

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN
MAESTRÍA EN INGENIERÍA VIAL



“Propuesta de especificación para la deformación permanente de mezclas asfálticas de TMN de 12,7 mm de Costa Rica utilizando el ensayo de Rueda de Hamburgo”

Proyecto de graduación para optar por el grado académico de

Maestría en Ingeniería Vial

Realizado por:

Amed Aldi Bolaños

San José, abril del 2022

Esta obra está bajo licencia [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)© 2 por [Amed Aldi Bolaños](#) _____

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:

Propuesta de especificación para la deformación permanente de mezclas asfálticas de TMN de 12,7 mm para Costa Rica utilizando el ensayo de Rueda de Hamburgo

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

Primer Apellido	Segundo Apellido	Nombre	No. de carné
ALDI	BOLAÑOS	AMED	2018319739

Se emite el siguiente dictamen el día 13 de junio 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 fe de lo acá expuesto firmamos,

Ing. Giannina Ortiz Quesada. Coordinadora Unidad de Posgrado Escuela Ingeniería en Construcción	Ing. Pedro Castro Fernández. Profesor Tutor
Ing. Sergio Fernández. Profesor Lector	Ing. Irving Pizarro Marchena. Profesor observador

DEDICATORIA

A Dios, eje de mi vida.

A mi esposa, Ruth Solano Sibaja.

A mi hijo, Antonio Aldi Solano.

A mi madre, Mayra Bolaños Segura.

A toda mi familia.

Este segundo esfuerzo, es para ustedes con cariño.

AGRADECIMIENTOS

A los miembros del comité asesor Dr. Pedro Luis Castro Fernández, Ing., MBA, MSc., Ph.D. y el programa de la Maestría por su tiempo y comprensión dedicados al proyecto.

Al Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) y LGC Ingeniería de Pavimentos S.A y su presidente Ing. Luis Guillermo Chavarría Bravo; MSc. por la oportunidad y colaboración que me brindaron en tan distinguidas instituciones.

A todas las empresas constructoras y consultoras, las instituciones, profesionales independientes y demás personas que colaboraron con datos para este proyecto, gracias por creer en la investigación.

A mi hijo, Antonio Aldi Solano, gran Maestro e inspiración para este proyecto, quien con solo existir me enseñó a amar.

A mi esposa la Ing. Ruth Solano Sibaja, motor para la conclusión de este proyecto.

A mi madre, quien desde pequeño me enseñó los fundamentos para ser un profesional de bien.

A todos mis familiares: mi abuela, tíos, hermanos, mis sobrinos, primos y mi padrino, a quienes les debo gran parte de estas páginas.

A mis compañeros de la maestría y amigos gracias por su amistad y ayuda.

A usted, estimada lectora o estimado lector, porque hace que este proyecto perdure.

Pero sobre todo a Dios, porque se puede confiar en él y sigo poniendo mi profesión a su servicio.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	ix
ABSTRACT	x
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del Problema.....	3
1.3. Justificación del Estudio.....	3
1.4. Objetivos	5
1.4.1. Objetivo general	5
1.4.2. Objetivos específicos.....	5
1.5. Alcance y limitaciones	6
1.5.1. Alcance.....	6
1.5.2. Limitaciones.....	7
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	9
2.1. Generalidades sobre deformación permanente.....	9
2.1.1. Ensayos más comunes para determinar la deformación permanente a nivel nacional	14
2.1.1.1. Método estándar de ensayo de Rueda de Hamburgo de mezclas de asfálticas compactadas AASHTO T 324-17.....	14
2.1.1.2. Método de ensayo para la determinación de la susceptibilidad a la deformación permanente de mezclas asfálticas para pavimento utilizando el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA) AASHTO T 340-10 (2015).....	19
2.1.1.3. Principales diferencias entre los métodos de ensayo APA y Rueda de Hamburgo	22
2.2. Equipos utilizados para la ejecución de los ensayos	23
2.2.1. APA Jr.....	23
2.2.2. Compactador Giratorio SuperPave®.....	25
2.2.3. Moldes y placas para la elaboración de muestras.....	26
2.2.4. Moldes para ensayo de APA y Hamburgo	26
2.3. Especificaciones técnicas nacionales sobre deformación permanente	27
2.3.1. CR-2010 sin actualizaciones	27
2.3.2. CR-2010 actualización mayo 2017	30
2.3.3. Cartel de Conservación Vial.....	33
2.3.4. Carteles de licitaciones públicas para proyectos	36
2.4. Tipos de Plantas de asfalto	37
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....	39
3.1. Tipo de investigación por realizar	39
3.2. Formulación de hipótesis	40

