

Universidad Latina de Costa Rica

Facultad de Ingeniería, Tecnologías de la Información y Comunicación

Escuela de Ingeniería Civil

Propuesta de trabajo final de graduación para optar por el grado académico de Licenciado en

Ingeniería Civil

Modalidad Tesis

**Análisis del comportamiento de las propiedades físico-mecánicas de la mezcla asfáltica
modificada con Resin8.**

Sustentante:

Brayan Jackson Porras

San Pedro, Montes de Oca

Abril de 2022

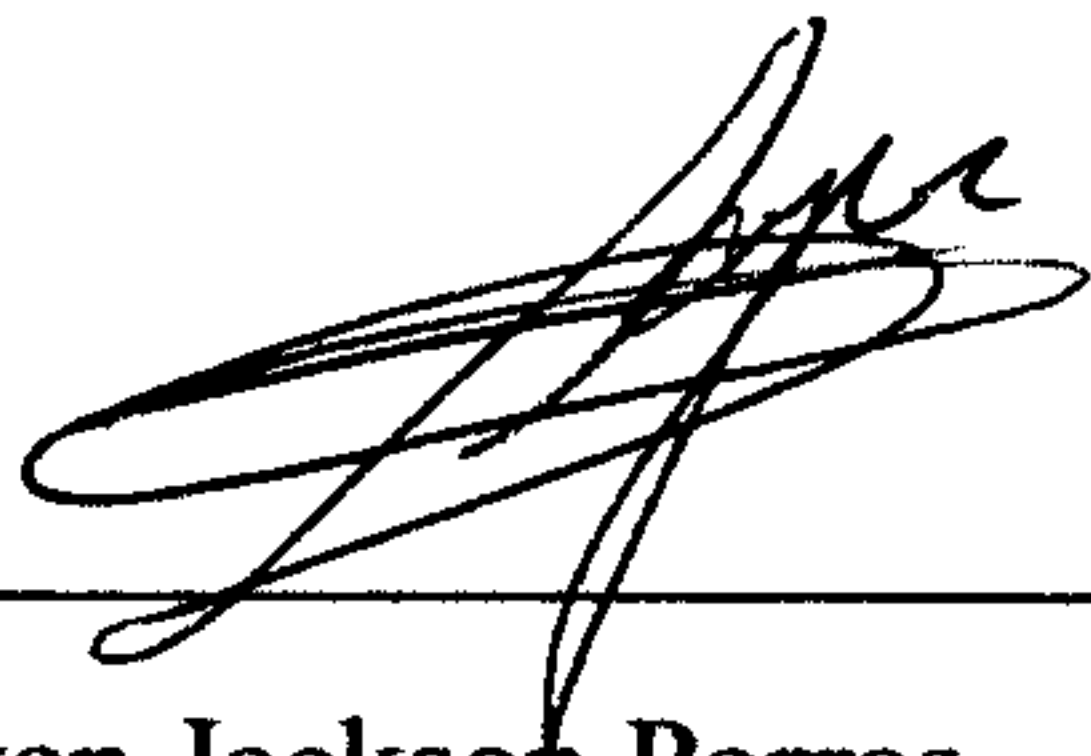
DECLARACIÓN JURADA

Yo, Brayan Jackson Porras estudiante de la Universidad Latina de Costa Rica, declaro bajo la fe de juramento y consciente de las responsabilidades penales de este acto, que soy Autor Intelectual del Proyecto de Graduación en modalidad Tesis titulado:

Análisis del comportamiento de las propiedades físico-mecánicas de la mezcla asfáltica modificada con Resin8.

Por lo que libero a la Universidad de cualquier responsabilidad en caso de que mi declaración sea falsa.

Firmo en Cartago, 28 de junio del 2022.



Brayan Jackson Porras

Licencia De Distribución No Exclusiva (carta de la persona autora para uso didáctico)

Universidad Latina de Costa Rica

Yo (Nosotros):

Brayan Jackson Porras

**De la Carrera /
Programa:**

Ingeniería Civil

**Modalidad de
TFG:**

TESIS

Titulado:

**Análisis del comportamiento de las propiedades físico-mecánicas de la
mezcla asfáltica modificada con Resin8.**

Al firmar y enviar esta licencia, usted, el autor (es) y/o propietario (en adelante el "AUTOR"), declara lo siguiente: **PRIMERO:** Ser titular de todos los derechos patrimoniales de autor, o contar con todas las autorizaciones pertinentes de los titulares de los derechos patrimoniales de autor, en su caso, necesarias para la cesión del trabajo original del presente TFG (en adelante la "OBRA"). **SEGUNDO:** El **AUTOR** autoriza y cede a favor de la **UNIVERSIDAD U LATINA S.R.L.** con cédula jurídica número 3-102-177510 (en adelante la "UNIVERSIDAD"), quien adquiere la totalidad de los derechos patrimoniales de la **OBRA** necesarios para usar y reusar, publicar y republicar y modificar o alterar la **OBRA** con el propósito de divulgar de manera digital, de forma perpetua en la comunidad universitaria. **TERCERO:** El **AUTOR** acepta que la cesión se realiza a título gratuito, por lo que la **UNIVERSIDAD** no deberá abonar al autor retribución económica y/o patrimonial de ninguna especie. **CUARTO:** El **AUTOR** garantiza la originalidad de la **OBRA**, así como el hecho de que goza de la libre disponibilidad de los derechos que cede. En caso de impugnación de los derechos autorales o reclamaciones instadas por terceros relacionadas con el contenido o la autoría de la **OBRA**, la responsabilidad que pudiera derivarse será exclusivamente de cargo del **AUTOR** y este garantiza mantener indemne a la **UNIVERSIDAD** ante cualquier reclamo de algún tercero. **QUINTO:** El **AUTOR** se compromete a guardar confidencialidad sobre los alcances de la presente cesión, incluyendo todos aquellos temas que sean de orden meramente institucional o de organización interna de la **UNIVERSIDAD**. **SEXTO:** La presente autorización y cesión se regirá por las leyes de la República de Costa Rica. Todas las controversias, diferencias, disputas o reclamos que pudieran derivarse de la presente cesión y la materia a la que este se refiere, su ejecución, incumplimiento, liquidación, interpretación o validez, se resolverán por medio de los Tribunales de Justicia de la República de Costa Rica, a cuyas normas se someten el **AUTOR** y la **UNIVERSIDAD**, en forma voluntaria e incondicional. **SÉPTIMO:** El **AUTOR** acepta que la **UNIVERSIDAD**, no se hace responsable del uso, reproducciones, venta y distribuciones de todo tipo de fotografías, audios, imágenes, grabaciones, o cualquier otro tipo de

presentación relacionado con la **OBRA**, y el **AUTOR**, está consciente de que no recibirá ningún tipo de compensación económica por parte de la **UNIVERSIDAD**, por lo que el **AUTOR** haya realizado antes de la firma de la presente autorización y cesión. **OCTAVO**: El **AUTOR** concede a **UNIVERSIDAD**., el derecho no exclusivo de reproducción, traducción y/o distribuir su envío (incluyendo el resumen) en todo el mundo en formato impreso y electrónico y en cualquier medio, incluyendo, pero no limitado a audio o video. El **AUTOR** acepta que **UNIVERSIDAD**. puede, sin cambiar el contenido, traducir la **OBRA** a cualquier lenguaje, medio o formato con fines de conservación. **NOVENO**: El **AUTOR** acepta que **UNIVERSIDAD** puede conservar más de una copia de este envío de la **OBRA** por fines de seguridad, respaldo y preservación. El **AUTOR** declara que el envío de la **OBRA** es su trabajo original y que tiene el derecho a otorgar los derechos contenidos en esta licencia. **DÉCIMO**: El **AUTOR** manifiesta que la **OBRA** y/o trabajo original no infringe derechos de autor de cualquier persona. Si el envío de la **OBRA** contiene material del que no posee los derechos de autor, el **AUTOR** declara que ha obtenido el permiso irrestricto del propietario de los derechos de autor para otorgar a **UNIVERSIDAD** los derechos requeridos por esta licencia, y que dicho material de propiedad de terceros está claramente identificado y reconocido dentro del texto o contenido de la presentación. Asimismo, el **AUTOR** autoriza a que en caso de que no sea posible, en algunos casos la **UNIVERSIDAD** utiliza la **OBRA** sin incluir algunos o todos los derechos morales de autor de esta. **SI AL ENVÍO DE LA OBRA SE BASA EN UN TRABAJO QUE HA SIDO PATROCINADO O APOYADO POR UNA AGENCIA U ORGANIZACIÓN QUE NO SEA UNIVERSIDAD U LATINA, S.R.L., EL AUTOR DECLARA QUE HA CUMPLIDO CUALQUIER DERECHO DE REVISIÓN U OTRAS OBLIGACIONES REQUERIDAS POR DICHO CONTRATO O ACUERDO.** La presente autorización se extiende el día 28 de junio de 2022 a las 10 am.

Firma del estudiante(s):



Este proyecto titulado: “**Análisis del comportamiento de las propiedades físico-mecánicas de la mezcla asfáltica modificada con Resin8**”, por el estudiante: Brayan Jackson Porras, fue aprobada por el Tribunal Examinador de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Latina, Sede San Pedro, como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil:

MARIA DEL
CARMEN
GALLARDO MEJIA
(FIRMA)

Firmado digitalmente por
MARIA DEL CARMEN
GALLARDO MEJIA (FIRMA)
Fecha: 2022.07.05 19:56:12
-06'00'

María del Carmen Gallardo Mejía

Tutor

PABLO JOSE
TORRES
MORALES
(FIRMA)

Digitally signed by
PABLO JOSE TORRES
MORALES (FIRMA)
Date: 2022.07.13
23:06:08 -06'00'

Pablo José Torres Morales

Lector

Firmado digitalmente por Minor
Murillo Chacón
Fecha: 2022.07.18 07:14:14 -06'00'

Minor Eduardo Murillo Chacón

Lector

Agradecimiento.

Debidamente debo agradecer a mis padres que siempre me apoyaron en todos los sentidos posibles, principalmente a mi papá que siempre me motivó a seguir adelante y creer en mis habilidades.

Después debo agradecer a las personas que se cruzaron en mi camino universitario ya que cada una de estas personas me hizo mejor persona y profesional, incluyendo compañeros, amigos y profesores.

Luego un gran agradecimiento a las personas del laboratorio Mat-Tec debido a que sin ellos no hubiera logrado esta tesis, me enseñaron todo y me dieron un trato que siempre agradeceré.

Finalmente un agradecimiento a mi persona por ser constante y perseverante durante todo este proceso.

Resumen

La presente investigación es parte de una investigación más grande, por ende, se van a realizar ensayos específicos una mezcla asfáltica en específico debido a que ya se han efectuado pruebas de otros parámetros. Para efectos de esta investigación se van a evaluar distintas propiedades físico-mecánicas tales como la gravedad específica máxima teórica, vida de fatiga, contenido de asfalto, granulometría y estabilidad y flujo Marshall de una mezcla de asfalto que se utiliza en Costa Rica; dicha mezcla asfáltica es modificada con una resina plástica llamada Resin8, producido, en territorio nacional por el grupo Pedregal y evaluado por el laboratorio Mat-Tec; la cual contiene componentes de plástico reciclado combinado con cal y ceniza de madera; el plástico que se recicla proviene de la recolección de estos residuos por parte de las municipalidades. La investigación se centra en encontrar alguna variación en las propiedades de la mezcla y con esto poder entender de una forma correcta el comportamiento de la combinación de un agente externo con los agregados tradicionales que se utilizan en el país para el bacheo y la construcción de capas de mezcla asfáltica. Finalmente, se intenta encontrar porcentajes óptimos de resin8 para la producción de mezcla asfáltica modificada y con esto poder reciclar de manera masiva, aliviando un problema que afecta a todo al mundo entero.

Índice de contenidos

Agradecimiento.....	2
Resumen.....	3
Índice de Tablas.....	6
Índice de figuras.....	7
Problema y Propósito.....	9
Estado del Objeto de Estudio.....	9
Planteamiento del problema de estudio.....	13
Enunciado del Problema.....	13
Formulación del Problema.....	15
Justificación.....	16
Objetivo general.....	19
Objetivos específicos.....	19
Alcances y Limitaciones.....	20
Alcances.....	20
Limitaciones.....	20
Delimitaciones.....	21
Delimitación espacial.....	21
Delimitación temporal.....	21
Marco teórico.....	22
Asfalto.....	22
Agregados.....	23
Mezcla asfáltica.....	24
Mezclas asfálticas modificadas.....	25
Metodología Marshall.....	30
Resistencia a la fatiga.....	38
Ensayo de fatiga (AASHTO T 321-17).....	42
Granulometría.....	47
Contenido de asfalto por centrifuga.....	51
Resin8.....	56
Marco metodológico.....	58
Tipo de investigación.....	58
Métodos de investigación.....	58

Sujetos y fuentes de información	59
Principales fuentes de información	59
Definición de variables.....	60
Instrumentos y técnicas utilizados en la recolección de datos.....	61
Compactador Marshall.....	61
Centrifuga digital.....	61
Equipo para pruebas de fatiga por flexión con viga independiente BFF-5	63
Equipo para granulometría	66
Sustentación de la confiabilidad y validez de los instrumentos de la investigación.....	66
Técnicas de recolección de datos.....	70
Caracterización de mezcla.....	70
Creación de las muestras para estabilidad y flujo Marshall.....	70
Instrumentos que se utilizaron para Metodología Marshall según AASHTO R 68.	71
Procedimiento (AASHTO R 68).....	72
Ensayo de estabilidad y flujo Marshall.....	77
Instrumentos que se utilizaron para ensayo de gravedad específica máxima teórica	77
Ensayo de contenido de asfalto por centrífuga	79
Instrumentos que se utilizaron para los ensayos de contenido de asfalto por centrifuga y granulometría.....	79
Procedimiento que se siguió para los ensayos de contenido de asfalto y granulometría.....	79
Procedimiento que se siguió para el ensayo de fatiga de flexo-tracción o ensayo de viga a cuatro puntos.....	83
Diseño de vigas para el ensayo.	83
Análisis de resultados.....	85
Resultados obtenidos del ensayo de Metodología Marshall.....	85
Resultados obtenidos en ensayos de gravedad específica máxima teórica	90
Resultados obtenidos en ensayos de granulometría y contenido de asfalto por centrifuga.	94
Resultados obtenidos en el ensayo de granulometría.....	97
Resultados de ensayo de fatiga.....	105
Conclusiones	113
Bibliografía	115

Índice de Tablas.

Tabla 1. Simbología granulometría.....	48
Tabla 2. Simbología granulometría.....	49
Tabla 3. Simbología granulometría.....	50
Tabla 4. Simbología granulometría.....	50
Tabla 5. Sujetos y fuentes de información	59
Tabla 6. Definición de variables.....	60
Continúa.....	60
Continuando.....	61
Tabla 7. Cantidades de agregados para muestras Marshall	85
Tabla 8. Pesos de pastillas Marshall.....	86
Tabla 9. Lecturas de estabilidad y flujo de 0% de R8.....	87
Tabla 10. Lecturas de estabilidad y flujo de 1% de R8.....	87
Tabla 11. Lecturas de estabilidad y flujo de 2% de R8.....	88
Tabla 12. Lecturas de estabilidad y flujo para 3% de R8.....	88
Tabla 13. Lecturas de estabilidad y flujo para 6% de R8.....	89
Tabla 14. Cantidades de agregados para gravedad específica máxima teórica	90
Tabla 15. Determinación de peso en condición SSS para 0%.....	91
Tabla 16. Determinación de peso en condición SSS para 1%.....	91
Tabla 17. Determinación de peso en condición SSS para 2%.....	92
Tabla 18. Determinación de peso en condición SSS para 3%.....	92
Tabla 19. Determinación de peso en condición SSS para 6%.....	93
Tabla 20. Resultados de gravedad específica máxima teórica.....	93
Tabla 21. Cantidades de agregados para contenido de asfalto y granulometría.....	94
Tabla 22. Peso real de muestras para contenido de asfalto.....	95
Tabla 23. Contenido de asfalto por centrifuga.....	95
Tabla 24. Datos de granulometría para 0% de R8.....	97
Tabla 25. División de agregados para 0% de R8.....	97
Tabla 26. Datos de granulometría para 1% de R8.....	98
Tabla 27. División de agregados para 1% de R8.....	99
Tabla 28. Datos de granulometría para 2% de R8.....	99
Continúa.....	99
Continuando.....	100

Tabla 29. Distribución de agregados para muestras de 1% de R8.....	100
Tabla 30. Datos de granulometría para 3% de R8.	101
Tabla 31. Distribución de agregados para muestras de 0% de R8.....	101
Tabla 32. Datos de granulometría para 6% de R8.	102
Tabla 33. Distribución de agregados para muestras de 6% de R8.....	103
Tabla 34. Vida fatiga (4BB) 400 μ S, mezcla de 0% de R8.	105
Tabla 35. Vida fatiga (4BB) 600 μ S, mezcla de 0% de R8.	106
Tabla 36. Vida fatiga (4BB) 400 μ S, mezcla de 3% de R8.	107
Tabla 37. Vida fatiga (4BB) 600 μ S, mezcla de 3% de R8.	108
Tabla 38. Vida fatiga (4BB) 400 μ S, mezcla de 6% de R8.	109
Tabla 39. Vida fatiga (4BB) 600 μ S, mezcla de 6% de R8.	110

Índice de figuras

Figura 1: Muestra de pastilla de mezcla asfáltica modificada.....	16
Figura 2. Designación de mezclas según su uso.....	32
Figura 3. Número de golpes según clasificación de tránsito	33
Figura 4. Vacíos de diseño.....	34
Figura 5: Parámetros requeridos de diseño en la metodología Marshall.....	34
Figura 6: Ejemplo de resultado de ensayo Marshall. Propiedades de la mezcla asfáltica según el contenido de asfalto.	37
Figura 7. Ejemplo de análisis del rango efectivo de contenido de asfalto.....	38
Figura 8: Ilustración del ensayo de flexo-tracción	40
Figura 9: Curva típica de fatiga	40
Figura 10: Precisión en la prueba de fatiga	41
Figura 11: Resultados esperados de curvas en ensayo de fatiga	41
Figura 12. Ilustración de tamices.....	51
Figura 13. Ejemplo de agitador	55
Figura 14. Ejemplo de aparato de centrifuga.....	63
Figura 15. Equipo para pruebas de fatiga por flexión con viga independiente bff-5	64
Figura 16. Caracterización de materiales.....	72
Figura 17. Proceso de cocinado de mezcla asfáltica.....	73
Figura 18. Proceso de curado.....	74

Figura 19. Proceso de compactación Marshall.	75
Figura 20. Pastillas Marshall.	76
Figura 21. Proceso de ensamblaje de aparato de centrífuga.	81
Figura 22. Proceso de pesado en granulometría.	83
Figura 23. Vigas para ensayo de fatiga.	84
Figura 24. Gráfico de comparación de datos de estabilidad.	89
Figura 25. Gráfico de comparación de resultados de gravedad específica máxima teórica ..	94
Figura 26. Gráfico de pérdida de asfalto vs porcentaje de resin8.	96
Figura 27. Curva granulométrica para 0% de R8	98
Figura 28. Curva granulométrica para 1% de R8	99
Figura 29. Curva granulométrica para 2% de R8	100
Figura 30. Curva granulométrica para 3% de R8	102
Figura 31. Curva granulométrica para 6% de R8	103
Figura 32. Comparación de curvas granulométricas	104
Figura 33. Variación de la rigidez de la muestra de mezcla de control de 4bb (400 μ S)....	106
Figura 34. Variación de la rigidez de la muestra de mezcla de control de 4bb (600 μ S)....	107
Figura 35. Variación de la rigidez de la muestra de 3% de R8 de 4bb (400 μ S).	108
Figura 36. Variación de la rigidez de la muestra 3% de resin8 de 4bb (600 μ S)	109
Figura 37. Variación de la rigidez de la muestra de 6% de resin8 de 4bb (400 μ S)	110
Figura 38. Variación de la rigidez de la muestra 6% de resin8 de 4bb (600 μ S)	111
Figura 39. Resultados de vida por fatiga (400 μ S)	112

Problema y Propósito.

Estado del Objeto de Estudio.

Primeramente, (Monturiol Arroyo, 2019) afirma que cuando introducimos un material de desecho como lo es el plástico a la mezcla asfáltica, se ven afectadas las propiedades viscosas y elásticas de dicha mezcla y su desempeño. Además, realizó pruebas mediante el método húmedo con 3 diferentes porcentajes de plástico PET (1, 2.5, 5), donde indicó que el porcentaje intermedio funcionaba de mejor manera debido a las propiedades que presentó. Esta muestra fue comparada con pavimentos sin modificar; por otra parte, realizó otra mezcla con el método seco donde sustituyó 1% del agregado fino por el polímero. Finalmente, concluyó que en el caso del método húmedo, el agregado sufre daño y en el caso del método seco la mezcla se rigidiza volviéndose más eficiente a las deformaciones, pero menos eficientes en su desempeño de fatiga; concluyéndose positivamente que el consumo de material reciclado sería considerable. Por su parte, (Hasanain Radhi, y otros, 2021) indican que el método seco es inconsistente debido a su mala distribución de las partículas en el esqueleto de la mezcla, por ende, este estudio intenta mejorar la consistencia del proceso seco mediante la comparación del control de una mezcla asfáltica virgen y cuatro mezclas asfálticas modificadas con plástico, en sí concluyeron que al agregar una gran cantidad de plástico, la estructura del agregado se desvía y que la mezcla presentaba una mejora substancial en donde el porcentaje de plástico era por lo menos un 20% del peso del aglutinante.

Debidamente (Mashaan, Chegenizadeh, Rezagholilou, & Nikraz, 2021) estudiaron las propiedades ingenieriles y viscoelásticas utilizando el plástico PET, mediante el flujo de Marshall, la estabilidad de Marshall y el cociente de este, en sí tuvieron ciertas conclusiones muy importantes donde afirman que, según los estudios, los porcentajes óptimos varían entre

un 6% a 8% para mantener un balance entre la rigidez y la elasticidad de la mezcla. Otros autores que hicieron estudios fueron (Abas, Talaib A., & Raghad U., 2014) los cuales utilizaron plástico reciclado con un tamaño de 1,5 cm hasta partículas de 0,075 cm, variaron ciertos aspectos como la sustitución de agregado que variaba entre un 5% hasta un 15% de plástico; estudiaron el comportamiento de la mezcla a diferentes temperaturas de 109-206 C° y con distintos tiempos de 20-60 minutos; con esto definieron la fórmula correcta, la cual es de 40 minutos, 10% de sustitución y una temperatura de 172 grados Celsius. Otro punto que definieron fue que la mezcla en condiciones óptimas tenía un muy buen comportamiento en la prueba de estabilidad de Marshall, bajos niveles de distorsión y un aceptable baja densidad húmeda, la densidad seca no se ve afectada y un punto bastante importante es que lograron ver una gran resistencia a sustancias químicas externas y evidentemente que era una gran opción para reducir los botaderos de plástico no degradable, ya que las carreteras siempre estarán ahí y se le da un buen uso a un gran problema que nos confronta en la actualidad.

Otra investigación muy importante en el tema fue hecha por (Grady, 2021) quien hizo un amplio estudio sobre los distintos plásticos reciclables y sus componentes químicos, los cuales pueden modificar o controlar ciertas propiedades mecánicas de la mezcla de concreto asfáltico. En esta investigación se define que los elastómeros termoplásticos, se separan en dos fases, una que se puede disolver y otra que no es soluble, esta combinación crea una mejora en la resistencia a la fatiga aumentando la flexibilidad del aglutinante, mientras los acrilatos reaccionan con el ligante mejorando así la rigidez del concreto. Además, habla sobre 3 casos para el uso del plástico en el mezcla de cemento, el primero es cuando se espera que el plástico se derrita cuando se prepara la mezcla, el segundo caso es donde no se derrite el plástico durante la preparación de la mezcla y el último que es el

menos común, que se combine con la materia prima, donde para cada uno de los casos se necesita conocer bastante bien los componentes de los plásticos debido a que existen componentes que se combinan con la mezcla a cierta temperatura y con esto también existen niveles de desintegración de las partículas de plástico el cual se derrite y si excede cierta temperatura se puede desintegrar. Otros autores que han hecho investigaciones son (Chin & Damen, 2019) donde mencionan un punto importante que es la exposición de los trabajadores de obra con los gases que pueden expulsar las mezclas asfálticas al mezclarse con los químicos que traen los plásticos; Dan a conocer que los residuos plásticos pueden funcionar como un agregado más en las mezclas bituminosas y junto a esto prolonga el aglutinante que se use sin tener un gran impacto a la mezcla de asfalto. Pero también es necesario saber que no todos los plásticos se pueden utilizar para las mezclas bituminosas.

Asimismo, (White & Magee, 2019) concluyen en un informe que la viscosidad y la temperatura de ablandamiento del aglutinante se ven aumentadas cuando se utilizan plásticos reciclados y que la mezcla se ve beneficiada con respecto a las deformaciones, ya que las propiedades recobran su estado cuando sufre alguna clase de deformación. También, afirman que las mezclas que utilizan algún tipo de plástico son susceptibles a la humedad, y la fatiga no se ve realmente afectada; recomiendan investigar más en dos temas, el de la reducción a la resistencia por humedad cuando se introduce plástico en la mezcla, así como la asimilación del plástico en el método seco. Debidamente, (Jassim, Mahmood, & Ahmed, 2014) hicieron un estudio y llegaron a varias conclusiones, una de ellas es que recomiendan usar partículas que pasen el tamiz No. 16 (1,18 mm) debido a que aumenta la estabilidad de Marshall y el índice de fuerza retenida entre un 12% a un 18% comparándola con una mezcla sin modificar. Otra conclusión a la que llegan es que si se utiliza material que es

retenido en el tamiz de 3/8" (9,5 mm) y superiores a este, hace que la estabilidad de Marshall decrezca junto con la resistencia al daño por humedad y deducen que es porque las partículas más gruesas no se unen con los otros componentes de la mezcla. También recomiendan usar un 15 % de plástico reciclado sobre el peso del agregado, esto ayuda a controlar el daño por humedad y la estabilidad de Marshall.

