

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

MAESTRÍA EN INGENIERÍA VIAL



“Mejoramiento de una mezcla asfáltica con la adición de residuos de caucho obtenidos de la remoción en la pista aterrizaje del aeropuerto”

Proyecto Final de Graduación para optar por el título de Máster en Ingeniería Vial grado profesional de Maestría.

Realizado por:
Alexander Sánchez Mora

Cartago, mayo de 2022

ACTA DE APROBACIÓN DE PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN

Con fundamento en lo establecido por la Maestría en Ingeniería Vial, el Tribunal Examinador del Proyecto Final de Graduación denominado:

Mejoramiento de una mezcla asfáltica con la adición de residuos de caucho obtenidos de la remoción en la pista aterrizaje del Aeropuerto.

Y, habiendo analizado el resultado del trabajo presentado por el(los) estudiante(s):

Primer Apellido	Segundo Apellido	Nombre	No. de carné
SANCHEZ	MORA	ALEXANDER	2018319736

Se emite el siguiente dictamen el día 03 de mayo del 2022:

<input checked="" type="checkbox"/> Aprobado	<input type="checkbox"/> Reprobado <input type="checkbox"/> Se recomienda <input type="checkbox"/> No se recomienda <i>Brindarle una nueva oportunidad para Defensa Pública.</i> Nueva fecha: _____
---	---

Dando fé de lo acá expuesto firmamos,

GUSTAVO ADOLFO ROJAS MOYA (FIRMA) Firmado digitalmente por GUSTAVO ADOLFO ROJAS MOYA (FIRMA) Fecha: 2022.05.05 11:56:27 -06'00' Ing. Gustavo Rojas. Director Escuela de Ingeniería en Construcción	SERGIO FERNANDEZ CERDAS (FIRMA) Firmado digitalmente por SERGIO FERNANDEZ CERDAS (FIRMA) Fecha: 2022.05.04 18:17:02 -06'00' Ing. Sergio Fernández. Profesor Tutor
JOSE PABLO AGUIAR MOYA (FIRMA) Firmado digitalmente por JOSE PABLO AGUIAR MOYA (FIRMA) Fecha: 2022.05.04 13:47:54 -06'00' Ing. José Pablo Aguiar. Profesor Lector	GIANNINA ORTIZ QUESADA (FIRMA) Firmado digitalmente por GIANNINA ORTIZ QUESADA (FIRMA) Fecha: 2022.05.04 13:33:17 -06'00' Ing. Giannina Ortiz Quesada. Coordinadora Unidad de Posgrado

DEDICATORIA

A mi esposa, por su gran comprensión y paciencia, por haber estado en los momentos difíciles y apoyarme cuando más lo necesitaba al darme palabras de aliento para que pudiera lograr mi objetivo.

A mi hijo, por ser la fuente de inspiración para seguir adelante y las personas a quien más me interesa dar un buen ejemplo en este mundo, que nunca dejen de luchar para lograr sus objetivos y retos.

A mis padres, quienes me enseñaron desde pequeño a luchar para alcanzar mis metas y gracias a ellos son lo que soy ahora.

AGRADECIMIENTOS

Dios, por su amor, gracia, sabiduría, misericordia, por darme fuerzas para seguir adelante con todo, por levantarme y porque le debo toda mi felicidad.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE CUADROS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
RESUMEN.....	x
ABSTRACT	xi
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN.	1
1.1. Antecedentes.	1
1.2. Planteamiento del Problema.....	2
1.3. Justificación del Estudio.....	4
1.4. Objetivos	5
1.4.1. Objetivo General.	5
1.4.2. Objetivos Específicos.....	5
1.4.3. Alcance y limitaciones	5
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	7
2.1. Pavimentos Aeroportuarios.	7
2.1.1. Tipos de Estructuras de Pavimento Aeroportuarios.....	8
2.1.2. Pavimento Flexible.....	8
2.1.3. Pavimento Rígido.....	9
2.2. Mezclas Asfálticas.....	10
2.2.1. Funcionalidad de las Mezclas Asfálticas.	10
2.2.2. Propiedades de las mezclas asfálticas para capas de rodadura.....	11
2.2.3. Clasificación de las Mezclas Asfálticas	12
2.3. Ligantes asfálticos.	13
2.4. Mezclas Asfálticas para Aeropuertos tipo P-401.	15
2.4.1. Materiales.....	15
2.4.1.1. Agregado.	15
2.4.1.2. Filler mineral.	16
2.4.1.3. Aglutinante de cemento asfáltico.	16
2.4.1.4. Composición de la mezcla.....	16
2.4.1.5. Limitaciones climáticas.....	18
2.5. Generalidades de los asfaltos modificados en Costa Rica.	18
2.6. Tipos de polímeros para la modificación de los Asfaltos.	19
2.6.1. Asfaltos modificados con polímeros tipo elastómeros:.....	19
2.6.2. Asfaltos modificados con polímeros tipo plastómeros:	19
2.6.3. Métodos de adición de residuo de caucho reciclado en las mezclas asfálticas.	20
2.7. Deformación permanente en mezclas asfálticas.....	22
2.7.1. Roderas por fallas en la subrasante.	22
2.7.2. Roderas por fallas en la capa de asfalto.	23
2.8. Ensayos de desempeño de mezclas asfálticas a utilizar en presente trabajo de investigación.....	23
2.8.1. Ensayo del Analizador de pavimentos asfálticos (APA).	23
2.8.2. Ensayo del efecto de la humedad a la tensión diametral (TSR).....	24
2.8.3. Módulo dinámico.	25
CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO.	27
3.1. Tipo de Investigación.	27
3.2. Fuentes y Sujetos de Información.	27
3.2.1. Fuentes.	27

3.2.2. Primarias.....	27
3.2.3. Secundarias.....	27
3.2.4. Terciarias.....	27
3.2.5. Sujetos de información.....	28
3.3. Técnicas e Instrumentos de Investigación.....	28
3.3.1. Consulta personal.....	28
3.3.2. Revisión documental.....	28
3.3.3. Definición de los sitios de muestreo.....	28
3.3.4. Ensayos de laboratorio.....	29
3.3.4.1. Análisis granulométrico (agregado grueso y fino).....	29
3.3.4.2. Perdida por sanidad – Sulfato de sodio.....	30
3.3.4.3. Gravedad específica y Absorción.....	30
3.3.4.4. Equivalencia de arena de agregado fino.....	31
3.3.4.6. Límites de Attemberg.....	32
3.3.4.7. Método de prueba estándar para la densidad a granel (“Peso Unidad”) y los vacíos en el agregado.....	32
3.3.4.8. Abrasión: Máquina de los Ángeles.....	33
3.3.4.9. Caras Fracturadas.....	33
3.3.4.10. Partículas Planas y Elongadas.....	34
3.3.4.11. Índice de Durabilidad.....	34
3.3.4.12. Residuos insolubles en agregado carbonatados.....	35
3.3.4.13. Análisis granulométrico (residuo de caucho).....	35
3.3.4.14. Ensayos físicos en el cemento asfáltico.....	35
3.3.4.14.1. Punto de ablandamiento.....	35
3.3.4.14.2. Recuperación Elástica a 25°C.....	36
3.3.4.14.4. Densidad del asfalto a 25°C.....	36
3.3.4.14.5. Viscosidad dinámica 135°C.....	37
3.3.4.14.6. Cambio de masa en RTFO.....	37
3.3.4.15. Determinación de las fracciones disponibles de agregados para el diseño de mezclas asfálticas.....	38
3.3.4.15.1. Determinación del porcentaje en peso que pasa a través de los tamices para la mezcla asfáltica en caliente para el diseño, de acuerdo con el método Marshall.....	38
3.3.4.16. Diseño de mezcla asfáltica sin residuo de caucho, obtención de parámetros Marshall.....	38
3.3.4.17. Diseño de mezcla asfáltica con residuo de caucho, obtención de parámetros Marshall.....	39
3.3.5. Matriz de ensayos.....	40
3.3.6 Análisis de contenido.....	41
3.4. Procesamiento y Análisis de datos.....	41
3.4.1. Objetivo 1. Determinar las características volumétricas y mecánicas de los agregados pétreos y de los residuos de caucho de la limpieza de la pista de aterrizaje del aeropuerto mediante ensayos de laboratorio.....	41
3.4.2. Objetivo 2. Realizar los diseños de mezcla con y sin residuos de caucho para analizar el efecto del caucho sobre las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica.....	41
3.4.3. Objetivo 3. Comparar el comportamiento dinámico de las mezclas asfálticas en caliente con y sin residuo de caucho de la limpieza de la pista de aterrizaje del aeropuerto mediante ensayos de laboratorio.....	42

3.4.4.	Objetivo 4. Evaluar la resistencia a la deformación permanente y daño inducido por humedad con y sin adición de residuo de caucho de la pista de aterrizaje en la mezcla asfáltica mediante ensayos de laboratorio.	42
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y ANÁLISIS.		43
4.1.	Objetivo 1: Determinar las características volumétricas y mecánicas de los agregados pétreos y de los residuos de caucho de la limpieza de la pista de aterrizaje del Aeropuerto.	43
4.1.1.	Ubicación de los agregados pétreos.	43
4.1.2.	Granulometría de diseño con los porcentajes pasando en cada malla para la mezcla de agregado.	43
4.1.3.	Granulometría de diseño.	44
4.1.4.	Ensayos a los Agregados Pétreos:	44
4.1.5.	Análisis de resultados de la caracterización de los agregados.	46
4.1.6.	Ubicación del Residuo de Caucho.	47
4.1.7.	Proceso de extracción del caucho en la Pista de Aterrizaje.	48
4.1.8.	Ensayos al Residuo de Caucho.	50
4.1.9.	Análisis de resultados caracterización de los residuos de caucho.	50
4.2.	Objetivo 2: Realizar los diseños de mezcla con y sin residuos de caucho para analizar el efecto de los residuos de caucho sobre las propiedades volumétricas de la Mezcla Asfáltica. .	51
4.2.1.	Ensayos físicos y reológicos al cemento asfáltico.	51
4.2.2.	Análisis de resultados de los ensayos físicos y reológicos del cemento asfáltico..	52
4.2.3.	Determinación del porcentaje de caucho.	56
4.2.4.	Determinación del grado de desempeño PG del proyecto de investigación.	56
4.2.5.	Diseño de mezcla asfáltica sin y con residuos de caucho.	57
4.2.6.	Análisis de resultados del diseño de mezcla asfáltica sin y con residuos de caucho.	58
4.3.	Objetivo 3. Comparar el comportamiento dinámico de las mezclas asfálticas en caliente con y sin residuo de caucho.	62
4.3.1.	Análisis de resultados de los módulos dinámicos de las mezclas asfálticas en caliente con y sin residuo de caucho.	64
4.4.	Objetivo 4. Evaluar la resistencia a la deformación permanente y daño inducido por humedad con y sin adición de residuo de caucho mediante ensayos de laboratorio.	65
4.4.1.	Determinación de la resistencia a la deformación permanente de la mezcla asfáltica con y sin adición de residuo de caucho.	65
4.4.2.	Análisis de resultados de la resistencia a la deformación permanente de la mezcla asfáltica con y sin adición de residuo de caucho.	66
4.4.3.	Determinación daño inducido por humedad de la mezcla asfáltica con y sin adición de residuo de caucho.	66
4.4.4.	Análisis de resultados daño inducido por humedad de la mezcla asfáltica con y sin adición de residuo de caucho.	67
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.		68
5.1.	Conclusiones.	68
5.2.	Recomendaciones.	69
CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA.		70
CAPÍTULO 7: APÉNDICES.		75
CAPÍTULO 8: ANEXOS.		79

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Criterio de Diseño Marshall.	16
Cuadro 2: Criterios de Diseños Giratorios	17
Cuadro 3: Criterios de Diseños Giratorios	17
Cuadro 4: Agregado de la Mezcla Asfáltica	17
Cuadro 5: Limitaciones de temperatura de la capa subyacente.	18
Cuadro 6: Propiedades Volumétricas Diseño Marshall	18
Cuadro 7: Agregado Pavimentos Asfálticos.	38
Cuadro 8: Criterio de Diseño Marshall.	39
Cuadro 9: Compactador giratorio Superpave.	39
Cuadro 10: Porcentaje de vacío mínimo en el agregado mineral (VMA).	39
Cuadro 11: Matriz de Ensayos.	40
Cuadro 12: Porcentaje de combinación de agregados.	43
Cuadro 13: Granulometría de diseño.	44
Cuadro 14: Graduación fracción fina	44
Cuadro 15: Graduación fracción gruesa.	45
Cuadro 16: Graduación fracción intermedia.	45
Cuadro 17: Resumen de Cumplimiento del polvo de piedra.	46
Cuadro 18: Resumen de Cumplimiento de la piedra cuarta.	46
Cuadro 19: Resumen de Cumplimiento de la piedra quinta.	47
Cuadro 20: Resultado Ensayo Residuo de Caucho	50
Cuadro 21: Ensayos físicos en el cemento asfáltico.	51
Cuadro 22: Cambio de masa en RTFO	51
Cuadro 23: Límite superior del grado de desempeño PG.	52

Cuadro 24: Límite superior del grado de desempeño PG.	52
Cuadro 25: Aumento de grado requerido.	57
Cuadro 26: Parámetros de la mezcla con el porcentaje óptimo de asfalto sin caucho.	58
Cuadro 27: Parámetros de la mezcla con el porcentaje óptimo de asfalto con caucho.	58
Cuadro 28: Valores E^* obtenidos en el laboratorio mezcla sin caucho.	62
Cuadro 29: Valores E^* obtenidos en el laboratorio mezcla con caucho.	62
Cuadro 30: Resultado APA de las muestras sin residuo de caucho.	65
Cuadro 31: Resultado APA de las muestras con residuos de caucho.	66
Cuadro 32: Resultado TSR de las muestras sin residuos de caucho.	66
Cuadro 33: Resultado TSR de las muestras con residuos de caucho.	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Árbol de Problemas.	3
Figura 2: Comportamiento de pavimentos flexibles y rígidos.	8
Figura 3: Dependencia tiempo- Temperatura del cemento Asfáltico.....	13
Figura 4: Comportamiento visco-elástico del asfalto.....	14
Figura 5: Descripción del proceso por vía húmeda.	21
Figura 6: Deformación permanente debido a una capa subyacente débil.	23
Figura 7: Deformación permanente debido a una mezcla asfáltica débil.....	23
Figura 8: Analizador de pavimentos asfálticos (APA).....	24
Figura 9: Ensayo del efecto de la humedad a la tensión diametral.....	25
Figura 10: Módulo dinámico en mezclas asfálticas.	26
Figura 11: Muestra el equipo para el tamizaje del agregado grueso y fino.....	29
Figura 12: Muestra el equipo para determinar la pérdida por sanidad.	30
Figura 13: Muestra el equipo para determinar la gravedad específica y absorción del agregado.	30
Figura 14: Muestra parte del equipo para determinar la equivalencia de arena en el agregado fino.	31
Figura 15: Muestra el equipo para determinar las partículas friables.....	31
Figura 16: Muestra el equipo para determinar los Límites de Atterberg.....	32
Figura 17: Muestra el equipo para determinar el peso unitario del agregado.	32
Figura 18: Muestra el equipo para determinar la abrasión del agregado.....	33
Figura 19: Muestra el equipo para determinar las partículas fracturadas.....	33
Figura 20: Muestra parte del equipo para determinar longitud/ancho del agregado.	34
Figura 21: Muestra parte del equipo para determinar la resistencia relativa de los agregados.	34
Figura 22: Muestra el equipo para el tamizaje del agregado grueso y fino.....	35
Figura 23: Muestra el equipo para determinar el punto de ablandamiento	35
Figura 24: Moldes para el ensayo de recuperación elástica con ductilómetro.	36
Figura 25: Método del picnómetro para calcular densidades.	36

Figura 26:Viscosidad dinamica de asfaltos.....	37
Figura 27: Cambio de masa en RTFO.....	37
Figura 28: CDP Río Lagarto.	43
Figura 29: Residuo de Caucho	49
Figura 30: Punto de ablandamiento.....	53
Figura 31: Recuperación elástica.	53
Figura 32: Densidad del asfalto a 25°C.....	54
Figura 33: Viscosidad dinámica a 135°C	54
Figura 34: Asfalto original sin envejecimiento.	55
Figura 35:Asfalto envejecido en RTFO.	56
Figura 36:Mapa de zonificación PG para altas temperaturas en Costa Rica.....	57
Figura 37: Curva maestra de módulo dinámico mezcla sin caucho.	64
Figura 38: Curva maestra de módulo dinámico mezcla con caucho	64
Figura 39: Relación curvas maestras de módulo dinámico sin y con caucho.	65

RESUMEN

El análisis e investigación del comportamiento de mezclas asfálticas convencionales modificadas; con residuos de caucho ha venido desarrollando desde hace varios años en otros países, con la finalidad de obtener pavimentos cuyas propiedades de estabilidad, flujo aumenten y que sean sustentables. Además, es de gran interés para minimizar el impacto o huella que tiene las distintas técnicas ingenieriles en el medio ambiente por lo cual este tipo modificaciones se encuentran enmarcadas dentro de la línea de pavimentos o alternativas verdes.

Es por esta razón que el presente proyecto tiene como finalidad realizar una investigación de índole comparativo sobre el comportamiento de las propiedades volumétricas y mecánicas entre una mezcla asfáltica convencional y una mezcla asfáltica modificada con residuos de caucho provenientes de la pista de aterrizaje, material que se ha escogido como modificante por sus diferentes características, además de ser accesible y económico, el proceso para modificar la mezcla es por vía húmeda, mediante la incorporación en porcentajes de, 15%, 25%. El propósito es mejorar o al menor igualar las características mecánicas de mezclas asfálticas convencionales que podrían ser empleadas como parte del diseño estructural, mantenimiento, de las labores de rehabilitación, reforzamiento de los pavimentos aeroportuarios, así como la reutilización de este material una vez que haya sido removido del pavimento de la pista.

Se emplea el método Marshall y se realizan las comparaciones con el objetivo de determinar si el caucho mejora o no las propiedades mecánicas, para que en un futuro se pueda proponer el uso de este como una alternativa para mejorar las propiedades de la mezcla asfáltica y su vida útil en los aeropuertos del país.

Se abarca brevemente la descripción y origen de los agregados pétreos y del caucho usados en esta investigación, así como se describe todos los ensayos realizados para comprobar si los materiales utilizados cumplen o no con las especificaciones necesarias para mezclas asfálticas de acuerdo con la establecidos en las especificaciones técnicas de acuerdo con la Circular de Asesoramiento AC 150/5370-10H, Parte 6 Pavimento Flexible, Ítem P-401 Pavimento de mezcla de asfalto de la FAA.

Además, mediante pruebas de desempeño como la del Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA), Modulo Dinámico y Daño Inducido por Humedad (TSR) se determinó cuál de las dos mezclas tiene mejor comportamiento ante la deformación plástica y el daño inducido por humedad, que constituyen parámetros de desempeño mecánico asociados a problemas típicos que sufren las mezclas asfálticas cuando están en servicio en un pavimento aeroportuario.

Se puede concluir que estas técnicas y materiales tienen mucha aplicabilidad para su uso en los pavimentos aeroportuarios y de carreteras, debido a los beneficios que aporta los asfaltos modificados con caucho a los problemas de deformación permanente que constituye uno de los principales deterioros de los pavimentos en las pistas de aterrizaje de los aeropuertos. Además, es importante indicar que la reutilización de caucho ayuda a reducir el impacto ambiental.

Palabra clave: Caucho, Aeropuertos, FAA, APA, TSR, Modulo dinámico,

ABSTRACT

The analysis and investigation of the behavior of modified conventional asphalt mixtures; with rubber waste has been developing for several years in other countries, in order to obtain pavements whose properties of stability, flow increase and are sustainable. In addition, it is of great interest to minimize the impact or footprint that the different engineering techniques have on the environment, which is why these types of modifications are framed within the line of pavements or green alternatives.

It is for this reason that the purpose of this project is to carry out a comparative investigation on the behavior of the volumetric and mechanical properties between a conventional asphalt mixture and a modified asphalt mixture with rubber residues from the landing strip, a material that is has chosen as a modifier due to its different characteristics, in addition to being accessible and economical, the process to modify the mixture is by wet means, by incorporating in percentages of, 15%, 25%. The purpose is to improve or at least match the mechanical characteristics of conventional asphalt mixtures that could be used as part of the structural design, maintenance, rehabilitation work, reinforcement of airport pavements, as well as the reuse of this material once it has been removed from the runway pavement.

The Marshall method is used and comparisons are made in order to determine whether or not the rubber improves the mechanical properties, so that in the future the use of this can be proposed as an alternative to improve the properties of the asphalt mixture and its useful life in the country's airports.

The description and origin of the stone aggregates and rubber used in this investigation is briefly covered, as well as all the tests carried out to verify whether the materials used comply with the necessary specifications for asphalt mixtures in accordance with that established in the technical specifications in accordance with FAA Advisory Circular AC 150/5370-10H, Part 6 Flexible Pavement, Item P-401 Asphalt Mix Pavement.

In addition, through performance tests such as the Asphalt Pavement Analyzer (APA), Dynamic Modulus and Moisture-Induced Damage (TSR), it was determined which of the two mixtures has better behavior in the face of plastic deformation and moisture-induced damage, which constitute mechanical performance parameters associated with typical problems suffered by asphalt mixtures when they are in service on an airport pavement.

It can be concluded that these techniques and materials have great applicability for use in airport pavements, due to the benefits that rubber-modified asphalts bring to permanent deformation problems, which constitute one of the main deteriorations of pavements on airport runways. airport landing. In addition, it is important to indicate that the reuse of rubber helps reduce the environmental impact.

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN.

1.1. Antecedentes.

La modificación de asfaltos con polímeros de las más diversas variedades y procedencias es una de las tendencias más importantes de la industria actual de construcción de carreteras.

El uso de aditivos en planta para modificar asfalto, puede convertirse en una variante que involucra desde el ingenio hasta cambios importantes de tecnología y este último asociado directamente con la inversión, no obstante hay que tomar en cuenta los beneficios de modificar las características reológicas de los asfaltos, ya que para poder adecuar al asfalto para que se desempeñe de una forma específica y predeterminada en un pavimento reflejaría que la relación inversión beneficio sea un factor importante en los análisis financieros de los proyectos. Los aportes de los polímeros a la mejora de las propiedades reológicas de los asfaltos han sido ampliamente estudiados. Sin embargo, cada vez que el mercado ofrece un nuevo producto, es fundamental realizar un análisis exhaustivo de las mejoras que podrían provocar dicho polímero a un asfalto determinado y así como el costo de su uso. (Salazar, 2008)

Los asfaltos modificados con polímeros elevan la vida útil de un pavimento, algunos autores como (Bacchetta, 2003) consideran que puede ser de dos a tres veces (según el caso a aplicar), con un costo adicional de hasta un 25 % sobre el costo la mezcla asfáltica. Esta plenamente demostrado que los asfaltos convencionales poseen propiedades muy satisfactorias tanto mecánicas como de adhesión en una amplia gama de aplicaciones y bajo distintas condiciones climáticas y de tránsito. Sin embargo, el creciente incremento de volumen del tránsito y magnitudes de carga, y la necesidad de optimizar las inversiones, provoca que, en algunos casos, las propiedades de los asfaltos convencionales resulten insuficientes. A modo de ejemplo, con los asfaltos convencionales, aun con los grados de desempeño PG más altos, no es posible eliminar el problema de las deformaciones producidas por el tránsito como lo son el ahuecamiento por deformación permanente, especialmente cuando se deben afrontar condiciones de alta temperatura y tránsito lento. Además, con la simple adopción de asfaltos más duros se corre el riesgo de fisuraciones por efectos térmicos. (Salazar, 2008)

En el 2016 la Ingeniera Ellen Rodríguez Castro mediante lo Boletín Técnico presenta el tema “*Uso de Polvo de Caucho de Llantas en Pavimentos Asfálticos*”. En este trabajo Rodríguez realiza una caracterización del caucho utilizado, se investiga la composición de la llanta según el tipo y composición química, además indica que la estructura y composición de la llanta son factores que hay que considerar cuando se va a utilizar el caucho en pavimentos asfálticos, además se indica que para usar las llantas como aditivo o modificador en las mezclas asfálticas se debe reducir el material a un tamaño de partícula entre 0,5 mm y 2 mm, según la aplicación. El caucho se utiliza en pavimentos asfálticos de dos maneras, como modificador del asfalto o como mejorador de la mezcla asfáltica. En el primer caso se conoce como proceso de vía húmeda y el segundo como vía seca. El estudio revela muchos beneficios ecológicos que provee la adición del caucho al asfalto, también hay importantes beneficios en el desempeño de la mezcla asfáltica, dentro de los cuales se pueden mencionar: El caucho aumenta el volumen del asfalto, lo cual permite envolver los agregados con películas más gruesas sin exudación, se modifica la reología del asfalto aumentando la flexibilidad y resiliencia a altas temperaturas y se indica que en varios investigadores han demostrado la reducción de fatiga y reflejo de grietas, mayor resistencia a la deformación permanente y a la oxidación por envejecimiento.

También José Pablo Aguiar Mora, Laura Marcela Cruz Abarca, Alejandro Porras Méndez, Adriana Vargas Nordbeck y Luis Guillermo Loria Salazar presentan un estudio denominado “*Materiales de desecho como modificantes de la Mezclas Asfáltica*” en el año 2015 se realizó una investigación que se fundamenta en la caracterización del asfalto modificado y la posterior verificación del desempeño en la mezcla asfáltica

diseñada según la metodología Superpave. El asfalto modificado fue diseñado para determinar un contenido mínimo idóneo de modificante (material de desecho). Con base en el contenido óptimo, se verificaron las propiedades básicas del asfalto, así como su resistencia a la deformación y a la fatiga mediante ensayos reológicos utilizando el reómetro dinámico de cortante (DSR). A nivel de mezcla asfáltica se realizaron ensayos de deformación permanente con el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA), se verificó la rigidez de la mezcla mediante evaluación del Módulo Resiliente a la Tensión Indirecta y se estudió la resistencia al daño por humedad con base en la Resistencia Retenida a la Tensión Diametral. Se pudo determinar cuantitativamente que el material de desecho presenta un beneficio sobre el comportamiento del asfalto, y de la mezcla asfáltica, principalmente aportando a la resistencia a la deformación permanente y a la humedad. El aporte en cuanto a fatiga no fue significativo. Sin embargo, el modificante no generó un efecto negativo en ninguno de los parámetros analizados.

1.2. Planteamiento del Problema.

Dentro de la infraestructura del medio de transporte aéreo ocupa un lugar importante el pavimento de las pistas de despegue, carreteo, conexiones y plataformas; su estado debe permitir que se realicen con seguridad, economía, eficiencia y comodidad las operaciones terrestres y las de transición aire-tierra-aire. ósea, aterrizaje, despegues, maniobras, carga, descarga y mantenimiento. El pavimento de un aeropuerto es algo más que una superficie “dura y resistente” al peso y al deslizamiento de las aeronaves; es una estructura formada por una o varias capas de material convenientemente colocadas sobre un suelo acondicionado como desplante o cimentación. Esta estructura debe ser capaz de permitir la operación de las aeronaves y de los medios auxiliares, además de resistir el desgaste producido por el tráfico, así como de las agresiones del clima y otros agentes de su entorno.

Las variables mencionadas deben tenerse en cuenta en los métodos de diseño de pavimentos nuevos y en los que se utilicen para ampliar, reforzar, rehabilitar o reemplazar los existentes de acuerdo con su nivel de servicio. Se requiere entonces contar con técnicas convenientes de evaluación que hagan posible decidir sobre las últimas actividades y desarrollar, comprobar y ajustar métodos de diseño. La evaluación es básica para planear el futuro y debe ver el estado del pavimento en cualquier momento; sus alcances deben ser lo suficientemente amplios para cubrir el balance económico avión-pavimento-usuario.

El Incremento en las operaciones aéreas y en el tamaño y peso de los aviones. ha traído como consecuencia de un deterioro acelerado de los pavimentos con la presencia de patologías tales como ahuellamiento y grietas con nivel de severidad media a alta, esto ha conllevado a un incremento o frecuencia de reparaciones y cierren en las pistas de aterrizaje, generando efectos desfavorables como pérdidas económicas a las aerolíneas y produciendo una mala imagen a nivel institucional y de Gobierno.

Esto hace necesaria la evaluación en el caso de problemas relativos al diseño. los materiales usados o las técnicas de construcción. para evaluar el comportamiento de la obra en proceso o terminada y que pueden manifestarse en un deterioro rápido del pavimento.

ÁRBOL DE PROBLEMAS

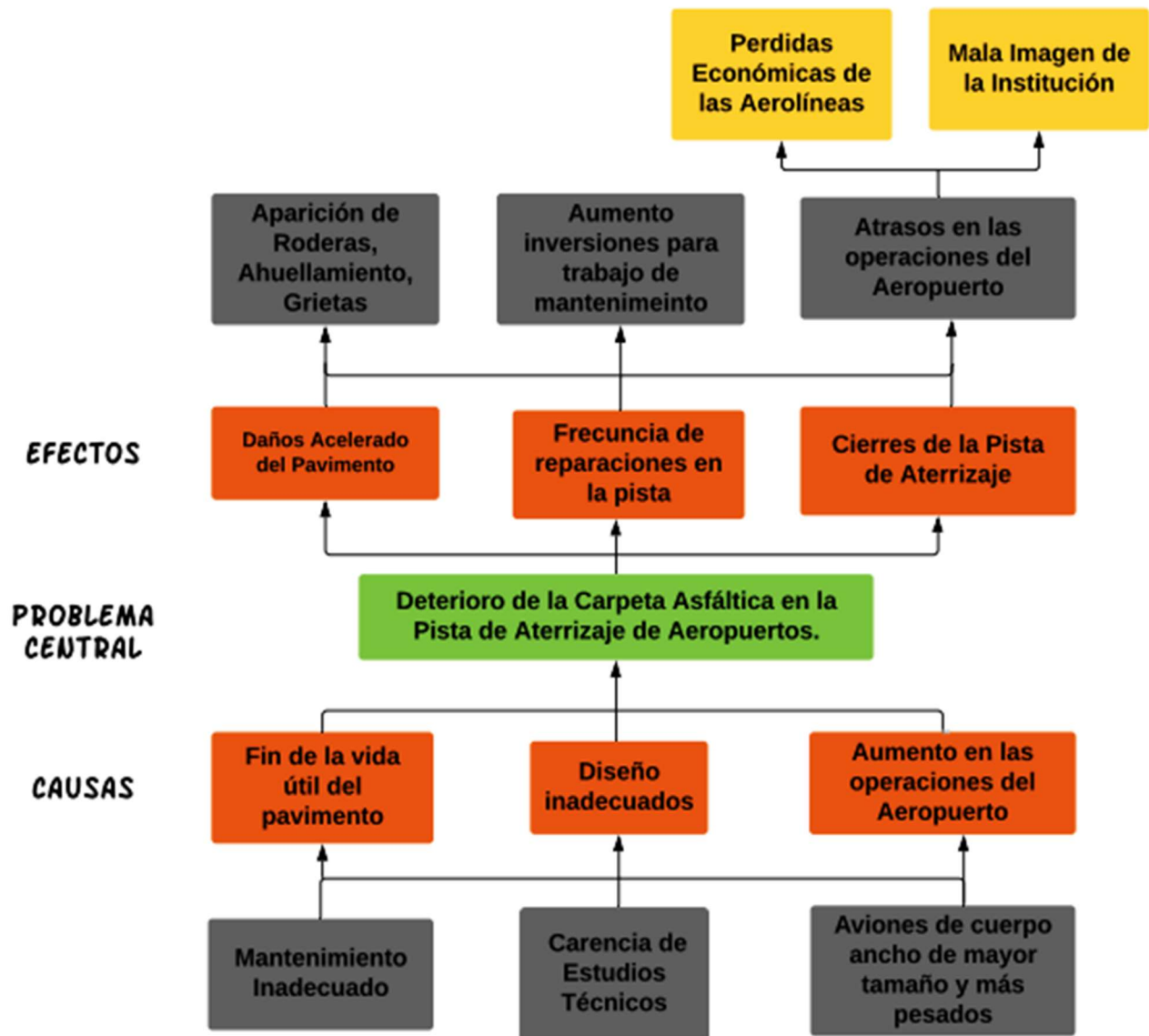


Figura 1: Árbol de Problemas.

1.3. Justificación del Estudio.

En los pavimentos de aeropuertos, a diferencia de los de carreteras, es posible encontrar situaciones estructurales diferentes en longitudes reducidas, correspondientes a distintas etapas de construcción, o ampliaciones por cambios en el tráfico de aeronaves, o debido a la operación de nuevas aeronaves de mayor peso.

Siendo la deformación permanente y los daños por humedad unas de las fallas más preocupantes que generan un deterioro en los pavimentos aeroportuarios, lo cual hace necesario conocer sus causas fundamentales antes de tomar las previsiones del caso en las etapas de elaboración del proyectos, construcción y mantenimiento futuros. Por esto, es primordial que se realicen, diversos ensayos y análisis de campo, los cuales permitan evaluar la estructura del pavimento para minimizar los efectos de la deformación permanente y daños por humedad en los pavimentos aeroportuarios. Esto conduce a la necesidad de utilizar nuevos materiales para el mejoramiento de mezclas asfálticas y que, dependiendo de los resultados del análisis, puedan incluir el uso de modificadores que puedan mejorar las características de los materiales constituyentes de la mezcla asfáltica, con el propósito de incrementar la durabilidad de los pavimentos.

Es importante indicar que modificar el asfalto es mejorar las propiedades mecánicas bajo las condiciones de servicio a las que este estará sometido (temperatura, clima, zona geográfica y tipo de tráfico). De esta manera, se busca diseñar materiales resistentes a los esfuerzos de tensión, corte y a la deformación, generando que los mismos se desempeñen apropiadamente y presenten una mayor vida útil de servicio. Considerando que la modificación de los asfaltos es una práctica cada vez más común (dependiendo del material a utilizar), es de interés identificar si la modificación puede ser realizada mediante el uso de materiales que pueden presentar una reducción del impacto ambiental debido a razones como contaminación o dificultad de desecho.

Hoy no se cuenta con estudios previos de referencia del uso del caucho obtenido de la limpieza de la pista de aterrizaje del aeropuerto, para la incorporación a una mezcla asfáltica mediante la vía seca o húmeda, por lo que este proyecto perfectamente puede servir como inicio para la implementación de nuevos materiales al diseño de mezclas asfálticas para aeropuertos en Costa Rica.

Además este estudio es muy importante para la Dirección general de Aviación Civil específicamente para la Unidad de Infraestructura Aeronáutica y el proceso Mantenimiento de Aeroportuario, ya que permitiría analizar que comportamientos muestran las mezclas asfálticas típicas para aeropuertos con y sin la adición de caucho producto de la limpieza de la pista de aterrizaje del aeropuerto con la finalidad de valorar cual es la mejor alternativa de diseño de mezcla asfáltica que permite contrarrestar los efectos adversos de la deformación permanente.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General.

Comparar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica utilizando caucho obtenido de la limpieza de pista de aterrizaje mediante su incorporación por vía húmeda y con respecto a una mezcla asfáltica convencional.

1.4.2. Objetivos Específicos.

1.4.2.1. Determinar las características volumétricas y mecánicas de los agregados pétreos y de los residuos de caucho de la limpieza de la pista de aterrizaje del aeropuerto mediante ensayos de laboratorio.

1.4.2.2. Realizar los diseños de mezcla con y sin residuos de caucho para analizar el efecto del caucho sobre las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica.

1.4.2.3. Realizar el módulo dinámico para comparar los niveles de rigidez de ambas mezclas ante diferentes condiciones de carga y temperatura mediante ensayos de laboratorio.

1.4.2.4. Evaluar la resistencia a la deformación permanente y daño inducido por humedad con y sin adición de residuo de caucho de la pista de aterrizaje en la mezcla asfáltica mediante ensayos de laboratorio.

1.4.3. Alcance y limitaciones

Alcance:

- Se determino las características volumétricas y mecánicas de los agregados pétreos y de los residuos de caucho de la limpieza de la pista de aterrizaje del aeropuerto de mediante ensayos de laboratorio.
- Se determino los diseños de mezcla con y sin residuos de caucho.
- Se comparo el comportamiento dinámico de las mezclas asfálticas en caliente con y sin residuo de caucho de la limpieza de la pista de aterrizaje del aeropuerto por vía húmeda.
- Se evaluó la resistencia a la deformación permanente y daño inducido por humedad con y sin adición de residuo de caucho de la pista de aterrizaje en la mezcla asfáltica mediante ensayos de laboratorio.
- Únicamente se utilizó el caucho proveniente de la limpieza de la pista de aterrizaje del Aeropuerto.
- El estudio se centró en analizar la deformación y durabilidad y no así la fatiga que da principalmente en las calles de rodaje.
- Se utilizó las Especificación Estándar para la Construcción de Aeropuertos de la FAA (Federal Aviation Administration) documento AC 150/5370-10H Ítem P-401.
- Únicamente se utilizó como fuente de materiales del tajo CDP Río Lagarto. Ubicado en el Distrito: Juntas, Cantón: Abangares, Provincia: Guanacaste.

- No se desarrolló normativa para diseñar asfaltos modificados con caucho para aeropuertos.
- No se utilizó ningún otro aditivo más que el caucho.
- Se utilizó el Método de diseño de Mezclas Asfálticas Marshall.
- Se evaluó daño por humedad de las mezclas asfálticas.

Limitaciones

- Falta de información o registros a nivel nacional sobre análisis del uso de caucho en a aeropuertos.
- Falta de disponibilidad de otro tipo de caucho hace que únicamente se evalúe y compare un solo tipo de caucho.
- Disponer de la cantidad de suficiente de material de caucho para las pruebas de laboratorio.
- Limitación con disponibilidad de personal y cantidad de ensayos de laboratorio.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. Pavimentos Aeroportuarios.

Los pavimentos se deben proyectar, diseñar y construir para prestar servicio en condiciones adecuadas, durante un determinado número de años (período de diseño), vida en servicio (vida útil del pavimento); los que deberán ser atendidos oportunamente ante la presencia de eventuales solicitaciones destructivas (carga y/o repeticiones de la carga superiores a las de diseño) y evitar su salida de servicio en forma parcial o total.

Los pavimentos aeroportuarios son construidos para soportar las cargas impuestas por las aeronaves, así como de proporcionar una superficie adecuada y segura para transitar en cualquier condición meteorológica.

La determinación del espesor del pavimento se basa en el análisis teórico de la distribución de las cargas por los pavimentos y los terrenos de fundación (subrasantes), en el análisis de los datos experimentales relativos al pavimento y en un estudio del comportamiento de los pavimentos, en condiciones de servicio reales. Aun cuando la estructura básica y la función de los pavimentos en aeropuertos es esencialmente la misma, que, en una carretera, existen diferencias significativas entre uno y otro, como, por ejemplo: la anchura, la forma, los pesos totales y la elevada presión que los neumáticos de las ruedas de las aeronaves que la transmiten. Los pavimentos en las pistas también tienen que soportar las vibraciones del período de calentamiento, el escape de los motores de reacción y los impactos del aterrizaje.

Las pistas sufren menos aplicaciones de carga que una carretera de alto tránsito. La disposición de las ruedas y los patrones de carga son diferentes; por lo general, las aeronaves tienen un tren de aterrizaje en triciclo, con una rueda o conjunto de ruedas dirigible. Las cargas se canalizan en la parte media de la pista, y quedan un 80 % de las cargas dentro de 8% más o menos del área pavimentada. Así pues, el esfuerzo se concentra dentro del tercio central del pavimento. (Pavimentos Aeroportuarios, 2013).

En los aeropuertos, al igual que en las carreteras se encuentran 2 tipos de pavimentos (Rígidos y Flexibles), los cuales se han utilizado de acuerdo con los requerimientos de tráfico y a la tecnología disponible.

Los administradores de aeropuertos y los ingenieros de pavimentos en particular deben buscar mejoras continuas en la tecnología de los materiales de manera de reducir el consumo de energía, mejorar el desempeño y conservar el medio ambiente (Barling, 1997).

Para ofrecer un buen nivel de servicio, los pavimentos de los aeropuertos deben cumplir con dos funciones esenciales:

- ✓ Proveer adecuada capacidad de soporte a las aeronaves que los utilizan;
- ✓ Proveer buena calidad de rodaje y seguridad operacional a las aeronaves bajo cualquier condición meteorológica.

2.1.1. Tipos de Estructuras de Pavimento Aeroportuarios.

En proyectos de construcción de estructuras de pavimento se pueden utilizar materiales bituminosos, hidráulicos.

Una sección típica de un pavimento flexible y Rígido de un aeropuerto sería el siguiente:

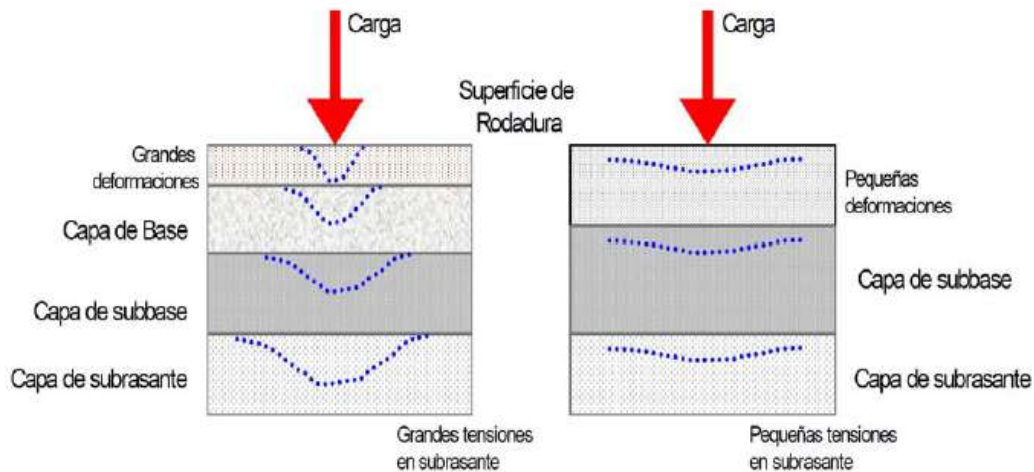


Figura 2: Comportamiento de pavimentos flexibles y rígidos.

Fuente: (Albarracin Cristiano & Pérez Camargo, 2011)

2.1.2. Pavimento Flexible.

La estructura está conformada por capas de rodadura y capas de base. En las capas de rodadura se pueden utilizar capas bituminosas tratadas con ligantes hidráulicos debido a que el tipo de cargas, las bajas velocidades de movilización y operación ocasionan deformaciones permanentes en las capas asfálticas. Las capas que conforman la estructura de Pavimento Flexible.

- **Subrasante:**

Es la capa de terreno sobre la que se soporta la estructura de pavimento y que se extiende hasta una profundidad a la cual no se vea afectada por la carga de diseño que corresponde al tránsito previsto a soportar. Esta capa puede estar conformada en corte o relleno y una vez compactada debe tener las secciones transversales y pendientes especificadas en los planos finales de diseño. Los espesores de cada una de las capas de la estructura de pavimento dependerán en gran parte de la calidad de la subrasante, por lo que ésta debe cumplir con los requisitos de resistencia a la compresión, al corte y a la expansión y contracción por efectos de la humedad, es por esto por lo que el diseño de una estructura de pavimento es principalmente, el ajuste de la carga de diseño transmitida por rueda a la capacidad portante de la subrasante.

- **Subbase:**

Es la capa de la estructura de pavimento destinada fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las cargas aplicadas en la superficie de rodadura de pavimento, de tal manera que la capa de subrasante sea capaz de soportar los esfuerzos generados por dichas cargas, absorbiendo las variaciones inherentes a dicho suelo que puedan afectar a la subbase. Ésta última, debe controlar los cambios volumétricos y de elasticidad que serían desfavorables para el pavimento. Se utiliza además como capa de drenaje y contralor de ascensión capilar del agua, protegiendo así a la estructura de pavimento, por lo que generalmente se usan materiales granulares. Al haber capilaridad en época de heladas, se produce un hinchamiento del agua, causado por el congelamiento, lo que produce fallas en el pavimento, si éste no dispone de una subrasante o subbase adecuada. Esta capa de material se coloca entre la subrasante y la capa de base, sirviendo como material de transición, en los pavimentos flexibles.

- **Base granular:**

Material constituido por agregado grueso de buena calidad, triturada y mezclada con material de relleno seleccionado o bien por una combinación de piedra o grava, con arena y suelo, en su estado natural. Todos estos materiales deben ser clasificados para formar una base integrante de la estructura de pavimento. Su estabilidad dependerá de la graduación de las partículas, su forma, densidad relativa, fricción interna y cohesión y todas estas propiedades dependerán de la proporción de finos con respecto al agregado grueso contenido en la misma.

2.1.3. Pavimento Rígido.

Son pavimentos que hacen parte dentro de los pavimentos rígidos. Estos pavimentos se diferencian bastante de los flexibles; los pavimentos de concreto reciben la carga transmitida por los vehículos y la distribuyen en una superficie de la subrasante.

La losa debido a su alta rigidez y alto módulo elástico tiene un comportamiento estructural similar al de una viga. Ella absorbe prácticamente toda la carga.

Diferentes tipos de Pavimentos Rígidos:

- a) Pavimentos de concreto simple, con juntas sin refuerzo
- b) Pavimentos de concreto simple, reforzado.
- c) Pavimentos de concreto reforzado (refuerzo continuo)
- d) Pavimentos de concreto pre esforzado.
- e) Pavimentos de concreto reforzado con fibras cortas de acero.

Estos tipos de pavimentos tienen un grave inconveniente lo cual hace que se tengan especiales cuidados en el diseño, pero sobre todo en la construcción de estos, son las juntas puesto que se tienen que diseñar y construir para controlar los cambios volumétricos, que se producen debido a cambios de temperatura. Pero hay que notar que en los pavimentos de refuerzo continuo y los pre esforzados, no se tienen en cuenta las juntas transversales de contracción y de expansión exceptuando al llegar a una intersección o a una estructura fija.

Dichos pavimentos están sujetos a los esfuerzos siguientes:

- a) Esfuerzos abrasivos causados por las llantas de los vehículos y las aeronaves.
- b) Esfuerzos directos de compresión y acortamiento debido a las cargastransmitidas por las llantas.

Capas que conforman la estructura de Pavimento Rígido

- Subrasante.
- Subbase o Base Estabilizada.
- Superficie de rodadura.

2.2. Mezclas Asfálticas.

Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total. (Rodríguez, 2004)

Las mezclas asfálticas se emplean en la construcción de pavimentos, ya sea en capas de rodadura o en capas inferiores y su función es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica a los usuarios de las vías de comunicación, facilitando la circulación de los vehículos, aparte de transmitir suficientemente las cargas debidas al tráfico a la explanada para que sean soportadas por ésta. Se tienen que considerar dos aspectos fundamentales en el diseño y proyecto de un firme:

1. La función resistente, que determina los materiales y los espesores de las capas que habremos de emplear en su construcción.
2. La finalidad, que determina las condiciones de textura y acabado que se deben exigir a las capas superiores del firme, para que resulten seguras y confortables. A estas capas superiores se le denomina pavimento.

2.2.1. Funcionalidad de las Mezclas Asfálticas.

Las mezclas asfálticas sirven para soportar directamente las acciones de los neumáticos y transmitir las cargas a las capas inferiores, proporcionando unas condiciones adecuadas de rodadura, cuando se emplean en capas superficiales; y como material con resistencia simplemente estructural o mecánica en las demás capas de los pavimentos.

Como material simplemente estructural se pueden caracterizar de varias formas. La evaluación de parte de sus propiedades por la cohesión y el rozamiento interno es comúnmente utilizada; o por un módulo de rigidez longitudinal y un módulo transversal, o incluso por un valor de estabilidad y de deformación. Como en otros materiales hay que considerar también, la resistencia a la rotura, las leyes de fatiga y las deformaciones plásticas.

El comportamiento de la mezcla depende de circunstancias externas a ellas mismas, tales como son el tiempo de aplicación de la carga y de la temperatura. Por esta causa su caracterización y propiedades tienen que estar vinculadas a estos factores, temperatura y duración de la carga, lo que implica la necesidad del conocimiento de la reología del material.

Las cualidades funcionales del Pavimento residen fundamentalmente en su superficie. De su acabado y de los materiales que se hayan empleado en su construcción estos dependen en aspectos tan interesantes y preocupantes para los usuarios como:

1. La adherencia del neumático al firme.
2. Las proyecciones de agua en tiempo de lluvia.
3. El desgaste de los neumáticos.
4. Las cargas dinámicas del tráfico.
5. La resistencia a la rodadura.

Estos aspectos funcionales del firme están principalmente asociados con la textura y la regularidad superficial del pavimento. Actualmente la reología de las mezclas está bien estudiada tanto desde el punto de vista experimental como del teórico, con una consecuencia práctica inmediata: la mejor adaptación de las fórmulas de trabajo y de los materiales a las condiciones reales de cada pavimento.

Por ejemplo, son fácilmente accesibles estos ajustes, según la región climática o las condiciones de velocidad, en los métodos de diseño de pavimentos.

Como resumen, se puede decir que, en una mezcla asfáltica, en general, hay que optimizar las propiedades siguientes:

- ✓ Estabilidad.
- ✓ Durabilidad.
- ✓ Resistencia a la fatiga.

Si la mezcla se usa como capa de rodadura hay que añadir las propiedades siguientes:

- ✓ Resistencia al deslizamiento.
- ✓ Regularidad.
- ✓ Permeabilidad adecuada.

2.2.2. Propiedades de las mezclas asfálticas para capas de rodadura.

La capa superior de un pavimento es la que debe proporcionar una superficie de rodadura segura, confortable y estética. Como todas las exigencias deseables para una superficie de rodadura no pueden optimizarse simultáneamente hay que equilibrar las propiedades contrapuestas para llegar a las soluciones más satisfactorias. Los materiales asfálticos proporcionan superficies continuas y cómodas para la rodadura de los vehículos. No obstante, hay que establecer un balance entre la durabilidad, rugosidad, impermeabilidad, y otras características útiles o imprescindibles para el usuario.

Se han realizado diversos estudios para mejorar las condiciones de las mezclas asfálticas entre esos se encuentran los asfaltos modificados con Polímeros los cuales brindan mayor rigidez a altas temperaturas de servicio reduciendo el ahuecamiento, también se obtienen mezclas más flexibles a bajas temperaturas de servicio reduciendo el fisuramiento, pero también tiene sus desventajas como alto costo del polímero, dificultades del mezclado: no todos los polímeros son compatibles con el asfalto base (existen aditivos correctores).

Si bien los asfaltos convencionales destinados a la construcción vial han demostrado ser satisfactorios en un rango considerablemente amplio de aplicaciones, clima y tránsito, bajo determinadas condiciones, sus respuestas son limitadas.

Mayores velocidades de circulación del tránsito, asociado al frenado, acelerado y desacelerado, aumento del parque automotor, empleo de bases hidráulicas en las capas inferiores de los pavimentos, capas de rodamiento delgadas y ultradelgadas, son algunos de los factores y técnicas constructivas que demandan modificar los asfaltos convencionales para adaptarlos a cada requerimiento específico.