3.3.	Técnicas e instrumentos de investigación	40
3.4.	Población de interés	40
3.5.	Tipo de muestreo.....	42
3.6.	Unidad de muestreo.....	44
3.7.	Unidad informante.....	46
3.8.	Ejecución de ensayos	47
3.9.	Procedimiento de muestreo de MAC	47
3.9.1.	Muestreo de mezcla asfáltica en camión.....	47
3.9.2.	Muestreo de mezcla asfáltica en campo antes de la compactación en carretera	48
3.9.3.	Muestreo de mezcla asfáltica en camino después de la compactación en carretera.....	50
3.9.4.	Procedimiento de números aleatorios.....	51
3.10.	Software estadístico.....	51
CAPÍTULO 4. ESPECIFICACIONES INTERNACIONALES PARA DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA EL ENSAYO DE RUEDA DE HAMBURGO.....		52
4.1.	Alemania	52
4.2.	Estados Unidos.....	52
4.3.	México.....	54
4.4.	Perú	54
CAPÍTULO 5. ESTIMACIÓN DE LA PRECISIÓN E INCERTIDUMBRES PARA LOS MÉTODOS DE ENSAYO APA Y RUEDA DE HAMBURGO.....		56
5.1.	Estimación de incertidumbre para la medición de la deformación permanente de las mezclas asfálticas por APA.....	58
5.1.1.	Función de medición	58
5.1.2.	Incertidumbres tipo B.....	58
5.1.3.	Incertidumbre tipo A	59
5.1.4.	Coeficientes de sensibilidad para la deformación permanente por APA en (mm).....	61
5.1.5.	Estimación de la incertidumbre estándar combinada.....	61
5.1.6.	Incertidumbre expandida.....	62
5.2.	Estimación de incertidumbre para la medición de la deformación permanente de las mezclas asfálticas por rueda de Hamburgo	63
5.2.1.	Función de medición	63
5.2.2.	Incertidumbres tipo B.....	64
5.2.3.	Incertidumbre tipo A	65
5.2.4.	Coeficientes de sensibilidad para la deformación permanente por Rueda de Hamburgo en (mm)	66
5.2.5.	Estimación de la incertidumbre estándar combinada	67
5.2.6.	Incertidumbre expandida.....	67

CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y ANÁLISIS	69
6.1. Parámetros volumétricos de la MAC	69
6.2. Resultados de deformación permanente.....	73
6.2.1. Resultados de Rueda de Hamburgo MAC moldeada.....	74
6.2.2. Resultados de APA MAC moldeada.....	75
6.2.3. Deformación permanente de núcleos extraídos en campo	75
6.3. Características de los datos de deformación permanente	78
6.4. Comparativa entre MAC moldeada y núcleos de campo y relación entre variables.....	90
6.5. Tendencia de los parámetros volumétricos versus deformación permanente obtenida por medio del ensayo de Rueda de Hamburgo.....	93
6.5.1. Propiedades de la MAC que indican relación creciente sobre la deformación plástica del ensayo Rueda de Hamburgo.....	93
6.5.2. Propiedades de la MAC que indican relación decreciente sobre la deformación plástica del ensayo Rueda de Hamburgo.....	101
6.6. Propuesta de especificación para Costa Rica del ensayo de deformación permanente Rueda de Hamburgo.....	107
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	113
7.1. Conclusiones	113
7.2. Recomendaciones.....	117
REFERENCIAS	119
ANEXOS.....	121
Anexo 1: Certificado de calibración.....	121
Anexo 2: Tabla de valores de la t-Student a niveles de confianza (a dos colas).....	122
Anexo 3: Informes de ensayo por parte del laboratorio LGC Ingeniería de Pavimentos S.A.....	123