Por otra parte (Ye, Amirkhanian, Li, & Chen, 2020), estudiaron el efecto del polietileno en la mezcla asfáltica donde llegan a la conclusión que modificando distintos tipos y contenidos de polietileno se pueden aumentar tanto el grado de temperatura como la resistencia a la deformación en las roderas en las carpetas modificadas también, disminuyo la deformación por cizallamiento por lo que el uso de dicho material además de reforzar la viscosidad de los aglutinantes, mejora la elasticidad. Un autor que estudió la mezcla de residuos plásticos pero con concreto hidráulico fue (Trimbakwala, 2017), pudo concluir que, al mezclar plástico con el bitumen aumenta la capacidad de este para soportar temperaturas más altas, de hasta unos 10 °C, además que las muestras de cementos bituminosos pasan perfectamente las pruebas Marshall por ejemplo, en la estabilidad de Marshall hubo un mejoramiento del orden de dos a tres veces mayor comparándolo con una muestra sin modificar y el último punto fue que las muestras que eran tratadas con algún plástico eran más resistentes a las adversidades relacionadas al remojo o al contacto con el agua.

Planteamiento del problema de estudio

Enunciado del Problema

Alrededor del mundo, incluyendo a nuestro país, el material que nos rodea diariamente son los millones de productos a base de plástico, en la cocina existe plástico, en nuestra oficina o lugar de trabajo, en las clases, en nuestro transporte, en nuestro dormitorio, en fin, en la mayoría de los lugares está este producto presente y de aquí nace la famosa problemática de... ¿Qué hacer con todo lo que desechamos? Sabemos dónde va a parar, ya sea en los ríos que desembocan en los océanos, ya sea en algún botadero y desde hace décadas se está haciendo un gran esfuerzo para poder reducir los residuos, ya sea utilizando medidas como el reciclaje y la reutilización, entonces, ¿A qué quiero llegar con todo esto?, en sí todas las investigación sobre la utilización de alguna clase de plástico en el mejoramiento de las mezclas asfálticas nace de unir la ingeniería con la una problemática que sufren todos los países y que seguirán sufriendo sino vamos aliviando la cantidad de plástico que va a parar a nuestras fuentes de oxígeno y de vida.

Evidentemente ante esta idea de unir la ingeniería dirigida a los pavimentos con los residuos del día a día, se ha investigado en muchos países el método correcto de fabricación de una mezcla modificada con ciertos plásticos para poder así reducir los desechos que no se desintegran y mejorar la mezcla de nuestros pavimentos. Hay muchos países que ya están creando pavimentos modificados con polietileno o con tereftalato de polietileno (PET), por ejemplo, en nuestro país (Monturiol Arroyo, 2019) investigó sobre la mezcla asfáltica modificada con PET donde encontró que dicho producto puede llegar a rigidizar mucho la mezcla y que puede tener problemas por humedad y por ende, se debe prestar más atención a este parámetro, ya que Costa Rica es una zona tropical húmeda e incluso tropical muy húmeda, por ende, se debe que proteger en lo máximo posible nuestras carreteras de este

factor ambiental; por su parte, Lanamme ha impulsado un proyecto junto con varias empresas que producen productos a base de plástico y la municipalidad de Desamparados para crear un pavimento verde con PET, quieren hacer un kilómetro de carretera mitad sin modificar y la otra mitad con pavimento “verde”, que es así como denominan al pavimento modificado con PET. En otros países como es el caso de Australia ya empezó a crear carreteras de prueba con dos tipos de materiales llamados MR6 y MR10, así los denominó la empresa creadora “MacRebur” de Escocia, la cual es una mezcla de toda clase de materiales desechados a base de plástico. Ellos han encontrado que los niveles de resistencia por daño de humedad no se vieron afectados, ni la rigidez tuvo un alza exorbitante; se hicieron pruebas de países como Estados Unidos, Reino Unido y en su propio país donde en todas las pruebas la mezcla se comportaba como un pavimento normal, agregan que el efecto de la utilización de MR6 y MR10 tiene similitud a cuando se utiliza algún polímero.

La investigación empieza confrontando un problema a nivel mundial pero llevado al territorio nacional; los costarricenses llevamos décadas quejándonos de lo pobre y malos que son la mayoría de pavimentos que se tiene, el mal y tardío mantenimiento de las carreteras y la falta de éstas para tener una circulación de vehículos terrestres decentes, para darse una idea, a nivel centroamericano nuestro país se queda atrás en calidad de carreteras en muchos aspectos técnicos y compitiendo con países con menos presupuestos que el de nosotros tales como El Salvador o incluso Honduras. El fin del proyecto es evaluar la calidad, la durabilidad y la eficiencia de las mezclas asfálticas modificadas y de uso actual en nuestras carreteras, para establecer alternativas que permitan reducir la explotación de recursos pétreos, promover el uso de desecho no biodegradables y bajar costos en la construcción de la red vial; todo esto dentro del compromiso nacional de reducir la huella de carbono.

Sabemos que existen muchos componentes dentro de los productos a base de plástico debido a sus diversos usos cotidianos, por ende habrán plásticos que no son aptos para nuestras condiciones o incluso que sean demasiado caros de reutilizar, pero por esa razón es que hay que encontrar cual es la fórmula idónea para los distintos pavimentos que necesitamos en nuestra red vial, ejemplo de esto es el caso en California (Technology, 2019) donde concluyeron que el uso de plástico en la modificación de la mezcla asfáltica se obtiene una mezcla dos e incluso tres veces más duradera que una mezcla tradicional en caliente, ahora bien, esto hace que las intervenciones de mantenimiento sean más lejanas, por tanto los costos de operación y mantenimiento se reducen. Otro punto que cabe recalcar es que se trata de incentivar la industria del reciclaje y en un modo la de reutilizar algo que no se puede desintegrar sin dejar una huella en el medio ambiente, es decir, con este proyecto además de mejorar la calidad del pavimento vigente, se puede promover la industria del reciclado de plástico a gran escala, porque imagínense cuantos kilómetros de carretera se pueden construir utilizando botellas y bolsas de plásticos para mejorarlo, por ende no solo el área de construcción y los usuarios que utilicen las carreteras de nuestro país se verán beneficiados, sino que otro tipo de industria puede salir en auge a partir de este tipo de investigaciones.

Formulación del Problema

Con base en la información recabada el presente trabajo pretende responder la siguiente interrogante.

¿Cuáles son las proporciones idóneas de plástico reciclado, en nuestro caso “Resin8”, para controlar y mejorar las propiedades físico-mecánicas en la mezcla asfáltica?

Figura 1: Muestra de pastilla de mezcla asfáltica modificada



Fuente: LannameUCR

Justificación

Según datos proporcionados por (COSEVI, 2021), Costa Rica tiene una red vial nacional de 7800 km y 3500 km de red vial cantonal. De los 7800 km de vía nacional, un 77% están en zona rural y un 23% en zona urbana., el 64% de esta red está pavimentado (concreto asfáltico, concreto hidráulico o tratamientos superficiales). Según un estudio de (Cavallo , Powell, & Serebrisky, 2020) nuestro país cuenta con un 49 % de carreteras con alguna clase de deterioro en la red principal del territorio nacional, donde el promedio de países de Latinoamérica y el Caribe es de un 20%; por ende, si pensamos en todas las reparaciones y proyectos que ahora mismo necesita el país, sería una cantidad exorbitante de mezcla asfáltica y si a dicha mezcla le agregamos plástico reciclado podría aumentar la inversión en estos proyectos y dar una gran ayuda al medio ambiente sin necesidad de cambiar en gran medida las formas convencionales de producir la mezcla asfáltica.

En nuestro país los pavimentos en general, se ven afectados por las condiciones del climatológicas y altas cargas de los vehículos de transporte comercial terrestre, responsable

casi en un 100% de mover la carga desde y hacia los puertos marítimos, lo anterior se traduce en deformaciones permanentes para las mezclas asfálticas; esto unido al crecimiento al crecimiento desmedido de la flota vehicular, han generado un deterioro a la red vial en niveles que fueron casi imposibles de predecir; por esta razón se debe buscar una solución que proporcione un mejor desempeño de los pavimentos en las carreteras nacionales.

Según (LanammeUCR, 2015), el país necesita al menos 3 ligantes diferentes para poder cubrir la necesidad básica de la infraestructura vial; sin embargo el único órgano que está a cargo de la distribución y compra de ligantes en Costa Rica es la Refinadora Costarricense de Petróleo S.A (RECOPE), la cual solo compra y distribuye un solo ligante. Esta situación afecta directamente los proyectos del país, donde se combinan altas cargas vehiculares, alto TPD y microclimas a lo largo de una misma carretera y, donde por licitación se fijan parámetros de aceptación de alta exigencia; los cuales obligan al uso de materiales de excelente calidad y a la modificación de las mezclas asfálticas (uso de polímeros y aditivos) para lograr un buen desempeño a lo largo de la vida útil.

Es notable el constante uso del plástico y de productos a base de este alrededor de nosotros, sea donde sea que estemos hay algún objeto hecho de plástico y el problema no tanto su uso, sino, en cómo y dónde desecharlo o tratarlo. Cabe recalcar, que ya se están efectuando grandes esfuerzos para reciclar y reutilizar este producto pero, hace falta una enorme inversión y no solo en dinero, sino en ideas y en cultura, debido a esto, mucho del conocimiento que se adquiere debe estar dedicado hacia el alivio progresivo de este problema mundial, donde los residuos que producimos tardan décadas, siglos e incluso en algunos casos con la tecnología que tenemos hoy en día, no hay manera de que ciertos plásticos sean tratados o eliminados, y que además ni la naturaleza y el tiempo pueden

desintegrarlos. Cada campo de pensamiento puede cooperar a la causa, incluyendo la ingeniería civil aplicando métodos de mejoramiento de pavimentos se pueden reutilizar hasta 150000 botellas de 300 ml por kilómetro de carretera (Monturiol Arroyo, 2019).

Este trabajo pretende crear y aportar conocimiento acerca del mejoramiento de ciertas propiedades físico-mecánicas de la mezcla asfáltica con plástico reciclado, ya sean botellas, bolsas, entre muchos otros objetos de este tipo, para así dar una mejora a los pavimentos de nuestras redes viales de cualquier zona y con distintos climas de nuestro territorio y llegar a disminuir el uso de otros polímeros o aditivos, y lo más importante es reducir costos en los proyectos de interés nacional, que si lo ponemos en perspectiva se necesitan urgentemente.

Finalmente, este proyecto es una parte de una investigación mucho más grande del laboratorio Mat-Tec que busca, entre otros muchos objetivos, estudiar pavimentos modificados para su uso adecuado y que cumplan las normas de nuestro país, además se intenta dar una buena opción, ante la gran urgencia de ampliar nuestras carreteras, de crear nuevos puntos de conexión, asimismo uno de los puntos más importantes es el mantenimiento y rebacheo de las vías de transporte actuales para dar un mejor flujo vehicular a toda la flota y aliviar el congestionamiento que se vive todos los días. También un fin muy importante es el tema de costo, donde se tienen muchas veces buenas ideas pero no se cuenta con el apoyo económico, esta clase de proyectos puede incentivar una mayor inversión nacional e incluso internacional.

Objetivo general

Comparar y evaluar propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas convencionales y las mezclas asfálticas modificadas con plástico reciclado.

Objetivos específicos.

-Obtener la vida por fatiga que reciben las muestras modificadas con Resin8 mediante el método de viga a cuatro puntos.

-Determinar el contenido de asfalto de mezclas asfálticas modificadas con resina plástica y mezcla virgen mediante el método de centrifuga.

-Realizar la granulometría de muestras modificadas con resina plástica y sin modificar después de la extracción del asfalto.

-Calcular la gravedad específica máxima teórica para mezclas con resina plástica y mezclas sin modificar.

-Obtener lecturas de estabilidad y flujo mediante la metodología Marshall de muestras modificadas con resina plástica y sin modificar.

-Comparar resultados de vida por fatiga, gravedad específica máxima teórica, estabilidad y flujo, contenido de asfalto y granulometría de la muestra con resina plástica contra una muestra virgen.

Alcances y Limitaciones

Alcances

-El presente trabajo se utilizará la metodología Marshall para poder evaluar mediante dichas pruebas el desempeño de una muestra asfáltica con resina plástica.

-Se intentará optimizar el desempeño de los pavimentos asfálticos tradicionales para así dar una opción de mejora a las mezclas sin tener un costo demasiado elevado.

-Se usará la resina plástica llamada “Resin8” para intentar suplir algunas deficiencias encontradas en otros tipos de resinas tales como los problemas de rigidez, de fatiga y en ciertos casos de daño por humedad.

-Se compararán los resultados de las pruebas Marshall con una muestra de pavimentos asfáltico tradicional.

-Finalmente, un alcance muy importante es que se reciclará plástico proveniente de botellas y bolsas fabricadas con dicho material.

Limitaciones

-Considerando que en Costa Rica solo se distribuye un tipo de ligante brindado por la Refinería Costarricense de Petróleo, todo el proyecto y lo que involucre se realizará con este tipo de ligante, por ende, todos los resultados serán tomando en cuenta esa única opción.

-El equipo que se va a utilizar será solo con para la metodología Marshall, debido a que solo se dispone de este equipo para la realización del experimento.

Delimitaciones

Delimitación espacial

Este trabajo puede involucrar a todos los proyectos del territorio nacional que involucren la fabricación de una mezcla asfáltica. Debido a que, por ejemplo, uno de los puntos a destacar es que se mejorará la durabilidad de los pavimentos, por ende, todos los pavimentos asfálticos en cualquier zona se pueden ver beneficiados. Otro punto importante es que en teoría es conveniente utilizar este tipo de mezclas modificadas en lugares expuestos a altas deformaciones permanentes, se pueden utilizar en rutas muy importantes tales como las que conectan las fronteras norte y sur, como así también ambos puertos. Además, se podrán ver beneficiados los proyectos que estén en zonas húmedas, que en nuestro país sobran, debido a que se verá una mejora en el daño por humedad.

Delimitación temporal

Esta investigación busca incentivar el mejoramiento de los pavimentos asfálticos de Costa Rica de los próximos 30 años, ya que muchos proyectos se pueden ver beneficiados con este método, se sabe bien que proyectos de construcción y más aún, de envergaduras grandes, duran en ser procesados, debido a esto, se prevé que en los próximos 5 años se sigan haciendo investigaciones al respecto donde se evalúen distintos escenarios y con distintas pruebas así como también que se empiecen a crear tramos de prueba, por esa razón, después de esos 5 años, se podrá empezar a ver proyectos de esta índole, pero en sí a menos de que se encuentre un material que sustituya los pavimentos tradicionales el uso del plástico en las mezclas asfálticas siempre se podrán usar.

Marco teórico

Asfalto

“Es un material aglomerante de color oscuro, constituidos por mezclas complejas de hidrocarburos no volátiles de alto peso molecular, originarios del petróleo crudo, en el cual están disueltos, pueden obtenerse por evaporación natural de depósitos localizados en la superficie terrestre, denominados Asfaltos Naturales, o por medio de procesos de destilación industrial cuyo componente predominante es el Bitumen. Los asfaltos destilados del petróleo son producidos ya sea por destilación por vapor o soplados. La destilación por vapor produce un excelente asfalto para pavimentos, mientras que el producto de destilación por aire o soplado tiene una escasa aplicación en pavimentación”. (Valenzuela V, 2003). (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015) Además estos materiales ligan con el agregado pétreo para conformar mezclas asfálticas y son los responsables de brindar, a la capa asfáltica resistencia mecánica bajo carga monotónica, estática y/o cíclica, impermeabilidad y durabilidad. Existen algunos tipos de asfaltos que son utilizados para la fabricación de mezclas asfálticas tales como:

- Cemento asfáltico
- Emulsiones asfálticas
- Asfaltos rebajados
- Asfaltos modificados y multigrados
- Asfaltos espumados
- Crudos pesados

Según (RECOPE, 2021) “Se puede obtener en forma natural de yacimientos de asfalto o por medio de procesos de refinación del petróleo. Tiene gran valor desde el punto de vista de ingeniería porque es, fuerte, adhesivo, durable, altamente resistente a la reacción con ácidos, bases, sales y además provee una apropiada flexibilidad a sus mezclas con agregado mineral. Por su naturaleza visco elástica su comportamiento depende de la temperatura y el tiempo de aplicación de carga.” Cabe recalcar que el único tipo de asfalto que RECOPE brinda para la construcción de carreteras es el AC-30, debido a un acuerdo entre las entidades relacionadas con el asfalto, ya que llegaron a la conclusión de que este era el tipo que más se ajusta a las necesidades de Costa Rica.

Agregados

Según Cemex los agregados, compuestos de materiales geológicos tales como, la piedra, la arena y la grava, se utilizan virtualmente en todas las formas de construcción. Se pueden aprovechar en su estado natural o bien triturarse y convertirse en fragmentos más pequeños

Los agregados que se utilizan para construir se denominan "agregados de construcción", pero existen otros tipos de agregados que se pueden utilizar en agricultura, manufactura y otras industrias.

Los agregados son un ingrediente indispensable en el concreto premezclado, el asfalto y el mortero. Representan aproximadamente de 60% a 75% del volumen total del concreto premezclado, además ejercen una importante influencia en las cualidades del concreto recién mezclado, así como también después de que éste endurece

Los agregados no sólo incrementan la resistencia del concreto, sino que también pueden hacer que la mezcla sea más compacta, permitiendo aplicaciones como la

impermeabilización y retención de temperatura. Pueden además contribuir a las cualidades estéticas del concreto. Por ejemplo, la arena aporta la brillantez a las superficies tratadas.

Mezcla asfáltica

La mezcla asfáltica es un material heterogéneo constituido por una mezcla de agregados de diferentes tamaños, polvo mineral y un ligante asfáltico, de forma que una vez compactada presenta propiedades suficientes para resistir el tráfico vehicular. El ligante asfáltico puede ser cemento asfáltico o un cemento asfáltico modificado, este es impermeable lo que es perfecto para restringir la permeabilidad de dicho cemento. Los agregados crean un esqueleto pétreo que aporta rigidez y resistencia a la mezcla. Los aditivos dependiendo de las necesidades que requiera el proyecto, hacen variar propiedades físico-mecánicas de la mezcla asfáltica y para poder usarlo en carreteras se deberá compactar para mejorar la fricción del esqueleto granulométrico y la impermeabilidad de la capa.

Las mezclas se dividen en frías y calientes, donde la mezcla asfáltica fría es una combinación de agregado mineral con o sin relleno mineral al cuál se les aplica un ligante asfáltico como emulsión asfáltica en Costa Rica existe un tipo de emulsión llamada CRS-1h y la mezcla en caliente tiene aplicado un ligante asfáltico en caliente. Para medir el desempeño de las mezclas asfálticas existen distintos métodos entre los más conocidos están el Superpave y el método Marshall, estos métodos ya tienen definidos valores estándares que deben cumplirse para la obtención de una mezcla asfáltica con buenas propiedades físico-mecánicas y así poder cumplir con los estándares. En nuestro caso solo utilizaremos el método Marshall.

Mezclas asfálticas modificadas

Las mezclas asfálticas modificadas son mezclas vírgenes que se les agrega un polímero como aditivos para mejorar alguna o algunas de sus propiedades, logrando así un mejor rendimiento, sin aumentar los materiales tradicionales para el diseño de vías terrestres y así disminuyendo costos de proyectos. Esto se ha empezado a utilizar más debido al incesante aumento de la cantidad de vehículos y además del peso de estos, otro motivo es el que hoy en día se construyen carreteras en todas las zonas posibles para dar accesibilidad y sabemos que en ciertas zonas debido al clima que presentan y su ambiente, cuesta más hacer una buena carretera con estas adversidades porque se veía en la necesidad de conseguir materiales de una calidad mayor y además de que no en toda zona de construcción se tiene acceso a materiales de buena calidad o aunque sea que sirvan de una manera correcta para el proyecto. Según estudios de Lanamme y de distintos autores alrededor del mundo la utilización de un agente modificante en la mezcla puede aumentar la vida útil de una mezcla de dos a tres veces (dependiendo del caso que se esté trabajando) por tan solo un aumento en la obra de un 25% en comparación de la obra sin ningún polímero, esto evidentemente debe ir asociado al costo del polímero y a lo que este vaya a modificar en el proceso de fabricación, entonces a mediano y largo plazo es una inversión muy favorable para todas las partes del proyecto.

Los polímeros son sustancias de alto peso molecular compuestas de grandes y cientos de moléculas, debido a su gran variedad de propiedades existen polímeros sintéticos como los plásticos de todos los días, pero también existen los naturales como el hule o el caucho

La NCAT (National Center of Asphalt Technology) dio a conocer una lista de las razones por las cuales es importante y a la vez bueno la implementación de un polímero para la modificación de mezcla asfáltica. Algunas razones que da son:

- 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, la NCAT determina que hay dos tipos de polímeros que han dado muy buenos resultados.

Esto se trata de los homopolímeros, conformados por una sola unidad estructural, y los copolímeros, los cuales constan de varias unidades estructural 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 vuelen a su longitud original. Tienen deformaciones pseudopolíticas 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 temperatura.

-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 se 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 1 mejoran el comportamiento de las mezclas asfálticas tanto a altas como a bajas temperaturas. Los tipo 2 mejoran el comportamiento de mezclas asfálticas a bajas temperaturas y los tipos 3 mejoran la resistencia a las roderas de las mezclas asfálticas, disminuye la susceptibilidad térmica del cemento al agregarse a una mezcla, el principal efecto es el cambio en la relación viscosidad-temperatura (Delgado, 2008)

Para poder incorporar un polímero para modificar nuestra muestra tenemos que tomar en cuenta ciertos aspectos:

-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: depende 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.

Sin embargo, añade (Delgado, 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 son los siguientes:

- 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.

Existen un par de características muy importante que van a influir en el comportamiento de la mezcla a realizar tales como la forma física en al que se incorpora el polímero junto con el tamaño de las partículas. Otro punto que menciona (Delgado, 2008) es que para que la dispersión en nuestra mezcla sea efectiva, practica y económica, se tendrá que cumplir los siguientes aspectos:

- Costo adecuado
- Debe ser disponible por volumen por el fabricante
- Tener afinidad química con el asfalto
- Ser resistente a las temperaturas que enfrente en el proceso de fabricado
- Mejorar la resistencia a fluir.

El asfalto modificado debe cumplir con ciertas especificaciones al final como lo son:

- 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 conseguir una modificación exitosa se recomienda conocer de primera mano las propiedades químicas y termodinámicas del polímero. Asimismo, se deben de realizar una serie de ensayos de laboratorio, en este caso basándose en la estabilidad de Marshall, para así poder diseñar, evaluar y clasificar la mezcla obtenida.

Metodología Marshall

En nuestro caso usaremos la compactación Marshall que está definida en el AASHTO R 68 para poder confeccionar los especímenes de una manera genérica y poder hacer la comparación. Según Lanamme en el método Marshall se confeccionan especímenes de prueba de 64 mm de alto y 102 mm de diámetro; se preparan mediante un procedimiento de calentar, combinar y compactar la mezcla de asfalto y agregado pétreo, mediante un número determinado de golpes del martillo. Los dos aspectos principales del método Marshall son la volumetría y la prueba de Estabilidad y Flujo de los especímenes compactados.

La metodología de diseño Marshall tiene como finalidad fundamental encontrar combinaciones adecuadas de agregados minerales y cemento asfáltico, que permita brindarle a la mezcla asfáltica resultante una serie de características físicas y de resistencia que se establecen cuales en los requisitos contractuales de calidad, como en el diseño de dicha mezcla asfáltica. Las disposiciones vuales de Costa Rica definen los requisitos que cuantifican la calidad de la mezcla asfáltica a través de la definición de valores límites de algunos parámetros específicos para la mezcla asfáltica, tanto de la metodología Marshall como de características volumétricas, a saber: contenido de vacíos en mezcla, estabilidad de flujo vacíos en el agregado mineral (VMA), vacíos en llenos de asfalto (VFA), correspondientes de la metodología Marshall y el parámetro volumétrico de la relación polvo/asfalto. Por otra parte, estas mismas disposiciones indican que la administración deberá aprobar el diseño de mezcla presentado por el contratista, previo al inicio de producción de la mezcla asfáltica bajo este diseño; sin embargo, esta aprobación no contempla un análisis específico de los parámetros del diseño que permita establecer alguna posible particularidad de este, tal como la restricción del rango de contenido de asfalto

indicado, que se define en la metodología Marshall como el óptimo $\pm 0,5\%$. (Lanamme, 2014)

En sí la metodología de diseño Marshall es la que ha perdurado durante mas años en Costa Rica. Al igual que todas las metodologías existentes lo que intentan obtener es la mejor combinación en porcentaje de agregados minerales y cemento asfáltico, que pueda brindar a la mezcla características físicas y de resistencias adecuadas para así cumplir con los requerimientos que establecen las entidades reguladoras de este tipo de productos.

Al encontrar este balance también se busca el buen acomodo de las partículas de agregado y del asfalto, esto para que pueda resistir y manejar de buena manera los cambios volumétricos hechos por la carga del tránsito (Loria Salazar & Gomez Sandoval, 2021) que será destinado el producto y los efectos que tienen las adversidades climatológicas como en los cambios de temperatura entre el día y la noche.

La metodología Marshall pretende determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación de agregado. El método también provee información sobre las propiedades de la mezcla asfáltica en caliente, y establece densidades y contenidos óptimos de vacío que deben ser cumplidos durante la construcción del pavimento (Asphalt Institute, 2007)

En sí, sabemos que la solución a la creación de una mezcla asfáltica se basa mucho en lo económico por ende, el método Marshall también colabora en seleccionar un diseño económico cumpliendo a su vez con los parámetros mínimos establecidos:

-Asfalto suficiente para formar una película que cubra el agregado y lo mantenga unido y provea una capa a prueba de agua con el propósito de garantizar durabilidad.

-Suficiente resistencia de la mezcla a la deformación permanente por la carga de tránsito a la que será sometida durante su función en carretera.

-Porcentaje de vacíos suficiente para permitir la compactación adicional como producto de las cargas de tránsito sin presentar deterioro, ni exudación de asfalto, ni comprometer la permeabilidad de la mezcla asfáltica.

-Trabajabilidad suficiente para permitir la colocación y compactación eficiente sin presentar segregación.

Parámetros de diseño de mezcla asfáltica en caliente

Existen parámetros de diseño típicos o comunes que se consideran dentro de la metodología Marshall, estos se definen con respecto al tráfico que se estima que será utilizado en la fase de operación en carretera.

Para realizar el diseño Marshall se debe clasificar primero el tipo de mezcla asfáltica en caliente de acuerdo con su uso.

Figura 2. Designación de mezclas según su uso.

