las medias que no comparten una letra son significativamente distintas.					

Al igual que en ANOVA anterior, se definió como hipótesis nula que las medias sin iguales. Al realizar el análisis se obtuvo un valor p de 0,45 por lo cual se determina que no se cuenta con suficiente información para concluir que las medias de los métodos son distintas entre sí. Esto

se reafirma con los resultados obtenidos en la Figura 46 ya que, como se comentó previamente, no se nota una mayor diferencia entre las curvas maestras, con la excepción del método húmedo donde para frecuencias bajas se distancian los valores del resto sin embargo, hay una clara tendencia en los resultados lo cual, mediante el análisis estadístico realizado determina que no se cuentan con datos suficientes para determinar si son distintas.

5.6.4 Flow Number

El ensayo de Flow Number, como se comentó previamente, consiste en obtener el número de ciclos para el cual el esfuerzo axial permanente llega a su valor mínimo de cambio. Una vez obtenido este valor, se procede a utilizar el

Cuadro 5 para determinar dentro de qué rango de carga de ejes equivalentes se encuentran los especímenes según su método de modificación.

A continuación en el Cuadro 17 se adjuntan los resultados obtenidos para la prueba de Flow Number para los dos métodos de incorporación en estudio y la mezcla asfáltica de control.

Cuadro 17. Resultados ensayo de Flow Number

	Húmedo 2,5% PET (del asfalto)			**Seco 1,5% PET**			**Control 0% PET**		
Especimen	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Flow Number (ciclos)	76	106	116	79	33	43	124	128	124
Promedio	99			52			125		
Desviación Standard	20,82			24,19			2,31		

Siguiendo la clasificación adjunta en el

Cuadro 5, las tres mezclas asfálticas entran dentro de la categoría de 3 a 10 millones de ESALS.

Como se había indicado, previamente en el ensayo de MSCR, se había obtenido esta clasificación para el asfalto modificado con un 2,5% de PET por lo cual se observa la relación entre los resultados de las pruebas siendo esta la misma también para la mezcla modificada mediante el método seco y la de control.

Además, en el Cuadro 6**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran los resultados graficados para los especímenes de cada método.

A partir de esta figura y el Cuadro 17, se observa como el diferencia entre los datos obtenidos está dentro de los rangos permitidos establecidos en la norma AASHTO TP79 lo cual constata que los especímenes son representativos de cada método.

Por otro lado, en la Figura 47 se adjunta el resultado del promedio de Flow Number por cada método.

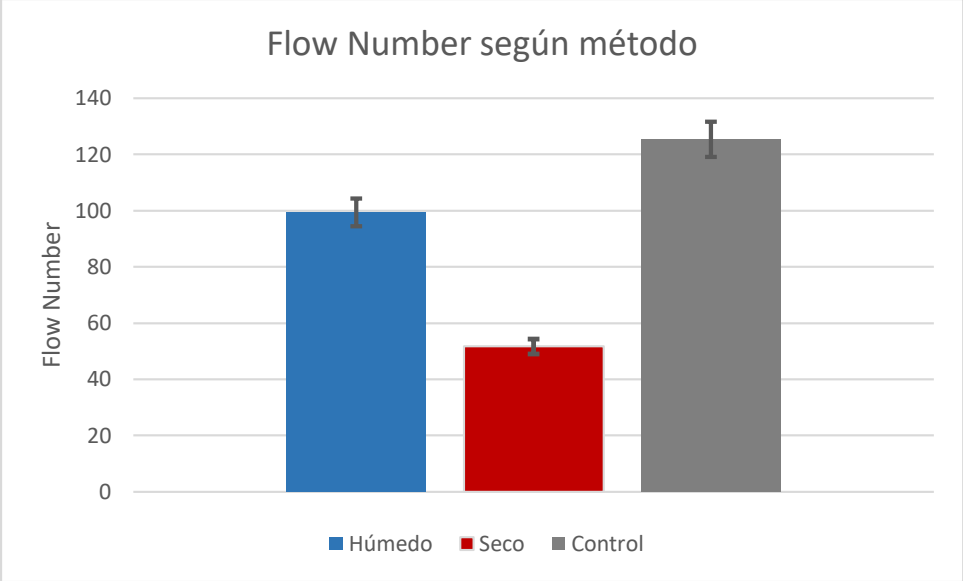

Figura 47. Flow Number según método

Se observa como el asfalto control presenta un valor considerablemente mayor a las mezclas modificadas, siendo inclusive más del doble del método seco. Sin embargo, por clasificación todos se encuentran dentro del mismo rango siendo este el rango para vehículos muy pesados de acuerdo con el ensayo de MSCR rondando entre los 3 y 10 millones de ejes equivalentes.

Aun así, se nota como la mezcla asfáltica sin modificar tiende a ser más resistente a esfuerzos de fatiga mientras que la mezcla modificada mediante el método seco se comporta como una mezcla más rígida, disminuyendo su tolerancia al agrietamiento.

Esto se ve complementado por los resultados obtenidos previamente donde la mezcla modificada con plástico tiende a rigidizarse más, haciéndola una mezcla óptima para resistir deformaciones, pero propensa al agrietamiento por fatiga y al daño por humedad dado el agregado utilizado.

Adicionalmente y, al igual que en los dos ensayos anterior, se realizó el ANOVA para comparar estadísticamente los resultados. Éste se adjunta a continuación en el Cuadro 18. ANOVA y comparación por método Tukey,

Cuadro 18. ANOVA y comparación por método Tukey, Flow Number

Flow Number					
Hipótesis nula: Todas las medias son iguales					
Hipótesis alternativa: Al menos una media es diferente (					
Nivel de significancia: α= 0,05					
Fuente	Grados de libertad	Suma Cuadrados	Cuadrados Medio	Valor F	Valor p
Método	2	8375	4187,4	12,27	0,008
Error	6	2048	341,3		
Total	9	10423			
Comparación por método Tukey con 95% de confianza					
	Método	N	Media	Agrupación	
	Húmedo	3	125,33	A	
	Control	3	99,3	A	
	Seco	3	51,7	B	
Las medias que no comparten una letra son significativamente distintas.					

Para este ensayo se concluyó que al menos una de las medias es distinta lo cual al comparar mediante el método Tukey se reafirma ya que, como se nota tanto en el cuadro anterior como en el Cuadro 17, el método seco es el que presenta valores menores a los otros dos. Sin embargo, para el caso de este ensayo, todos entran dentro de la misma clasificación a pesar de que estadísticamente exista una diferencia significativa entre ellos.

5.6.5 Fatiga en cuatro puntos

El último ensayo realizado para evaluar el desempeño de mezclas asfálticas modificadas con PET fue el de la viga de fatiga. Este, como se comentó previamente sirve para determinar la vida de fatiga de especímenes de asfalto de 380 mm de largo por 50 mm de espesor y 63 mm de ancho.

El ensayo puede desarrollarse según dos métodos; esfuerzo controlado o deformación controlada. Para el trabajo de investigación se procedió con la segunda opción donde se tomaron deformaciones controladas de 400 y de 600 microstrains en donde el ensayo termina cuando la viga alcanza el 50% de su rigidez inicial.

A continuación, se observan los resultados obtenidos para los dos métodos de modificación junto con las vigas de control tanto para 400 como para 600 microstrains de deformación.

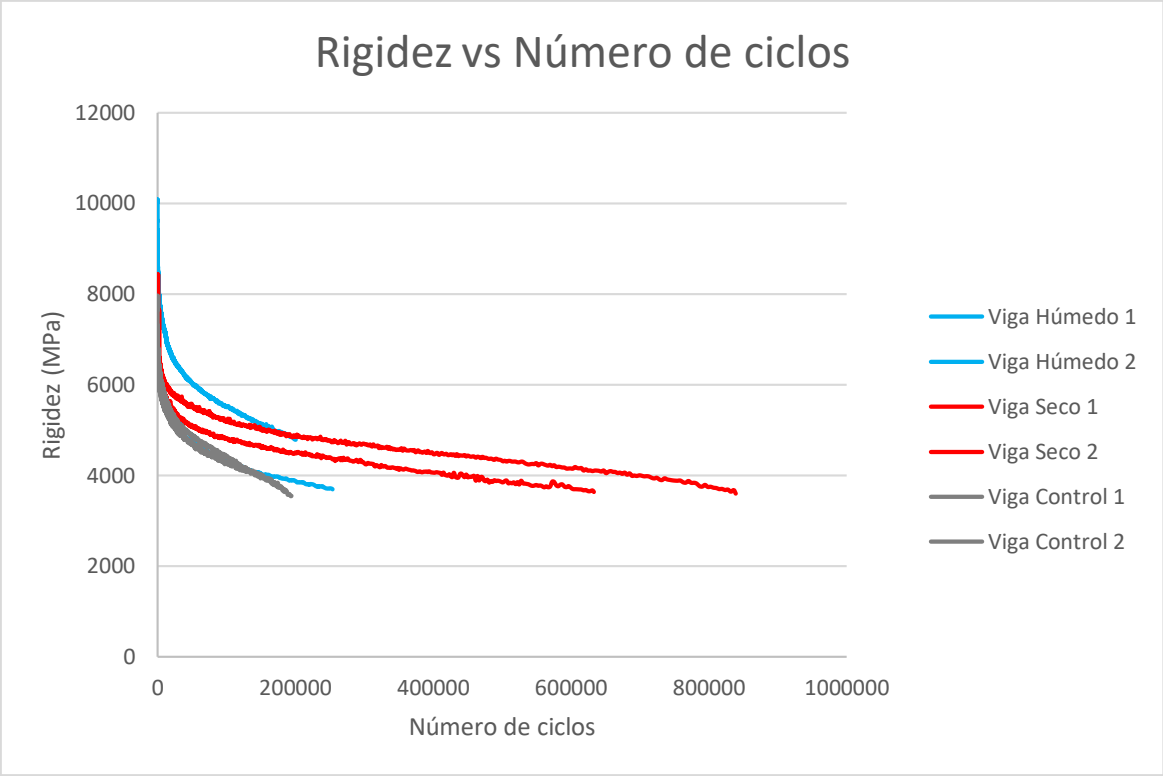

Figura 48. Ensayo de vigas de fatiga a 400 ustrains de deformación

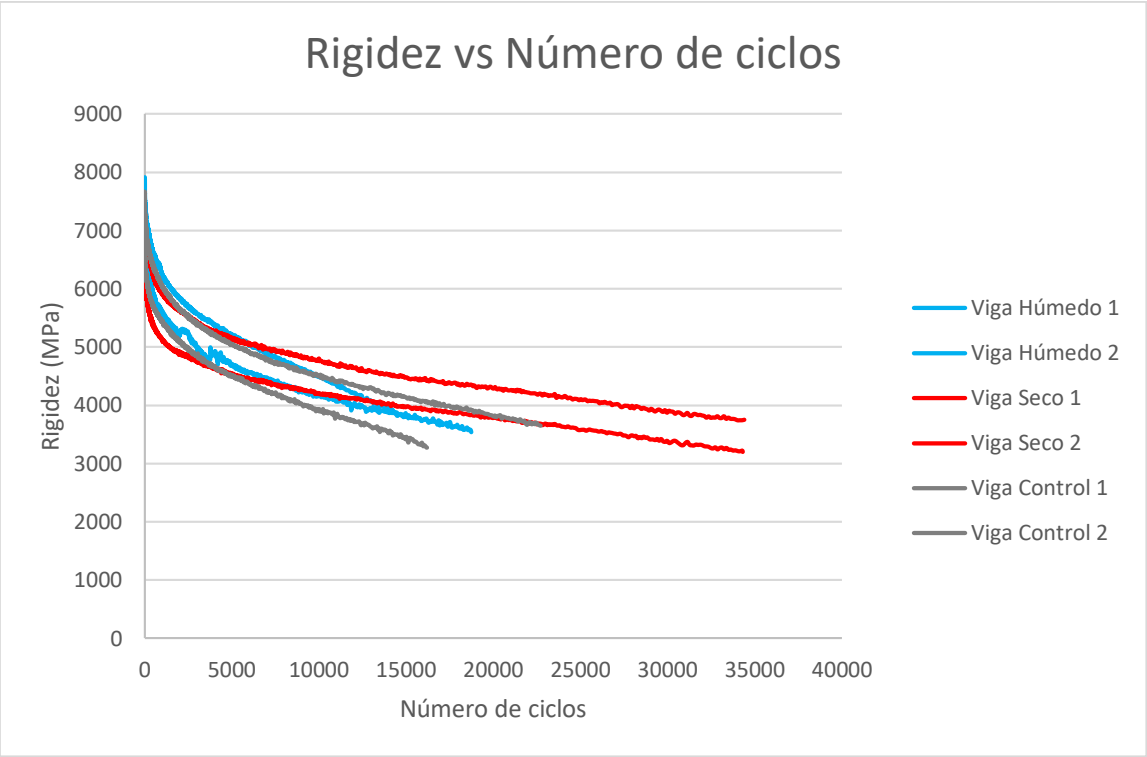

Figura 49. Ensayo de vigas de fatiga a 600 ustrains de deformación

Como se observa, las vigas de 400 microstrains de deformación llegan al 50% de rigidez inicial en una cantidad de ciclos mucho mayor a las de 600. Esto se da ya que, al mantener una deformación de 600 microstrains se le aplica una carga inicial mayor la cual hace que las vigas se deterioren de manera más acelerada en comparación con las otras.