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LOS CENTROS DE PRODUCCIÓN DE MAC UTILIZADOS.	7
FIGURA 2. CURVA TÍPICA ESFUERZO – DEFORMACIÓN EN UN CICLO DE CARGA Y DESCARGA.....	9
FIGURA 3. DEFORMACIONES EN PAVIMENTOS FLEXIBLES Y DISTRIBUCIÓN DE CARGAS.	10
FIGURA 4. MODELOS DESARROLLADOS POR DISTINTAS ORGANIZACIONES PARA DEFORMACIONES PLÁSTICAS.....	10
FIGURA 5. VARIACIÓN DE ESFUERZOS CON RESPECTO AL TIEMPO CUANDO SE APLICA UNA CARGA VEHICULAR.	11
FIGURA 6. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DEFORMACIÓN PERMANENTE.....	13
FIGURA 7. SISTEMA DE MONTAJE DE LOS ESPECÍMENES.	16
FIGURA 8. ESQUEMA DE LOS MOLDES PARA LOS ESPECÍMENES.	16
FIGURA 9. ENSAYO DE RUEDA DE HAMBURGO EN EJECUCIÓN.	17
FIGURA 10. CURVA DE RUEDA DE HAMBURGO.....	18
FIGURA 11. CONFIGURACIÓN DEL EQUIPO PARA EL ENSAYO APA	20
FIGURA 12. EQUIPO APA JR.	23
FIGURA 13. COMPACTADOR GIRATORIO SUPERPAVE® (SGC).....	25
FIGURA 14. MOLDES PARA LA ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES.	26
FIGURA 15. MOLDES PARA RUEDA DE HAMBURGO (IZQUIERDA) Y APA (DERECHA).	27
FIGURA 16. REQUISITOS DE MUESTREO Y ENSAYOS PARA MAC CON MATERIAL DE RECICLADO.	28
FIGURA 17. DESCRIPCIÓN DE LOS TIPOS DE MAC.	29
FIGURA 18. REQUISITOS DE MAC SECCIÓN 418.06.03.	29
FIGURA 19. SECCIÓN 418.07.02.06 DISEÑO DE MEZCLA	29
FIGURA 20. REQUISITOS DE DESEMPEÑO Y ACEPTACIÓN DE DISEÑO MAC.	30
FIGURA 21. REQUISITOS DE DESEMPEÑO PARA DEFORMACIÓN PLÁSTICA MAC MARSHALL.....	31
FIGURA 22. REQUISITOS DE DESEMPEÑO PARA DEFORMACIÓN PLÁSTICA MAC SUPERPAVE®.....	32
FIGURA 23. REQUISITOS MEZCLA ASFÁLTICA.	34
FIGURA 24. REQUISITOS DE MAC MODIFICADA CON POLÍMEROS.	35
FIGURA 25. 6.1. RECEPCIÓN DEL DISEÑO DE MEZCLA Y LA FÓRMULA DE MEZCLA.	36
FIGURA 26. PROCESO CUANTITATIVO	39
FIGURA 27. FLUJOGRAMA DEL PROCESO DE INVESTIGACIÓN.	40
FIGURA 28. UBICACIÓN PRINCIPALES PLANTAS DE PRODUCCIÓN DE MAC	42
FIGURA 29. ZONAS ADJUDICADAS PARA CADA CONTRATISTA Y PLANTA SUPLIDORA.....	43
FIGURA 30. RESUMEN DE ACTIVIDADES REALIZADAS	44
FIGURA 31. PASTILLAS MAC COMO UNIDAD DE MUESTREO	45
FIGURA 32. UNIDAD DE MUESTREO UNA PISTA COMPUESTA POR DOS ESPECÍMENES.	45
FIGURA 33. UNIDAD INFORMANTE	46
FIGURA 34. MUESTREO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CAMIÓN	48
FIGURA 35. MUESTREO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CAMINO ANTES DE LA COMPACTACIÓN EN CARRETERA	49
FIGURA 36. MUESTREO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CAMINO DESPUÉS DE LA COMPACTACIÓN EN CARRETERA EN CAMIÓN.....	50
FIGURA 37. PROCESO ANÁLISIS ESTADÍSTICO	51
FIGURA 38. ESPECIFICACIONES DE DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA LA RUEDA DE CARGA DE HAMBURGO.....	53
FIGURA 39. RIESGO DE DECISIÓN EN LA MEDICIÓN.	57
FIGURA 40. DIAGRAMA DE CAUSA Y EFECTO PARA FUENTES DE INCERTIDUMBRE APA	58
FIGURA 41. DIAGRAMA DE CAUSA Y EFECTO PARA FUENTES DE INCERTIDUMBRE PARA RUEDA DE HAMBURGO.....	64
FIGURA 42. PUNTOS POR LADO DONDE SE TOMA LECTURA DE LA DEFORMACIÓN PERMANENTE EN LAS PRUEBAS.	78
FIGURA 43. PRUEBA DE NORMALIDAD PRIMERA SERIE DE RESULTADOS DE APA.	81
FIGURA 44. PRUEBA DE NORMALIDAD PRIMERA SERIE DE DATOS DE RUEDA DE HAMBURGO.	84
FIGURA 45. PRUEBA DE NORMALIDAD SEGUNDA SERIE DE DATOS (AGRUPADA) DE APA.	85
FIGURA 46. PRUEBA DE NORMALIDAD SEGUNDA SERIE DE DATOS (AGRUPADA) DE RUEDA DE HAMBURGO.....	86
FIGURA 47. ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE LA SERIE DE DATOS AGRUPADA DE LOS RESULTADOS DE APA.	87
FIGURA 48. ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE LA SERIE DE DATOS AGRUPADA DE LOS RESULTADOS DE RUEDA DE HAMBURGO.....	87