Designación	Aplicación por tipo de capa asfáltica	Aplicación por niveles de ESAL's
Mezcla A	Mezcla asfáltica en caliente exclusiva para bacheo para rutas donde la superficie existente consiste en algún tipo de tratamiento superficial, incluyendo lechadas asfálticas	Hasta 10 millones ESAL's (mediano volumen de tránsito)
Mezcla B	Mezcla asfáltica en caliente para capas o sobrecapas asfálticas y bacheo en rutas de mediano volumen de tránsito donde la superficie existente consiste en mezcla asfáltica	Hasta 10 millones ESAL's (mediano volumen de tránsito)
Mezcla C*	Capas asfálticas intermedias (alto desempeño)	Más de 10 millones ESAL's (alto volumen de tránsito)
Mezcla D*	Capas asfálticas de rodadura (alto desempeño)	Más de 10 millones ESAL's (alto volumen de tránsito)

Fuente: Repositorio MOPT

Las propiedades volumétricas de diseño Marshall deben cumplir con los parámetros establecidos en la siguiente figura.

Figura 3. Número de golpes según clasificación de tránsito

Criterios para diseño de mezcla asfáltica Método Marshall	Clasificación del tránsito ¹					
	Tránsito Pesado		Tránsito Medio		Tránsito Liviano	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Número de golpes en cada cara para compactar el espécimen de ensayo	75		50		35	
Porcentaje de vacíos %	3,0	5,0	3,0	5,0	3,0	5,0
Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral (VMA) %	Ver Tabla 401-02					
Porcentaje de Vacíos llenos de Asfalto (VFA) %	65	75	65	78	70	80
b) Relación polvo - asfalto (P/A)						
Relación polvo - asfalto (P/A) %	0,6	1,3	0,8	1,6	-	-
¹ Clasificaciones del tránsito Liviano: Condiciones que resultan en un ESAL de diseño (millones): <0,3 Mediano: Condiciones que resultan en un ESAL de diseño (millones): entre 0,3 y 10 Pesado: Condiciones que resultan en un ESAL de diseño (millones): >10 hasta 30						

Fuente: Repositorio MOPT

Además, los porcentajes de vacíos deben cumplir con los parámetros establecido en la siguiente figura.

Figura 4. Vacíos de diseño

Tamaño Máximo Nominal ²		VMA mínimo, por ciento		
		Vacíos de Diseño, por ciento ³		
mm ¹	(pulg) ¹	3,0	4,0	5,0
4,75	(0,19)	16,0	17,0	18,0
9,5	(3/8)	14,0	15,0	16,0
12,5	(1/2)	13,0	14,0	15,0
19	(3/4)	12,0	13,0	14,0
25	(1,0)	11,0	12,0	13,0
37,5	(1,5)	10,0	11,0	12,0

¹Especificación Normal para Tamaños de Tamices usados en Pruebas, ASTM E 11(AASHTO M 92)
² El tamaño máximo nominal de partícula es un tamaño más grande que el primer tamiz que retiene más de 10 por ciento del material.
³ Interpole el VMA mínimo para los valores de vacíos de diseño que se encuentren entre los que están citados.

Fuente: Repositorio MOPT

Figura 5: Parámetros requeridos de diseño en la metodología Marshall

Parámetro	Requisito Mezclas Tipo A	Requisito Mezclas Tipo B	Requisito Mezclas Tipo C	Requisito Mezclas Tipo D	Método de Ensayo
Estabilidad, N	≥ 5500	≥ 8000	≥ 8000	≥ 8000	INTE 04-01-11
Flujo, mm	3 ± 1	2,5 ± 1	2,5 ± 1	2,5 ± 1	INTE 04-01-11
Resistencia al daño inducido por la humedad en mezclas asfálticas compactadas ⁽¹⁾ (sin efectuar período de congelamiento)	≥ 75%	≥ 75%	≥ 85%	≥ 85%	INTE 04-01-05
Resistencia al daño inducido por la humedad en mezclas asfálticas compactadas a 25°C ⁽¹⁾ (especímenes sin condicionar), kPa	-	≥ 700	≥ 700	≥ 700	INTE 04-01-05
Deformación plástica luego de 8000 ciclos de carga a 60°C ⁽²⁾ , mm	-	-	≤ 3,5	≤ 2,5	AASHTO T 340
Cantidad de repeticiones para la falla por fatiga a 20°C para un nivel de deformación unitaria controlada de: ⁽³⁾ 400 µm 600 µm	-	-	≥ 450 000 ≥ 50 000	≥ 300 000 ≥ 25 000	AASHTO T 321

Fuente: Repositorio MOPT

Las especificaciones Marshall se adecuan según sea el propósito del proyecto; es decir, no se puede hacer un mismo diseño para una urbanización que para una autopista que conecte dos puertos marítimos importantes, sin embargo las especificaciones costarricenses que se encuentran hasta el momento, dichas especificaciones no varían de acuerdo con el tráfico que se espere que utilice la carretera, sino el uso que se le vaya a dar a la mezcla, diferenciado entre el bacheo en rutas de tratamiento superficial, o con capas de sobrecapas asfálticas.

Metodología para el análisis de la consistencia de los diseños de mezcla

La normativa costarricense establece los requisitos que debe cumplir toda mezcla asfáltica en caliente, los cuales se tipifican en su mayoría para la metodología de diseño de mezcla Marshall, por lo que el cumplimiento integral de los requisitos establecidos en este procedimiento, no solo constituye una obligación contractual sino que define las pautas de producción que se deben seguir para producir mezcla asfáltica con la calidad pactada.

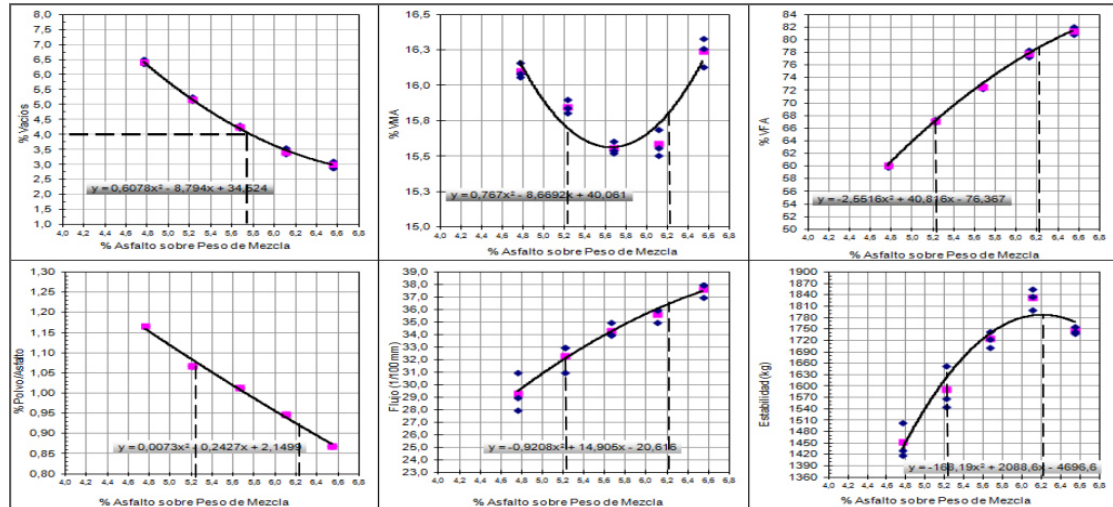
El cumplimiento de dichos requerimientos se evalúa mediante los parámetros Marshall (contenido de vacíos, VFA, VMA, relación polvo/asfalto, densidad, flujo y estabilidad), deben cumplirse dentro de la totalidad del rango óptimo de contenido de asfalto establecido en el diseño de la mezcla asfáltica. Por ejemplo, si el contenido óptimo de asfalto que se estima para el diseño es de un 5,0 %; dicha metodología indica que dentro del rango óptimo $\pm 0,5$ (de 4,5% a 5,5%) todos los criterios de diseño deben cumplir con las especificaciones. Si no es así se tendrá que determinar el rango esperado en el cual se pueda lograr la condición requerida.

Gracias a la metodología que usa la Auditoria Técnica del Lanamme, se analiza el comportamiento individual de cada parámetro dentro del rango óptimo de contenido de asfalto con el fin de evaluar si existe el riesgo potencial de incurrir en un incumplimiento durante la producción de la mezcla asfáltica en planta.

En estos casos la auditoria ha considerado un riesgo potencial el incumplimiento de alguno de los parámetros establecidos durante la producción de mezcla asfáltica. Además si se tiene un buen control de la materia prima, la consistencia del asfalto y se verifica bien la fórmula de trabajo se podrá reducir este riesgo. Los casos en los cuales no se deberían de presentar grandes variaciones con los parámetros de las mezclas es en los que la reducción del rango de asfalto es muy pequeña y evidentemente si se tiene un buen control de la mezcla no deberían aparecer inconsistencias. En el caso opuesto donde tal vez el proceso de producción no tenga demasiados controles y la restricción del rango de asfalto es alta y junto con esto tal vez el proceso de producción varía mucho, las inconsistencias podrían verse en aumento y el incumplimiento de los parámetros indicados se podría ver afectado mayormente.

Para verse reflejado los resultados de la metodología Marshall se hacen una serie de ensayos en un laboratorio para así poder traducir los resultados en gráficos, estos gráficos se comparan con los estándares y se puede ver reflejado si la mezcla está bien o mal hecha. Los gráficos compararan las propiedades de mezcla asfáltica que se necesiten versus el contenido de asfalto y con esto se calculan las ecuaciones de la línea de tendencia para cada uno de los parámetros necesarios tal y como se muestra en la Figura 6.

Figura 6: Ejemplo de resultado de ensayo Marshall. Propiedades de la mezcla asfáltica según el contenido de asfalto.



Fuente: Auditoria Técnica, LanammeUCR

Estos gráficos son utilizados para determinar el contenido de asfalto donde los parámetros de la metodología Marshall se cumplan y de ahí se puede obtener el rango óptimo de dicho parámetro. Normalmente, el diseño Marshall establece un contenido óptimo de asfalto donde se obtiene el 4% de vacíos, y a partir de este valor encontrado, se evalúan los otros parámetros en $\pm 0,5\%$ de variación. Para el caso mostrado en la Figura 2, el contenido de asfalto óptimo que resulta es de $5,75\% \pm 0,5\%$ (rango óptimo: 5,25% a 6,25%).

Ya cuando se analizan los rangos de contenido de asfalto óptimo que cumplan los parámetros de diseño, se elabora un resumen en tabla como se aprecia en la Tabla 4. Esta tabla muestra los valores máximos y mínimos de los parámetros requeridos para el diseño de la mezcla, se puede apreciar que existen incumplimientos en los parámetros de contenido de vacíos y BFA, lo cual limitaría al rango óptimo para poder cumplir con los requisitos estándar.

Figura 7. Ejemplo de análisis del rango efectivo de contenido de asfalto

Parámetro	Límites de especificación		Contenido de asfalto			Cumplimiento
			Óptimo - 0,5% 5,25%	Óptimo 5,75%	Óptimo + 0,5% 6,25%	
Estabilidad, kg	Mayor a 800		1.633	1.752	1.787	SI
Flujo, l/100 cm	20	40	32	35	37	SI
Contenido de vacíos, %	5	3	5,1^(a)	4,1	3,3	NO
Relación Polvo/asfalto	1,3	0,6	1,1	1,0	0,9	SI
VMA	Mayor a 14		15,7	15,6	15,8	SI
VFA tránsito liviano	70	80	68^(b)	74	79	NO
VFA tránsito medio	65	78	68	74	79^(c)	NO
VFA tránsito pesado	65	75	68	74	79^(d)	NO

Fuente: Auditoria Técnica, LanammeUCR

Resistencia a la fatiga

Conforme pasa el tiempo la carpeta asfáltica puede llegar a presentar agrietamientos debido a cambios volumétricos causados por las cargas repetitivas del tránsito o por variaciones climatológicas. El primer caso, se generan esfuerzos de tensión en la base de la carpeta asfáltica; los cuales al llegar a superar la resistencia del material, generan el fisuramiento y terminan reflejándose en la parte superior. Los fisuramientos por variaciones climatológicas son comunes en los pavimentos asfálticos, incluso se podrían tomar como la principal; por ende, la investigación sobre este tema en específico es muy importante porque podría prever mucho gasto económico y en sí darles una larga vida útil a los pavimentos asfálticos para beneficio del usuario.

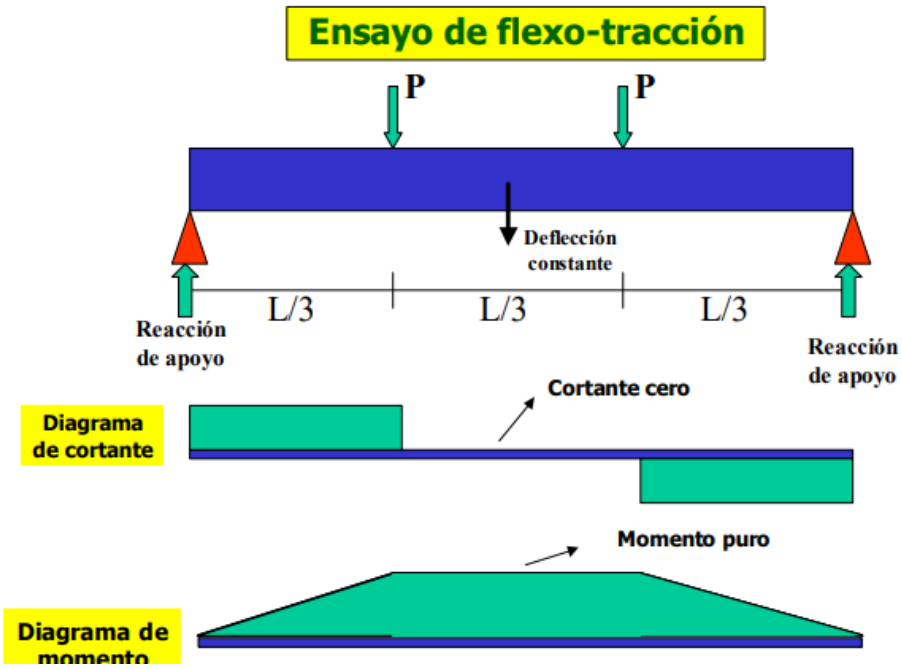
Este tipo de agrietamiento se origina en la estructura de la mezcla asfáltica, cabe recalcar que es una de las fallas más costosas de reparar durante la rehabilitación de la estructura de la mezcla. En efecto, aquellos pavimentos asfálticos que tengan un buen refuerzo contra las fallas por fatiga, que eviten el agrietamiento de la estructura de la mezcla y que sean suficientemente flexibles, tienden a tener una mayor durabilidad, evidentemente deben de contar con buenas bases para soportar la estructura de una manera adecuada.

La forma de carga, generalmente controlada por esfuerzo o por deformación para los ensayos de laboratorio, es además uno de los principales factores que afectan la respuesta a la fatiga. El contenido de vacíos de aire y la temperatura, que tienen un efecto sobre la rigidez de la mezcla, podrían tener una influencia sobre la fatiga mayor que cualquiera de los otros factores. Además, como se mencionó, muchas propiedades de la mezcla, el tipo de carga y los factores ambientales afectan el desempeño a fatiga y deben de considerarse en el desarrollo de los protocolos de ensayo y en la determinación de las propiedades del ligante y la mezcla asfáltica pues son esenciales para la resistencia a la fatiga de los pavimentos. (Loría, 2005)

Un enfoque más reciente, consiste en obtener mezclas asfálticas infinitamente resistentes a la fatiga. Estos se conocen como pavimentos perpetuos, y se logran buscando la forma de reducir los esfuerzos a los que está sometida la mezcla asfáltica en las fibras donde se inicia el agrietamiento. (Loría, 2005)

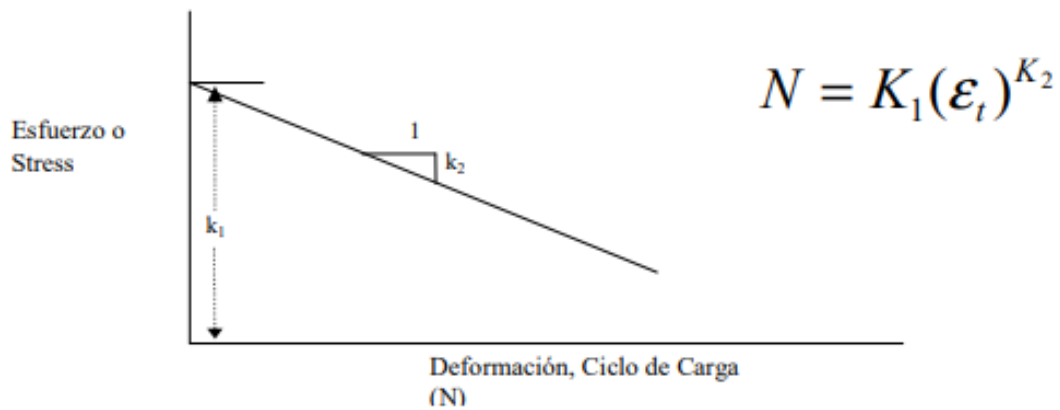
Una de las formas típicas de estimar las propiedades a fatiga de la mezcla asfáltica colocada en sitio es el ensayo a flexo-tracción. El ensayo a flexo-tracción determina la vida a fatiga de una pequeña viga (380 mm de largo x 50 mm de espesor x 63 mm de ancho) sometiéndola a repetidos esfuerzos de flexo-tracción hasta alcanzar la falla. El espécimen de muestra es extraído de mezcla asfáltica producida en el laboratorio o compactada en campo. Los resultados generalmente se grafican para mostrar los ciclos a la falla vs. esfuerzo o deformación aplicada. Finalmente, y en términos generales, se buscaría determinar las leyes de fatiga para la mezcla asfáltica, con lo que se puede encontrar las deformaciones, esfuerzos y deflexiones admisibles de la mezcla. (Loría, 2005).

Figura 8: Ilustración del ensayo de flexo-tracción



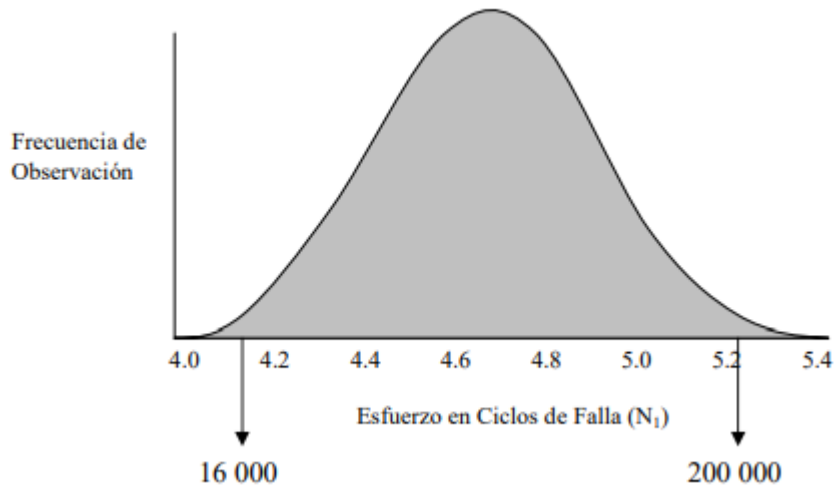
Fuente: LanammeUCR

Figura 9: Curva típica de fatiga



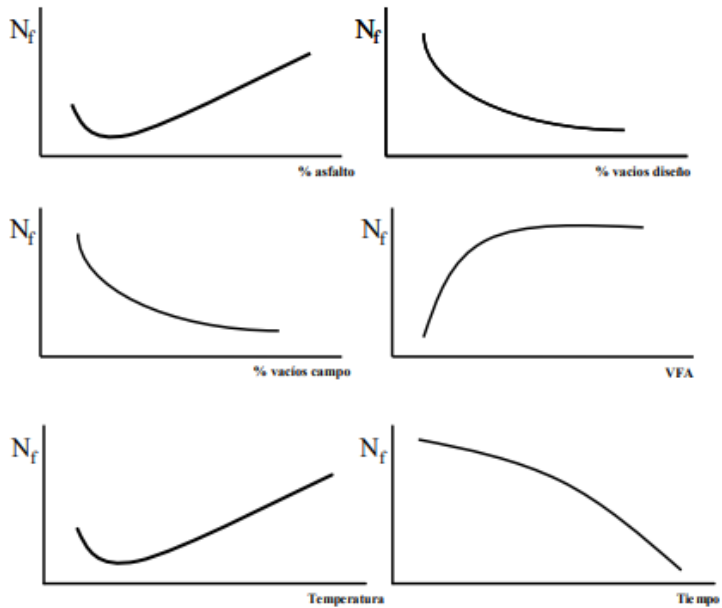
Fuente: LanammeUCR

Figura 10: Precisión en la prueba de fatiga



Fuente: LanammeUCR

Figura 11: Resultados esperados de curvas en ensayo de fatiga



Fuente: LanammeUCR

Los resultados más importantes que se desean obtener son los siguientes:

- Módulo de rigidez
- Energía disipada durante el ensayo
- Número de ciclos de carga para un dado criterio de falla

Ensayo de fatiga ([AASHTO T 321-17](#))

En el presente trabajo se va a realizar un estudio de la resistencia por fatiga mediante el ensayo llamado viga de cuatro puntos o flexo-tracción, en sí, se trata de una máquina de fatiga que ejerce carga en cuatro puntos sobre la vigueta que está simplemente apoyada, esta carga simula el paso de vehículos sobre el pavimento asfáltico cuando ya este está operando, esta carga se produce hasta que la vigueta falle o hasta algún valor deseado. Generalmente se van a reproducir los resultados en gráficos que nos da la máquina de fatiga y con esto se van a buscar las leyes de la fatiga. Existen algunas características muy importantes que se deben tomar en cuenta para este ensayo las cuales son:

- Protocolo de ensayo: AASHTO T 321-17
- Carga en 4 puntos
- Carga cíclica a 10 Hz
- Temperatura de ensayo: 20 °C
- Especímenes de 50 mm X 62.5 mm X 375 mm

El protocolo de ensayo AASHTO T 321-17, señala la realización de un condicionamiento del espécimen de 2 horas, a 20 °C.

Procedimiento del ensayo

Según el reporte de (Loría, 2005), el Programa Estratégico de Investigación en Carreteras (SHRP por sus siglas en inglés) ofrece una metodología para caracterizar la respuesta a fatiga de una mezcla un tiempo de ensayo relativamente corto. El procedimiento emplea cuatro especímenes evaluados a cuatro diferentes niveles de deformación para determinar las propiedades de resistencia a la fatiga de la mezcla asfáltica. Los niveles de deformación son señalados dentro de los períodos de vida típicos para una mezcla, entre 5000 y 1-2 millones de ciclos, dependiendo, por supuesto, de la deformación unitaria o esfuerzo aplicado. El ensayo es desarrollado en el modo de esfuerzo controlado a una frecuencia de 10 Hz, como se indica:

Realice un ensayo al cual la vida del espécimen está entre 5000 y 10000 ciclos, los rangos recomendados de deformación estarán entre 800 y 1000 μS .

Si el primer ensayo indica una vida de fatiga mayor de 10000 ciclos, el nivel de deformación deberá ser incrementado para el segundo ensayo. Si la vida a fatiga del primer ensayo es menor que 10000 ciclos, el nivel de deformación deberá ser reducido para el segundo ensayo.

Los resultados de esos ensayos serán utilizados para generar la relación de deformación versus ciclos de carga:

$$N = A + B * \epsilon$$

Donde:

N = Ciclos para la falla

A = intersección de la línea de regresión

B = pendiente de la línea de regresión

ϵ = esfuerzo aplicado

Esta relación es utilizada para estimar la deformación que se requiere para tener una vida de fatiga aproximada entre 100000 y 350000 ciclos.

Se deben hacer dos ensayos adicionales, uno a 100000 ciclos y el otro a 350000 ciclos de carga.

Para cada uno de los ensayos se calcula la rigidez, los esfuerzos aplicados, las deformaciones y la energía disipada.

Luego el esfuerzo aplicado pico a pico se da por la siguiente formula:

$$\sigma_t = \frac{3aP}{wh^2}$$

En donde:

σ_t = Máximo esfuerzo de tensión, N

a = L/3, mm

L = luz de la viga, mm

P = carga aplicada, N

W = ancho de la viga, mm

h = altura de la viga, mm

Deformaciones

La deformación se da por la siguiente formula:

$$\epsilon_t = \frac{12h\delta}{3L^2 - 4a^2}$$

Donde:

ϵ_t = deformación máxima, mm/mm

δ = deflexión de la viga en el eje neutral, mm

Rigidez a la flexión

La rigidez está dada por la siguiente formula:

$$s = \frac{\sigma_t}{\epsilon_t}$$

Donde “S” es la rigidez en pascales.

Angulo de fase

El ángulo fase se obtiene mediante la siguiente formula:

$$\phi = 300f * s$$

En donde:

ϕ = ángulo de fase

f = frecuencia de la carga, Hz

s = Tiempo de espera entre $P_{\text{máx}}$ y $\delta_{\text{máx}}$, s.

Energía disipada

La energía disipada por cada ciclo está dada por:

$$D = \pi * \sigma_t * \varepsilon_{sen}(\phi)$$

En donde “D” es la energía disipada por ciclo en Pascales. La energía disipada acumulada es la determinada por la suma de la energía disipada por el ciclo de vida del espécimen.

La curva de fatiga se determina en una curva de vida de fatiga versus deformación aplicada, para describirla, se utiliza la siguiente formula:

$$N_f = K_1 * \varepsilon^{-k_2}$$

Donde:

N_f = vida a fatiga, ciclos

ε = deformación aplicada, mm/mm

K_1 y K_2 = coeficientes de regresión

Módulo de elasticidad

Ya para terminar este punto, el módulo de elasticidad se obtiene de la siguiente manera:

$$E = [Pa/\delta wh] * \left[\frac{(3L^2 - 4a^2)}{4h^2 + k * (1 + \nu)} \right]$$

En donde:

P = Fuerza pico a = L/3, mm

δ = Deflexión pico al centro de la viga

w = Ancho de la viga

h = Altura de la viga

L = Luz de la viga

k = Esfuerzo cortante actual dividido por el esfuerzo cortante promedio (Se asume 1.5)

ν = Relación de Poisson por defecto

Granulometría

La granulometría que se hará por la definición que explican en el AASHTO T 30. Este método de ensayo consiste en determinar la distribución de los tamaños de las partículas de un agregado extraído de la mezcla asfáltica mediante un análisis por tamices. El tamaño de partícula del agregado se determina por medio de tamices de malla de alambre normalizados.