Se deduce que cuando se recurre a la modificación de los asfaltos, se busca mejorar propiedades que luego contribuirán en mejoras para las propiedades de las mezclas asfálticas. Entre los objetivos más buscados por la modificación se cuentan, la disminución de la susceptibilidad térmica del asfalto mejorando su comportamiento reológico y mecánico, el aumento de la adhesividad tanto activa como pasiva, la resistencia al envejecimiento por ende una mayor durabilidad y un mayor aporte a la cohesividad de las mezclas.

Existen una gran cantidad de modificadores de los asfaltos, entre estos modificadores pueden citarse el polvo de neumáticos, los mejoradores de susceptibilidad térmica y los polímeros sintéticos.

Los ensayos contemplados en las especificaciones de los asfaltos convencionales no son suficientes para caracterizar a los modificados, siendo necesario introducir ensayos que permitan evaluar sus propiedades diferenciadas. Entre otros son aplicables a asfaltos modificados la compatibilidad asfalto polímero, la estabilidad al almacenaje, las propiedades mecánicas y elásticas y el comportamiento con relación al envejecimiento del asfalto modificado.

2.2.3. Clasificación de las Mezclas Asfálticas

Existen varios parámetros de clasificación para establecer las diferencias entre las distintas mezclas y las clasificaciones pueden ser diversas (Marrugo Baena & Orozco Lora, 2015):

- a) Por Fracciones de agregado pétreo empleado.
 - ✓ Masilla asfáltica
 - ✓ Concreto asfáltico
 - ✓ Macadam asfáltico
- b) Por la Temperatura de puesta en obra
 - ✓ Mezclas asfálticas en Caliente
 - ✓ Mezclas asfálticas en Frío.
- c) Por la proporción de Vacíos en la mezcla asfáltica
 - ✓ Mezclas Cerradas o Densas
 - ✓ Mezclas Semi-cerradas o Semi-densas
 - ✓ Mezclas Abiertas
 - ✓ Mezclas Porosas o Drenantes

d) Por el Tamaño máximo del agregado pétreo.

- ✓ Mezclas Gruesas
- ✓ Mezclas Finas

e) Por la Estructura del agregado pétreo.

- ✓ Mezclas con Esqueleto mineral
- ✓ Mezclas sin Esqueleto mineral

f) Por la Granulometría.

- ✓ Mezclas Continuas
- ✓ Mezclas Discontinuas

2.3. Ligantes asfálticos.

La más importante característica del ligante asfáltico, muchas veces una ventaja, y en otras veces una desventaja, es su susceptibilidad térmica. Otro aspecto que influye de manera determinante en el comportamiento del ligante es el tiempo de aplicación de la carga. Como el comportamiento del cemento asfáltico es dependiente de la temperatura y de la duración del tiempo de aplicación de la carga (Figura 3), ambos factores pueden intercambiarse. Es decir, una baja velocidad de carga puede simularse con temperaturas elevadas, y una alta velocidad de carga puede simularse con bajas temperaturas. Por ello, los ensayos de caracterización de los cementos asfálticos deben especificar la temperatura y la velocidad de aplicación de carga, para que los resultados del ensayo sean efectivos.



Figura 3: Dependencia tiempo- Temperatura del cemento Asfáltico.

Fuente: (Garnica Anguas, Delgado Alamilla, & Sandoval Sandoval, Análisis de varianza del efecto de algunos factores que influyen en la deformación permanente de mezclas asfálticas, 2005)

El cemento asfáltico es un material viscoelástico por que exhibe simultáneamente características viscosas. A altas temperaturas (mayor a 100°C), el cemento asfáltico actúa casi como fluido viscoso, y a muy baja temperatura (menor a 0°C) se comporta como un sólido elástico. A una temperatura intermedia, que es la condición prevista en el pavimento, el cemento asfáltico tiene características de ambos estados, un fluido viscoso y un sólido elástico (Figura 4).

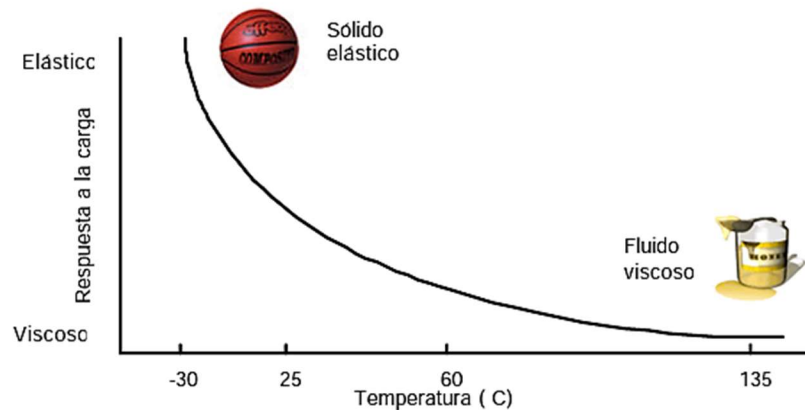


Figura 4: Comportamiento viscoelástico del asfalto.

Fuente: (Garnica Anguas, Delgado Alamilla, & Sandoval Sandoval, Análisis de varianza del efecto de algunos factores que influyen en la deformación permanente de mezclas asfálticas, 2005)

Al estar compuesto de moléculas orgánicas, el cemento asfáltico reacciona con el oxígeno del medio ambiente. Esta reacción se denomina “oxidación”, y cambia la composición y la estructura de las moléculas de asfalto, haciendo más dura y frágil la estructura del asfalto dando origen al “endurecimiento por envejecimiento”. La oxidación se produce más rápidamente a altas temperaturas; es por ello por lo que parte del endurecimiento ocurre durante el proceso de producción, cuando es necesario calentar la mezcla asfáltica para permitir la elaboración, mezclado y compactación. Este es también el motivo por el cual la oxidación es más crítica en cementos asfálticos utilizados en pavimentos en climas cálidos y desérticos. Los ligantes asfálticos modificados son productos concebidos para superar las propiedades del asfalto original, mejorando el desempeño de la carpeta asfáltica a largo plazo. Si bien los modificadores pueden afectar muchas propiedades; la mayoría de ellos intenta reducir la dependencia con la temperatura, el endurecimiento por oxidación del cemento asfáltico, y la susceptibilidad a la humedad de la mezcla.

Es por esto por lo que principal objetivo del diseño de la mezcla asfáltica es determinar la proporción óptima de los componentes (asfalto, agregado, aire, aditivos) que garanticen el mejor desempeño de ésta durante el período de diseño de una estructura de pavimento flexible. La mejor selección de estas proporciones debe garantizar lo siguiente:

- Suficiente ligante para garantizar una adecuada resistencia al agrietamiento por fatiga y durabilidad (resistencia al daño por humedad).
- Suficiente estabilidad y rigidez de la mezcla, para resistir las deformaciones debidas al tránsito.
- Suficientes vacíos de aire que facilitan la densificación de la mezcla por cargas de tránsito, sin que se presenten exudaciones o pérdidas de estabilidad (flujo plástico). Así mismo, un porcentaje de vacíos adecuado para prevenir el ingreso de agua y aire a la mezcla (resistencia al envejecimiento y al daño por humedad).

- Suficiente trabajabilidad que garantice la eficiente colocación de la mezcla sin segregación y consumo tolerable de energía de densificación.
- Suficiente resistencia al deslizamiento y bajo nivel de ruido, si la mezcla va a ser usada como capa de rodadura. El primer paso es la selección del tipo de ligante asfáltico a emplearse, en función de los criterios de temperatura superior a inferior del sistema de Grado de Desempeño (PG) para ligantes. Este se basa en el concepto de que un ligante, para tener un comportamiento satisfactorio durante el proceso constructivo y a lo largo de su vida de servicio, debe cumplir con una serie de propiedades físicas (rigidez y elasticidad) bajo condiciones críticas de temperatura y envejecimiento a las que se verá sometido.

La selección del tipo de ligante asfáltico a emplearse, en función de los criterios de temperatura superior a inferior del sistema de Grado de Desempeño (PG) para ligantes. Este se basa en el concepto de que un ligante, para tener un comportamiento satisfactorio durante el proceso constructivo y a lo largo de su vida de servicio, debe cumplir con una serie de propiedades físicas (rigidez y elasticidad) bajo condiciones críticas de temperatura, velocidad de carga y envejecimiento a las que se verá sometido.

2.4. Mezclas Asfálticas para Aeropuertos tipo P-401.

La mezcla asfáltica tipo P-401, es una mezcla creada por la Administración Federal de Aviación (FAA, por sus siglas en inglés) para la construcción de Aeropuertos. A continuación, se mostrarán los parámetros fijados por la Administración Federal de Aviación (FAA), en su circular AC No: 150/5370-10H, cuyo propósito es establecer los estándares para la construcción de aeropuertos, más específicamente en el Parte 6, el cual trata de los Pavimentos flexibles, Ítem P-401 Pavimento de mezcla asfáltica. (ver anexo 1).

2.4.1. Materiales.

2.4.1.1. Agregado.

El Agregado consistirá en piedra fracturada, grava triturada, escoria machacada, tamizada, filler de arena y mineral natural, según sea necesario. Los agregados deben estar libres de sulfuros, de metales ferrosos, tales como piritas, que causarían "moho" coloración que puede dejar marcas en el pavimento. La porción retenida en el tamiz N°4 (4,75 mm) es agregado grueso. La porción pasando por el tamiz N°4 (4,75 mm) y retenido en el tamiz N°200 (0,075 mm) es árido fino, y la porción pasando por el tamiz N°200 (0,075 mm) es relleno mineral.

El agregado grueso: El agregado grueso consistirá en partículas resistentes, durables, libre de películas de materiales que impidan recubrimiento completo y la unión con el material bituminoso y libre de materia orgánica y otras sustancias nocivas. El porcentaje de desgaste no será mayor del 40% cuando se ensaya de acuerdo con la ASTM C131. La pérdida de dureza por sulfato de sodio no deberá superar el 12%, o la pérdida de dureza por sulfato de magnesio no excederá del 18%, después de cinco ciclos, cuando se ensaya de acuerdo con la ASTM C88. Terrones de arcilla y partículas deleznales no excederán de 1,0% cuando se prueba de acuerdo con la ASTM C142.

El agregado fino: El Agregado fino deberá estar limpio, durable, de formas angulares producidas por la trituración de piedra, escoria, o grava que cumpla con los requisitos para el uso especificados para agregado grueso. Las partículas de agregado deberán estar libres de revestimientos de arcilla, limo, u otros materiales.

El agregado fino, incluyendo cualquier material mezclado para el agregado fino, tendrá un índice de plasticidad de no más de seis (6) y un límite líquido de no más de 25 años cuando se ensaya de acuerdo con la ASTM D4318.

La pérdida de dureza no superará el 10% cuando se utiliza sulfato de sodio o 15% cuando se utiliza sulfato de magnesio, después de cinco ciclos, cuando se prueba según la norma ASTM C88.

Los terrones de arcilla y partículas deleznable no excederán de 1,0%, en peso, cuando se prueba de acuerdo con ASTM C142.

2.4.1.2. Filler mineral.

Si el filler se presenta de forma natural en el agregado, deberá cumplir con los requisitos de la norma ASTM D242.

2.4.1.3. Aglutinante de cemento asfáltico.

Aglutinante de cemento asfáltico deberá cumplir con la norma ASTM D6373 Grado Rendimiento (PG).

2.4.1.4. Composición de la mezcla.

La mezcla se compone de agregado con una buena granulometría, filler, agente anti - tira, si es necesario, y ligante asfáltico. Las diversas fracciones de agregados deberán ser de diferente tamaño, se maneja en grupos de tamaños diferentes, y se combinan en proporciones tales que la mezcla resultante cumple con los requisitos de clasificación de la fórmula de mezcla del trabajo.

Cuadro 1: Criterio de Diseño Marshall.

Ensayo	Pavimentos Diseñados para Aeronaves que pesan 60.000 libras (27.216 kg) o más o presiones de neumáticos 100 psi o más	Pavimentos Diseñados para Aeronaves de peso bruto inferior a 60.000 libras (27.216 kg) o presión de los neumáticos a menos de 100 psi
Número de golpes	75	50
Estabilidad, libras (Newtons) Mínimo	2150 (9560)	1350 (6000)
Flujo ¹ , 0.01 inch. (0.25 mm)	10-16	10-18
Vacios de aire	3.5	3.5
Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (mínimo)	Ver Tabla 4	Ver Tabla 4

Fuente: (FAA, Especificaciones Estándar para la construcción de aeropuertos, 2018)

Cuadro 2: Criterios de Diseños Giratorios

Test Property	Pavimentos Diseñados para Aeronaves que pesan 60.000 libras (27.216 kg) o más o presiones de neumáticos 100 psi o más	Pavimentos Diseñados para Aeronaves de peso bruto inferior a 60.000 libras (27.216 kg) o presión de los neumáticos a menos de 100
Número de giros compactador	75	50
vacíos de aire (%)	3.5	3.5
vacíos en el agregado Mineral (%) (mínimo)	Ver tabla 5	Ver Tabla 5

Fuente: (FAA, Especificaciones Estándar para la construcción de aeropuertos, 2018)

Cuadro 3: Criterios de Diseños Giratorios

Agregado (ver Tabla 3)	Mínimo VMA
Gradación 3	16%
Gradación 2	15%
Gradación 1	14%

Fuente: (FAA, Especificaciones Estándar para la construcción de aeropuertos, 2018)

Cuadro 4: Agregado de la Mezcla Asfáltica

Dimensión del Tamiz	Porcentaje en peso pasando de tamices		
	Gradación 1	Gradación 2	Gradación 3
1 inch (25 mm)	100	--	--
3/4 inch (19 mm)	76-98	100	--
1/2 inch (12 mm)	66-86	79-99	100
3/8 inch (9 mm)	57-77	68-88	79-99
No. 4 (4.75 mm)	40-60	48-68	58-78
No. 8 (2.36 mm)	26-46	33-53	39-59
No. 16 (1.18 mm)	17-37	20-40	26-46
No. 30 (0.600 mm)	11-27	14-30	19-35
No. 50 (0.300 mm)	7-19	9-21	12-24
No. 100 (0.150 mm)	6-16	6-16	7-17
No. 200 (0.075 mm)	3-6	3-6	3-6
Porcentaje de Asfalto			
Piedra o Grava	4.5-7.0	5.0-7.5	5.5-8.0
Escoria	5.0-7.5	6.5-9.5	7.0-10.5

Fuente: (FAA, Especificaciones Estándar para la construcción de aeropuertos, 2018)

2.4.1.5. Limitaciones climáticas.

La mezcla no debe colocarse sobre una superficie mojada o cuando la temperatura de la superficie subyacente es menor que la especificada en la Tabla 5. Los requisitos de temperatura pueden ser suspendidos por el Ingeniero, si así lo solicita; Sin embargo, se deberán cumplir todos los demás requisitos, incluyendo la compactación.

Cuadro 5: Limitaciones de temperatura de la capa subyacente.

Espesor del Material	Base Temperatura (Mínimo)	
	°F	°C
3 pulgadas (7,5 cm) o superior	40	4
Mayor de 2 pulgadas (50 mm) pero menos de 3 pulgadas (7,5 cm)	45	7

Fuente: (FAA, Especificaciones Estándar para la construcción de aeropuertos, 2018)

Cuadro 6: Propiedades Volumétricas Diseño Marshall

Propiedad	Pavimentos Diseñados para Aeronaves que pesan 60.000 libras (27.216 kg) o más o presiones de neumáticos 100 psi o más		Pavimentos Diseñados para Aeronaves de peso bruto inferior a 60.000 libras (27.216 kg) o presión de los neumáticos a menos de 100 psi	
Numero de Golpes	75 golpes		50 golpes	
	Especificación -Tolerancia		Especificación -Tolerancia	
	L	U	L	U
Estabilidad, Mínima (lbs)	1800	--	1000	--
Flujo, 0.01-in	8	18*	8	20*
Total de Vacíos de Aire en la Mezcla (%)	2	5	2	5
Surface Course Mat Density (%)	96.3	[101.3]	96.3	[101.3]
Joint density (%)	93.3	--	93.3	--

Fuente: (FAA, Especificaciones Estándar para la construcción de aeropuertos, 2018)

2.5. Generalidades de los asfaltos modificados en Costa Rica.

En el caso de Costa Rica el uso de modificantes de asfalto se caracteriza por ser una alternativa reciente, no existen empresas formales en torno a la fabricación de asfaltos modificados por lo que las empresas constructoras y la administración del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) se han visto en la necesidad de implementar procesos de modificación en planta de producción de Mezcla Asfáltica en Caliente (MAC). (Elizondo Arrieta, Salazar Delgado, & Villegas Villegas, 2010).

Existen modificantes provenientes de los productos industrializados como es el caucho y el plástico que podrían hacer parte constitutiva de la estructura de un pavimento al dar a las mezclas asfálticas un mejor

comportamiento mecánico y por ende una mayor duración de vida. Se debe ser conscientes que se vive en la cultura del usar y tirar, y en la basura de cada día, están los recursos que dentro de poco tiempo harán falta. Se trata, en definitiva, de que se ponga en práctica la consigna de las tres erres, reducir, reutilizar y reciclar, en este orden de importancia. (Reyes Lizcano, Madrid Ahumada, & Salas Callejas, 2007).

Es importante tomar en cuenta que los asfaltos modificados son producto de la incorporación en el asfalto de un polímero. Esto se hace con el fin de modificar sus propiedades físicas y reológicas para disminuir su susceptibilidad a la temperatura, humedad y oxidación e incrementar la adherencia con el material pétreo. Aumentar la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación y esfuerzos de tensión repetidos.

2.6. Tipos de polímeros para la modificación de los Asfaltos.

Existen polímeros utilizados en la modificación de los asfaltos como lo son: Elastómeros y los Plastómeros.

- **Elastómeros:** Son polímeros de respuesta elástica (caucho, SBS, SBR, Isopreno).
- **Plastómeros:** Rigidizan el asfalto ofreciendo resistencia, como consecuencia no son deformables elásticamente (PVC, EVA).

Para el presente trabajo de investigación se utilizó el polímero tipo elastómero como el caso del caucho.

2.6.1. Asfaltos modificados con polímeros tipo elastómeros:

Se requiere mezclar tres componentes: asfalto, resina base y un endurecedor, lo que complica la modificación ya que debe existir compatibilidad entre estos. Los asfaltos modificados tienen una elevada resistencia mecánica, gran resistencia a la tracción, buen poder humectante y adhesión a los agregados. Si el trabajo con este tipo de asfalto es realizado dentro de los parámetros correctos, su tiempo de vida está condicionado por la vida del agregado, no por el asfalto; en otras palabras, el pavimento se deteriora por trituración o abrasión del agregado antes que por la falla del ligante (asfalto). Su resistencia al envejecimiento es excelente.

Son empleados para casos específicos como:

- ✓ Zonas de frenado intenso, donde se requiere una gran resistencia al derrapaje.
- ✓ Zonas donde se requiere resistir a las maniobras o a los agentes químicos.
- ✓ Zonas donde se requiere mantener una buena rugosidad durante largos periodos de tiempo.

2.6.2. Asfaltos modificados con polímeros tipo plastómeros:

Debido a la forma en que estos polímeros se incorporan al asfalto aumentan de forma considerable su viscosidad, incluso en bajas dosificaciones. Si se aumenta la concentración del polímero, se llega a un punto en el cual la mayoría de los aceites están asociados con el polímero y se produce un cambio drástico en las propiedades físicas del asfalto. Estas se acercan más a las propiedades del polímero que a las del asfalto. Esto sucede cuando el contenido del polímero va de 8 – 10%, en este punto, el asfalto aumenta el intervalo de plasticidad, aumenta la resistencia a la ruptura, disminuye su sensibilidad térmica sobre todo en el intervalo de temperaturas de aplicación.

Los asfaltos modificados con este tipo de polímero termoplástico cuando son añadidos en bajas proporciones poseen las siguientes propiedades:

- ✓ Buena resistencia al calor.
- ✓ Buena resistencia al envejecimiento.
- ✓ Baja viscosidad.
- ✓ La resistencia Marshall aumenta de 2 a 2.5 veces a 25°C mientras que a 0°C y -2.5°C es prácticamente igual a la de un asfalto convencional.
- ✓ Buena flexibilidad a baja temperatura.
- ✓ Cuando es utilizado en concentraciones de 7% aumenta la rigidez del asfalto a temperaturas elevadas.
- ✓ Buena resistencia a deformaciones permanentes.

Como se ha visto mucha de la experiencia que tiene en nuestro país en asfaltos modificados es a través sus aplicaciones en carreteras. De ahí nace la obligación de incorporar estas técnicas a las mezclas asfálticas en los Aeropuertos del país.

El caucho proveniente de los neumáticos desechados puede ser incorporado en las mezclas asfálticas por medio de tres métodos diferentes denominados: proceso por Vía Húmeda, proceso por Vía Seca.

2.6.3. Métodos de adición de residuo de caucho reciclado en las mezclas asfálticas.

La implementación del Grano de Caucho Reciclado a los pavimentos trae beneficios físico-mecánicos; sin embargo, hay dos vías por las cuales se adiciona. Las características que adquiere el pavimento varían según el modo por el cual se va a adicionar al pavimento.

- **Mezcla asfáltica con la adición de residuo de caucho por Vía Seca.**

El proceso seco implica la mezcla del grano de caucho reciclado con agregados antes de agregar el cemento asfáltico a la mezcla. A diferencia del proceso húmedo, este tipo de mezcla tiene grandes inconvenientes técnicos. La falta de estándares de calidad y del rendimiento inconsistente ha dado como resultado la desconfianza para los investigadores y profesionales en aceptar este tipo de modificación, por lo cual se inclinan por el proceso por vía húmeda, a pesar de que tiene el potencial para reciclar más polvo de GCR (Grano de Caucho Reciclado). (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).



Figura 5: Descripción del proceso por vía seca.
Fuente: (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).

En este proceso de aplicación como se observa en la Figura 5, se encuentra el GCR sustituyendo una parte muy pequeña de los agregados (entre el uno (1) y el tres (3) porciento del peso total de los agregados). Esta aplicación ocurre en el momento antes de agregar el cemento asfáltico en la mezcla, justo cuando los agregados alcanzan una temperatura específica. En este proceso de aplicación no se necesita ningún equipo especial para poder realizar la mezcla ya que el GCR entra a mezclarse con los agregados de manera directa. En algunos casos las partes más diminutas del GCR entran a modificar el cemento asfáltico

- **Mezcla asfáltica con la adición de residuo de caucho por Vía Húmeda.**

Esta tecnología genera un producto conocido como “Asfalto modificado con caucho” o “Asfalto-Caucho”. Este proceso de modificación aumenta la viscosidad del cemento asfáltico dándole unas características particulares. La plasticidad de esta mezcla disminuye en temperaturas altas, lo cual es un punto a favor para evitar fenómenos como el ahuellamiento. Además, en bajas temperaturas, la flexibilidad de esta mezcla aumenta, esto traduce un mejor comportamiento ante problemas de posible fisuración.

En este proceso hay que tener varios factores en cuenta que son decisivos en el resultado esperado de esta mezcla “asfalto-caucho”. Estos factores son, el tamaño, la textura y la proporción del GCR, el tipo del cemento asfáltico, el tiempo y la temperatura de mezclado, el grado de agitación mecánica durante la reacción de la mezcla (GCR con el cemento asfáltico), el componente aromático del cemento asfáltico y el uso de otros aditivos.



Figura 6: Descripción del proceso por vía húmeda.
Fuente: (Díaz Claros & Castro Celis, 2017)

En la Figura 6 se describe este proceso que es conocido también como proceso McDonald y específicamente consta de un tanque donde se mezcla el betón (cemento asfáltico) con el GCR con una serie de tornillos sin fin para asegurar la circulación de la mezcla para que haya una reacción óptima entre estos dos materiales durante un periodo suficiente (por lo general este periodo está entre los 45 y 60 minutos), paralelo a esto se calientan los agregados pétreos (4 y 5) para una mezcla posterior con el cemento asfáltico modificado (6) y poder así ser transportado al lugar de construcción (7). En este transporte se debe mantener una temperatura específica que va desde los 160°C a los 190°C, para evitar problemas de manejabilidad del material en el campo y pérdidas de propiedades mecánicas.

2.7. Deformación permanente en mezclas asfálticas.

El asfalto es un material que puede ser considerado elástico – lineal a temperaturas bajas y frecuencias de carga altas, pero muestra propiedades viscosas y plásticas a temperaturas mayores. Debido a este comportamiento, las cargas repetidas generan deformaciones permanentes en las capas asfálticas, especialmente durante el periodo de verano. El comportamiento de las mezclas asfálticas con respecto a las deformaciones permanentes depende fuertemente del tipo de ligante utilizado, así como de la composición de la mezcla, forma y tamaño de las partículas, calidad de los agregados y aditivos, cuando éstos son empleados.

La temperatura del asfalto es un factor que afecta fuertemente a la deformación permanente. No sólo las temperaturas máximas, sino también los gradientes de temperatura pueden tener una influencia sobre la deformación permanente. La temperatura máxima, así como el gradiente de temperatura pueden ser cambiados por la conductividad térmica de la mezcla, así como la reflectividad, por medio de la selección del agregado.

La sección de pavimento y la velocidad también pueden afectar la deformación permanente. La distribución lateral de la zona de rodadas está influenciada por la velocidad, ancho de la sección y la profundidad de las roderas. Las velocidades bajas, las cuales corresponden a frecuencias de carga más bajas, también contribuyen directamente al desarrollo de deformaciones permanentes en las capas bituminosas.

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

La deformación permanente se caracteriza por una sección de superficie cruzada que ya no se encuentra en su posición de diseño. Se le llama permanente porque representa una acumulación de pequeñas cantidades de deformación irrecuperable que ocurre cada vez que se le aplica la carga. Existen dos principales tipos de roderas: roderas por fallas en la subrasante y roderas por fallas en la capa de asfalto.

2.7.1. Roderas por fallas en la subrasante.

La deformación se produce por la aplicación repetida de carga a la subrasante, la subbase, o la base por debajo de la carpeta asfáltica (figura 7), y aunque el empleo de materiales más rígidos reduce parcialmente este tipo de deformación, el fenómeno normalmente se considera más como un problema estructural de materiales.

Frecuentemente es el resultado de una sección de pavimento demasiado delgada, y sin la suficiente profundidad para reducir a niveles tolerables la tensión sobre la subrasante cuando las cargas se aplican. Podría ser también producto de una subrasante debilitada por el ingreso inesperado de humedad.



Figura 7: Deformación permanente debido a una capa subyacente débil.
Fuente: Instituto Mexicano de Transporte

2.7.2. Roderas por fallas en la capa de asfalto.

Cuando una mezcla asfáltica presenta roderas, es evidente que su resistencia al corte es demasiado baja para resistir las cargas pesadas repetidas a las que está sujeta (Figura 8). La deformación por corte se caracteriza por un movimiento de la mezcla hacia abajo y lateralmente. Las superficies de rodamiento que presentan este tipo de problema representan un peligro para el usuario, ya que los surcos que se forman retienen suficiente agua como para provocar hidro planeo o acumulación de hielo.



Figura 8: Deformación permanente debido a una mezcla asfáltica débil.
Fuente: Instituto Mexicano de Transporte.

2.8. Ensayos de desempeño de mezclas asfálticas a utilizar en presente trabajo de investigación.

2.8.1. Ensayo del Analizador de pavimentos asfálticos (APA).

El Analizador de Pavimentos Asfálticos – Simulador de Pavimentos APA permite evaluar la deformación permanente y la susceptibilidad a la humedad de las mezclas asfálticas. La sensibilidad de las muestras a la deformación permanente se estima bajo cargas de ruedas metálicas, las cuales son soportadas por cauchos estandarizados, además de esto, cuenta con cámara de temperatura controlada. Las medidas automáticas se obtienen mediante sensores, que determinan la profundidad de la huella de la rueda en cada ciclo. Este equipo es perfecto para evaluar en qué medida la mezcla asfáltica tiende a resistir la deformación permanente. (figura 7). De acuerdo con la Norma AASHTO T 340.



Figura 9: Analizador de pavimentos asfálticos (APA).
Fuente: (Lanamme, 2019)

- **Especificaciones Técnicas de acuerdo con la Circular de Asesoramiento 150/5370-10H, Parte 6 Pavimento Flexible, Ítem P-401 Pavimento de mezcla de asfalto de la FAA.**

Con la muestra de mezcla asfáltica en caliente se moldearon especímenes cilíndricos de 150 mm de diámetro y 75 mm (± 2 mm) de altura posterior a un proceso de acondicionado de 4 h (± 5 m) a una temperatura de 135 °C (± 3 °C). Para finalizar se acondicionó los especímenes a 60 °C (mín. 6 h) y se procedió a llevar el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA) a la temperatura de ensayo y se aplicó una presión de 100 psi a las mangueras. Se programaron 8000 ciclos de carga, donde se registró automáticamente la deformación en dos puntos por espécimen. Al momento de finalizar los ciclos de ensayo se reportó la deformación plástica en cada punto (conformado por dos especímenes) y el promedio general de los 6 especímenes de acuerdo con la Norma AASHTO T-340. EL valor debe ser menor a 5 mm @ 8000 ciclos de carga.

2.8.2. Ensayo del efecto de la humedad a la tensión diametral (TSR).

Este método de ensayo determina la pérdida de resistencia de las mezclas asfálticas, consiste en aplicar una carga de compresión a lo largo de los ejes diametrales del espécimen cilíndrico sometidos a distintos acondicionamientos. La magnitud de la carga es aplicada a una velocidad de deformación constante de 50,8 mm por minuto hasta la falla. La carga se aplica por medio de las muelas Lottman, debido a la forma cilíndrica de los especímenes; la carga de compresión se transforma en un esfuerzo de tensión. Durante el ensayo, la carga máxima es registrada hasta que ocurre la falla del espécimen. La resistencia retenida a la tensión es la relación de esfuerzos de los especímenes acondicionados entre los especímenes secos la cual determina qué tan resistente es la mezcla al daño por acción del agua. De acuerdo con la Norma AASHTO T 283.



Figura 10: Ensayo del efecto de la humedad a la tensión diametral

Fuente: (Lanamme, 2019)

- **Especificaciones Técnicas de acuerdo con la Circular de Asesoramiento 150/5370-10H, Parte 6 Pavimento Flexible, Ítem P-401 Pavimento de mezcla de asfalto de la FAA.**

El ensayo de evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas compactadas, utilizando la prueba de tracción indirecta (TSR) Este método cubre la preparación de especímenes de ensayo y la medición del cambio en la resistencia a la tensión diametral, como resultado de los efectos de la saturación de agua y un acondicionamiento acelerado en un baño de agua, de mezclas asfálticas compactadas. EL valor debe ser no menor a 80 a una saturación de 70-80%.

2.8.3. Módulo dinámico.

Este método de ensayo cubre los procedimientos para determinar los valores del módulo dinámico. El procedimiento cubre un amplio intervalo tanto de temperatura como de frecuencias de carga. La serie de ensayos mínima recomendada incluye temperaturas de 4,4 °C, 21,1 °C, 37,8 °C y 54,4 °C y frecuencias de cargas de 0,1; 0,5; 1; 5; 10 y 25 Hz para cada temperatura. De acuerdo con la Norma AASHTO T 342.



Figura 11: Módulo dinámico en mezclas asfálticas.

Fuente: (Lanamme, 2019).

CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO.

3.1. Tipo de Investigación.

El proyecto se basa en una investigación que incluye revisión literaria y ensayos de laboratorio para obtener la variación y propiedades volumétricas, desempeño mecánico del material de caucho para su aplicación en mezclas asfálticas para los pavimentos de los aeropuertos, es un proyecto que se considera desde un enfoque mixto, ya que desde punto de vista cuantitativo se da una recolección de información y los resultados de laboratorio, sin embargo, la investigación literaria de casos implica un componente cualitativo.

Debido a que el proyecto aporta una temática poco estudiada desde el punto de vista técnico, es que se puede considerar de un alcance exploratorio, ya que el análisis de caucho proveniente de las pistas de aterrizaje no se ha realizado anteriormente en el país, se pretende con este proyecto ayudar al abordaje de esta temática de forma más específica en futuros proyectos de investigación. Además, se considera que al estar el proyecto fundamentado en caracterizar un material para definir si aplica su uso para mejor o al menos igualar el desempeño de las mezclas asfálticas para usos en pavimentos de los aeropuertos, es que se puede considerar que la investigación también tiene un componente de carácter descriptivo debido a que “busca especificar propiedades, características y rasgos importantes de cualquier fenómeno que se analice.

3.2. Fuentes y Sujetos de Información.

3.2.1. Fuentes.

Algunas fuentes utilizadas se describen a continuación:

3.2.2. Primarias.

Las fuentes primarias de información utilizadas para este proyecto se basan en manuales y documentos denominado Circulares de Asesoramiento AC 150/5370-10H de la Administración Federal de Aviación (FAA), ASTM, AASHTO, Material Técnico emitido la Asociación Latinoamericana y Caribeña de Pavimentos Aeroportuarios (ALACPA). y artículos de proyectos similares realizados en otros países.

3.2.3. Secundarias.

Las fuentes consisten principalmente en la consulta de resúmenes de artículos científicos, debido a la dificultad para obtener los documentos completos.

3.2.4. Terciarias.

Como fuentes terciarias se utilizaron algunas bases de datos en red y sistemas bibliotecarios nacionales e internacionales como:

- ✓ Federal Aviation Administration, <https://www.faa.gov>
- ✓ Repositorio TEC, <https://repositorio.tec.ac.cr/>
- ✓ LanammeUCR, <https://www.lanamme.ucr.ac.cr>
- ✓ Alacpa, <https://www.alacpa.org>
- ✓ NCAT, <https://www.ncat.us>
- ✓ Instituto del Asfalto, <http://www.asphaltinstitute.org/specification-databases/us-state-binder-specification-database/>
- ✓ Dirección General de Aviación Civil, <https://www.dgac.go.cr>

3.2.5. Sujetos de información.

Los sujetos de información:

- ✓ Asociación Latinoamérica y Caribeña de Pavimentos Aeroportuarios: Brindó ponencias técnicas del uso caucho en pavimentos aeroportuarios.
- ✓ Dirección General de Aviación Civil: Brindó información técnica de pavimentos en aeropuertos.
- ✓ Ingenieros aeronáuticos de varias partes de Latinoamérica y Caribe.
- ✓ Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales: Se obtuvo información sobre estudios técnicos del uso de caucho en mezclas asfálticas.

3.3. Técnicas e Instrumentos de Investigación.

En cuanto a las técnicas e instrumentos de investigación estos se describen en seguida:

3.3.1. Consulta personal.

Se basa en realizar consultas puntuales mediante entrevista directa o telefónica a personas que tienen información y/o conocimiento clave para el análisis de una situación determinada.

3.3.2. Revisión documental.

Consiste en identificar palabras clave en documentos donde se espera obtener información relevante para el desarrollo del proyecto.

3.3.3. Definición de los sitios de muestreo.

Se identifica que la fuente de material donde se recolectara el caucho es el Aeropuerto Internacional Daniel Oduber Quirós, en Liberia, Guanacaste. Y mediante un equipo especial de Limpieza de caucho propiedad de la Dirección General de Aviación Civil y administrado por el proceso de mantenimiento aeroportuario se procede extraer el material de muestra. Mismo que se utilizó sin ningún tipo de procesamiento como se puede observar en la Figura 15.



Figura 12: Fuente de Material
Fuente: Propia.

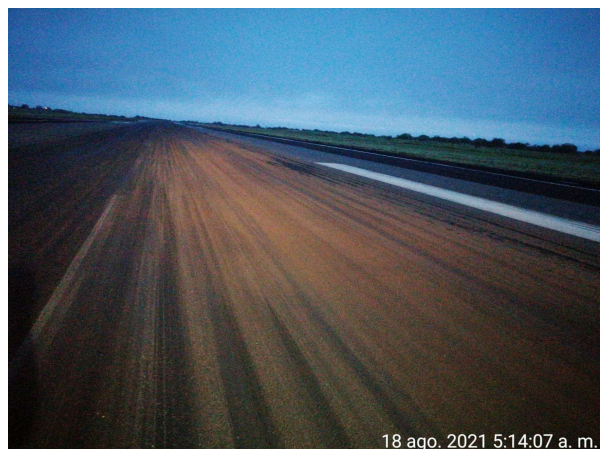


Figura 13: Después de la Limpieza.



Figura 14: Equipo para recolección del caucho.
Fuente: Propia.



Figura 15: Condición final.
Fuente: Propia.

3.3.4. Ensayos de laboratorio.

Corresponde a pruebas realizadas mediante un laboratorio acreditado por el Ente Costarricense de Acreditación (ECA) al material de estudio con el fin de caracterizar el mismo, a continuación, se describen cada una de pruebas específicas a realizar, estas corresponden a los ensayos requeridos para la caracterización de los agregados (pétreos y residuo de caucho), ensayos requeridos para el diseño de mezclas asfálticas con y sin residuos de caucho y ensayos para el cemento asfáltico. Comportamiento dinámico de la mezcla asfáltica con y sin residuo de caucho y pruebas para evaluación de la susceptibilidad a la deformación permanente de la mezcla asfáltica compactada y el daño por humedad.

3.3.4.1. Análisis granulométrico (agregado grueso y fino).

Este método cubre la determinación de la distribución por tamaño de las partículas de agregado fino y grueso mediante tamizado. Esto con el fin de obtener la granulometría de diseño para las condiciones del proyecto, de acuerdo con las normas ASTM C 136 y C 117 / AASHTO T 27 y T 11.



Figura 16: Muestra el equipo para el tamizaje del agregado grueso y fino.
Fuente: (Lanamme, 2019).

3.3.4.2. Perdida por sanidad – Sulfato de sodio.

Este método de prueba cubre los procedimientos de estimación de la sanidad (resistencia a la degradación) de los agregados cuando se encuentran expuestos a la acción del clima en el concreto u otras aplicaciones. ASTM C88 /ASHTO T 104.

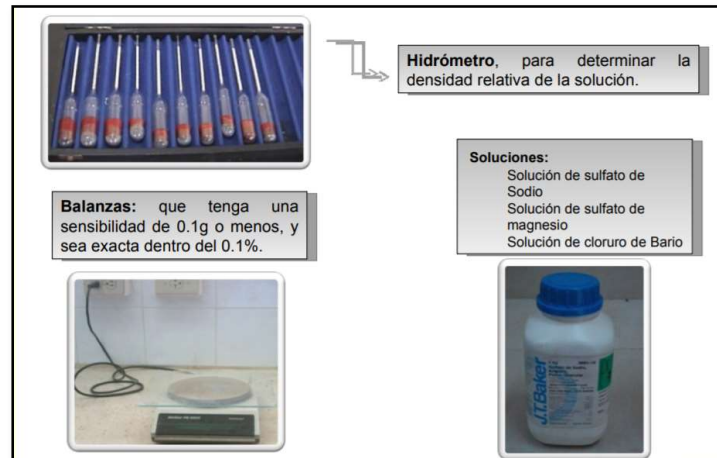


Figura 17: Muestra el equipo para determinar la pérdida por sanidad.
Fuente: Propia.

3.3.4.3. Gravedad específica y Absorción.

La gravedad específica permite calcular el volumen que ocupa el agregado dentro de una mezcla, en este caso mezcla asfáltica, también se puede determinar el cambio de masa del agregado debido a la absorción de agua en comparación con el material seco, de acuerdo con la norma ASTM C-127 / 128.



Figura 18: Muestra el equipo para determinar la gravedad específica y absorción del agregado.
Fuente: (Lanamme, 2019).

3.3.4.4. Equivalencia de arena de agregado fino.

El ensayo de equivalente de arena determina la cantidad de material fino y arcilloso que se encuentra en una muestra de agregado fino, es necesario determinar la cantidad permisible de finos arcillosos ya que son materiales que provocan gran daño al pavimento, de acuerdo con la norma ASTM D2419 / AASHTO T-176.



Figura 19: Muestra parte del equipo para determinar la equivalencia de arena en el agregado fino.

Fuente: (Lanamme, 2019).

3.3.4.5. Partículas Friables.

Este método de ensayo describe la determinación aproximada de partículas friables y arcillosas en los agregados, de acuerdo con la norma ASTM C-142 / AASTHO T-112.



Figura 20: Muestra el equipo para determinar las partículas friables.

Fuente: propia.

3.3.4.6. Límites de Attemberg.

Estos ensayos junto con la granulometría por tamizado se requieren para la clasificación del suelo, en este caso su consistencia con respecto al contenido de humedad. A estos contenidos de humedad en los puntos de transición de un estado al otro son los denominados límites de Atterberg, de acuerdo con las normas ASTM D 4318/ AASTHO T 89.



Figura 21: Muestra el equipo para determinar los Límites de Attemberg.
Fuente: (Lanamme, 2019).

3.3.4.7. Método de prueba estándar para la densidad a granel (“Peso Unidad”) y los vacíos en el agregado.

Este método de ensaye se refiere a la determinación de la densidad en masa (“peso unitario”) de los agregados en condición compactada o suelta, y el cálculo de los huecos en agregados finos, gruesos o una mezcla de ambos, basándose en una misma determinación, de acuerdo con la norma ASTM D 29.



Figura 22: Muestra el equipo para determinar el peso unitario del agregado.
Fuente: (Lanamme, 2019).

3.3.4.8. Abrasión: Máquina de los Ángeles.

La prueba de abrasión los Ángeles evalúa la tenacidad, que nos permite determinar la capacidad que tiene el agregado de absorber la energía de deformación en condiciones de impacto, y la resistencia a la abrasión que permite determinar el desgaste o erosión del agregado grueso, de acuerdo con la norma ASTM C- 131.



Figura 23: Muestra el equipo para determinar la abrasión del agregado.
Fuente: (Lanamme, 2019).

3.3.4.9. Caras Fracturadas.

Este método de ensayo cubre la determinación del porcentaje, por masa o por conteo, de partículas fracturadas en una muestra de agregado grueso, la cual cumple con los requisitos especificados. Este porcentaje se incluye en los requisitos para maximizar la resistencia al corte por aumento de la fricción entre las partículas, dependiente o independientemente de cualquier mezcla de agregados, proporcionar estabilidad para el tratamiento de superficies de agregados, y para brindar una mayor fricción y textura de estos cuando son utilizados en las superficies del pavimento, de acuerdo con la norma ASTM D 5821.



Tamices de alambre tejido y agujero cuadrado, de 37.5, 25., 19., 12.5 y 9.5 mm (1½", 1", ¾", ½" y 3/8").



Cuarteador, para la obtención de las muestra representativa.



Balanza, de 5000 g de capacidad y aproximación de 1 gr.



Espátula

Figura 24: Muestra el equipo para determinar las partículas fracturadas.
Fuente: propia.

3.3.4.10. Partículas Planas y Elongadas.

Este método de prueba cubre la determinación de los porcentajes de partículas chatas, alargadas o partículas chatas y alargadas del agregado grueso. Para ubicar cada partícula en uno de los grupos se debe ensayar cada una de ellas, ya sean chatas según relación ancho/espesor, alargadas según relación longitud/ancho y chata y alargada según su relación longitud/espesor de acuerdo con la norma ASTM 4791.



Figura 25: Muestra parte del equipo para determinar longitud/ancho del agregado.
Fuente: (Lanamme, 2019).

3.3.4.11. Índice de Durabilidad.

El índice de durabilidad indica la resistencia relativa de los agregados de producir finos dañinos cuando se someten a métodos mecánicos de degradación. Por lo tanto, se debe especificar un valor mínimo de índice de durabilidad para prohibir el uso de agregados en diferentes campos de la construcción, donde sean susceptibles a la degradación, de acuerdo con las normas ASTM D-3744 y AASHTO T-210.



Figura 26: Muestra parte del equipo para determinar la resistencia relativa de los agregados.
Fuente: (Lanamme, 2019).

3.3.4.12. Residuos insolubles en agregado carbonatados.

Este método de prueba cubre la determinación del porcentaje de residuo insoluble en agregados de carbonato utilizando una solución de ácido clorhídrico para hacer reaccionar los carbonatos.

3.3.4.13. Análisis granulométrico (residuo de caucho).

Este método cubre la determinación de la distribución por tamaño de las partículas de agregado fino y grueso mediante tamizado. Esto con el fin de obtener la granulometría de diseño para las condiciones del proyecto, de acuerdo con las normas ASTM C 136 y C 117 / AASHTO T 27 y T 11.



Figura 27: Muestra el equipo para el tamizaje del agregado grueso y fino.
Fuente: (Lanamme, 2019).

3.3.4.14. Ensayos físicos en el cemento asfáltico.

3.3.4.14.1. Punto de ablandamiento.

Este método de ensayo permite la determinación del punto de ablandamiento de materiales bituminosos en el rango entre 30 °C y 157 °C empleando el equipo de anillo y esfera sumergido en agua destilada entre 30 °C y 80 °C o glicerina USP por encima de 80 °C hasta 157 °C. De acuerdo con las normas ASTM D 36-14/ AASHTO T 53.



Figura 28: Muestra el equipo para determinar el punto de ablandamiento
Fuente: (Lanamme, 2019).

3.3.4.14.2. Recuperación Elástica a 25°C,

El ensayo se emplea para evaluar la recuperación elástica del asfalto al medir la distancia recorrida después de cortar las muestras de asfalto elongadas una distancia específica. Las muestras se estiran bajo condiciones específicas de velocidad y temperatura $5 \text{ cm/min} \pm 5\%$ y $25^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$, De acuerdo con las normas ASTM D6084, AASHTO T301.



Figura 29: Moldes para el ensayo de recuperación elástica con ductilómetro.
Fuente: (Lanamme, 2019).

3.3.4.14.4. Densidad del asfalto a 25°C.

Este ensayo es un parámetro fundamental del asfalto, utilizado para la venta de asfalto y el cálculo de masa - volumen en los tanques de almacenamiento, ya que permite estimar el volumen vendido de asfalto. De acuerdo con las normas ASTM D70.



Figura 30: Método del picnómetro para calcular densidades.
Fuente: Propia

3.3.4.14.5. Viscosidad dinámica 135°C.

La viscosidad cinemática es una relación entre la viscosidad absoluta y la densidad, Este parámetro mide la capacidad de un líquido a fluir a través de un capilar. En el caso del asfalto se utiliza para garantizar las condiciones de almacenamiento, trasvase y bombeo a 135 °C sin inconvenientes. De acuerdo con las normas ASTM D2170.



Figura 31: Viscosidad dinamica de asfaltos.
Fuente: (Lanamme, 2019).

3.3.4.14.6. Cambio de masa en RTFO.

Este ensayo se emplea para evaluar la susceptibilidad al endurecimiento o envejecimiento de tendría el asfalto durante las operaciones de mezclado, cuando se realiza esta prueba se debe reportar el resultado obtenido, de esta manera se puede expresar el resultado como pérdida de masa (al usar signo negativo) o ganancia de masa (utilizando signo positivo). Esta tendencia al endurecimiento o envejecimiento se mide por un cambio de masa comparando la masa original respecto a la masa luego del calentamiento en el horno TFO. De acuerdo con las normas ASTM D1754.



Figura 32: Cambio de masa en RTFO.
Fuente: (Lanamme, 2019).

3.3.4.15. Determinación de las fracciones disponibles de agregados para el diseño de mezclas asfálticas.

3.3.4.15.1. Determinación del porcentaje en peso que pasa a través de los tamices para la mezcla asfáltica en caliente para el diseño, de acuerdo con el método Marshall.

Para determinar los límites para curva granulométrica del tipo de mezcla asfáltica que se va a utilizar, es necesario conocer el tamaño máximo del agregado que va a intervenir en la mezcla asfáltica en caliente, con esto se establece el porcentaje en peso que pasa a través de los tamices.

De la Especificación estándar para la Construcción de Aeropuertos y de acuerdo Circulares de Asesoramiento AC 150/5370-10H, Parte 6 Pavimento Flexible, Ítem P-401 Pavimento de mezcla de asfalto (ver anexo 1).

Cuadro 7: Agregado Pavimentos Asfálticos.

Malla	Porcentaje por Peso Tamicez Pasando		
	Graduación 1	Graduación 2	Graduación 3
1" (25.0 mm)	100	--	--
3/4" (19.0 mm)	76 - 98	100	--
1/2" (12.5 mm)	66 - 86	79 - 99	100
3/8"(9.5mm)	57 - 77	68 - 88	79 - 99
Nº 4 (4.75 mm)	40 - 60	48 - 68	58 - 78
Nº 8 (2.36 mm)	26- 46	33 - 53	39 - 59
Nº 16 (1.18 mm)	17 - 37	20 - 40	26 - 46
Nº 30 (0.600 mm)	11 - 27	14 - 30	19 - 35
Nº 50 (0.300 mm)	7 - 19	9 - 21	12 - 24
Nº 100 (0.150 mm)	6 - 16	6 - 16	7 - 17
Nº 200 (0.075 mm)	3 - 6	3 - 6	3 - 6

Fuente: (FAA, Especificaciones Estándar para la construcción de aeropuertos, 2018).

3.3.4.16. Diseño de mezcla asfáltica sin residuo de caucho, obtención de parámetros Marshall.

La mezcla se compone de agregado con una buena granulometría, filler y ligante asfáltico. Las diversas fracciones de agregados deberán ser de diferente tamaño, se maneja en grupos de tamaños diferentes, y se combinan en proporciones tales que la mezcla resultante cumple con los requisitos de clasificación de la fórmula de mezcla del trabajo.

Cuadro 8: Criterio de Diseño Marshall.

Ensayo	Pavimentos Diseñados para Aeronaves que pesan 60.000 libras (27.216 kg) o más o presiones de neumáticos 100 psi o más	Pavimentos Diseñados para Aeronaves de peso bruto inferior a 60.000 libras (27.216 kg) o presión de los neumáticos a menos de 100 psi
Número de golpes	75	50
Estabilidad, libras (Newton) Mínimo	2150 (9560)	1350 (6000)
Flujo ¹ , 0.01 inch. (0.25 mm)	10 - 16	10 - 18
Vaciós de aire	3.5	3.5
Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (mínimo)	Ver Tabla 3	Ver Tabla 3

Fuente: (FAA, Especificaciones Estándar para la construcción de aeropuertos, 2018).

Cuadro 9: Compactador gigatorio Superpave.

Ensayo	Pavimentos Diseñados para Aeronaves que pesan 60.000 libras (27.216 kg) o más o presiones de neumáticos 100 psi o más	Pavimentos Diseñados para Aeronaves de peso bruto inferior a 60.000 libras (27.216 kg) o presión de los neumáticos a menos de 100 psi
Numero de giros compactador	75	50
vación de aire (%)	3.5	3.5
Vaciens en el agregado Mineral (%) (mínimo)	Ver Tabla 4	Ver Tabla 4

Fuente: (FAA, Especificaciones Estándar para la construcción de aeropuertos, 2018)

Cuadro 10: Porcentaje de vacío mínimo en el agregado mineral (VMA).