FIGURA 49. PRUEBA DE VALORES ATÍPICOS A LA SERIE DE DATOS AGRUPADA DE LOS RESULTADOS DE APA.....	88
FIGURA 50. PRUEBA DE VALORES ATÍPICOS A LA SERIE DE DATOS AGRUPADA DE LOS RESULTADOS DE RUEDA DE HAMBURGO.....	88
FIGURA 51. RELACIÓN ENTRE RESULTADOS DE RUEDA DE HAMBURGO VERSUS DE APA.....	89
FIGURA 52. RESULTADOS CORRELACIÓN DE PEARSON.....	90
FIGURA 53. GRÁFICO RESUMEN DE RESULTADO DE DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA TODAS LAS PLANTAS PRODUCTORAS ANALIZADAS MAC MOLDEADA EN LABORATORIO (M=MOLDEADA).....	91
FIGURA 54. GRÁFICA COMPARATIVA RESULTADOS OBTENIDOS UTILIZANDO MAC MOLDEADA VERSUS NÚCLEOS DE CAMPO	91
FIGURA 55. GRÁFICA RELACIÓN DEFORMACIÓN PLÁSTICA (RH) VERSUS FLUJO.....	94
FIGURA 56. GRÁFICA RELACIÓN DEFORMACIÓN PLÁSTICA (RH) VERSUS CONTENIDO DE ASFALTO SOBRE EL AGREGADO.....	94
FIGURA 57. GRÁFICA RELACIÓN DEFORMACIÓN PLÁSTICA (RH) VERSUS CONTENIDO DE ASFALTO SOBRE LA MEZCLA.....	95
FIGURA 58. GRÁFICA RELACIÓN DEFORMACIÓN PLÁSTICA (RH) VERSUS VFA.....	95
FIGURA 59. GRÁFICA RELACIÓN DEFORMACIÓN PLÁSTICA (RH) VERSUS RELACIÓN POLVO / ASFALTO.....	96
FIGURA 60. GRÁFICA RELACIÓN DEFORMACIÓN PLÁSTICA (RH) VERSUS ASFALTO EFECTIVO.....	96
FIGURA 61. GRÁFICA RELACIÓN DEFORMACIÓN PLÁSTICA (RH) VERSUS PORCENTAJE PASANDO EL TAMIZ 12.7 MM.	97
FIGURA 62. GRÁFICA RELACIÓN DEFORMACIÓN PLÁSTICA (RH) VERSUS PORCENTAJE PASANDO EL TAMIZ 9.5 MM.	97
FIGURA 63. GRÁFICA RELACIÓN DEFORMACIÓN PLÁSTICA (RH) VERSUS PORCENTAJE PASANDO EL TAMIZ #4.	98
FIGURA 64. GRÁFICA RELACIÓN DEFORMACIÓN PLÁSTICA (RH) VERSUS PORCENTAJE PASANDO EL TAMIZ #8.	98
FIGURA 65. GRÁFICA RELACIÓN DEFORMACIÓN PLÁSTICA (RH) VERSUS PORCENTAJE PASANDO EL TAMIZ #16.	99
FIGURA 66. GRÁFICA RELACIÓN DEFORMACIÓN PLÁSTICA (RH) VERSUS PORCENTAJE PASANDO EL TAMIZ #30.	99