Este procedimiento cubre el análisis mecánico del agregado recuperado de muestras de mezcla de asfalto de acuerdo con AASHTO T 30-19. Este FOP utiliza el agregado recuperado del horno de ignición utilizado en AASHTO T 308. AASHTO T 30 fue desarrollado para el análisis de agregado extraído y por lo tanto incluye referencias al asfalto extraído y al elemento filtrante, que no se aplican en este FOP.

Los análisis de tamices determinan la gradación o distribución de partículas agregadas dentro de una muestra dada para determinar el cumplimiento de los estándares de diseño y producción.

Granulometría en tamizado de agregados finos y gruesos

Tamizado de agregados finos

Al realizar el ensayo de tamizado con el agregado fino en el laboratorio, se debe pasar el material fino por los respectivos tamices obteniendo un peso retenido en cada malla o tamiz. Para calcular el peso neto retenido en cada sección se tiene que aplicar la siguiente fórmula:

$$W_{Ret} = (W_{Ret} + W_b) - W_b$$

Tabla 1. Simbología granulometría.

Simbología	Descripción	Unidad
W_b	Peso de la bandeja	Gramos
W_{Ret}	Peso retenido	Gramos

Fuente: Laboratorio de Materiales de Construcción, Universidad Latina

Para calcular el peso neto retenido de la muestra de agregado fino se debe desarrollar la formula anterior de la siguiente manera:

$$W_{Ret} = (88,8 \text{ g}) - 79,6 \text{ g}$$

$$W_{Ret} = 9,2 \text{ g}$$

El procedimiento anterior se efectuó de igual manera para cada uno de los tamices por los cuales pasó el agregado fino en las pruebas que se realizaron en el laboratorio.

Se requiere determinar el porcentaje de agregado retenido en cada uno de los tamices por los cuales se pasa el agregado fino. Para calcular el porcentaje de material retenido durante el tamizado se aplica la siguiente fórmula:

$$\% Ret = \frac{W_{Ret}}{W_s Original} \times 100$$

Tabla 2. Simbología granulometría.

Simbología	Descripción	Unidad
W_b	Peso de la bandeja	Gramos
W_{Ret}	Peso retenido	Gramos
$W_s Original$	Peso original de la muestra	Gramos

Fuente: Laboratorio de Materiales de Construcción, Universidad Latina

Para calcular el peso neto retenido de la muestra de agregado fino se debe desarrollar la formula anterior de la siguiente manera:

$$\% Ret = \frac{9,2}{383,1} \times 100$$

$$\% Ret = 2.4\%$$

El procedimiento anterior se efectuó de igual manera para cada uno de los tamices por los cuales pasó el agregado fino en las pruebas que se realizaron en el laboratorio.

Tamizado de agregados grueso

Al realizar el ensayo de tamizado con el agregado grueso en el laboratorio, se debe pasar el material grueso por los respectivos tamices obteniendo un peso retenido en cada malla o tamiz. Para calcular el peso neto retenido en cada sección se tiene que aplicar la siguiente fórmula:

$$W_{Ret} = (W_{Ret} + W_b) - W_b$$

Tabla 3. Simbología granulometría.

Simbología	Descripción	Unidad
W_b	Peso de la bandeja	Gramos
W_{Ret}	Peso retenido	Gramos

Fuente: Laboratorio de Materiales de Construcción, Universidad Latina

Para calcular el peso neto retenido de la muestra de agregado grueso se debe desarrollar la formula anterior de la siguiente manera:

$$W_{Ret} = (2540,9 g) - 1869,5 g$$

$$W_{Ret} = 671,4 g$$

El procedimiento anterior se efectuó de igual manera para cada uno de los tamices por los cuales pasó el agregado grueso en las pruebas que se realizaron en el laboratorio.

Se requiere determinar el porcentaje de agregado retenido en cada uno de los tamices por los cuales se pasa el agregado grueso. Para calcular el porcentaje de material retenido durante el tamizado se aplica la siguiente fórmula:

$$\% Ret = \frac{W_{Ret}}{W_s Original} \times 100$$

Tabla 4. Simbología granulometría.

Simbología	Descripción	Unidad
W_b	Peso de la bandeja	Gramos
W_{Ret}	Peso retenido	Gramos
$W_s Original$	Peso original de la muestra	Gramos

Fuente: Laboratorio de Materiales de Construcción, Universidad Latina

Para calcular el peso neto retenido de la muestra de agregado grueso se debe desarrollar la fórmula anterior de la siguiente manera:

$$\% Ret = \frac{671,4}{2779,4} \times 100$$

$$\% Ret = 24,16 \%$$

El procedimiento anterior se efectuó de igual manera para cada uno de los tamices por los cuales pasó el agregado grueso en las pruebas que se realizaron en el laboratorio.

Figura 12. Ilustración de tamices.



Fuente: JMR Equipos SAC

Contenido de asfalto por centrifuga

Este ensayo se va a hacer siguiendo los términos y especificaciones indicados en la norma AASHTO T-164, que es el método estándar de prueba para la extracción cuantitativa de aglutinante de asfalto de mezcla en caliente (HMA): Estos métodos cubren la determinación cuantitativa de aglutinante de asfalto en muestras de pavimento de mezcla de asfalto en caliente. El agregado obtenido por estos métodos se puede utilizar para el análisis

de tamices utilizando T 30, este es el método estándar para determinar la cantidad de asfalto líquido que contiene la mezcla asfáltica producida. Esto nos va a dar una clara idea de lo que sucede con el contenido del asfalto y sus agregados al estar combinados con el Resine Eight.

Instrumentos necesarios para el experimento:

- Horno que pueda mantener constante la temperatura de 110 ± 5 °C
- Recipientes de 12” de longitud, 8” de ancho y 1” de espesor para poder calentar los especímenes
- Balanza (según el peso de la muestra de apreciación aproximada de 0.01%)
- Vaso graduable de 1000 ml a 2000 ml de capacidad
- Aparato de extracción, consiste en un aparato donde se pueda rotar una taza a una velocidad variable y controlada, hasta unos 3600 RPM, el aparato debe estar provisto de una campana para poder retener el disolvente que escapa de la taza y un desagüe para que el asfalto pueda salir, debe tener además, accesorios de protección contra explosiones, y deberá instalarse en una cámara con buena ventilación
- Anillos filtrantes de fieltro o de papel
- Tricloriteno como disolvente

Preparación de la muestra de ensayo

Se obtiene la muestra de mezcla asfáltica según el ensayo ASTM D979

-Si la mezcla no es suficientemente blanda para ser separada con una espátula, se coloca en el horno a 110 ± 5 °C hasta que sea posible su manipulación

-La cantidad de muestra para el ensayo se determina según el tamaño nominal máximo del agregado en la mezcla.

-Luego se coloca la muestra en el horno hasta obtener un peso constante a una temperatura entre 149 y 163 °C durante dos a dos horas y media.

Procedimiento

Se determina el porcentaje de humedad mediante la diferencia de pesos:

$$\%Humedad = \frac{W_i - W_f}{W_f} \times 100$$

Donde:

W_i = al peso de la muestra antes del secado

W_f = peso de la muestra después de estar de dos a dos horas y media en el horno

Luego se coloca de 650 a 2500 gramos de la porción de ensayo en la taza de extracción, se cubre con tricloriteno y se deja el tiempo suficiente para que el disolvente se desintegre en la porción de ensayo. Después, se seca y se determina el peso del anillo filtrante y se ajusta al anillo del borde de la taza; se coloca todo el conjunto en el aparato de extracción, se debe apretar la tapa firmemente y colocar una taza en la salida del desagüe para recolectar el extracto. Se inicia la centrifugación girando lentamente y aumentando gradualmente la velocidad a un máximo de 3600 RPM hasta que de fluir el solvente por el desagüe; se deja que la maquina se detenga y se agregan 200 ml del solvente de tricloriteno y se repite el procedimiento hasta que el extracto no sea más oscuro que el color de la paja. Se coloca el extracto y el residuo del aparato en recipientes adecuados. Luego se quitan los anillos y se deja enfriar al aire, si existe alguna partícula adherida al anillo se debe quitar y

agregar al material extraído, se seca el anillo hasta peso constante a una temperatura de 110 ± 5 °C, se vierte cuidadosamente el material de la taza y se coloca en el horno a 110 ± 5 °C. Finalmente para obtener el porcentaje de contenido de asfalto, se utiliza la siguiente formula:

$$\%Asf = \left[\frac{(W_{i+t} + W_a) - (W_{f+t} + W_a)}{(W_{i+t} + W_a)} \right] * 100$$

Donde:

$\%Asf$ = Porcentaje de asfalto de la muestra.

W_{i+t} = Peso constante más peso de taza.

W_a = Peso de anillos.

W_{f+t} = Peso final sin asfalto más peso de taza.

Gravedad específica máxima teórica.

Para poder dar comienzo a este experimento y seguir la norma de este mismo, se debe comenzar secando los agregados por dos horas y media, para que la muestra no tenga humedad o se reduzca lo máximo posible y así obtener peso constante. Luego esta muestra se debe de esparcir y separar las partículas, sin romper o quebrar los agregados, este proceso se debe hacer a mano; luego se debe dejar enfriando a temperatura ambiente.

Para continuar con el ensayo se necesita un instrumento muy importante llamado agitador mecánico, el cual nos va a servir para poder sacar el aire que está entre las partículas de nuestro espécimen. Dicho agitador cuenta con un controlador automático para

poder controlar la duración de agitación y además, se conecta a una bomba para que esta haga el trabajo de agitación.

Figura 13. Ejemplo de agitador



Fuente: COTECNO

Luego se debe tomar registro del peso de muestra que se va a introducir en el recipiente del agitador mecánico, después de medido este dato se va a llenar con suficiente cantidad de agua para cubrir el espécimen, dicha agua debe estar a una temperatura de 25 ± 1 °C. Después se va a colocar en el agitador se pone su respectivo empaque, se ajusta su tapa y se enciende el controlador de duración junto con la bomba, dicho controlador debe estar programado para 15 ± 2 min, el manómetro de la tapa debe indicar una presión de $3,7 \pm 0,3$ kPa, después de esto se acciona el controlador para que empiece a agitar y sacar el aire que tiene nuestra muestra.

Pasados los 15 minutos se debe encontrar el peso sumergido de la muestra sin aire dentro por ende, se introduce dicha muestra a un estanque, se coloca en una especie de

gancho que va a estar ligado a una balanza y a partir de aquí se espera obtener un peso sumergido.

Cuando se obtiene el peso sumergido se va a tener que sacar el exceso de agua y poner en una bandeja, después se coloca la muestra en la bandeja en alguna zona al aire libre para que esta muestra seque hasta peso constante, las mediciones de peso constante se empiezan a hacer después de que la muestra se empiece a ver un poco seca, luego se hacen mediciones cada 15 minutos hasta obtener valores donde no haya una diferencia de 0,5 entre los dos últimos.

Para realizar el cálculo de la gravedad específica máxima teórica con un tazón sumergido en agua se debe utilizar la siguiente fórmula:

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

Donde:

G_{mm} = Gravedad específica máxima teórica

A = Peso seco de la muestra al aire (g)

B = Peso del tazón sumergido en agua (g)

C = Peso del tazón y de la muestra sumergida en agua (g)

Resin8

Según (Loria Salazar & Gomez Sandoval, 2021) en 2018, el Centro para el Desarrollo Regenerativo y Colaboración (CRDC por sus siglas en inglés) en asociación con PEDREGAL[®], una empresa de materiales de construcción y constructora de Costa Rica, desarrolló una solución patentada y única para la crisis de los desechos plásticos llamada

RESIN8[®] (R8[®]), una mezcla extruida de un 80% de plástico reciclado (de varios orígenes) y un 20% de materiales minerales (principalmente un 10% de cal y un 10% de ceniza de madera). La cal se utiliza principalmente como relleno antiséptico para eliminar cualquier contaminación que pueda contener el plástico. Aparte de la ceniza de madera, también se pueden utilizar otros tipos de ceniza, por ejemplo, de desechos de caña de azúcar, café o plástico. El proceso de extrusión consiste en mezclar los materiales indicados a una temperatura entre 190°C a 200°C para plásticos de baja densidad y hasta un máximo de 230°C para plásticos de alta densidad como el PVC. Después de la mezcla, el material se enfría en agua, ¡tomando una especie de forma de “tubo rugoso”, y finalmente, se tritura para reducirlo a un material “con forma de arena”. El equipo de producción está ajustado a una temperatura máxima de 240°C ya que los plásticos de alta densidad como el PVC liberan productos clorurados u otros gases tóxicos por encima de los 260°C. R8[®] se ha utilizado con éxito como sustituto de la arena en bloques de mampostería y, más recientemente, en mezcla asfáltica en caliente (MAC).

Entre las diversas pruebas de análisis realizadas en el R8[®] antes de su aplicación en materiales de construcción, se realizó el ensayo de barrido de calorimetría diferencial (DSC), la que se volvió muy útil para comprender el comportamiento del R8[®]. Los resultados de ensayos mostraron que hay tres picos principales durante la aplicación de una rampa de flujo de calor en el material: 120 °C, 160 °C y 190 °C. Con esta evidencia experimental, se cree que a 160°C el R8[®] mantendrá la integridad total de las partículas que lo componen, pero el plástico se derrite un poco y ayudaría a integrarlo con la matriz bituminosa asfáltica sin generar grumos.

Marco metodológico

Tipo de investigación

El tipo de investigación que se va a realizar en el presente trabajo es de tipo experimental, debido a que la idea del trabajo es mediante una serie de ensayos de laboratorio, obtener ciertos resultados de una muestra de mezcla asfáltica modificada con Resin8 y luego los compararemos con una muestra de mezcla asfáltica virgen.

Métodos de investigación

El primer método para recalcar es el método de investigación cuantitativa ya que en el presente trabajo se va a recolectar y analizar datos numéricos. Este método nos va a funcionar para identificar tendencias y promedios, se van a intentar realizar predicciones, se comprobará relaciones y se intentarán obtener resultados generales. Además, este método es ideal para el proyecto debido a que la idea de dar conclusiones en este trabajo será mejorar el producto de mezcla asfáltica mejorada con Resin8. Finalmente este método es ideal para interpretar información con base en números y cifras, es un método descriptivo, estudia el comportamiento de una muestra y trabaja en el sistema de estímulo y respuesta. El segundo método que se va a utilizar en la investigación será el método cualitativo, este método busca comprender o explicar el comportamiento, las motivaciones y características, este método de investigación es ideal cuando se quiere comprender o explicar el comportamiento de un grupo objetivo, pero también si se buscan nuevas ideas o productos, así simplemente se desea probar algo. Este método es un conjunto de técnicas de investigación que se utilizan para obtener una visión general del comportamiento y la percepción de las personas o muestras sobre un tema en particular; genera ideas y suposiciones que pueden ayudar a entender como es percibido un problema.

Sujetos y fuentes de información

Tabla 5. Sujetos y fuentes de información

Nombre	Tema para tratar	Empresa	Cargo
Luis G. Loría	Coordinador de ensayos de laboratorio	Mat-Tec S.A.	Jefe y dueño de laboratorio
Minor Brenes	Explicación y guía de ensayos	Mat-Tec S.A.	Técnico de laboratorio especializado en ensayos de asfalto
Nelson López	Explicación y guía de ensayos	Mat-Tec S.A.	Técnico de laboratorio especializado en ensayos de asfalto

Fuente: Propia

Principales fuentes de información

Se utilizó como fuente principal de información el sitio del LanammeUCR

https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1624/R_catalogo_me_zclas.pdf?sequence=8&isAllowed=y

Definición de variables

Tabla 6. Definición de variables.

Variable	Definición conceptual	Definición operativa
Metodología Marshall	Este es un ensayo de laboratorio, que va a funcionar para poder estandarizar las muestras que se utilizarán en la investigación para que los resultados sean válidos y comparables con muestras vírgenes del mismo origen. La idea es tener unas dimensiones de muestras similares con parámetros análogos	AASHTO R 68
Vida por Fatiga	Para esta variable se va a realizar un ensayo llamado “Viga de 4 puntos” donde se va a simular las cargas de tránsito para estudiar su comportamiento en términos de resistencia a fatiga. Se crea una viga que se colocará simplemente apoyada y se ejercerá carga en cuatro puntos	AASHTO T 321-17
Contenido de asfalto por centrifuga	Este ensayo se va a realizar para poder verificar que es lo que pasa con la cantidad de asfalto que se mezcló inicialmente. La idea es separar los áridos del asfalto en la máquina de centrifugado, utilizando un agente disolvente	AASHTO T-164
Granulometría en tamizado de agregados	Esta variable funciona para dar una idea del comportamiento de las partículas pertenecientes a los áridos, la idea es estudiar su comportamiento al tener un agente no tradicional como lo es el resine8, donde se va a comparar las granulometrías antes y después de haber hecho las muestras	AASHTO T 30

Continúa....

Continuando...

Variable	Definición conceptual	Definición operativa
Gravedad máxima específica teórica	Esta variable nos va a servir para obtener datos fundamentales en el estudio de la mezcla en cuestión, algunos de los datos importante es el porcentaje de vacíos y el contenido de asfalto que absorbieron los agregados	AASHTO T209

Fuente: Propia

Instrumentos y técnicas utilizados en la recolección de datos

Compactador Marshall

El primer instrumento es para realizar las pastillas de muestra Marshall, las cuales se utilizarán para conseguir los datos de estabilidad y flujo, se usó un equipo mecánico; en el cual, el mazo compactador es enganchado a una cadena, que le permite el ascenso hasta un punto máximo desde donde se deja caer; al no ser automática hay que ir contando el número de golpes con algún contador o en la mente, en nuestro caso al ser varias muestras preferimos usar un contador. Es importante estar atento al utilizar este equipo porque tienen que ser setenta y cinco golpes por cara y uno tiene que detener el compactador justo cuando da el golpe número setenta y cinco, para esto el dispositivo dispone de un interruptor para poder parar y reanudar el proceso. Este equipo se ajusta a los collarines y moldes de 4' y 6'.

Centrifuga digital

La centrifuga digital se define en la norma ASTM D 2172 donde especifica que está diseñada para la extracción cuantitativa del bitumen en mezclas de pavimentos bituminosos. Cuenta con un tablero de control con pantalla gráfica, en el que se pueden programar y visualizar todas las funciones que desempeña. El control electrónico incorpora un excelente

control PID (proporcional, integral y derivativo) que garantiza la frecuencia programada para la extracción y genera rampas de aceleración y parada aumentando la vida útil del equipo. La centrifuga digital se ofrece para muestras de 1500 g y 3000 g.

Especificaciones técnicas del aparato:

- Velocidad de ensayo: 3 600 rpm
- Ajuste de tiempo: Programable entre 30 y 3600 segundos (una hora).
- Recipiente: Removible de aluminio.
- Filtros de papel: Incluye 50 filtros para la centrifuga de operación digital
- Dimensiones Totales: 410 mm x 475 mm x 530 mm (Ancho x Largo x Alto)
- Caja de control: 310 mm x 130 mm x 260 mm (Ancho x Largo x Alto)
- Operación eléctrica: 220 VAC / 47Hz - 63 Hz
- Potencia: 750 W • Consumo corriente: 7A
- Recubrimiento superficial: Pintura electrostática.
- Peso total: 42 kg sin muestra.

Figura 14. Ejemplo de aparato de centrifuga



Equipo para pruebas de fatiga por flexión con viga independiente BFF-5

Descripción del equipo:

El equipo para pruebas de fatiga por flexión con viga independiente bff-5 es un sistema avanzado de prueba de asfalto de mezcla en caliente (HMA) que se utiliza para determinar la vida útil de la capa asfáltica del pavimento. La vida útil de la fatiga es un indicador importante del rendimiento de campo del asfalto, sujeto a la carga de flexión repetida. La prueba de fatiga en la viga de asfalto se puede realizar en dos modos: deformación / deformación constante o tensión / carga constante; ambos utilizando formas de onda definidas por el usuario, haversine, senoidal, cuadrada, triangular o definida. El modo de deformación constante se recomienda para capas de pavimento más delgadas (5” de grosor) y la carga de tensión constante simula las condiciones del campo más de cerca. El

equipo BFF-5 puede realizar la prueba de fatiga en ambos modos a frecuencias de hasta 60 Hertz . La prueba de fatiga de la viga estándar se realiza a temperaturas intermedias de 20 ° C (68 ° F). El equipo GCTS ofrece una cámara ambiental opcional capaz de controlar la temperatura de la muestra durante toda la prueba. La precisión del control de la cámara ambiental es mejor que $\pm 0,5$ ° C. Con esta opción se pueden alcanzar temperaturas de -30 ° a + 150 ° (con refuerzo de nitrógeno líquido).

Figura 15. Equipo para pruebas de fatiga por flexión con viga independiente bff-5



Fuente: Grupo consurlab.com

También se necesita otro equipo muy importante a la hora de producir las muestras, en este caso se necesita hacer una losa de asfalto para su posterior cortado y la extracción de vigas de mezcla asfáltica para poder colocarlas en el anterior mencionado equipo, este equipo se llama compactador avanzado de rodillo, con el cual se conseguirá una losa que cumpla las especificaciones necesarias según la norma (AASHTO T 321-17).

Este aparato puede compactar losas de asfalto a una densidad predeterminada, empleando cargas por unidad de anchura de rodillo; los cuales son consistentes con los rodillos de pavimentación utilizados en la construcción de carreteras.

Las losas de asfalto producidas pueden ser usadas para:

- El ensayo de pista (carga por rueda).
- Preparar especímenes (núcleos) para ensayos de tracción indirecta y ensayos de dilatación estática y dinámica (ensayos de fluencia).
- Cortar en vigas para ensayos de fatiga por flexión.

La máquina puede compactar losas de 500 x 300 mm, 400 x 300 mm, 300 x 300 mm y 320 x 260 mm (intercambiables), ajustándolo con los accesorios adecuados.

Todas las versiones cuentan con un marco sólido de acero de alta rigidez, con dispositivos de seguridad y diseño ergonómico que se ajustan a las normas CE.

Descripción:

Con un sistema de compactación por segmento de rodillo de radio de cabeza de 535 mm. El segmento de rodillo se mueve libremente por fricción simple para una mejor uniformidad de la compactación. Un motor paso a paso mueve verticalmente el segmento del rodillo bajo control de desplazamiento y control de carga. La carga vertical se aplica de manera ortogonal al eje del movimiento de desplazamiento. El carro del molde se mueve hacia atrás y hacia adelante por un sistema de manivela que reduce al mínimo la aceleración durante la inversión del movimiento y la consiguiente perturbación de la muestra. La dimensión longitudinal (mayor) del molde corresponde a la dirección de compactación por lo que es posible obtener muestras de una longitud adecuada conforme a las normas. La tapa de la máquina se eleva para permitir un fácil acceso al área de moldeo. En la posición de "reposo" se cierra el molde para el operador, mientras que el segmento de rodillo se levanta

y se coloca en la parte posterior de la máquina.

Las máquinas cuentan con un control de la tarjeta electrónica personalizada con pantalla táctil de la PC

Equipo para granulometría

En este apartado se van a utilizar 11 tamices y 1 charola, además, se debe de disponer de bandejas limpias para poder ir trabajando de una manera correcta con los agregados. Los tamices que se van a utilizar son los de número 1', 3/4', 1/2', 3/8', 4', 8', 16', 30', 50', 100' y 200'.

Sustentación de la confiabilidad y validez de los instrumentos de la investigación

Primeramente se tiene que tomar en cuenta de que todos los ensayos que se van a realizar en el presente trabajo están totalmente estandarizados, esto nos va a funcionar para poder tener datos de referencia o estos datos los podemos usar como guía para realizar las pruebas adecuadamente, es bien sabido que estos ensayos han sido probados y realizados cientos sino miles de veces y este trabajo solo serán unas cuantas pruebas más de este tipo de ensayos, esto nos da una fiabilidad y validez a la hora de sacar conclusiones.

Los ensayos que se van a realizar en esta investigación van a ser con mezcla asfáltica modificada y con mezcla asfáltica no modificada, para cada experimento de ambas líneas de trabajo se van a realizar 3 muestras, por ende, en caso de algún error se podrá detectar alguna equivocación de manera sencilla. Lo normal de estos ensayos es hacer de 3 a 5 muestras por experimento con 3 distintos porcentajes de asfalto para ver la afectación de variar la cantidad de asfalto en los experimentos, en este trabajo se van a realizar 3 muestras para poder realizar gráficas aceptables y que reflejen la realidad de los datos. Las gráficas que se esperan conseguir deberán tener la misma tendencia y en caso contrario se deberá buscar una fuente de error o alguna otra razón, se debe recordar que se está tratando de hacer funcionar

una mezcla asfáltica modificada con resina, por ende, los resultados van a variar pero se esperan que no sean extremadamente anómalas.

Las máquinas y aparatos pertenecen al laboratorio de MATTECH, este laboratorio tiene en constante uso todas las maquinas que se usarán para desarrollar el trabajo, este laboratorio puede competir perfectamente con laboratorios tales como el del Lanamme de la UCR, siguiendo con el laboratorio MATTECH, se desarrollan experimentos e investigaciones para conocimiento sobre el asfalto a nivel mundial, cabe recalcar que los equipos de dicho laboratorio son los que se usan comúnmente en todos los laboratorios de materiales y también tienen equipo de última tecnología y de gran calidad, incluso tienen mejor equipo que muchos laboratorios importantes y de renombre de Costa Rica.

la compactación de Marshall establecida en la norma técnica AASHTO R 68 se utilizará para garantizar un manejo estándar en las muestras de mezcla asfálticas modificadas y las muestras de mezclas asfáltica no modificadas; garantizándose de esta forma, la comparación de los parámetros obtenidos de cada una de ellas (flujo y estabilidad), en el caso de que se hiciera sin ningún proceso de estandarización, las variaciones serían infinitas y no se podrían comparar los resultados obtenidos. Cabe recalcar que este equipo se está calibrando con la periodicidad requerida, acorde al constante uso que se le da en el laboratorio y a la confiabilidad garantizada por el cliente.

El ensayo de vigas a cuatro puntos se hará con el equipo de este ensayo normado por AASHTO TP 8 por ende, este ensayo también estará estandarizado y ya se cuentan con datos base con los que se pueden comparar resultados. Esta máquina es novedosa y también se calibra periódicamente. El ensayo de viga a cuatro puntos simula la carga que va a sufrir la mezcla asfáltica a la hora de compactarse después de su construcción; esto se hace mediante

una viga simplemente apoyada, a la cual se le ejerce cargas en 4 puntos hasta su rotura, obteniéndose resultados de deformaciones, los cuales van a ser comparados con las muestras de mezcla asfáltica vírgenes. Una gran incógnita del uso de las mezclas asfálticas modificadas con alguna resina plástica es su fatiga, debido a que su rigidez aumenta y aun cuesta obtener un porcentaje de dosificaciones adecuado para el uso en nuestro país. Haciendo este tipo de ensayos se estará más cerca de obtener respuesta a esta incógnita, pues se trabajará con distintos contenidos de resina. En sí, este ensayo permitirá tener pruebas de las variaciones que hace el resina con respecto a las variables anteriormente mencionadas contra las de una muestra virgen, donde la idea es encontrar el punto donde todas las características de nuestra mezcla asfáltica puedan ser controladas y tener un producto de mucha mejor calidad que los productos que se usan actualmente.