Las deformaciones a las cuales son sometidas las vigas tratan de simular el comportamiento que tendría una carpeta asfáltica sometida a cargas, sin embargo, se diferencia en que las vigas no se llevan al punto de fluencia, se trata de controlar su deformación dentro de un límite menor a este punto para así sólo evaluar su rigidez.

Además, se observa que para ambos casos las vigas modificadas mediante el método seco tienen una rigidez mucho mayor en comparación con las otras, resistiendo casi el doble de cantidad de ciclos para alcanzar la mitad de la rigidez inicial para el caso de 600 y hasta cuatro veces más en el caso de la deformación a 400 microstrains.

Este comportamiento se ve reflejado también en el resto de pruebas donde la mezcla asfáltica modificada con PET tiene una mayor rigidez, disminuyendo así las deformaciones que podría presentar, sin embargo, aumentando el efecto del agrietamiento por fatiga.

Además, como se muestra en las figuras anteriores, el efecto de un esfuerzo cada vez menor con una deformación constante produce que el módulo de elasticidad disminuya con respecto al número de ciclos. Esto se da ya que para que las vigas mantengan la deformación propuesta estas deben de reducir el esfuerzo aplicado ya que conforme pasa el número de ciclos, las vigas disminuyen el valor de su módulo lo cual conlleva a hacerlas más propensas a deformarse, es decir, pierden rigidez, por lo cual el comportamiento es el esperado.

A continuación, en la Figura 50 se muestra la diferencia entre los métodos húmedo o seco respecto a la cantidad de ciclos necesarios para alcanzar las deformaciones establecidas.

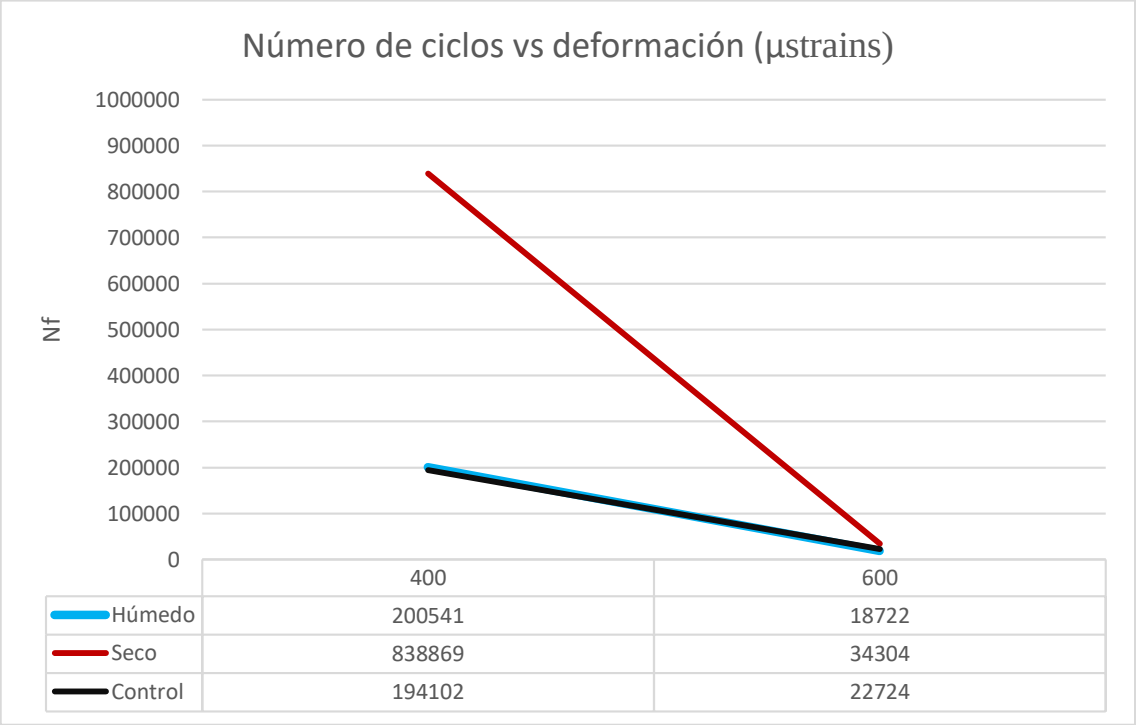

Figura 50. Número de ciclos vs deformación

Como se observa, el método seco presenta la mayor pendiente respecto a la cantidad de ciclos necesarios para alcanzar las deformaciones establecidas mientras que el asfalto modificado mediante el método húmedo presenta un comportamiento prácticamente igual al del asfalto control. De esto se puede concluir que la modificación del asfalto mediante el método seco hace que la mezcla asfáltica se vuelva más rígida lo cual afecta su desempeño ya que, una vez que sufre una deformación de 400 microstrains, su resistencia a la deformación disminuye a una tasa mucho mayor que el asfalto control o el modificado mediante el método húmedo.

Asimismo, en la Figura 51 y la Figura 52 se observa el comportamiento del ángulo de fase respecto al número de ciclos de carga tanto para 400 como para 600 microstrains de deformación.

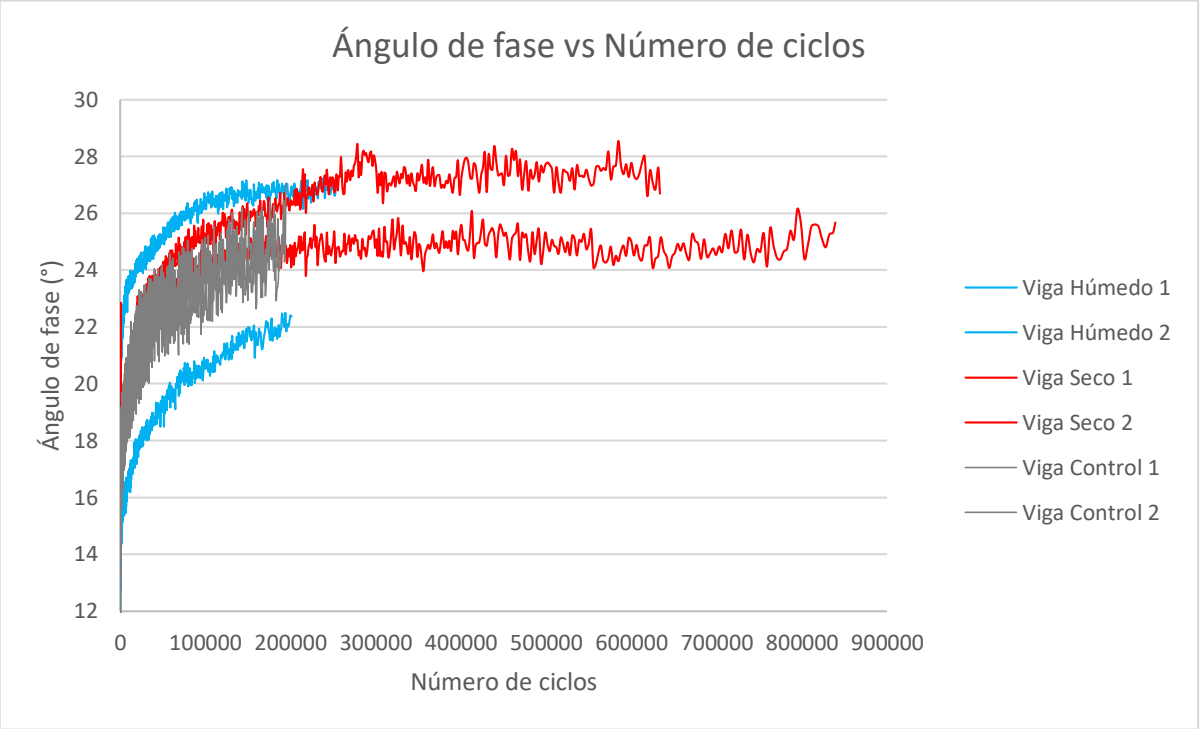

Figura 51. Comportamiento del ángulo de fase para 400 ustrains

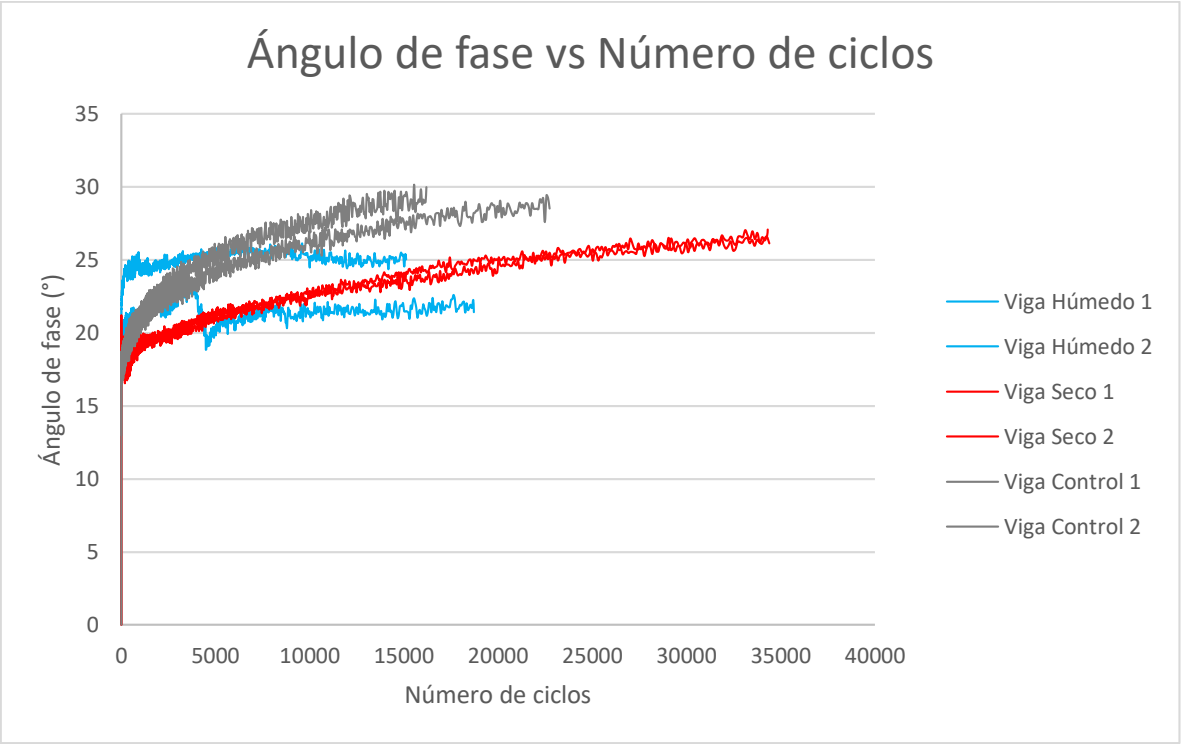

Figura 52. Comportamiento del ángulo de fase para 600 ustrains

Como se muestra en las figuras anteriores, el comportamiento del ángulo de fase es inversamente proporcional al de la rigidez y el módulo elástico. Esto se da ya que, al disminuir su rigidez, la mezcla asfáltica va a tender a aumentar la diferencia entre la respuesta del pavimento al esfuerzo y su deformación. Esta diferencia entre las fases de respuesta es lo que se conoce como el ángulo de fase por lo cual, al ser cada vez mayores significa que la mezcla asfáltica va perdiendo rigidez lo que a su vez aumenta la tendencia a producir deformaciones ya que se tendrían menores valores del módulo dinámico.