FIGURA 67. GRÁFICA RELACIÓN DEFORMACIÓN PLÁSTICA (RH) VERSUS PORCENTAJE PASANDO EL TAMIZ #50.	100
FIGURA 68. GRÁFICA RELACIÓN DEFORMACIÓN PLÁSTICA (RH) VERSUS PORCENTAJE PASANDO EL TAMIZ #200.....	100
FIGURA 69. GRÁFICA RELACIÓN DEFORMACIÓN PLÁSTICA (RH) VERSUS GBS DE LAS PASTILLAS MAC.....	101
FIGURA 70. GRÁFICA RELACIÓN DEFORMACIÓN PLÁSTICA (RH) VERSUS GEMT.....	102
FIGURA 71. GRÁFICA RELACIÓN DEFORMACIÓN PLÁSTICA (RH) VERSUS ESTABILIDAD.....	102
FIGURA 72. GRÁFICA RELACIÓN DEFORMACIÓN PLÁSTICA (RH) VERSUS PORCENTAJE DE VACÍOS MAC.....	103
FIGURA 73. GRÁFICA RELACIÓN DEFORMACIÓN PLÁSTICA (RH) VERSUS VMA.....	104
FIGURA 74. GRÁFICA RELACIÓN DEFORMACIÓN PLÁSTICA (RH) VERSUS GBS COMBINADO DE LOS AGREGADOS.....	104
FIGURA 75. GRÁFICA RELACIÓN DEFORMACIÓN PLÁSTICA (RH) VERSUS GBS DE LA FRACCIÓN FINA DE AGREGADO.....	105
FIGURA 76. GRÁFICA RELACIÓN DEFORMACIÓN PLÁSTICA (RH) VERSUS GBS DE LA FRACCIÓN GRUESA DE AGREGADO.....	105
FIGURA 77. GRÁFICA RELACIÓN DEFORMACIÓN PLÁSTICA (RH) VERSUS GRAVEDAD ESPECÍFICA EFECTIVA.....	106
FIGURA 78. GRÁFICA RELACIÓN DEFORMACIÓN PLÁSTICA (RH) VERSUS ABSORCIÓN DE ASFALTO.....	106
FIGURA 79. GRÁFICA RELACIÓN DEFORMACIÓN PLÁSTICA (RH) VERSUS GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL ASFALTO.....	107
FIGURA 80. GRÁFICA NUBE DE DATOS RUEDA DE HAMBURGO.....	109
FIGURA 81. SECCIÓN 11 PRECISIÓN Y EXACTITUD DE LA NORMA AASHTO T324.....	110
FIGURA 82. VALORES Z_{α} PARA DISTINTOS NIVELES DE CONFIANZA.....	111
FIGURA 84. CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° 067-2019 M. EQUIPO GALGAS LGC-068-005.....	121
FIGURA 85. TABLA DE VALORES DE LA T-STUDENT A NIVELES DE CONFIANZA (A DOS COLAS).....	122