Asimismo, la prueba de contenido de asfalto que está estandarizada por la norma AASHTO T-164, lo cual dará fiabilidad a los resultados y principalmente a los procedimientos que se efectuarán durante el proceso de fabricación y ejecución. La idea de hacer este ensayo es encontrar respuestas sobre qué sucede al contenido del asfalto en general al tener un agente no común para este, tal y como es el resina, se quiere saber si el resina consume parte del asfalto, si muchas partículas de la resina se adhieren al líquido. También en este proceso se utiliza un disolvente por default entonces también se investigará si el que se utilizará es de igual manera efectivo en este caso y por eso la importancia de hacer muestras vírgenes en las mismas condiciones y no tomar como referencia alguna otra muestra que se haya hecho en algún momento con las mismas características, en sí lo que se quiere estudiar en este ensayo es el comportamiento del asfalto junto con la resina plástica. Este ensayo se realizará mediante el uso de una centrifugadora digital, la cual es

constantemente utilizada y calibrada debido a la importancia que tiene en esta clase de laboratorios. En este experimento se compara el peso del ligante que sale de la centrifugadora en la muestra no modificada versus el peso en la muestra modificada donde ambas tienen el mismo contenido de asfalto. Esta comparación podrá generar conclusiones concretas.

El último ensayo que se va a efectuar es el ensayo de granulometría, el cual está normado por la norma AASHTO T 30, la cual como los otros experimentos está normada y estandarizada, y esto de igual manera da cierta ventaja al obtener resultados porque se obtienen gráficas y cifras con qué comparar y con esto ver si se va por buen camino o en caso de que no den resultados similares a lo que se esperaba se investigará cuáles son las variaciones que afectan dichos resultados. El ensayo de granulometría es bastante común, se van a utilizar suficientes tamices para poder obtener una división de partículas adecuadas, la idea es verificar qué sucede con las partículas de los agregados y del resine8, pues éste sustituye parte del agregado. Se verificará cuales son los cambios que se observan en la gradación del agregado al combinarse con el resin8 y concluir sobre la incidencia en el comportamiento del agregado. Finalmente, estos ensayos permitirán averiguar el comportamiento de los agregados y del contenido de asfalto cuando se mezcla con la resina plástica “resine8”. Al comparar los resultados nos va a funcionar para tener mejores conclusiones sobre estos, debido a que se utilizará como muestra comparativa un espécimen común en nuestro país para la construcción pavimentos asfálticos, por ende se verán reflejados los beneficios de la utilización de esta resina plástica y por consecuente también algunas desventajas que se podrían encontrar en este proceso.

Técnicas de recolección de datos

Caracterización de mezcla

Los agregados tienen como origen la ciudad de Esparza en Puntarenas, Costa Rica. En este caso se utilizarán cuatro materiales:

- Arena Industrial

- Piedra quinta de 12,5 mm

- Piedra quinta de 19 mm

- Piedra cuarta de 25 mm

La mezcla evaluada tiene ya las cantidades especificadas y es la utilizada por el grupo PEDREGAL. En los ensayos se van a sustituir porcentajes de la piedra quinta de 12,5 mm y de la arena industrial por Resin8, debido a que estos dos agregados son los que tienen mayor cantidad de finos y la idea es que los porcentajes de arenas no se vean afectados para su posterior mezclado. Por ejemplo, si la mezcla que se está estudiando es de 1% de Resin8 se va a sustituir 0,67 % de arena industrial y 0,33% de piedra de 12,5 mm y así se hace en todos los casos

Creación de las muestras para estabilidad y flujo Marshall

Para la creación de muestra se empezó con la caracterización de los agregados, dichos agregados son extraídos de Esparza; se utilizaron cuatro tipos de agregados para todos los ensayos los cuales son los mismos del ensayo pasado y los que demás.

A estos agregados también hay que añadirle el Resin8, el cual va a sustituir un porcentaje de los agregados más finos; es decir, se va a quitar un porcentaje de arena industrial y de piedra cuarta de 12,5 mm para cambiarlo por una cantidad igual pero de Resin8.

Las muestras se van a crear según el método de compactación de Marshall

(AASHTO R 68) para poder estandarizar nuestro trabajo y realizar las mismas pruebas que se realizar en las fábricas y en los laboratorios alrededor del mundo.

Instrumentos que se utilizaron para Metodología Marshall según AASHTO R 68.

-Se requiere un molde cilíndrico de 4” o de 6” (en nuestro caso utilizaremos el de 4”), dicho molde debe contar con un collar y un plato de base.

-Aceite

-Filtro de papel del molde que se va a utilizar.

-Un compactador Marshall

-Bandejas de aluminio

-Un horno

-Termómetro

-Una balanza de pesaje.

-Un eyector de muestras.

-Recipientes de acero y bandejas de acero.

-Máquina de cuarteo o un divisor de muestras.

-Espátula, cuchara y guantes

-Plantilla de gas

Procedimiento (AASHTO R 68)

Primeramente, se debe caracterizar los materiales y en una bandeja poner las cantidades necesarias de cada agregado para tener muestras de 1200, en nuestro caso utilizamos un poco menos de 1200 a la hora de moldear las pastillas porque se hicieron algunas pruebas antes del experimento real y las muestras tenían una altura por encima del que la norma estandariza. Se pusieron al horno en bandejas de aluminio las cantidades de agregado y resin⁸ durante tres horas para poder tener un peso constante sin humedad, después se tomó este peso seco para luego calcular la cantidad de asfalto en gramos, es importante hacer este proceso rápido porque en estos ensayos la temperatura es muy importante y si dicha temperatura varía mucho se verá reflejado en la variación de resultados.

Figura 16. Caracterización de materiales.



Fuente: Propia

Ahora bien, cuando ya se tiene en un recipiente el asfalto con los agregados y el R⁸ se empieza a cocinar en la plantilla de gas, este proceso debe de mantener la temperatura

para la homogenización de la mezcla y se debe revolver el asfalto con los agregados hasta que todas las partículas de agregados estén totalmente cubiertas de asfalto, cuando esto está listo se pasa la mezcla asfáltica a recipientes para su próximo curado.

Figura 17. Proceso de cocinado de mezcla asfáltica



Fuente: Propia

El curado de esta mezcla fue de tres horas a $160\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10$ en un horno, cuando este tiempo se cumpla se puede iniciar con el moldeo de las pastillas.

Figura 18. Proceso de curado.



Fuente: Propia

Después se deberá lubricar el molde, el collar y el plato base con el aceite, luego se introduce en el horno las piezas anteriormente mencionadas para que estén a una temperatura igual o similar la de la mezcla. Después se van a dividir y reducir las muestras mediante la máquina de cuarteo y se deben extraer muestras de 1200g a 1300g, estos especímenes se van a ir dividiendo y reconociendo mediante el número de los moldes de acero en los cual se van a depositar las muestras. Seguidamente se van a introducir una por una las muestras al molde con aceite para así ensamblar dicho molde junto con esto se debe añadir el filtro de papel para que el material no se adhiera al aparato. Luego se debe esparcir bien la muestra por el molde con ayuda de la espátula (usándola como una pala) se va a introducir quince veces por el perímetro y diez veces en el interior, ahora bien se va a introducir en el sujetador de molde que trae el compactador Marshall para que este ejecute unos setenta y cinco golpes y luego va a hacer el mismo proceso pero del lado contrario. Finalmente cuando este proceso se haya realizado con todas las muestras se utilizará en todas las muestras el eyector de muestras y dichos especímenes se deberán dejar a temperatura ambiente en un cuarto para que se regule

la temperatura, cabe recalcar que es importante marcar los especímenes con números para poder de esta manera identificarlos con mayor facilidad.

Figura 19. Proceso de compactación Marshall.



Fuente: Propia

Después, las pastillas se deben de sacar del molde cuando estén un poco más frías, una temperatura aceptable y trabajable para poder sacarlas es alrededor de los 50 °C, ya que a esta temperatura la pastilla ya está bastante sólida y no se va a deformar cuando se saque del molde utilizando el eyector de muestras, luego se deben tomar cuatro mediciones de las alturas de nuestras muestras en distintos puntos, en nuestro caso utilizamos un vernier electrónico, es importante poner la muestra en una superficie plana cuando se toma la

medición, además de esta medición se deberá tomar cuatro mediciones más pero para el diámetro, estos datos se requerirán en el cálculo de estabilidad y flujo Marshall.

Figura 20. Pastillas Marshall.



Fuente Propia.

Siguiendo la dinámica, se debe tomar el peso de todas las pastillas, esto se hace para que la pastilla no absorba humedad y el dato que se registre sea lo más certero posible. Cuando se tengan todos los datos anteriormente mencionados se determina el peso sumergido en agua, utilizando un recipiente que se pueda enganchar a la balanza y a la vez la muestra quede totalmente sumergida; en nuestro caso la balanza estaba encima de un estañón lleno de agua a 25 ± 1 °C, la balanza cuenta con un brazo para poder enganchar una cadena y poder tomar mediciones sumergidas. Finalmente, el peso que haría falta es el peso saturado superficie seca, para ello después de sacar la muestra del estañón se seca por fuera con un paño hasta que su superficie tenga la textura seca y se determina el peso. Con esto finaliza el proceso de toma de datos generales para las pastillas Marshall.

Ensayo de estabilidad y flujo Marshall.

Instrumentos que se utilizaron para ensayo de gravedad específica máxima teórica

-Bandejas de acero

-Bandejas de aluminio

-Bomba hidráulica

-Agitador mecánico con tazón y manómetro

-Ventilador

-Guantes

-Horno

-Termómetro

-Plantilla de gas

-Pera de succión

Procedimiento:

Se empezó con la caracterización de materiales, se definieron las cantidades de cada agregado y del resín. Se buscó que todas las muestras que se fueran a utilizar tuvieran un peso inicial de 2500 gramos, se pusieron a secar en bandejas de aluminio a $160\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10$ para obtener un peso constante y que no haya errores por humedad, se toma el dato del peso seco y con este se calcula la cantidad de asfalto en gramos para después cocinar las muestras en la plantilla de gas, este cocinado se hizo a una temperatura de $160\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10$ controlando la temperatura con un termómetro. Cuando todas las partículas de agregados estén totalmente

cubiertas se colocaron en bandejas. Después de esto las bandejas se colocaron en el horno durante tres horas a $160\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10$ para un curado efectivo.

Después del proceso anterior, se debe sacar la muestra y colocar en una mesa metálica que tenga bastante espacio para poder esparcir la muestra y separar las muestras teniendo cuidado de quebrar no el agregado, la idea es que exista el mínimo de particular pegadas entre sí por el asfalto, esto se deja en la mesa hasta que la mezcla tome temperatura ambiente, utilizamos un ventilador a baja velocidad para un enfriado más rápido, luego se introduce el espécimen dentro del tazón del agitador mecánico, se debe llenar dicho tazón de agua hasta una altura donde la muestra quede totalmente cubierta y quede un poco más de eso, es decir el agua no debe quedar al nivel de la muestra sino debe quedar con el nivel de agua más alto pero no llenar el tazón. Se encendió la bomba hidráulica, esta bomba en específico se calentaba bastante entonces, mientras se utilizaba dicha bomba se encendía el ventilador para enfriarla un poco, se enciende el aparato que regula la cantidad de minutos de agitado, la mezcla se agitó por 15 minutos exactos, cuando este tiempo terminaba, se llenaba un poco más el tazón con agua, y se introdujo al estañón con agua y se colocaba encima de una reja de acero que se ligaba mediante cadenas al brazo que tiene la balanza para poder medir el peso sumergido de nuestras muestras; tomado este dato. Se procedió a sacar todo el exceso de agua que tiene el tazón y se colocó la muestra en una bandeja, dicha muestra todavía tenía bastante agua, por ende, con una pera de succión se sacaba el exceso de agua que quedaba en la bandeja teniendo cuidado de que esta no absorbiera los materiales más finos de nuestra muestra.

Finalmente, esta muestra se dejó al aire libre con un ventilador encendido encima de ella para poder obtener el dato de peso constante, este dato se empezó a tomar cuando la

mezcla se empezaba a ver más seca y en la bandeja no había tanto rastro de agua, después de este dato inicial se pesaban las muestras cada 15 minutos hasta que los dos últimos datos no variaran más de un 0,5 es decir que para terminar el experimento si una muestra estaba pesando 2630,4 gramos el experimento podía parar si el siguiente dato resultaba como máximo de 2629,9 gramos.

Ensayo de contenido de asfalto por centrífuga

Instrumentos que se utilizaron para los ensayos de contenido de asfalto por centrifuga y granulometría

- Tamices

- Bandejas de acero

- Bandejas de aluminio

- Termómetro

- Plantilla de gas

- Centrifuga digital con tazón

- Balde

- Gasolina

- Filtro de papel

- Espátula

Procedimiento que se siguió para los ensayos de contenido de asfalto y granulometría.

De primeras hay que caracterizar los materiales, donde se definieron las cantidades de cada agregado y de resina que al final actúa como un agregado, en nuestro ensayo utilizamos muestras de 2000,0 gramos en todas las muestras, ahora bien se secó la muestra

en el horno durante tres horas a una temperatura de $160\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10$, las muestras se sacan del horno y se pesan, dándonos el dato de peso sin humedad; es decir peso seco, con este dato se calcula la cantidad de asfalto que debía llevar la mezcla, para este ensayos se utiliza un 6% de asfalto. Luego se pasa a la plantilla para el proceso de cocinado y mezclado, donde se busca de igual manera que en los ensayos anteriores una homogenización de mezcla y que no existan partículas sin recubrimiento de asfalto, después de este proceso se puso a curar durante tres horas a una temperatura de $160\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10$. Ya curado el material se saca del horno y se deja enfriar lo suficiente para que sea trabajable, es importante dejarlo enfriar ya que se va a trabajar con una máquina que gira a gran velocidad y que tiene gasolina dentro, por ende hay que tener mucho cuidado. Cuando se enfrió la mezcla se tuvo que cuartear los especímenes porque con la suma de la cantidad de asfalto más el agregado, las muestras eran de más de 2000,0 gramos y la capacidad máxima de la centrifuga que estamos utilizando es de 1800,0 gramos, por ende se cuarteó hasta tener un valor entre 1800,0 gramos y 1500,0 gramos

Ya con el peso correcto de muestra, se puso el filtro en el horno para quitarle humedad y se pesó, además, se debe pesar el tazón de la centrifuga, ya con estos datos se procede a introducir la muestra al tazón, se trata de acomodar lo mejor posible, luego se empieza a llenar con gasolina hasta que toda la mezcla se cubra por completo, cuando tenemos la gasolina cubriendo el espécimen, se espera mínimo 20 minutos para que la gasolina penetre bien toda la mezcla asfáltica. Ya pasado este tiempo se inicia el proceso de ensamblaje donde hay que colocar el filtro de papel encima del tazón y luego la tapa del tazón atornillándola con una tuerca, dicha tuerca debe estar bien tallada para que la tapa no se salga o este moviéndose, esto se hace para que no exista ninguna probabilidad chispa y

asimismo, ningún accidente, finalmente se asegura la tapa de la centrifuga y se da inicio a la centrifuga, lo que hace dicho aparato es girar el tazón a 3600 rpm, este dispositivo tiene un orificio que mientras la maquina gira la gasolina con el asfalto va saliendo por este, dicho liquido se transporta por una manguera a un balde donde se va depositando todo el residuo, este proceso debe durar hasta que ya no salga más líquido. El proceso se debe repetir cinco veces, es decir se debe llenar de gasolina otras cuatro veces pero no hay que esperar los veinte minutos iniciales, antes de rellenar de nuevo con gasolina, se debe utilizar la espátula para remover los finos que quedan en el filtro y también los que quedan pegados en las paredes del tazón para que todas las partículas se empapen de igual manera de gasolina y exista un lavado efectivo.

Figura 21. Proceso de ensamblaje de aparato de centrifuga.



Fuente: Propia

Para seguir el procedimiento, cuando terminan los lavados, se debe pesar el filtro, que para cuestiones de cálculo se definió como filtro más finos, además se debe tomar el peso de la muestra sin asfalto, luego sacar el contenido de asfalto.

El ensayo anteriormente mencionado va de la mano con el análisis granulométrico, ya que se desea conocer el comportamiento los agregados en nuestra mezcla después de haberse cocinado y curado, por ende el residuo sin asfalto será utilizado para un análisis granulométrico

En nuestro caso para la obtención de granulometría se debió poner a secar la muestra durante una hora en el horno a $160\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10$ para que la humedad que la muestra absorbió mientras se hacía el ensayo de centrifuga desaparezca, ahora bien después de esa hora de secado se debe dejar enfriando la mezcla hasta ser manejable, luego se debe lavar el material que se va a utilizar para esto se va a utilizar una malla #16 y la malla #200, este proceso se debe hacer hasta ver el material limpio, ya con el material limpio, se utiliza la plantilla de gas para empezar a secar la muestra limpia, cuando esta muestra se vuelva manejable se toma el peso y se empieza el proceso de tamizado; para este ensayo se usaron once tamices más la charola (1', 3/4', 1/2', 3/8', 4', 8', 16', 30', 50', 100', 200') se formaron en torre todas las mallas y se vertió el material por todos los tamices, se movieron o batieron los tamices para que las partículas que tal vez estaban pegadas junto con otras partículas puedan pasar los tamices y nos den resultados más acertados. Ahora bien, se van sacando las mallas de arriba hacia abajo y se empiezan a pesar los materiales que retienen las mallas hasta llegar a la charola, la sumatoria de estos datos deben ser un valor exactamente igual al peso inicial de la muestra seca.

Figura 22. Proceso de pesado en granulometría.



Fuente: Propia.

Procedimiento que se siguió para el ensayo de fatiga de flexo-tracción o ensayo de viga a cuatro puntos.

Diseño de vigas para el ensayo.

Para creación de losas de asfalto y que sea funcional para el moldeo se debe tener una cantidad de mezcla de entre unos treinta y uno a treinta dos kilos de mezcla, se caracterizaron los agregados y se sustituyó el resin8 por los agregados más finos, las muestras se dejaron secando en el horno durante tres horas a $160\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10$, después de este proceso se tomó el peso sin humedad y se añadió la cantidad respectiva de asfalto para su posterior mezclado y cocinado, el moldeo se hace en una maquina llamada compactador avanzado de rodillo para losas de asfalto, de esta losa moldeada se sacan las vigas con una sierra eléctrica para poder obtener las medidas que exigen la norma las cuales son de 50 mm x 62.5 mm x 375 mm ± 0.1 , en nuestro caso las vigas cumplieron con este requerimiento, cabe recalcar que de una losa se pueden extraer 6 vigas. Ahora bien, con las vigas bien cortadas y bien medidas, se deben sumergieron en agua para que dichas vigas tomen una

temperatura de 25 °C durante aproximadamente tres horas, cuando se llega a esta temperatura se procede a obtener la gravedad específica bruta, donde se toma un peso sumergido y un peso superficie saturado seco, esta recolección de datos se efectúa con todos los especímenes. Después de esto se procede a curar los especímenes, donde se introdujeron en el horno durante cinco días seguidos a una temperatura de 85 °C, se tomó la hora exacta para poder sacar las vigas dentro de cinco días a la misma hora, se esperó a que se enfriara y se tomó el peso seco, ya con todos los datos que tenemos calculamos el porcentaje de vacíos.

Figura 23. Vigas para ensayo de fatiga.



Fuente: Propia.

Luego introducimos los especímenes en la máquina de ensayos a fatiga, la resistencia de cada una de las muestras al agrietamiento por fatiga se evaluó mediante la prueba de fatiga de vigas de flexión de 4 puntos de carga según el protocolo “AASHTO T321-03:

Determinación de la vida útil a la fatiga de mezcla asfáltica en caliente compactada sujeta a la viga por flexión de carga repetida”. El espécimen de viga se somete a flexión en 4 puntos con rotación libre y traslación horizontal en todos los puntos de carga y reacción. Esto produce un momento de flexión constante sobre la parte central de la muestra. En esta investigación, las pruebas de deformación constante se realizaron a diferentes niveles de deformación (400 μ S y 600 μ S); usando una carga de pulso repetido a una frecuencia de 10 Hz y una temperatura de prueba de 21,1 °C. La rigidez inicial se midió en el ciclo de carga número 50. La vida a fatiga o falla se definió como el número de ciclos correspondientes a una reducción del 50% en la rigidez inicial.

Análisis de resultados.

Resultados obtenidos del ensayo de Metodología Marshall

Tabla 7. Cantidades de agregados para muestras Marshall

Cantidades de agregados para experimentos Marshall al 6% de asfalto					
Resine8 (%)	0%	1%	2%	3%	6%
Arena Industrial (g)	771	771	726	723	713
Cuarta 12' (g)	37	36	78	74	64
Cuarta 19' (g)	196	195	85	86	88
Quinta 25' (g)	196	195	305	307	315
Resine8 (g)	0	3	6	10	20
Total=	1200	1200	1200	1200	1200

Fuente: Propia

Tabla 8. Pesos de pastillas Marshall.

Pesos de Pastillas Marshall moldeadas			
Para 0% de R8	Peso Pastilla seca (g)	Peso pastilla sumergida (g)	Peso SSS (g)
Espécimen 1	1175,9	668,4	1179,4
Espécimen 2	1169,6	662,9	1172,1
Espécimen 3	1172,6	664,2	1176,7
Espécimen 4	1171,1	663,4	1177,0
Para 1% de R8	Peso Pastilla seca	Peso pastilla sumergida	Peso SSS
Espécimen 1	1174,2	667,1	1178,2
Espécimen 2	1170,5	663,2	1173,7
Espécimen 3	1179,5	670,2	1183,3
Espécimen 4	1171,9	663,6	1176,1
Espécimen 5	1169,8	663,0	1173,2
Para 2% de R8	Peso Pastilla seca	Peso pastilla sumergida	Peso SSS
Espécimen 1	1170,9	663,8	1176,6
Espécimen 2	1172,4	664,3	1178,5
Espécimen 3	1172,0	664,1	1178,1
Espécimen 4	1168,1	661,1	1171,0
Espécimen 5	1171,9	663,6	1177,4
Para 3% de R8	Peso Pastilla seca	Peso pastilla sumergida	Peso SSS
Espécimen 1	1181,6	673,6	1186,7
Espécimen 2	1183,1	674,4	1187,8
Espécimen 3	1180,2	671,2	1184,7
Espécimen 4	1179,6	670,5	1184,1
Espécimen 5	1185,9	679,9	1191,5
Para 6% de R8	Peso Pastilla seca	Peso pastilla sumergida	Peso SSS
Espécimen 1	1172,6	664,6	1178,6
Espécimen 2	1168,9	661,6	1172,9
Espécimen 3	1173,6	665,3	1177,5
Espécimen 4	1170,2	663,7	1176,5
Espécimen 5	1174,7	668,0	1179,7

Fuente: Propia

En el caso de las pastillas para estabilidad y flujo Marshall se eligieron las cuatro muestras con datos similares, dichos datos de todas las muestras están bastante bien si se comparan con la muestra sin modificar, no existe ninguna tendencia a variar en este proceso

de moldeo, ni tampoco alguna variación por el cocinado. La temperatura de $160\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10$ funciona bastante bien durante tres horas.