Agregado (ver Tabla 1)	Mínimo VMA
Graduación 3	16%
Graduación 2	15%
Graduación 1	14%

Fuente: (FAA, Especificaciones Estándar para la construcción de aeropuertos, 2018)

3.3.4.17. Diseño de mezcla asfáltica con residuo de caucho, obtención de parámetros Marshall.

A partir de la granulometría del residuo de caucho se determina que el mayor porcentaje retenido es en los tamices No. 50, 100, 200 y pasante del tamiz No. 200, por lo que se reemplaza el material fino de la muestra normal proporcionalmente en un porcentaje de 25, 50, 75, 100 % del material retenido en los tamices mencionados anteriormente, utilizando el porcentaje de asfalto óptimo obtenido en la mezcla original.

El diseño de la mezcla asfáltica modificada se realiza con el mismo proceso de elaboración de especímenes que se utiliza en la mezcla original

3.3.5. Matriz de ensayos.

Una matriz de ensayos corresponde a un cuadro donde se exponen elementos para ser cruzados con sus principales características; en este caso se utiliza una matriz para representar los ensayos de laboratorio a realizar a cada una de las muestras a caracterizar indicando los requerimientos aplicables. También se indica la cantidad y procedencia de las muestras.

Cuadro 11: Matriz de Ensayos.

OBJETIVOS ESPECIFICOS	PRODUCTOS	ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	CANTIDAD PRUEBAS
OE1 Determinar las características volumétricas y mecánicas de los agregados pétreos y de los residuos de caucho de la limpieza de la pista de aterrizaje del Aeropuerto mediante ensayos de laboratorio.	1.1 Ensayos a los agregados (pétreos y residuo de caucho). 1.2 Análisis de Resultados caracterización de los agregados.	Análisis granulométrico (agregado grueso y fino)	ASTM C 136 y C 117 / AASHTO T 27 y T 11.	2
		Perdida por sanidad – Sulfato de sodio	ASTM C88 / ASHTO T 104.	2
		Gravedad específica y Absorción.	ASTM C-127 / 128.	2
		Equivalencia de arena de agregado fino.	ASTM D2419 / AASHTO T-176.	2
		Partículas Friables.	ASTM C-142 / AASTHO T-112.	2
		Límites de Attemberg.	ASTM D 4318/ AASTHO T 89	2
		Método de prueba estándar para la densidad a granel (“Peso Unidad”) y los vacíos en el agregado.	ASTM D 29.	2
		Abrasión: Máquina de los Ángeles.	ASTM C- 131.	2
		Caras Fracturadas	ASTM D 5821.	2
		Partículas Planas y Elongadas.	ASTM 4791	2
		Índice de Durabilidad.	ASTM D-3744 y AASHTO T-210.	2
		Residuos insolubles en agregado carbonatados		2
		Análisis granulométrico (residuo de caucho).	ASTM C 136 y C 117 / AASHTO T 27 y T 11	2
		Determinación de las fracciones disponibles de agregados para el diseño de mezclas asfálticas.		2
OE2 Realizar los diseños de mezcla con y sin residuos de caucho para analizar el efecto de los residuos de caucho sobre las propiedades volumétricas de la Mezcla Asfáltica	2.1. Diseño de Mezcla Asfáltica sin residuos de caucho.	Diseño de mezcla asfáltica sin residuo de caucho, obtención de parámetros Marshall	Se tomara como base el Diseño de mezcal existente	1
	2.2. Diseño de Mezcla Asfáltica con residuos de caucho.	Diseño de mezcla asfáltica con residuo de caucho, obtención de parámetros Marshall.	Porcentajes de 25, 50, 75, 100 %	4
OE3 Comparar el comportamiento dinámico de las mezclas asfálticas en caliente con y sin residuo de caucho de la limpieza de la pista de aterrizaje del Aeropuerto por vía seca.	3.1. Comportamiento dinámico de la mezcla asfáltica sin residuo de caucho.	Ensayos Módulo de Rigidez de la mezcla asfáltica sin residuo de caucho	ASTM D3496 y D3497, AASTHO TP	1
	3.2. Comportamiento dinámico de la mezcla asfáltica con residuo de caucho.	Ensayos Módulo de Rigidez de la mezcla asfáltica con residuo de caucho	ASTM D3496 y D3497, AASTHO TP	2
OE4 Evaluar la resistencia a la deformación permanente y daño inducido por humedad con y sin adición de residuo de caucho de la pista de aterrizaje en la mezcla asfáltica mediante ensayos de laboratorio.	4.1. Evaluación de la susceptibilidad a la deformación permanente de la mezcla asfáltica compactada. Y daño por humedad.	Ensayo Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA).	AASHTO T 340	2
		Susceptibilidad al daño por humedad.	AASHTO T 283	2

Fuente: Propia.

3.3.6 Análisis de contenido.

Como se ha planteado en los objetivos, se pretende realizar un análisis comparativo directo entre los resultados de dos mezclas una sin caucho y otras con caucho. Dicho análisis se realizará mediante la tabulación y representación gráfica de los resultados obtenidos en cada una de las pruebas realizadas. Para ello, se utilizará la herramienta de gráficos de Excel para comparar cada una de las mezclas frente a las especificaciones de la FAA.

Con la información recolectada, se pretende obtener datos para determinar si es posible utilizar el residuo de caucho proveniente de las pistas de aterrizaje para mejorar o al menos igualar con respecto a una mezcla convencional, esto dados los resultados obtenidos en las pruebas de volumetría, mecánicos y desempeño a las mezclas.

3.4. Procesamiento y Análisis de datos.

El análisis que se realizará con la información y datos obtenidos se especifican por objetivo de cumplimiento.

3.4.1. Objetivo 1. Determinar las características volumétricas y mecánicas de los agregados pétreos y de los residuos de caucho de la limpieza de la pista de aterrizaje del aeropuerto mediante ensayos de laboratorio.

Para determinar las características físicas y mecánicas de los agregados y el material de caucho a utilizar se realizarán pruebas de laboratorio, siguiendo la normativa ASTM o AASHTO y las Especificación Estándar para la Construcción de Aeropuertos, de acuerdo con la Circular de Asesoramiento AC 150/5370-10H, Parte 6 Pavimento Flexible, Ítem P-401 Pavimento de mezcla de asfalto (ver anexo 1), para determinar el cumplimiento con respecto a la especificación.

Con la información obtenida se analizará y comparará las características de los agregados y el material caucho para determinar cuál de las dos brindan mejores propiedades.

3.4.2. Objetivo 2. Realizar los diseños de mezcla con y sin residuos de caucho para analizar el efecto del caucho sobre las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica.

Se procede a determinar los porcentajes óptimos de asfalto para las muestras con y sin caucho, siguiendo la normativa ASTM o AASHTO y las Especificación Estándar para la Construcción de Aeropuertos, de acuerdo con la Circular de Asesoramiento AC 150/5370-10H, Parte 6 Pavimento Flexible, Ítem P-401 Pavimento de mezcla de asfalto (ver anexo 1), para determinar el cumplimiento con respecto a la especificación.

Con la información obtenida se analizará y comparará los porcentajes óptimos de asfalto para ambas mezclas asfálticas.

3.4.3. Objetivo 3. Comparar el comportamiento dinámico de las mezclas asfálticas en caliente con y sin residuo de caucho de la limpieza de la pista de aterrizaje del aeropuerto mediante ensayos de laboratorio.

Se evaluarán especímenes con la matriz de ensayos (Cuadro 11. Matriz de Ensayos) y así se determinará los valores del módulo dinámico con y sin residuos de Caucho, siguiendo la normativa ASTM o AASHTO para determinar el cumplimiento con respecto a la especificación.

Con la información obtenida se discutirá sobre su comportamiento y desempeño entre ambas muestras.

3.4.4. Objetivo 4. Evaluar la resistencia a la deformación permanente y daño inducido por humedad con y sin adición de residuo de caucho de la pista de aterrizaje en la mezcla asfáltica mediante ensayos de laboratorio.

Para evaluar la deformación permanente mediante Ensayo Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA) se utilizará especímenes con la matriz de ensayos (Cuadro 11. Matriz de Ensayos) para evaluar el desempeño de la mezcla asfáltica con y sin residuos de caucho, su importancia radica que el ensayo nos permite distinguir cuáles de las dos mezclas asfálticas son más deformables.

Además, la evaluación de susceptibilidad al daño por humedad se utilizará igualmente especímenes de acuerdo con la matriz de ensayos (Cuadro 11. Matriz de Ensayos) para evaluar su desempeño ante cambio en la resistencia a la tensión diametral para mezclas asfálticas compactadas, como resultado de los efectos de la saturación de agua, siguiendo la normativa ASTM o AASHTO y las Especificación Estándar para la Construcción de Aeropuertos, de acuerdo con la Circular de Asesoramiento AC 150/5370-10H, Parte 6 Pavimento Flexible, Ítem P-401 Pavimento de mezcla de asfalto (ver anexo 1), para determinar el cumplimiento con respecto a la especificación.

Con la información obtenida se discutirá sobre su comportamiento y desempeño con base cada prueba a realizar

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y ANÁLISIS.

En este apartado se detallan los resultados obtenidos en el desarrollo de la investigación.

4.1. Objetivo 1: Determinar las características volumétricas y mecánicas de los agregados pétreos y de los residuos de caucho de la limpieza de la pista de aterrizaje del Aeropuerto.

4.1.1. Ubicación de los agregados pétreos.

Inicialmente se establece la ubicación de las fuentes de materiales pétreos y el material de residuo de caucho para desarrollo del presente Trabajo Final de Graduación. Este primero se ubica en el distrito de Juntas, cantón de Abangares, de la Provincia de Guanacaste.



Figura 33: CDP Río Lagarto.
Fuente: Propia.

4.1.2. Granulometría de diseño con los porcentajes pasando en cada malla para la mezcla de agregado.

En el cuadro 12 se presenta la combinación propuesta de agregados para la verificación del diseño.

Cuadro 12: Porcentaje de combinación de agregados.

Fracción	Nombre comercial	% de combinación
Fina	Polvo de piedra	58%
Intermedia	Piedra quintilla	24%
Gruesa	Piedra cuartilla	18%

Fuente: Informe ITP:1240-19.

4.1.3. Granulometría de diseño.

En el cuadro 13 se presenta la granulometría de diseño con base en las proporciones establecidas.

Cuadro 13: Granulometría de diseño.

Tamiz (in)	Tamiz (mm)	Graduación de diseño	Especificaciones FAA Item P 401 TM 19.1mm	
3/4"	19,000	100	100	100
1/2"	12,500	91	79	99
3/8"	9,500	79	68	88
No.4	4,750	54	48	68
No.8	2,360	34	33	53
No.16	2,000	23	20	40
No.30	0,600	17	14	30
No.50	0,300	13	9	21
No.100	0,150	9	6	16
No.200	0,075	6,0	3,0	6,0

Fuente: Informe ITP:1240-19.

4.1.4. Ensayos a los Agregados Pétreos:

- **Tipo de ensayo realizado:** Granulometría de fracción fina TMN 4.75mm (Polvo de Piedra), especificación según FAA. especificación según FAA de acuerdo con la Circular de Asesoramiento 150/5370-10H, Parte 6 Pavimento Flexible, Ítem P-401 Pavimento de mezcla de asfalto. (ver anexo 2).

Cuadro 14: Graduación fracción fina

Tamiz	% Pasando
19.1 mm	100
12.5 mm	80
9.5 mm	53
N°4	35
N°8	26
N°16	18
N°30	8,1
N°50	100
N°100	80
N°200	53

Fuente: Informe ITP:1240-19.

- **Tipo de ensayo realizado:** Granulometría de fracción gruesa TMN 12.7 mm (piedra cuartilla), especificación según FAA de acuerdo con la Circular de Asesoramiento 150/5370-10H, Parte 6 Pavimento Flexible, Ítem P-401 Pavimento de mezcla de asfalto. (ver anexo 2).

Cuadro 15: Graduación fracción gruesa.

Tamiz	% Pasando
19.1 mm	100
12.5 mm	57
9.5 mm	11
N°4	3
N°8	3
N°16	2
N°30	2
N°50	2
N°100	2
N°200	1,3

Fuente: Informe ITP:1240-19.

- **Tipo de ensayo realizado:** Granulometría de fracción intermedio TMN 9.5 mm (piedra quintilla), especificación según FAA. FAA de acuerdo con la Circular de Asesoramiento 150/5370-10H, Parte 6 Pavimento Flexible, Ítem P-401 Pavimento de mezcla de asfalto. (ver anexo 2).

Cuadro 16: Graduación fracción intermedia.

Tamiz	% Pasando
19.1 mm	100
12.5 mm	76
9.5 mm	13
N°4	5
N°8	4
N°16	3
N°30	3
N°50	3
N°100	1,8
N°200	100

Fuente: Informe ITP:1240-19.

4.1.5. Análisis de resultados de la caracterización de los agregados.

Los resultados obtenidos de los ensayos realizados a los agregados pétreos obtenidos del Tajo CDP Río Lagarto, muestran un buen comportamiento, tal como se muestra en los cuadros 13,14,15 y 16 correspondientes al polvo de piedra, piedra cuarta y piedra quinta respectivamente.

Los ensayos realizados a los materiales pétreos están cumpliendo los criterios de aceptación establecidos en la Especificaciones Técnicas de la Circular de Asesoramiento AC 150/5370-10H, Parte 6 Pavimento Flexible, Ítem P-401 Pavimento de mezcla de asfalto, (ver Anexo 1). que son base necesario para los diseños de mezcla posterior como se muestran en los cuadros 17, 18 y 19. (ver Anexo 2).

Cuadro 17: Resumen de Cumplimiento del polvo de piedra.

Prueba de Material	Especificación	Resultado	Cumplimiento
Índice de plasticidad	LL Menor 25 % IP Menor a 6 %	N.P. N.P.	Cumple
Equivalente de arena	Mayor a 45 %	65 %	Cumple
Pérdida por sanidad Sulfato de Sodio	Menor a 10 %	0,6 %	Cumple
Índice de durabilidad	Mayor a 35%	82 %	Cumple
Partículas Friables	Menor a 1%	0,7 %	Cumple
Angularidad de finos	Mayor a 35%	47,2 %	Cumple

Fuente: Propia.

Cuadro 18: Resumen de Cumplimiento de la piedra cuarta.

Prueba de Material	Especificación	Resultado	Cumplimiento
Abrasión Los Ángeles	Menor a 40%	13,7 %	Cumple
Residuos insolubles en agregados carbonatados	Mayor a 25%	100 %	Cumple
Al menos una Cara Fracturadas Al menos dos Caras Fracturadas	Mayor a 85% Mayor a 70%	Al menos una cara fracturada 100 % Más de una cara fracturada 100 %	Cumple
Pérdida por sanidad Sulfato de Sodio	Menor a 10%	2,3 %	Cumple
Índice de durabilidad de gruesos	Mayor a 35%	82 %	Cumple
Caras planas y alongadas*	Menor a 8%	% Partículas Planas 1.1% % Partículas Elongadas 0.1% % Partículas ni Planas ni Elongadas 98.8%	Cumple
Partículas friables	Menor a 1%	0,3 %	Cumple
Método "A" Relación 3:1			

Fuente: Propia.

Cuadro 19: Resumen de Cumplimiento de la piedra quinta.

Prueba de Material	Especificación	Resultado	Cumplimiento
Abrasión Los Ángeles	Menor a 40%	13,7 %	Cumple
Residuos insolubles en agregados carbonatados	Mayor a 25%	100 %	Cumple
Al menos una Cara Fracturadas Al menos dos Caras Fracturadas	Mayor a 85% Mayor a 70%	Al menos una cara fracturada 100 % Más de una cara fracturada 100 %	Cumple
Pérdida por sanidad Sulfato de Sodio	Menor a 10%	3,4 %	Cumple
Índice de durabilidad de gruesos	Mayor a 35%	82 %	Cumple
Caras planas y alargadas*	Menor a 8%	% Partículas Planas 2.0% % Partículas Elongadas 0.6% % Partículas ni Planas ni Elongadas 97.4%	Cumple
Partículas friables	Menor a 1%	0,3 %	Cumple
Método "A" Relación 3:1			

Fuente: Propia.

4.1.6. Ubicación del Residuo de Caucho.

El material de residuo de caucho será extraído del Aeropuerto Internacional Daniel Oduber Quirós ubicado en la provincia de Guanacaste, cantón Liberia está en la planicie de Llano Grande a unos 8 kilómetros al oeste de la ciudad de Liberia.

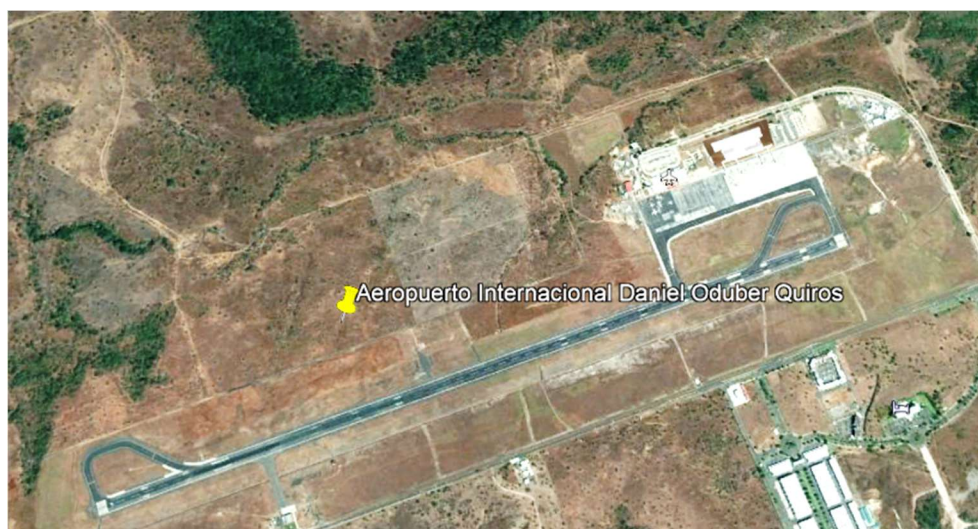


Figura 23: Pista de aterrizaje del AIDOQ.
Fuente: Tomada de Google Earth.

4.1.7. Proceso de extracción del caucho en la Pista de Aterrizaje.

Mediante un equipo denominado SK2000 que utiliza un sistema de agua a presión ultra alta de hasta 40.000 psi – 2750 bar, y posee un sistema de filtración que separa el lodo resultante en desechos sólidos y agua sucia, lo sólidos son capturados casi secos y pueden se extraídos fácilmente.



Figura 24: Equipo de limpieza de caucho en la pista del AIDOQ..
Fuente: Propia.



Figura 25: Barras expulsan agua de alta presión.
Fuente: Propia.



Figura 26: Tanque de almacenamiento de caucho.
Fuente: Propia.

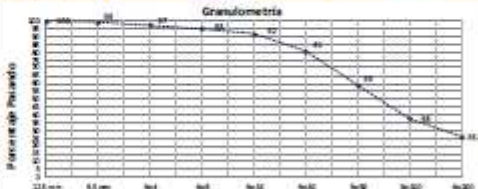


Figura 34: Residuo de caucho.
Fuente: Propia.

4.1.8. Ensayos al Residuo de Caucho.

- **Tipo de ensayo realizado:** Análisis del tipo de agregados piedra caucho obtenido de la pista de aterrizaje.

Cuadro 20: Resultado Ensayo Residuo de Caucho

Aceptación de Agregados	No. Muestra	Código de ensayo	Valor Obtenido		Especificaciones
	LC-3546-19 Caucho	Análisis Granulométrico (AG-02)	Malla	% Pasando	No Aplica
			12,5 mm	100	---
			9,5 mm	99	---
			No4	97	---
			No8	95	---
			No16	92	---
			No30	81	---
			No50	59	---
			No100	38	---
No200			26,0	---	
					
Peso Volumétrico (AG-04/AG-05)	Suelto	854 kg/m³	N.A.		
	Envarellado	937 kg/m³			
	Sanidad con Sulfato de Sodio (AG-08)		2,6 %	N.A.	

Fuente: Informe ITP:1240-19.

4.1.9. Análisis de resultados caracterización de los residuos de caucho.

En la actualidad a nivel nacional e internacional no existe especificaciones técnicas relativas a su aplicación en mezclas asfálticas para pistas de aterrizaje para Aeropuertos, el material de residuo de caucho proveniente de la limpieza de la pista se pudo realizar unos tamizajes del material para determinar sus porcentajes pasando y retenidos, y ver de qué forma poder realizar una buena combinación de materiales para el diseño mezcla posterior.

Es importante indicar que los ensayos realizados al residuo de caucho que son aplicables a agregado pétreo únicamente fue posible realizar el análisis granulométrico, peso volumétrico y ensayo de sanidad.

En el caso del peso volumétrico se pudo denotar que el resultado es muy bajo y eso nos da una indicación que probablemente el caucho está generando una alta absorción.

Con respecto al ensayo de Sanidad con Sulfato de Sodio dando como resultado un valor 2.6%, si bien como se indicó anteriormente no existe especificación para valorar su cumplimiento a una norma, este valor nos muestra que el caucho posee cierta resistencia a la acción de soluciones como sulfato de sodio o de magnesio que se encuentran en diferentes cantidades en el suelo y agua.

Además, se puede notar que existe gran cantidad de caucho que pasa en cada una de las mallas, lo cual hace que debe tener cuidado a la hora de generar los diseños de mezcla para garantizar siempre cumplir con la especificación.

Es importante indicar que al inicio del presente proyecto de investigación se intentó realizar el mejoramiento vía seca pero que, por las características de alta absorción del caucho, se requerían altos contenidos de asfalto para lograr un buen cubrimiento del agregado, por tanto, se optó realizar el presente trabajo de investigación mediante la modificación por vía húmeda.

4.2. Objetivo 2: Realizar los diseños de mezcla con y sin residuos de caucho para analizar el efecto de los residuos de caucho sobre las propiedades volumétricas de la Mezcla Asfáltica.

4.2.1. Ensayos físicos y reológicos al cemento asfáltico.

Para el presente trabajo de investigación se utilizan tres porcentajes de caucho 0% (muestra de patrón), 15% y 25%, es importante indicar que los porcentajes utilizados se basaron a referencia literaria existente, específicamente del libro Hot Mix Asphalt Materiales, Mixture Design, and Construction de la National Center for Asphalt Technology (NCAT), donde se establecen rangos recomendados que se encuentran entre 18% y 26%. Se optó por usar los valores de 15% y 25%, esto con el fin de contar con un valor mínimo y máximo, de esta forma establecer un cambio significativo en las propiedades, además se procedió realizar ensayos físicos y reológicos como se muestra en la tabla 21, y los resultados detallados se pueden observar en el (ver anexo 3) además se procederá a realizar un análisis de cada uno de los resultados obtenidos.

Cuadro 21: Ensayos físicos en el cemento asfáltico.

Ensayos físicos en cemento asfáltico.				
Ensayo	Asfalto Virgen	Asfalto 15% Caucho	Asfalto 25% Caucho	Unidades
Punto de ablandamiento 5 °C/min	49,4	53,1	53,7	°C
Recuperación elástica a 25 °C	6,25	8,75	3,75	%
Densidad del asfalto a (25 °C)	1030,65	1090,39	1103,74	adimensional
Punto de inflamación	N.A.	N.A.	N.A.	°C
Viscosidad dinámica a 135 °C	470	1023	1363	mPa.s

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 22: Cambio de masa en RTFO

Ensayos físicos en cemento asfáltico Cambio de masa con horno de película delgada rotacional.				
Ensayo	Asfalto Virgen	Asfalto 15% Caucho	Asfalto 25% Caucho	Unidades
Cambio de masa RTFOT	-0,3812	-0,6580	-1,2370	%

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 23: Límite superior del grado de desempeño PG.

Ensayos reológicos en cemento asfáltico					
Determinación del límite superior del grado de desempeño.					
Cemento asfáltico original sin envejecimiento.					
Ensayo	Temperatura (°C)	Asfalto Virgen	Asfalto 15% Caucho	Asfalto 25% Caucho	Unidades
Módulo de deformación (G*/senδ)	64	2,26	4,99	2,73	kPa
Módulo de deformación (G*/senδ)	70	0,99	2,00	1,21	kPa
Módulo de deformación (G*/senδ)	76	0,50	0,88	0,49	kPa
Ángulo de fase (δ)	64	86,6	84,4	85,7	°
Ángulo de fase (δ)	70	87,9	86,7	87,9	°
Ángulo de fase (δ)	76	88,9	88,6	89,2	°
Temperatura real de falla:		69,8	75,03	77,24	°C
Temperatura superior PG:		64	70	76	°C

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 24: Límite superior del grado de desempeño PG.

Ensayos reológicos en cemento asfáltico					
Determinación del límite superior del grado de desempeño.					
Cemento asfáltico envejecido en horno de película delgada rotacional.					
Ensayo	Temperatura (°C)	Asfalto Virgen	Asfalto 15% Caucho	Asfalto 25% Caucho	Unidades
Módulo de deformación (G*/senδ)	64	8,95	6,15	8,33	kPa
Módulo de deformación (G*/senδ)	70	3,50	2,51	3,31	kPa
Módulo de deformación (G*/senδ)	76	1,46	1,07	1,36	kPa
Ángulo de fase (δ)	64	82,1	81,1	79,1	°
Ángulo de fase (δ)	70	83,5	83,9	82,3	°
Ángulo de fase (δ)	76	84,8	86,2	85,1	°
Temperatura real de falla:		73,18	76,92	78,75	°C
Temperatura superior PG:		70	76	76	°C

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2. Análisis de resultados de los ensayos físicos y reológicos del cemento asfáltico.

- **Punto de ablandamiento 5°C/min (ASTM D36).**

Con respecto al punto de ablandamiento se puede decir que es muy importante conocer en lo que corresponde al cambio de fase de un estado viscoso a semifluido donde el asfalto empieza a fluir y puede presentar problemas de estabilidad en campo. La temperatura o punto de ablandamiento es de vital importancia para luego realizar una clasificación del producto bituminoso ya que este puede llegar a estar sometido a temperaturas elevadas durante su vida de servicio. De acuerdo con la figura 35 se puede decir que en el caso de la muestra virgen está dentro de los valores típicos de temperatura de 50°C, y en los casos de los asfaltos con adición del 15% y 25% de caucho se puede observar que hay un aumento de temperatura con respecto al asfalto virgen, pero entre 15% y 25% no se evidencia un salto significativo. Ahora bien, los resultados indican con certeza que la adición de caucho está ayudando al asfalto de pasar de una condición semi viscoso a uno fluido. Además, podría ser que la película de asfalto incrementa o el caucho le da más cuerpo al asfalto generando que se ocupe más temperatura para que éste fluya hasta llegar al punto de

ablandamiento. con lo que se puede indicar que le podría generar una mayor capacidad de resistencia a la deformación plástica.

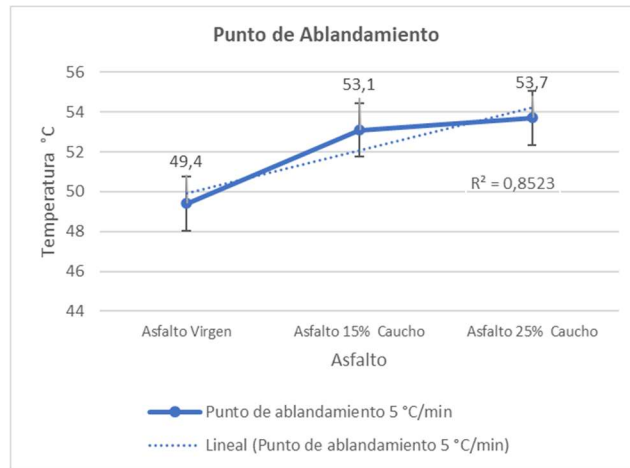


Figura 35: Punto de ablandamiento.
Fuente: Elaboración Propia.

- **Recuperación Elástica a 25°C (ASTM D6084).**

La recuperación elástica determina la capacidad de recuperación plásticas de los materiales asfálticos. En la figura 36 se representa los resultados obtenidos en el ensayo de recuperación elástica para la condición virgen, que es 6.25%, en el caso de 15% de caucho genera un aumento con respecto al asfalto virgen, y en el caso de 25% de caucho obtuvo bajo rendimiento probablemente debido una separación de fases por una falta de fusión entre el asfalto y el caucho. Aun así, los resultados indican muy poco aporte del caucho a esta propiedad.

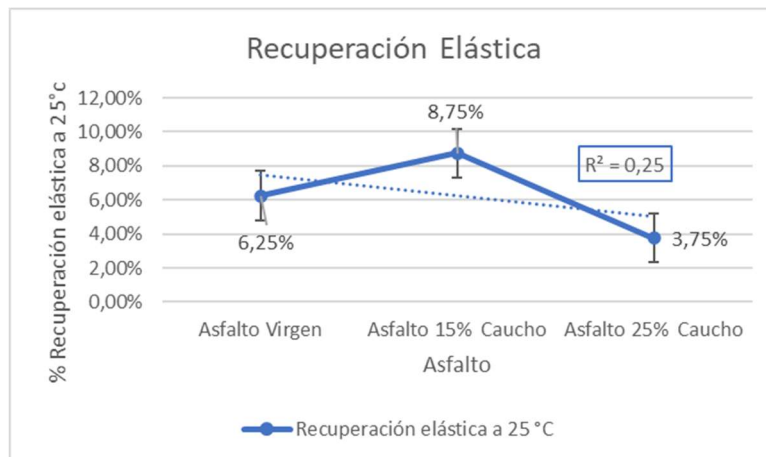


Figura 36: Recuperación elástica.
Fuente: Elaboración Propia.

- **Densidad del asfalto a 25°C (ASTM D70).**

En la figura 37 se representa los resultados obtenidos de la densidad del asfalto para los 3 casos de estudio se encuentran dentro los valores típicos., además se puede decir que un aumento en la densidad se da por la presencia del caucho que aumenta el peso lo cual brinda mayor cuerpo al asfalto (mayor viscosidad) y temperatura para llevarlo a un estado semifluido.

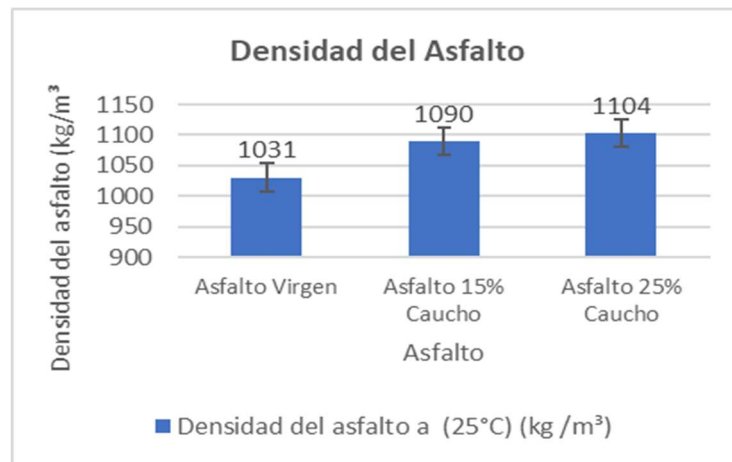


Figura 37: Densidad del asfalto a 25°C.
Fuente: Elaboración Propia.

- **Viscosidad dinámica a 135°C (ASTM D2170).**

El viscosímetro rotacional (RV) caracteriza la rigidez del asfalto a 135 °C, de temperatura en la cual se comporta casi enteramente como un fluido. Esta especificación limita a un valor menor de 3 Pa*s. Esto garantiza un asfalto que es capaz de ser bombeado y manejable durante la elaboración de la mezcla asfáltica en caliente. Como se muestra en la figura 38 para el asfalto virgen, conforme se da un aumento el porcentaje de caucho se da un aumento en la viscosidad del ligante asfáltico.

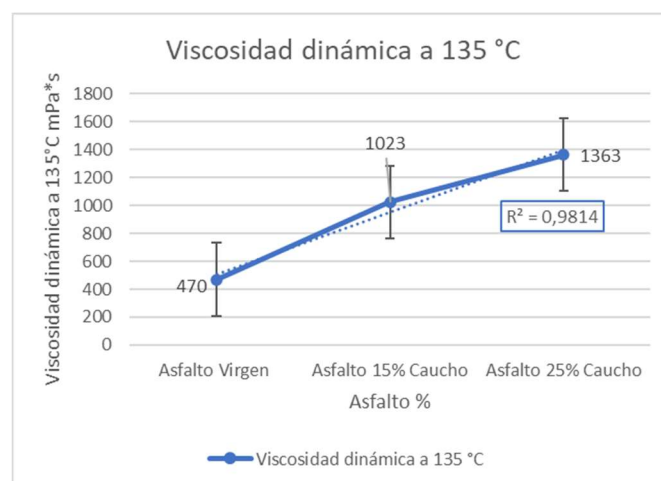


Figura 38: Viscosidad dinámica a 135°C.
Fuente: Elaboración Propia.

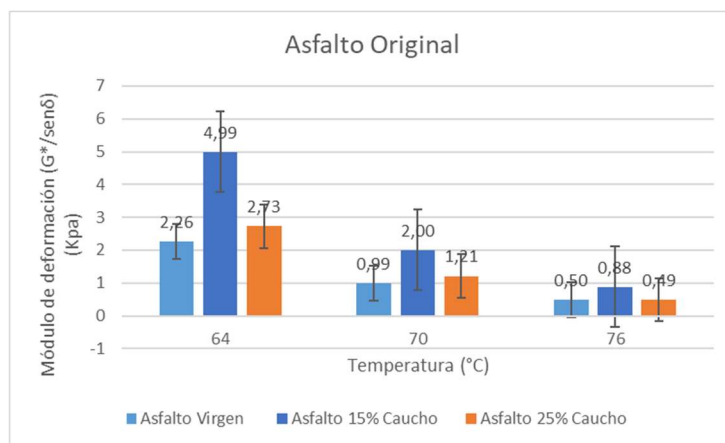
- **Cambio de masa en RTFO (ASTM D1754).**

Del cuadro 22 muestra los resultados del horno de película delgada rotacional RTFO se emplea para evaluar la susceptibilidad al endurecimiento o envejecimiento de tendría el asfalto durante las operaciones de mezclado, cuando se realiza esta prueba se debe reportar el resultado obtenido, de esta manera se puede expresar el resultado como pérdida de masa (al usar signo negativo) o ganancia de masa (utilizando signo positivo). Los resultados indican que las tres muestras se encuentran dentro de la especificación de pérdida de masa de 1.0 % máximo,

- **Cemento asfáltico original sin envejecimiento.**

De la figura 39 se muestra los resultados de los parámetros reológicos en el asfalto original sin envejecimiento y, con la incorporación de los porcentajes de 15% y 25% de caucho. De los resultados obtenidos para asfalto virgen presenta un PG 64, para caso de los porcentajes de 15% y 25% de caucho incorporado presentan en un PG 70 y PG 76 respectivamente, además en todos los casos cumplen con la especificación donde módulo de deformación ($G^*/\text{sen}\delta$) debe alcanzar un valor mínimo 1.00 kPa. Esto quiere decir que el asfalto se va a desempeñar adecuadamente ante la deformación por esfuerzos en lugares con temperaturas de 64°C, 70°C y 76°C o menores.

Figura 39: Asfalto original sin envejecimiento.



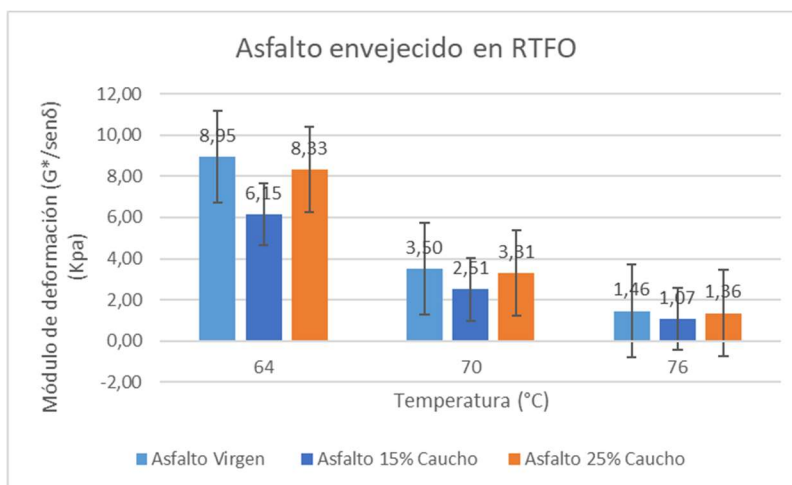
Fuente: Elaboración Propia.

- **Cemento asfáltico envejecido en horno de película delgada rotacional.**

De la figura 40 se muestra los resultados de los parámetros reológicos en el asfalto envejecido para las muestras de asfalto virgen, con la incorporación de los porcentajes de 15% y 25% de caucho. De los resultados obtenidos para asfalto virgen recae a un PG 70, para el caso de los porcentajes de 15% y 25% de caucho incorporado recaen en PG 76 y PG 76 respectivamente, además en todos los casos cumplen con la especificación donde módulo de deformación ($G^*/\text{sen}\delta$) debe alcanzar un valor mínimo 2.20 kPa.

Esto quiere decir, que el asfalto se va a desempeñar adecuadamente ante la deformación por esfuerzos en lugares con temperaturas de 70°C, 76°C y 76°C o menores, tras varios años en servicio, típicamente dos años. El ligante alcanza una condición de envejecimiento de largo plazo, por lo cual su rigidez y tendencia frágil ha aumentado.

Figura 40:Asfalto envejecido en RTFO.



Fuente: Elaboración Propia.

4.2.3. Determinación del porcentaje de caucho.

Para el ligante asfáltico, se tiene una serie de pruebas que permiten la aceptación del bitumen para la mezcla, en este caso, según se observa en los cuadros 21, 22, 23 y 24 se debe cumplir con algunas pruebas para determinar la caracterización del ligante por viscosidad y grado desempeño.

De los resultados obtenidos se puede concluir que la adición de caucho que genera una mejoría significativa en las propiedades físicas y reológicas del asfalto si se compara contra la muestra virgen, se puede apreciar que en el caso de la adición de caucho de un 25% no hay una mejora significativa en las propiedades físicas del asfalto en comparación a la adición de 15% de caucho, con los resultados obtenidos se puede ver un bajo rendimiento probablemente debido una separación de fases por una falta de fusión entre el asfalto y el caucho.

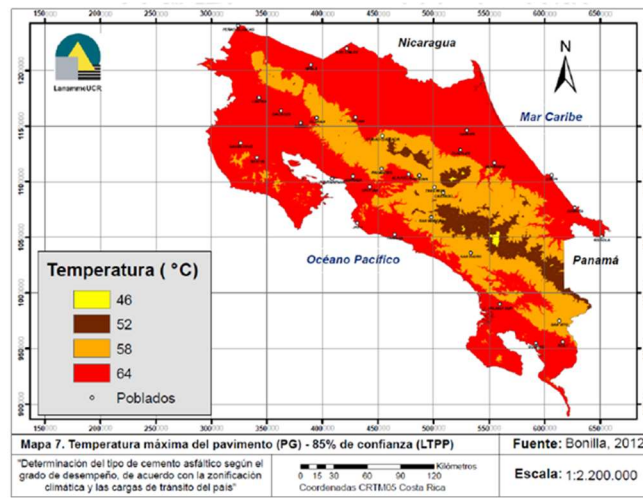
Esto significa que si se utiliza el caucho a un 25% se podría generar problemas durante la producción a una mayor escala, por lo que opta por utilizar la adición de caucho de un 15%, para los procesos subsiguientes proyecto del presente proyecto de investigación.

4.2.4. Determinación del grado de desempeño PG del proyecto de investigación.

En la figura 40 se observa que los ensayos realizados al cemento asfáltico, en los cuales se mide expresamente el módulo de deformabilidad $G^*/\sin\delta$ que permite conocer la relación entre la resistencia a la deformación producto de la aplicación de un esfuerzo cortante vs la viscosidad o elasticidad del asfalto, para así determinar la tendencia a la formación de roderas. Cuanto menor sea $\sin\delta$ más resistencia a la deformación permanente presenta el asfalto.

En la figura 41 se presenta el mapa de zonificación PG para altas temperaturas en Costa Rica. Tomando como base que el proyecto se está realizando para el Aeropuerto Internacional Daniel Oduber Quirós, ubicado en el cartón Liberia de la provincia de Guanacaste se puede determinar que para la zona de estudio establece un PG 64, pero debido al que el PG 64 se ubica en el límite de condición crítica no sería conveniente, además si se considera que el beneficio que se persigue es para la pista de aterrizaje y considerando que va utilizar un 15% de caucho, bajo este criterio se puede optar por la selección un PG 76 con esto garantizar mayor resistencia a la deformación que es lo se anda buscando en un pista de aterrizaje.

Figura 41: Mapa de zonificación PG para altas temperaturas en Costa Rica.



Fuente: (Metología de Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente para Costa Rica, 2015).

Ahora bien, de acuerdo con la normativa FAA mediante la circular de asesoramiento 150-5370-10H se indica que usando el PG inicial seleccionado, se debe aplicar el aumento de grado PG para Carpeta a Máxima Temperatura de acuerdo con el cuadro 25 se muestra a continuación.

Cuadro 25: Aumento de grado requerido.

Aircraft Gross Weight	High Temperature Adjustment to Asphalt binder Grade	
	All Pavement Types	Pavement area with slow or stationary aircraft
≤ 12,500 lbs (5670 kg)	--	1 Grade
< 100,000 lbs (45360 kg)	1 Grade	2 Grade
≥ 100,000 lbs (45360 kg)	2 Grade	3 Grade

Fuente: (FAA, Especificaciones Estándar para la construcción de aeropuertos, 2018).

Para el Aeropuerto Internacional Daniel Oduber Quirós se tiene considerado que el avión crítico de diseño es un A320 que tiene un peso bruto de 172.000 lb, por tanto, de acuerdo con el cuadro 25 y considerando que la pista de aterrizaje se encuentra dentro de la columna denominado Todo tipo de Pavimentos y con un Peso Bruto de Aeronave es ≥ 100.000 lb se debe aumentar 2 grados, eso quiere decir, que de acuerdo a PG 76 seleccionado que es el especificado quedaría un PG $76 + 12 = 88$, por lo que se selecciona el grado del desempeño siguiente que corresponde un PG 88 para el proyecto.

4.2.5. Diseño de mezcla asfáltica sin y con residuos de caucho.

El diseño propuesto, corresponde a una mezcla asfáltica en caliente que cumple la Graduación 2 con los parámetros fijados por la Administración Federal de Aviación (FAA), en su circular AC No: 150/5370-10H, cuyo propósito es establecer los estándares para la construcción de aeropuertos, más específicamente en la Parte 6, el cual trata de los Pavimentos flexibles, Ítem P-401 Pavimento de mezcla asfáltica.

Los parámetros de diseño utilizados y la disponibilidad de materia prima y tipo garantizan el cumplimiento de este del diseño de mezcla. En el anexo 4 se adjunta los valores de caracterización de la mezcla asfáltica diseñada.

A continuación, se procederá a realizar un análisis de cada uno de los resultados obtenidos de las características y comportamiento de las mezclas.

Cuadro 26: Parámetros de la mezcla con el porcentaje óptimo de asfalto sin caucho.

PARÁMETRO	VALOR OBTENIDO	ESPECIFICACIÓN FAA	CUMPLIMIENTO
Porcentaje de Vacíos de aire	4,00	3.0% - 5.0%	Cumple
VMA (Vacíos en el agregado mineral)	13,16	15.0 Mínimo	No Cumple
Gravedad específica bruta	2,370	-----	
Gravedad específica máxima teórica	2,444	-----	
Estabilidad (mínima)	3181 lb 1433 kg	2150 libras 977kg MINIMO	Cumple
Flujo	11.9 pulgadas 30.3 (cm/100)	10- 16 pulgadas 25,4 - 35.6 (cm/100)	Cumple
% Asfalto Efectivo	5,63	-----	
VFA (Vacíos llenos con asfalto)	70.3	-----	

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 27: Parámetros de la mezcla con el porcentaje óptimo de asfalto con caucho.

PARÁMETRO	VALOR OBTENIDO	ESPECIFICACIÓN FAA	CUMPLIMIENTO
Porcentaje de Vacíos de aire	4,00	3.0% - 5.0%	Cumple
VMA (Vacíos en el agregado mineral)	13,21	15.0 Mínimo	No Cumple
Gravedad específica bruta	2,367	-----	
Gravedad específica máxima teórica	2,457	-----	
Estabilidad (mínima)	3181 lb 1433 kg	2150 libras 977kg MINIMO	Cumple
Flujo	11.9 pulgadas 30.3 (cm/100)	10- 16 pulgadas 25,4 - 35.6 (cm/100)	Cumple
% Asfalto Efectivo	5,95	-----	
VFA (Vacíos llenos con asfalto)	71.2	-----	

Fuente: Elaboración propia.

4.2.6. Análisis de resultados del diseño de mezcla asfáltica sin y con residuos de caucho.

- **Densidad.**

La densidad de la mezcla compactada está definida como su peso unitario (el peso de un volumen específico de la mezcla). La densidad es una característica muy importante debido a que es esencial tener una alta densidad en el pavimento terminado para obtener un rendimiento duradero. De acuerdo con los cuadros 26 y 27, y las figuras 42 y 43 los resultados indican un valor de 2370 kg/m³ para la mezcla sin caucho o mezcla patrón y de 2367 kg/m³ para la mezcla con caucho. Estos parámetros no cuentan con valores de especificación de acuerdo con la normativa. Pero estos valores son de importancia esto porque la densidad obtenida en el laboratorio se convierte la densidad patrón, y es usada como referencia para determinar si la densidad del pavimento terminado es, o no, adecuada. Comparando los dos resultados la densidad de la mezcla con caucho es ligeramente menor con respecto a la mezcla sin caucho o mezcla patrón es congruente con el resultado de los vacíos de la mezcla ya que la densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre más alta la densidad menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa.



Figura 42: Porcentaje de asfalto vs Densidad.

Fuente: Elaboración Propia



Figura 43: Porcentaje de asfalto vs Densidad.

Fuente: Elaboración Propia

- **Porcentaje de vacíos de aire.**

Los vacíos de aire son espacios pequeños de aire, o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios adonde pueda fluir el asfalto durante su compactación adicional. El porcentaje permitido de vacíos de acuerdo con la normativa está entre 3% y 5%. De acuerdo con los cuadros 26 y 27 y las figuras 44 y 45, para ambos casos se utiliza vacíos de 4,0%, mismos que están dentro de la especificación.

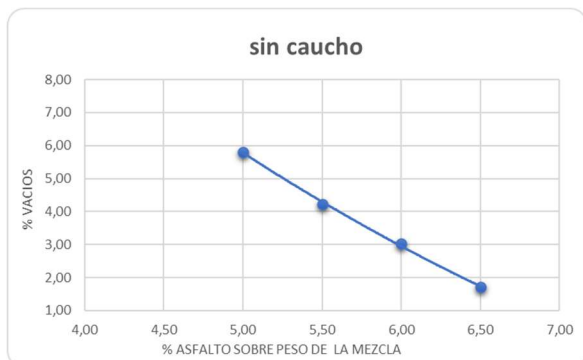


Figura 44: Porcentaje de asfalto vs Vacíos.

Fuente: Elaboración Propia.

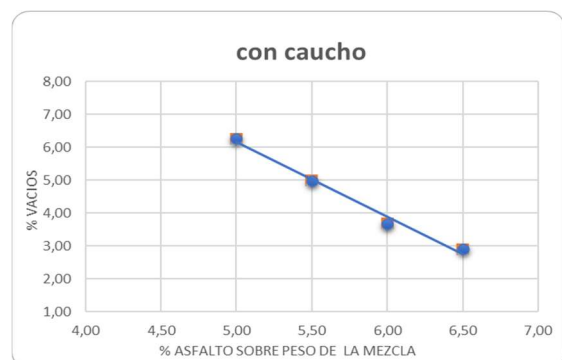


Figura 45: Porcentaje de asfalto vs Vacíos.

Fuente: Elaboración Propia.

- **Estabilidad.**

La estabilidad de un asfalto es su capacidad de resistir desplazamientos y deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y lisura bajo cargas repetidas, un pavimento inestable desarrolla ahuellamientos (canales), ondulaciones (corrugación) y otras señas que indican cambios en la mezcla. El valor permitido de acuerdo con la normativa es de 2159 lb (977kg) MÍNIMO. De acuerdo con los cuadros 26 y 27 y las figuras 46 y 47 los resultados indican una estabilidad de 3181 lb(1483kg) para ambas mezclas lo cual indica que están dentro de la especificación.

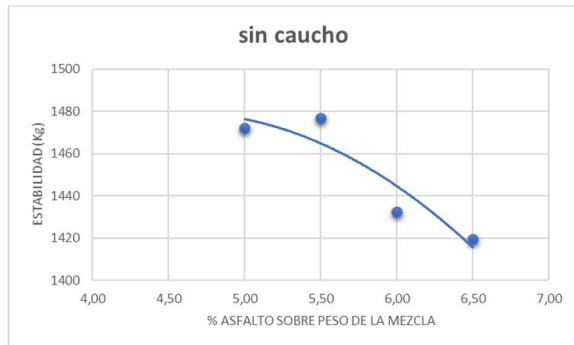


Figura 46: Porcentaje de asfalto vs Estabilidad.
Fuente: Elaboración Propia.

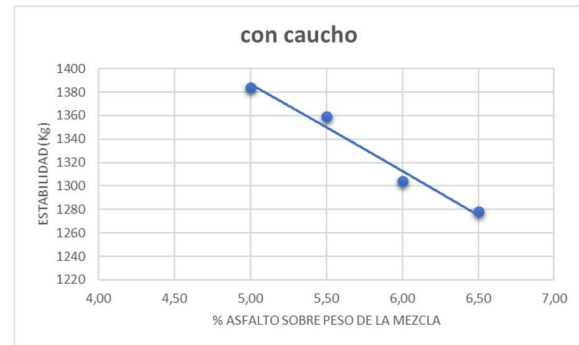


Figura 47: Porcentaje de asfalto vs Estabilidad.
Fuente: Elaboración Propia.

- **Vacíos en el agregado mineral (VMA).**

Los vacíos en el agregado mineral (VMA) son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado en una mezcla compactada de pavimentación, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto. El VMA representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto (todo el asfalto menos la porción que se pierde en el agregado) y el volumen de vacíos necesario en la mezcla. Los valores permitidos de acuerdo con la normativa son de un 15.0% MÍNIMO. De acuerdo con los cuadros 26 y 27 y las figuras 48 y 49 los resultados indican valores de 13.16% para la mezcla sin caucho o mezcla patrón y 13.21% para la mezcla con caucho por lo que ambas mezclas están fuera de la especificación. Sin embargo, con respecto a la normativa la granulometría se debe engrosar el esqueleto granulométrico con el fin de abrir más los vacíos entre partículas para acomodar más asfalto y aire, es decir, quizás se requiera más asfalto. Esto se debe a que el Gbs del caucho no se pudo medir con los métodos tradicionales.

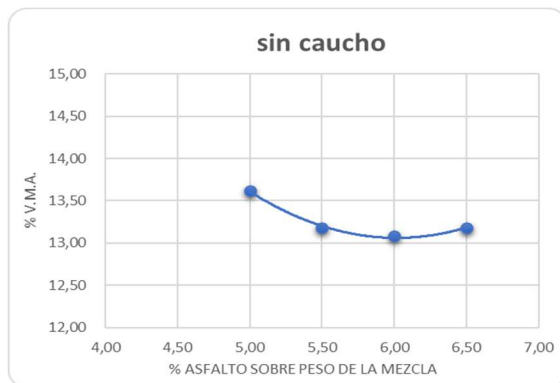


Figura 48: Porcentaje de asfalto vs VMA.
Fuente: Elaboración Propia.