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 1. FUENTE DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZADAS.	6
CUADRO 2. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES GRANULARES Y SU INFLUENCIA ANTE LA DEFORMACIÓN PERMANENTE.	12
CUADRO 3. RESUMEN DE CONDICIONES PARA EL ENSAYO DE RUEDA DE HAMBURGO	17
CUADRO 4. RESUMEN DE CONDICIONES PARA EL ENSAYO DE APA	21
CUADRO 5. NOMENCLATURA DE LOS CENTROS DE PRODUCCIÓN DE MAC.	44
CUADRO 6. ESPECIFICACIÓN MEXICANA PARA EL ENSAYO DE RUEDA DE HAMBURGO.	54
CUADRO 7. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DEL VERNIER PARA MEDIR LAS DIFERENTES ALTURAS DE COMPROBACIÓN DEL EQUIPO.	59
CUADRO 8. REPETICIONES DEL ENSAYO APA.....	60
CUADRO 9. FÓRMULAS PARA ANÁLISIS DE VARIANZA DE UN FACTOR (ANOVA).....	60
CUADRO 10. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE COMBINADA APA.....	61
CUADRO 11. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EXPANDIDA APA.....	63
CUADRO 12. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN DEL VERNIER EN DIFERENTES ALTURAS.	65
CUADRO 13. REPETIBILIDAD Y ANÁLISIS DE VARIANZA DE UN FACTOR	65
CUADRO 14. FÓRMULAS PARA ANÁLISIS DE VARIANZA DE UN FACTOR (ANOVA).....	66
CUADRO 15. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE COMBINADA.....	67
CUADRO 16. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EXPANDIDA.....	68
CUADRO 17. RESULTADOS DE PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS DE LA MAC POR PLANTA PRODUCTORA.	69
CUADRO 18. RESULTADOS DE PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS DE LA MAC POR PLANTA PRODUCTORA (CONTINUACIÓN)	70
CUADRO 19. RESUMEN DE ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE LOS PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS DE LA MAC	71
CUADRO 20. RESULTADOS DE RUEDA DE HAMBURGO MAC MOLDEADA	74
CUADRO 21. RESULTADOS DE APA MAC MOLDEADA	75
CUADRO 22. RESULTADOS DE ENSAYO DE RUEDA DE HAMBURGO A NÚCLEOS EXTRAÍDOS EN CAMPO.	77
CUADRO 23. RESULTADOS DE ENSAYO DE APA A NÚCLEOS EXTRAÍDOS EN CAMPO.....	77
CUADRO 24. SERIES DE DATOS DEL ENSAYO DE APA.....	80
CUADRO 25. SERIES DE DATOS DEL ENSAYO DE RUEDA DE HAMBURGO.....	82
CUADRO 26. COMPARATIVA DE RESULTADOS PROMEDIO DE DEFORMACIÓN PERMANENTE MAC MOLDEADA Y NÚCLEOS EXTRAÍDOS.	92
CUADRO 27. RESUMEN DE DATOS DE DESVIACIONES ESTÁNDAR Y COEFICIENTES DE VARIACIÓN MAC MOLDEADA Y COMPACTADA.	93
CUADRO 28. RESULTADOS DE DEFORMACIÓN RUEDA DE HAMBURGO	108