Como es de esperar, el asfalto modificado mediante el método seco presenta una mayor cantidad de ciclos necesarios para alcanzar el valor del ángulo de fase respectivo para el 50% de la rigidez inicial lo cual reafirma la diferencia entre este método y los otros dos donde el asfalto modificado mediante el método húmedo no tiene una mayor diferencia respecto a la mezcla asfáltica de control. Esto no quiere decir que no sea un asfalto de calidad, sin embargo, el costo asociado a la modificación del asfalto mediante este método requiere que presente beneficios de desempeño mayores para así considerar modificarlo. De lo contrario, los costos de molienda, incorporación, temperatura y tiempo de mezclado no justificarían la poca diferencia en desempeño respecto al control.

De la misma forma se realizó el ANOVA con los datos obtenidos para los distintos métodos para determinar si hay una diferencia significativa entre los datos. Los resultados se muestran en el Cuadro 19

Cuadro 19. ANOVA y comparación por método Tukey, Fatiga en 4 puntos

Fatiga					
Hipótesis nula: Todas las medias son iguales					
Hipótesis alternativa: Al menos una media es diferente (					
Nivel de significancia: α= 0,05					
Fuente	Grados de libertad	Suma Cuadrados	Cuadrados Medio	Valor F	Valor p
Método	2	52822433	26411217	38,97	0,0001
Error	4621	2976730760	677762		
Total	4623	3029553194			
Comparación por método Tukey con 95% de confianza					
	Método	N	Media	Agrupación	
	Húmedo	1465	5671,9	A	
	Control	1465	5410,8	B	
	Seco	1465	5487	C	
Las medias que no comparten una letra son significativamente distintas.					

Como se observa en el cuadro anterior de igual manera que en las figuras comparando la rigidez contra el número de ciclos para cada método, los datos son significativamente distintos. En este caso, el ANOVA determinó un valor de p de prácticamente cero ya que las diferencias entre los métodos son notables. Cabe destacar además la comparativa por el método de Tukey donde las medias de los métodos fueron clasificadas en tres grupos ya que son significativamente distintas, reafirmando así los resultados obtenidos.

En términos generales la mezcla asfáltica modificada mediante el método seco presenta mejores características con respecto al método húmedo y a la mezcla asfáltica de control, sin embargo, para esta combinación de agregados y plástico se tuvieron problemas con el proceso de compactación ya que los especímenes tendían a perder su forma original si no se dejaban enfriar una vez finalizada la compactación. Además, como se puede observar en la última columna del Anexo C, también se requirieron de una mayor cantidad de giros del compactador para alcanzar la altura determinada para cada pastilla. Estos dos factores afectarían su colocación en carreteras ya que se necesitarían una mayor cantidad de pasadas del compactador para lograr la altura deseada lo cual implica un aumento en el costo económico asociado además de que la carretera se mantendría cerrada al tránsito por un mayor período

de tiempo hasta que la mezcla asfáltica se enfríe lo suficiente por lo cual se deberá de considerar una planificación adicional a la hora de colocarla ya sea como capa superior o intermedia.

Sin embargo, desde el punto de vista ambiental implicaría una alternativa interesante para el plástico desechado ya que, tomando en consideración el valor de la máxima teórica encontrada para el diseño por el método seco, se tendría una densidad de 2,37 toneladas de asfalto por metro cúbico. Suponiendo un valor de mezcla asfáltica colocada de 2,3 ton/m^3 y un carril de 3,5 metros de ancho, 0,05 metros de espesor y 1000 metros de largo, se necesitarían de 175 metros cúbicos de mezcla asfáltica compactada lo cual equivale aproximadamente a 400 toneladas de mezcla asfáltica compactada por kilómetro.

Tomando en cuenta que se está utilizando un 1% de PET en sustitución del agregado fino, de la misma forma como fueron calculados los baches para las distintas pruebas mostradas en el Anexo C, se necesitarían de 9250 gramos de plástico PET por tonelada de asfalto, lo cual, para un kilómetro de carretera, equivale aproximadamente a 3700000 gramos por kilómetro de carretera. Si una botella de PET promedio de 500 ml pesa aproximadamente 25 gramos se necesitarían de 148000 botellas por kilómetro para un carril de 3,5 metros de ancho con una carpeta de 5 cm de espesor. Es decir que, en una carretera de dos carriles por sentido bajo estas condiciones, se podrían utilizar casi 600000 botellas de plástico PET por kilómetro lo cual significaría un aporte importante al reciclaje desde el punto de vista de la ingeniería civil.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

A continuación, se detallan las conclusiones del trabajo de investigación siendo estas divididas en tres secciones, el uso del plástico como modificante, la modificación del asfalto y los especímenes de mezcla asfáltica modificada y su comparación con una mezcla con asfalto sin modificar.

Plástico PET

El uso de plástico para la modificación de asfalto conlleva un análisis profundo de sus propiedades y cuál podría ser su aporte al desempeño de la mezcla asfáltica. Para ello primeramente se debe de tener claro que el objetivo de su uso es mejorar o mantener las características de desempeño del asfalto original lo cual también incluye el aspecto económico.

Por ello, al realizar las pruebas de caracterización del plástico utilizado se debe de tomar en cuenta que, en caso de utilizar el PET para modificar una mezcla asfáltica, se van a intentar abaratar los costos lo más posible por lo cual no se va a contar un proceso de esterilizado o lavado profundo por lo cual se van a tener partículas de otras sustancias dentro de la mezcla lo cual va a alterar en proporciones pequeñas las propiedades de la misma.

En cuanto a las pruebas realizadas, se obtuvo una temperatura de recristalización de 160 °C la cual junto con estudios pasados donde el asfalto modificado utiliza una temperatura de mezclado y compactación mayor a la usual, se decidió utilizar una temperatura de modificación de 180-185 °C para la modificación por el método húmedo, lo cual generaría un aumento en costos de producción del asfalto ya que implica un proceso adicional el cual además significa un aumento en temperatura respecto a la temperatura de mezclado. Sin embargo, se esperaba que el plástico no se derritiera ya que este tiene una temperatura de fusión mayor a los 200 °C la cual no justificaría el uso del PET para modificar asfalto ya que su costo sería demasiado elevado.

El uso de plástico PET en mezclas asfálticas debe de contemplar que se contaría con una variedad de productos hechos de este material con diferencias no sólo en cuanto a su contenido, sino también a su proceso de fabricación, reciclado y lavado por lo cual a la hora de hacer una modificación a gran escala estos factores pueden alterar el desempeño esperado del asfalto.

Modificación del asfalto

En la modificación mediante el método húmedo, en las tres modificaciones de asfalto realizadas no se produjo una pérdida en su clasificación por grado de desempeño a la hora de envejecer el asfalto lo cual concluye que este mantiene sus propiedades al ser sometido a temperaturas y presiones elevadas. Sin embargo, si se notó una disminución en la clasificación según el ensayo MSCR para el asfalto modificado con 5% de PET lo cual, junto con problemas de dispersión y de incorporación al asfalto se decidió dejar por fuera esta dosis como posible porcentaje de modificación.

En cuanto a los otros dos se tuvo una clasificación MSCR de VH, es decir, de vehículos pesados lo cual junto con el resto de pruebas realizadas confirmar que el asfalto modificado con plástico PET tiende a rigidizar la mezcla asfáltica disminuyendo así su porcentaje de deformación como se vio en la prueba de LAS.

En este método de modificación se decidió usar un 2,5% de PET ya que parte de las metas del proyecto era poder utilizar la mayor cantidad de plástico en la modificación, sin embargo, es importante tener en cuenta la forma y tamaño del agente modificante ya que al modificar el asfalto con el plástico triturado en partículas menores a 1 cm^2 de área se sedimentó todo el material dejando el asfalto sin modificar en la parte superior de la mezcla. Es por ello que se decidió moler el plástico para así reducir aún más su área y homogenizar la mezcla asfáltica lo más posible. Sin embargo, esto también a gran escala conllevaría un paso extra en el proceso de fabricación de mezcla asfáltica lo cual aumentaría los costos de producción tanto por el proceso de molienda del plástico como por el mezclado ya que este tomó un tiempo aproximado de dos horas y media y aun así no se logró mantener la mezcla homogenizada si ésta no se mantiene en movimiento.

En cuanto a la modificación mediante el método seco se reducen los costos de producción respecto al método húmedo ya que este no requiere de tiempo de mezclado y se realiza a una temperatura menor, además, no se requiere mantener la mezcla en movimiento ya que se modifica la granulometría utilizada, lo cual no implica un costo adicional en comparación con el proceso de modificación de asfalto mediante el método húmedo

Además, para el método seco se debe de tener en consideración realizar la modificación por volumen a la hora de calcular los baches de mezcla. Esto dado que la diferencia en densidades

del agregado con respecto al PET hacen que se necesite un mayor volumen de plástico para sustituir una determinada cantidad de agregado.

Mezcla asfáltica modificada y ensayos realizados

En cuanto a las mezclas asfálticas se concluyó que el agregado utilizado es un factor que influyó considerablemente en los resultados ya que este, tanto para las mezclas modificadas como para la de control, presenta gran susceptibilidad al daño por humedad lo cual se podría haber evitado utilizando otro agregado.

Aun así, las pruebas realizadas determinaron que el asfalto modificado mediante el método seco requiere de un mayor porcentaje de asfalto en comparación con las demás mezclas, lo cual conllevaría un aumento en los costos de producción incrementado además por la cantidad de pasadas del equipo compactador ya que, como se mencionó en el análisis, los especímenes realizados para este método requirieron de una mayor cantidad de ciclos de carga y un mayor tiempo de reposo previo a ser manipulados.

Además, se concluye que el asfalto modificado mediante el método húmedo no tiene por qué ser mezclado a una temperatura de 185 °C ya que las partículas de plástico no se incorporan a la mezcla por lo cual se podría estudiar el uso de una menor temperatura para así determinar si se obtiene o no el mismo resultado.

En cuanto a los ensayos realizados a la mezcla asfáltica se destaca como el método seco presenta un menor daño por humedad respecto al método húmedo en la prueba de resistencia retenida a la tensión diametral a pesar de tener la menor resistencia de las tres mezclas. Esto se puede deber al efecto del plástico en sustitución del agregado fino el cual no sufre daño al ser saturado, pero disminuye la capacidad de resistencia de carga por ser un material de menor densidad y resistencia que el agregado utilizado.

En el ensayo de Módulo Dinámico se observa como el método húmedo es el que presenta una disminución en su calidad respecto a las otras dos mezclas ya que para temperaturas elevadas y/o frecuencias bajas de carga disminuye el valor de su módulo considerablemente lo cual le resta beneficios en cuanto a su desempeño.