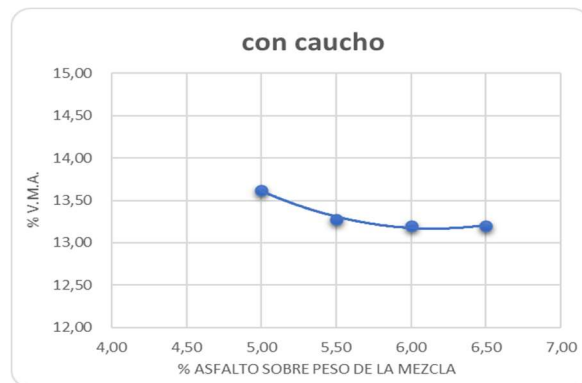


Figura 49: Porcentaje de asfalto vs VMA.
Fuente: Elaboración Propia.

- **Flujo.**

La fluencia Marshall, medida en centésimas de pulgada representa la deformación de la briqueta. La deformación está indicada por la disminución en el diámetro vertical de la briqueta. Los valores permitidos de acuerdo con la normativa son de un 15.0% MÍNIMO. El valor permitido de acuerdo con la normativa es de 10-16 pulgadas (25.4cm – 35,6 cm/100). De acuerdo con los cuadros 26 y 27 y las figuras 50 y 51 los resultados indican que el flujo es de 11.9 pulgadas (30.3 cm/100) para ambas mezclas lo cual indican que los valores obtenidos están dentro de la especificación. Por se podría presentar buen comportamiento ante las deformaciones plásticas.

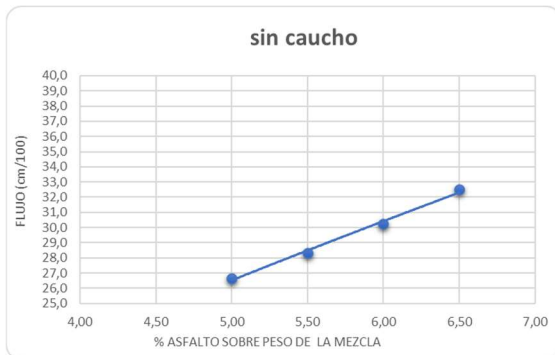


Figura 50: Porcentaje de asfalto vs Flujo.
Fuente: Elaboración Propia.

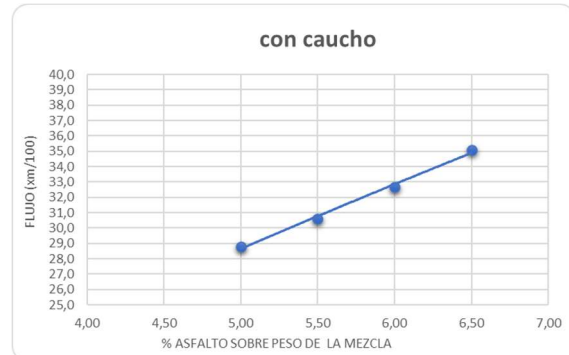


Figura 51: Porcentaje de asfalto vs Flujo.
Fuente: Elaboración Propia.

- **Vacíos llenos de asfalto (VFA).**

Los vacíos llenos de asfalto, VFA, son el porcentaje de vacíos intergranulares entre las partículas de agregado (VMA) que se encuentran llenos de asfalto. El VMA abarca asfalto y aire. De acuerdo con los cuadros 26 y 27, y las figuras 52 y 53 los resultados indican un valor 70.3% para la mezcla sin caucho o mezcla patrón y 71.2% para la mezcla con caucho. Estos parámetros no cuentan con valores de especificación de acuerdo con la normativa. Pero estos valores El criterio VFA ayuda a evitar mezclas que puedan ser susceptibles a roderas en situaciones de alto tráfico.

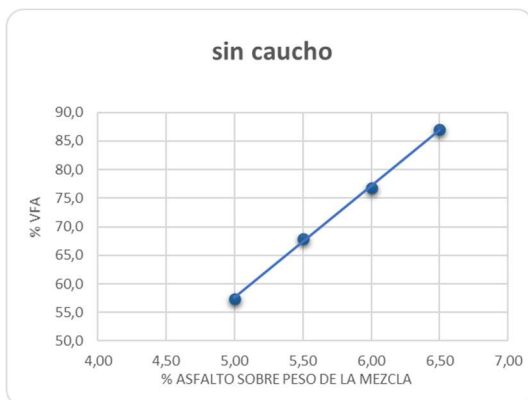


Figura 52: Porcentaje de asfalto vs VFA.
Fuente: Elaboración Propia.

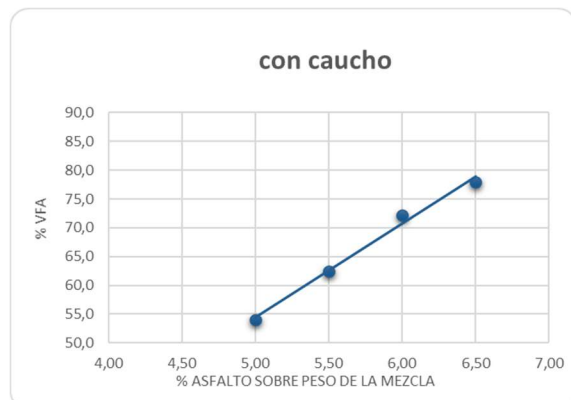


Figura 53: Porcentaje de asfalto vs VFA.
Fuente: Elaboración Propia.

- **Contenido de asfalto.**

La proporción de asfalto en la mezcla es importante y debe ser determinada exactamente y luego controlada con precisión en la obra. El contenido de asfalto de una mezcla particular se establece usando los criterios establecidos por el método de diseño seleccionado. El contenido total de asfalto es la cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla.

Con base en estudio de valores obtenidos de las curvas Marshall y criterios de diseño, se define un valor de asfalto óptimo sobre la mezcla sin caucho o mezcla patrón que corresponde a un **5.63%** y para la mezcla con caucho un **5.95%** aplicándose el criterio de Vacíos de Aire, VMA y VFA, bajo las condiciones presentadas para los fines comparativas.

En el anexo No. 4 se presentan las memorias de cálculo, gráficos de tendencia, diseño y falla de los especímenes de ensayo preparados bajo la metodología de diseño Marshall.

4.3. **Objetivo 3. Comparar el comportamiento dinámico de las mezclas asfálticas en caliente con y sin residuo de caucho.**

El valor del módulo de rigidez de la mezcla asfáltica es dependiente de la temperatura y de la frecuencia de aplicación de la carga, es por esto por lo que se le da el nombre de módulo dinámico (E^*). Esta dependencia está asociada al comportamiento viscoelástico del ligante que compone la mezcla.

En las siguientes tablas se muestran los ensayos completos de los módulos dinámicos (psi) para 4 temperaturas y 6 frecuencias de carga (Hz), para las mezclas sin caucho o mezcla patrón y la mezcla con caucho.

Cuadro 28: Valores E^* obtenidos en el laboratorio mezcla sin caucho.

Temperatura, °F	Módulo dinámico E^* , psi					
	25 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.1 Hz
40	2171557	2001331	1878145	1591985	1466963	1180029
70	1563703	1383082	1246843	956622	834355	571256
100	538043	417709	345045	204890	163893	90325
130	147905	99196	73210	33886	25072	13880

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 29: Valores E^* obtenidos en el laboratorio mezcla con caucho.

Temperatura, °F	Módulo dinámico E^* , psi					
	25 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.1 Hz
40	2375819	2211830	2090336	1828929	1713817	1444917
70	1688581	1517484	1392268	1113553	994767	729976
100	690623	555302	471470	305643	253285	152822
130	225534	162201	125806	65939	51348	28539

Fuente: Elaboración Propia.

En las Figuras 54 y 55, se muestran las curvas de módulo dinámico en función del tiempo de carga, ambos en escala logarítmica, a diferentes temperaturas, para las mezclas sin caucho o mezcla patrón y con caucho.

Para la realización de las curvas maestras se procede a superponer las curvas tomando como curva de referencia la más cercana a la temperatura ambiente, en este caso la de 70 °F(21.1°C), para esto se aplica un

factor de cambio con el objetivo de desplazar las curvas a un nuevo intervalo de tiempo. La Figura 54 y 55 muestran las curvas maestras finales obtenidas al aplicar la superposición y las Figuras 56 y 57 muestran el factor de cambio aplicado como función de la temperatura, que se encuentran en el anexo 5 que corresponden a las gráficas del Factor de cambio versus Temperatura.

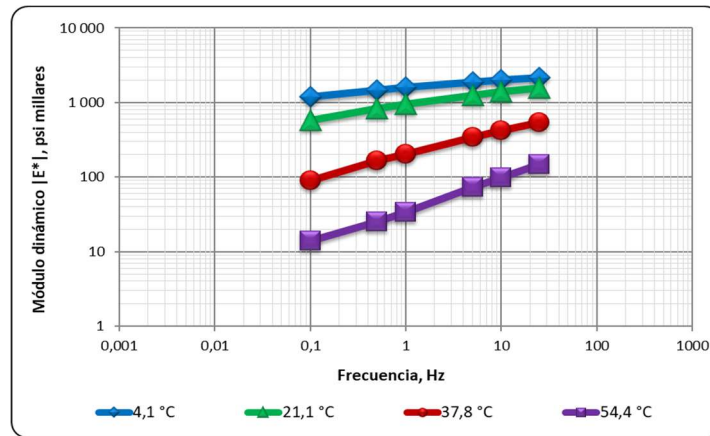


Figura 54: Módulo dinámico mezcla sin caucho.
Fuente: Elaboración Propia.

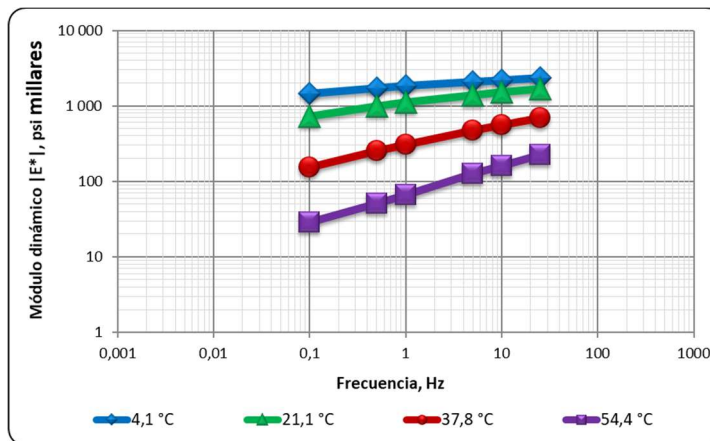


Figura 55: Módulo dinámico mezcla con caucho.
Fuente: Elaboración Propia.

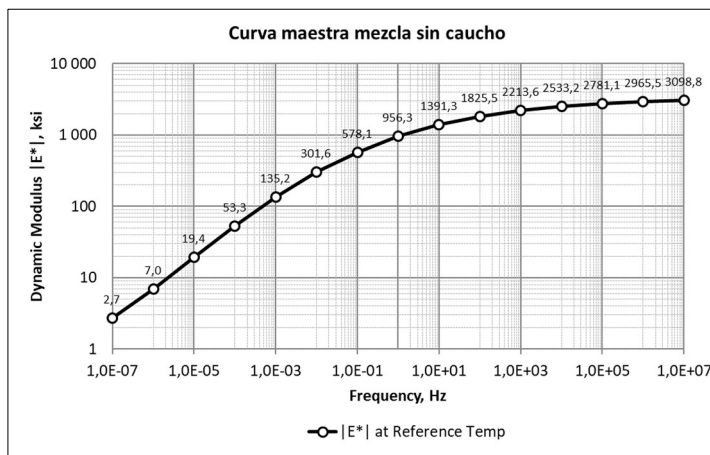


Figura 56: Curva maestra de módulo dinámico mezcla sin caucho.
Fuente: Elaboración propia.

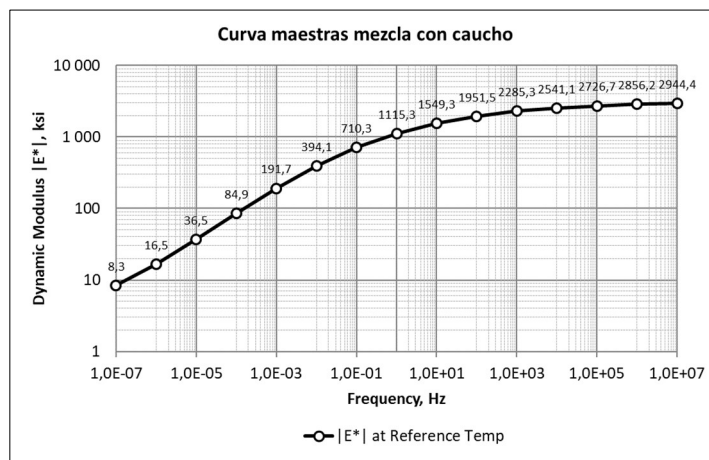


Figura 57: Curva maestra de módulo dinámico mezcla con caucho.
Fuente: Elaboración propia.

4.3.1. Análisis de resultados de los módulos dinámicos de las mezclas asfálticas en caliente con y sin residuo de caucho.

Los ensayos se realizaron a las temperaturas de 40°F(4.1°C), 70°F(21.1°C), 100°F(37.8°C), 130°F(54,4°C) y una frecuencia de carga de 25Hz, 10Hz, 5Hz, 1Hz, 0.5Hz y 0.1Hz, comenzando por las temperaturas bajas a las altas y de las frecuencias altas a las bajas. Es importante indicar que la utilización de estas frecuencias y temperaturas son requeridas para ajustar la curva maestra. En el anexo 5 se pudo ver los resultados de las pruebas para ambas mezclas. Además, es importante indicar que cuando aumenta la frecuencia, aumenta el valor del módulo, cuando aumenta la temperatura, disminuye el valor del módulo y el efecto de la frecuencia es más importante para las temperaturas altas.

Los resultados de los ensayos de modulo dinámico fueron utilizados para construir curvas maestras de las mezclas asfálticas mediante el principio de superposición como se indicó anteriormente. Estas curvas permiten caracterizar las propiedades mecánicas de la mezcla tomando en cuenta el efecto de la temperatura y la frecuencia de carga.

En la figura 58 muestran las curvas maestras para las mezclas sin y con residuos de caucho respectivamente se pueden observar ciertas particularidades:

- Ambas mezclas tienen un comportamiento sumamente parecido dentro de todos los rangos de temperaturas y frecuencias de carga.
- Puede observarse que para la mezcla con residuos de caucho a bajas frecuencias presenta un mayor modulo en comparación a la mezcla sin residuos de caucho, sin embargo, conforme aumenta la frecuencia de carga los módulos para ambas mezclas se comportan de manera prácticamente similares.
- Los resultados mostraron que la mezcla asfáltica con caucho presentó valores de modulo dinámico ligeramente mayores para todas las temperaturas y frecuencias de carga y que es menos susceptible a la deformación permanente que la mezcla asfáltica sin caucho o mezcla patrón.

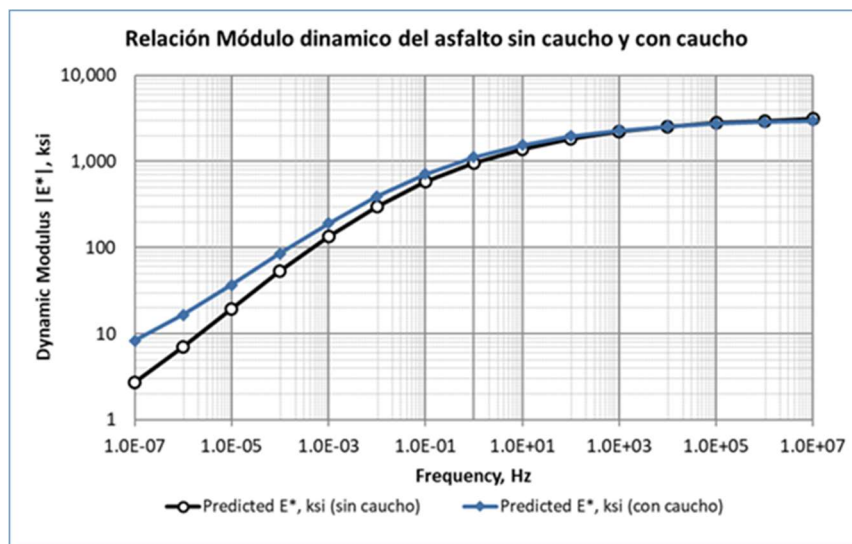


Figura 58: Relación curvas maestras de módulo dinámico sin y con caucho.
Fuente: Elaboración propia

4.4. Objetivo 4. Evaluar la resistencia a la deformación permanente y daño inducido por humedad con y sin adición de residuo de caucho mediante ensayos de laboratorio.

4.4.1. Determinación de la resistencia a la deformación permanente de la mezcla asfáltica con y sin adición de residuo de caucho.

Con la muestra de mezcla asfáltica en caliente se moldearon especímenes cilíndricos de 150 mm de diámetro y 75 mm (± 2 mm) de altura posterior a un proceso de acondicionado de 240 min (± 5 min) a una temperatura de 135 °C (± 3 °C). Para finalizar se acondicionó los especímenes a 60°C (mín. 6 h) y se procedió a llevar el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA) a la temperatura de ensayo y se aplicó una presión de 100 psi a las mangueras. Se programaron 8000 ciclos de carga, donde se registró automáticamente la deformación en dos puntos por espécimen. Al momento de finalizar los ciclos de ensayo se reportó la deformación plástica en cada punto (conformado por dos especímenes) y el promedio general de los 6 especímenes de acuerdo con la Norma AASHTO T-340. Y cumplimiento de la especificación según FAA de acuerdo con la Circular de Asesoramiento 150/5370-10H, Parte 6 Pavimento Flexible, Ítem P-401 Pavimento de mezcla de asfalto. (ver anexo 1 y 6).

Cuadro 30: Resultado APA de las muestras sin residuo de caucho.

PARÁMETRO	VALOR OBTENIDO	ESPECIFICACIÓN FAA	CUMPLIMIENTO
Deformación general promedio de las 6 muestras ensayadas (5,63% contenido de asfalto sin caucho)	1,605 mm	MENOR QUE 5 mm	CUMPLE

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 31: Resultado APA de las muestras con residuos de caucho.

PARÁMETRO	VALOR OBTENIDO	ESPECIFICACIÓN FAA	CUMPLIMIENTO
Deformación general promedio de las 6 muestras ensayadas (5,95% contenido de asfalto sin caucho)	1,234 mm	MENOS QUE 5 mm	CUMPLE

Fuente: Elaboración propia.

4.4.2. Análisis de resultados de la resistencia a la deformación permanente de la mezcla asfáltica con y sin adición de residuo de caucho.

Las deformaciones permanentes medidas mediante el ensayo APA se presentan en los Cuadros 30 y 31. Se aprecia que el ensayo realizado en la mezcla con caucho tiende a disminuir el ahuellamiento. Esto se debe que caucho mejora las propiedades físico mecánicas de la mezcla asfáltica.

Además, se observa que ambas muestras cumplen la especificación de la FAA para este tipo de pruebas desempeño.

4.4.3. Determinación daño inducido por humedad de la mezcla asfáltica con y sin adición de residuo de caucho.

Los resultados se obtuvieron a partir de la ejecución del ensayo de evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas compactadas, utilizando la Prueba de Tracción Indirecta (TSR) Este método cubre la preparación de especímenes de ensayo y la medición del cambio en la resistencia a la tensión diametral, como resultado de los efectos de la saturación de agua y un acondicionamiento acelerado en un baño de agua, de mezclas asfálticas compactadas. En el anexo 7 se presenta detalles de los datos del ensayo.

Cuadro 32: Resultado TSR de las muestras sin residuos de caucho.

PARÁMETRO	VALOR OBTENIDO	ESPECIFICACIÓN FAA	CUMPLIMIENTO
Deformación general promedio de las 6 muestras ensayadas (5,63% contenido de asfalto sin caucho)	99.98%	NO MENOR QUE [80]	CUMPLE

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 33: Resultado TSR de las muestras con residuos de caucho.

PARÁMETRO	VALOR OBTENIDO	ESPECIFICACIÓN FAA	CUMPLIMIENTO
Deformación general promedio de las 6 muestras ensayadas (5,95% contenido de asfalto sin caucho)	98.59%	NO MENOR QUE [80]	CUMPLE

Fuente: Elaboración propia.

4.4.4. Análisis de resultados daño inducido por humedad de la mezcla asfáltica con y sin adición de residuo de caucho.

El resultado del ensayo de TSR se muestran en los cuadros 32 y 34 en donde se evidencia que a para el caso de este proyecto partir del agregado y estas fuentes utilizados de los resultados la adición de residuos de caucho en la mezcla no aporta significativa al mejoramiento a la susceptibilidad al daño por humedad. Es importante indicar que ambas mezclas cumplen con la especificación de la FAA para este tipo de pruebas desempeño. Pero es claro que el caucho posee una gran viabilidad para considerarse como mezcla asfáltica sostenible.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1. Conclusiones.

1. Se determinó que los agregados pétreos cumplen con los requisitos establecidos en las especificaciones técnicas de acuerdo con la Circular de Asesoramiento AC 150/5370-10H, Parte 6 Pavimento Flexible, Ítem P-401 Pavimento de mezcla de asfalto de la FAA.
2. Se debe prestar atención debido que existe gran cantidad de caucho que pasa en cada una de las mallas, lo cual hace que se deba tener cuidado a la hora de generar los diseños de mezcla para garantizar que cumplan con la especificación.
3. Para el presente trabajo de investigación se utilizan dos porcentajes de caucho 15% y 25% y de los resultados de físicos y reológicas se utilizó la adición de caucho de un 15%.
4. Con base a los resultados obtenidos de la mezcla sin y con residuos de caucho se determinó porcentajes óptimos de asfalto de 5.63% y 5.95% respectivamente.
5. De acuerdo con los resultados obtenidos del ensayo del módulo dinámico la mezcla con residuos de caucho a bajas frecuencias presenta un mayor modulo en comparación a la mezcla sin residuos de caucho, sin embargo, conforme aumenta la frecuencia de carga los módulos para ambas mezclas se comportan de manera prácticamente similares, por lo que puede concluir que el uso de residuo de caucho en las mezclas asfálticas para aeropuertos mejor el desempeño de estas.
6. En los resultados obtenidos del analizador de pavimentos asfálticos (APA) ambas mezclas cumplen requisitos establecidos en las especificaciones técnicas de acuerdo con la Circular de Asesoramiento AC 150/5370-10H, Parte 6 Pavimento Flexible, Ítem P-401 Pavimento de mezcla de asfalto de la FAA.
7. Los ensayos del daño inducido por humedad (TSR) muestran que la adición de residuos de caucho en la mezcla no aporta una mejoría significativa al mejoramiento a la susceptibilidad al daño por humedad. Sin embargo, ambas mezclas cumplen requisitos establecidos en las especificaciones técnicas de acuerdo con la Circular de Asesoramiento AC 150/5370-10H, Parte 6 Pavimento Flexible, Ítem P-401 Pavimento de mezcla de asfalto de la FAA.
8. Se puede concluir que estas técnicas y materiales tienen mucha aplicabilidad para su uso en los pavimentos aeroportuarios, debido a los beneficios que aporta los asfaltos modificados con caucho a los problemas de deformación permanente que constituye uno de los principales deterioros de los pavimentos en las pistas de los aeropuertos. Además, es importante indicar que la reutilización de caucho ayuda a reducir el impacto ambiental.

5.2. Recomendaciones.

1. Se recomienda ampliar a otras fuentes de materias pétreas a nivel nacional a fin determinar si en país existe material que pueda cumplir requisitos establecidos en las especificaciones técnicas de acuerdo con la Circular de Asesoramiento AC 150/5370-10H, Parte 6 Pavimento Flexible, Ítem P-401 Pavimento de mezcla de asfalto de la FAA.
2. Establecer métodos de ensayo para la caracterización y especificaciones técnicas del caucho provenientes de otros Aeropuertos del país para determinar su factibilidad de uso como modificadores del cemento asfáltico para la mezcla asfáltica.
3. Se debe hacer una correcta elección del tipo de ligante asfáltico de acuerdo con la zona donde será colocada la mezcla asfáltica, para evitar que la temperatura influya en gran medida en la deformabilidad de la mezcla, entre menos susceptible a la temperatura sea el ligante asfáltico, más resistente a la deformación plástica será la mezcla a altas temperaturas. Se desean mayormente asfaltos que presenten una alta viscosidad y una baja susceptibilidad a la temperatura. Los contenidos óptimos de asfalto se deben respetar durante la fabricación de la mezcla en planta.
4. Se debe establecer la forma de producción, para posteriormente poder aplicar esta nueva técnica a la pavimentación de aeropuertos a fin de disminuir los efectos de la deformación permanente en las capas de rodadura.
5. Se recomienda construir tramos experimentales que permitan adquirir experiencia sobre la bondad del empleo del residuo de caucho incorporado por vía húmeda en mezclas asfálticas.
6. Realizar un análisis costo-beneficio para determinar la factibilidad de uso de los residuos de caucho para las pistas de aeropuertos y su producción a mayor escala.
7. Con el fin de garantizar que los resultados obtenidos de los ensayos a la mezcla original como de la mezcla modificada sean aceptables, es recomendable comprobar que los agregados pétreos y el material bituminoso usados en su fabricación cumplan con las especificaciones técnicas.
8. Se recomienda realizar el diseño de mezclas mediante la metodología SUPERPAVE.
9. Se debe monitorear en todo momento la temperatura de mezclado debido a las altas temperaturas que se requiere para lograr una buena interacción del cemento asfáltico con caucho.
10. Se deben realizar pruebas más exhaustivas al caucho proveniente de la pista de para solventar el problema de la poca información técnica de este agregado específicamente en la utilización de mezclas asfálticas.
11. Se recomienda no almacenarlo por períodos muy extensos de tiempo.
12. Se recomienda realizar pruebas de fatiga para determinar su contribución a la resistencia a los problemas de agrietamiento en las mezclas asfálticas.
13. Se debe analizar el caucho mediante tramos establecidos para determinar si existe variabilidad.

CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA

- Aguiar Moya, J. P., Cruz Abarca, L. M., Porras Méndez, A., Vargas, N. A., & Loria Salazar, L. G. (2015). *Materiales de desecho como modificantes de la Mezcla Asfáltica*. San José, Costa Rica: : Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales.
- Albarracin Cristiano, D. M., & Pérez Camargo, C. H. (2011). *Estado del arte en el diseño de los pavimntos aeroportuarios*. Bucaramanga.
- Bacchetta, G. (2003). *"Obtención de cementos asfálticos moficados con incorporación de asfaltita y caucho reciclado de neumáticos"*. Equipamientos, manufactura y especificaciones técnicas. Ecuador.
- Camacho Salazar, P. (2016). Evaluación de reciclado de pavimentos asfálticos (RAP) para uso en pavimentos expuestos(Tesis de Maestría). *Instituto Tecnológico de Costa Rica*. Costa Rica.
- Cubillos Estrella, C. A., & Núñez Galeano, C. E. (2013). *Análisis de la susceptibilidad al daño por humedad de una mezcla asfáltica para rodadura empleando asfaltos sumergidos*. Bogota, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana.
- Delgado Alamilla, H., Gómez López, J., & Flores Flores, M. (2017). Propuesta de método de prueba de módulo dinámico en mezclas asfálticas para México. *Secretaria de Comunicación y Transporte*, 86.
- Diaz Claros, C. M., & Castro Celis, L. C. (2017). Implementación del Grano de Caucho Reciclado(GCR) proveniente de Llantas usadas para mejorar las Mezclas Asfálticas y Garantizar Pavimentos Sostenibles en Bogotá. *Tesis*. Bogotá, Colombia.
- Elizondo Arrieta, F., Salazar Delgado, J., & Villegas Villegas, E. (2010). Caracterización de Asfaltos modificados con diferentes Aditivos. *Ingeniería* , 81-92.

- FAA. (2018). *AC 150/5370-10H, Parte 6 Pavimento Flexible, Ítem P-401 Pavimento de mezcla de asfalto.*
- FAA. (2018). Especificaciones Estándar para la construcción de aeropuertos. *Circulares de Asesoramiento 150 /5370-10G.*
- Fernández Rodríguez, P. E., & Ruiz Bedoya, N. A. (2018). Mezcla Asfáltica modificada con poliestireno por vía seca.(Tesis de Pregrado). *Pontificia Universidad Católica del Ecuador.* Quito.
- Garnica Anguas, P., Delgado Alamilla, H., & Sandoval Sandoval, C. D. (2005). Análisis de varianza del efecto de algunos factores que influyen en la deformación permanente de mezclas asfálticas. *Secretaria de Comunicaciones y Transporte, Instituto Mexicano del Transporte.*
- Garnica Anguas, P., Flores Flores, M., Gómez López, J. A., & Delgado Alamilla, H. (2005). *Caracterización Geomecánica de Mezclas Asfálticas.* Sanfandila, Mexico: Secretaria de Comunicación y Transporte.
- Jiménez Acuña, M., Ulloa Calderón, A., & Molina Zamora, D. (2010). Implementación de los ensayos de laboratorio para diseño de mezcla y evaluación del desempeño para sellos de lechada asfáltica(Slurry Seals) en Costa Rica. 1-60.
- Lanamme. (2019). *Catálogo de ensayos para mezclas asfálticas.* San José, Montes de Oca: Centro de Transferencia Tecnológica.
- Leiva Padilla, P., Leiva Villacorta, F., Pablo Aguiar, J., & Loria Salazar, L. G. (2013). *Herramienta de Cálculo de la Curva Maestra de Módulo Dinámico.* San Pedro de Mostes de Oca: LanammeUCR.

- Leiva Villacorta, F. (2013). *Estudio del Módulo Complejo de Mezclas Asfálticas. Desarrollo de Curvas Maestras Ira Parte*. San Pedro de Montes de Oca: LanammeUCR.
- Leiva, F. (2004). *Modulo Dinámico de Mezclas Asfálticas*. San Pedro de Montes de Oca: LanammeUCR.
- Leiva Villacorta, F., Jiménez Acuña, M., Aguiar Moya, J. P., & Loría Salazar, L. G. (2015). *Metología de Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente para Costa Rica*. San Pedro de Montes de Oca: LanammeUCR.
- Llago Serrano, R. C. (2015). Empleo en mezclas asfálticas de cauchos recuperado de neumaticos fuera de uso(Tesis de Maestría). *Univerisdad de Politécnica de València*. España.
- Loayza León, O., Rodríguez Castro, E., & Salazar Delgado, J. (2017). Comparación de los métodos de contenido de asfalto de mezcla asfáltica en caliente. *Modelos & Materiales*, 11-19.
- Marín Uribe, C. R., & Guzmán Meléndez, M. R. (2007). Comparación de Módulos Dinámicos de probetas elaboradas por el Método Marshall y por Método Superpave. *Ingenieria Universidad de Medellín*, 76.
- Marrugo Baena, Y., & Orozco Lora, J. (2015). *Estudio sobre mezclas asfalticas tipo P-401 y su aplicación a Pavimentos Aeroportuarios*. Cartagena.
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2015). *Manual de Especificaciones Generales para la Conservación de Caminos, Carreteras y puentes (MCV-2015)*. San josé.
- Miranda Argüello, F. (2017). *Daño por Humedad en Mezclas Asfálticas*. San Pedro de Montes de Oca: LanammeUCR.

- Muñoz López, A. P., & Orquera Guerrero, M. F. (2018). Mejoramiento de una mezcla asfáltica con la adición del residuo de caucho tras remoción de la pista de aterrizaje del Aeropuerto Internacional Mariscal SUCRE, por vía seca(Tesis de Pregado). *Pontificia Univeridad Católica de Ecuador*. Ecuador.
- NCAT. (1996). *Hot Mix Asphalt Materiales, Mixture Design, and Construction* . Lanham Maryland: NCAT.
- Orjuela Gonzales, A. V., & Jiménez Morena, J. L. (2020). *Comparación de las Propiedades Fisicomecánicas de una Mezcla Asfáltica con una de Grano de Caucho Reciclado*. Bogotá. *Pavimentos Aeroportuarios*. (06 de junio de 2013). Obtenido de www.aerocivil.go.co
- Reyes Lizcano, F. A., Madrid Ahumada, M. F., & Salas Callejas, S. X. (2007). Mezclas asfálticas modificadas con un elastómero (caucho) y un plastómero (tiras bolsas plástica). *Infraestructura Vial*, 25-34.
- Rodríguez Castro, E. (2016). *Uso de polvo de caucho de llantas*. San José, Costa Rica: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales.
- Salazar Delgado, J. (2008). Evaluación de la factibilidad del uso en Costa Rica de polímeros modificantes de asfalto incorporados en planta. San José, Costa Rica: Unidad de Investigación en infraestructura Vial. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales.
- Torres Velázquez, R., Hernández Villares, H., Romero Zepeda, F., & Torres Verdín, V. (2016). Pruebas de desempeño en diferentes mezclas Asfálticas. *Entre Textos*, 97-107.

Vargas Nordcbeck, A. (2013). *Evaluación del Desempeño de Mezclas Asfálticas en Caliente con y sin la adición de Polímeros Modificantes para Mezclas Típicas en Costa Rica*. San Pedro de Montes de Oca: LanammeUCR.

CAPÍTULO 7: APÉNDICES

Ensayo en el equipo APA



Foto 1: Muestras con caucho



Foto 2: Muestras sin caucho



Foto 3: Muestras sin caucho



Foto 4: Equipo APA

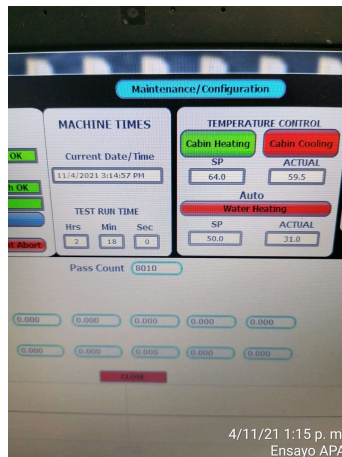


Foto 5: Condiciones de la prueba



Foto 6: Preparación para ensayo



Foto 7: Prueba Finalizada



Foto 8: Prueba Finalizada

Ensayo compactador Giratorio SUPERPAVE



Foto 1: Muestras con y sin caucho.



Foto 2: Acondicionamiento muestras.



Foto 3: Preparación de las muestras.



Foto 4: Preparación de las muestras.



Foto 5: Peso de las muestras.



Foto 6: Muestras preparadas.



Foto 7: Compactador
SUPERPAVE



Foto 8: Prueba en ejecución



Foto 9: Valores del ensayo



Foto 10: Prueba realizada

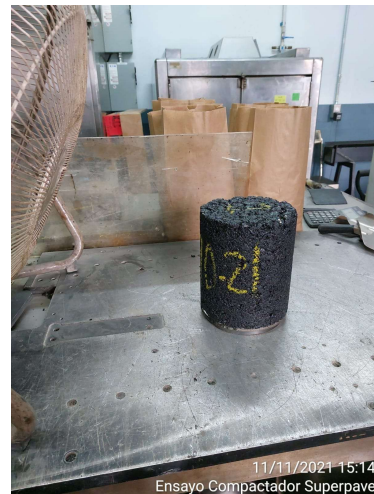


Foto 10: Muestra compactada



Foto 11: Muestras listas.

Ensayo módulo dinámico



Foto 1: Muestras acondicionadas



Foto 2: Preparación muestra.

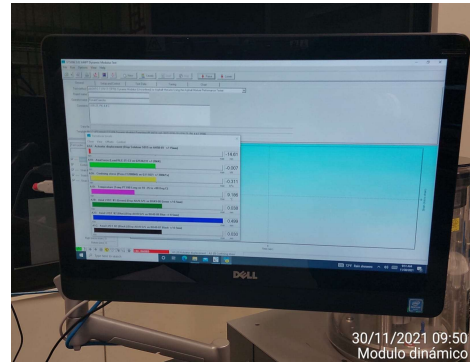


Foto 3: Calibración de la muestra.



Foto 4: Muestra a ensayar.

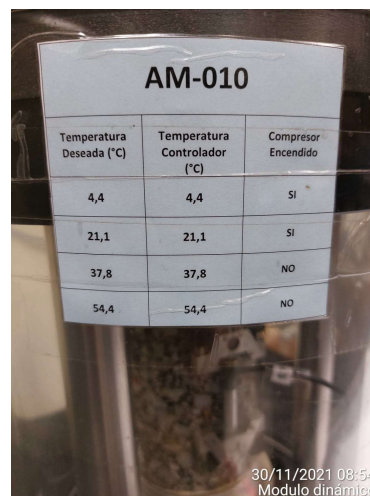


Foto 5: Temperatura del ensayo.

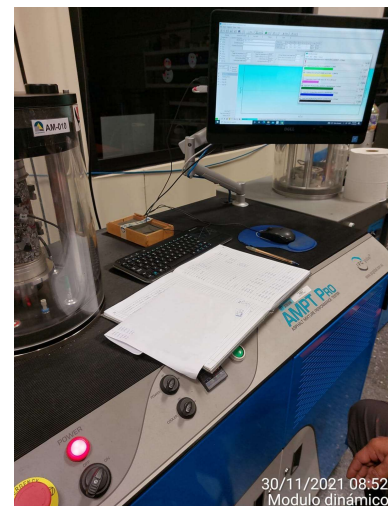


Foto 6: Control de calibración

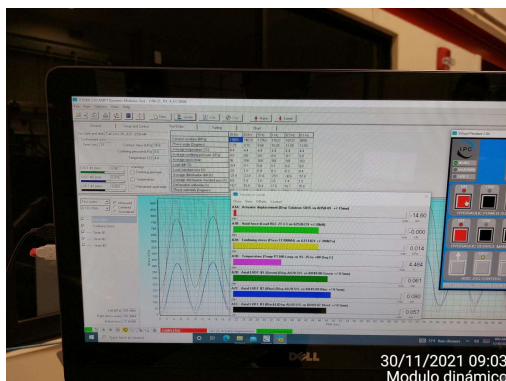


Foto 7: Resultados del ensayo.

CAPÍTULO 8: ANEXOS

Anexo 1. Circular de Asesoramiento AC 150/5370-10H, Parte 6 Pavimento Flexible, Ítem P-401 Pavimento de mezcla de asfalto.

This specification is intended to be used for the surface course for airfield flexible pavements subject to aircraft loadings of gross weights greater than 30,000 pounds (13,600 kg) and is to apply within the limits of the pavement designed for full load bearing capacity. Item P-401 may also be used as a stabilized base course. For airfield pavement projects at non primary airports, serving aircraft less than 60,000 pounds (27216 kg), state highway specifications may be used in states where the state has requested and received FAA approval to use state highway specifications.

The dimensions and depth of the “surface course” this specification applies to shall be as defined by the Engineer’s pavement design performed in accordance with advisory circular (AC) 150/5320-6, Airport Pavement Design and Evaluation and FAARFIELD. The current version of FAARFIELD is available at:
www.faa.gov/airports/engineering/design_software/

For small maintenance and repair projects less than 3000 tons (2720 tones), P-403 may be used for the surface course.

For courses other than the surface course, such as stabilized base courses, asphalt binder courses and/or truing and leveling courses; for pavements designed to accommodate aircraft gross weights of 30,000 pounds (13,600 kg) or less; and for pavements intended to be used for roads, shoulder pavements, blast pads, and other pavements not subject to full aircraft loading, specification Item P-403 may be used.

This specification contains job mix formula options for both Marshall and Gyratory Mix Design Methods. The Engineer shall select the method to be used for the project, considering the prevalent method in use in the local project area. The specifications must be edited to follow one methodology or the other. The bid documents can not include both design methodologies.

DESCRIPTION

401-1.1 This item shall consist of pavement courses composed of mineral aggregate and asphalt binder mixed in a central mixing plant and placed on a prepared base or stabilized course in accordance with these specifications and shall conform to the lines, grades, thicknesses, and typical cross-sections shown on the plans. Each course shall be constructed to the depth, typical section, and elevation required by the plans and shall be rolled, finished, and approved before the placement of the next course.

MATERIALS

401-2.1 Aggregate. Aggregates shall consist of crushed stone, crushed gravel, crushed slag, screenings, natural sand, and mineral filler, as required. The aggregates should have no known history of detrimental pavement staining due to ferrous sulfides, such as pyrite. Coarse aggregate is the material retained on the No. 4 (4.75 mm) sieve. Fine aggregate is the material passing the No. 4 (4.75 mm) sieve.

Some aggregates may contain ferrous sulfides and iron oxides which can cause stains on exposed surfaces. In areas where staining has been a problem or is suspected, the Engineer should verify that producers and aggregate suppliers have taken steps to minimize the inclusion of any ferrous sulfides or iron oxides in aggregate to be used in the project.

On large projects and/or projects that span multiple construction seasons, additional aggregate tests may be necessary to validate consistency of aggregate produced and delivered for the project.

a. Coarse aggregate. Coarse aggregate shall consist of sound, tough, durable particles, free from films of matter that would prevent thorough coating and bonding with the asphalt material and free from organic matter and other deleterious substances. Coarse aggregate material requirements are given in the table below.

Coarse Aggregate Material Requirements

Material Test	Requirement	Standard
Resistance to Degradation	Loss: 40% maximum	ASTM C131
Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate	Loss after 5 cycles: 12% maximum using Sodium sulfate - or - 18% maximum using magnesium sulfate	ASTM C88
Clay lumps and friable particles	1.0 % maximum	ASTM C142
Percentage of Fractured Particles	For pavements designed for aircraft gross weights of 60,000 pounds (27200 kg) or more: Minimum 75% by weight of particles with at least two fractured faces and 85% with at least one fractured face ¹	ASTM D5821
	For pavements designed for aircraft gross weights less than 60,000 pounds (27200 kg): Minimum 50% by weight of particles with at least two fractured faces and 65% with at least one fractured face ¹	
Flat, Elongated, or Flat and Elongated Particles	8% maximum, by weight, of flat, elongated, or flat and elongated particles at 5:1 ²	ASTM D4791
Bulk density of slag ³	Weigh not less than 70 pounds per cubic foot (1.12 Mg/cubic meter)	ASTM C29.

¹ The area of each face shall be equal to at least 75% of the smallest mid-sectional area of the piece. When two fractured faces are contiguous, the angle between the planes of fractures shall be at least 30 degrees to count as two fractured faces.

² A flat particle is one having a ratio of width to thickness greater than five (5); an elongated particle is one having a ratio of length to width greater than five (5).

³ Only required if slag is specified.

b. Fine aggregate. Fine aggregate shall consist of clean, sound, tough, durable, angular shaped particles produced by crushing stone, slag, or gravel and shall be free from coatings of clay, silt, or other objectionable matter. Natural (non-manufactured) sand may be used to obtain the gradation of the fine

aggregate blend or to improve the workability of the mix. Fine aggregate material requirements are listed in the table below.

Fine Aggregate Material Requirements

Material Test	Requirement	Standard
Liquid limit	25. maximum	ASTM D4318
Plasticity Index	4. maximum	ASTM D4318
Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate	Loss after 5 cycles: 10% maximum using Sodium sulfate - or - 15% maximum using magnesium sulfate	ASTM C88
Clay lumps and friable particles	1.0% maximum	ASTM C142
Sand equivalent	[45 minimum]	ASTM D2419
[Natural Sand	[0% to 15%] maximum by weight of total aggregate	ASTM D1073]

The addition of natural sand to a mix containing all crushed coarse and fine aggregates will normally increase its workability and compactability. The addition of natural sand tends to decrease the stability of the mixture therefore, it is recommended to not use natural sand. However, if natural sand is used, use the minimum amount necessary to achieve a workable mixture.

c. Sampling. ASTM D75 shall be used in sampling coarse and fine aggregate.

401-2.2 Mineral filler. Mineral filler (baghouse fines) may be added in addition to material naturally present in the aggregate. Mineral filler shall meet the requirements of ASTM D242.

Mineral Filler Requirements

Material Test	Requirement	Standard
Plasticity Index	4. maximum	ASTM D4318

401-2.3 Asphalt binder. Asphalt binder shall conform to ASTM D6373 Performance Grade (PG) [____].

[

Asphalt Binder PG Plus Test Requirements

Material Test	Requirement	Standard
Elastic Recovery	[75%] minimum	ASTM D6084 ¹

¹ Follow procedure B on RTFO aged binder.]

The Engineer should use the following guidance in selecting the asphalt binder PG to include in the above paragraph.

Prior to bumping for traffic, the initial asphalt binder PG should be consistent with the recommendations of the applicable State DOT requirements for pavement environmental conditions. Additional guidance on selecting the asphalt binder PG prior to bumping include the following:

- Asphalt Institute MS-26, The Asphalt Binder Handbook.
- The Asphalt Institute's State Binder Specification Database at:
<http://www.asphaltinstitute.org/specification-databases/us-state-binder-specification-database/>
- The Long-Term Pavement Performance Binder program at
<https://infopave.fhwa.dot.gov/>

Using the initial PG selected, apply the applicable grade bump in accordance with the table below, which will determine the PG that will be inserted in the above paragraph.

Required Grade Bump

Aircraft Gross Weight	High Temperature Adjustment to Asphalt binder Grade	
	All Pavement Types	Pavement area with slow or stationary aircraft
≤ 12,500 lbs. (5670 kg)	--	1 Grade
< 100,000 lbs. (45360 kg)	1 Grade	2 Grade
≥ 100,000 lbs. (45360 kg)	2 Grade	3 Grade

Typically, when the PG spread between the high and low temperature is 92 or more, the asphalt binder has been modified. The Engineer may use the PG Plus Test found in the Asphalt Institute's State Binder Specification Database for the project location which requires modification of the table. If the PG spread is less than 92, delete the Asphalt Binder PG Plus Test Requirements table.

Note asphalt industry is in a state of change regarding binder designations. Some States are following ASTM D6373, while others are following AASHTO M332.

Ensure that the binder supplied meets minimum requirements of ASTM D6373.

401-2.4 Anti-stripping agent. Any anti-stripping agent or additive (anti-strip) shall be heat stable and shall not change the asphalt binder grade beyond specifications. Anti-strip shall be an approved material of the Department of Transportation of the State in which the project is located.

COMPOSITION

401-3.1 Composition of mixture(s). The asphalt mix shall be composed of a mixture of aggregates, filler and anti-strip agent if required, and asphalt binder. The aggregate fractions shall be sized, handled in separate size groups, and combined in such proportions that the resulting mixture meets the grading requirements of the job mix formula (JMF).

401-3.2 Job mix formula (JMF) laboratory. The laboratory used to develop the JMF shall possess a current certificate of accreditation, listing D3666 from a national accrediting authority and all test methods required for developing the JMF; and be listed on the accrediting authority's website. A copy of the laboratory's current accreditation and accredited test methods shall be submitted to the Resident Project Representative (RPR) prior to start of construction.

401-3.3 Job mix formula (JMF). No asphalt mixture shall be placed until an acceptable mix design has been submitted to the RPR for review and accepted in writing. The RPR's review shall not relieve the Contractor of the responsibility to select and proportion the materials to comply with this section.

When the project requires asphalt mixtures of differing aggregate gradations and/or binders, a separate JMF shall be submitted for each mix. Add anti-stripping agent to meet tensile strength requirements.

The JMF shall be prepared by an accredited laboratory that meets the requirements of paragraph 401-3.2. The asphalt mixture shall be designed using procedures contained in Asphalt Institute MS-2 Mix Design Manual, 7th Edition. [Samples shall be prepared and compacted using a Marshall compactor in accordance with ASTM D6926.] [Samples shall be prepared and compacted using the gyratory compactor in accordance with ASTM D6925.]

Should a change in sources of materials be made, a new JMF must be submitted to the RPR for review and accepted in writing before the new material is used. After the initial production JMF has been approved by the RPR and a new or modified JMF is required for whatever reason, the subsequent cost of the new or modified JMF, including a new control strip when required by the RPR, will be borne by the Contractor.

The RPR may request samples at any time for testing, prior to and during production, to verify the quality of the materials and to ensure conformance with the applicable specifications.

Select the method for mix design, Marshall Method, ASTM D6926 or Gyratory Method, ASTM D6925.

The design criteria in Table 1 are target values necessary to meet the acceptance requirements contained in paragraph 401-6.2. The criteria is based on a production process which has a material variability with the following standard deviations: Air Voids = 0.65%.

The JMF shall be submitted in writing by the Contractor at least [30] days prior to the start of paving operations. The JMF shall be developed within the same construction season using aggregates proposed for project use.

The JMF shall be dated, and stamped or sealed by the responsible professional Engineer of the laboratory and shall include the following items as a minimum:

- Manufacturer's Certificate of Analysis (COA) for the asphalt binder used in the JMF in accordance with paragraph 401-2.3. Certificate of asphalt performance grade is with modifier already added, if used and must indicate compliance with ASTM D6373. For plant modified asphalt binder, certified test report indicating grade certification of modified asphalt binder.
- Manufacturer's Certificate of Analysis (COA) for the anti-stripping agent if used in the JMF in accordance with paragraph 401-2.4.

- Certified material test reports for the course and fine aggregate and mineral filler in accordance with paragraphs 401-2.1.
- Percent passing each sieve size for individual gradation of each aggregate cold feed and/or hot bin; percent by weight of each cold feed and/or hot bin used; and the total combined gradation in the JMF.
- Specific Gravity and absorption of each coarse and fine aggregate.
- Percent natural sand.
- Percent fractured faces.
- Percent by weight of flat particles, elongated particles, and flat and elongated particles (and criteria).
- Percent of asphalt.
- Number of blows or gyrations
- Laboratory mixing and compaction temperatures.
- Supplier-recommended field mixing and compaction temperatures.
- Plot of the combined gradation on a 0.45 power gradation curve.
- Graphical plots of air voids, voids in the mineral aggregate (VMA), and unit weight versus asphalt content. To achieve minimum VMA during production, the mix design needs to account for material breakdown during production.
- Tensile Strength Ratio (TSR).
- Type and amount of Anti-strip agent when used.
- Asphalt Pavement Analyzer (APA) results.
- Date the JMF was developed. Mix designs that are not dated or which are from a prior construction season shall not be accepted.
- [Percentage and properties (asphalt content, asphalt binder properties, and aggregate properties) of reclaimed asphalt mix pavement (RAP) in accordance with paragraph 401-3.4.]
- []

Delete if RAP is not allowed per paragraph 401-3.4.

The Owner may add additional testing to meet local conditions with FAA concurrence.

Table 1. Asphalt Design Criteria

Test Property	Value	Test Method
Number of blows or gyrations	[75]	
Air voids (%)	3.5	ASTM D3203
Percent voids in mineral aggregate (VMA), minimum	See Table 2	ASTM D6995
Tensile Strength Ratio (TSR) ¹	not less than [80] at a saturation of 70-80%	ASTM D4867
[Asphalt Pavement Analyzer (APA) ^{2,3}	[Less than 10 mm @ 4000 passes]	[AASHTO T340 at 250 psi hose pressure at 64°C test temperature]

¹ Test specimens for TSR shall be compacted at 7 ± 1.0 % air voids. In areas subject to freeze-thaw, use freeze-thaw conditioning in lieu of moisture conditioning per ASTM D4867.