RESUMEN

La deformación permanente de mezcla asfáltica es uno de los tres ensayos de desempeño (referidos a: fatiga, daño por humedad y deformación permanente) más importantes por analizar en los pavimentos flexibles. En este estudio, se analizan mezclas asfálticas de tamaño máximo nominal de 12,7 mm provenientes de 7 de las principales plantas productoras de Costa Rica, comparando los resultados de deformación permanente de los ensayos que utilizan ruedas cargadas (Wheel-Track Testing): Rueda de Hamburgo (AASHTO T-324) y APA (AASHTO T-340), realizados con el equipo Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA Jr.), donde se analiza el comportamiento y se contrastan los resultados de los dos métodos de ensayo, realizados a una misma mezcla asfáltica moldeada y además se aportan resultados de núcleos extraídos en campo para la misma producción de MAC.

Debido a que los dos métodos de ensayo predicen la misma variable (deformación permanente), el ensayo de Rueda de Hamburgo, pronostica también la susceptibilidad al daño por humedad, ya que se somete el espécimen a una condición más crítica, razón por la cual se recomienda utilizar el método AASHTO T-324 en el país ofreciendo más información que el estándar AASHTO T-340.

Como último paso, se realiza una propuesta de especificación de la deformación permanente para el ensayo de Rueda de Hamburgo con base en el análisis de los resultados obtenidos y la normativa internacional. Mediante el uso del método AASHTO T-324 se determinó que el límite máximo propuesto para el ensayo de deformación permanente de las MAC de TMN de 12,7 mm de Costa Rica es de 5,380 mm y que también la curva de número de ciclos versus deformación, no presente el punto de inflexión que obedezca al inicio del daño por humedad de la MAC.

Palabras clave: deformación permanente, ahuellamiento mezcla asfáltica, Rueda de Hamburgo, APA, ensayos de desempeño MAC.

ABSTRACT

Permanent deformation of asphalt mixtures is one of the three most important performance tests - fatigue, moisture damage, and permanent deformation- to analyze in flexible pavements. This study examines asphalt mixtures with a nominal maximum size of 12.7 mm from seven of the main production plants in Costa Rica. Comparing and contrasting the permanent deformation results of tests using loaded wheels (Wheel Tracking): Hamburg Wheel (AASHTO T-324) and APA (AASHTO T-340). Which is performed with the Asphalt Pavement Analyzer (APA Jr.) equipment, where the behavior is analyzed, and the results of the two test methods are contrasted, performed on the same molded asphalt mixture. Results from field-extracted cores for the same HMA production are also provided.

Since both test methods predict the same variable -permanent deformation-, the Hamburg Wheel test also predicts susceptibility to moisture damage because it subjects the specimen to a more critical condition. Therefore, it is recommended to use the AASHTO T-324 method in the country, offering more information than the AASHTO T-340 standard.

As a last step, a permanent deformation specification proposal is made for the Hamburg Wheel test, based on the analysis of the results obtained and international regulations. Using the AASHTO T-324 method it was found that the proposed maximum specification limit is for the permanent deformation test of 12.7 mm NMAS MAC from Costa Rica is 5.380 mm and that the cycle number versus the deformation curve does not present the inflection point that corresponds to the onset of moisture damage of the HMA.

Keywords: Permanent deformation, Rutting, Hamburg Wheel-Tracking Test, APA, performance tests for bituminous mixtures HMA.

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Antecedentes

La ingeniería de pavimentos, en aras de predecir el comportamiento de la falla por deformación permanente de mezclas asfálticas compactadas, ha desarrollado ensayos de laboratorio que someten el material bajo cargas cíclicas, simulando las condiciones del paso de vehículos que tendrá el pavimento cuando entre en operación. Es por esta razón, que desde hace varias décadas se investiga en este campo para generar modelos que permitan pronosticar esta falla y que se pueda considerar desde la etapa del diseño estructural del pavimento. Estas variables de desempeño se tornan complejas de predecir en campo o mediante auscultación, por lo que se recurre a ensayos de laboratorio empíricos que puedan ejecutarse, para utilizar sus resultados desde la concepción del diseño estructural y que sirvan también para determinar esta falla en la mezcla producida en boca de planta.

El diseño de pavimentos en Costa Rica, tradicionalmente ha sido realizado por medio del uso de la metodología de diseño AASHTO 93, que se basa en correlaciones empíricas de los resultados obtenidos de las pistas de ensayo de Ottawa, Illinois en 1950. Hace algunos años en los Estados Unidos, donde fue originada esta metodología, se identificó la necesidad de una transición de este estado empírico (estado actual), hacia un estado empírico-mecanístico (estado del arte), y finalmente una implementación totalmente mecánica (estado de las investigaciones actuales), buscando con este objetivo un retorno a los principios básicos de la ingeniería. (Loría, Aguiar, Padilla, & Villacorta, 2014).