Tabla 9. Lecturas de estabilidad y flujo de 0% de R8

Determinación de estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica para muestras de 0% de R8					
Ítem	Pastilla 1	Pastilla 2	Pastilla 3	Pastilla 4	Promedio
Altura (mm) Medición 1	63,81	62,91	63,43	62,82	63,2425
Altura (mm) Medición 2	63,74	62,75	63,36	65,94	63,9475
Altura (mm) Medición 3	63,69	62,59	63,76	63,14	63,2950
Altura (mm) Medición 4	63,85	62,71	63,01	63,27	63,2100
Diámetro (mm) Medición 1	101,32	101,28	102,87	101,6	101,7675
Diámetro (mm) Medición 2	101,47	101,49	101,64	101,48	101,5200
Diámetro (mm) Medición 3	101,21	101,68	102,92	101,18	101,7475
Diámetro (mm) Medición 4	102,47	101,62	102,61	101,23	101,9825
Lectura de flujo (1/100cm):	31	30	31	32	31
Lectura de estabilidad (kg):	1562	1389	1523	1622	1524

Fuente: Propia

Tabla 10. Lecturas de estabilidad y flujo de 1% de R8

Determinación de estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica para muestras de 1% de R8					
Ítem	Pastilla 1	Pastilla 2	Pastilla 3	Pastilla 4	Promedio
Altura (mm) Medición 1	63,98	62,95	63,81	62,96	63,4250
Altura (mm) Medición 2	62,89	62,90	63,13	64,44	63,3400
Altura (mm) Medición 3	62,74	62,87	63,21	63,31	63,0325
Altura (mm) Medición 4	62,45	63,71	63,15	63,02	63,0825
Diámetro (mm) Medición 1	102,25	101,17	102,20	101,50	101,7800
Diámetro (mm) Medición 2	101,23	101,78	101,12	101,65	101,4450
Diámetro (mm) Medición 3	101,94	101,65	102,75	101,19	101,8825
Diámetro (mm) Medición 4	102,01	101,65	101,74	102,11	101,8775
Lectura de flujo:	34	32	31	31	32
Lectura de estabilidad	1498	1687	1536	1446	1542

Fuente: Propia

Tabla 11. Lecturas de estabilidad y flujo de 2% de R8

Determinación de estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica para muestras de 2% de R8					
Ítem	Pastilla 1	Pastilla 2	Pastilla 3	Pastilla 4	Promedio
Altura (mm) Medición 1	62,98	62,94	63,15	63,42	63,1225
Altura (mm) Medición 2	63,54	63,75	63,14	64,23	63,6650
Altura (mm) Medición 3	63,89	63,77	63,53	63,66	63,7125
Altura (mm) Medición 4	62,96	62,97	63,13	63,08	63,0350
Diámetro (mm) Medición 1	101,54	101,26	101,80	101,55	101,5375
Diámetro (mm) Medición 2	101,89	102,26	101,26	101,68	101,7725
Diámetro (mm) Medición 3	101,45	101,68	101,74	101,25	101,53
Diámetro (mm) Medición 4	101,73	102,36	101,69	101,88	101,915
Lectura de flujo:	32	31	34	30	31,75
Lectura de estabilidad	1542	1489	1641	1548	1555

Fuente: Propia

Tabla 12. Lecturas de estabilidad y flujo para 3% de R8

Determinación de estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica para muestras de 3% de R8					
Ítem	Pastilla 1	Pastilla 2	Pastilla 3	Pastilla 4	Promedio
Altura (mm) Medición 1	63,51	63,89	63,81	63,72	63,7325
Altura (mm) Medición 2	63,62	63,81	62,70	63,93	63,5150
Altura (mm) Medición 3	62,75	63,07	63,25	62,99	63,0150
Altura (mm) Medición 4	63,54	63,89	63,75	63,55	63,6825
Diámetro (mm) Medición 1	102,22	102,01	101,90	101,79	101,9800
Diámetro (mm) Medición 2	101,54	101,93	101,76	101,23	101,6150
Diámetro (mm) Medición 3	102,41	101,82	101,58	102,14	101,9875
Diámetro (mm) Medición 4	101,84	102,30	101,46	101,89	101,8725
Lectura de flujo:	33	35	32	32	33
Lectura de estabilidad	1570	1563	1544	1559	1559

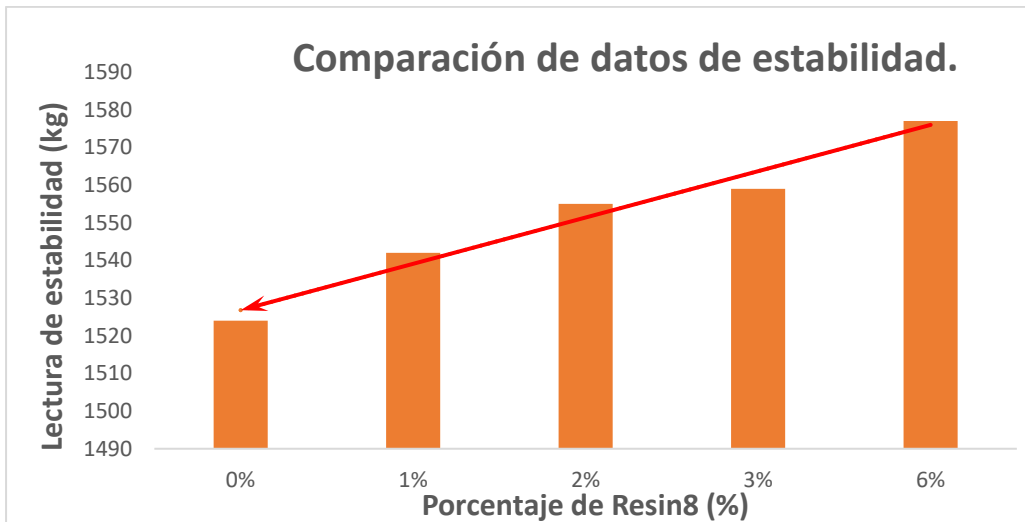
Fuente: Propia

Tabla 13. Lecturas de estabilidad y flujo para 6% de R8

Determinación de estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica para muestras de 6% de R8					
Ítem	Pastilla 1	Pastilla 2	Pastilla 3	Pastilla 4	Promedio
Altura (mm) Medición 1	62,87	62,96	63,15	63,08	63,0150
Altura (mm) Medición 2	63,54	63,47	63,00	63,50	63,3775
Altura (mm) Medición 3	63,58	62,99	63,74	63,45	63,4400
Altura (mm) Medición 4	64,25	63,67	63,77	63,74	63,8575
Diámetro (mm) Medición 1	101,56	101,62	101,82	101,74	101,6850
Diámetro (mm) Medición 2	102,12	102,30	101,70	101,75	101,9675
Diámetro (mm) Medición 3	101,54	101,86	101,46	101,61	101,6175
Diámetro (mm) Medición 4	101,98	101,75	101,69	101,87	101,8225
Lectura de flujo:	30	35	32	31	32
Lectura de estabilidad	1554	1669	1536	1549	1577

Fuente: Propia

Figura 24. Gráfico de comparación de datos de estabilidad.



Fuente: Propia

Las dimensiones de las pastillas estuvieron consistentes y están dentro de lo que la norma permite. Con respecto a la lectura de flujo que se obtuvo, no se encontró alguna variación debido a los distintos porcentajes de Resin8, no existe alguna tendencia o alguna variación, evidentemente los datos varían pero se tiene que deber al mismo proceso de

producción y no por el uso de la resina plástica. Además los resultados están dentro de lo que la norma permite para este tipo de ensayos, por ejemplo la muestra de 1% tuvo el mismo valor que la muestra en la cual se utilizó un porcentaje de resina de 6% el cual fue de 32 (1/100 cm) y las otras muestras están dando valores entre 33 (1/100 cm) y 31 (1/100 cm). Para la lectura de estabilidad, se encuentra un aumento conforme se utiliza más resina, pero esto se esperaba debido a que dicha resina plástica endurece la mezcla por ende, en el caso de la muestra sin modificar se obtuvo 1524 kg, en la muestra modificada con un 1% el valor fue de 1542 kg, luego en el caso que se utilizó un 2% el valor de estabilidad fue de 1555 kg, el otro caso donde se utilizó un 3% de resina se obtuvo como lectura un 1559 kg y finalmente en el caso de la estabilidad par aun 6% fue de 1577 kg; se debe tomar en cuenta para posteriores experimentos con estos componentes. Cabe recalcar que los resultados de estabilidad Marshall están bastante bien con respecto al mínimo que la norma exige.

Resultados obtenidos en ensayos de gravedad específica máxima teórica

Tabla 14. Cantidades de agregados para gravedad específica máxima teórica

Cantidades para G_{mm} al 6% de asfalto					
Resina (%)	0%	1%	2%	3%	6%
Arena Industrial (g)	1610,0	1608,0	1512,0	1506,0	1486,0
Cuarta 12' (g)	75,0	73,0	161,0	155,0	134,0
Cuarta 19' (g)	407,0	406,0	178,0	180,0	183,0
Quinta 25' (g)	408,0	406,0	635,0	639,0	655,0
Resina (g)	0,0	7,0	14,0	20,0	42,0
Total=	2500,0	2500,0	2500,0	2500,0	2500,0

Fuente: Propia

Tabla 15. Determinación de peso en condición SSS para 0%.

Determinación del peso en condición superficie saturada seca				
Peso bandeja 1 656,5 g		Peso bandeja 2 446,7 g		
Peso inicial 1 3242,4 g		Peso inicial 2 3044,8 g		
0% de R8	Especimen 1 (g)	Peso sin bandeja (g)	Especimen 2 (g)	Peso sin bandeja (g)
Peso 15 min secado (g)	3236,2	2579,7	3039,6	2592,9
Peso 15 min secado (g)	3229,4	2572,9	3032,5	2585,8
Peso 15 min secado (g)	3225,8	2569,3	3028,8	2582,1
Peso 15 min secado (g)	3220,2	2563,7	3023,9	2577,2
Peso 15 min secado (g)	3217,1	2560,6	3020,1	2573,4
Peso 15 min secado (g)	3216,2	2559,7	3014,6	2567,9
Peso 15 min secado (g)	3215,8	2559,3	3010,9	2564,2
Peso 15 min secado (g)	-	-	3010,6	2563,9

Fuente: Propia

Tabla 16. Determinación de peso en condición SSS para 1%.

Determinación del peso en condición superficie saturada seca				
Peso bandeja 1 656,5 g		Peso bandeja 2 346,7 g		
Peso inicial 1 3253,7 g		Peso inicial 2 3175,3 g		
1% de R8	Espécimen 1 (g)	Peso sin bandeja (g)	Espécimen 2 (g)	Peso sin bandeja (g)
Peso 15 min secado (g)	3250,9	2594,4	3071,5	2624,8
Peso 15 min secado (g)	3245,5	2589	3065,8	2619,1
Peso 15 min secado (g)	3240,6	2584,1	3056,2	2609,5
Peso 15 min secado (g)	3236,3	2579,8	3050,6	2603,9
Peso 15 min secado (g)	3232,2	2575,7	3047,8	2601,1
Peso 15 min secado (g)	3229,9	2573,4	3042,7	2596
Peso 15 min secado (g)	3225,1	2568,6	3040,5	2593,8
Peso 15 min secado (g)	3223,3	2566,8	3037,2	2590,5
Peso 15 min secado (g)	3223,3	2566,8	3035,9	2589,2
Peso 15 min secado (g)			3035,2	2588,5
Peso 15 min secado (g)			3035,1	2588,4

Fuente: Propia.

Tabla 17. Determinación de peso en condición SSS para 2%.

Determinación del peso en condición superficie saturada seca				
Peso bandeja 1 656,5 g		Peso bandeja 2 346,7 g		
Peso inicial 1 3358,3 g		Peso inicial 2 3090,3 g		
2% de R8	Espécimen 1 (g)	Peso sin bandeja (g)	Espécimen 2 (g)	Peso sin bandeja (g)
Peso 15 min secado (g)	3349,1	2692,6	3081,6	2634,9
Peso 15 min secado (g)	3336,4	2679,9	3073,8	2627,1
Peso 15 min secado (g)	3324,2	2667,7	3049,1	2602,4
Peso 15 min secado (g)	3314,7	2658,2	3031,5	2584,8
Peso 15 min secado (g)	3310,2	2653,7	3025,9	2579,2
Peso 15 min secado (g)	3308,5	2652,0	3019,3	2572,6
Peso 15 min secado (g)	3208,2	2551,7	3018,9	2572,2

Fuente: Propia.

Tabla 18. Determinación de peso en condición SSS para 3%.

Determinación del peso en condición superficie saturada seca				
Peso bandeja 1 656,5 g		Peso bandeja 2 346,7 g		
Peso inicial 1 3382,6 g		Peso inicial 2 3176,3 g		
3% de R8	Espécimen 1 (g)	Peso sin bandeja (g)	Espécimen 2 (g)	Peso sin bandeja (g)
Peso 15 min secado (g)	3372,4	2715,9	3153,2	2706,5
Peso 15 min secado (g)	3365,6	2709,1	3140,1	2693,4
Peso 15 min secado (g)	3359,5	2703,0	3031,4	2584,7
Peso 15 min secado (g)	3342,7	2686,2	3025,5	2578,8
Peso 15 min secado (g)	3334,2	2677,7	3021,8	2575,1
Peso 15 min secado (g)	3326,9	2670,4	3020,8	2574,1
Peso 15 min secado (g)	3324,3	2667,8	3017,1	2570,4
Peso 15 min secado (g)	3323,6	2667,1	3015,9	2569,2
Peso 15 min secado (g)	3322,7	2666,2	3015,3	2568,6
Peso 15 min secado (g)	3222,5	2566,0	3015,2	2568,5

Fuente: Propia.

Tabla 19. Determinación de peso en condición SSS para 6%.

Determinación del peso en condición superficie saturada seca				
Peso bandeja 1 656,5 g		Peso bandeja 2 346,7 g		
Peso inicial 1 3379,0 g		Peso inicial 2 3061,6 g		
6% de R8	Espécimen 1 (g)	Peso sin bandeja (g)	Espécimen 2 (g)	Peso sin bandeja (g)
Peso 15 min secado (g)	3367,1	2710,6	3053	2606,3
Peso 15 min secado (g)	3355,8	2699,3	3044,3	2597,6
Peso 15 min secado (g)	3349,5	2693	3035,9	2589,2
Peso 15 min secado (g)	3342,9	2686,4	3030,5	2583,8
Peso 15 min secado (g)	3337,4	2680,9	3027,7	2581
Peso 15 min secado (g)	3336,1	2679,6	3025,6	2578,9
Peso 15 min secado (g)	3236,1	2579,6	3025,2	2578,5

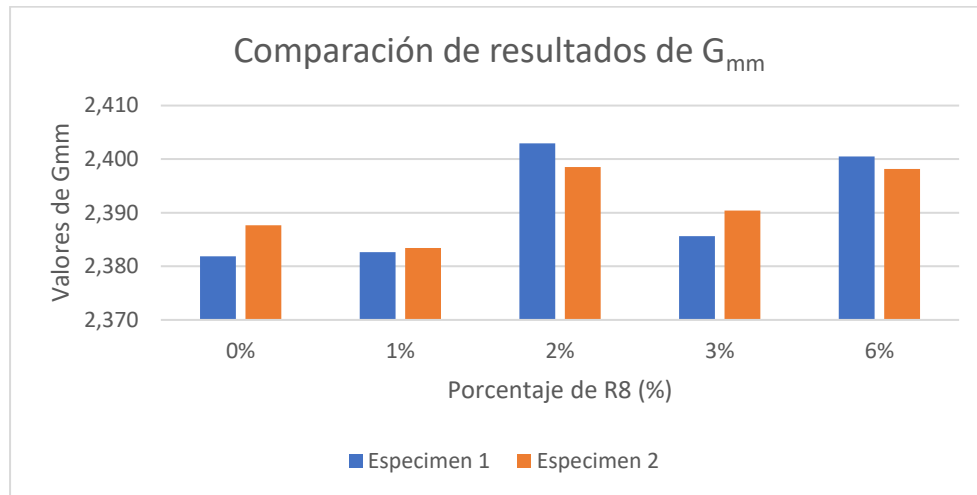
Fuente: Propia.

Tabla 20. Resultados de gravedad específica máxima teórica.

Resultados G_{mm}		
	Espécimen 1	Espécimen 2
0%	2,382	2,388
1%	2,383	2,383
2%	2,403	2,399
3%	2,386	2,390
6%	2,401	2,398
Promedio=	2,391	

Fuente: Propia.

Figura 25. Gráfico de comparación de resultados de gravedad específica máxima teórica



Fuente: Propia.

Los resultados obtenidos relacionados con la gravedad específica máxima teórica no mostraron alguna clase de tendencia con la variación de resin8, existen variaciones pero se debe al mismo proceso de fabricación y sus posibles márgenes de error, los resultados cumplen con lo mínimo requerido según la norma; el promedio de las muestras vírgenes fue de 2,385 y los valores de las muestras modificadas varían entre un 2,383 a un 2,401.

Resultados obtenidos en ensayos de granulometría y contenido de asfalto por centrifuga.

Tabla 21. Cantidades de agregados para contenido de asfalto y granulometría.

Cantidades para experimentos de Contenido de asfalto y Granulometría al 6% de asfalto					
Resine8 (%)	0%	1%	2%	3%	6%
Arena Industrial (g)	1288	1286	1210	1205	1190
Cuarta 12' (g)	60	58	130	124	107
Cuarta 19' (g)	326	325	142	143	147
Quinta 25' (g)	326	325	507	512	523
Resine8 (g)	0	6	11	16	33
Total=	2000	2000	2000	2000	2000

Fuente: Propia.

Tabla 22. Peso real de muestras para contenido de asfalto.

Cantidad de asfalto inicial para muestras secas para un 6% de asfalto					
Resine8 (%)	0%	1%	2%	3%	6%
Peso seco (g)	1987,7	1994,3	1989,5	1995,1	1991,6
Peso asfalto (g)	126,87	127,30	126,99	127,35	127,12
Peso curado después de cuartear (g)	1541,1	1749,4	1639,9	1502,3	1761,6

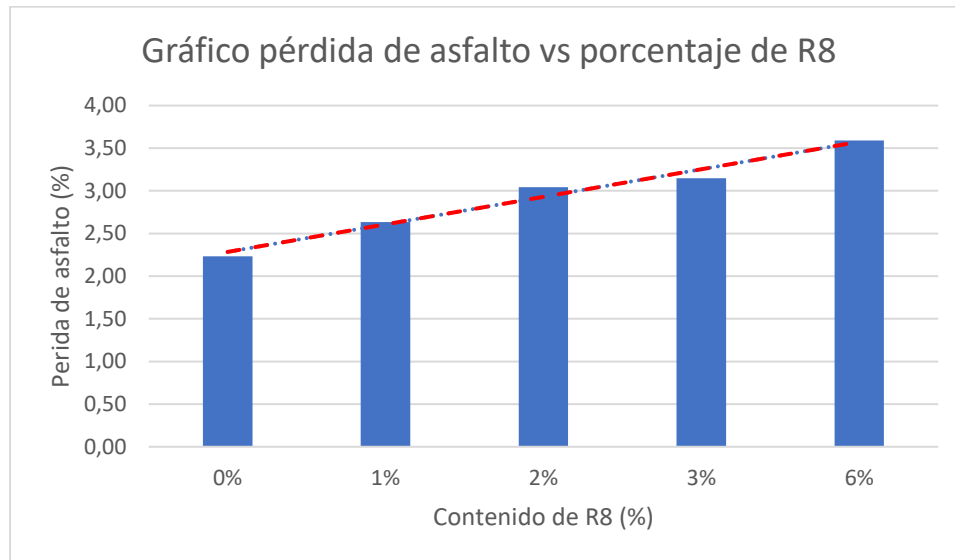
Fuente: Propia.

Tabla 23. Contenido de asfalto por centrifuga.

Determinación del contenido de asfalto por centrifuga P_b%					
Resine8 (%)	0%	1%	2%	3%	6%
Peso del tazón vacío (g)	1705,1	1705,1	1705,1	1705,1	1705,1
Peso del filtro (g)	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6
Peso de la mezcla más tazón (g)	3246,2	3454,5	3345	3207,4	3466,7
Peso de la muestra inicial (g)	1541,1	1749,4	1639,9	1502,3	1761,6
Peso del filtro más fino (g)	15,4	15,7	15,3	15,6	15,7
Peso del agregado más tazón (g)	3154,0	3350,2	3247,9	3118,1	3362,7
Peso de muestra final (g)	1448,9	1645,1	1542,8	1413,0	1657,6
Contenido de asfalto (%)	5,87	5,84	5,82	5,81	5,78
Perdida (%)	2,23	2,63	3,04	3,15	3,59

Fuente: Propia.

Figura 26. Gráfico de pérdida de asfalto vs porcentaje de resin8



Fuente: Propia.

Los resultados del ensayo de contenido de asfalto por centrifuga muestran que al tener una mayor cantidad de resin8 hay un aumento en la perdida de cantidad de asfalto, esto se debe a que las partículas de resin8 están absorbiendo y reteniendo una cantidad del asfalto que normalmente los agregados no retienen, ahora bien existe una perdida que es por el proceso de producción pero existe una tendencia a aumentar. En la muestra virgen la pérdida fue de 2,23%, los porcentajes de perdida de asfalto de las muestras con resin8 fue para 1% un 2,63% de pérdida , para 2% un 3,04% de pérdida, para 3% fue de 3,15% y el último de 6% tuvo una pérdida de 3,59%. Este aumento en la pérdida de asfalto se debe a que las partículas de resin8 están absorbiendo el asfalto.

Resultados obtenidos en el ensayo de granulometría.

Tabla 24. Datos de granulometría para 0% de R8.

Granulometría de muestra del 0% de R8					
Mallas (#)	Abertura (mm)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Ret. Acum	% Pasando
1	25,400	0,0	0,00	0,00	100
3/4	19,100	8,3	0,57	0,57	99,43
1/2	12,700	287,3	19,83	20,40	79,60
3/8	9,520	181,5	12,53	32,93	67,07
4	4,750	355,1	24,51	57,44	42,56
8	2,000	192,4	13,28	70,72	29,28
16	0,840	129,6	8,94	79,66	20,34
30	0,420	90,2	6,23	85,89	14,11
50	0,250	74,6	5,15	91,03	8,97
100	0,106	85,1	5,87	96,91	3,09
200	0,074	36,9	2,55	99,45	0,55
Ch		7,9	0,55	100,00	0,00
	Total=	1448,9	100,00		

Fuente: Propia.

Tabla 25. División de agregados para 0% de R8.

División de agregados	
Gravas=	57,44 %
Arenas=	42,02 %
Finos=	0,55 %
Total=	100,00 %

Fuente: Propia.

Figura 27. Curva granulométrica para 0% de R8

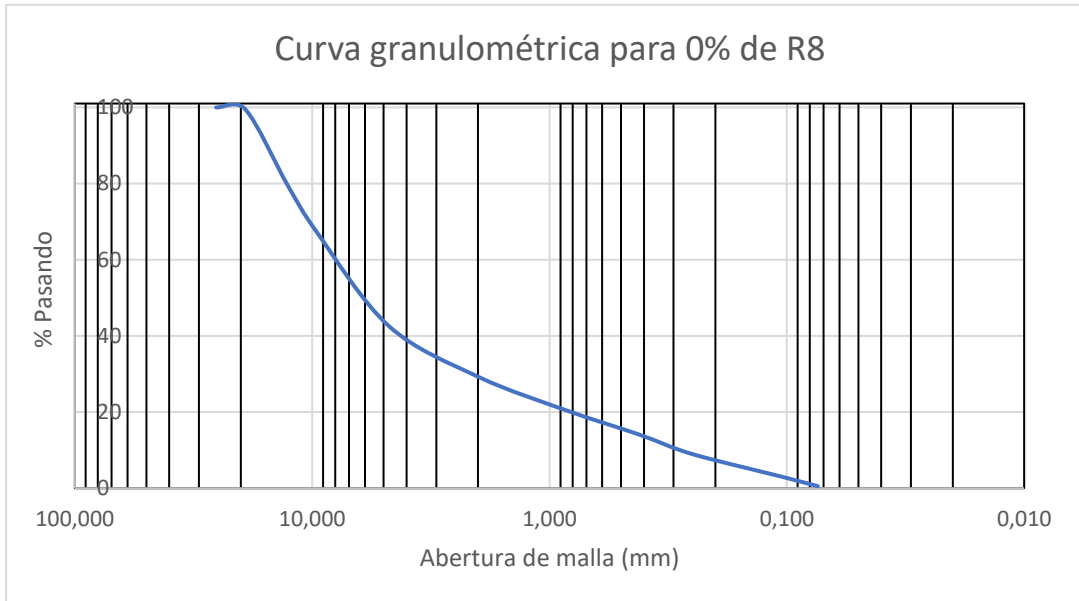


Tabla 26. Datos de granulometría para 1% de R8.

Granulometría de muestra del 1% de R8					
Mallas (#)	Abertura (mm)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Ret. Acum	% Pasando
1	25,400	0,0	0,00	0,00	100
3/4	19,100	10,3	0,63	0,63	99,37
1/2	12,700	405,8	24,67	25,29	74,71
3/8	9,520	158,1	9,61	34,90	65,10
4	4,750	486	29,54	64,45	35,55
8	2,000	247,5	15,04	79,49	20,51
16	0,840	117,2	7,12	86,61	13,39
30	0,420	66,2	4,02	90,64	9,36
50	0,250	55,9	3,40	94,04	5,96
100	0,106	53,7	3,26	97,30	2,70
200	0,074	33,1	2,01	99,31	0,69
Ch		11,3	0,69	100,00	0,00
	Total=	1645,1	100,00		

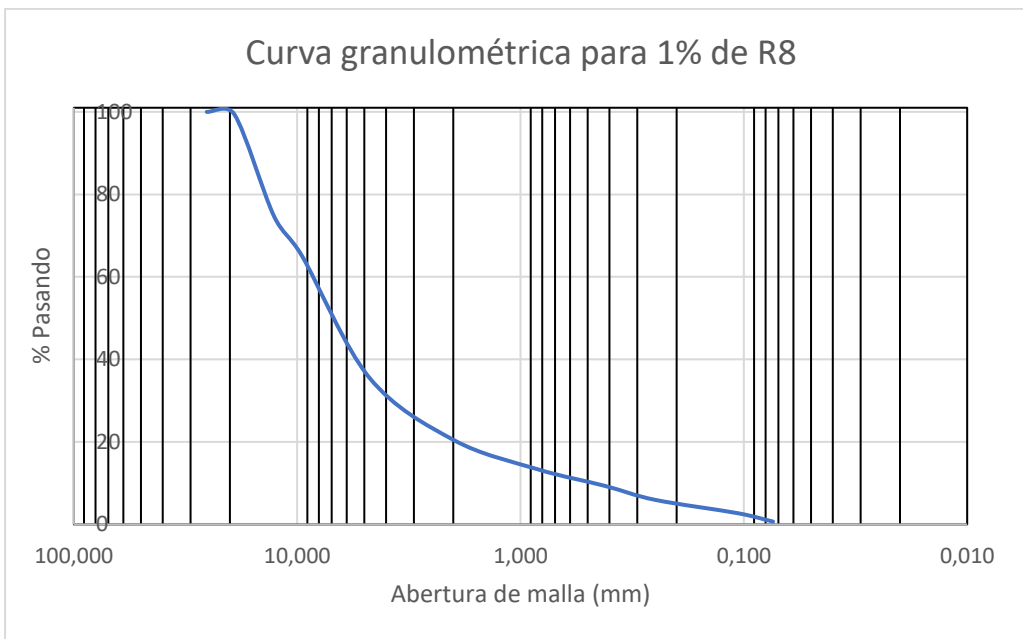
Fuente: Propia.

Tabla 27. División de agregados para 1% de R8.

División de agregados	
Gravas=	64,45 %
Arenas=	34,87 %
Finos=	0,69 %
Total	100,00 %

Fuente: Propia.

Figura 28. Curva granulométrica para 1% de R8



Fuente: Propia

Tabla 28. Datos de granulometría para 2% de R8.

Granulometría de muestra del 2% de R8					
Mallas (#)	Abertura (mm)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Ret. Acum	% Pasando
1	25,400	0,0	0,00	0,00	100
3/4	19,100	23,1	1,50	1,50	98,50
1/2	12,700	250,5	16,24	17,73	82,27
3/8	9,520	212,3	13,76	31,49	68,51
4	4,750	496,7	32,19	63,69	36,31

Continúa...

Continuando...