² AASHTO T340 at 100 psi hose pressure at 64°C test temperature may be used in the interim. If this method is used the required Value shall be less than 5 mm @ 8000 passes

³ Where APA not available, use Hamburg Wheel test (AASHTO T-324) 10mm @ 20,000 passes at 50°C.

75 blows or gyrations shall be specified for airports serving aircraft greater than 60,000 pounds. 50 blows or gyrations may be specified for airports serving aircraft 60,000 pounds or less.

The APA procedure has shown that mixes that meet the requirements above perform well under aircraft loading. If APA is not available in an area, compacted mix design samples may be sent to a laboratory that has an APA or the Hamburg wheel test (AASHTO T 324) 10mm @ 20,000 passes at 50°C may be used with FAA approval of ADO. The use of APA or Hamburg is not required for pavements serving aircraft less than 60,000 pounds.

Specify a TSR of not less than 85 in areas with aggregate that have a history of stripping.

The mineral aggregate shall be of such size that the percentage composition by weight, as determined by laboratory sieves, will conform to the gradation or gradations specified in Table 2 when tested in accordance with ASTM C136 and ASTM C117.

The gradations in Table 2 represent the limits that shall determine the suitability of aggregate for use from the sources of supply; be well graded from coarse to fine and shall not vary from the low limit on one sieve to the high limit on the adjacent sieve, or vice versa.

Table 2. Aggregate - Asphalt Pavements

Sieve Size	Percentage by Weight Passing Sieve
1 inch (25.0 mm)	*
3/4 inch (19.0 mm)	*
1/2 inch (12.5 mm)	*
3/8 inch (9.5 mm)	*
No. 4 (4.75 mm)	*
No. 8 (2.36 mm)	*
No. 16 (1.18 mm)	*
No. 30 (600 µm)	*
No. 50 (300 µm)	*
No. 100 (150 µm)	*
No. 200 (75 µm)	*
Minimum Voids in Mineral Aggregate (VMA)¹	*
Asphalt Percent:	
Stone or gravel	*
Slag	*
Recommended Minimum Construction Lift Thickness	*

¹To achieve minimum VMA during production, the mix design needs to account for material breakdown during production.

The aggregate gradations shown are based on aggregates of uniform specific gravity. The percentages passing the various sieves shall be corrected when aggregates of varying specific gravities are used, as indicated in the Asphalt Institute MS-2 Mix Design Manual, 7th Edition.

The aggregate gradation shall be specified by the Engineer from the gradations shown in this note. The gradation shall be inserted into Table 2. Asterisks denote insert points.

Where locally available aggregates cannot be economically blended to meet the grading requirements of the gradations shown, the gradations may be modified to fit the characteristics of such local aggregates with approval of the FAA. The modified gradation must produce a paving mixture that satisfies the mix design requirements.

Table 2. Aggregate - Asphalt Pavements

Sieve Size	Percentage by Weight Passing Sieves		
	Gradation 1	Gradation 2	Gradation 3 ¹
1 inch (25.0 mm)	100	--	--
3/4 inch (19.0 mm)	90-100	100	--
1/2 inch (12.5 mm)	68-88	90-100	100
3/8 inch (9.5 mm)	60-82	72-88	90-100
No. 4 (4.75 mm)	45-67	53-73	58-78
No. 8 (2.36 mm)	32-54	38-60	40-60
No. 16 (1.18 mm)	22-44	26-48	28-48
No. 30 (600 µm)	15-35	18-38	18-38
No. 50 (300 µm)	9-25	11-27	11-27
No. 100 (150 µm)	6-18	6-18	6-18
No. 200 (75 µm)	3-6	3-6	3-6
Minimum Voids in Mineral Aggregate (VMA)	14.0	15.0	16.0
Asphalt percent by total weight of mixture:			
Stone or gravel	4.5-7.0	5.0-7.5	5.5-8.0
Slag	5.0-7.5	6.5-9.5	7.0-10.5
Recommended Minimum Construction Lift Thickness	3. inch	2. inch	1 1/2 inch

¹ Gradation 3 is intended for leveling courses. FAA approval is required for use in other locations.

401-3.4 Reclaimed asphalt pavement (RAP). [RAP shall not be used.] [Reclaimed asphalt shall consist of reclaimed asphalt pavement (RAP), coarse aggregate, fine aggregate, mineral filler, and asphalt. The RAP shall be of a consistent gradation and asphalt content and properties. When RAP is fed into the plant, the maximum RAP size shall not exceed one inch (25 mm). The reclaimed asphalt pavement mix shall be designed using procedures contained in the Asphalt Institute MS-2 Mix Design Manual, 7th Edition. The percentage of asphalt in the RAP shall be established for the mixture design according to ASTM D2172 using the appropriate dust correction procedure. The JMF shall meet the requirements of paragraph 401-3.3. RAP shall only be used for shoulder surface course mixes and for any intermediate courses. The amount of RAP shall be limited to [___] percent. In addition to the requirements of paragraph 401-3.3, the JMF shall indicate the percent of reclaimed asphalt pavement and the percent and grade of new asphalt binder. For the PG graded asphalt binder selected in 401-2.3, adjust as follows:

a. For 0-20% RAP, there is no change in virgin asphalt binder content.

b. For >20 to 30% RAP, select asphalt binder one grade softer, i.e., PG 64-22 would soften to PG 58-28.

RAP containing Coal Tar shall not be used. Coal Tar surface treatments must be removed prior to recycling underlying asphalt material.

Recycled asphalt shingles (RAS) shall not be used.]

Engineer will determine if RAP is/is not allowed and make appropriate selection.

RAP should not be used for surface mixes, except on shoulders. It can be used very effectively in lower layers or for shoulders. Engineer to specify the maximum percentage of reclaimed asphalt allowed in the mix. The amount of RAP shall be limited to 30%, if the resulting recycled mix meets all requirements that are specified for virgin mixtures. The Contractor may obtain the RAP from the job site or an existing source.

401-3.5 Control Strip. [A control strip is not required.][Full production shall not begin until an acceptable control strip has been constructed and accepted in writing by the RPR. The Contractor shall prepare and place a quantity of asphalt according to the JMF. The underlying grade or pavement structure upon which the control strip is to be constructed shall be the same as the remainder of the course represented by the control strip.

The Contractor will not be allowed to place the control strip until the Contractor quality control program (CQCP), showing conformance with the requirements of paragraph 401-5.1, has been accepted, in writing, by the RPR.

The control strip will consist of at least 250 tons (227 metric tons) or 1/2 subplot, whichever is greater. The control strip shall be placed in two lanes of the same width and depth to be used in production with a longitudinal cold joint. The cold joint must be cut back in accordance with paragraph 401-4.14 using the same procedure that will be used during production. The cold joint for the control strip will be an exposed construction joint at least four (4) hours old or when the mat has cooled to less than 160°F (71°C). The equipment used in construction of the control strip shall be the same type, configuration and weight to be used on the project.

The control strip will be considered acceptable by the RPR if the gradation, asphalt content, and VMA are within the action limits specified in paragraph 401-5.5a; and Mat density greater than or equal to 94.5%, air voids 3.5% +/- 1%, and joint density greater than or equal to 92.5%.

If the control strip is unacceptable, necessary adjustments to the JMF, plant operation, placing procedures, and/or rolling procedures shall be made and another control strip shall be placed. Unacceptable control strips shall be removed at the Contractor's expense.

The control strip will be considered one lot for payment based upon the average of a minimum of 3 samples (no sublots required for control strip). Payment will only be made for an acceptable control strip in accordance with paragraph 401-8.1 using a lot pay factor equal to 100.]

For small projects, less than 3,000 tons (2722 metric tons), a control strip is not required.

CONSTRUCTION METHODS

401-4.1 Weather limitations. The asphalt shall not be placed upon a wet surface or when the surface temperature of the underlying course is less than specified in Table 4. The temperature requirements may be waived by the RPR, if requested; however, all other requirements including compaction shall be met.

Table 4. Surface Temperature Limitations of Underlying Course

Mat Thickness	Base Temperature (Minimum)	
	°F	°C
3 inches (7.5 cm) or greater	40 ¹	4
Greater than 2 inches (50 mm) but less than 3 inches (7.5 cm)	45	7

401-4.2 Asphalt plant. Plants used for the preparation of asphalt shall conform to the requirements of American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) M156 including the following items.

a. Inspection of plant. The RPR, or RPR's authorized representative, shall have access, at all times, to all areas of the plant for checking adequacy of equipment; inspecting operation of the plant: verifying weights, proportions, and material properties; and checking the temperatures maintained in the preparation of the mixtures.

b. Storage bins and surge bins. The asphalt mixture stored in storage and/or surge bins shall meet the same requirements as asphalt mixture loaded directly into trucks. Asphalt mixture shall not be stored in storage and/or surge bins for a period greater than twelve (12) hours. If the RPR determines there is an excessive heat loss, segregation, or oxidation of the asphalt mixture due to temporary storage, temporary storage shall not be allowed.

401-4.3 Aggregate stockpile management. Aggregate stockpiles shall be constructed in a manner that prevents segregation and intermixing of deleterious materials. Aggregates from different sources shall be stockpiled, weighed and batched separately at the asphalt batch plant. Aggregates that have become segregated or mixed with earth or foreign material shall not be used.

A continuous supply of materials shall be provided to the work to ensure continuous placement.

401-4.4 Hauling equipment. Trucks used for hauling asphalt shall have tight, clean, and smooth metal beds. To prevent the asphalt from sticking to the truck beds, the truck beds shall be lightly coated with a

minimum amount of paraffin oil, lime solution, or other material approved by the RPR. Petroleum products shall not be used for coating truck beds. Each truck shall have a suitable cover to protect the mixture from adverse weather. When necessary, to ensure that the mixture will be delivered to the site at the specified temperature, truck beds shall be insulated or heated, and covers shall be securely fastened.

401-4.4.1 Material transfer vehicle (MTV). [Material transfer vehicles used to transfer the material from the hauling equipment to the paver, shall use a self-propelled, material transfer vehicle with a swing conveyor that can deliver material to the paver without contacting the paver. The MTV shall be able to move back and forth between the hauling equipment and the paver providing material transfer to the paver, while allowing the paver to operate at a constant speed. The Material Transfer Vehicle will have remixing and storage capability to prevent physical and thermal segregation.] [Material transfer vehicles are not required.]

An MTV is required for runway and taxiway construction on pavements designed for aircraft weighing 100,000 lbs. (45360 kg) or more. The MTV is recommended for all pavements where the weight of the MTV will not damage the pavement structure. The use of an MTV is optional for shoulder construction.

401-4.5 Asphalt pavers. Asphalt pavers shall be self-propelled with an activated heated screed, capable of spreading and finishing courses of asphalt that will meet the specified thickness, smoothness, and grade. The paver shall have sufficient power to propel itself and the hauling equipment without adversely affecting the finished surface. The asphalt paver shall be equipped with a control system capable of automatically maintaining the specified screed grade and elevation.

If the spreading and finishing equipment in use leaves tracks or indented areas or produces other blemishes in the pavement that are not satisfactorily corrected by the scheduled operations, the use of such equipment shall be discontinued.

The paver shall be capable of paving to a minimum width specified in paragraph 401-4.12.

401-4.6 Rollers. The number, type, and weight of rollers shall be sufficient to compact the asphalt to the required density while it is still in a workable condition without crushing of the aggregate, depressions or other damage to the pavement surface. Rollers shall be in good condition, clean, and capable of operating at slow speeds to avoid displacement of the asphalt. All rollers shall be specifically designed and suitable for compacting asphalt concrete and shall be properly used. Rollers that impair the stability of any layer of a pavement structure or underlying soils shall not be used.

401-4.7 Density device. The Contractor shall have on site a density gauge during all paving operations in order to assist in the determination of the optimum rolling pattern, type of roller and frequencies, as well as to monitor the effect of the rolling operations during production paving. The Contractor shall supply a qualified technician during all paving operations to calibrate the gauge and obtain accurate density readings for all new asphalt. These densities shall be supplied to the RPR upon request at any time during construction. No separate payment will be made for supplying the density gauge and technician.

401-4.8 Preparation of asphalt binder. The asphalt binder shall be heated in a manner that will avoid local overheating and provide a continuous supply of the asphalt binder to the mixer at a uniform temperature. The temperature of unmodified asphalt binder delivered to the mixer shall be sufficient to provide a suitable viscosity for adequate coating of the aggregate particles but shall not exceed 325°F (160°C) when added to

the aggregate. The temperature of modified asphalt binder shall be no more than 350°F (175°C) when added to the aggregate.

401-4.9 Preparation of mineral aggregate. The aggregate for the asphalt shall be heated and dried. The maximum temperature and rate of heating shall be such that no damage occurs to the aggregates. The temperature of the aggregate and mineral filler shall not exceed 350°F (175°C) when the asphalt binder is added. Care shall be taken that aggregates high in calcium or magnesium content are not damaged by overheating. The temperature shall not be lower than is required to obtain complete coating and uniform distribution on the aggregate particles and to provide a mixture of satisfactory workability.

401-4.10 Preparation of Asphalt mixture. The aggregates and the asphalt binder shall be weighed or metered and mixed in the amount specified by the JMF. The combined materials shall be mixed until the aggregate obtains a uniform coating of asphalt binder and is thoroughly distributed throughout the mixture. Wet mixing time shall be the shortest time that will produce a satisfactory mixture, but not less than 25 seconds for batch plants. The wet mixing time for all plants shall be established by the Contractor, based on the procedure for determining the percentage of coated particles described in ASTM D2489, for each individual plant and for each type of aggregate used. The wet mixing time will be set to achieve 95% of coated particles. For continuous mix plants, the minimum mixing time shall be determined by dividing the weight of its contents at operating level by the weight of the mixture delivered per second by the mixer. The moisture content of all asphalt upon discharge shall not exceed 0.5%.

For batch plants, wet mixing time begins with the introduction of asphalt binder into the mixer and ends with the opening of the mixer discharge gate. Mixing time should be the shortest time required to obtain uniform distribution of aggregate sizes and thorough coating of aggregate particles with asphalt binder.

401-4.11 Application of Prime and Tack Coat. Immediately before placing the asphalt mixture, the underlying course shall be cleaned of all dust and debris.

[A prime coat in accordance with Item P-602 shall be applied to aggregate base prior to placing the asphalt mixture.]

A tack coat shall be applied in accordance with Item P-603 to all vertical and horizontal asphalt and concrete surfaces prior to placement of the first and each subsequent lift of asphalt mixture.

401-4.12 Laydown plan, transporting, placing, and finishing. Prior to the placement of the asphalt, the Contractor shall prepare a laydown plan with the sequence of paving lanes and width to minimize the number of cold joints; the location of any temporary ramps; laydown temperature; and estimated time of completion for each portion of the work (milling, paving, rolling, cooling, etc.). The laydown plan and any modifications shall be approved by the RPR.

Deliveries shall be scheduled so that placing and compacting of asphalt is uniform with minimum stopping and starting of the paver. Hauling over freshly placed material shall not be permitted until the material has been compacted, as specified, and allowed to cool to approximately ambient temperature. The Contractor, at their expense, shall be responsible for repair of any damage to the pavement caused by hauling operations.

Contractor shall survey each lift of asphalt surface course and certify to RPR that every lot of each lift meets the grade tolerances of paragraph 401-6.2d before the next lift can be placed.

Edges of existing asphalt pavement abutting the new work shall be saw cut and the cut off material and laitance removed. Apply a tack coat in accordance with P-603 before new asphalt material is placed against it.

The speed of the paver shall be regulated to eliminate pulling and tearing of the asphalt mat. Placement of the asphalt mix shall begin along the centerline of a crowned section or on the high side of areas with a one-way slope unless shown otherwise on the laydown plan as accepted by the RPR. The asphalt mix shall be placed in consecutive adjacent lanes having a minimum width of [____] feet (m) except where edge lanes require less width to complete the area. Additional screed sections attached to widen the paver to meet the minimum lane width requirements must include additional auger sections to move the asphalt mixture uniformly along the screed extension. [____]

The Engineer should specify the widest paying lane practicable to hold the number of longitudinal joints to a minimum. Additional job specific construction limitations may be added as necessary covering such items as echelon paving, hot joint construction, etc.

The longitudinal joint in one course shall offset the longitudinal joint in the course immediately below by at least one foot (30 cm); however, the joint in the surface top course shall be at the centerline of crowned pavements. Transverse joints in one course shall be offset by at least 10 feet (3 m) from transverse joints in the previous course. Transverse joints in adjacent lanes shall be offset a minimum of 10 feet (3 m). On areas where irregularities or unavoidable obstacles make the use of mechanical spreading and finishing equipment impractical, the asphalt may be spread and looted by hand tools.

The RPR may at any time, reject any batch of asphalt, on the truck or placed in the mat, which is rendered unfit for use due to contamination, segregation, incomplete coating of aggregate, or overheated asphalt mixture. Such rejection may be based on only visual inspection or temperature measurements. In the event of such rejection, the Contractor may take a representative sample of the rejected material in the presence of the RPR, and if it can be demonstrated in the laboratory, in the presence of the RPR, that such material was erroneously rejected, payment will be made for the material at the contract unit price.

Areas of segregation in the surface course, as determined by the RPR, shall be removed and replaced at the Contractor's expense. The area shall be removed by saw cutting and milling a minimum of the construction lift thickness as specified in paragraph 401-3.3, Table 2 for the approved mix design. The area to be removed and replaced shall be a minimum width of the paver and a minimum of 10 feet (3 m) long.

401-4.13 Compaction of asphalt mixture. After placing, the asphalt mixture shall be thoroughly and uniformly compacted by self-propelled rollers. The surface shall be compacted as soon as possible when the asphalt has attained sufficient stability so that the rolling does not cause undue displacement, cracking or shoving. The sequence of rolling operations and the type of rollers used shall be at the discretion of the Contractor. The speed of the roller shall, always, be sufficiently slow to avoid displacement of the hot mixture and be effective in compaction. Any surface defects and/or displacement occurring as a result of the roller, or from any other cause, shall be corrected at the Contractor's expense.

Sufficient rollers shall be furnished to handle the output of the plant. Rolling shall continue until the surface is of uniform texture, true to grade and cross-section, and the required field density is obtained. To prevent adhesion of the asphalt to the roller, the wheels shall be equipped with a scraper and kept moistened with water as necessary.

In areas not accessible to the roller, the mixture shall be thoroughly compacted with approved power tampers.

Any asphalt that becomes loose and broken, mixed with dirt, contains check-cracking, or in any way defective shall be removed and replaced with fresh hot mixture and immediately compacted to conform to the surrounding area. This work shall be done at the Contractor's expense. Skin patching shall not be allowed.

401-4.14 Joints. The formation of all joints shall be made to ensure a continuous bond between the courses and obtain the required density. All joints shall have the same texture as other sections of the course and meet the requirements for smoothness and grade.

The roller shall not pass over the unprotected end of the freshly laid asphalt except when necessary to form a transverse joint. When necessary to form a transverse joint, it shall be made by means of placing a bulkhead or by tapering the course. The tapered edge shall be cut back to its full depth and width on a straight line to expose a vertical face prior to placing the adjacent lane. In both methods, all contact surfaces shall be coated with an asphalt tack coat before placing any fresh asphalt against the joint.

Longitudinal joints which have been left exposed for more than four (4) hours; the surface temperature has cooled to less than 175°F (80°C); or are irregular, damaged, uncompacted or otherwise defective shall be cut back with a cutting wheel or pavement saw a maximum of 3 inches (75 mm) to expose a clean, sound, uniform vertical surface for the full depth of the course. All cutback material and any laitance produced from cutting joints shall be removed from the project. Asphalt tack coat in accordance with P-603 shall be applied to the clean, dry joint prior to placing any additional fresh asphalt against the joint. The cost of this work shall be considered incidental to the cost of the asphalt.

Cut back of all cold joints is required as specified above.

The Contractor may provide additional joint density QC by use of joint heaters at the Contractor's expense. Electrically powered infrared heating equipment should consist of one or more low-level radiant energy heaters to uniformly heat and soften the pavement joints. The heaters should be configured to uniformly heat an area up to 18 inches (0.5 m) in width and 3 inches (75 mm) in depth. Infrared equipment shall be thermostatically controlled to provide a uniform, consistent temperature increases throughout the layer being heated up to a maximum temperature range of 200 to 300°F (93 to 150°C).

Propane powered infrared heating equipment shall be attached to the paving machine and the output of infrared energy shall be in the one to six-micron range. Converters shall be arranged end to end directly over the joint to be heated in sufficient numbers to continuously produce, when in operation, a minimum of 240,000 BTU per hour. The joint heater shall be positioned not more than one inch (25 mm) above the pavement to be heated and in front of the paver screed and shall be fully adjustable. Heaters will be required to be always in operation.

The heaters shall be operated so they do not produce excessive heat when the units pass over new or previously paved material.

401-4.15 Saw-cut grooving. Saw-cut grooves shall be provided as specified in Item P-621. [Saw-cut grooving is not required.]

401-4.16 Diamond grinding. Diamond grinding shall be completed prior to pavement grooving. Diamond grinding shall be accomplished by sawing with saw blades impregnated with industrial diamond abrasive.

Diamond grinding shall be performed with a machine designed specifically for diamond grinding capable of cutting a path at least 3 feet (0.9 m) wide. The saw blades shall be 1/8-inch (3-mm) wide with enough blades to create grooves between 0.090 and 0.130 inches (2 and 3.5 mm) wide; and peaks and ridges approximately 1/32 inch (1 mm) higher than the bottom of the grinding cut. The actual number of blades will be determined by the Contractor and depend on the hardness of the aggregate. Equipment or grinding procedures that cause ravels, aggregate fractures, spalls or disturbance to the pavement will not be permitted. Contractor shall demonstrate to the RPR that the grinding equipment will produce satisfactory results prior to making corrections to surfaces. Grinding will be tapered in all directions to provide smooth transitions to areas not requiring grinding. The slurry resulting from the grinding operation shall be continuously removed and the pavement left in a clean condition. The Contractor shall apply a surface treatment per P-608 to all areas that have been subject to grinding.

401-4.17 Nighttime paving requirements. The Contractor shall provide adequate lighting during any nighttime construction. A lighting plan shall be submitted by the Contractor and approved by the RPR prior to the start of any nighttime work. All work shall be in accordance with the approved CSPP and lighting plan.

CONTRACTOR QUALITY CONTROL (CQC)

All federally funded projects over \$500K dollars where paving is the major work item must have a CQCP. It is strongly encouraged that a Contractor Quality Control Program (CQCP) be developed for all projects.

For projects that do not include a formal CQCP, this section can be edited to remove reference to a CQCP. However, QC testing is still required regardless of project size.

401-5.1 General. [The Contractor shall develop a Contractor Quality Control Program (CQCP) in accordance with Item C-100. No partial payment will be made for materials without an approved CQCP.]

401-5.2 Contractor quality control (QC) facilities. [The Contractor shall provide or contract for testing facilities in accordance with Item C-100. The RPR shall be permitted unrestricted access to inspect the Contractor's QC facilities and witness QC activities. The RPR will advise the Contractor in writing of any noted deficiencies concerning the QC facility, equipment, supplies, or testing personnel and procedures. When the deficiencies are serious enough to be adversely affecting the test results, the incorporation of the materials into the work shall be suspended immediately and will not be permitted to resume until the deficiencies are satisfactorily corrected.]

401-5.3 Contractor QC testing. The Contractor shall perform all QC tests necessary to control the production and construction processes applicable to these specifications [and as set forth in the approved CQCP. The testing program shall include, but not necessarily be limited to, tests for the control of asphalt content, aggregate

gradation, temperatures, aggregate moisture, field compaction, and surface smoothness. A QC Testing Plan shall be developed as part of the CQCP.]

a. Asphalt content. A minimum of two tests shall be performed per day in accordance with ASTM D6307 or ASTM D2172 for determination of asphalt content. When using ASTM D6307, the correction factor shall be determined as part of the first test performed at the beginning of plant production; and as part of every tenth test performed thereafter. The asphalt content for the day will be determined by averaging the test results.

b. Gradation. Aggregate gradations shall be determined a minimum of twice per day from mechanical analysis of extracted aggregate in accordance with ASTM D5444, ASTM C136, and ASTM C117.

c. Moisture content of aggregate. The moisture content of aggregate used for production shall be determined a minimum of once per day in accordance with ASTM C566.

d. Moisture content of asphalt. The moisture content shall be determined once per day in accordance with AASHTO T329 or ASTM D1461.

e. Temperatures. Temperatures shall be checked, at least four times per day, at necessary locations to determine the temperatures of the dryer, the asphalt binder in the storage tank, the asphalt at the plant, and the asphalt at the job site.

f. In-place density monitoring. The Contractor shall conduct any necessary testing to ensure that the specified density is being achieved. A nuclear gauge may be used to monitor the pavement density in accordance with ASTM D2950.

g. Smoothness for Contractor Quality Control.

Note change in deviations on final surface course that require grinding, limited to deviations greater than 1/4 inch that trap water, intent here is to focus on areas that may cause issues with the safe operation of aircraft and to minimize grinding if it will not improve safety

The Contractor shall perform smoothness testing in transverse and longitudinal directions daily to verify that the construction processes are producing pavement with variances less than 1/4 inch in 12 feet, identifying areas that may pond water which could lead to hydroplaning of aircraft. If the smoothness criteria is not met, appropriate changes and corrections to the construction process shall be made by the Contractor before construction continues

The Contractor may use a 12-foot (3.7 m) "straightedge, a rolling inclinometer meeting the requirements of ASTM E2133 or rolling external reference device that can simulate a 12-foot (3.7m) straightedge approved by the RPR. Straight-edge testing shall start with one-half the length of the straightedge at the edge of pavement section being tested and then moved ahead one-half the length of the straightedge for each successive measurement. Testing shall be continuous across all joints. The surface irregularity shall be determined by placing the freestanding (unleveled) straightedge on the pavement surface and allowing it to rest upon the two highest spots covered by its length and measuring the maximum gap between the straightedge and the pavement surface in the area between the two high points. If the rolling inclinometer or external reference device is used, the data may be evaluated using either the FAA profile program, ProFAA, or FHWA ProVal, using the 12-foot straightedge simulation function.

Smoothness readings shall not be made across grade changes or cross slope transitions. The transition between new and existing pavement shall be evaluated separately for conformance with the plans.

Include detail for transition between new and existing pavement including smoothness and grade limitations.

(1) Transverse measurements. Transverse measurements shall be taken for each day's production placed. Transverse measurements shall be taken perpendicular to the pavement centerline each 50 feet (15 m) or more often as determined by the RPR. The joint between lanes shall be tested separately to facilitate smoothness between lanes.

(2) Longitudinal measurements. Longitudinal measurements shall be taken for each day's production placed. Longitudinal tests shall be parallel to the centerline of paving; at the center of paving lanes when widths of paving lanes are less than 20 feet (6 m); and at the third points of paving lanes when widths of paving lanes are 20 ft (6 m) or greater. When placement abuts previously placed material the first measurement shall start with one half the length of the straight edge on the previously placed material.

Deviations on the final surface course in either the transverse or longitudinal direction that will trap water greater than 1/4 inch (6 mm) shall be corrected with diamond grinding per paragraph 401-4.16 or by removing and replacing the surface course to full depth. Grinding shall be tapered in all directions to provide smooth transitions to areas not requiring grinding. All areas in which diamond grinding has been performed shall be subject to the final pavement thickness tolerances specified in paragraph 401-6.1d(3). Areas that have been ground shall be sealed with a surface treatment in accordance with Item P-608. To avoid the surface treatment creating any conflict with runway or taxiway markings, it may be necessary to seal a larger area.

Control charts shall be kept showing area of each day's placement and the percentage of corrective grinding required. Corrections to production and placement shall be initiated when corrective grinding is required. If the Contractor's machines and/or methods produce significant areas that need corrective actions in excess of 10 percent of a day's production, production shall be stopped until corrective measures are implemented by the Contractor.

h. Grade. Grade shall be evaluated daily to allow adjustments to paving operations when grade measurements do not meet specifications. As a minimum, grade shall be evaluated prior to and after the placement of the first lift and after placement of the surface lift.

Measurements will be taken at appropriate gradelines (as a minimum at center and edges of paving lane) and longitudinal spacing as shown on cross-sections and plans. The final surface of the pavement will not vary from the gradeline elevations and cross-sections shown on the plans by more than 1/2 inch (12 mm) vertically [and 0.1 feet (30 mm) laterally]. The documentation will be provided by the Contractor to the RPR [within 24 hours] [by the end of the following working day].

Areas with humps or depressions that exceed grade or smoothness criteria and that retain water on the surface must be ground off provided the course thickness after grinding is not more than 1/2 inch (12 mm) less than the thickness specified on the plans. Grinding shall be in accordance with paragraph 401-4.16.

The Contractor shall repair low areas or areas that cannot be corrected by grinding by removal of deficient areas to the depth of the final course plus 1/2 inch and replacing with new material. Skin patching is not allowed.

401-5.4 Sampling. When directed by the RPR, the Contractor shall sample and test any material that appears inconsistent with similar material being sampled, unless such material is voluntarily removed and replaced, or deficiencies corrected by the Contractor. All sampling shall be in accordance with standard procedures specified.

401-5.5 Control charts. The Contractor shall maintain linear control charts for both individual measurements and range (i.e. difference between highest and lowest measurements) for aggregate gradation, asphalt content, and VMA. The VMA for each day will be calculated and monitored by the QC laboratory.

Control charts shall be posted in a location satisfactory to the RPR and kept current. As a minimum, the control charts shall identify the project number, the contract item number, the test number, each test parameter, the Action and Suspension Limits applicable to each test parameter, and the Contractor's test results. The Contractor shall use the control charts as part of a process control system for identifying potential problems and assignable causes before they occur. If the Contractor's projected data during production indicates a problem and the Contractor is not taking satisfactory corrective action, the RPR may suspend production or acceptance of the material.

a. Individual measurements. Control charts for individual measurements shall be established to maintain process control within tolerance for aggregate gradation, asphalt content, and VMA. The control charts shall use the job mix formula target values as indicators of central tendency for the following test parameters with associated Action and Suspension Limits:

Control Chart Limits for Individual Measurements

Sieve	Action Limit	Suspension Limit
3/4 inch (19.0 mm)	±6%	±9%
1/2 inch (12.5 mm)	±6%	±9%
3/8 inch (9.5 mm)	±6%	±9%
No. 4 (4.75 mm)	±6%	±9%
No. 16 (1.18 mm)	±5%	±7.5%
No. 50 (300 µm)	±3%	±4.5%
No. 200 (75 µm)	±2%	±3%
Asphalt Content	±0.45%	±0.70%
Minimum VMA	-0.5%	-1.0%

b. Range. Control charts shall be established to control gradation process variability. The range shall be plotted as the difference between the two test results for each control parameter. The Suspension Limits specified below are based on a sample size of $n = 2$. Should the Contractor elect to perform more than two tests per lot, the Suspension Limits shall be adjusted by multiplying the Suspension Limit by 1.18 for $n = 3$ and by 1.27 for $n = 4$.

Control Chart Limits Based on Range

Sieve	Suspension Limit
1/2 inch (12.5 mm)	11%
3/8 inch (9.5 mm)	11%
No. 4 (4.75 mm)	11%
No. 16 (1.18 mm)	9%
No. 50 (300 µm)	6%
No. 200 (75 µm)	3.5%
Asphalt Content	0.8%

c. Corrective Action. [The CQCP shall indicate that appropriate action shall be taken when the process is believed to be out of tolerance. The Plan shall contain rules to gauge when a process is out of control and detail what action will be taken to bring the process into control. As a minimum, a process shall be deemed out of control and production stopped and corrective action taken, if:

(1) One-point falls outside the Suspension Limit line for individual measurements or range; or

(2) Two points in a row fall outside the Action Limit line for individual measurements.]

401-5.6 QC reports. The Contractor shall maintain records and shall submit reports of QC activities daily [, in accordance with Item C-100].

MATERIAL ACCEPTANCE

401-6.1 Acceptance sampling and testing. Unless otherwise specified, all acceptance sampling and testing necessary to determine conformance with the requirements specified in this section will be performed by the RPR at no cost to the Contractor except that coring as required in this section shall be completed and paid for by the Contractor.

a. Quality assurance (QA) testing laboratory. The QA testing laboratory performing these acceptance tests will be accredited in accordance with ASTM D3666. The QA laboratory accreditation will be current and listed on the accrediting authority's website. All test methods required for acceptance sampling and testing will be listed on the lab accreditation.

b. Lot size. A standard lot will be equal to one day's production divided into approximately equal sublots of between 400 to 600 tons. When only one or two sublots are produced in a day's production, the sublots will be combined with the production lot from the previous or next day.

Where more than one plant is simultaneously producing asphalt for the job, the lot sizes will apply separately for each plant.

For large projects with high production rates, the Engineer may adjust the lot size to be ½ days production.

For small projects, with multiple small placements or if the total project size is less than 3000 tons (2270 metric tons), acceptable material will be paid for by the ton (metric ton) placed per day.

For small maintenance and repair projects, P-403 should be used.

c. Asphalt air voids. Plant-produced asphalt will be tested for air voids on a subplot basis.

(1) Sampling. Material from each subplot shall be sampled in accordance with ASTM D3665. Samples shall be taken from material deposited into trucks at the plant or at the job site in accordance with ASTM D979. The sample of asphalt may be put in a covered metal tin and placed in an oven for [not less than 30 minutes nor more than 60 minutes] to maintain the material at or above the compaction temperature as specified in the JMF.

Engineer should increase hold times to not less than 60 minutes and not more than 90 minutes when absorptive aggregates are used.

(2) Testing. Air voids will be determined for each subplot in accordance with ASTM D3203 for a set of three compacted specimens prepared in accordance with [ASTM D6926] [ASTM D6925].

d. In-place asphalt mat and joint density. Each subplot will be tested for in-place mat and joint density as a percentage of the theoretical maximum density (TMD).

(1) Sampling. The [Contractor] [RPR] will cut minimum 5 inch (125 mm) diameter samples in accordance with ASTM D5361. The Contractor shall furnish all tools, labor, and materials for cleaning, and filling the cored pavement. Laitance produced by the coring operation shall be removed immediately after coring, and core holes shall be filled within one day after sampling in a manner acceptable to the RPR.

(2) Bond. Each lift of asphalt shall be bonded to the underlying layer. If cores reveal that the surface is not bonded, additional cores shall be taken as directed by the RPR to determine the extent of unbonded areas. Unbonded areas shall be removed by milling and replaced at no additional cost as directed by the RPR.

(3) Thickness. Thickness of each lift of surface course will be evaluated by the RPR for compliance to the requirements shown on the plans after any necessary corrections for grade. Measurements of thickness will be made using the cores extracted for each subplot for density measurement. The maximum allowable deficiency at any point will not be more than 1/4 inch (6 mm) less than the thickness indicated for the lift. Average thickness of lift, or combined lifts, will not be less than the indicated thickness. Where the thickness tolerances are not met, the lot or subplot shall be corrected by the Contractor at his expense by removing the deficient area and replacing with new pavement. The Contractor, at his expense, may take additional cores as approved by the RPR to circumscribe the deficient area.

(4) Mat density. One core shall be taken from each subplot. Core locations will be determined by the RPR in accordance with ASTM D3665. Cores for mat density shall not be taken closer than one foot (30 cm) from a transverse or longitudinal joint. The bulk specific gravity of each cored sample will be determined in accordance with ASTM D2726. The percent compaction (density) of each sample will be determined by dividing the bulk specific gravity of each subplot sample by the TMD for that subplot.

(5) Joint density. One core centered over the longitudinal joint shall be taken for each subplot that has a longitudinal joint. Core locations will be determined by the RPR in accordance with ASTM D3665. The bulk specific gravity of each core sample will be determined in accordance with ASTM D2726. The percent compaction (density) of each sample will be determined by dividing the bulk specific gravity of each joint density sample by the average TMD for the lot. The TMD used to determine the joint density at joints formed between lots will be the lower of the average TMD values from the adjacent lots.

401-6.2 Acceptance criteria.

a. General. Acceptance will be based on the implementation of the Contractor Quality Control Program (CQCP) and the following characteristics of the asphalt and completed pavements: air voids, mat density, joint density, grade [] and Profilograph roughness [].

Only include profilograph roughness for runway and/or taxiway pavement projects greater than 500 feet (150 m) in length.

b. Air Voids and Mat density. Acceptance of each lot of plant produced material for mat density and air voids will be based on the percentage of material within specification limits (PWL). If the PWL of the lot equals or exceeds 90%, the lot will be acceptable. Acceptance and payment will be determined in accordance with paragraph 401-8.1.

c. Joint density. Acceptance of each lot of plant produced asphalt for joint density will be based on the PWL. If the PWL of the lot is equal to or exceeds 90%, the lot will be considered acceptable. If the PWL is less than 90%, the Contractor shall evaluate the reason and act accordingly. If the PWL is less than 80%, the Contractor shall cease operations and until the reason for poor compaction has been determined. If the PWL is less than 71%, the pay factor for the lot used to complete the joint will be reduced by five (5) percentage points. This lot pay factor reduction will be incorporated and evaluated in accordance with paragraph 401-8.1.

d. Grade. The final finished surface of the pavement shall be surveyed to verify that the grade elevations and cross-sections shown on the plans do not deviate more than 1/2 inch (12 mm) vertically [] or 0.1 feet (30 mm) laterally [].

Cross-sections of the pavement shall be taken at a minimum [50-foot (15-m)] longitudinal spacing, at all longitudinal grade breaks, and at start and end of each lane placed. Minimum cross-section grade points shall include grade at centerline, [± 10 feet of centerline], and edge of [runway][taxiway] pavement.

The survey and documentation shall be stamped and signed by a licensed surveyor. Payment for sublots that do not meet grade for over 25% of the subplot shall not be more than 95%.

e. Profilograph roughness for QA Acceptance. [The final profilograph shall be the full length of the project to facilitate testing of roughness between lots. The [Contractor, in the presence of the RPR shall] [RPR will] perform a profilograph roughness test on the completed project with a profilograph meeting the requirements of ASTM E1274 or a Class I inertial profiler meeting ASTM E950. Data and results shall be provided within [48 hrs] of profilograph roughness tests.

The pavement shall have an average profile index less than 15 inches per mile per 1/10 mile. The equipment shall utilize electronic recording and automatic computerized reduction of data to indicate

"must grind" bumps and the Profile Index for the pavement using a 0.2-inch (5 mm) blanking band. The bump template must span one inch (25 mm) with an offset of 0.4 inches (10 mm). The profilograph must be calibrated prior to use and operated by a factory or State DOT approved, trained operator. Profilograms shall be recorded on a longitudinal scale of one inch (25 mm) equals 25 feet (7.5 m) and a vertical scale of one inch (25 mm) equals one inch (25 mm). Profilograph shall be performed one foot right and left of project centerline and 15 feet (4.5 m) right and left of project centerline. Any areas that indicate "must grind" shall be corrected with diamond grinding per paragraph 401-4.16 or by removing and replacing full depth of surface course. as directed by the RPR. Where corrections are necessary, a second profilograph run shall be performed to verify that the corrections produced an average profile index of 15 inches per mile per 1/10 mile or less.][Not used.]

Edit as required for the project.

Profilograph roughness and acceptance paragraphs only apply when the overall project is a new and/or reconstructed runway(s) and/or taxiway(s) greater than 500 feet (152 m) in length.

Profilograph roughness is not applicable to aprons and should be used with caution on projects to rehabilitate runways and/or taxiways unless the project includes provisions to correct existing deficiencies.

Any changes to the profilograph roughness acceptance limits requires a modification to standards in accordance with FAA Order 5300.1, Modifications to Agency Airport Design, Construction, and Equipment Standards.

The Engineer must select who will provide the specified equipment and the timeframe for receiving the test data. The Airport should retain a copy of the profilograph roughness test and reports for inclusion in the Airport's Pavement Maintenance Management Program (PMP).

401-6.3 Percentage of material within specification limits (PWL). The PWL will be determined in accordance with procedures specified in Item C-110. The specification tolerance limits (L) for lower and (U) for upper are contained in Table 5.

Table 5. Acceptance Limits for Air Voids and Density

Test Property	Pavements Specification Tolerance Limits	
	L	U
Air Voids Total Mix (%)	2.0	5.0
Surface Course Mat Density (%)	92.8	-
Base Course Mat Density (%)	92.0	-
Joint density (%)	90.5	--

a. Outliers. All individual tests for mat density and air voids will be checked for outliers (test criterion) in accordance with ASTM E178, at a significance level of 5%. Outliers will be discarded, and the PWL will be determined using the remaining test values. The criteria in Table 5 are based on production processes which have a variability with the following standard deviations: Surface Course Mat Density (%), 1.30; Base Course Mat Density (%), 1.55; Joint Density (%), 1.55.

The Contractor should note that (1) 90 PWL is achieved when consistently producing a surface course with an average mat density of at least 94.5% with 1.30% or less variability, (2) 90 PWL is achieved when consistently producing a base course with an average mat density of at least 94.0% with 1.55% or less variability, and (3) 90 PWL is achieved when consistently producing joints with an average joint density of at least 92.5% with 1.55% or less variability.

401-6.4 Resampling pavement for mat density.

a. General. Resampling of a lot of pavements will only be allowed for mat density, and then, only if the Contractor requests same, in writing, within 48 hours after receiving the written test results from the RPR. A retest will consist of all the sampling and testing procedures contained in paragraphs 401-6.1d and 401-6.2b. Only one resampling per lot will be permitted.

(1) A redefined PWL will be calculated for the resampled lot. The number of tests used to calculate the redefined PWL will include the initial tests made for that lot plus the retests.

(2) The cost for resampling and retesting shall be borne by the Contractor.

b. Payment for resampled lots. The redefined PWL for a resampled lot will be used to calculate the payment for that lot in accordance with Table 6.

c. Outliers. Check for outliers in accordance with ASTM E178, at a significance level of 5%.

[401-6.5 Leveling course. The leveling course is the first variable thickness lift placed to correct surface irregularities prior to placement of subsequent courses. The leveling course shall meet the aggregate gradation in Table 2, paragraph 401-3.3. The leveling course shall meet the requirements of paragraph 401-3.3, 401-6.2b for air voids, but shall not be subject to the density

requirements of paragraph 401-6.2b format density and 401-6.2c for joint density. The leveling course shall be compacted with the same effort used to achieve density of the control strip. The leveling course shall not exceed the lift thickness associated with each gradation in Table 2, paragraph 401-3.3.]

Use this paragraph only when there is a need to restore proper cross-section prior to overlaying. Areas of the pavement requiring a leveling course shall be shown on the plans.

METHOD OF MEASUREMENT

401-7.1 Measurement. Asphalt shall be measured by the number of tons [kg] of asphalt used in the accepted work. Batch weights or truck scale weights will be used to determine the basis for the tonnage.

BASIS OF PAYMENT

401-8.1 Payment. Payment for a lot of asphalt meeting all acceptance criteria as specified in paragraph 401-6.2 shall be made based on results of tests for mat density and air voids. Payment for acceptable lots shall be adjusted according to paragraph 401-8.1c format density and air voids; and paragraph 401-6.2c for joint density, subject to the limitation that:

a. The total project payment for plant mix asphalt pavement shall not exceed [___] percent of the product of the contract unit price and the total number of tons (kg) of asphalt used in the accepted work.

b. The price shall be compensation for furnishing all materials, for all preparation, mixing, and placing of these materials, and for all labor, equipment, tools, and incidentals necessary to complete the item.

The Engineer shall specify a value ranging from 100% to the maximum lot pay factor amount of 106%.

For mixtures that contain RAP, do not include separate payment for asphalt binder.

c. Basis of adjusted payment. The pay factor for each individual lot shall be calculated in accordance with Table 6. A pay factor shall be calculated for both mat density and air voids. The lot pay factor shall be the higher of the two values when calculations for both mat density and air voids are 100% or higher. The lot pay factor shall be the product of the two values when only one of the calculations for either mat density or air voids is 100% or higher. The lot pay factor shall be the lower of the two values when calculations for both mat density and air voids are less than 100%. If PWL for joint density is less than 71% then the lot pay factor shall be reduced by 5% but be no higher than 95%.

For each lot accepted, the adjusted contract unit price shall be the product of the lot pay factor for the lot and the contract unit price. Payment shall be subject to the total project payment limitation specified in paragraph 401-8.1a. Payment in excess of 100% for accepted lots of asphalt shall be used to offset payment for accepted lots of asphalt pavement that achieve a lot pay factor less than 100%.

Payment for sublots which do not meet grade in accordance with paragraph 401-6.2d after correction for over 25% of the sublot shall be reduced by 5%.

Table 6. Price adjustment schedule¹

Percentage of material within specification limits (PWL)	Lot pays factor (percent of contract unit price)
96 – 100	106
90 – 95	PWL + 10
75 – 89	0.5 PWL + 55
55 – 74	1.4 PWL – 12
Below 55	Reject ²

¹ Although it is theoretically possible to achieve a pay factor of 106% for each lot, actual payment above 100% shall be subject to the total project payment limitation specified in paragraph 401-8.1a.

² The lot shall be removed and replaced. However, the RPR may decide to allow the rejected lot to remain. In that case, if the RPR and Contractor agree in writing that the lot shall not be removed, it shall be paid for at 50% of the contract unit price and the total project payment shall be reduced by the amount withheld for the rejected lot.

d. Profilograph Roughness. [The Contractor will receive full payment when the profilograph average profile index is in accordance with paragraph 401-6.2e. When the final average profile index for the entire length of pavement does not exceed 15 inches per mile per 1/10 mile payment will be made at the contract unit price for the completed pavement.]
[Not used.]

Edit as required for project.

401-8.1 Payment.

Payment will be made under:

Item P-401-8.1 Asphalt [Surface] [Base] [Binder] [Leveling]
Course - per ton (kg)

REFERENCES

The publications listed below form a part of this specification to the extent referenced. The publications are referred to within the text by the basic designation only.

ASTM International (ASTM)

ASTM C29 Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate

ASTM C88 Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate

ASTM C117	Standard Test Method for Materials Finer than 75- μ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing
ASTM C127	Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate
ASTM C131	Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine
ASTM C136	Standard Test Method for Sieve or Screen Analysis of Fine and Coarse Aggregates
ASTM C142	Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates
ASTM C566	Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying
ASTM D75	Standard Practice for Sampling Aggregates
ASTM D242	Standard Specification for Mineral Filler for Bituminous Paving Mixtures
ASTM D946	Standard Specification for Penetration-Graded Asphalt Cement for Use in Pavement Construction
ASTM D979	Standard Practice for Sampling Asphalt Paving Mixtures
ASTM D1073	Standard Specification for Fine Aggregate for Asphalt Paving Mixtures
ASTM D1188	Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Compacted Bituminous Mixtures Using Coated Samples
ASTM D2172	Standard Test Method for Quantitative Extraction of Bitumen from Asphalt Paving Mixtures
ASTM D1461	Standard Test Method for Moisture or Volatile Distillates in Asphalt Paving Mixtures
ASTM D2041	Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures
ASTM D2419	Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate
ASTM D2489	Standard Practice for Estimating Degree of Particle Coating of Bituminous-Aggregate Mixtures
ASTM D2726	Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures
ASTM D2950	Standard Test Method for Density of Bituminous Concrete in Place by Nuclear Methods
ASTM D3203	Standard Test Method for Percent Air Voids in Compacted Dense and Open Bituminous Paving Mixtures
ASTM D3381	Standard Specification for Viscosity-Graded Asphalt Cement for Use in Pavement Construction
ASTM D3665	Standard Practice for Random Sampling of Construction Materials

ASTM D3666	Standard Specification for Minimum Requirements for Agencies Testing and Inspecting Road and Paving Materials
ASTM D4318	Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils
ASTM D4552	Standard Practice for Classifying Hot-Mix Recycling Agents
ASTM D4791	Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate
ASTM D4867	Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures
ASTM D5361	Standard Practice for Sampling Compacted Asphalt Mixtures for Laboratory Testing
ASTM D5444	Standard Test Method for Mechanical Size Analysis of Extracted Aggregate
ASTM D5821	Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate
ASTM D6084	Standard Test Method for Elastic Recovery of Bituminous Materials by Duclilometer
ASTM D6307	Standard Test Method for Asphalt Content of Hot Mix Asphalt by Ignition Method
ASTM D6373	Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder
ASTM D6752	Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Compacted Bituminous Mixtures Using Automatic Vacuum Sealing Method
ASTM D6925	Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Super Pave Gyratory Compactor.
ASTM D6926	Standard Practice for Preparation of Bituminous Specimens Using Marshall Apparatus
ASTM D6927	Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Bituminous Mixtures
ASTM D6995	Standard Test Method for Determining Field VMA based on the Maximum Specific Gravity of the Mix (Gmm)
ASTM E11	Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves
ASTM E178	Standard Practice for Dealing with Outlying Observations
ASTM E1274	Standard Test Method for Measuring Pavement Roughness Using a Profilograph
ASTM E950	Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference
ASTM E2133	Standard Test Method for Using a Rolling Inclinator to Measure Longitudinal and Transverse Profiles of a Traveled Surface

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)

AASHTO M156	Standard Specification for Requirements for Mixing Plants for Hot-Mixed, Hot-Laid Bituminous Paving Mixtures.
AASHTO T329	Standard Method of Test for Moisture Content of Hot Mix Asphalt (HMA) by Oven Method
AASHTO T324	Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Asphalt Mixtures
AASHTO T 340	Standard Method of Test for Determining the Rutting Susceptibility of Hot Mix Asphalt (APA) Using the Asphalt Pavement Analyzer (APA)

Asphalt Institute (AI)

Asphalt Institute Handbook MS-26, Asphalt Binder
Asphalt Institute MS-2 Mix Design Manual, 7th Edition
AI State Binder Specification Database

Federal Highway Administration (FHWA)

Long Term Pavement Performance Binder Program

Advisory Circulars (AC)

AC 150/5320-6 Airport Pavement Design and Evaluation

FAA Orders

5300.1 Modifications to Agency Airport Design, Construction, and Equipment Standards

Software

FAARFIELD

END OF ITEM P-401

Fuente: (FAA, 2018)

Anexo 2: Informe ITP 1240-19

	Ingeniería Técnica de Proyectos ITP, S.A. Cédula Jurídica: 3-101-362220 Tel: (506) 2290-1400 / Fax: (506) 2290-9295 Dirección: San José, la Uruca, Contiguo a Repretel, frente al ampm E-mail: ingenieria@itp.cr	Código ITP-RL-59-CR	
		Versión: 02	Página 1 de 7
		Informe No. ITP-1240-19	

Fecha: 10 de Diciembre de 2019



INFORME DE ENSAYO

INFORMACIÓN AL CUENTE

Nombre del Cliente: Constructora MECO S.A.

Dirección del Cliente: La Uruca, 25 m Norte del Hotel San José Palacio.