En términos generales, tanto en los ensayos de Módulo Dinámico como Flow Number y fatiga en cuatro puntos, el método seco presentó mejores resultados en comparación con el método húmedo y el asfalto control, resultando en una mezcla asfáltica más rígida, capaz de resistir un

mayor número de ciclos de carga, pero una vez deformado la cantidad de ciclos necesarios para alcanzar el 50% de su rigidez inicial disminuye considerablemente.

Aun así, en caso utilizar el asfalto modificado mediante el método seco en carretera se estarían reciclando una cantidad considerablemente alta de botellas de plástico PET. En donde, como se mostró anteriormente, se realizó el cálculo y se estimó que para un carril de 3,5 metros de ancho y colocando una capa de 5 cm de espesor, se podrían reciclar aproximadamente 150000 botellas de PET de 330 ml.

Por lo tanto, en el caso de una carretera de dos carriles por sentido con una carpeta de 5 cm de altura se estarían utilizando alrededor de 600000 botellas de PET de 330 ml por kilómetro lo cual significaría una cantidad bastante elevada de plástico al que se le estaría dando un uso alternativo, ayudando así a reducir la contaminación y alterando las propiedades de la mezcla asfáltica al hacerla más rígida.

Se debe de tener en consideración que el uso de materiales de desecho como agente modificador en pavimentos es una opción principalmente para reducir la contaminación. Difícilmente un material de desecho va a tener un efecto como el de los aditivos creados con el fin específico de mejorar alguna característica ya sea del asfalto, agregado o la mezcla.

Además, los ensayos y parámetros de aceptación utilizados son los conocidos para materiales convencionales por lo cual no necesariamente sean los mejores para materiales de desecho. Por lo cual factores como el porcentaje de vacíos óptimo puede que sea distinto para una mezcla modificada en comparación con una sin modificar.

El hecho de que la modificación implique un proceso adicional en la elaboración de mezclas asfálticas hace que la idea sea poco atractiva para las empresas por lo cual, el uso de materiales de desecho sólo va a ser posible si existe una iniciativa a nivel gubernamental, de lo contrario no va a ser rentable, aunque implique un beneficio ambiental.

6.2 Recomendaciones

Dentro de las recomendaciones y cambios que se podrían realizar, se recomiendan hacer pruebas mediante el método húmedo reduciendo la temperatura de modificación ya que se notó como el plástico no se mezcló adecuadamente con el asfalto sin importar el tamaño de partícula por lo cual se podrían realizar pruebas a una temperatura igual a la del asfalto control lo cual implicaría una disminución importante en los costos de producción y así determinar si esos 20 °C de diferencia significan un cambio en las propiedades del asfalto modificado. También se podría cambiar la velocidad de agitación y el tiempo de mezclado ya que estas variables también podrían incidir en las características del asfalto modificado.

Además, se recomienda realizar un análisis costo beneficio del uso de plástico en carreteras, especialmente empleando el método seco para así conocer si se justifica el costo de modificar el asfalto mediante este método. Esto también tomando en consideración otra recomendación la cual sería realizarlo para distintos porcentajes de plástico ya que éste puede sustituir otras cantidades de agregado e incluso utilizarlo en un tamaño distinto con una curva granulométrica diferente. También, se sugiere el uso de algún aditivo que ayude tanto a disminuir su rigidez como la cantidad de asfalto necesaria ya que este es uno de los principales aumentos en el costo de la mezcla lo cual no ayuda a que las empresas se interesen en este tipo de alternativas.

Se recomienda también hacer un análisis del desempeño de la mezcla modificada con el mismo porcentaje de plástico, pero con otro agregado que tenga mejores características ante el daño por humedad para así determinar si la mezcla puede ser utilizada como una capa superficial o como una subcapa capaz de reducir las deformaciones del pavimento.

Además, se deben de realizar otras pruebas tanto para el plástico como para la mezcla asfáltica para así conocer mejor su desempeño. Se debe de hacer la prueba de Rueda de Hamburgo para así tener una mejor idea de si el daño por humedad presentado en las mezclas fue solamente producto del agregado o si el uso de plástico PET disminuye su resistencia a este tipo de daño.

Así mismo, se puede construir un tramo de prueba y utilizar equipos para realizar ensayos acelerados en pavimentos como es el caso del HVS (Heavyweight Vehicle Simulator) del LanammeUCR para así tener una mejor idea del desempeño a largo plazo de una mezcla asfáltica modificada mediante este método.

7. BIBLIOGRAFÍA

Abdelaal, M., Sobahi, T., & Makki, M. (2008). *Chemical degradation of Poly(Ethylene Therephtalate).* International Journal of Polymeric Materials.

Aguiar Moya, J., & Villegas Villegas, E. (Enero de 2012). Alternativas verdes a los modificantes de asfalto comerciales: Bolsas de banano - Parte 1 (Modificación del ligante). *Boletín Técnico PITRA*.

Aguiar Moya, J., Salazar Delgado, J., Villegas Villegas , R. E., Leiva Villacorta , F., Loría Salazar , L., & Navas Carro, A. (s.f.). *Uso de materiales de desecho como modificantes de asfalto en Costa Rica.* San José.

American Association of State Highway and Transportation Officials. (s.f.). *AASHTO PP 60-14.*

Astorga, Y. (15 de Julio de 2016). Las 7 razones por las que necesitamos una nueva Ley de Aguas. *GobiernoCR*. Obtenido de http://gobierno.cr/las-7-razones-por-las-que-necesitamos-una-nueva-ley-de-aguas/

Awwad, M. T., & Shbeeb, L. (2007). *The Use of Polyethylene in Hot Asphalt Mixtures.* Amman, Jordania: Science Publications.

Cook, P. (14 de Noviembre de 2015). *Say Hello to the Latest Technology in Civil Engineering: PlasticRoad*. Obtenido de Industry Tap: http://www.industrytap.com/say-hello-latest-technology-civil-engineering-plasticroad/32735

Coomarasamy. (1998). *Performance of Scrap Tire Rubber Modified Aspahlt Paving Mixes.* Ohio: Rubber Division.

Cruz Abarca, L. M., & Porras Méndez, A. (2015). *El Efecto de Materiales de Desecho en el Comportamiento de la Mezcla Asfáltica.* San José.

dos Santos Pereira, A. P., Prado da Silva, M. H., Lima Júnior, É. P., Anderson dos Santos, P., & James Tommasini, F. (2017). *Processing and Characterization of PET Composites Reinforced With Geopolymer Concrete.* Río de Janeiro.

Elizondo, F. (2018). Presentaciones del curso: Laboratorio de Pavimentos.

Elizondo, F., Salazar Delgado, J., & Villegas Villegas, E. (2010). *Análisis reológico de asfaltos modificados.* San José.

Federal Highwat Administration (FHWA). (2011). *Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice .* Virginia.

Federal Highway Administration. (1995). *Background of Superpave Asphalt Mixture Desing and Analysis.* Springfield, Virginia.

Federal Highway Administration. (2002). *Superpave Asphalt Mixture Design.* Washington, DC.

Fraga Grueiro, L. (2001). *Estudio cinético , dinamomecánico y termogravimétrico del sistema epoxídico BADGE (n=0) / m-XDA, mediante las técnicas de análisis térmico : DSC, DMA y TGA. Construcción de un diagrama TTT".* Alicante.

González, M. (2010). *Caminos básicos y reciclado de pavimentos con la tecnología de asfalto espumado.* Santiago de Chile.

Govind Prasad, S., De, A., & De, U. (2011). Structural and Optical Investigations of Radiation Damage in Transparent PET Polymer Films. *International Journal of Spectroscopy*.

Granados, A. (2013). *Carbono Neutralidad: Avances y Desafíos de cara al año 2021.* San José.

Johnson, C. (2010). *Estimating Asphalt Binder Fatigue Resistance Using an Accelerated Test Method.* University of Winsonsin-Madison.

Kwabena Appiah, J., Berko-Boateng, V. N., & Ama Tagbor, T. (2016). *Use of waste plastic materials for road construction in Ghana.* Kumasi, Ghana: Elsevier.

LanammeUCR. (2013). *Evaluación del desempeño de mezclas asfálticas en caliente con y son la adición de polímeros modificantes para mezclas típicas en Costa RIca.* San José.

LanammeUCR. (2015). *Metodología de diseño de mezclas asfálticas en caliente para Costa RIca.* San José.

LanammeUCR. (2015). *Propuesta de asfaltos para Costa RIca.* San José.

LanammeUCR. (2016). *Avance proyectos de investigación para el segundo trimestre del 2016.* San José.

LanammeUCR. (s.f.). *Equipos de laboratorio de infraestructura vial.* San José.

Loría Salazar , L., & Leiva Padilla, P. (Octubre de 2012). Efecto de las propiedades del agregado extraído de un pavimento asfáltico reciclado (RAP) en el cálculo de los vacíos en el agregado mineral (VMA). *Boletín Técnico, PITRA, 3*(33).

Morales, S. M. (2013). *Evaluación del Comportamiento a la Fatiga de una Mezcla de Concreto MR-4,5 MPa con adición de Fibras de Polipropileno.* San José.

Nasir, S., Ayoub , M., Zafarullah, S., Bilal, A., Amjad, B., & Kakar, E. (2014). *Effective Use of Waste Plastic as Bitumen Strength Modifier.* Quetta: Horizon Research Publishing.

Nurul Asyiqin Binti Ahmad, R. P. (s.f.). *The Use of Plastic Waste in Bituminous Mixture for the Road Pavement.* Malaysia.

Pacheco Flores, C., Delgado Alamilla, H., & Garnica Anguas, P. (s.f). *Análisis de propiedaedes de desempeño de un ligante asfáltico.* Ciudad de México.

Pérez, L. M. (2012). *Estudio del uso del polietileno tereftalato (PET) como material de restitución en suelos de baja capacidad de carga.* México D.F.

Plastic Technologies Institute. (2 de Marzo de 2019). *Plastic Technologies*. Obtenido de https://www.plastictechnologies.com

Rodríguez Castro, E. (7 de Abril de 2016). Uso de Polvo de Caucho de Llantas en Pavimentos Asfálticos. San José, Costa Rica.

Rodriguez, E., & Villegas, E. (2012). *Caracterización de polímeros aplicando el método termogravimétrico.* San José: UCR.

Salazar, J. (2008). *Evaluación de la factibilidad del uso en Costa Rica de polímeros modificantes de asfalto incorporados en planta.* San José.

Salazar, J. (2013). *Métodos de ensayo para la determinación cualitativa y cuantitativa del contenido de polímero presente en ligantes asfálticos modificados.* San José: UCR.

Suriñach, S., Baro, M., Bordas, S., Clavaguera, N., & Clavaguera-Mora , M. (1992). *La calorimetría diferencial de barrido y su aplicación a la Ciencia de Materiales.* Barcelona.

Vasudevan, R. (Julio de 2006). Utilization of waste plastics for flexbile pavements. *Indian Highways (Indian Road Congress)*, Vol 34, No. 7.

Villegas Villegas , R. E., Aguiar Moya , J., Loría Salazar, L., & Navas Carro, A. (s.f). *Procedimientos para la caracterización de ligantes asfálticos .* San José.

Webb, H. K., Arnott, J., Crawford, R. J., & Ivanova, E. P. (2012). *Plastica Degradation and Its Environmental Implications with Special Reference to Poly(ethylene therephtalate).* Hawthorn, Victoria.

8. ANEXOS

Anexo A. Puntos de control en granulometría

Tabla 404-6 Puntos de control y PCS para las granulometrías Superpave® (Tablas 3 y 4, AASHTO M 323, 2012)

TMN	37,5 mm			25,0 mm			19,0 mm			12,5 mm			9,5 mm			4,75 mm		
Malla (mm)	PCS	Mín	Máx	PCS	Mín	Máx	PCS	Mín	Máx	PCS	Mín	Máx	PCS	Mín	Máx	PCS	Mín	Máx
50,0		100																
37,5		90	100		100													
25,0			90		90	100		100										
19,0						90		90	100		100							
12,5									90		90	100		100			100	
9,5	47											90		90	100		95	100
4,75				40			47								90		90	100
2,36		15	41		19	45		23	49	39	28	58	47	32	67			
1,18																	30	60
0,075		0	6		1	7		2	8		2	10		2	10		6	12

Figura A. 1. Puntos de control para granulometrías Superpave

Anexo B. Gráficos utilizados para el diseño del pavimento según método.