8	2,000	227,1	14,72	78,41	21,59
16	0,840	133,6	8,66	87,07	12,93
30	0,420	79,9	5,18	92,25	7,75
50	0,250	55,4	3,59	95,84	4,16
100	0,106	42,1	2,73	98,57	1,43
200	0,074	18	1,17	99,73	0,27
Ch		4,1	0,27	100,00	0,00
	Total=	1542,8	100,00		

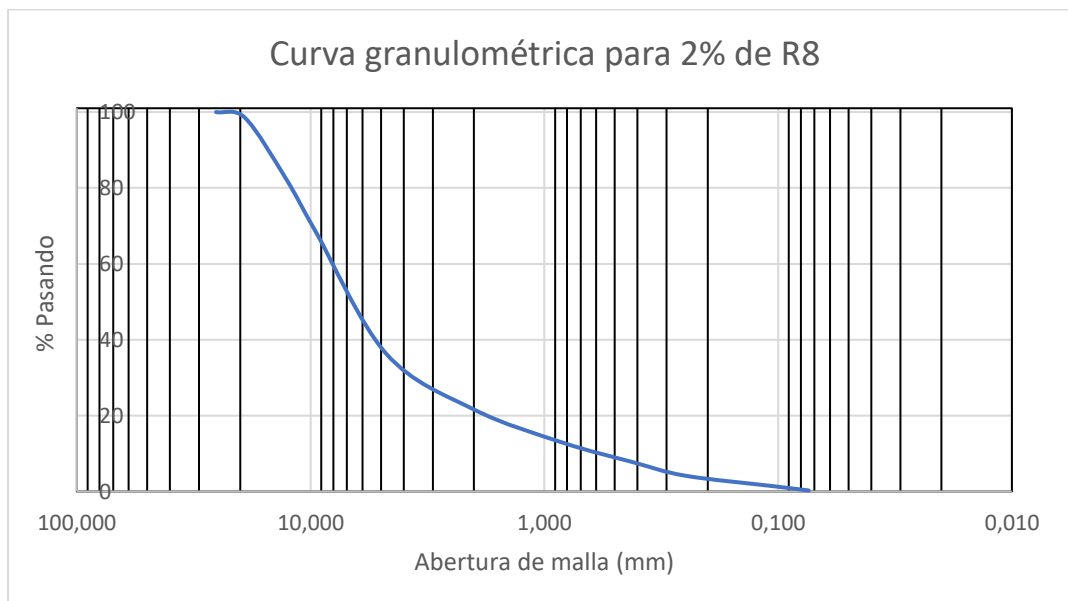
Fuente: Propia.

Tabla 29. Distribución de agregados para muestras de 1% de R8.

División de agregados	
Gravas=	63,69 %
Arenas=	36,04 %
Finos=	0,27 %
Total	100,00 %

Fuente: Propia.

Figura 29. Curva granulométrica para 2% de R8



Fuente: Propia

Tabla 30. Datos de granulometría para 3% de R8.

Granulometría de muestra del 3% de R8					
Mallas (#)	Abertura (mm)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Ret. Acum	% Pasando
1	25,400	0	0,00	0,00	100,00
3/4	19,100	34,3	2,43	2,43	97,57
1/2	12,700	296,8	21,00	23,43	76,57
3/8	9,520	158,6	11,22	34,66	65,34
4	4,750	434,5	30,75	65,41	34,59
8	2,000	186	13,16	78,57	21,43
16	0,840	113,2	8,01	86,58	13,42
30	0,420	70,9	5,02	91,60	8,40
50	0,250	57,5	4,07	95,67	4,33
100	0,106	40,8	2,89	98,56	1,44
200	0,074	17,4	1,23	99,79	0,21
Ch		3,00	0,21	100,00	0,00
	Total=	1413,0	100,00		

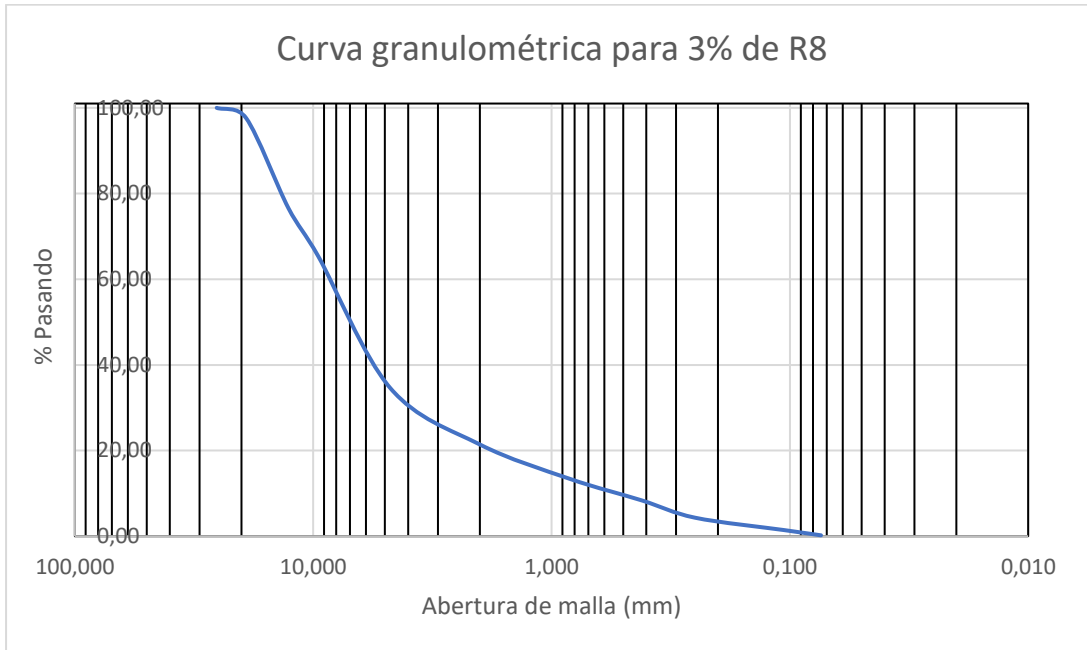
Fuente: Propia.

Tabla 31. Distribución de agregados para muestras de 0% de R8.

División de agregados	
Gravas=	65,41 %
Arenas=	34,38 %
Finos=	0,21 %
Total	100,00 %

Fuente: Propia.

Figura 30. Curva granulométrica para 3% de R8



Fuente: Propia

Tabla 32. Datos de granulometría para 6% de R8.

Granulometría de muestra del 6% de R8					
Mallas (#)	Abertura (mm)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Ret. Acum	% Pasando
1	25,400	0,0	0,00	0,00	100
3/4	19,100	15,0	0,90	0,90	99,10
1/2	12,700	327,2	19,74	20,64	79,36
3/8	9,520	192,4	11,61	32,25	67,75
4	4,750	576,9	34,80	67,05	32,95
8	2,000	270,1	16,29	83,35	16,65
16	0,840	117,8	7,11	90,46	9,54
30	0,420	62,3	3,76	94,21	5,79
50	0,250	42,7	2,58	96,79	3,21
100	0,106	31,3	1,89	98,68	1,32
200	0,074	16,0	0,97	99,64	0,36
Ch		5,9	0,36	100,00	0,00
	Total=	1657,6	100,00		

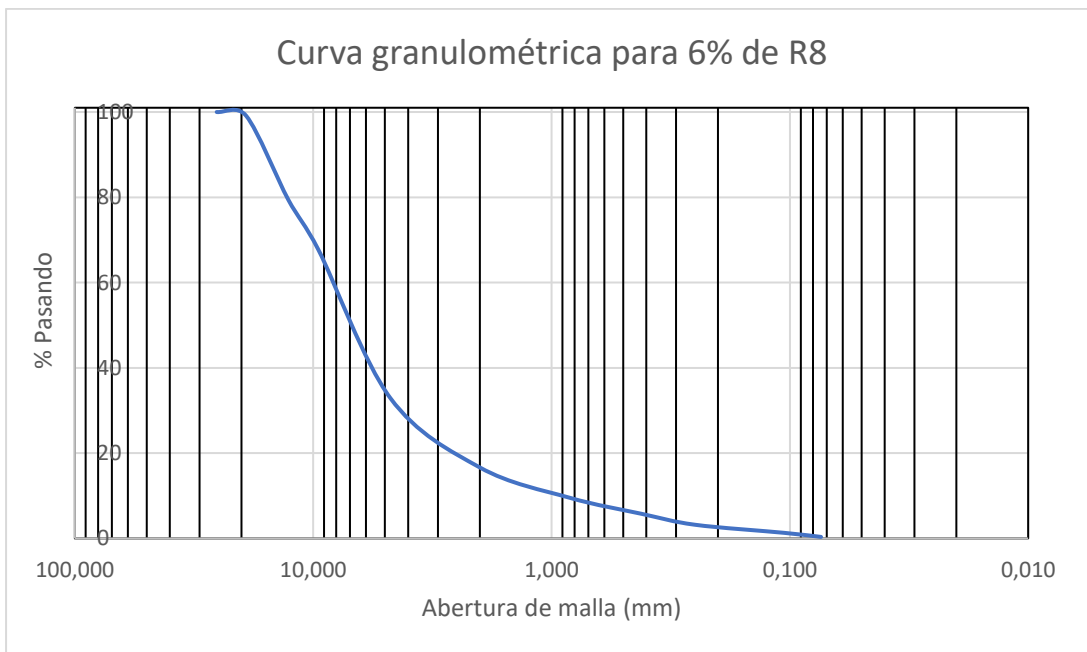
Fuente: Propia.

Tabla 33. Distribución de agregados para muestras de 6% de R8.

División de agregados	
Gravas=	67,05 %
Arenas=	32,59 %
Finos=	0,36 %
Total	100,00 %

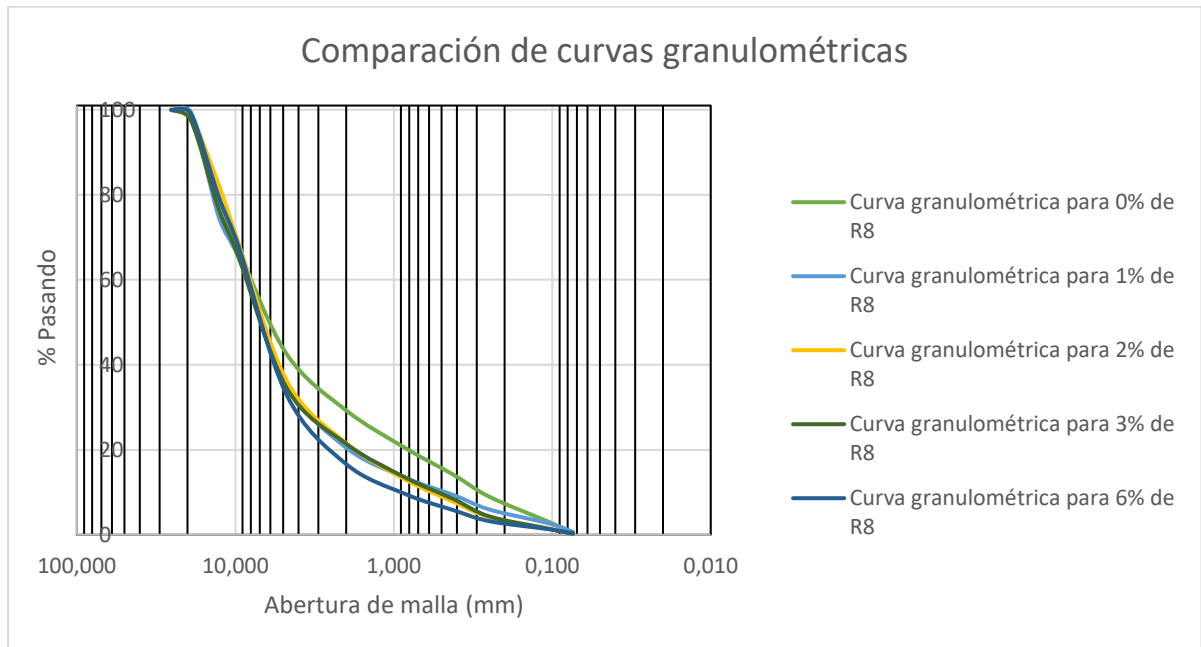
Fuente: Propia.

Figura 31. Curva granulométrica para 6% de R8



Fuente: Propia

Figura 32. Comparación de curvas granulométricas



Fuente: Propia

Los resultados de las granulometrías muestran una clara disminución de los agregados clasificados como arenas, esto se debe a que el resin8 está sustituyendo una cantidad determinada de agregado fino y este actúa como una arena, al ser un material donde predomina el plástico y que su procedencia varía mucho, es evidente que al calentar a altas temperaturas esta resina en cierta parte se va adherir a las partículas de agregado, que en nuestro caso fueron las de mayor tamaño y esto se puede demostrar observando el peso que retienen las mallas superiores donde el peso retenido de la muestra virgen es menor al peso de las muestras que contienen algún porcentaje de resin8, eso sí, varía mucho en la distribución del resin8 sobre dichas mallas. . En el caso de la muestra virgen, contiene un 42,02 % de arenas, en la muestra de 1% de resin8 existe un 34,87% de arenas, el de 2% contiene un 36,04%, en el caso del 3% contiene un 36,04% de arenas y finalmente en el caso de 6% contiene un 32,59% de arenas, esto se debe a que las partículas de resin8 se adhieren

a las partículas más grandes y esto se puede evidenciar sumando los pesos de los agregados más grandes por ejemplo la suma de los pesos retenidos de las 4 primeras mallas para la muestra virgen es de 477,1 gramos y en el caso de la muestra que contiene 6% de resina esta misma suma da como resultado 534,6 gramos.

Resultados de ensayo de fatiga

El ensayo de fatiga en el 4PBB se realizó para todos los tratamientos experimentales realizados y cumplió con la especificación costarricense del CR2010 indicada en su Sección 401 para niveles de deformación bajos y altos. Si se asume que los tratamientos R8[®]-MAC estudiados tienen que cumplir las condiciones más severas; por lo tanto, deberá cumplir con la especificación para mezclas Tipo C:

- $N_f > 450\,000$ repeticiones de carga a $400\ \mu\text{S}$, y;

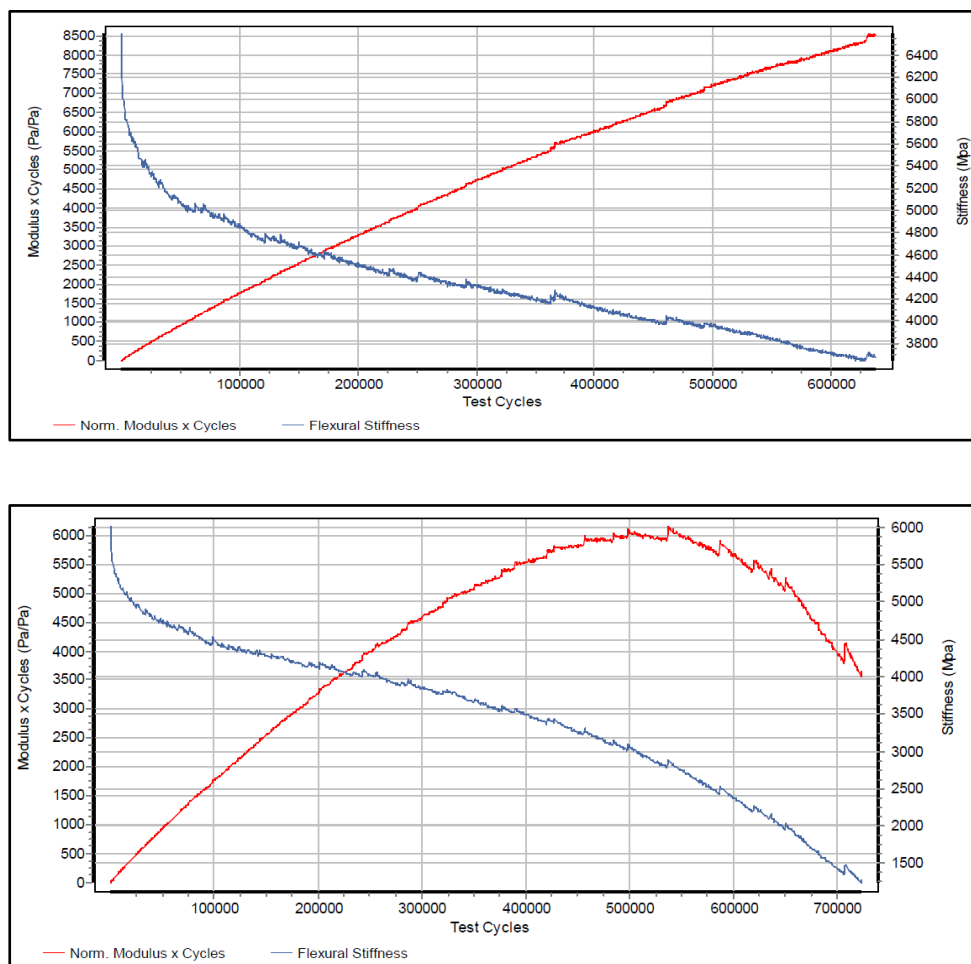
- $N_f > 50\,000$ repeticiones de carga a $600\ \mu\text{S}$.

Tabla 34. Vida fatiga (4BB) $400\ \mu\text{S}$, mezcla de 0% de R8.

Espécimen	Contenido de vacíos (%)	Temperatura (°C)	Rigidez inicial (MPa)	Rigidez final (MPa)	Ciclos para la falla, N_f
B2-V5	7,3	20,6	5 498	3 698	636 170
B2-V4	8	20,1	5 048	3 048	501 130
Promedio	7,7	20,4	5 273,0	3 373,0	568 650
Desv. Est.	0,5	0,4	318	460	95 488

Fuente: Propia.

Figura 33. Variación de la rigidez de la muestra de mezcla de control de 4bb (400 μ S)



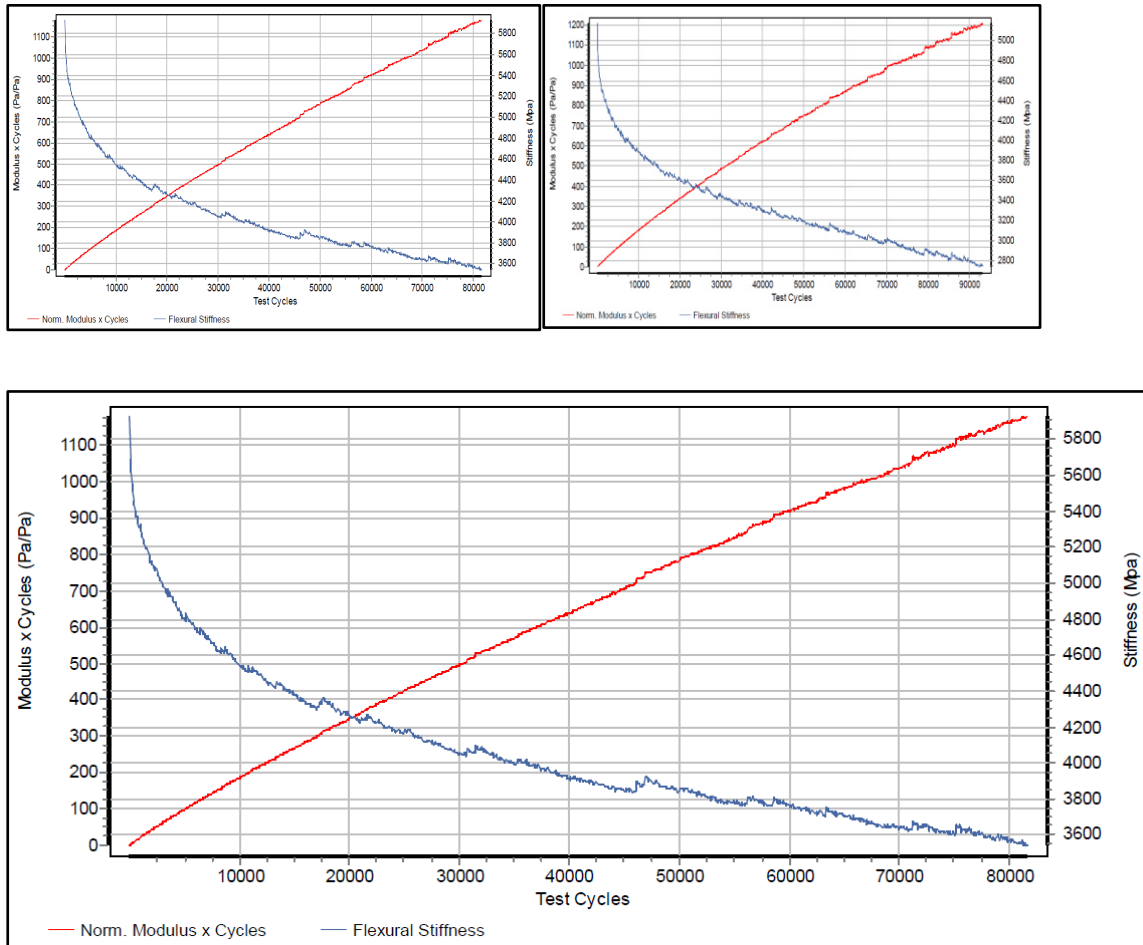
Fuente: Propia

Tabla 35. Vida fatiga (4BB) 600 μ S, mezcla de 0% de R8.

Especimen	Contenido de vacíos (%)	Temperatura (°C)	Rigidez inicial (MPa)	Rigidez final (MPa)	Ciclos para la falla, Nf
B2-V1	7,5	20,4	4 912	3 569	81 130
B2-V2	7,5	20,7	4 754	3 518	77 210
B1-V5	7,9	20,7	4 248	2 756	93 210
Promedio	7,6	20,6	4 638	3 281	83 850
Desv. Est.	0,2	0,2	347	455	8 340

Fuente: Propia.

Figura 34. Variación de la rigidez de la muestra de mezcla de control de 4bb (600 μ S)



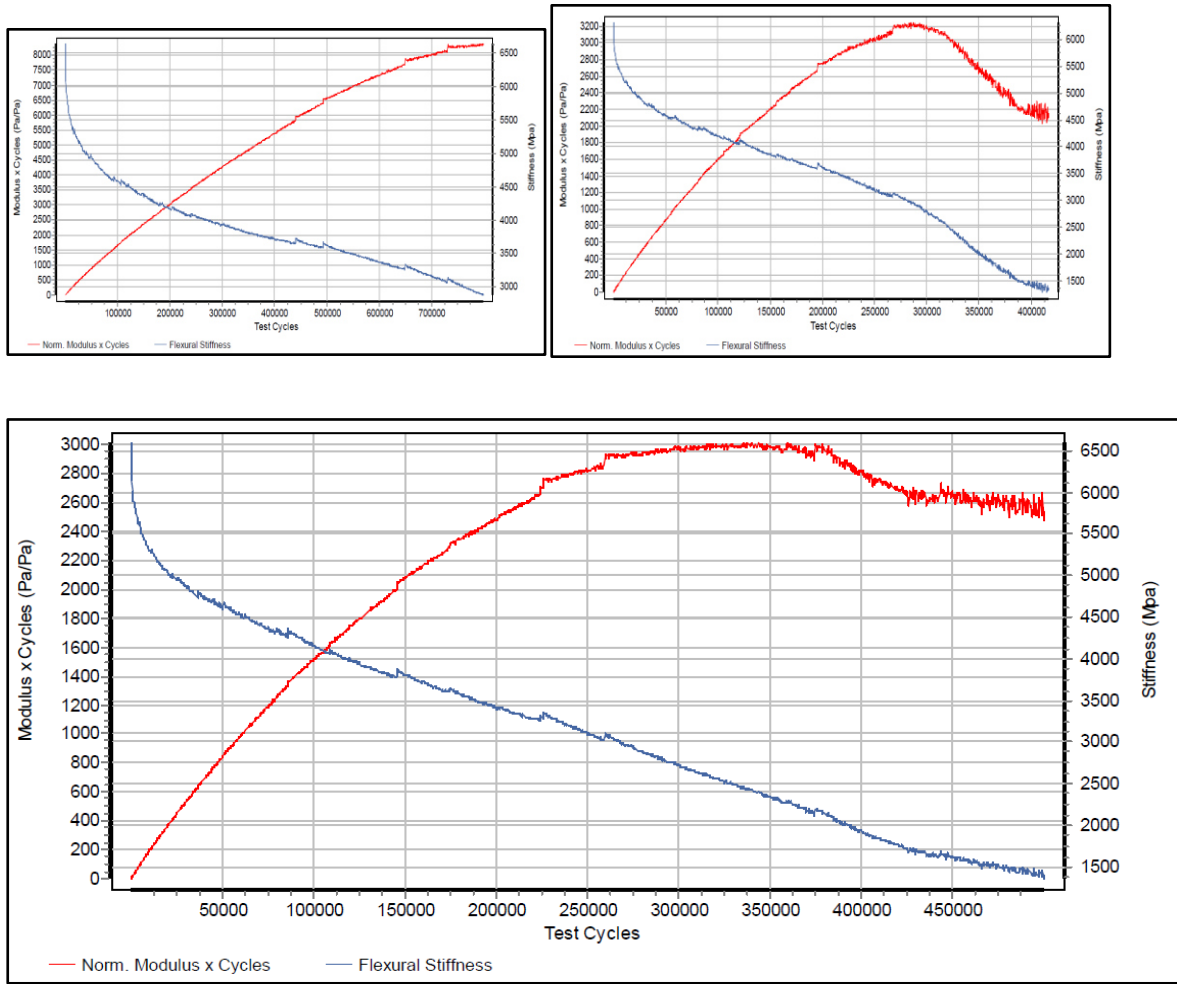
Fuente: Propia

Tabla 36. Vida fatiga (4BB) 400 μ S, mezcla de 3% de R8.

Espécimen	Contenido de vacíos (%)	Temperatura (°C)	Rigidez inicial (MPa)	Rigidez final (MPa)	Ciclos para la falla, Nf
B1-V1	6,6	20,4	5 256	2 991	285 130
B2-V2	6,2	20,1	5 518	2 900	797 450
B2-V3	7,5	20,1	5 486	2 408	343 370
Promedio	6,8	20,2	5 420	2 766	475 317
Desv. Est.	0,7	0,2	143	314	280 491

Fuente: Propia.

Figura 35. Variación de la rigidez de la muestra de 3% de R8 de 4bb (400 μ S).