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA U OBJETO (S) DE ENSAYO

Descripción del muestreo: ☐ Muestra tomada por el cliente
☒ Muestra tomada por personal de ITP S.A. **Fecha:** Noviembre 2019


Proyecto: AIDOO

Fecha de recepción de muestra u objeto de ensayo: 11 de Noviembre 2019 **Lugar de muestreo:** Rio Lagarto

Descripción de la muestra u objeto de ensayo: • Aceptación de Agregados (EE-03).

Ubicación de la realización de los ensayos: Laboratorio Central ITP La Uruca.

Periodo o fecha ejecución de los ensayos: Noviembre 2019 – Diciembre 2019

 INGENIERÍA TÉCNICA DE PROYECTOS	Ingeniería Técnica de Proyectos ITP, S.A. Cédula Jurídica: 3-101-362220 Tel: (506) 2290-1400 / Fax: (506) 2290-9295 Dirección: San José, la Urca, Contiguo a Repretel, frente al ampm E-mail: ingenieria@itp.cr	Código ITP-RL-59-CR	
		Versión: 02	Página 2 de 7
		Informe No. ITP-1240-19	

RESULTADOS

Los métodos de ensayos utilizados y su respectiva equivalencia nacional e internacional se enlistan en la tabla (1), además los resultados obtenidos para la muestra se encuentran tabulados en la tabla (2) y en los anexos se presentan las pruebas realizadas y su respectivo valor (cuando aplique).

Tabla (1). Método de Ensayo Utilizados:

Instructivo de Técnico	Código
Método para el análisis granulométrico agregado grueso y fino (LAVADO) (AG-02)	ITP-IT- 54 ⁿ ASTM C 117 ASTM C 136 AASHTO T 11 AASHTO T 27
Reducción de muestras de agregado y suelos: cuarteo (AG-02)	ITP-IT- 34 ⁿ ASTM C 702 C 702 M
Abrasión en máquina Los Ángeles (Tamaño Normal) (AG-06)	ITP-IT-76 ⁿ ASTM C 131/C 131 M
Sanidad con Sulfato de Sodio (AG-07)	ITP-IT- 57 ⁿ ASTM C 88
Método para la determinación de la Gravedad específica de agregado gruesos (AG-08)	ITP-IT- 18 ⁿ ASTM C 127 AASHTO T 85
Gravedad específica de finos (AG-09)	ITP-IT- 59 ⁿ ASTM C 128 AASHTO T 84
Método para la determinación de Partículas planas y elongadas en agregado grueso (AG-10)	ITP-IT- 47 ⁿ ASTM D 4791
Caras redondeadas y fracturadas (AG-11)	ITP-IT-66 ⁿ ASTM D 5821
Equivalente de arena (AG-12)	ITP-IT- 55 ⁿ ASTM D 2419
Índice de durabilidad (AG-13)	ITP-IT-70 ⁿ ASTM D 3744 / D 3744 M

*Ensayos bajo acreditación ECA LE-050, ver alcance en www.eca.or.cr

**Ensayos no acreditados.

Cumplimiento con los métodos de ensayo	SI <input checked="" type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>
Desvío	N.A.	


 INGENIERÍA TÉCNICA DE PROYECTOS	Ingeniería Técnica de Proyectos ITP, S.A. Cedula Jurídica: 3-101-362220 Tel: (506) 2290-1400 / Fax: (506) 2290-9295 Dirección: San José, la Uruga, Contiguo a Repretel, frente al ampm E-mail: ingenieria@itp.cr		Código ITP-RL-59-CR
	Versión: 02	Página 3 de 7	
			Informe No. ITP-1240-19

Tabla (2). Resultado de ensayo:

Tipo de ensayo realizado: Aceptación de agregados polvo de piedra, especificación según FAA.

Aceptación de Agregados

LC-3546-19

No. Muestra

Código de ensayo

Valor Obtenido

Especificaciones

Malla

% Pasando

Según FAA

7.5 mm

100

—

Nº4

99

—

Nº8

95

—

Nº16

93

—

Nº30

92

—

Nº50

91

—

Nº100

91

—

Nº200

81

—

Análisis Granulométrico (AG-02)

Gravimetric

Percent Retained

Percent Passing

7.5 mm

100

9.5 mm

99

19 mm

95

25 mm

93

30 mm

92

37.5 mm

91

47.5 mm

91

60 mm

81

75 mm

75

90 mm

70

105 mm

65

125 mm

60

150 mm

55

175 mm

50

200 mm

45

Peso Volumétrico (pa-01-a)

Suelto

1541 kg/m³

N.A.

Envasado

1707 kg/m³

N.A.

Gravedad Específica Bruta Seca (Gbs)(pa-01-a)-19

2.579

N.A.

Gravedad Específica Saturada Seca (Gss)(pa-01-a)-19

2.634

N.A.

% de Absorción (pa-01-a)-19

2.17 %

N.A.

Índice de Plasticidad (pa-01)

N.P.

U. Menor a 25%

N.P.

IP Menor a 5%

Equivalente de Arena (pa-18)

65 %

Mayor a 45 %

Colorimetría (pa-11)

Color igual a patrón # 1

N.A.

Índice de durabilidad (pa-14)

82 %

Mayor a 35 %

Santidad con Sulfato de Sodio (pa-05)

0.6 %

Menor a 10 %

Partículas Finales y Ancladas (pa-03)

0.7 %

Menor a 1 %

Angulosidad de Ríos


47.2 %

Mayor a 35 %

Módulo de Finura


3.7


N.A.

 INGENIERÍA TÉCNICA DE PROYECTOS	Ingeniería Técnica de Proyectos ITP, S.A. Cedula Jurídica: 3-101-362220 Tel: (506) 2290-1400 / Fax: (506) 2290-9295 Dirección: San José, la Urbica, Contiguo a Repretel, frente al ampm. E-mail: ingenieria@itp.cr	Código ITP-RL-59-CR	
		Versión: 02	Página 4 de 7
		Informe No. ITP-1240-19	


Tipo de ensayo realizada: Aceptación de agregados piedra cuarta, especificación según FAA.


Aceptación de Agregados

No. Muestra	Código de ensayo	Valor Obtenido		Especificaciones	
LC-3546-19	Análisis Granulométrico (AG-02)	Malla	% Pasando	Según FAA	
		19.0 mm	100	—	
		12.5 mm	83	—	
		9.5 mm	16	—	
		No#4	3	—	
		No#6	2	—	
		No#10	2	—	
		No#20	2	—	
		No#50	2	—	
		No#100	1.6	—	
					
	Paso Volumétrico (pa-sux-a)	Suelto	1408 kg/m³	N.A.	
		Envallado	1570 kg/m³		
	Gravedad Específica Bruta Seca (Gbs) (pa-zh) (pa-iz)	2,616		N.A.	
	Gravedad Específica Saturada Seca (Gss) (pa-zh) (pa-iz)	2,666		N.A.	
	% de Absorción (pa-ey-a) (iz)	1,92 %		N.A.	
	Abrasión en máquina Los Angeles (pa-iz)	13,7 %		Menor a 40 %	
	Partículas Frías y Arcillosas (pa-iz)	0,3 %		Menor a 1 %	
	Índice de durabilidad (pa-iz)	82 %		Mayor a 25 %	
	Sanidad con Sulfato de Sodio (pa-iz)	2,3 %		Menor a 10 %	
	Residuo insoluble en agregados carbonatados (pa-iz)	100 %		Mayor a 25 %	
	Cara fracturada (pa-iz)	Al menos una cara fracturada 100 %		Mayor a 85 %	
		Más de una cara fracturada 100 %		Mayor a 70 %	
	Partículas Planas y Elongadas (pa-iz)	Método "A" Relación 3:1		Menor a 8 %	
		%Partículas Planas			
		1,1 %			
		%Partículas Elongadas			
		0,1 %			
		%Partículas ni Planas ni Elongadas			
		98,8 %			

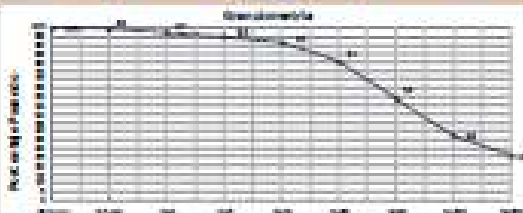
 INGENIERÍA TÉCNICA DE PROYECTOS	Ingeniería Técnica de Proyectos ITP, S.A. Cedula Jurídica: 3-101-362220 Tel: (506) 2290-1400 / Fax: (506) 2290-9295 Dirección: San José, la Urca, Confugio a Repretel, frente al amp m E-mail: ingenieria@itp.cr		Código ITP-RL-59-CR	
			Versión: 02	Página 5 de 7
	Informe No. ITP-1240-19			

Tipo de ensayo realizado: Aceptación de agregados piedra quinta, especificación según FAA.

Aceptación de Agregados	JC-3546-19	No. Muestra	Código de ensayo	Valor Obtenido		Especificaciones
				Mala	% Pasando	Según FAA
		Análisis Granulométrico (AC-02)	Análisis Granulométrico (AC-02)	12.5 mm	100	—
				9.5 mm	82	—
				No#4	8	—
				No#8	4	—
				No#16	3	—
				No#30	3	—
				No#50	2	—
				No#100	1.8	—
						
		Peso Volumétrico (paso-01)		Suelto	1380 kg/m³	N.A.
				Envasado	1527 kg/m³	
		Gravedad Específica Bruta Seca (Gbs) (paso-01-a)		2.612		N.A.
		Gravedad Específica Saturada Seca (Gss) (paso-01-a)		2.662		N.A.
		% de Absorción (paso-01-a)		1.91 %		N.A.
		Abrasión en máquina Los Angeles (paso-01)		13.7 %		Menor a 40 %
		Partículas frías y Afiladas (paso-01)		0.3 %		Menor a 1 %
		Índice de durabilidad (paso-01)		82 %		Mayor a 35 %
		Sonidad con Sulfato de Sodio (paso-01)		3.4 %		Menor a 10 %
		Residuos Insolubles en agua (paso-01)		100 %		Mayor a 25 %
		Caras fracturadas (paso-01)		Al menos una cara fracturada 100 %		Mayor a 85 %
				Más de una cara fracturada 100 %		Mayor a 70 %
		Partículas Planas y Elongadas (paso-01)		Método "A" Relación 3:1		Menor a 8 %
				%Partículas Planas	2.0 %	
				%Partículas Elongadas	0.6 %	
				%Partículas ni Planas ni Elongadas	97.4 %	

 INGENIERÍA TÉCNICA DE PROYECTOS	Ingeniería Técnica de Proyectos ITP, S.A. Cedula Jurídica: 3-101-362220 Tel: (506)2290-1400 / Fax: (506) 2290-9295 Dirección: San José, la Urca, Contiguo a Repretel, frente al ampm E-mail: ingenieria@itp.cr		Código ITP-RL-59-CR	
			Versión: 02	Página 6 de 7
	Informe No. ITP-1240-19			

Tipo de ensayo realizada: Aceptación de agregados piedra caucho, especificación según FAA.

Aceptación de Agregados	No. Muestra	Código de ensayo	Valor Obtenido		Especificaciones
			Maña	% Pasando	No Aplica
			12,5 mm	100	—
			9,5 mm	99	—
			No4	97	—
			No6	95	—
			No14	92	—
			No30	81	—
			No50	59	—
			No100	38	—
			No200	26,0	—
	LC-3546-19 Caucho	Análisis Granulométrico (AG-02)			
		Peso Volumétrico (AV-04a-02)	Suelto	854 kg/m³	N.A.
			Empacado	937 kg/m³	
		Sanidad con Sulfato de Sodio (AG-06)	2,6 %		N.A.

(+) Incertidumbre del valor expresada al 95% de confianza:

- Para la estimación de las incertidumbres se utiliza el instructivo "Estimación de incertidumbre" (ITP-AL-01).
- La adecuación del tamaño de muestra para la realización de los ensayos se lleva a cabo mediante el instructivo "Muestreo de campo" (ITP-IT-19), "Muestreo de mezcla asfáltica" (ITP-IT-14), "Muestreo en campo de agregados" (ITP-IL-35), "Muestreo de mezclas de concreto" (ITP-IL-50), "Muestreo de materiales asfálticos por AASTHO" (ITP-IL-124) o "Práctica estándar para el muestreo de materiales asfálticos" (ITP-IL-122); según corresponda.

	Ingeniería Técnica de Proyectos ITP, S.A. Cédula Jurídica: 3-101-362220 Tel: (506) 2290-1400 / Fax: (506) 2290-9295 Dirección: San José, la Urca, Contiguo a Repretel, frente al ampm E-mail: ingenieria@itp.cr	Código ITP-RL-59-CR	
		Versión: 02	Página 7 de 7
		Informe No. ITP-1240-19	

Notas:

1. Este informe de ensayo cumple los criterios establecidos por la norma INTE-SO/IEC 17025, en su versión vigente, para la emisión de resultados de ensayo.
2. No se permite la reproducción parcial o total de este documento sin autorización de Ingeniería Técnica de Proyectos ITP, S.A.
3. Los datos expresados son únicamente referidos a la muestra o al (a los) objeto (s) de ensayo que se indica (n), salvo que se indique lo contrario.
4. La incertidumbre de los resultados se expresa con un $k=2$ (95% de confianza).
5. Este informe no es válido sin la firma de aprobación por parte de Ingeniería Técnica de Proyectos ITP, S.A. en las páginas que así lo requieran.
6. Si usted requiere mayor información de la aportada en este informe, sobre ubicación de las pruebas, resultados intermedios, o cualquier información particular, sírvase contactarnos al correo ingenieria@itp.cr
7. ESTE DOCUMENTO INCLUYE INFORMACIÓN DE RESULTADOS DE ENSAYOS ACREDITADOS ANTE EL ENTE COSTARRICENSE DE ACREDITACIÓN, LOS CUALES SE RECONOCEN CON EL SÍMBOLO (*). ADICIONALMENTE SE INCLUYEN RESULTADOS DE ENSAYOS NO ACREDITADOS LOS CUALES SE RECONOCEN CON EL SÍMBOLO (**) SI APLICAN, VER ALCANCE Y VIGENCIA DE ACREDITACION EN WWW.ECA.OR.CR, BAJO LA IDENTIFICACIÓN LE-050.

Elaborado por:
JOSE LUIS GUZMAN SANCHEZ
(FIRMA)

Jose Luis Guzmán
Coordinador de U.E.I.

Aprobado por:

Ing. Sergio Fernández Cerdas MSc.
Gerente Técnico Regional


ÚLTIMA LÍNEA

Fuente: ITP 1240-19

Anexo 3: Ensayos físicos y reológicos al cemento asfáltico.

- LC 3446 VIRGEN

Tabla No. 1

 INGENIERÍA TÉCNICA DE PROYECTOS Ensayos físicos en cemento asfáltico.		
Ensayo	Resultado	Unidades
Penetración a 25 °C, 100 g, 5 s	N.A.	1/10 mm
Punto de ablandamiento 5 °C/min	49.4	°C
Recuperación elástica a 25 °C	6.25	%
Ductilidad del asfalto	N.A.	cm
Densidad del asfalto a (25 °C)	1030.65	adimensional
Punto de inflamación	N.A.	°C
Viscosidad dinámica a 135 °C	470	mPa·s
Viscosidad dinámica a 150 °C	N.A.	mPa·s
Viscosidad dinámica a 165 °C	N.A.	mPa·s

Nota: 1 mPa·s = 1 cP (centiPoise) Viscosímetro Brookfield VT1

Tabla No. 2


 INGENIERÍA TÉCNICA DE PROYECTOS Ensayos reológicos en cemento asfáltico Determinación del límite superior del grado de desempeño.			
<i>Cemento asfáltico original sin envejecimiento.</i>			
Ensayo	Temperatura (°C)	Resultado	Unidades
Módulo de deformación (G*/senδ)	64	2.26	kPa
Módulo de deformación (G*/senδ)	70	0.99	kPa
Módulo de deformación (G*/senδ)	76	0.50	kPa
Ángulo de fase (δ)	64	86.6	°
Ángulo de fase (δ)	70	87.9	°
Ángulo de fase (δ)	76	88.9	°
Temperatura real de falla: 69.8 °C Temperatura superior PG: 64 °C			

Tabla No. 3



 INGENIERÍA TÉCNICA DE PROYECTOS Ensayos físicos en cemento asfáltico Cambio de masa con horno de película delgada rotacional.		
Ensayo	Resultado	Unidades
Cambio de masa RTFOT	-0.3812	%

Tabla No. 4



INGENIERÍA
TÉCNICA DE
PROYECTOS

Ensayos reológicos en cemento asfáltico
Determinación del límite superior del grado de desempeño.


Cemento asfáltico envejecido en horno de película delgada rotacional.

Ensayo	Temperatura (°C)	Resultado	Unidades
Módulo de deformación (G*/senδ)	64	8.95	kPa
Módulo de deformación (G*/senδ)	70	3.50	kPa
Módulo de deformación (G*/senδ)	76	1.46	kPa
Ángulo de fase (δ)	64	82.1	°
Ángulo de fase (δ)	70	83.5	°
Ángulo de fase (δ)	76	84.8	°

Temperatura real de falla: 73.18 °C

Temperatura superior PG: 70 °C

Tabla No. 5



INGENIERÍA
TÉCNICA DE
PROYECTOS

Ensayos reológicos en cemento asfáltico
Determinación de temperatura intermedia del grado de desempeño.


Cemento asfáltico envejecido en horno de película delgada + cámara de envejecimiento por presión PAV.

Ensayo	Temperatura (°C)	Resultado	Unidades
Módulo de fatiga (G* senδ)	N.A.	N.A.	kPa
Módulo de fatiga (G* senδ)	N.A.	N.A.	kPa
Módulo de fatiga (G* senδ)	N.A.	N.A.	kPa
Ángulo de fase (δ)	N.A.	N.A.	°
Ángulo de fase (δ)	N.A.	N.A.	°
Ángulo de fase (δ)	N.A.	N.A.	°

Temperatura real de falla: N.A. °C

Temperatura intermedia PG: N.A. °C

Tabla No. 6



INGENIERÍA
TÉCNICA DE
PROYECTOS

Ensayos reológicos en cemento asfáltico
Determinación del límite inferior del grado de desempeño.

Ensayo	Temperatura (°C)	Resultado	Unidades
Módulo de rigidez Creep Stiffness (s)	N.A.	N.A.	MPa
Módulo de rigidez Creep Stiffness (s)	N.A.	N.A.	MPa
Módulo de rigidez Creep Stiffness (s)	N.A.	N.A.	MPa
Valor de pendiente estimado (m)	N.A.	N.A.	Adimensional
Valor de pendiente estimado (m)	N.A.	N.A.	Adimensional
Valor de pendiente estimado (m)	N.A.	N.A.	Adimensional

Temperatura real de falla: N.A. °C

Temperatura inferior PG: N.A.

Tabla No. 7



Clasificación del cemento asfáltico por grado de desempeño.

Ensayo	Temperatura (°C)	Clasificación*
Temperatura superior	N.A.	PG 64
Temperatura intermedia	N.A.	
Temperatura inferior	N.A.	

*Clasificación según (AASHTO M-320)

- **LC 3446 15% CAUCHO**

Tabla No. 1



Ensayos físicos en cemento asfáltico.

Ensayo	Resultado	Unidades
Penetración a 25 °C, 100 g, 5 s	N.A.	1/10 mm
Punto de ablandamiento 5 °C/min	53.1	°C
Recuperación elástica a 25 °C	8.75	%
Ductilidad del asfalto	N.A.	cm
Densidad del asfalto a (25 °C)	1090.39	adimensional
Punto de inflamación	N.A.	°C
Viscosidad dinámica a 135 °C	1023	mPa·s
Viscosidad dinámica a 150 °C	N.A.	mPa·s
Viscosidad dinámica a 165 °C	N.A.	mPa·s

Tabla No. 2



**Ensayos reológicos en cemento asfáltico
Determinación del límite superior del grado de desempeño.**

Cemento asfáltico original sin envejecimiento.

Ensayo	Temperatura (°C)	Resultado	Unidades
Módulo de deformación (G*/senδ)	64	4.99	kPa
Módulo de deformación (G*/senδ)	70	2.00	kPa
Módulo de deformación (G*/senδ)	76	0.88	kPa
Ángulo de fase (δ)	64	84.4	°
Ángulo de fase (δ)	70	86.7	°
Ángulo de fase (δ)	76	88.6	°

Temperatura real de falla: **75.03** °C

Temperatura superior PG: **70** °C

Tabla No. 3



Ensayos físicos en cemento asfáltico
Cambio de masa con horno de película delgada rotacional.

Ensayo	Resultado	Unidades
Cambio de masa RTFOT	-0.6580	%

Tabla No. 4



Ensayos reológicos en cemento asfáltico
Determinación del límite superior del grado de desempeño.

Cemento asfáltico envejecido en horno de película delgada rotacional.

Ensayo	Temperatura (°C)	Resultado	Unidades
Módulo de deformación ($G^*/\sin\delta$)	70	6.15	kPa
Módulo de deformación ($G^*/\sin\delta$)	76	2.51	kPa
Módulo de deformación ($G^*/\sin\delta$)	82	1.07	kPa
Ángulo de fase (δ)	70	81.1	°
Ángulo de fase (δ)	76	83.9	°
Ángulo de fase (δ)	82	86.2	°

Temperatura real de falla: **76.92** °C

Temperatura superior PG: **76** °C

Tabla No. 7



Clasificación del cemento asfáltico por grado de desempeño.

Ensayo	Temperatura (°C)	Clasificación*
Temperatura superior	N.A.	PG 70
Temperatura intermedia	N.A.	
Temperatura inferior	N.A.	

*Clasificación según (AASHTO M-320)

- LC 3446 25% CAUCHO

Tabla No. 1



Ensayos físicos en cemento asfáltico.

Ensayo	Resultado	Unidades
Penetración a 25 °C, 100 g, 5 s	N.A.	1/10 mm
Punto de ablandamiento 5 °C/min	53.7	°C
Recuperación elástica a 25 °C	3.75	%
Ductilidad del asfalto	N.A.	cm
Densidad del asfalto a (25 °C)	1103,74	adimensional
Punto de inflamación	N.A.	°C
Viscosidad dinámica a 135 °C	1363	mPa·s
Viscosidad dinámica a 150 °C	N.A.	mPa·s
Viscosidad dinámica a 165 °C	N.A.	mPa·s

Tabla No. 2



Ensayos reológicos en cemento asfáltico
Determinación del límite superior del grado de desempeño.

Cemento asfáltico original sin envejecimiento.

Ensayo	Temperatura (°C)	Resultado	Unidades
Módulo de deformación ($G^*/\sin\delta$)	70	2.73	kPa
Módulo de deformación ($G^*/\sin\delta$)	76	1.21	kPa
Módulo de deformación ($G^*/\sin\delta$)	82	0.49	kPa
Ángulo de fase (δ)	70	85.7	°
Ángulo de fase (δ)	76	87.9	°
Ángulo de fase (δ)	82	89.2	°

Temperatura real de falla: **77.24** °C

Temperatura superior PG: **76** °C


Tabla No. 3



Ensayos físicos en cemento asfáltico
Cambio de masa con horno de película delgada rotacional.

Ensayo	Resultado	Unidades
Cambio de masa RTFOT	-0.12370	%

Tabla No. 4

 INGENIERÍA TÉCNICA DE PROYECTOS	Ensayos reológicos en cemento asfáltico Determinación del límite superior del grado de desempeño.
--	--


Cemento asfáltico envejecido en horno de película delgada rotacional.

Ensayo	Temperatura (°C)	Resultado	Unidades
Módulo de deformación (G*/senδ)	70	8.33	kPa
Módulo de deformación (G*/senδ)	76	3.31	kPa
Módulo de deformación (G*/senδ)	82	1.36	kPa
Ángulo de fase (δ)	70	79.1	°
Ángulo de fase (δ)	76	82.3	°
Ángulo de fase (δ)	82	85.1	°

Temperatura real de falla: **78.75** °C

Temperatura superior PG: **76** °C

Tabla No. 7

 INGENIERÍA TÉCNICA DE PROYECTOS	Clasificación del cemento asfáltico por grado de desempeño.
--	--

Ensayo	Temperatura (°C)	Clasificación*
Temperatura superior	N.A.	PG 76
Temperatura intermedia	N.A.	
Temperatura inferior	N.A.	

*Clasificación según (AASHTO M-320)

Fuente: Informe LC 3446

Anexo 4: Diseño de Mezcla Marshall

- Sin Caucho

Diseño Asfalto Sin CAUCHO LU-1120-21 (LC-965-21)

5,00
% Asfalto

Pastilla	Peso (g) en:			Volumen (cc)	% ASB	Grav.Espec.		Grav.Espec.	% Vacíos
	Aire	Agua	SSS			Bruta		Bruta	
1	1174,1	674,8	1177,7	502,9	0,72	2,335	0,9976	2,329	5,7
2	1173,0	673,1	1176,9	503,8	0,77	2,328	0,9976	2,323	6,0
3	1173,6	673,3	1175,9	502,6	0,46	2,335	0,9976	2,329	5,7
4	1176,5	674,7	1178,6	503,9	0,42	2,335	0,9976	2,329	5,7
PROMEDIO						2,333	0,9976	2,328	5,8
DESV. ESTANDAR						0,003			0,132

5,50
% Asfalto

Pastilla	Peso (g) en:			Volumen (cc)	% ASB	Grav.Espec.		Grav.Espec.	% Vacíos
	Aire	Agua	SSS			Bruta		Bruta	
1	1175,3	676,8	1176,3	499,5	0,20	2,353	0,9976	2,347	4,3
2	1173,2	675,2	1174,0	498,8	0,16	2,352	0,9976	2,346	4,4
3	1174,8	677,6	1176,0	498,4	0,24	2,357	0,9976	2,351	4,2
4	1173,1	677,5	1174,1	496,6	0,20	2,362	0,9976	2,357	4,0
PROMEDIO						2,356	0,9976	2,350	4,2
DESV. ESTANDAR						0,005			0,190

6,00
% Asfalto

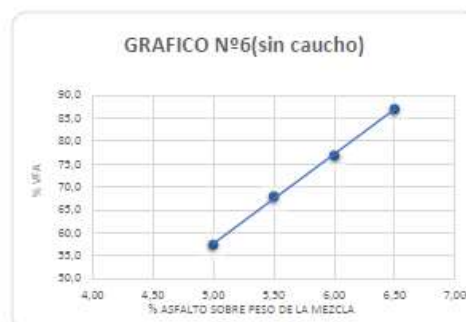
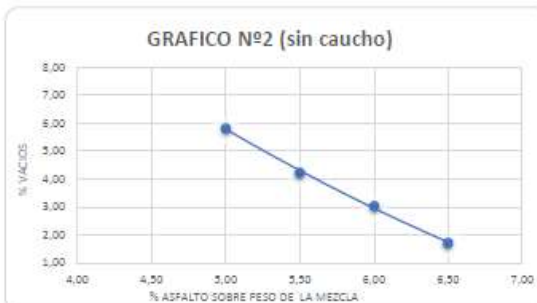
Pastilla	Peso (g) en:			Volumen (cc)	% ASB	Grav.Espec.		Grav.Espec.	% Vacíos
	Aire	Agua	SSS			Bruta		Bruta	
1	1171,9	677,0	1173,0	496,0	0,22	2,363	0,9976	2,357	3,3
2	1172,8	679,3	1173,0	493,7	0,04	2,376	0,9976	2,370	2,8
3	1173,2	678,8	1174,0	495,2	0,16	2,369	0,9976	2,363	3,1
4	1165,4	674,8	1166,0	491,2	0,12	2,373	0,9976	2,367	2,9
PROMEDIO						2,370	0,9976	2,364	3,0
DESV. ESTANDAR						0,006			0,226

6,50
% Asfalto

Pastilla	Peso (g) en:			Volumen (cc)	% ASB	Grav.Espec.		Grav.Espec.	% Vacíos
	Aire	Agua	SSS			Bruta		Bruta	
1	1170,3	680,1	1170,9	490,8	0,12	2,384	0,9976	2,379	1,5
2	1169,5	678,5	1169,9	491,4	0,08	2,380	0,9976	2,374	1,6
3	1171,3	678,8	1171,8	493,0	0,10	2,376	0,9976	2,370	1,8
4	1172,3	679,1	1172,9	493,8	0,12	2,374	0,9976	2,368	1,9
PROMEDIO						2,379	0,9976	2,373	1,7
DESV. ESTANDAR						0,005			0,192

MAXIMA TEORICA #	5,00	5,50	6,00	6,50
PESO INICIAL (g)	2052,6	2061,0	2056,6	2058,2
CALIBRACION G	7598,0	7598,0	7598,0	7598,0
	---	---	---	---
	2347,7	2347,6	2347,6	2347,7
PESO MUESTRA+FRASCO + AGUA	8824,9	8823,7	8814,5	8806,5
	---	---	---	---
MT SIN ABS	2,486	2,467	2,448	2,422
	2055,7	2063,9	2058,0	2059,2
	2055,7	2063,6	2058,0	2059,1
MAXIMA TEORICA CORREGIDA	2,477	2,460	2,444	2,420
FACTOR CORR.	0,9963	0,9969	0,9983	0,9989

Parametros de la mezcla con el porcentaje óptimo de asfalto						
% Asfalto	Gsb	Max Teo	Vacios	Estab.	VMA	VFA
5.00	2.333	2.477	5.81	1472	13.6	57.4
5.50	2.356	2.460	4.22	1477	13.2	68.0
6.00	2.370	2.444	3.03	1433	13.1	76.8
6.50	2.379	2.420	1.71	1420	13.2	87.0



Fuente: Elaboración propia.

- Con Caucho

Diseño Asfalto Con CAUCHO LU-1120-21 (LC-965-21)

5,00	Pastilla	Peso (g) en:			Volumen (cc)	% ASB	Grav.Espec.		Grav.Espec.	%
		Aire	Agua	SSS			Bruta		Bruta	Vacios
% Asfalto	1	1170,7	676,2	1178,0	501,8	1,45	2,333	0,9976	2,327	6,3
	2	1170,7	676,7	1179,5	502,8	1,75	2,328	0,9976	2,323	6,5
	3	1173,6	676,0	1178,3	502,3	0,94	2,336	0,9976	2,331	6,1
	4	1173,0	677,6	1180,1	502,5	1,41	2,334	0,9976	2,329	6,2
						PROMEDIO	2,333	0,9976	2,327	6,3
					DESV. ESTANDAR	0,003				0,138

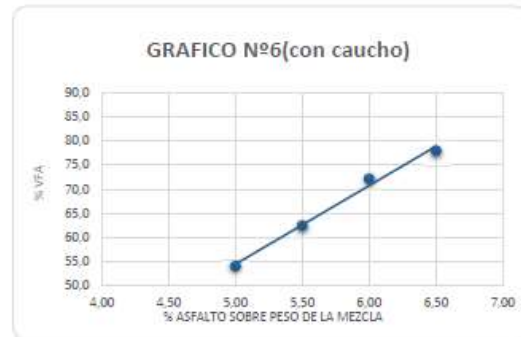
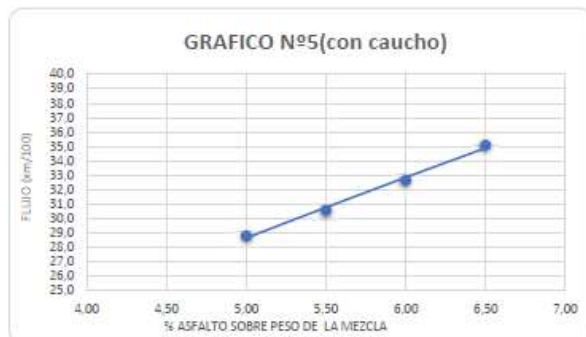
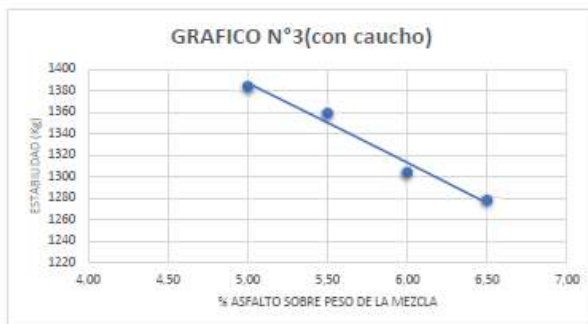
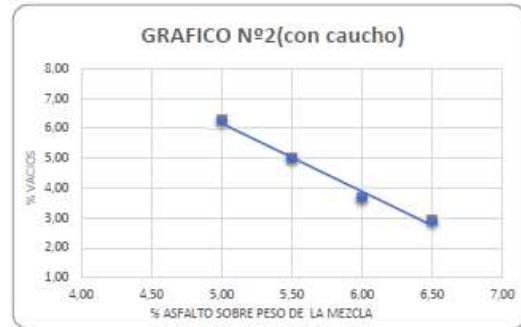
5,50	Pastilla	Peso (g) en:			Volumen	% ASB	Grav.Espec.		Grav.Espec.	%
		Aire	Agua	SSS	(cc)		Bruta		Bruta	Vacios
% Asfalto	1	1173,8	679,0	1176,8	497,8	0,60	2,358	0,9976	2,352	4,8
	2	1169,6	675,5	1172,3	496,8	0,54	2,354	0,9976	2,349	5,0
	3	1174,7	677,5	1177,0	499,5	0,46	2,352	0,9976	2,346	5,1
	4	1173,9	677,0	1176,6	499,6	0,54	2,350	0,9976	2,344	5,2
						PROMEDIO	2,353	0,9976	2,348	5,0
					DESV. ESTANDAR	0,004				0,144

6,00 % Asfalto	Peso (g) en:			Volumen	% ASB	Grav.Espec.		Grav.Espec.	%	
	Pastilla	Aire	Agua	SSS		(cc)	Bruta		Bruta	Vacios
	1	1175,6	680,4	1176,7	496,3	0,22	2,369	0,9976	2,363	3,6
	2	1175,9	680,8	1177,7	496,9	0,36	2,366	0,9976	2,361	3,7
	3	1177,6	682,1	1179,6	497,5	0,40	2,367	0,9976	2,361	3,7
	4	1173,0	679,9	1176,0	496,1	0,60	2,364	0,9976	2,359	3,8
	PROMEDIO						2,367	0,9976	2,361	3,7
	DESV. ESTANDAR						0,002			0,072

6,50	Pastilla	Peso (g) en:			Volumen (cc)	% ASB	Grav.Espec.		Grav.Espec.	%
		Aire	Agua	SSS			Bruta		Bruta	Vacios
% Asfalto	1	1178,0	684,5	1179,8	495,3	0,36	2,378	0,9976	2,373	2,9
	2	1177,0	684,2	1178,4	494,2	0,28	2,382	0,9976	2,376	2,8
	3	1177,1	682,4	1178,1	495,7	0,20	2,375	0,9976	2,369	3,0
	4	1178,6	683,8	1179,6	495,8	0,20	2,377	0,9976	2,371	2,9
	PROMEDIO						2,378	0,9976	2,372	2,9
	DESV. ESTANDAR						0,003			0,119

MAXIMA TEORICA #	5,00	5,50	6,00	6,50
PESO INICIAL (g)	2042,1	2055,8	2067,6	2078,2
CALIBRACION G	7598,0	7598,0	7598,0	7598,0
	—	—	—	—
	2347,3	2347,5	2347,4	2347,3
PESO MUESTRA+FRASCO + AGUA	8825,6	8828,6	8829,3	8829,0
	—	—	—	—
MT SIN ABS	2,507	2,491	2,472	2,453
	2045,5	2060,6	2073,8	2080,4
	2048,0	2060,4	2072,8	2079,5
MAXIMA TEORICA CORREGIDA	2,489	2,477	2,457	2,449
FACTOR CORR.	0,9928	0,9945	0,9938	0,9985

% Asfalto	Gsb	Max Teo	Flujo	Vacios	Estab.	VMA	VFA
5.00	2.333	2.489	26.7	6.27	1472	13.6	54.0
5.50	2.353	2.477	28.3	4.99	1477	13.3	62.4
6.00	2.367	2.457	30.3	3.68	1433	13.2	72.2
6.50	2.378	2.449	32.5	2.90	1420	13.2	78.0



Fuente: Elaboración propia

Anexo 5: Memorias de cálculo de los módulos dinámicos y curvas maestras.

- **Información de la prueba sin caucho.**

Temperature, °F	Mixture E* , psi					
	25 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.1 Hz
14	2791444	2713704	2626826	2413379	2321473	2090960
40	2171557	2001331	1878145	1591985	1466963	1180029
70	1563703	1383082	1246843	956622	834355	571256
100	538043	417709	345045	204890	163893	90325
130	147905	99196	73210	33886	25072	13880

Temperature, °F	Mixture Phase Angle						
	25 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.1 Hz	
14	3.34	4.17	4.47	5.24	5.573333	6.48	14°F
40	7.64	8.32	9.02	10.70	11.55	13.98	40°F
70	11.88	13.20	14.31	17.27	18.70	22.85	70°F
100	25.60	27.76	28.82	31.78	31.95	32.61	100°F
130	33.34	33.13	32.38	31.35	29.95	26.30	130°F

Master Curve

Sample	Temp F	Hz	E, ksi	Phi Deg	E', ksi	E'', ksi
1	14.0	25	2897.71	3.5	2892.43	174.88
1	14.0	10	2782.98	4.0	2776.24	193.65
1	14.0	5	2716.12	4.4	2708.01	209.80
1	14.0	1	2510.89	5.3	2500.04	233.24
1	14.0	0.5	2403.71	5.5	2392.56	231.22
1	14.0	0.1	2161.79	6.5	2147.89	244.72
1	40.0	25	2039.67	7.8	2020.75	277.17
1	40.0	10	1860.26	8.6	1839.34	278.17
1	40.0	5	1747.56	9.5	1723.70	287.83
1	40.0	1	1482.29	11.3	1453.76	289.43
1	40.0	0.5	1367.13	12.1	1336.85	286.11
1	40.0	0.1	1096.92	14.5	1062.17	273.91
1	70.0	25	1465.46	12.3	1431.72	312.69
1	70.0	10	1295.19	13.6	1258.87	304.55
1	70.0	5	1168.72	14.7	1130.51	296.37
1	70.0	1	895.90	17.7	853.73	271.64
1	70.0	0.5	781.03	19.1	738.08	255.44
1	70.0	0.1	532.58	23.2	489.44	209.98
1	100.0	25	518.95	25.5	468.47	223.25
1	100.0	10	402.63	27.6	356.91	186.35
1	100.0	5	331.99	28.6	291.43	159.02
1	100.0	1	196.09	31.5	167.21	102.43
1	100.0	0.5	156.06	31.6	132.88	81.84

1	100.0	0.1	85.22	32.2	72.08	45.46
1	130.0	25	140.88	33.13	117.97	76.99
1	130.0	10	92.59	33.17	77.50	50.66
1	130.0	5	67.69	32.41	57.15	36.28
1	130.0	1	30.59	31.40	26.11	15.94
1	130.0	0.5	22.67	29.98	19.64	11.33
1	130.0	0.1	12.60	26.15	11.31	5.55
2	14.0	25	2613.43	3.45	2608.70	157.27
2	14.0	10	2547.73	4.32	2540.49	191.91
2	14.0	5	2452.73	4.50	2445.17	192.44
2	14.0	1	2240.40	5.30	2230.82	206.95
2	14.0	0.5	2159.32	5.73	2148.53	215.59
2	14.0	0.1	1951.34	6.61	1938.37	224.62
2	40.0	25	2173.39	7.82	2153.18	295.72
2	40.0	10	2014.87	8.25	1994.02	289.12
2	40.0	5	1890.72	8.93	1867.80	293.49
2	40.0	1	1600.78	10.58	1573.57	293.92
2	40.0	0.5	1476.49	11.47	1447.00	293.61
2	40.0	0.1	1188.59	13.98	1153.38	287.14
2	70.0	25	1585.12	11.84	1551.40	325.23
2	70.0	10	1405.27	13.22	1368.03	321.37
2	70.0	5	1265.31	14.39	1225.61	314.46
2	70.0	1	965.52	17.45	921.08	289.53
2	70.0	0.5	840.93	18.92	795.50	272.67
2	70.0	0.1	571.45	23.22	525.16	225.30
2	100.0	25	538.53	26.16	483.36	237.43
2	100.0	10	415.97	28.38	365.98	197.72
2	100.0	5	342.43	29.46	298.16	168.41
2	100.0	1	200.59	32.57	169.04	107.98
2	100.0	0.5	160.12	32.75	134.67	86.62
2	100.0	0.1	87.18	33.27	72.89	47.83
2	130.0	25	153.74	34.20	127.16	86.41
2	130.0	10	104.02	33.70	86.54	57.72
2	130.0	5	77.03	32.87	64.70	41.81
2	130.0	1	35.61	31.55	30.34	18.63
2	130.0	0.5	26.21	29.97	22.70	13.09
2	130.0	0.1	14.53	26.07	13.05	6.39
3	14.0	25	2863.2	3.1	2858.95	155.84
3	14.0	10	2810.4	4.2	2802.81	206.32
3	14.0	5	2711.6	4.5	2703.34	211.81
3	14.0	1	2488.8	5.1	2479.03	220.81
3	14.0	0.5	2401.4	5.5	2390.45	228.91
3	14.0	0.1	2159.8	6.3	2146.55	238.50
3	40.0	25	2301.6	7.3	2283.00	292.05
3	40.0	10	2128.9	8.1	2107.63	299.96
3	40.0	5	1996.2	8.7	1973.40	300.56
3	40.0	1	1692.9	10.3	1665.87	301.24
3	40.0	0.5	1557.3	11.1	1528.19	299.54

3	40.0	0.1	1254.6	13.5	1219.91	292.88
3	70.0	25	1640.5	11.5	1607.70	326.51
3	70.0	10	1448.8	12.8	1412.89	320.48
3	70.0	5	1306.5	13.8	1268.57	312.53
3	70.0	1	1008.4	16.7	965.92	289.79
3	70.0	0.5	881.1	18.1	837.60	273.45
3	70.0	0.1	609.7	22.1	564.86	229.60
3	100.0	25	556.7	25.2	503.84	236.66
3	100.0	10	434.5	27.3	386.00	199.57
3	100.0	5	360.7	28.4	317.36	171.45
3	100.0	1	218.0	31.3	186.29	113.22
3	100.0	0.5	175.5	31.5	149.67	91.64
3	100.0	0.1	98.6	32.3	83.30	52.70
3	130.0	25	149.1	32.7	125.48	80.53
3	130.0	10	101.0	32.5	85.14	54.28
3	130.0	5	74.9	31.9	63.62	39.55
3	130.0	1	35.5	31.1	30.36	18.32
3	130.0	0.5	26.3	29.9	22.83	13.13
3	130.0	0.1	14.5	26.7	12.96	6.51

Comparison of Results										Adjusted
Temp, F	Hz	Sample	E', ksi	Average	Normal COV	Diff from Average	Selected	Corrected COV	Average of Selected	Data for Solver
14	25	1	3.460	3.343	5.79%	0.117	3.460	5.79%	3.343	3.460
		2	3.450			0.107	3.450			3.450
		3	3.120			0.223	3.120			3.120
	10	1	3.990	4.173	4.03%	0.183	3.990	4.03%	4.173	3.990
		2	4.320			0.147	4.320			4.320
		3	4.210			0.037	4.210			4.210
	5	1	4.430	4.470	0.81%	0.040	4.430	0.81%	4.470	4.430
		2	4.500			0.030	4.500			4.500
		3	4.480			0.010	4.480			4.480
	1	1	5.330	5.240	2.50%	0.090	5.330	2.50%	5.240	5.330
		2	5.300			0.060	5.300			5.300
		3	5.090			0.150	5.090			5.090
	0.5	1	5.520	5.573	2.48%	0.053	5.520	2.48%	5.573	5.520
		2	5.730			0.157	5.730			5.730
		3	5.470			0.103	5.470			5.470
	0.1	1	6.500	6.483	2.09%	0.017	6.500	2.09%	6.483	6.500
		2	6.610			0.127	6.610			6.610
		3	6.340			0.143	6.340			6.340
40	25	1	7.810	7.640	3.97%	0.170	7.810	3.97%	7.640	7.810
		2	7.820			0.180	7.820			7.820
		3	7.290			0.350	7.290			7.290
	10	1	8.600	8.317	3.09%	0.283	8.600	3.09%	8.317	8.600
		2	8.250			0.067	8.250			8.250
		3	8.100			0.217	8.100			8.100

	5	1	9.480	9.023	4.63%	0.457	9.480	4.63%	9.023	9.480
		2	8.930			0.093	8.930			8.930
		3	8.660			0.363	8.660			8.660
	1	1	11.260	10.697	4.81%	0.563	11.260	4.81%	10.697	11.260
		2	10.580			0.117	10.580			10.580
		3	10.250			0.447	10.250			10.250
	0.5	1	12.080	11.547	4.33%	0.533	12.080	4.33%	11.547	12.080
		2	11.470			0.077	11.470			11.470
		3	11.090			0.457	11.090			11.090
	0.1	1	14.460	13.980	3.43%	0.480	14.460	3.43%	13.980	14.460
		2	13.980			0.000	13.980			13.980
		3	13.500			0.480	13.500			13.500
70	25	1	12.320	11.880	3.55%	0.440	12.320	3.55%	11.880	12.320
		2	11.840			0.040	11.840			11.840
		3	11.480			0.400	11.480			11.480
	10	1	13.600	13.200	3.11%	0.400	13.600	3.11%	13.200	13.600
		2	13.220			0.020	13.220			13.220
		3	12.780			0.420	12.780			12.780
	5	1	14.690	14.307	3.01%	0.383	14.690	3.01%	14.307	14.690
		2	14.390			0.083	14.390			14.390
		3	13.840			0.467	13.840			13.840
	1	1	17.650	17.267	2.90%	0.383	17.650	2.90%	17.267	17.650
		2	17.450			0.183	17.450			17.450
		3	16.700			0.567	16.700			16.700
	0.5	1	19.090	18.697	2.89%	0.393	19.090	2.89%	18.697	19.090
		2	18.920			0.223	18.920			18.920
		3	18.080			0.617	18.080			18.080
	0.1	1	23.220	22.853	2.78%	0.367	23.220	2.78%	22.853	23.220
		2	23.220			0.367	23.220			23.220
		3	22.120			0.733	22.120			22.120
100	25	1	25.480	25.600	1.99%	0.120	25.480	1.99%	25.600	25.480
		2	26.160			0.560	26.160			26.160
		3	25.160			0.440	25.160			25.160
	10	1	27.570	27.763	1.97%	0.193	27.570	1.97%	27.763	27.570
		2	28.380			0.617	28.380			28.380
		3	27.340			0.423	27.340			27.340
	5	1	28.620	28.820	1.97%	0.200	28.620	1.97%	28.820	28.620
		2	29.460			0.640	29.460			29.460
		3	28.380			0.440	28.380			28.380
	1	1	31.490	31.783	2.17%	0.293	31.490	2.17%	31.783	31.490
		2	32.570			0.787	32.570			32.570
		3	31.290			0.493	31.290			31.290
	0.5	1	31.630	31.953	2.17%	0.323	31.630	2.17%	31.953	31.630
		2	32.750			0.797	32.750			32.750
		3	31.480			0.473	31.480			31.480
	0.1	1	32.240	32.610	1.76%	0.370	32.240	1.76%	32.610	32.240
		2	33.270			0.660	33.270			33.270
		3	32.320			0.290	32.320			32.320

130	25	1	33.130	33.340	2.33%	0.210	33.130	2.33%	33.340	33.130
		2	34.200			0.860	34.200			34.200
		3	32.690			0.650	32.690			32.690
	10	1	33.170	33.130	1.78%	0.040	33.170	1.78%	33.130	33.170
		2	33.700			0.570	33.700			33.700
		3	32.520			0.610	32.520			32.520
	5	1	32.410	32.383	1.55%	0.027	32.410	1.55%	32.383	32.410
		2	32.870			0.487	32.870			32.870
		3	31.870			0.513	31.870			31.870
	1	1	31.400	31.353	0.71%	0.047	31.400	0.71%	31.353	31.400
		2	31.550			0.197	31.550			31.550
		3	31.110			0.243	31.110			31.110
	0.5	1	29.980	29.953	0.13%	0.027	29.980	0.13%	29.953	29.980
		2	29.970			0.017	29.970			29.970
		3	29.910			0.043	29.910			29.910
	0.1	1	26.150	26.303	1.28%	0.153	26.150	1.28%	26.303	26.150
		2	26.070			0.233	26.070			26.070
		3	26.690			0.387	26.690			26.690

Ángulo de Fase

Master Curve for E'

Sample	Temp F	Hz	E', ksi	Phi Deg
1	14.0	25	2892.43	3.5
1	14.0	10	2776.24	4.0
1	14.0	5	2708.01	4.4
1	14.0	1	2500.04	5.3
1	14.0	0.5	2392.56	5.5
1	14.0	0.1	2147.89	6.5
1	40.0	25	2020.75	7.8
1	40.0	10	1839.34	8.6
1	40.0	5	1723.70	9.5
1	40.0	1	1453.76	11.3
1	40.0	0.5	1336.85	12.1
1	40.0	0.1	1062.17	14.5
1	70.0	25	1431.72	12.3
1	70.0	10	1258.87	13.6
1	70.0	5	1130.51	14.7
1	70.0	1	853.73	17.7
1	70.0	0.5	738.08	19.1
1	70.0	0.1	489.44	23.2
1	100.0	25	468.47	25.5
1	100.0	10	356.91	27.6
1	100.0	5	291.43	28.6
1	100.0	1	167.21	31.5
1	100.0	0.5	132.88	31.6
1	100.0	0.1	72.08	32.2

1	130.0	25	117.97	33.13
1	130.0	10	77.50	33.17
1	130.0	5	57.15	32.41
1	130.0	1	26.11	31.40
1	130.0	0.5	19.64	29.98
1	130.0	0.1	11.31	26.15
2	14.0	25	2608.70	3.45
2	14.0	10	2540.49	4.32
2	14.0	5	2445.17	4.50
2	14.0	1	2230.82	5.30
2	14.0	0.5	2148.53	5.73
2	14.0	0.1	1938.37	6.61
2	40.0	25	2153.18	7.82
2	40.0	10	1994.02	8.25
2	40.0	5	1867.80	8.93
2	40.0	1	1573.57	10.58
2	40.0	0.5	1447.00	11.47
2	40.0	0.1	1153.38	13.98
2	70.0	25	1551.40	11.84
2	70.0	10	1368.03	13.22
2	70.0	5	1225.61	14.39
2	70.0	1	921.08	17.45
2	70.0	0.5	795.50	18.92
2	70.0	0.1	525.16	23.22
2	100.0	25	483.36	26.16
2	100.0	10	365.98	28.38
2	100.0	5	298.16	29.46
2	100.0	1	169.04	32.57
2	100.0	0.5	134.67	32.75
2	100.0	0.1	72.89	33.27
2	130.0	25	127.16	34.20
2	130.0	10	86.54	33.70
2	130.0	5	64.70	32.87
2	130.0	1	30.34	31.55
2	130.0	0.5	22.70	29.97
2	130.0	0.1	13.05	26.07
3	14.0	25	2858.95	3.1
3	14.0	10	2802.81	4.2
3	14.0	5	2703.34	4.5
3	14.0	1	2479.03	5.1
3	14.0	0.5	2390.45	5.5
3	14.0	0.1	2146.55	6.3
3	40.0	25	2283.00	7.3
3	40.0	10	2107.63	8.1
3	40.0	5	1973.40	8.7
3	40.0	1	1665.87	10.3
3	40.0	0.5	1528.19	11.1
3	40.0	0.1	1219.91	13.5