Método Húmedo

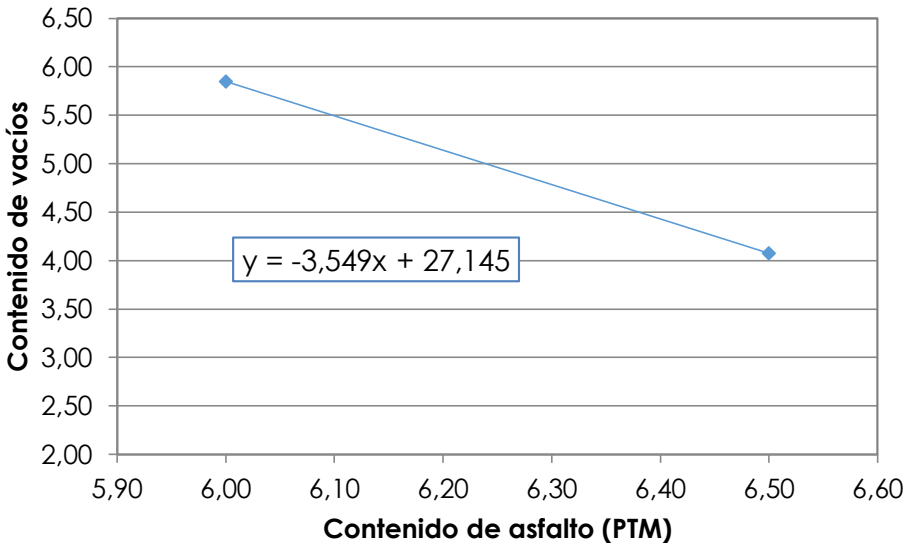

Figura B. 1 Contenido de asfalto vs vacíos, método húmedo

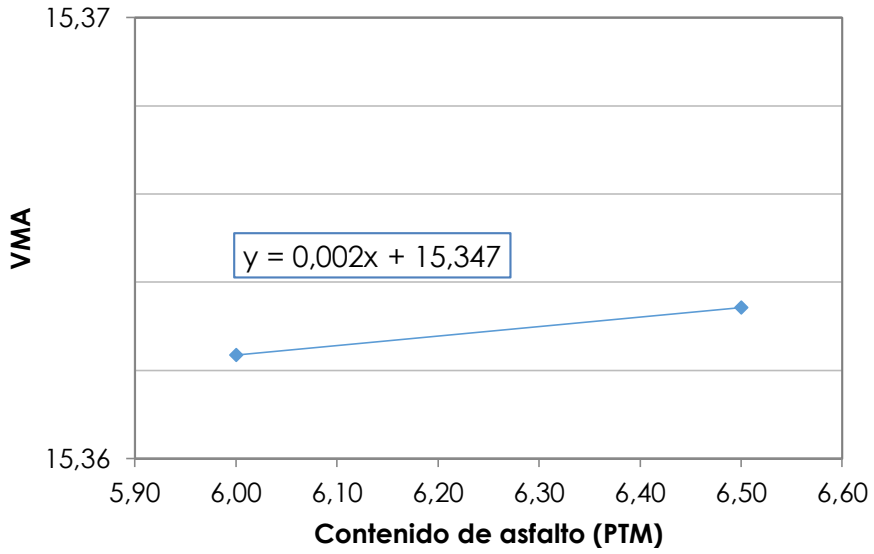

Figura B. 2 Contenido de asfalto vs VMA, método húmedo

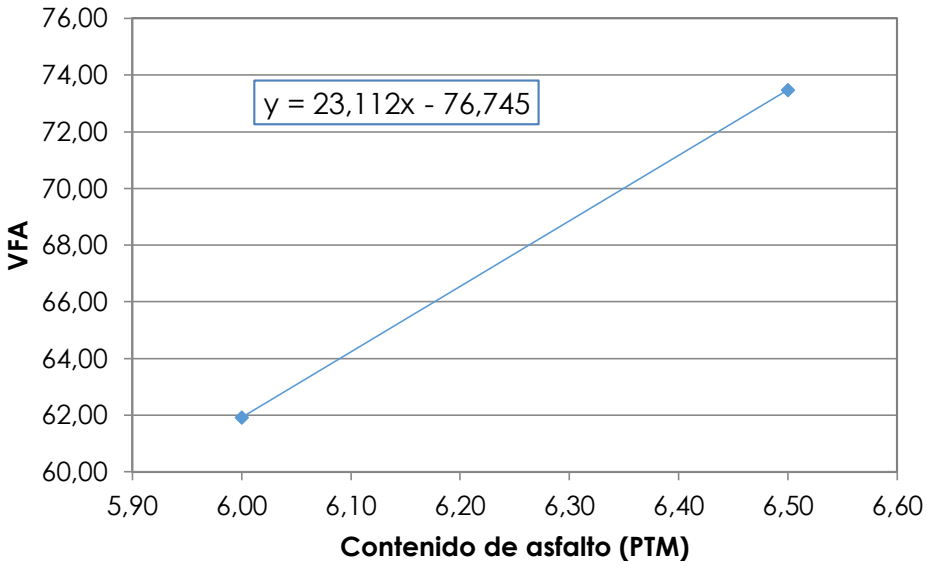

Figura B. 3 Vacíos rellenos de asfalto vs contenido de asfalto, método húmedo

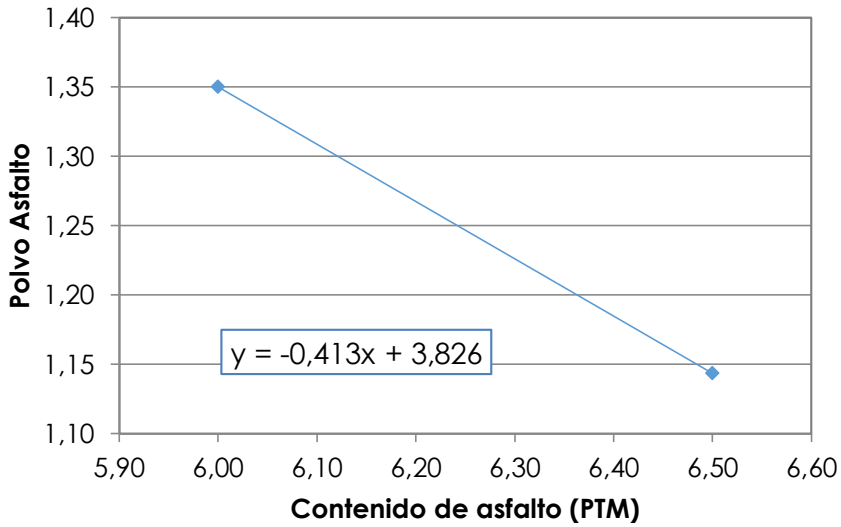

Figura B. 4 Relación polvo asfalto vs contenido de asfalto, método húmedo

Método Seco

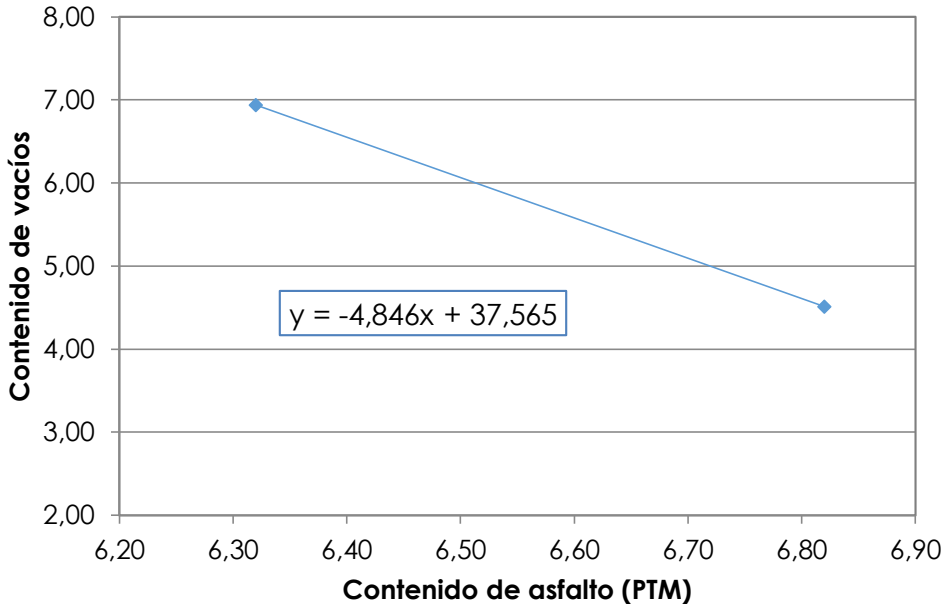

Figura B. 5 Contenido de asfalto vs vacíos, método seco

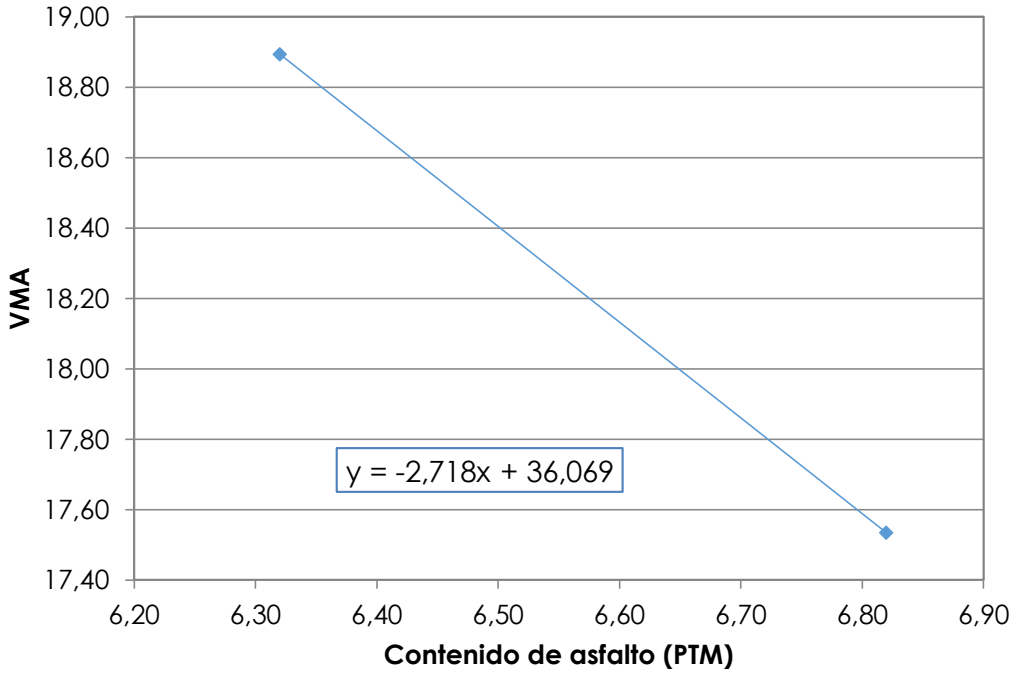

Figura B. 6 Contenido de asfalto vs VMA, método seco

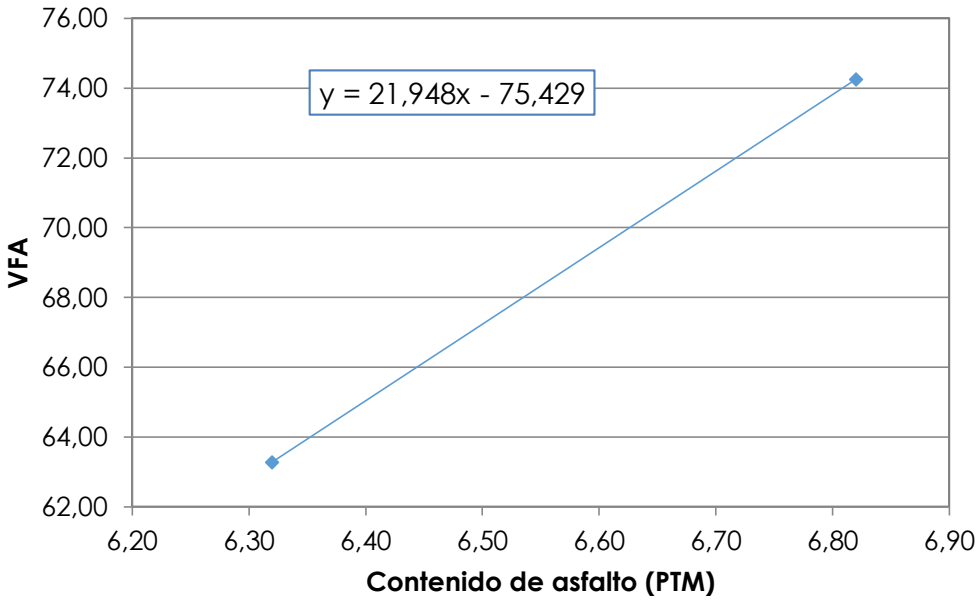