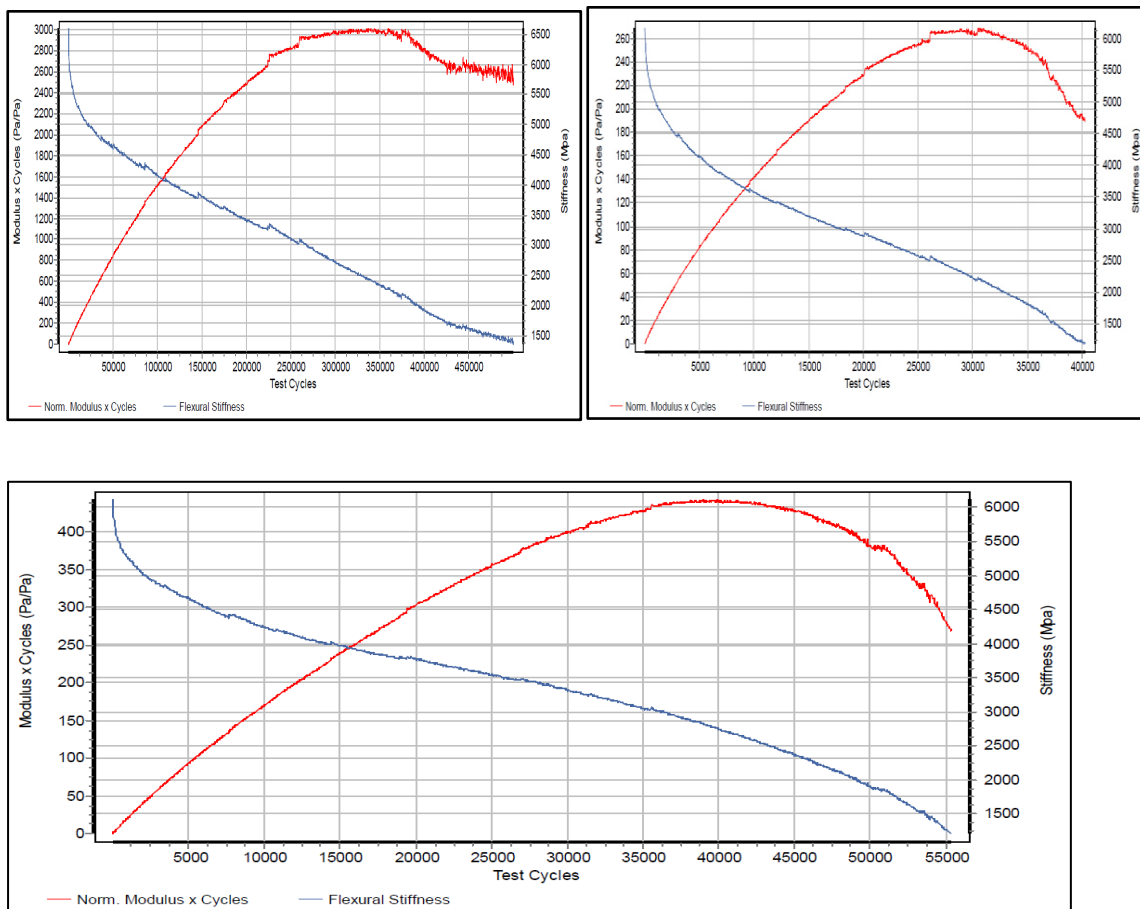
Fuente: Propia.

Tabla 37. Vida fatiga (4BB) 600 μ S, mezcla de 3% de R8.

Espécimen	Contenido de vacíos (%)	Temperatura (°C)	Rigidez inicial (MPa)	Rigidez final (MPa)	Ciclos para la falla, Nf
B1-V1	7,7	19,5	4 891	2 287	67 490
B1-V5	7,1	19,6	4 747	2 900	68 890
B2-V5	7,9	20,4	4 355	2 260	45 410
Promedio	7,6	19,8	4 664	2 482	60 597
Desv. Est.	0,4	0,5	277	362	13 171

Fuente: Propia.

Figura 36. Variación de la rigidez de la muestra 3% de resin8 de 4bb (600 μ S)



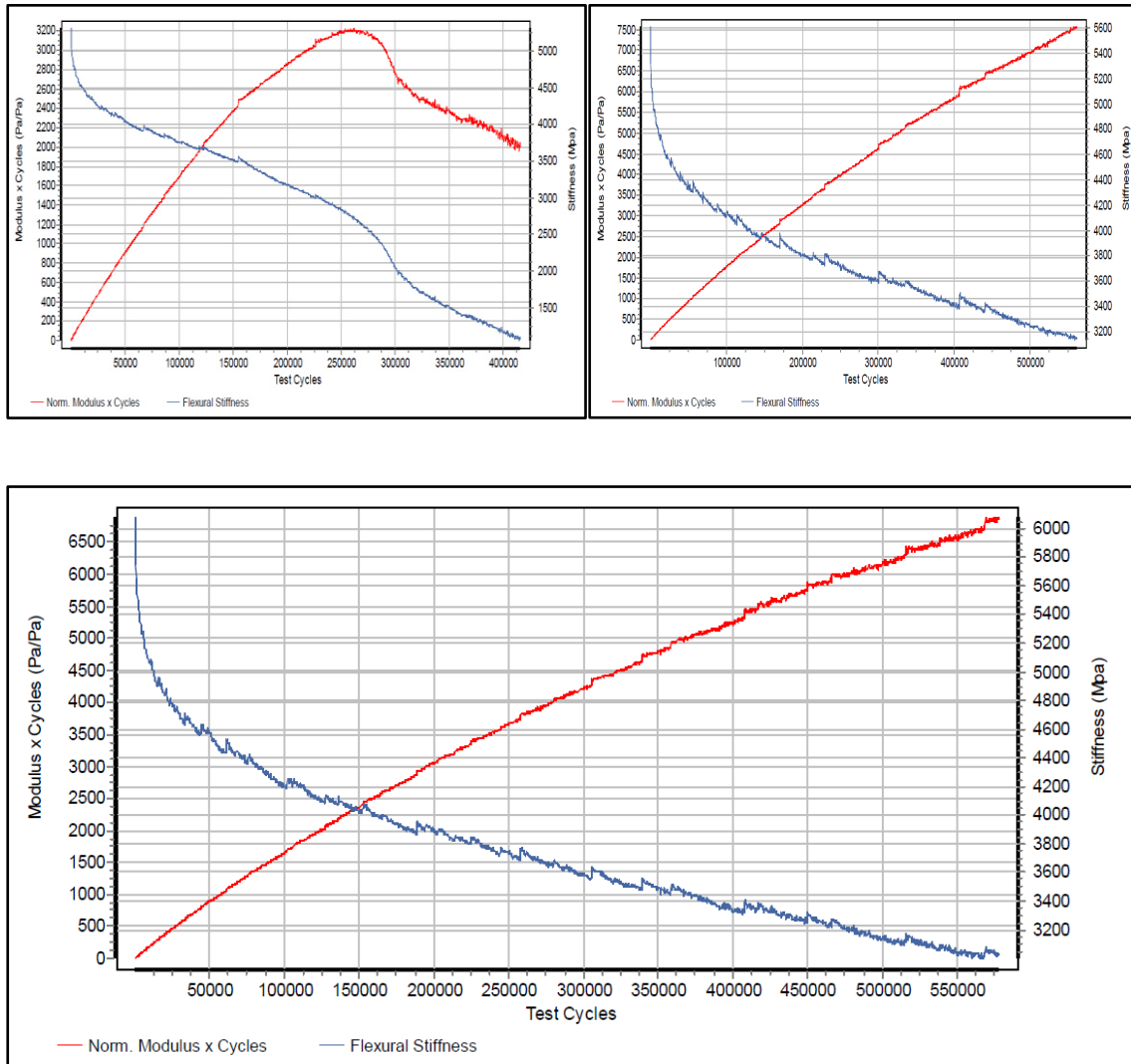
Fuente: Propia

Tabla 38. Vida fatiga (4BB) 400 μ S, mezcla de 6% de R8.

Espécimen	Contenido de vacíos (%)	Temperatura (°C)	Rigidez inicial (MPa)	Rigidez final (MPa)	Ciclos para la falla, Nf
B1-V3	7,3	19,8	4 670	3 150	561 300
B1-V4	7,2	19,9	5 093	3 029	577 610
Promedio	7,5	19,9	4 737	2 975	569 455
Desv. Est.	0,4	0,1	327	208	11 533

Fuente: Propia.

Figura 37. Variación de la rigidez de la muestra de 6% de resin8 de 4bb (400 μ S)



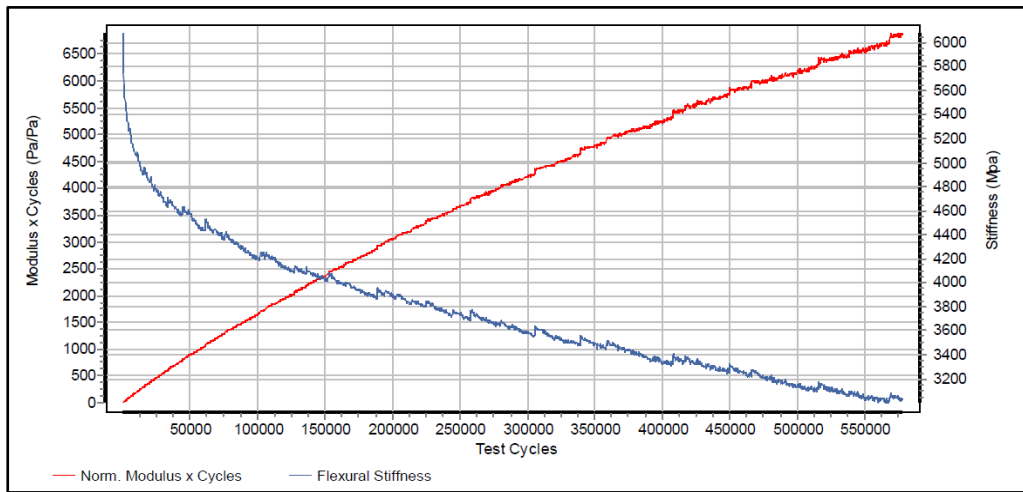
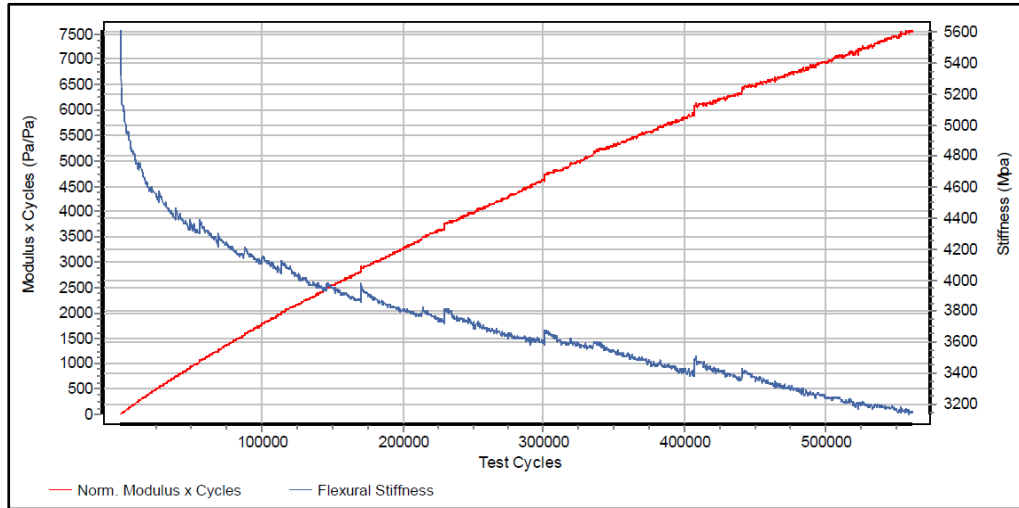
Fuente: Propia.

Tabla 39. Vida fatiga (4BB) 600 μ S, mezcla de 6% de R8.

Espécimen	Contenido de vacíos (%)	Temperatura (°C)	Rigidez inicial (MPa)	Rigidez final (MPa)	Ciclos para la falla, Nf
B1-V1	7,5	19,8	4 166	2 485	12 590
B1-V5	7,1	20	4 629	2 788	108 250
B2-V4	7,2	19,7	4 158	2 633	38 690
Promedio	7,3	19,8	4 318	2 635	53 177
Desv. Est.	0,2	0,2	270	152	49 448

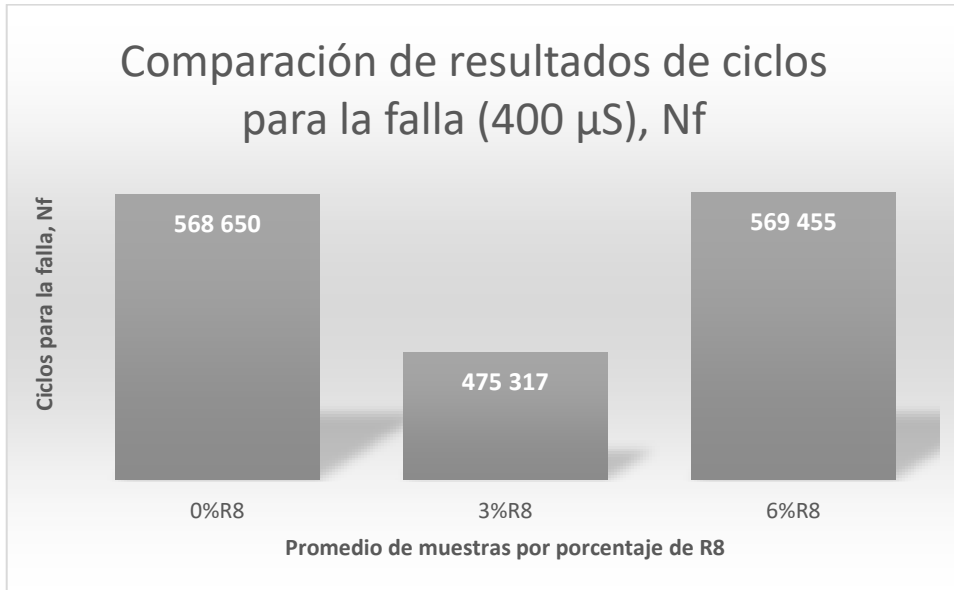
Fuente: Propia.

Figura 38. Variación de la rigidez de la muestra 6% de resin8 de 4bb (600 μ S)



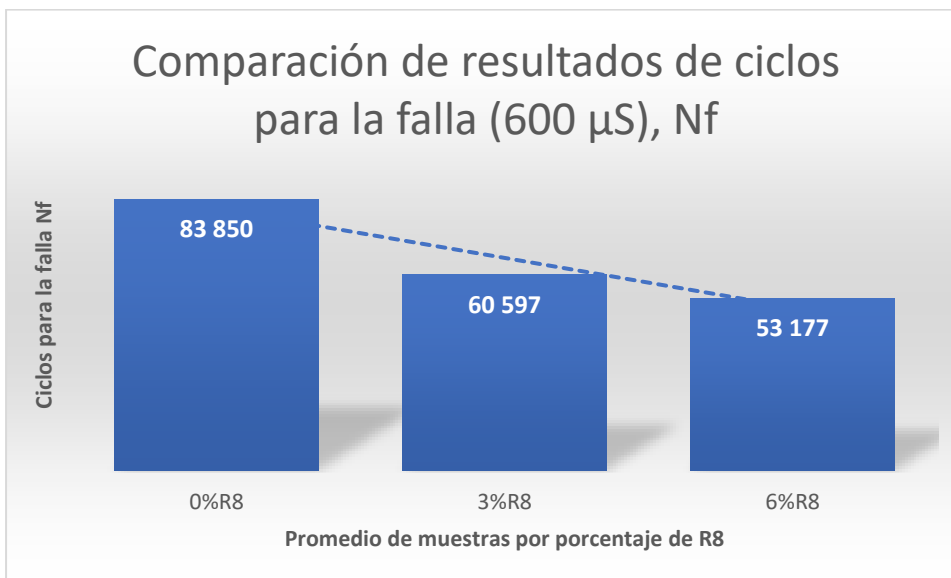
Fuente: Propia

Figura 39. Resultados de vida por fatiga (400 μ S)



Fuente: Propia.

Figura 40. Resultados de vida por fatiga 600 μ S



Fuente: propia.

En el caso de los resultados obtenidos del ensayo de vida por fatiga se obtuvo que las muestras se rigidizan cuando las mezclamos y sustituimos agregado fino por resin8. Pero en sí, los datos están bastante bien y cumplen con la norma requerida. También se puede observar una disminución considerable en la vida de fatiga en las muestras realizadas.

Conclusiones

Fatiga. Las pruebas de fatiga realizadas proporcionaron datos esperados, ya que se sabía que al añadir el resin8 a la mezcla se iba a rigidizar, dichos datos cumplen con las normas de Costa Rica para los niveles de 400 μ S y 600 μ S, pero además se encontró una reducción en la vida por fatiga en las muestras que se sometieron a 600 μ S; donde la muestra de 3% y 6% de resin8 tuvieron pérdidas de un 28% y 37% respectivamente, en el caso de 400 μ S se debe tomar en cuenta que el valor de la desviación estándar de los resultados es muy alta, y por ende si se suma esta desviación estándar los datos van a resultar muy similares, por este motivo, utilizar resin8 no está afectando de manera positiva o negativa a este parámetro de la mezcla.

Contenido de asfalto. Los datos que se obtuvieron por los ensayos realizados muestran una reducción en el contenido de asfalto, cuando se usa más resin8; la muestra virgen tuvo una pérdida, pero conforme se sustituye más resin8 por agregado fino, se incrementa la pérdida con respecto a la muestra virgen, en los casos de 1%, 2%, 3% y 6% se obtuvo como pérdida un 18%, 36%, 41%, y 60% respectivamente, por ende, el resin8 está absorbiendo más asfalto en comparación de la muestra sin modificar.

Granulometría. Con los datos obtenidos se concluye que el resin8 modifica la gradación del agregado utilizado en la mezcla; mientras más resin8 se utilice se obtendrá una disminución en los agregados finos, donde las muestras de 1%, 2%, 3% y 6% de resin8 tuvieron una disminución en la cantidad de las arenas de un 17%, 14%, 18% y 22% respectivamente y un aumento en el peso de los agregados gruesos, entonces, el resin8 se está trasladando de la parte de finos hacia la parte de agregado grueso.

Gravedad específica máxima teórica. Se pudo comprobar que los resultados son muy similares y que la muestra donde se utilizó 2% fue la que mejor se comportó en este parámetro, pero no se encontró ninguna clase de tendencia y el resin8 no está afectando este parámetro; se debe investigar más en este parámetro.

Estabilidad Marshall. En el caso de la estabilidad tiene una tendencia a aumentar; conforme se añade más resin8, la mezcla se hace más rígida y soporta más carga; en los casos de 1%, 2%, 3% y 6%, se obtuvo un 1,1%, 2,%, 2,3% y 3,5% respectivamente, en relación con la muestra virgen. Todas las mezclas producidas cumplieron con la especificación costarricense mínima de 800 kg.

Flujo Marshall. Con respecto al flujo, las muestras producidas cumplieron con las especificaciones mínimas según las normas de Costa Rica donde el mínimo es 20,32 (1/100 cm); se pudo obtener como resultado que las muestras aumentaron el valor del flujo cuando sustituimos agregado fino por resin8, por ende, su resistencia a deformaciones plásticas es mejor, donde las muestras de 1%, 2%, 3% y 6% tuvieron un aumento con respecto a la muestra sin modificar de un 3,22%, 2,42%, 6,45% y 3,22% respectivamente; no se encontró alguna tendencia y además, se recomienda seguir investigando este parámetro.

En el caso de los ensayos realizados la mezcla que se probó con 2% de resín fue la que se comportó de una mejor manera, si se juntan los ensayos realizados, se pudo observar una menor transferencia volumétrica de finos, un buen comportamiento con la absorción de asfalto en el caso del contenido de asfalto, los datos de flujo y estabilidad que se obtuvieron resultaron estables, tuvo el mejor comportamiento en el ensayo de gravedad específica máxima teórica y no se aleja en resultados con respecto a la muestra virgen, es decir no está afectando en gran medida que se sustituya un 2% de resín en la mezcla asfáltica ensayada.

Finalmente, existen variaciones en algunas propiedades de las mezclas asfálticas al sustituir resín por agregado fino, pero estas variaciones no están incumpliendo ninguna norma de Costa Rica, este proyecto puede aliviar los problemas ambientales que están sucediendo. Se debe seguir estudiando el tema a fondo y realizando distintos ensayos para poder identificar el porcentaje óptimo de resín.

Bibliografía

Abas, F., Talaib A., E., & Raghad U., A. (2014). *THE USE OF TECHNIQUES IN THE MANAGEMENT OF WASTE PLASTIC BY REUSE IT IN THE ASPHALT MIX.*

Recuperado el 20 de Octubre de 2021, de

<https://www.iasj.net/iasj/download/c4170e62da286eff>

Asphalt Institute. (2007). *Marshall Method.* Recuperado el 1 de Octubre de 2021, de https://dor.gov.np/uploads/publication/publication_1558676982.pdf

Cavallo , E., Powell, A., & Serebrisky, T. (2020). *DE ESTRUCTURAS A SERVICIOS. BID.* Obtenido de

<https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/De-estructuras-a-servicios-El-camino-a-una-mejor-infraestructura-en-America-Latina-y-el-Caribe.pdf>

Chin, C., & Damen, P. (2019). *Viability of Using Recycled Plastics in Asphalt and Sprayed Sealing Applications*. Recuperado el 14 de Octubre de 2021, de <https://trid.trb.org/view/1670017>

COSEVI. (2021). *Longitud de red vial*. Recuperado el 2 de Octubre de 2021, de <https://datosabiertos.csv.go.cr/dataviews/234872/costa-rica-longitud-de-la-red-vial/>

Delgado, J. S. (2008). *Evaluación de la factibilidad del uso en Costa Rica de polímeros modificantes de asfalto incorporados en planta*. Recuperado el 14 de Octubre de 2021, de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1464/UI-01-07%20Evaluaci%c3%b3n%20de%20la%20Factibilidad%20del%20uso%20en%20Costa%20Rica%20de%20pol%c3%admeros%20modificantes%20de%20asfalto%20incorporados.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Grady, B. (2021). *WASTE PALSTIC IN ASPHALT CONCRETE* (Vol. 2). WILEY.

Hasanain Radhi, R., Hassan Norhidayah, A., Razin Zainal, A. A., Zul Hanif, M. M., Izzi Md., Y. N., Mohd Khairul, I. M., & Naquiuddin Mohd, W. M. (2021). Enhanced Dry Process Method for Modified Asphalt Containing Plastic Waste. *Frontiers in Materials*, 8, pág. 247.

Jassim, H., Mahmood, O., & Ahmed, S. (Enero de 2014). Optimum Use of Plastic Waste to Enhance the Marshall Properties and Moisture Resistance of Hot Mix Asphalt.

International Journal of Engineering Trends and Technology, 7. Recuperado el 11 de
Noviembre de 2021, de <https://www.ijettjournal.org/volume-7/number-1/IJETT-V7P223.pdf>

Lanamme. (2014). *Consistencia de los diseños de mezcla según la metodología
Marshall*. Recuperado el 11 de Noviembre de 2021, de
[https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/889/CONSISTE
NCIA-DISE%*c3%91OS-MEZCLA-METOD.MARSHALL.pdf?sequence=1&isAllowed=y*](https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/889/CONSISTENCIA-DISE%c3%91OS-MEZCLA-METOD.MARSHALL.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

LanammeUCR. (2015). *metodologia de diseño de mezclas asfálticas en caliente para
Costa Rica*. Recuperado el 2 de Octubre de 2021, de
[https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/135/LM-PI-
UMP-026-R1%*20%28con%20firmas%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y*](https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/135/LM-PI-UMP-026-R1%20%28con%20firmas%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Loria Salazar, L., & Gomez Sandoval, G. (2021). *RESIN8©: A Micro-Plastic
Assessment and Product Circularity When Used in CMU's and Concrete Pavers*.
Recuperado el 12 de Noviembre de 2021, de
[https://www.researchgate.net/publication/349077678_RESIN8C_A_Micro-
Plastic_Assessment_and_Product_Circularity_When_Used_in_CMU's_and_Concrete_Paver
s](https://www.researchgate.net/publication/349077678_RESIN8C_A_Micro-Plastic_Assessment_and_Product_Circularity_When_Used_in_CMU's_and_Concrete_Pavers)

Loría, G. (2004). *Determinación de leyes y una especificacion costarricense para
fatiga de mezclas asfálticas en caliente*. Recuperado el 11 de Noviembre de 2021, de
[https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/427/Desarrollo%
20de%*20una%20Ecuaci%*c3%b3n%20para%20la%20Ley%20de%20Fatiga%20para%20me
zclas%20asf%*c3%a1lticas%20en%20caliente.pdf?sequence=1&isAllowed=y***](https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/427/Desarrollo%20de%20una%20Ecuaci%c3%b3n%20para%20la%20Ley%20de%20Fatiga%20para%20mezclas%20asf%c3%a1lticas%20en%20caliente.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Mashaan, N., Chegenizadeh, A., Rezagholilou, A., & Nikraz, H. (2021). *Laboratory Properties of Waste PET Plastic-Modified Asphalt Mixes*. Recuperado el 23 de Noviembre de 2021, de <https://www.mdpi.com/2313-4321/6/3/49/html#:~:text=According%20to%20previous%20studies%20%5B12,better%20durability%20and%20rutting%20resistance.>

Monturiol Arroyo, M. (2019). *Evaluación del desempeño de mezclas asfálticas modificadas con PET*. Recuperado el 16 de Octubre de 2021, de <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/9075/44160.pdf?sequence=1>

RECOPE. (2021). *Asfalto*. Recuperado el 22 de Enero de 2022, de <https://www.recope.go.cr/productos/calidad-y-seguridad-de-productos/asfalto/>

Rondón Quintana, H. A., & Reyes Lizcano, F. A. (2015). *Pavimentos, materiales construcción y diseño*. Bogotá: ECO. Recuperado el 11 de Octubre de 2021, de <https://books.google.com.pe/books?id=zuwcDgAAQBAJ&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>

Technology, N. C. (2019). *Research Needed on Using Recycled Plastics in Asphalt*. Recuperado el 26 de Octubre de 2021, de <https://www.eng.auburn.edu/research/centers/ncat/newsroom/2019-fall/plastics.html#:~:text=Existing%20studies%20indicate%20that%20pre,fatigue%20damage%2C%20and%20moisture%20damage.>

Trimbakwala, A. (Abril de 2017). Plastic Roads: Use of Waste Plastic in Road Construction. *Internation Journal of Scientific and Research Publication*, 7. Recuperado el 23 de Enero de 2022, de <http://www.ijsrp.org/research-paper-0417/ijsrp-p6424.pdf>

Valenzuela V, M. (2003). *El asfalto, en la conservación de pavimentos*. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. Recuperado el 26 de Octubre de 2021, de <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2003/bmfciv161a/sources/bmfciv161a.pdf>

White, G., & Magee, C. (Noviembre de 2019). Laboratory Evaluation of Asphalt Containing Recycled. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 7. doi:10.17265/2328-2142/2019.05.004

Ye, Q., Amirhanian, S., Li, J., & Chen, Z. (2020). Effects of Waste Polyethylene on the Rheological Properties of Asphalt Binder. *Journal of testing and evaluation*, 48. Recuperado el 15 de Octubre de 2021