3	70.0	25	1607.70	11.5
3	70.0	10	1412.89	12.8
3	70.0	5	1268.57	13.8
3	70.0	1	965.92	16.7
3	70.0	0.5	837.60	18.1
3	70.0	0.1	564.86	22.1
3	100.0	25	503.84	25.2
3	100.0	10	386.00	27.3
3	100.0	5	317.36	28.4
3	100.0	1	186.29	31.3
3	100.0	0.5	149.67	31.5
3	100.0	0.1	83.30	32.3
3	130.0	25	125.48	32.7
3	130.0	10	85.14	32.5
3	130.0	5	63.62	31.9
3	130.0	1	30.36	31.1
3	130.0	0.5	22.83	29.9
3	130.0	0.1	12.96	26.7

Comparison of Results

										Adjusted
Temp, F	Hz	Sample	E', ksi	Average	Normal COV	Diff from Average	Selected	Corrected COV	Average of Selected	Data for Solver
14	25	1	3.460	3.343	5.79%	0.117	3.460	5.79%	3.343	3.460
		2	3.450			0.107	3.450			3.450
		3	3.120			0.223	3.120			3.120
	10	1	3.990	4.173	4.03%	0.183	3.990	4.03%	4.173	3.990
		2	4.320			0.147	4.320			4.320
		3	4.210			0.037	4.210			4.210
	5	1	4.430	4.470	0.81%	0.040	4.430	0.81%	4.470	4.430
		2	4.500			0.030	4.500			4.500
		3	4.480			0.010	4.480			4.480
	1	1	5.330	5.240	2.50%	0.090	5.330	2.50%	5.240	5.330
		2	5.300			0.060	5.300			5.300
		3	5.090			0.150	5.090			5.090
	0.5	1	5.520	5.573	2.48%	0.053	5.520	2.48%	5.573	5.520
		2	5.730			0.157	5.730			5.730
		3	5.470			0.103	5.470			5.470
	0.1	1	6.500	6.483	2.09%	0.017	6.500	2.09%	6.483	6.500
		2	6.610			0.127	6.610			6.610
		3	6.340			0.143	6.340			6.340
40	25	1	7.810	7.640	3.97%	0.170	7.810	3.97%	7.640	7.810
		2	7.820			0.180	7.820			7.820
		3	7.290			0.350	7.290			7.290
	10	1	8.600	8.317	3.09%	0.283	8.600	3.09%	8.317	8.600
		2	8.250			0.067	8.250			8.250
		3	8.100			0.217	8.100			8.100

	5	1	9.480	9.023	4.63%	0.457	9.480	4.63%	9.023	9.480
		2	8.930			0.093	8.930			8.930
		3	8.660			0.363	8.660			8.660
	1	1	11.260	10.697	4.81%	0.563	11.260	4.81%	10.697	11.260
		2	10.580			0.117	10.580			10.580
		3	10.250			0.447	10.250			10.250
	0.5	1	12.080	11.547	4.33%	0.533	12.080	4.33%	11.547	12.080
		2	11.470			0.077	11.470			11.470
		3	11.090			0.457	11.090			11.090
	0.1	1	14.460	13.980	3.43%	0.480	14.460	3.43%	13.980	14.460
		2	13.980			0.000	13.980			13.980
		3	13.500			0.480	13.500			13.500
70	25	1	12.320	11.880	3.55%	0.440	12.320	3.55%	11.880	12.320
		2	11.840			0.040	11.840			11.840
		3	11.480			0.400	11.480			11.480
	10	1	13.600	13.200	3.11%	0.400	13.600	3.11%	13.200	13.600
		2	13.220			0.020	13.220			13.220
		3	12.780			0.420	12.780			12.780
	5	1	14.690	14.307	3.01%	0.383	14.690	3.01%	14.307	14.690
		2	14.390			0.083	14.390			14.390
		3	13.840			0.467	13.840			13.840
	1	1	17.650	17.267	2.90%	0.383	17.650	2.90%	17.267	17.650
		2	17.450			0.183	17.450			17.450
		3	16.700			0.567	16.700			16.700
	0.5	1	19.090	18.697	2.89%	0.393	19.090	2.89%	18.697	19.090
		2	18.920			0.223	18.920			18.920
		3	18.080			0.617	18.080			18.080
	0.1	1	23.220	22.853	2.78%	0.367	23.220	2.78%	22.853	23.220
		2	23.220			0.367	23.220			23.220
		3	22.120			0.733	22.120			22.120
100	25	1	25.480	25.600	1.99%	0.120	25.480	1.99%	25.600	25.480
		2	26.160			0.560	26.160			26.160
		3	25.160			0.440	25.160			25.160
	10	1	27.570	27.763	1.97%	0.193	27.570	1.97%	27.763	27.570
		2	28.380			0.617	28.380			28.380
		3	27.340			0.423	27.340			27.340
	5	1	28.620	28.820	1.97%	0.200	28.620	1.97%	28.820	28.620
		2	29.460			0.640	29.460			29.460
		3	28.380			0.440	28.380			28.380
	1	1	31.490	31.783	2.17%	0.293	31.490	2.17%	31.783	31.490
		2	32.570			0.787	32.570			32.570
		3	31.290			0.493	31.290			31.290
	0.5	1	31.630	31.953	2.17%	0.323	31.630	2.17%	31.953	31.630
		2	32.750			0.797	32.750			32.750
		3	31.480			0.473	31.480			31.480
	0.1	1	32.240	32.610	1.76%	0.370	32.240	1.76%	32.610	32.240
		2	33.270			0.660	33.270			33.270
		3	32.320			0.290	32.320			32.320

130	25	1	33.130	33.340	2.33%	0.210	33.130	2.33%	33.340	33.130
		2	34.200			0.860	34.200			34.200
		3	32.690			0.650	32.690			32.690
	10	1	33.170	33.130	1.78%	0.040	33.170	1.78%	33.130	33.170
		2	33.700			0.570	33.700			33.700
		3	32.520			0.610	32.520			32.520
	5	1	32.410	32.383	1.55%	0.027	32.410	1.55%	32.383	32.410
		2	32.870			0.487	32.870			32.870
		3	31.870			0.513	31.870			31.870
	1	1	31.400	31.353	0.71%	0.047	31.400	0.71%	31.353	31.400
		2	31.550			0.197	31.550			31.550
		3	31.110			0.243	31.110			31.110
	0.5	1	29.980	29.953	0.13%	0.027	29.980	0.13%	29.953	29.980
		2	29.970			0.017	29.970			29.970
		3	29.910			0.043	29.910			29.910
	0.1	1	26.150	26.303	1.28%	0.153	26.150	1.28%	26.303	26.150
		2	26.070			0.233	26.070			26.070
		3	26.690			0.387	26.690			26.690

Fuente: Elaboración Propia

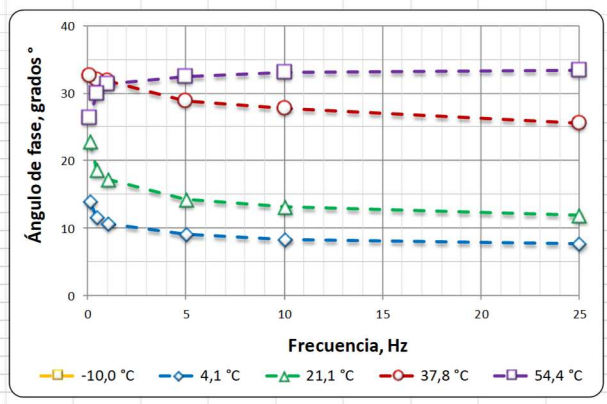
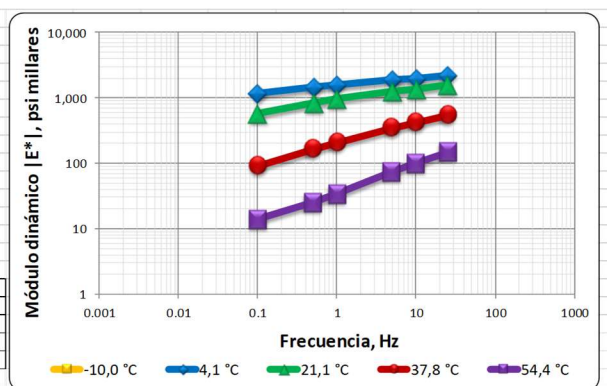
- Modulo dinámico sin caucho

	25	10	5	1	0.5	0.1
Temperatura, °F	Módulo dinámico E* , psi					
	25 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.1 Hz
14						
40	2171557	2001331	1878145	1591985	1466963	1180029
70	1563703	1383082	1246843	956622	834355	571256
100	538043	417709	345045	204890	163893	90325
130	147905	99196	73210	33886	25072	13880

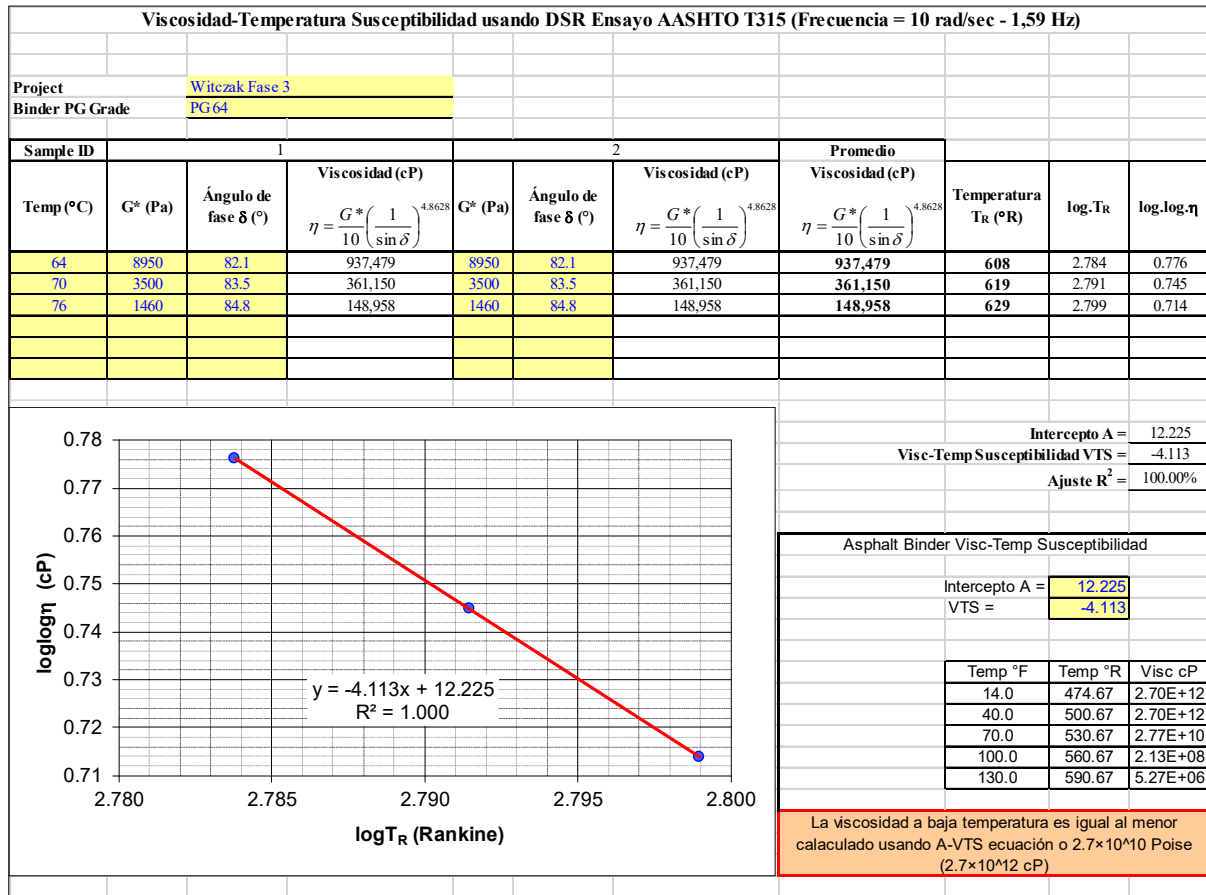
	25	10	5	1	0.5	0.1
Temperatura, °F	Ángulo de fase (°)					
	25 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.1 Hz
14						
40	7.64	8.32	9.02	10.70	11.55	13.98
70	11.88	13.20	14.31	17.27	18.70	22.85
100	25.60	27.76	28.82	31.78	31.95	32.61
130	33.34	33.13	32.38	31.35	29.95	26.30

	25	10	5	1	0.5	0.1
Temperatura, °F	Módulo elástico E', psi					
	25 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.1 Hz
14						
40	2152280	1980285	1854903	1564322	1437274	1145077
70	1530210	1346540	1208175	913511	790325	526414
100	485224	369622	302308	174166	139060	76086
130	123563	83070	61825	28938	21723	12443

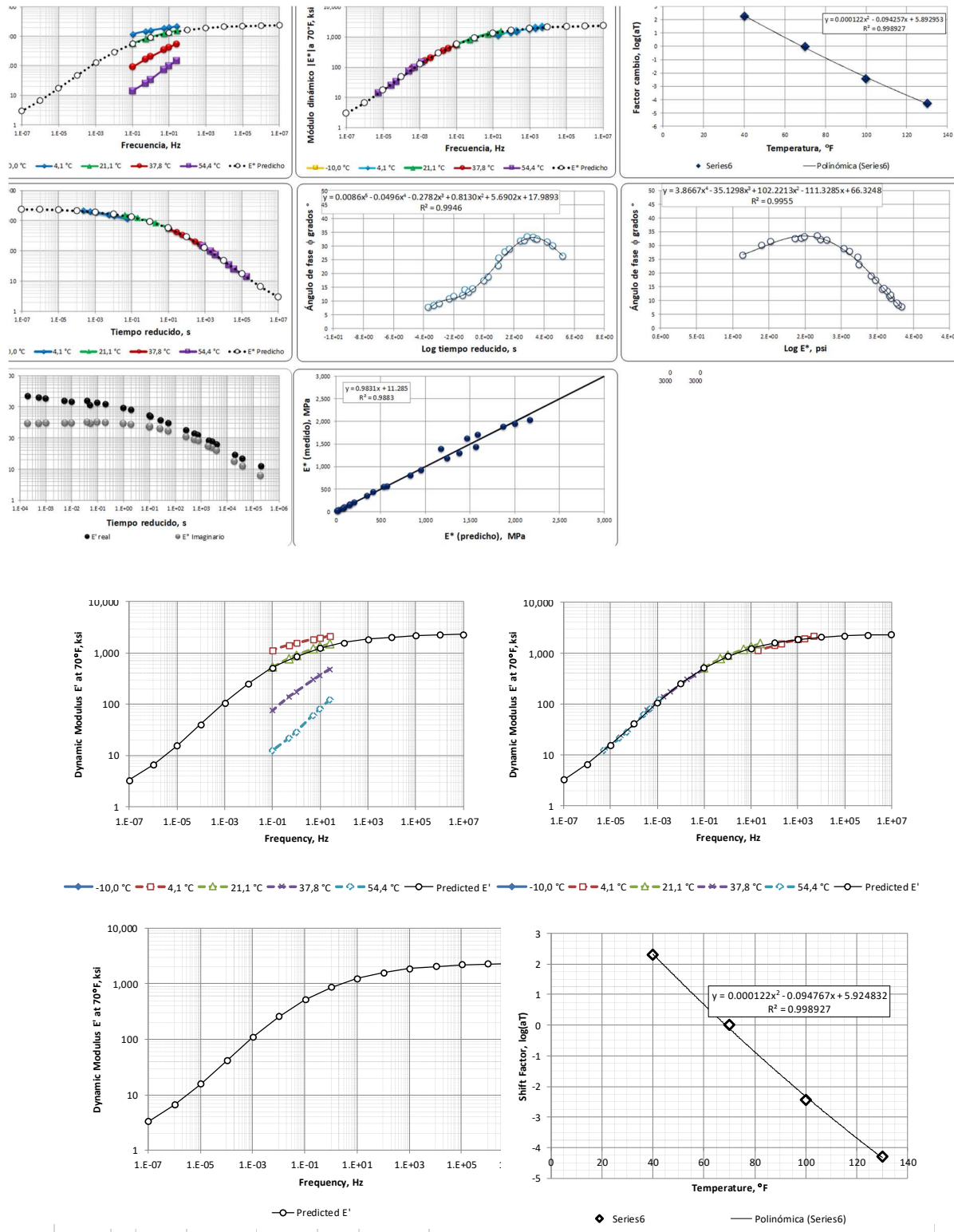
	25	10	5	1	0.5	0.1
Temperatura, °F	Módulo viscoso E'', psi					
	25 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.1 Hz
14						
40	288705	289481	294562	295488	293636	285075
70	321908	315828	308110	283944	267459	221861
100	232481	194578	166332	107917	86737	48678
130	81289	54215	39210	17631	12518	6151



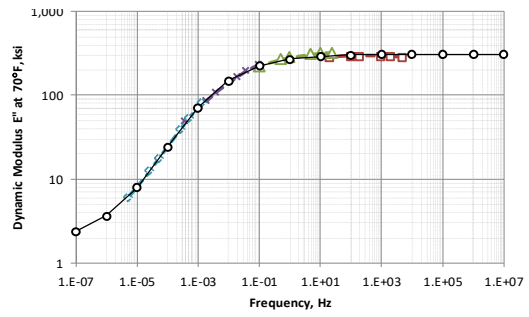
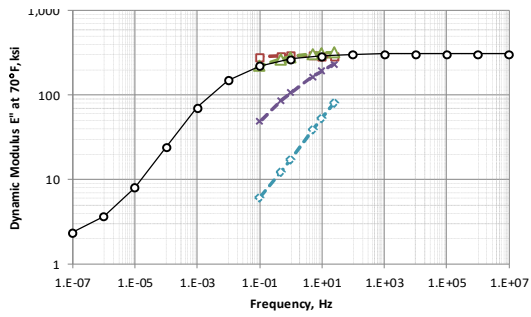
VTS- RTFO



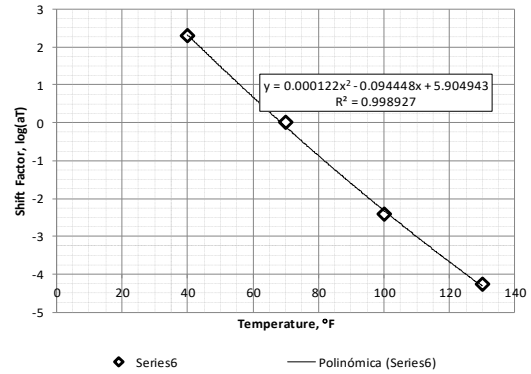
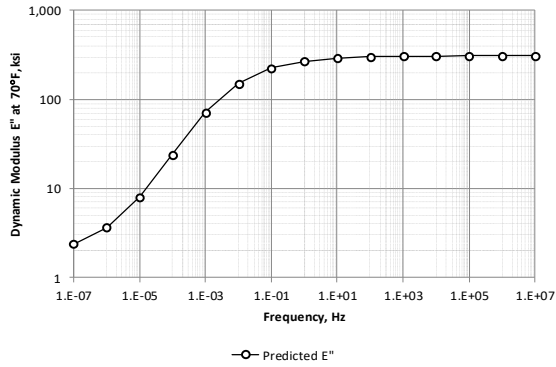
Solver E estrella



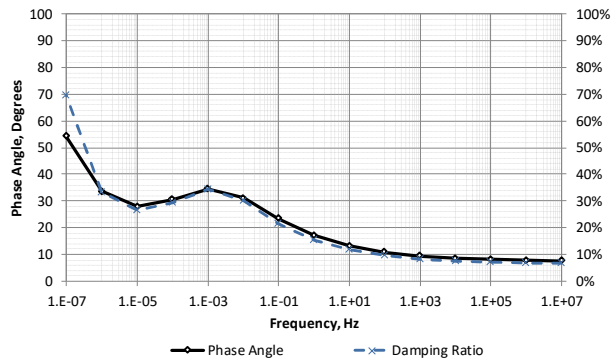
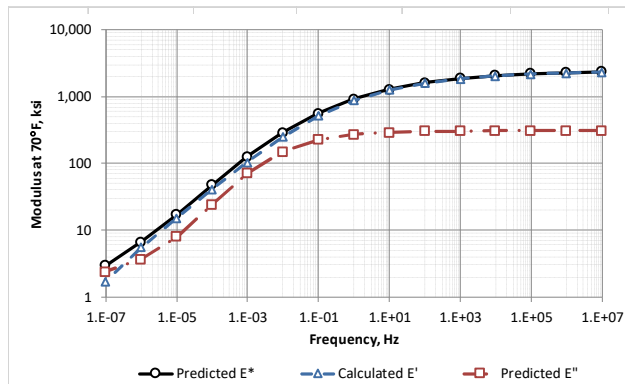
Solver E elástico



—●— -10,0 °C —□— 4,1 °C —△— 21,1 °C —×— 37,8 °C —◇— 54,4 °C —○— Predicted E'



Solver Viscoso



Damping

Input for 3D-Move Program

Shift Factor: $\log(a_T) = a \times T^2 + b \times T + c$

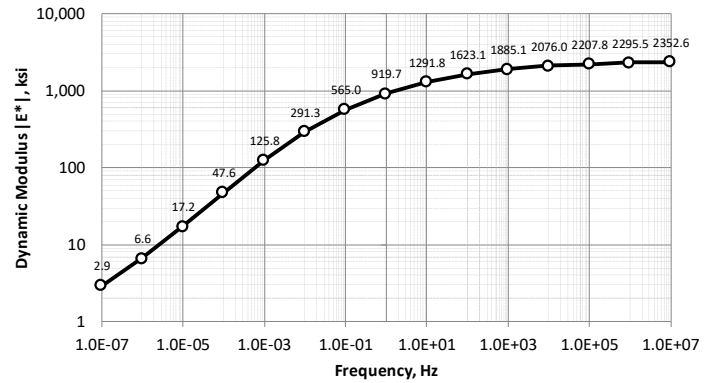
Constants	for E*	for E'	for E''
a =	0.000122	0.000122	0.000122
b =	-0.094257	-0.094767	-0.094448
c =	5.892953	5.924832	5.904943

Input Analysis Temperature (°F): **70**

Shift Factor $\log(a_T) = -0.10859$

Freq at Ref Temp, Hz	Predicted E*, ksi	Freq at Selected Temp, Hz	Predicted G* kPa	Poisson's Ratio	Damping Ratio
1.00E-10	0.7	1.28E-10	1.77E+03	0.4	#iNUM!
1.00E-09	1.0	1.28E-09	2.44E+03	0.4	#iNUM!
1.00E-08	1.6	1.28E-08	3.86E+03	0.4	#iNUM!
1.00E-07	2.9	1.28E-07	7.25E+03	0.4	69.6%
1.00E-06	6.6	1.28E-06	1.63E+04	0.4	33.2%
1.00E-05	17.2	1.28E-05	4.24E+04	0.4	26.4%
1.00E-04	47.6	1.28E-04	1.17E+05	0.4	29.5%
1.00E-03	125.8	1.28E-03	3.10E+05	0.4	34.4%
1.00E-02	291.3	1.28E-02	7.17E+05	0.4	30.2%
1.00E-01	565.0	1.28E-01	1.39E+06	0.4	21.7%
1.00E+00	919.7	1.28E+00	2.26E+06	0.4	15.4%
1.00E+01	1291.8	1.28E+01	3.18E+06	0.4	11.6%
1.00E+02	1623.1	1.28E+02	4.00E+06	0.4	9.5%
1.00E+03	1885.1	1.28E+03	4.64E+06	0.4	8.2%
1.00E+04	2076.0	1.28E+04	5.11E+06	0.4	7.5%
1.00E+05	2207.8	1.28E+05	5.44E+06	0.4	7.1%
1.00E+06	2295.5	1.28E+06	5.65E+06	0.4	6.8%
1.00E+07	2352.6	1.28E+07	5.79E+06	0.4	6.6%
1.00E+08	2389.3	1.28E+08	5.88E+06	0.4	6.5%
1.00E+09	2412.6	1.28E+09	5.94E+06	0.4	6.5%
1.00E+10	2427.3	1.28E+10	5.98E+06	0.4	6.4%

Temperature (°F)	70
Frequency (Hz)	14.75
E* , ksi	1309.6
E*	1291.8 1623.1
Freq (Hz)	12.84 128.41



—●— |E*| at Reference Temp

		E (ksi)	
		Frec	
Temp (°F)	70		

Salida del 3D Move

- Información de la prueba con caucho.

Temperature, °F	Mixture E* , psi					
	25 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.1 Hz
14	2791444	2713704	2626826	2413379	2321473	2090960
40	2375819	2211830	2090336	1828929	1713817	1444917
70	1688581	1517484	1392268	1113553	994767	729976
100	690623	555302	471470	305643	253285	152822
130	225534	162201	125806	65939	51348	28539

Temperature, °F	Mixture Phase Angle						
	25 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.1 Hz	
14	3.34	4.17	4.47	5.24	5.573333	6.48	14°F
40	6.44	6.97	7.48	8.62	9.17	11.00	40°F
70	10.11	11.16	12.00	14.32	15.52	19.00	70°F
100	21.52	23.62	24.84	28.03	28.71	30.69	100°F
130	30.97	31.59	31.46	31.17	29.88	27.87	130°F

Master Curve

Sample	Temp F	Hz	E, ksi	Phi Deg	E', ksi	E'', ksi
1	14.0	25	2897.71	3.5	2892.43	174.88
1	14.0	10	2782.98	4.0	2776.24	193.65
1	14.0	5	2716.12	4.4	2708.01	209.80
1	14.0	1	2510.89	5.3	2500.04	233.24
1	14.0	0.5	2403.71	5.5	2392.56	231.22
1	14.0	0.1	2161.79	6.5	2147.89	244.72
1	40.0	25	2454.33	6.6	2438.07	282.09
1	40.0	10	2296.68	7.1	2279.21	282.68
1	40.0	5	2176.30	7.5	2157.73	283.69
1	40.0	1	1895.65	8.7	1873.73	287.39
1	40.0	0.5	1772.07	9.4	1748.38	288.82
1	40.0	0.1	1487.94	11.3	1459.10	291.56
1	70.0	25	1752.93	10.3	1724.84	312.52
1	70.0	10	1580.33	11.2	1550.02	308.04
1	70.0	5	1447.48	12.1	1415.27	303.67
1	70.0	1	1153.92	14.5	1117.17	288.92
1	70.0	0.5	1030.20	15.7	991.62	279.29
1	70.0	0.1	754.63	19.3	712.44	248.80
1	100.0	25	728.96	21.4	678.56	266.34
1	100.0	10	586.24	23.5	537.70	233.58

1	100.0	5	497.63	24.7	452.28	207.55
1	100.0	1	324.60	27.8	287.10	151.44
1	100.0	0.5	268.47	28.6	235.82	128.31
1	100.0	0.1	162.15	30.6	139.56	82.57
1	130.0	25	230.61	31.23	197.19	119.57
1	130.0	10	166.94	31.75	141.96	87.85
1	130.0	5	126.42	32.17	107.01	67.31
1	130.0	1	67.33	31.55	57.37	35.23
1	130.0	0.5	52.74	30.11	45.62	26.46
1	130.0	0.1	29.23	27.95	25.82	13.70
2	14.0	25	2613.43	3.45	2608.70	157.27
2	14.0	10	2547.73	4.32	2540.49	191.91
2	14.0	5	2452.73	4.50	2445.17	192.44
2	14.0	1	2240.40	5.30	2230.82	206.95
2	14.0	0.5	2159.32	5.73	2148.53	215.59
2	14.0	0.1	1951.34	6.61	1938.37	224.62
2	40.0	25	2296.97	6.25	2283.31	250.06
2	40.0	10	2115.23	6.92	2099.83	254.85
2	40.0	5	1986.88	7.66	1969.15	264.84
2	40.0	1	1748.43	8.71	1728.27	264.77
2	40.0	0.5	1642.56	9.10	1621.88	259.78
2	40.0	0.1	1385.84	10.91	1360.79	262.29
2	70.0	25	1628.05	9.67	1604.92	273.47
2	70.0	10	1454.01	10.91	1427.73	275.20
2	70.0	5	1336.09	11.72	1308.24	271.40
2	70.0	1	1073.28	13.95	1041.63	258.74
2	70.0	0.5	960.01	15.11	926.82	250.25
2	70.0	0.1	709.09	18.53	672.33	225.35
2	100.0	25	665.72	21.23	620.54	241.07
2	100.0	10	536.06	23.37	492.08	212.64
2	100.0	5	455.85	24.68	414.21	190.34
2	100.0	1	295.73	28.02	261.07	138.93
2	100.0	0.5	245.84	28.72	215.60	118.13
2	100.0	0.1	149.10	30.90	127.94	76.57
2	130.0	25	221.76	31.24	189.61	115.01
2	130.0	10	161.43	31.87	137.09	85.23
2	130.0	5	128.08	31.49	109.22	66.90
2	130.0	1	67.89	31.28	58.02	35.25
2	130.0	0.5	53.01	30.06	45.88	26.55
2	130.0	0.1	29.44	28.08	25.98	13.86
3	14.0	25	2863.2	3.1	2858.95	155.84
3	14.0	10	2810.4	4.2	2802.81	206.32
3	14.0	5	2711.6	4.5	2703.34	211.81
3	14.0	1	2488.8	5.1	2479.03	220.81
3	14.0	0.5	2401.4	5.5	2390.45	228.91
3	14.0	0.1	2159.8	6.3	2146.55	238.50
3	40.0	25	2376.2	6.5	2360.98	268.16
3	40.0	10	2223.6	6.9	2207.38	267.90

3	40.0	5	2107.8	7.3	2090.75	267.83
3	40.0	1	1842.7	8.4	1822.85	269.82
3	40.0	0.5	1726.8	9.0	1705.47	270.73
3	40.0	0.1	1461.0	10.8	1435.19	273.26
3	70.0	25	1684.8	10.4	1657.14	303.84
3	70.0	10	1518.1	11.3	1488.48	298.51
3	70.0	5	1393.2	12.2	1361.87	293.95
3	70.0	1	1113.5	14.5	1077.94	278.98
3	70.0	0.5	994.1	15.7	956.91	269.34
3	70.0	0.1	726.2	19.2	685.77	238.94
3	100.0	25	677.2	21.9	628.36	252.47
3	100.0	10	543.6	24.0	496.61	221.10
3	100.0	5	460.9	25.2	417.10	196.18
3	100.0	1	296.6	28.3	261.25	140.43
3	100.0	0.5	245.5	28.9	215.07	118.48
3	100.0	0.1	147.2	30.6	126.77	74.85
3	130.0	25	224.2	30.4	193.34	113.57
3	130.0	10	158.2	31.2	135.42	81.85
3	130.0	5	122.9	30.7	105.66	62.81
3	130.0	1	62.6	30.7	53.84	31.93
3	130.0	0.5	48.3	29.5	42.04	23.77
3	130.0	0.1	26.9	27.6	23.88	12.48

Comparison of Results

										Adjusted
Temp, F	Hz	Sample	E*, ksi	Average	Normal COV	Diff from Average	Selected	Corrected COV	Average of Selected	Data for Solver
14	25	1	2,897.708	2,791.444	5.56%	106.264	2,897.708	5.56%	2,791.444	2,897.708
		2	2,613.434			178.010	2,613.434			2,613.434
		3	2,863.189			71.745	2,863.189			2,863.189
	10	1	2,782.983	2,713.704	5.32%	69.280	2,782.983	5.32%	2,713.704	2,782.983
		2	2,547.732			165.971	2,547.732			2,547.732
		3	2,810.396			96.692	2,810.396			2,810.396
	5	1	2,716.121	2,626.826	5.74%	89.295	2,716.121	5.74%	2,626.826	2,716.121
		2	2,452.733			174.094	2,452.733			2,452.733
		3	2,711.625			84.799	2,711.625			2,711.625
	1	1	2,510.893	2,413.379	6.22%	97.514	2,510.893	6.22%	2,413.379	2,510.893
		2	2,240.397			172.982	2,240.397			2,240.397
		3	2,488.847			75.468	2,488.847			2,488.847
	0.5	1	2,403.710	2,321.473	6.05%	82.236	2,403.710	6.05%	2,321.473	2,403.710
		2	2,159.321			162.152	2,159.321			2,159.321
		3	2,401.389			79.916	2,401.389			2,401.389
	0.1	1	2,161.787	2,090.960	5.78%	70.827	2,161.787	5.78%	2,090.960	2,161.787
		2	1,951.337			139.623	1,951.337			1,951.337
		3	2,159.756			68.796	2,159.756			2,159.756
40	25	1	2,454.333	2,375.819	3.31%	78.514	2,454.333	3.31%	2,375.819	2,454.333

		2	2,296.967			78.852	2,296.967			2,296.967
		3	2,376.158			0.338	2,376.158			2,376.158
	10	1	2,296.677	2,211.830	4.13%	84.847	2,296.677	4.13%	2,211.830	2,296.677
		2	2,115.234			96.595	2,115.234			2,115.234
		3	2,223.578			11.748	2,223.578			2,223.578
	5	1	2,176.295	2,090.336	4.59%	85.959	2,176.295	4.59%	2,090.336	2,176.295
		2	1,986.876			103.460	1,986.876			1,986.876
		3	2,107.837			17.501	2,107.837			2,107.837
	1	1	1,895.647	1,828.929	4.08%	66.717	1,895.647	4.08%	1,828.929	1,895.647
		2	1,748.433			80.496	1,748.433			1,748.433
		3	1,842.708			13.779	1,842.708			1,842.708
	0.5	1	1,772.074	1,713.817	3.84%	58.257	1,772.074	3.84%	1,713.817	1,772.074
		2	1,642.555			71.262	1,642.555			1,642.555
		3	1,726.822			13.005	1,726.822			1,726.822
	0.1	1	1,487.945	1,444.917	3.66%	43.028	1,487.945	3.66%	1,444.917	1,487.945
		2	1,385.838			59.079	1,385.838			1,385.838
		3	1,460.968			16.051	1,460.968			1,460.968
70	25	1	1,752.929	1,688.581	3.70%	64.349	1,752.929	3.70%	1,688.581	1,752.929
		2	1,628.052			60.529	1,628.052			1,628.052
		3	1,684.761			3.819	1,684.761			1,684.761
	10	1	1,580.334	1,517.484	4.16%	62.850	1,580.334	4.16%	1,517.484	1,580.334
		2	1,454.006			63.478	1,454.006			1,454.006
		3	1,518.113			0.628	1,518.113			1,518.113
	5	1	1,447.479	1,392.268	4.00%	55.211	1,447.479	4.00%	1,392.268	1,447.479
		2	1,336.090			56.178	1,336.090			1,336.090
		3	1,393.235			0.967	1,393.235			1,393.235
	1	1	1,153.922	1,113.553	3.62%	40.369	1,153.922	3.62%	1,113.553	1,153.922
		2	1,073.281			40.272	1,073.281			1,073.281
		3	1,113.457			0.097	1,113.457			1,113.457
	0.5	1	1,030.205	994.767	3.53%	35.438	1,030.205	3.53%	994.767	1,030.205
		2	960.007			34.761	960.007			960.007
		3	994.090			0.677	994.090			994.090
	0.1	1	754.633	729.976	3.15%	24.656	754.633	3.15%	729.976	754.633
		2	709.091			20.885	709.091			709.091
		3	726.205			3.771	726.205			726.205
100	25	1	728.961	690.623	4.88%	38.338	728.961	4.88%	690.623	728.961
		2	665.724			24.898	665.724			665.724
		3	677.182			13.440	677.182			677.182
	10	1	586.244	555.302	4.87%	30.941	586.244	4.87%	555.302	586.244
		2	536.060			19.242	536.060			536.060
		3	543.602			11.700	543.602			543.602
	5	1	497.625	471.470	4.83%	26.155	497.625	4.83%	471.470	497.625
		2	455.854			15.616	455.854			455.854
		3	460.931			10.539	460.931			460.931
	1	1	324.595	305.643	5.37%	18.952	324.595	5.37%	305.643	324.595
		2	295.732			9.911	295.732			295.732
		3	296.603			9.041	296.603			296.603
	0.5	1	268.465	253.285	5.19%	15.181	268.465	5.19%	253.285	268.465

		2	245.839			7.445	245.839			245.839
		3	245.549			7.735	245.549			245.549
0.1		1	162.152	152.822	5.32%	9.331	162.152	5.32%	152.822	162.152
		2	149.099			3.723	149.099			149.099
		3	147.214			5.608	147.214			147.214
130	25	1	230.610	225.534	2.02%	5.076	230.610	2.02%	225.534	230.610
		2	221.763			3.771	221.763			221.763
		3	224.229			1.305	224.229			224.229
	10	1	166.939	162.201	2.71%	4.738	166.939	2.71%	162.201	166.939
		2	161.427			0.774	161.427			161.427
		3	158.236			3.964	158.236			158.236
	5	1	126.415	125.806	2.09%	0.609	126.415	2.09%	125.806	126.415
		2	128.083			2.277	128.083			128.083
		3	122.920			2.886	122.920			122.920
	1	1	67.327	65.939	4.41%	1.388	67.327	4.41%	65.939	67.327
		2	67.892			1.953	67.892			67.892
		3	62.598			3.341	62.598			62.598
	0.5	1	52.736	51.348	5.15%	1.388	52.736	5.15%	51.348	52.736
		2	53.011			1.663	53.011			53.011
		3	48.298			3.051	48.298			48.298
	0.1	1	29.225	28.539	4.84%	0.687	29.225	4.84%	28.539	29.225
		2	29.443			0.904	29.443			29.443
		3	26.948			1.591	26.948			26.948

Master Curve for E'

Sample	Temp F	Hz	E', ksi	Phi Deg
1	14.0	25	2892.43	3.5
1	14.0	10	2776.24	4.0
1	14.0	5	2708.01	4.4
1	14.0	1	2500.04	5.3
1	14.0	0.5	2392.56	5.5
1	14.0	0.1	2147.89	6.5
1	40.0	25	2438.07	6.6
1	40.0	10	2279.21	7.1
1	40.0	5	2157.73	7.5
1	40.0	1	1873.73	8.7
1	40.0	0.5	1748.38	9.4
1	40.0	0.1	1459.10	11.3
1	70.0	25	1724.84	10.3
1	70.0	10	1550.02	11.2
1	70.0	5	1415.27	12.1
1	70.0	1	1117.17	14.5
1	70.0	0.5	991.62	15.7
1	70.0	0.1	712.44	19.3

1	100.0	25	678.56	21.4
1	100.0	10	537.70	23.5
1	100.0	5	452.28	24.7
1	100.0	1	287.10	27.8
1	100.0	0.5	235.82	28.6
1	100.0	0.1	139.56	30.6
1	130.0	25	197.19	31.23
1	130.0	10	141.96	31.75
1	130.0	5	107.01	32.17
1	130.0	1	57.37	31.55
1	130.0	0.5	45.62	30.11
1	130.0	0.1	25.82	27.95
2	14.0	25	2608.70	3.45
2	14.0	10	2540.49	4.32
2	14.0	5	2445.17	4.50
2	14.0	1	2230.82	5.30
2	14.0	0.5	2148.53	5.73
2	14.0	0.1	1938.37	6.61
2	40.0	25	2283.31	6.25
2	40.0	10	2099.83	6.92
2	40.0	5	1969.15	7.66
2	40.0	1	1728.27	8.71
2	40.0	0.5	1621.88	9.10
2	40.0	0.1	1360.79	10.91
2	70.0	25	1604.92	9.67
2	70.0	10	1427.73	10.91
2	70.0	5	1308.24	11.72
2	70.0	1	1041.63	13.95
2	70.0	0.5	926.82	15.11
2	70.0	0.1	672.33	18.53
2	100.0	25	620.54	21.23
2	100.0	10	492.08	23.37
2	100.0	5	414.21	24.68
2	100.0	1	261.07	28.02
2	100.0	0.5	215.60	28.72
2	100.0	0.1	127.94	30.90
2	130.0	25	189.61	31.24
2	130.0	10	137.09	31.87
2	130.0	5	109.22	31.49
2	130.0	1	58.02	31.28
2	130.0	0.5	45.88	30.06
2	130.0	0.1	25.98	28.08
3	14.0	25	2858.95	3.1
3	14.0	10	2802.81	4.2
3	14.0	5	2703.34	4.5
3	14.0	1	2479.03	5.1
3	14.0	0.5	2390.45	5.5
3	14.0	0.1	2146.55	6.3

3	40.0	25	2360.98	6.5
3	40.0	10	2207.38	6.9
3	40.0	5	2090.75	7.3
3	40.0	1	1822.85	8.4
3	40.0	0.5	1705.47	9.0
3	40.0	0.1	1435.19	10.8
3	70.0	25	1657.14	10.4
3	70.0	10	1488.48	11.3
3	70.0	5	1361.87	12.2
3	70.0	1	1077.94	14.5
3	70.0	0.5	956.91	15.7
3	70.0	0.1	685.77	19.2
3	100.0	25	628.36	21.9
3	100.0	10	496.61	24.0
3	100.0	5	417.10	25.2
3	100.0	1	261.25	28.3
3	100.0	0.5	215.07	28.9
3	100.0	0.1	126.77	30.6
3	130.0	25	193.34	30.4
3	130.0	10	135.42	31.2
3	130.0	5	105.66	30.7
3	130.0	1	53.84	30.7
3	130.0	0.5	42.04	29.5
3	130.0	0.1	23.88	27.6

Angulo de Fase

Comparison of Results										Adjusted
Temp, F	Hz	Sample	E', ksi	Average	Normal COV	Diff from Average	Selected	Corrected COV	Average of Selected	Data for Solver
14	25	1	3.460	3.343	5.79%	0.117	3.460	5.79%	3.343	3.460
		2	3.450			0.107	3.450			3.450
		3	3.120			0.223	3.120			3.120
	10	1	3.990	4.173	4.03%	0.183	3.990	4.03%	4.173	3.990
		2	4.320			0.147	4.320			4.320
		3	4.210			0.037	4.210			4.210
	5	1	4.430	4.470	0.81%	0.040	4.430	0.81%	4.470	4.430
		2	4.500			0.030	4.500			4.500
		3	4.480			0.010	4.480			4.480
	1	1	5.330	5.240	2.50%	0.090	5.330	2.50%	5.240	5.330
		2	5.300			0.060	5.300			5.300
		3	5.090			0.150	5.090			5.090
	0.5	1	5.520	5.573	2.48%	0.053	5.520	2.48%	5.573	5.520
		2	5.730			0.157	5.730			5.730
		3	5.470			0.103	5.470			5.470
	0.1	1	6.500	6.483	2.09%	0.017	6.500	2.09%	6.483	6.500
		2	6.610			0.127	6.610			6.610

		3	6.340			0.143	6.340			6.340
40	25	1	6.600	6.443	2.76%	0.157	6.600	2.76%	6.443	6.600
		2	6.250			0.193	6.250			6.250
		3	6.480			0.037	6.480			6.480
	10	1	7.070	6.970	1.24%	0.100	7.070	1.24%	6.970	7.070
		2	6.920			0.050	6.920			6.920
		3	6.920			0.050	6.920			6.920
	5	1	7.490	7.483	2.41%	0.007	7.490	2.41%	7.483	7.490
		2	7.660			0.177	7.660			7.660
		3	7.300			0.183	7.300			7.300
	1	1	8.720	8.617	1.98%	0.103	8.720	1.98%	8.617	8.720
		2	8.710			0.093	8.710			8.710
		3	8.420			0.197	8.420			8.420
	0.5	1	9.380	9.167	2.06%	0.213	9.380	2.06%	9.167	9.380
		2	9.100			0.067	9.100			9.100
		3	9.020			0.147	9.020			9.020
	0.1	1	11.300	10.997	2.46%	0.303	11.300	2.46%	10.997	11.300
		2	10.910			0.087	10.910			10.910
		3	10.780			0.217	10.780			10.780
70	25	1	10.270	10.110	3.82%	0.160	10.270	3.82%	10.110	10.270
		2	9.670			0.440	9.670			9.670
		3	10.390			0.280	10.390			10.390
	10	1	11.240	11.163	2.02%	0.077	11.240	2.02%	11.163	11.240
		2	10.910			0.253	10.910			10.910
		3	11.340			0.177	11.340			11.340
	5	1	12.110	12.003	2.06%	0.107	12.110	2.06%	12.003	12.110
		2	11.720			0.283	11.720			11.720
		3	12.180			0.177	12.180			12.180
	1	1	14.500	14.320	2.24%	0.180	14.500	2.24%	14.320	14.500
		2	13.950			0.370	13.950			13.950
		3	14.510			0.190	14.510			14.510
	0.5	1	15.730	15.520	2.29%	0.210	15.730	2.29%	15.520	15.730
		2	15.110			0.410	15.110			15.110
		3	15.720			0.200	15.720			15.720
	0.1	1	19.250	18.997	2.13%	0.253	19.250	2.13%	18.997	19.250
		2	18.530			0.467	18.530			18.530
		3	19.210			0.213	19.210			19.210
100	25	1	21.430	21.517	1.57%	0.087	21.430	1.57%	21.517	21.430
		2	21.230			0.287	21.230			21.230
		3	21.890			0.373	21.890			21.890
	10	1	23.480	23.617	1.42%	0.137	23.480	1.42%	23.617	23.480
		2	23.370			0.247	23.370			23.370
		3	24.000			0.383	24.000			24.000
	5	1	24.650	24.840	1.22%	0.190	24.650	1.22%	24.840	24.650
		2	24.680			0.160	24.680			24.680
		3	25.190			0.350	25.190			25.190
	1	1	27.810	28.030	0.80%	0.220	27.810	0.80%	28.030	27.810
		2	28.020			0.010	28.020			28.020

130	0.5	3	28.260	28.707	0.52%	0.230	28.260	0.52%	28.707	28.260
		1	28.550			0.157	28.550			28.550
		2	28.720			0.013	28.720			28.720
		3	28.850			0.143	28.850			28.850
		1	30.610	30.690	0.60%	0.080	30.610	0.60%	30.690	30.610
	0.1	2	30.900			0.210	30.900			30.900
		3	30.560			0.130	30.560			30.560
	25	1	31.230	30.967	1.50%	0.263	31.230	1.50%	30.967	31.230
		2	31.240			0.273	31.240			31.240
		3	30.430			0.537	30.430			30.430
	10	1	31.750	31.590	1.22%	0.160	31.750	1.22%	31.590	31.750
		2	31.870			0.280	31.870			31.870
		3	31.150			0.440	31.150			31.150
	5	1	32.170	31.463	2.29%	0.707	32.170	2.29%	31.463	32.170
		2	31.490			0.027	31.490			31.490
		3	30.730			0.733	30.730			30.730
	1	1	31.550	31.167	1.45%	0.383	31.550	1.45%	31.167	31.550
		2	31.280			0.113	31.280			31.280
		3	30.670			0.497	30.670			30.670
	0.5	1	30.110	29.883	1.17%	0.227	30.110	1.17%	29.883	30.110
		2	30.060			0.177	30.060			30.060
		3	29.480			0.403	29.480			29.480
	0.1	1	27.950	27.873	0.91%	0.077	27.950	0.91%	27.873	27.950
		2	28.080			0.207	28.080			28.080
		3	27.590			0.283	27.590			27.590

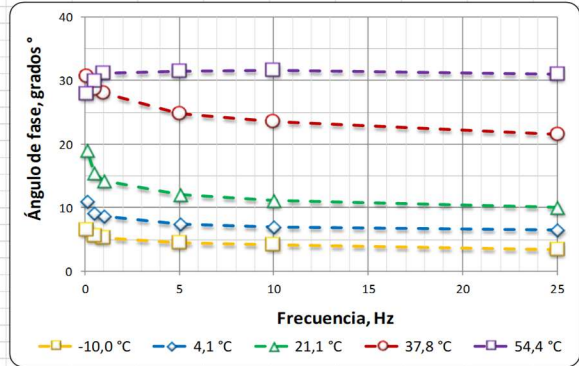
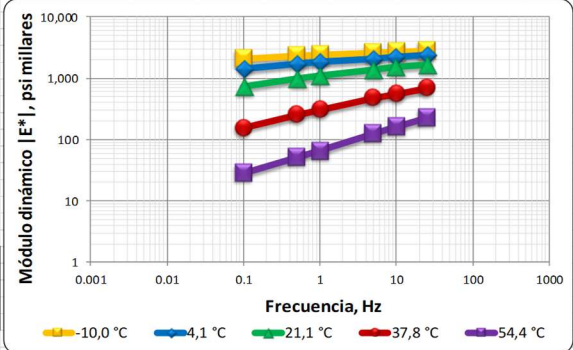
• Modulo dinámico con caucho

	25	10	5	1	0.5	0.1
Temperatura, °F	Módulo dinámico E* , psi					
14	2791444	2713704	2626826	2413379	2321473.4	2090960
40	2375819	2211830	2090336	1828829	1713817	1444917
70	1688581	1517484	1392268	1113553	994767	729976
100	690623	555302	471470	305643	253285	152822
130	225534	162201	125806	65939	51348	28539

	25	10	5	1	0.5	0.1
Temperatura, °F	Ángulo de fase (°)					
14	3.34	4.17	4.47	5.24	5.57	6.48
40	6.44	6.97	7.48	8.62	9.17	11.00
70	10.11	11.16	12.00	14.32	15.52	19.00
100	21.52	23.62	24.84	28.71	30.69	37.8
130	30.97	31.59	31.46	31.17	29.88	27.87

	25	10	5	1	0.5	0.1
Temperatura, °F	Módulo elástico E', psi					
14	2786693	2706508	2618836	2403293	2310499	2077588
40	2360812	2195484	2072532	1808286	1691930	1418386
70	1662361	1488772	1361827	1078955	958495	690220
100	642494	508794	427852	269792	222154	131418
130	193388	138166	107309	56422	44521	25228

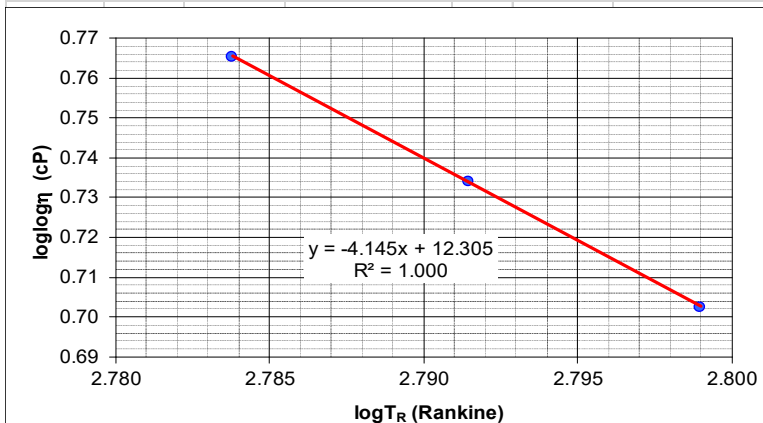
	25	10	5	1	0.5	0.1
Temperatura, °F	Módulo viscoso E'', psi					
14	162794	197487	204727	220409	225461	236099
40	266616	268405	272241	274016	273023	275821
70	296411	293795	289548	275423	266175	237617
100	253301	222463	198058	143632	121659	77999
130	116046	84967	65665	34125	25584	13342