Figura B. 7 Vacíos rellenos de asfalto vs contenido de asfalto, método seco

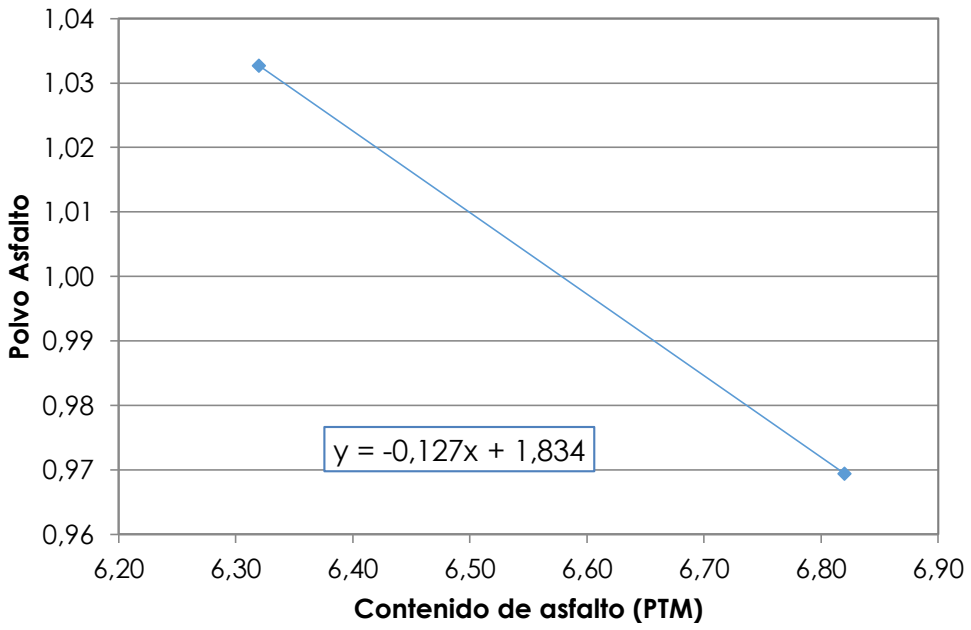

Figura B. 8 Relación polvo asfalto vs contenido de asfalto, método seco

Asfalto control

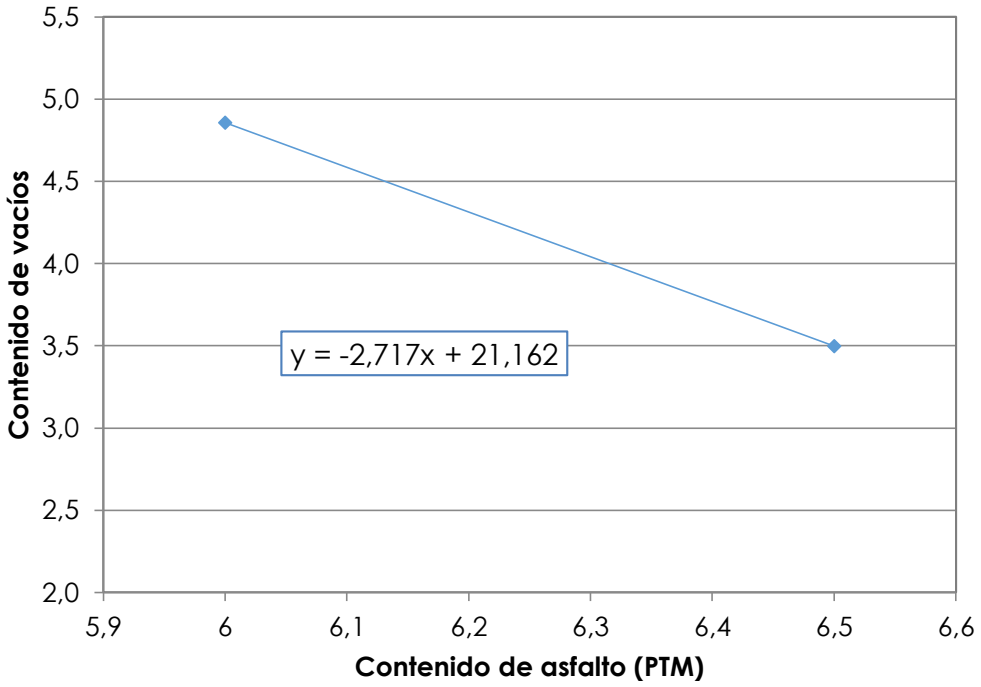

Figura B. 9 Contenido de asfalto vs vacíos, asfalto control

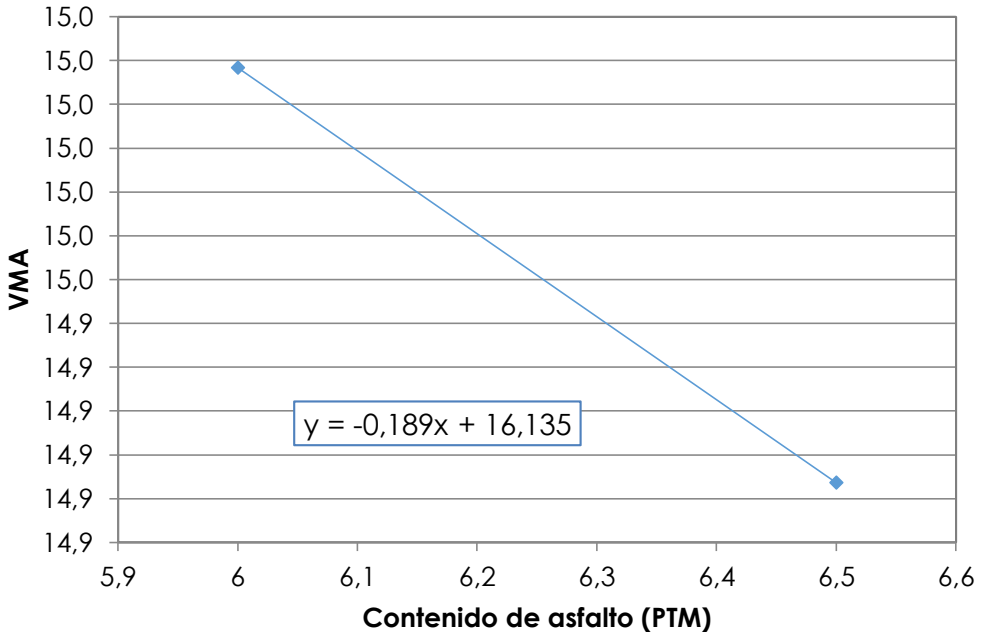

Figura B. 10 Contenido de asfalto vs VMA, asfalto control

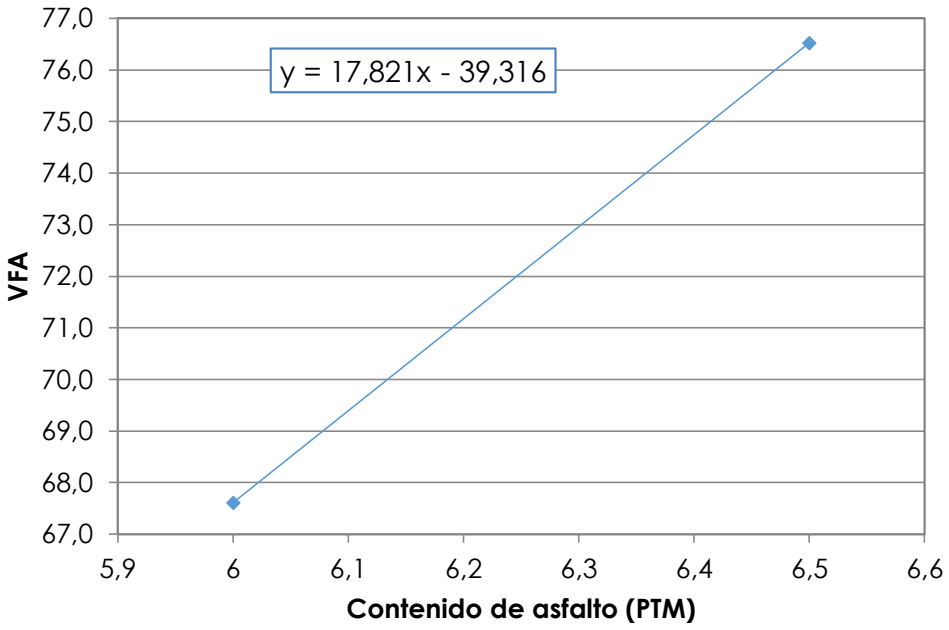

Figura B. 11 Vacíos rellenos de asfalto vs contenido de asfalto, asfalto control

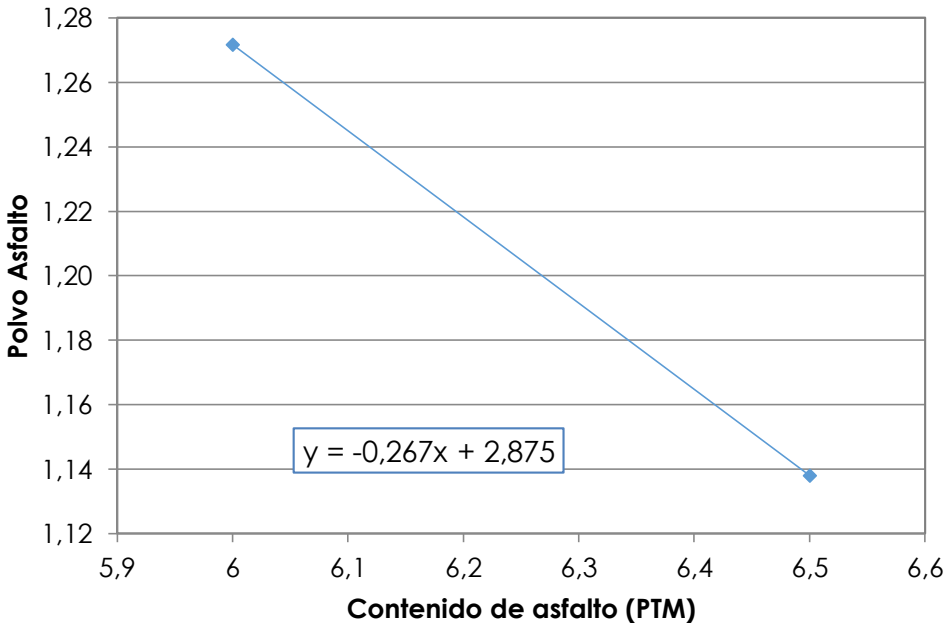

Figura B. 12 Relación polvo asfalto vs contenido de asfalto, asfalto control

Anexo C. Pesos de baches utilizados para los especímenes de mezcla asfáltica.

Método húmedo

Tipo de prueba	Peso de la mezcla	Apilamiento	%	Peso agregado (g)	Promedio N°. de Giros
Diseño	4635	Fino	47	2036	100
		Intermedio A	10	433	
		Intermedio B	33	1430	
		Grueso	10	433	
Máxima Teórica	2090	Fino	47	918	-
		Intermedio A	10	195	
		Intermedio B	33	645	
		Grueso	10	195	
Resistencia Retenida	3700	Fino	47	1626	52
		Intermedio A	10	346	
		Intermedio B	33	1141	
		Grueso	10	346	
Módulo Dinámico	3320 X 2	Fino	47	1459	37
		Intermedio A	10	310	
		Intermedio B	33	1024	
		Grueso	10	310	
Rueda de Hamburgo	2340	Fino	47	1028	85
		Intermedio A	10	219	
		Intermedio B	33	722	
		Grueso	10	219	
Fatiga	3915 X 6 Peso usado: 22650	Fino	47	1721	17
		Intermedio A	10	366	
		Intermedio B	33	1208	
		Grueso	10	366	

Método seco

Tipo de prueba	Peso de la mezcla	Apilamiento	Porcentaje de peso total	Peso agregado (g)	Peso corregido (g)	N° de Giros
Diseño	4565	Fino	46	1934	2053	100
		Intermedio A	10	430	428	
		Intermedio B	33	1418	1280	
		Grueso	10	430	428	
		PET	1	43	43	
Máxima Teórica	2090	Fino	46	896	896	-
		Intermedio A	10	195	195	
		Intermedio B	33	643	643	
		Grueso	10	195	195	
		PET	1	19	19	
Rueda de Hamburgo	2390	Fino	46	1024	1003	118
		Intermedio A	10	223	223	
		Intermedio B	33	735	735	
		Grueso	10	223	223	
		PET	1	22	22	
Resistencia Retenida	3680	Fino	46	1577	1544	82
		Intermedio A	10	343	343	
		Intermedio B	33	1132	1132	
		Grueso	10	343	343	
		PET	1	34	34	
Módulo Dinámico	3320 X 2	Fino	46	1423	1393	90
		Intermedio A	10	309	309	
		Intermedio B	33	1021	1021	
		Grueso	10	309	309	
		PET	1	31	31	
Viga de Fatiga	3917 x6 Peso utilizado: 22522	Fino	46	1678	1648	22
		Intermedio A	10	365	365	
		Intermedio B	33	1204	1204	
		Grueso	10	365	365	
		PET	1	37	36	

Anexo D. Precisión requerida para el ensayo de Módulo Dinámico.

Table 3—Single-Operator Precision for Dynamic Modulus and Phase Angle

Nominal Maximum Aggregate Size, mm	Average |E*|, MPa	Dynamic Modulus						Phase Angle					
		s_r%	Acceptable Range for n Specimens, % of Average					s_r°	Acceptable Range for n Specimens, degrees				
		%	n=2	n=3	n=4	n=5	n=6		n=2	n=3	n=4	n=5	n=6
9.5	≥137 to <200	15	43	51	55	60	61	1.8	5.1	6.0	6.5	7.1	7.3
9.5	≥200 to <500	13	36	42	46	50	51	1.5	4.2	4.9	5.4	5.8	6.0
9.5	≥500 to <1000	11	31	36	39	43	44	1.3	3.5	4.1	4.5	4.9	5.0
9.5	≥1000 to <2000	9	26	31	34	37	38	1.1	3.0	3.5	3.8	4.2	4.3
9.5	≥2000 to <5000	8	22	26	28	31	31	0.9	2.5	2.9	3.2	3.4	3.5
9.5	≥5000 to <10 000	7	19	22	24	26	27	0.7	2.1	2.4	2.6	2.9	2.9
9.5	≥10 000 to <16 400	6	16	19	21	23	23	0.6	1.8	2.1	2.3	2.4	2.5
12.5	≥137 to <200	17	47	55	60	65	67	1.9	5.4	6.4	7.0	7.6	7.8
12.5	≥200 to <500	14	39	46	50	54	55	1.6	4.5	5.3	5.7	6.2	6.4
12.5	≥500 to <1000	12	33	39	42	46	47	1.3	3.7	4.4	4.8	5.2	5.3
12.5	≥1000 to <2000	10	28	33	36	39	40	1.1	3.2	3.8	4.1	4.4	4.6
12.5	≥2000 to <5000	8	23	28	30	33	33	0.9	2.6	3.1	3.4	3.7	3.7
12.5	≥5000 to <10 000	7	20	23	25	28	28	0.8	2.2	2.6	2.8	3.1	3.1
12.5	≥10 000 to <16 400	6	17	20	22	24	24	0.7	1.9	2.2	2.4	2.6	2.7
19	≥137 to <200	20	56	66	72	78	80	2.2	6.3	7.4	8.1	8.7	9.0
19	≥200 to <500	16	46	54	59	64	65	1.8	5.2	6.1	6.6	7.2	7.4
19	≥500 to <1000	14	38	45	49	53	55	1.5	4.3	5.1	5.6	6.0	6.2
19	≥1000 to <2000	12	32	38	42	45	46	1.3	3.7	4.3	4.7	5.1	5.3
19	≥2000 to <5000	9	27	31	34	37	38	1.1	3.0	3.6	3.9	4.2	4.3
19	≥5000 to <10 000	8	22	26	28	31	32	0.9	2.5	3.0	3.3	3.5	3.6
19	≥10 000 to <16 400	7	19	22	24	26	27	0.8	2.2	2.6	2.8	3.0	3.1
25	≥137 to <200	24	66	78	85	92	94	2.6	7.2	8.4	9.2	10.0	10.2
25	≥200 to <500	19	53	62	68	74	76	2.1	5.9	6.9	7.6	8.2	8.4
25	≥500 to <1000	16	44	51	56	61	62	1.8	4.9	5.8	6.4	6.9	7.1
25	≥1000 to <2000	13	37	43	47	51	52	1.5	4.2	5.0	5.4	5.9	6.0
25	≥2000 to <5000	11	29	35	38	41	42	1.2	3.5	4.1	4.5	4.8	4.9
25	≥5000 to <10 000	9	24	29	31	34	35	1.0	2.9	3.4	3.7	4.0	4.1
25	≥10 000 to <16 400	7	20	24	26	28	29	0.9	2.5	2.9	3.2	3.4	3.5

Note: AMPT calibrated range is 137 MPa to 16 400 MPa.

Figura D- 1. Precisión para módulo dinámico para un solo operador.

Anexo E. Comprobación de precisión en módulos

Cuadro E- 1. Comprobación de precisión en módulos del método húmedo

MUESTRA	2,5 % PET	Temp 4.4°C								
Frec	MD 1	MD 2	MD 3	Promedio MD	Desvest MD	CV	1-2	2-3	1-3	rango aceptable
25	12761	13321	12596	12893	380	2,9	560	725	165	2579
10	11682	12219	11535	11812	360	3,0	537	684	147	2362
5	10853	11373	10715	10980	347	3,2	520	658	138	2196
1	8919	9387	8749	9018	330	3,7	468	638	170	1804
0,5	8090	8528	7897	8172	323	4,0	438	631	193	1634
0,1	6177	6595	6014	6262	300	4,8	418	581	163	1252

MUESTRA	2,5 % PET	Temp 21.1°C								
Frec	MD 1	MD 2	MD 3	Promedio MD	Desvest MD	CV	1-2	2-3	1-3	rango aceptable
25	6501	6458	6386	6448	58	0,9	43	72	62	1483
10	5364	5356	5268	5329	53	1,0	8	88	96	1226
5	4559	4578	4489	4542	47	1,0	19	89	70	1045
1	2929	2954	2886	2923	34	1,2	25	68	43	672
0,5	2361	2392	2324	2359	34	1,4	31	68	37	543
0,1	1299	1325	1274	1299	26	2,0	26	51	25	299

MUESTRA	2,5 % PET	Temp 37.8°C								
Frec	MD 1	MD 2	MD 3	Promedio MD	Desvest MD	CV	1-2	2-3	1-3	rango aceptable
25	1839	1912	1996	1916	79	4,1	73	84	157	632
10	1254	1311	1365	1310	56	4,2	57	54	111	432
5	921,8	968,5	1005	965	42	4,3	46,7	36,5	83,2	318
1	380,5	400,3	419,1	400	19	4,8	19,8	18,8	38,6	132
0,5	252,6	266,4	279,7	266	14	5,1	13,8	13,3	27,1	88
0,1	99,1	104,3	111,4	105	6	5,9	5,2	7,1	12,3	35

MUESTRA	2,5 % PET	Temp 54.4°C								
Frec	MD 1	MD 2	MD 3	Promedio MD	Desvest MD	CV	1-2	2-3	1-3	rango aceptable
25	711	721	696	709	13	1,8	10	25	15	270
10	450	441	420	437	15	3,5	9	21	30	166
5	328	319	301	316	14	4,4	9	18	27	120
1	148	145	133	142	8	5,6	3	12	15	54
0,5	112	108	102	107	5	4,7	4	6	10	41
0,1	65,2	62	59	62	3	5,0	3,2	3	6,2	24

Cuadro E- 2. Comprobación de precisión en módulos del método húmedo

MUESTRA	1 % PET	Temp 4.4°C								
Frec	MD 1	MD 2	MD 3	Promedio MD	Desvest MD	CV	1-2	2-3	1-3	rango aceptable
25	12634	12093	12745	12491	349	2,8	541	652	111	2498
10	11529	11003	11708	11413	366	3,2	526	705	179	2283
5	10671	10146	10908	10575	390	3,7	525	762	237	2115
1	8685	8126	8991	8601	439	5,1	559	865	306	1978
0,5	7806	7270	8139	7738	438	5,7	536	869	333	1780
0,1	5884	5289	6195	5789	460	8,0	595	906	311	1332

MUESTRA	1 % PET	Temp 21.1°C								
Frec	MD 1	MD 2	MD 3	Promedio MD	Desvest MD	CV	1-2	2-3	1-3	rango aceptable
25	6491	6164	6307	6321	164	2,6	327	143	184	1454
10	5330	5087	5215	5211	122	2,3	243	128	115	1198
5	4532	4388	4451	4457	72	1,6	144	63	81	1248
1	2911	2822	2894	2876	47	1,6	89	72	17	805
0,5	2347	2292	2345	2328	31	1,3	55	53	2	652
0,1	1283	1311	1334	1309	26	2,0	28	23	51	432

MUESTRA	1 % PET	Temp 37.8°C								
Frec	MD 1	MD 2	MD 3	Promedio MD	Desvest MD	CV	1-2	2-3	1-3	rango aceptable
25	2054	1801	1679	1845	191	10,4	253	122	375	609
10	1380	1217	1126	1241	129	10,4	163	91	254	410
5	1013	889,7	820,3	908	98	10,8	123,3	69,4	192,7	354
1	413,2	363,8	333,3	370	40	10,9	49,4	30,5	79,9	170
0,5	273,9	241,5	223,6	246	25	10,4	32,4	17,9	50,3	113
0,1	105,1	96,7	89,2	97	8	8,2	8,4	7,5	15,9	38

MUESTRA	1 % PET	Temp 54.4°C								
Frec	MD 1	MD 2	MD 3	Promedio MD	Desvest MD	CV	1-2	2-3	1-3	rango aceptable
25	385	352	377	371	17	4,6	33	25	8	141
10	185	165	190	180	13	7,3	20	25	5	68
5	121	107	126	118	10	8,3	14	19	5	45
1	37	33	48	39	8	19,7	4	15	11	18
0,5	25	26	34	28	5	17,4	1	8	9	13
0,1	13	14	17	15	2	14,2	1	3	4	8