Viscosidad-Temperatura Susceptibilidad usando DSR Ensayo AASHTO T315 (Frecuencia = 10 rad/sec - 1,59 Hz)

Project: Witzak Fase 3
Binder PG Grade: PG 64

Sample ID	1			2			Promedio	Temperatura Tr (°R)	log.Tr	log.log.η
Temp (°C)	G* (Pa)	Ángulo de fase δ (°)	Viscosidad (cP) $\eta = \frac{G^*}{10} \left(\frac{1}{\sin \delta} \right)^{4.8628}$	G* (Pa)	Ángulo de fase δ (°)	Viscosidad (cP) $\eta = \frac{G^*}{10} \left(\frac{1}{\sin \delta} \right)^{4.8628}$	Viscosidad (cP) $\eta = \frac{G^*}{10} \left(\frac{1}{\sin \delta} \right)^{4.8628}$			
64	6150	81.1	652,314	6150	77.8	687,254	669,784	608	2.784	0.765
70	2510	83.9	258,027	2510	80.2	269,599	263,813	619	2.791	0.734
76	1070	86.2	108,151	1070	82.5	111,565	109,858	629	2.799	0.703



Intercepto A = 12.305
Visc-Temp Susceptibilidad VTS = -4.145
Ajuste R² = 99.99%

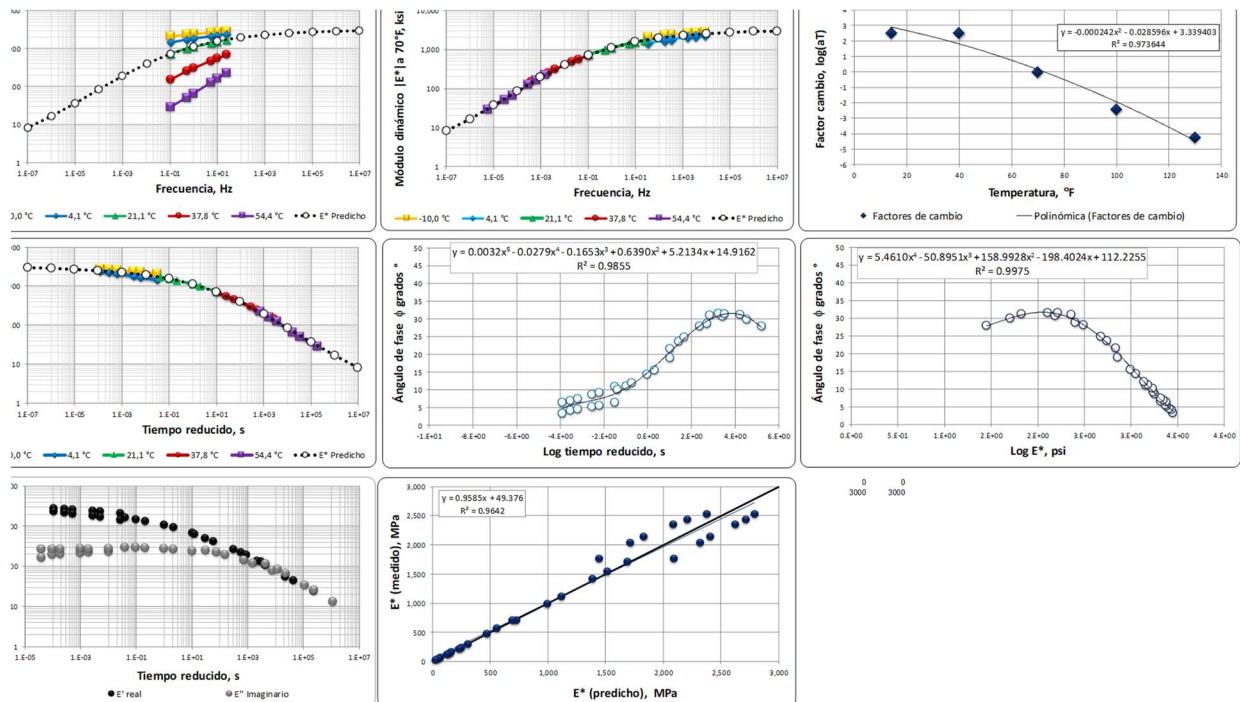
Asphalt Binder Visc-Temp Susceptibilidad

Intercepto A = 12.305
VTS = -4.145

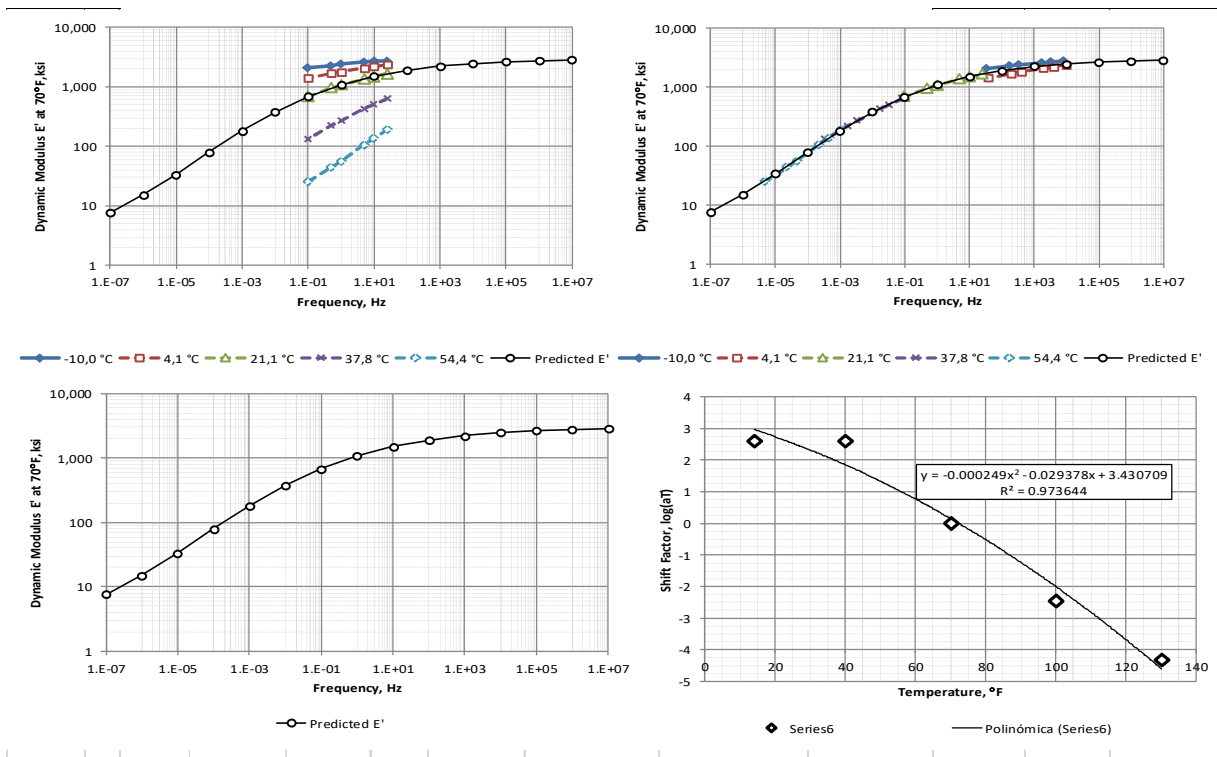
Temp °F	Temp °R	Visc cP
14.0	474.67	2.70E+12
40.0	500.67	2.70E+12
70.0	530.67	1.71E+10
100.0	560.67	1.40E+08
130.0	590.67	3.67E+06

La viscosidad a baja temperatura es igual al menor calculado usando A-VTS ecuación o 2.7×10^{10} Poise (2.7×10^{12} cP)

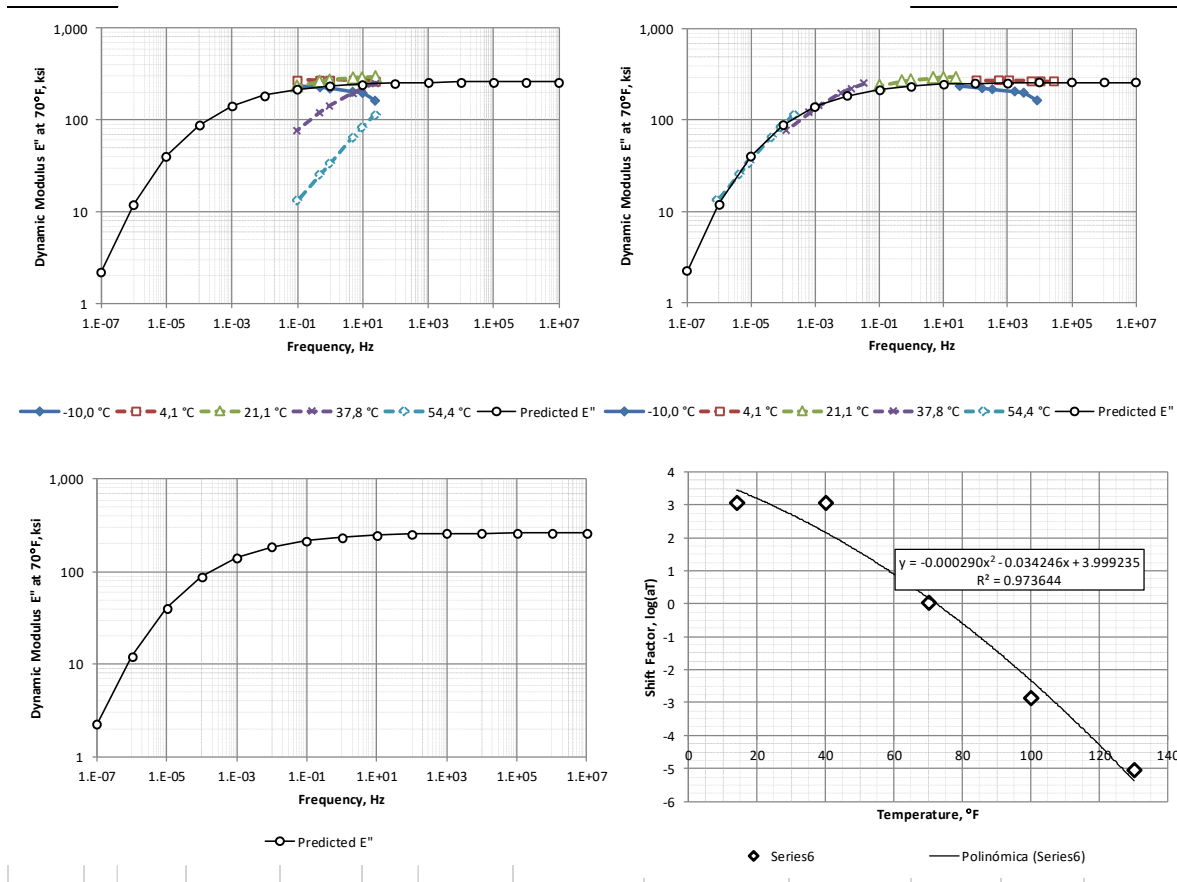
VTS-RTFO



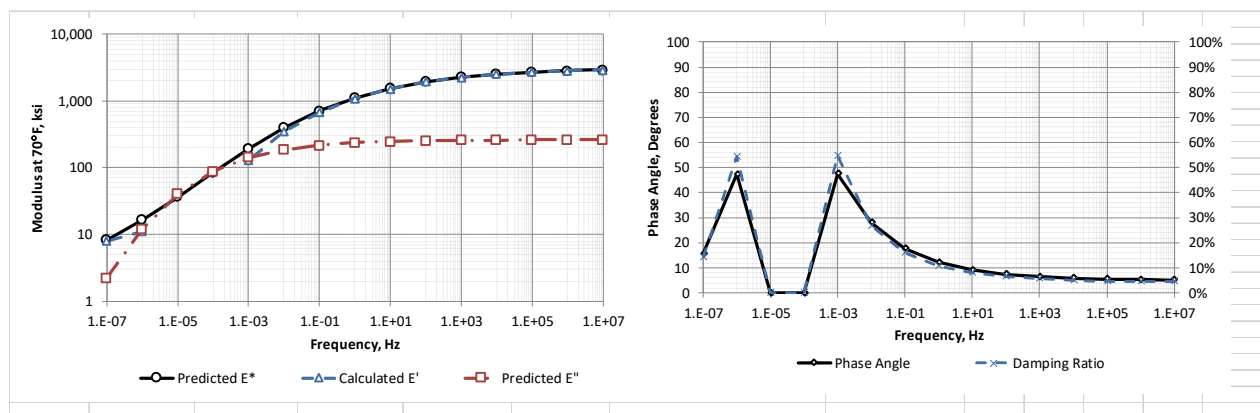
Solver E Estrella



Solver E elástico



Solver E viscosa



Damping

Input for 3D-Move Program

Shift Factor: $\log(a_T) = a \times T^2 + b \times T + c$

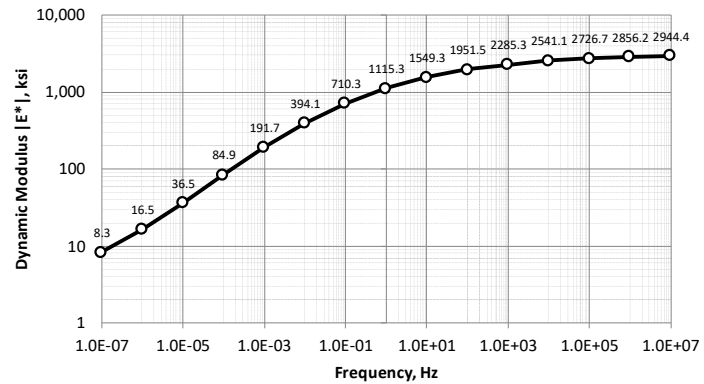
Constants	for E*	for E'	for E''
a =	-0.000242	-0.000249	-0.000290
b =	-0.028596	-0.029378	-0.034246
c =	3.339403	3.430709	3.999235

Input Analysis Temperature (*F): **70**

Shift Factor $\log(a_T) = 0.150669$

Freq at Ref Temp, Hz	Predicted E*, ksi	Freq at Selected Temp, Hz	Predicted G* kPa	Poisson's Ratio	Damping Ratio
1.00E-10	2.3	7.07E-11	5.74E+03	0.4	0.1%
1.00E-09	3.1	7.07E-10	7.75E+03	0.4	0.6%
1.00E-08	4.8	7.07E-09	1.18E+04	0.4	3.0%
1.00E-07	8.3	7.07E-08	2.04E+04	0.4	14.0%
1.00E-06	16.5	7.07E-07	4.06E+04	0.4	54.2%
1.00E-05	36.5	7.07E-06	9.00E+04	0.4	#iNUM!
1.00E-04	84.9	7.07E-05	2.09E+05	0.4	#iNUM!
1.00E-03	191.7	7.07E-04	4.72E+05	0.4	54.8%
1.00E-02	394.1	7.07E-03	9.70E+05	0.4	26.7%
1.00E-01	710.3	7.07E-02	1.75E+06	0.4	16.0%
1.00E+00	1115.3	7.07E-01	2.75E+06	0.4	10.8%
1.00E+01	1549.3	7.07E+00	3.82E+06	0.4	8.1%
1.00E+02	1951.5	7.07E+01	4.81E+06	0.4	6.6%
1.00E+03	2285.3	7.07E+02	5.63E+06	0.4	5.7%
1.00E+04	2541.1	7.07E+03	6.26E+06	0.4	5.1%
1.00E+05	2726.7	7.07E+04	6.71E+06	0.4	4.8%
1.00E+06	2856.2	7.07E+05	7.03E+06	0.4	4.6%
1.00E+07	2944.4	7.07E+06	7.25E+06	0.4	4.5%
1.00E+08	3003.5	7.07E+07	7.40E+06	0.4	4.4%
1.00E+09	3042.6	7.07E+08	7.49E+06	0.4	4.3%
1.00E+10	3068.4	7.07E+09	7.56E+06	0.4	4.3%

Temperature (*F)	70
Frequency (Hz)	14.75
E* , ksi	1667.8
E*	1549.3 1951.5
Freq (Hz)	7.07 70.69



Temp (*F)	E (ksi)		
	Frec		
70			

Salidad 3D Move

Fuente: Elaboración Propia

Anexo 6: Informe del ensayo del analizador de pavimentos asfálticos.

 LGC INGENIERIA DE PAVIMENTOS	LGC INGENIERIA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.27
		Aprobado: 2021-09-16
		Página: 1 de 13
		N° Informe 01-R003-2021

San José, Costa Rica, 10 de noviembre del 2021

Proyecto: Test de Maestría Ingeniería Vial TEC

Señores:

Ing. Alexander Sanchez Mora
Teléfono: 8833-7614
San José

Estimados Señores:



A continuación, le presento el resultado de los ensayos realizados al material de Mezcla Asfáltica en Caliente metodología SuperPave.

Información de la muestra

Fecha de recepción de la muestra: 2021-11-02

Identificación de la muestra: 01-25667-2021, 01-25668-2021

Descripción: Mezcla Asfáltica en Caliente metodología SuperPave

Muestreo (s)

(X) Cliente

(-) Personal del laboratorio

Ingreso de Muestra:

(X) RC-05: 21294

(-) RC-84: No hay

Método de Muestreo: Aplica ☐ (ver tabla de Ensayos realizados) No Aplica ☒

Plan de Muestreo: según en RC-101 "Trabajos diarios en campo"

Fecha de realización del muestreo: No aplica

Lugar del muestreo: No aplica

Lugar de realización del ensayo: Laboratorio 01: LGC Ingeniería de Pavimento S.A.

Ensayos Realizados:

Nombre del Ensayo	Método de Ensayo	Ensayo Acreditado (*)	Ensayo No Acreditado (**)
Moldeo De Especímenes MAC Por Medio Del Compactador Giratorio	AASHTO T-312	X	-
Método de ensayo para la Reducción de muestras Método A Mezcla Asfáltica	AASHTO R-47	X	-
Método de ensayo para la Gravedad específica máxima teórica de mezclas asfálticas	NTE C3	X	-
Método de ensayo para determinar la deformación permanente en mezclas asfálticas compactadas utilizando el Analizador de Pavimentos Asfálticos APA JR	AASHTO T-340	X	-

LGC Ingeniería de Pavimentos S.A.
Laboratorio y Centro de Calidad de Materiales
San Rafael de Desamparados, de la entrada de Casa Caba, 400 metros este, edificio: capar hembra
E-mail: laboratorio@lgcingenieria.com / centrocalidad@lgcingenieria.com Teléfonos: 2270-6540 / 2270-6541

Laboratorio Acreditado: N° LE-054 (RC 1.000.001 X) disponible en: www.eca.or.cr



	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.27
		Aprobado: 2021-09-16
		Página: 2 de 13
		N° Informe 01-R003-2021

Nombre del Ensayo	Método de Ensayo	Ensayo Acreditado (*)	Ensayo No Acreditado (**)
Método de ensayo para la Gravedad específica bruta de mezclas asfálticas compactadas utilizando el método de superficie saturada seca	INTECI	X	-

(Ampliar o reducir esta tabla según lo requiera)

Los ensayos acreditados se identifican con un asterisco (*) y la leyenda "Ensayo Acreditado". Y para los no acreditados se identifican con dos asteriscos (**) y la leyenda "Ensayo no acreditado".

Ensayo

El laboratorio realizó el ensayo de acuerdo con los procedimientos y registros que forman parte del sistema de gestión de calidad.

Observaciones

La muestra se analiza tal cual como fue suministrada por el cliente.

Resultados de Ensayos

Anexo N°	Descripción	Página (s)
1	Análisis de mezcla asfáltica en caliente Metodología SuperPave (5,95 % contenido de asfalto con caucho)	4-8
2	Análisis de mezcla asfáltica en caliente Metodología SuperPave (5,63 % contenido de asfalto sin caucho)	9-13

Con la mejor disponibilidad para aclarar, ampliar o comentar el informe.

Atentamente,

ROMMEL ENRIQUE GONZALEZ GOMEZ (FIRMA)
 Firmado digitalmente por ROMMEL ENRIQUE GONZALEZ GOMEZ (FIRMA)
 Fecha: 2021.11.10 11:20:06 -06'00'

Ing. Rommel González Gómez
 LGC Ingeniería de Pavimentos S.A.
 Encargado de elaborar el informe

AMED ALDI BOLAÑOS (FIRMA)
 Firmado digitalmente por AMED ALDI BOLAÑOS (FIRMA)
 Fecha: 2021.11.10 11:22:29 -06'00'

Ing. Amed Aldi Bolaños
 Director de Ingeniería
 LGC Ingeniería de Pavimentos S.A.
Encargado de revisar el informe

LUIS GUILLERMO CHAVARRIA BRAVO (FIRMA)
 Firmado digitalmente por LUIS GUILLERMO CHAVARRIA BRAVO (FIRMA)
 Fecha: 2021.11.10 11:21:52 -06'00'

Ing. Luis Guillermo Chavarría Bravo, M.Sc.
 Gerente General
 LGC Ingeniería de Pavimentos S.A.
 Encargado de aprobar el informe

Salto de Página

	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.27
		Aprobado: 2021-09-16
		Página: 3 de 13
		N° Informe 01-R003-2021

Notas:

Nota1: Sin la aprobación de LGC Ingeniería de Pavimentos S.A., no se debe reproducir el Informe, excepto cuando se reproduzca en su totalidad, para dar seguridad de que partes de un Informe no se sacan de contexto.

Nota2: Estimado cliente cuando sea necesario, se le reportará la condición del Item en la casilla de observaciones. Por ejemplo, material contaminado, material muy húmedo tuvo que ser secado previo a las pruebas, etc.

Nota3: Los resultados obtenidos corresponden únicamente a los Items ensayados.

Nota4: "La incertidumbre expandida reportada, se declara como la incertidumbre estándar de la medición multiplicada por un factor de cobertura k que corresponde a una probabilidad de cobertura aproximadamente del 95 %." La estimación de la incertidumbre se realiza con el "RC-37: Incertidumbre", se encuentra a disposición del cliente en el RC-78 incertidumbres expandidas relativas para los métodos de ensayo".

Nota5: Los resultados de ensayo (s) que han sido por servicios externamente suministrados se encuentran identificados mediante el uso de paréntesis, cuadrados ((Resultado obtenido)).

Nota6: Cualquier observación o comentario sobre nuestros servicios, favor enviarlo a nuestro correo electrónico, soporte@lgsdipavimentos@gmail.com.

Nota7: Si desea formular una queja o reclamo, comuníquese con gestor de calidad o al correo gestorcalidad@lgsdipavimentos.net.

Nota8: Si desea conocer el alcance del laboratorio puede visitar el sitio web del BCA www.bca.net.uy.

Nota9: El símbolo de acreditación se utiliza en este registro únicamente si se incluyen resultados de ensayos dentro del alcance de acreditación de nuestro laboratorio.

C/c: Archivo

-----Salto de Página-----

	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.27
		Aprobado: 2021-09-16
		Página: 4 de 13
		N° Informe 01-8003-2021

Anexo N°1 **Análisis de Mezcla Asfáltica en Caliente Metodología SuperPave** **(5,95 % contenido de asfalto con caucho)**

Determinación de la susceptibilidad a la deformación permanente a mezcla asfáltica **Metodología SuperPave**

Descripción del ensayo: Con la muestra de mezcla asfáltica en caliente metodología SuperPave aportada por el cliente, se moldearon especímenes cilíndricos de 150 mm de diámetro y 75 mm (± 2 mm) de altura posterior a un proceso de acondicionado de 4 h (± 5 m) a una temperatura de 135 °C (± 3 °C). Para finalizar se acondicionó los especímenes a 60 °C (mín. 6 h) y se procedió a llevar el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA) a la temperatura de ensayo y se aplicó una presión de 100 psi a las mangueras. Se programaron 8000 ciclos de carga, donde se registró automáticamente la deformación en dos puntos por espécimen. Al momento de finalizar los ciclos de ensayo se reportó la deformación plástica en cada punto (confirmado por dos especímenes) y el promedio general de los 6 especímenes de acuerdo con la Norma AASHTO T-340.

-----Salto de Página-----

	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.27
		Aprobado: 2021-09-16
		Página: 5 de 13
		N° Informe 01-R003-2021

Muestra: 01-25667-2021
Muestra Cliente: LC-965-21

Tabla N°1
Método de ensayo para determinar la susceptibilidad a la deformación permanente de
mezclas asfálticas utilizando el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA)

Fecha de realización de ensayo: 2021-11-05
5,95 % contenido de asfalto con caucho

Muestra Izquierda							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	62,9	1,275	1,225	0,000	1,256	1,256	1,253

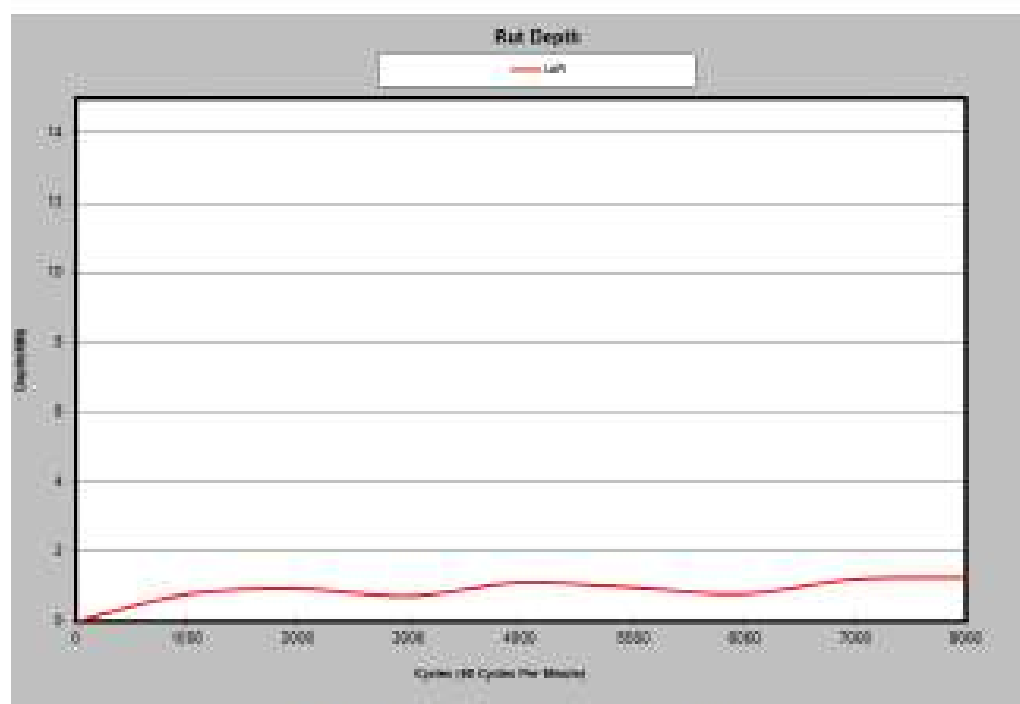


Gráfico 1. Deformación Muestra 01-25667-2021

	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.27
		Aprobado: 2021-09-16
		Página: 6 de 13
		N° Informe 01-R003-2021

Tabla N°2

Método de ensayo para determinar la susceptibilidad a la deformación permanente de mezclas asfálticas utilizando el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA)

Fecha de realización de ensayo: 2021-11-05
5,95 % contenido de asfalto con caucho

Muestra Derecha							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	-62,9	1,106	1,106	0,000	1,120	1,115	1,112

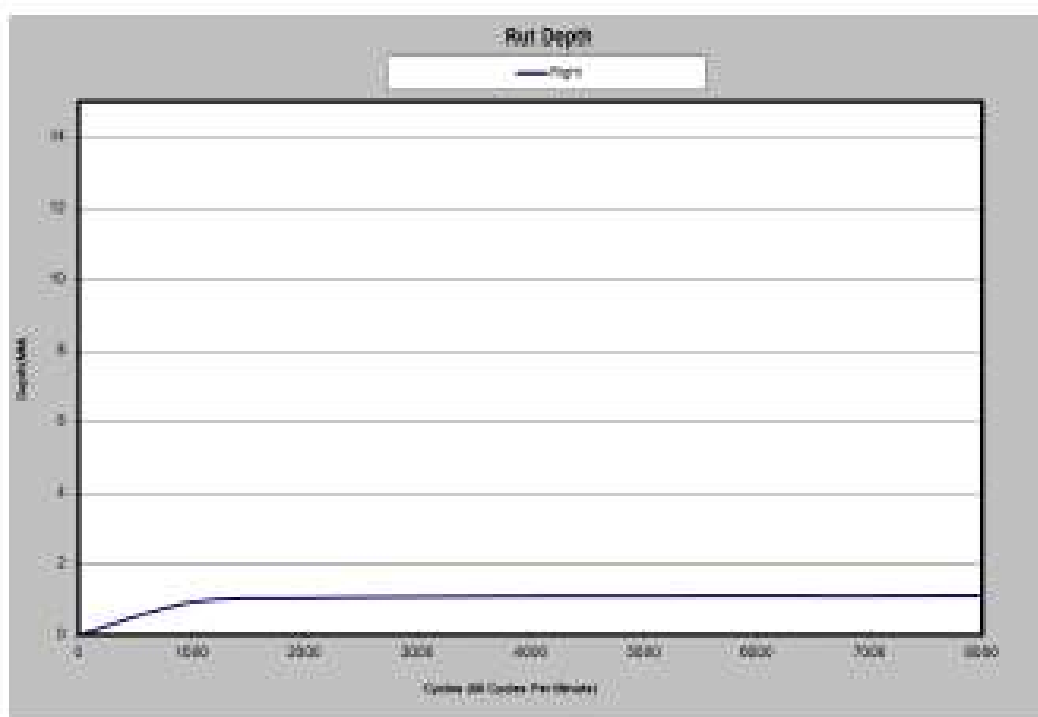


Gráfico 3. Deformación Muestra 01-25667-2021

	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.27
		Aprobado: 2021-09-16
		Página: 7 de 13
		N° Informe 01-R003-2021

Tabla N°3
Método de ensayo para determinar la susceptibilidad a la deformación permanente de
mezclas asfálticas utilizando el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA)

Fecha de realización de ensayo: 2021-11-05
5,95 % contenido de asfalto con caucho

Muestra Izquierda							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	62,0	1,306	1,306	0,000	1,366	1,375	1,338

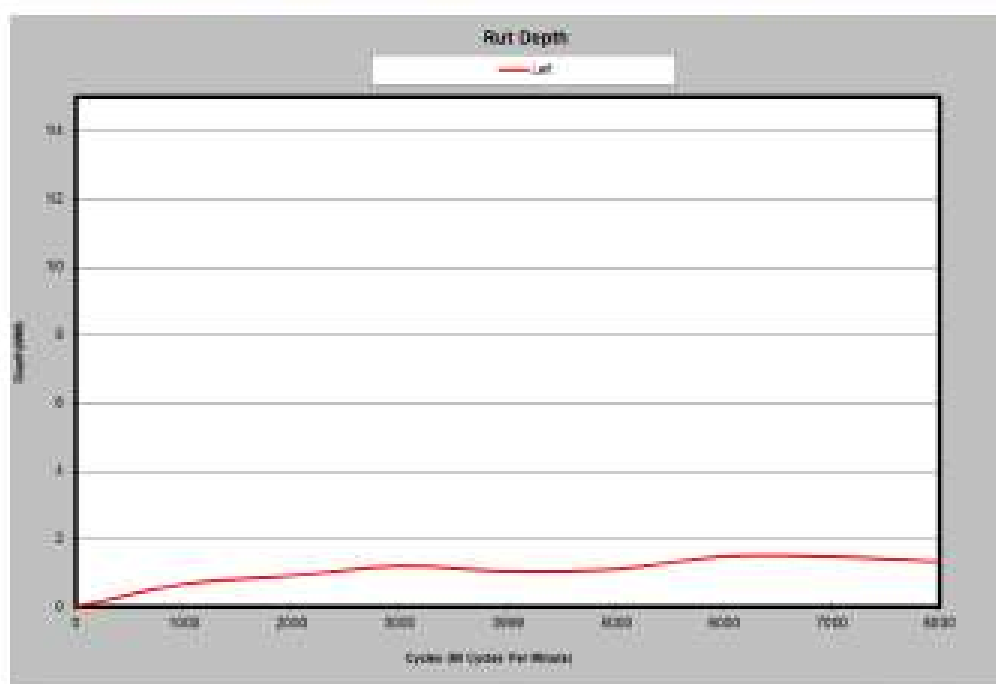


Gráfico 2. Deformación Muestra 01-25667-2021

Deformación general promedio de las 4 muestras ensayadas (5,95 % contenido de asfalto con caucho):	1,234 mm
---	-----------------

	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.27
		Aprobado: 2021-09-16
		Página: 8 de 13
		N° Informe 01-R003-2021

Tabla N°4
Resultados de Ensayos
5,95 % contenido de asfalto con caucho

MUESTRA	FECHA(S) DE REALIZACIÓN	MÉTODO DE ENSAYO	ENSAYO	RESULTADOS						
01-25667-2021	2021-11-03	M INTE C4 AASHTO T-268	Método de ensayo para el Porcentaje de vacíos de una mezcla asfáltica densa y abierta para pavimentos	Temperatura de moldear: 140,0 °C			Temperatura Ambiente: 35,7 °C			
				Primera Prueba						
				Posición	total	Peso seco (g)	Peso 100 (g)	Peso sum. (g)	Q80	Vacíos (%)
				1, U	2.463	2944,2	2961,7	1678,5	2,294	6,81
				4, U		2941,2	2949,9	1670,2	2,289	7,04
				7, UD		2943,1	2954,7	1672,9	2,292	6,89
				5, UD		2943,7	2954,1	1673,5	2,292	6,91
				Segunda Prueba						
				3, U	2.463	2942,1	2959,1	1675,4	2,296	6,74
				4, U		2943,7	2954,4	1668,2	2,295	6,78

-----Salto de Página-----

	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.27
		Aprobado: 2021-09-16
		Página: 9 de 13
		N° Informe 01-R003-2021

Anexo N°2 **Análisis de Mezcla Asfáltica en Caliente Metodología SuperPave** **(5,63 % contenido de asfalto sin caucho)**

Determinación de la susceptibilidad a la deformación permanente a mezcla asfáltica **Metodología SuperPave**

Descripción del ensayo: Con la muestra de mezcla asfáltica en caliente metodología SuperPave aportada por el cliente, se moldearon especímenes cilíndricos de 150 mm de diámetro y 75 mm (± 2 mm) de altura posterior a un proceso de acondicionado de 4 h (± 5 m) a una temperatura de 135 °C (± 3 °C). Para finalizar se acondicionó los especímenes a 60 °C (mín. 6 h) y se procedió a llevar el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA) a la temperatura de ensayo y se aplicó una presión de 100 psi a las mangueras. Se programaron 8000 ciclos de carga, donde se registró automáticamente la deformación en dos puntos por espécimen. Al momento de finalizar los ciclos de ensayo se reportó la deformación plástica en cada punto (conformado por dos especímenes) y el promedio general de los 6 especímenes de acuerdo con la Norma AASHTO T-340.

-----Salto de Página-----

	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.27
		Aprobado: 2021-09-16
		Página: 10 de 13
		N° Informe 01-R003-2021

Muestra: 01-25668-2021
Muestra Cliente: LC-965-21

Tabla N°5
Método de ensayo para determinar la susceptibilidad a la deformación permanente de
mezclas asfálticas utilizando el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA)

Fecha de realización de ensayo: 2021-11-04
5,43 % contenido de asfalto sin caucho

Muestra Izquierda							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	67,4	1,940	1,967	0,000	1,908	1,940	1,938

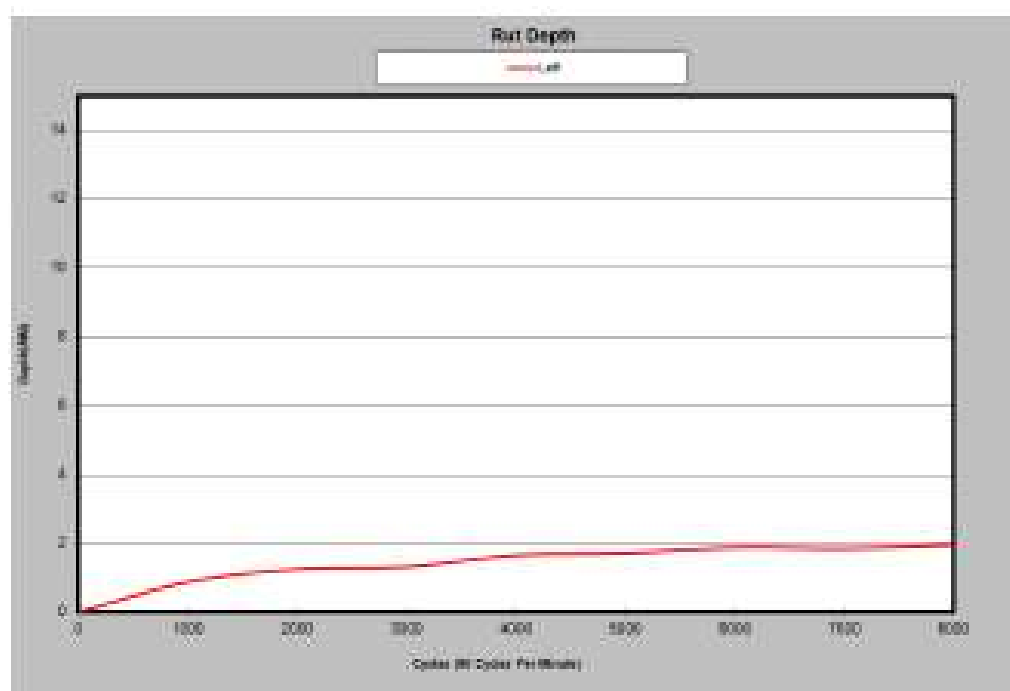


Gráfico 2. Deformación Muestra 01-2566-2021

PROTOCOLO N° 6
Método de ensayo para determinar la susceptibilidad a la deformación permanente de
mezclas asfálticas utilizando el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA)

Fecha de realización de ensayo: 2021-11-04
 5,43 % contenido de asfalto sin caucho

Muestra Derecha							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	67,4	1,414	1,414	0,000	1,408	1,442	1,424

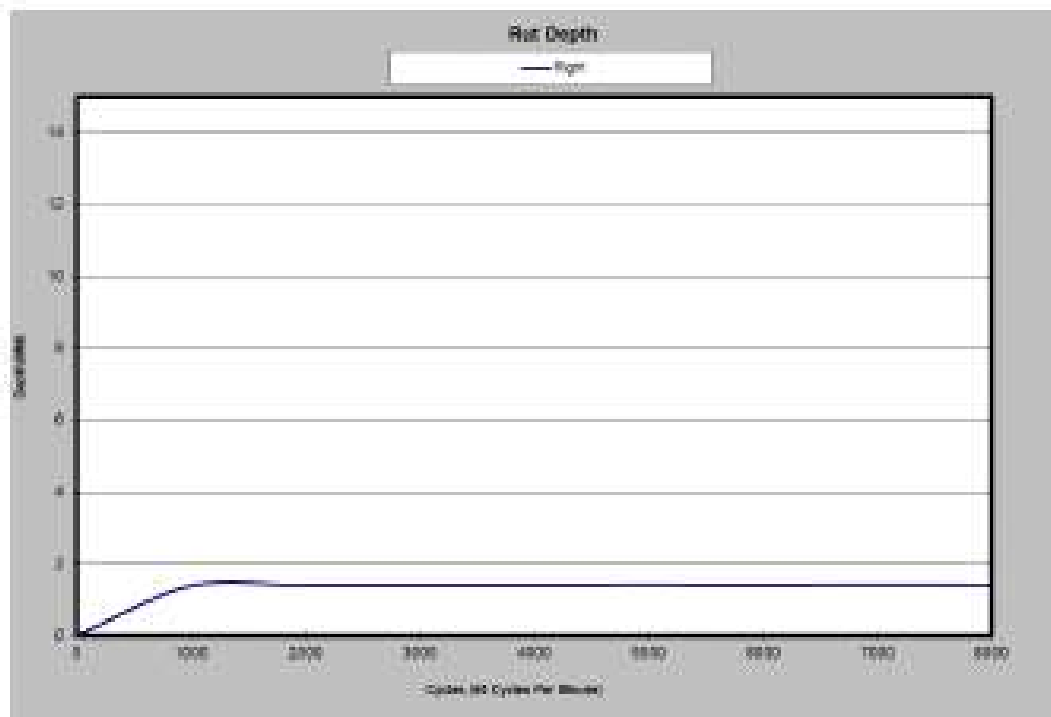


Gráfico 3. Deformación Muestra 01-25668-2021

LDC Ingeniería de Pavimentos S.A.
 Laboratorio y Control de Calidad de Asfaltos
 San Miguel de los Baños, de la entrada de Ciego de Avila, 400 metros más, edificio, contra terreno
 E-mail: laboratorioingenieria@london.com.cu / calidadasfaltos@london.com.cu Teléfonos: 2020-5654.1 / 2020-5654.2
 Laboratorio Acreditado: N° 1502 (QC) (SC) 17025:2017, disponible en: cubainformacion.com



Tabla N°7
Método de ensayo para determinar la susceptibilidad a la deformación permanente de
mezclas asfálticas utilizando el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA)

Fecha de realización de ensayo: 2021-11-05
 5,63 % contenido de asfalto sin caucho

Muestra Derecha							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	62,0	1,454	1,450	0,000	1,454	1,454	1,453

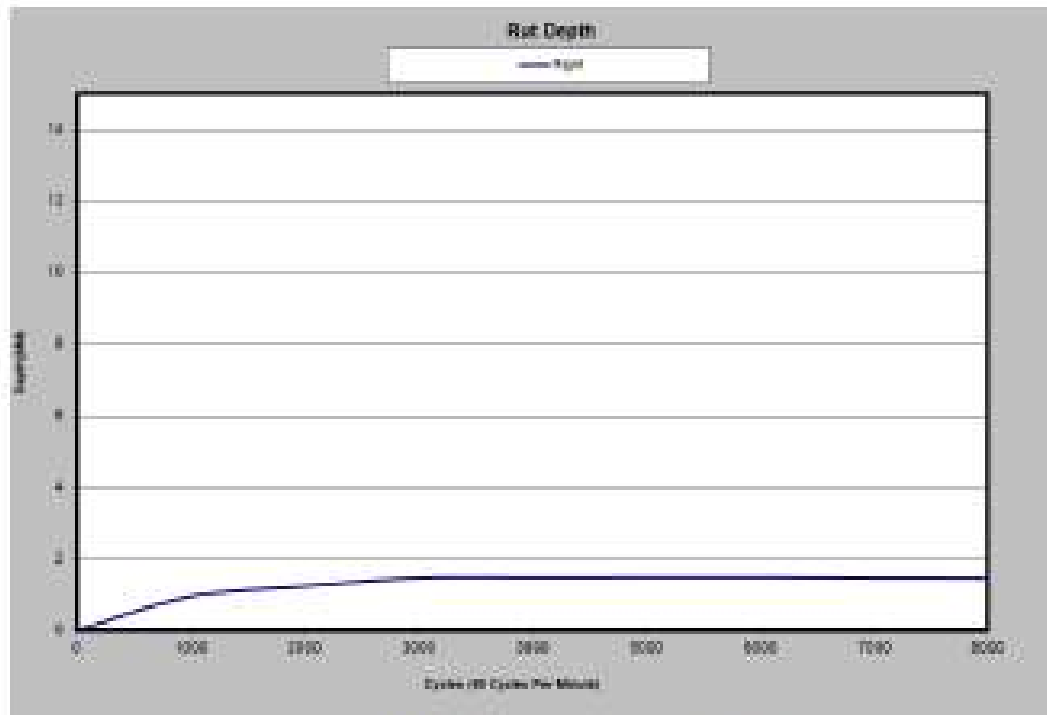


Gráfico 2. Deformación Muestra 01-25668-2021

Deformación general promedio de las 6 muestras ensayadas (5,63 % contenido de asfalto sin caucho):	1,405 mm
---	-----------------

Tabla N°8
Resultados de Ensayos

ISI C Ingeniería de Pavimentos S.A.
 Laboratorio y Control de Calidad de Materiales
 San Miguel de Desamparados, de la entrada de Costa Rica, 400 metros más, edificio color terracota
 Email: carboinventario@isicv.com / carboinventario@isicv.com / Teléfono: 2070-5555 / 2070-5555
 Laboratorio Acreditado: N°5-EC-0001-2017 - disponible en: www.isicv.com




	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.27
		Aprobado: 2021-09-16
		Página: 13 de 13
		N° Informe 01-R003-2021

5,63 % contenido de asfalto sin caucho

MUESTRA	FECHA(S) DE REALIZACIÓN	MÉTODO DE ENSAYO	ENSAYO	RESULTADOS						
01-25668-2021	2021-11-02	T1 INTE C4 AASBITO T-268	Método de ensayo para el Porcentaje de vacíos de cine de mezclas asfálticas densas y abiertas para pavimentos	Temperatura de moldes: 140,0 °C			Temperatura Ambiente: 24,0 °C			
				Primera Puesta						
				peso	total	Peso seco (g)	Peso 130 (g)	Peso sum. (g)	total	Vacíos (%)
				7, U	2,453	2902,8	2912,0	1646,2	2,293	6,51
				4, U		2904,7	2910,4	1640,3	2,291	6,62
				5, LD		2901,5	2904,7	1636,2	2,287	6,73
				6, LD		2902,8	2908,7	1639,2	2,287	6,78
				Segunda Puesta						
				2, LD	2,453	2900,3	2905,0	1638,9	2,291	6,61
				3, LD		2901,3	2904,7	1638,6	2,292	6,58

Última Línea

Anexo 7: Resultado del ensayo del TSR.

	Ingeniería Técnica de Proyectos ITP S.A. Herramienta de trabajo para el cálculo de resistencia referida y tensión diametral	Código ITP-RL-154	
		Versión: 01	Página: 1 de 2
		Consecutivo: 01	

TENSIÓN DIAMETRAL (AASHTO T-283)

Muestra	LU-1622-21 SIN CAUCHO	Fecha de mezclado	N/A
Proyecto	LC-965-21	Fecha de moldeado	2021-11-19
		Fecha de acondicionamiento	2021-11-22
		Fecha de falla	2021-11-23
GSM	2,453	Número de golpes	75

PASTILLA N°	DIÁMETRO (cm)	ESPESOR (cm)	MASA SECA (g)	MASA S.S.S. 1 (g)	MASA SUMERGIDA (g)	VOLUMEN (cm ³)	GBS BRUTA	VACÍOS DE AIRE %	COMPACTACIÓN %
1	10,176	6,259	1184,8	1185,7	683,2	502,5	2,358	3,9	96,1
2	10,184	6,288	1185,6	1187,0	683,6	503,4	2,355	4,0	96,0
3	10,180	6,275	1182,7	1184,0	681,2	502,8	2,352	4,1	95,9
4	10,174	6,205	1181,6	1182,8	679,9	502,9	2,350	4,2	95,8
5	10,176	6,277	1182,2	1184,0	681,1	502,9	2,351	4,2	95,8
6	10,174	6,279	1182,9	1184,4	680,9	503,5	2,349	4,2	95,8
7	10,179	6,264	1183,1	1184,6	680,0	504,6	2,345	4,4	95,6
8	10,180	6,286	1181,8	1183,0	679,7	503,3	2,348	4,3	95,7

PASTILLA	ESPESOR (cm)	CARGA (kN)	DIÁMETRO (cm)	ESFUERZO A TENSIÓN (kPa)	DAÑO VISUAL POR HUMEDAD (DE 0 A 5)	¿AGREGADO QUEBRADO O AGRIETADO?
1	6,3	14,182	10,2	1417,5		
2	6,3	14,693	10,2	1460,7		
3	6,3	15,340	10,2	1528,8		
4	6,2	15,120	10,2	1524,7		
5	6,3	15,785	10,2	1573,2		
6	6,3	14,897	10,2	1484,6		
7	6,3	14,456	10,2	1443,3		
8	6,3	14,395	10,2	1432,1		

ts húmedo 1482,9
ts seco 1483,3

TSR	99,98%	ESP. MAYOR A 75
-----	--------	-----------------

STEVEN ESQUIVEL CAMPOS
Encargado de laboratorio
Ingeniería Técnica de Proyectos

STEVEN ESQUIVEL CAMPOS
Técnico
Ingeniería Técnica de Proyectos

	Ingeniería Técnica de Proyectos ITP S.A.		Código ITP-RL-154
	Herramienta de trabajo para el cálculo de resistencia referida y tensión diametral		Versión: 01 Página: 1 de 2
			Consecutivo: 01

TENSIÓN DIAMETRAL (AASHTO T-283)

Muestra	LU-1622-21 CON CAUCHO	Fecha de mezclado	N/A
Proyecto	LC-965-21	Fecha de moldeo	2021-11-19
		Fecha de acondicionamiento	2021-11-22
		Fecha de falla	2021-11-23
GSMF	2.462	Número de golpes	90

PASTILLA N°	DIÁMETRO (cm)	ESPESOR (cm)	MASA SECA (g)	MASA S.S.S. 1 (g)	MASA SUMERGIDA (g)	VOLUMEN (cm ³)	GBS BRUTA	VACÍOS DE AIRE %	COMPACTACIÓN %
1	10,185	6,243	1184,9	1186,0	687,3	498,7	2,376	3,5	96,5
2	10,182	6,151	1183,9	1184,9	687,2	497,7	2,379	3,4	96,6
3	10,179	6,133	1181,7	1182,7	686,3	496,4	2,381	3,3	96,7
4	10,178	6,206	1186,7	1188,0	687,0	501,0	2,369	3,8	96,2
5	10,185	6,191	1183,0	1183,7	684,7	499,0	2,371	3,7	96,3
6	10,192	6,203	1184,1	1185,4	685,9	499,5	2,371	3,7	96,3
7	10,172	6,194	1186,1	1187,5	684,1	503,4	2,356	4,3	95,7
8	10,175	6,247	1186,2	1187,2	687,5	499,7	2,374	3,6	96,4

PASTILLA	ESPESOR (cm)	CARGA (kN)	DIÁMETRO (cm)	ESFUERZO A TENSIÓN (kPa)	DAÑO VISUAL POR HUMEDAD (DE 0 A 5)	¿AGREGADO QUEBRADO O AGRIETADO?
1	6,2	19,560	10,2	1958,4		
2	6,2	18,135	10,2	1843,4		
3	6,1	18,879	10,2	1925,2		
4	6,2	20,064	10,2	2022,2		
5	6,2	19,383	10,2	1956,9		
6	6,2	18,915	10,2	1904,7		
7	6,2	19,803	10,2	2000,9		
8	6,2	19,944	10,2	1997,5		

ts húmeda 1937,3
ts seca 1965,0

TSR	98,59%	ESP. MAYOR A 75
-----	--------	-----------------

STEVEN ESQUIVEL CAMPOS
Encargado de laboratorio
Ingeniería Técnica de Proyectos

STEVEN ESQUIVEL CAMPOS
Técnico
Ingeniería Técnica de Proyectos

Fuente: Informe ITP-RL-154