Anexo F. Curvas maestras utilizando el software Pitra-ImoDin

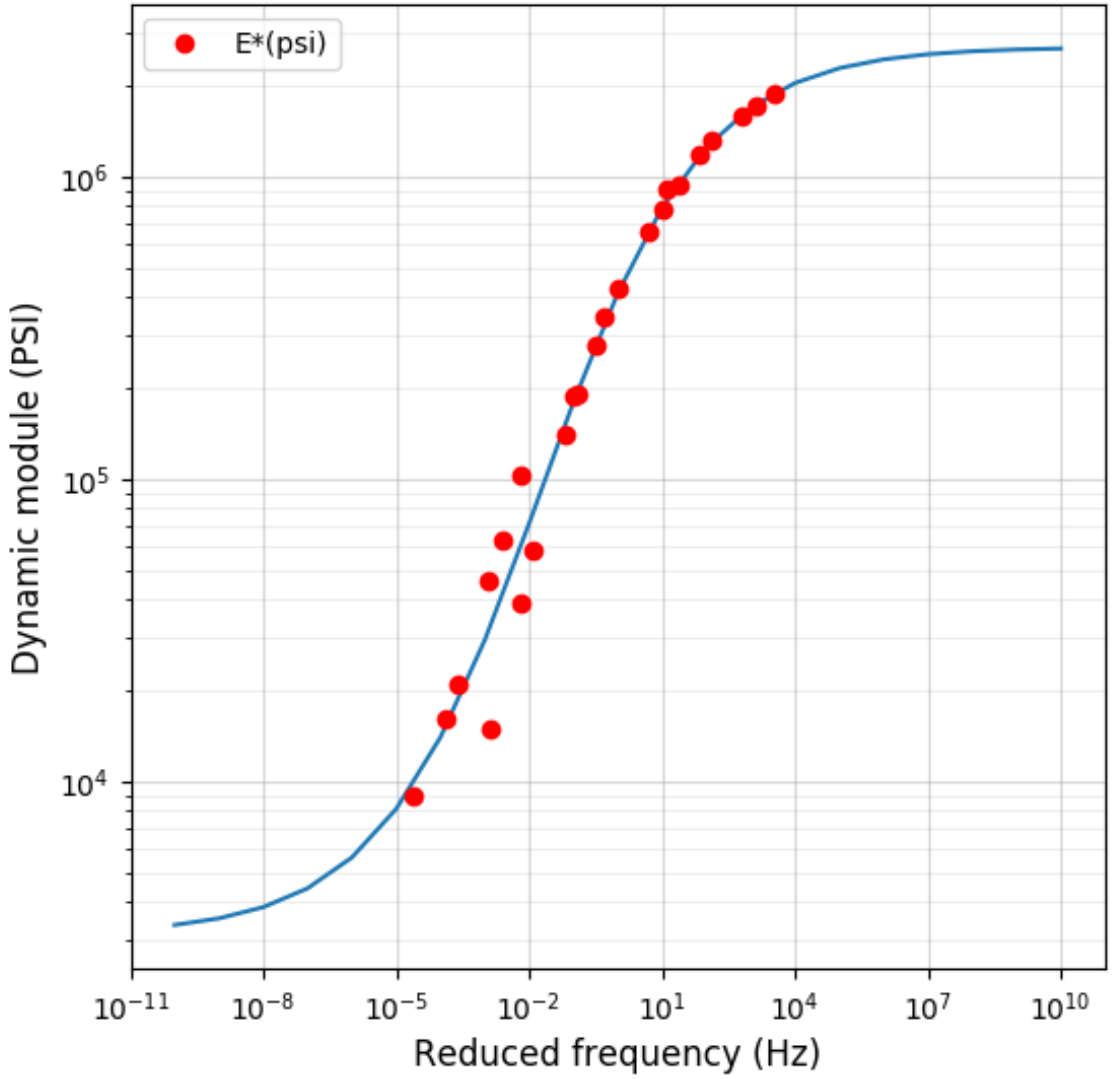

Figura F- 1. Curva maestra método húmedo

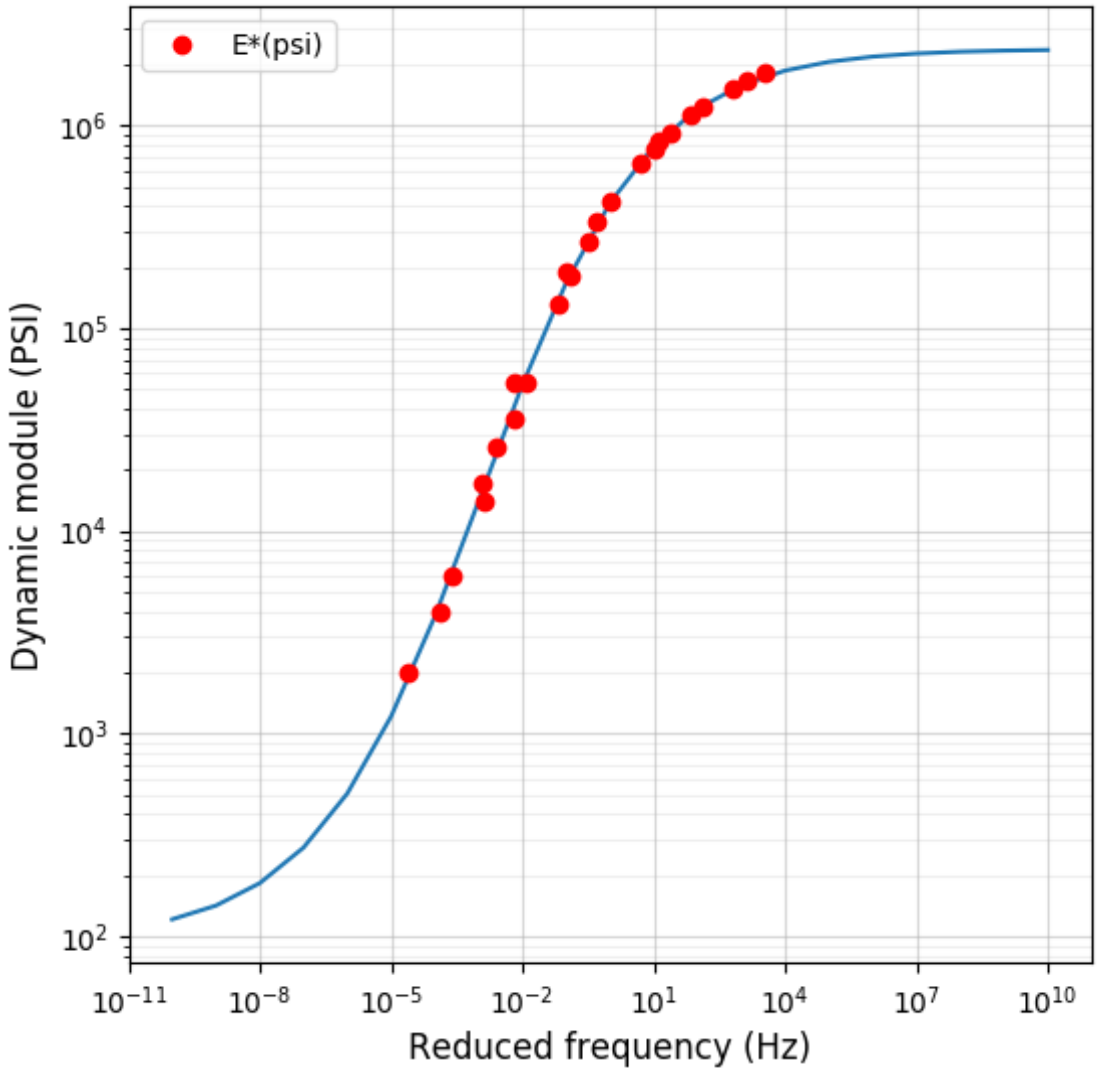

Figura F- 2. Curva maestra método seco

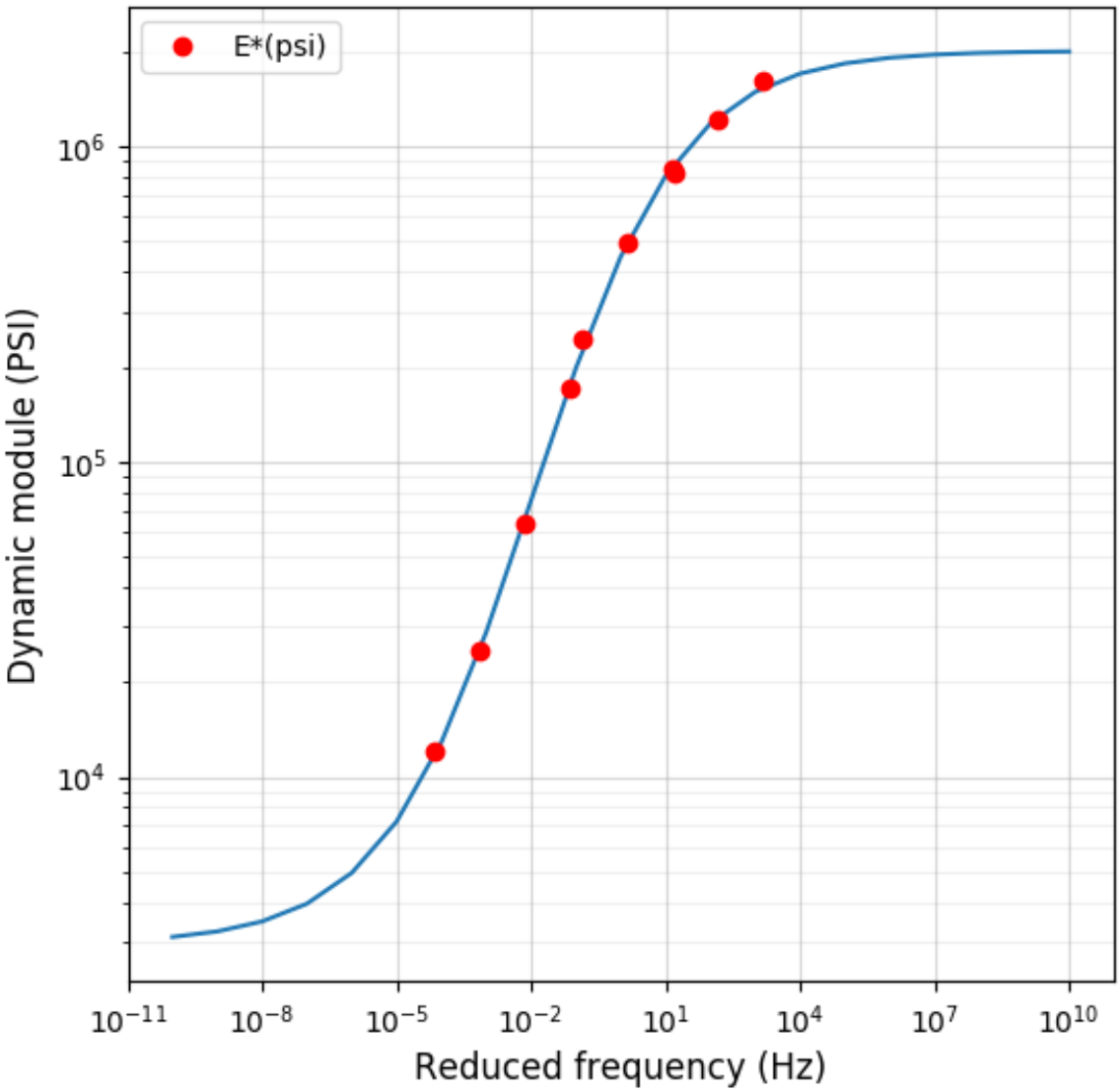

Figura F- 3. Curva maestra asfalto control