Entre los ensayos más comunes para predecir el desempeño de la mezcla asfáltica, existen los que utilizan dispositivos de ruedas cargadas para determinar la susceptibilidad al daño por deformación permanente (Garnica Anguas, Delgado Alamilla, & Sandoval Sandoval, 2005). En Costa Rica, los equipos más comunes son el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA) de origen estadounidense y la Rueda de Carga de Hamburgo diseñada en Alemania, estos equipos los poseen laboratorios de materiales de instituciones autónomas y hasta hace pocos años fueron adquiridos por laboratorios de materiales privados. Estos ensayos, se rigen por la norma AASHTO T-340 en el caso de APA y cuando se utiliza la Rueda de Hamburgo el método de ensayo es AASHTO T-324.

La presente investigación, se desarrolla en el contexto de los laboratorios de materiales de construcción, quienes son los encargados en el país de la ejecutar ensayos de aceptación de mezcla asfáltica producida. Así mismo, los laboratorios de materiales (privados y públicos), en su función de autocontrol y verificación de los proyectos de infraestructura vial del país, con el avance de la tecnología, la evolución de las especificaciones técnicas y la actualización de las normas de ensayo, han tenido que adquirir nuevos equipos para predecir el comportamiento de la mezcla asfáltica a corto y largo plazo por lo que dentro de sus labores

internas, se investiga a fondo el impacto de cada variable involucrada en los ensayos y la optimización de los recursos, con los cuales se evaluará al contratista, por lo que para dicho contexto, el desarrollo del proyecto contribuye con esa información.

También, en Costa Rica las especificaciones técnicas de los ensayos nacen en su mayoría del estudio de normas aplicadas en otros países y para utilizarlas en esta región, previo deben estudiarse el comportamiento de los materiales, equipos y centros de producción nacional y de esta manera, adecuar los umbrales de exigencia homologados. Por lo tanto, en el ensayo de Rueda de Hamburgo se tiene que estudiar este comportamiento para proponer un rango máximo de aceptación y no solo el indicado en la norma de ensayo internacional, objeto de esta investigación, impactando a la comunidad ingenieril que se dedica al diseño, construcción o control de calidad de los proyectos con estructuras de pavimentos de concreto asfáltico.

1.2. Planteamiento del Problema

Tanto para la mezcla asfáltica colocada en la red vial nacional como en la cantonal, se debe contar con ensayos de desempeño que garanticen la calidad de la mezcla asfáltica producida en las distintas plantas para proyectos de conservación vial y licitaciones públicas y privadas. Como el ensayo de deformación permanente se puede llevar a cabo con cualquiera de los dos métodos (Rueda de Hamburgo y APA) a pesar de que uno reúne condiciones más críticas dentro de su metodología de ensayo (Rueda de Hamburgo), además que existen especificaciones técnicas generales del país para controlar la deformación permanente únicamente para el procedimiento con APA y para el ensayo Rueda de Hamburgo, no se cuenta con normativa nacional explícita, fundamentada en estudios, por lo tanto, es oportuno entonces investigar sobre estos posibles valores de deformación permanente para las mezclas producidas en el país, ya que si los ingenieros de proyecto no tienen claridad normativa para la deformación permanente, la definición de aceptación o rechazo de mezcla asfáltica en caliente (MAC) al contratista tampoco será la adecuada, por lo tanto, en aras de plantear una propuesta de especificación del ensayo de rueda de Hamburgo adaptada a la realidad del país, da origen a realizar estos ensayos y comparar sus resultados, con el fin de buscar una comparación entre ellos y otorgar resultados recientes de deformación permanente para las mezclas asfálticas del país con ambas metodologías.

1.3. Justificación del Estudio

Los daños más importantes por analizar en mezclas asfálticas en Costa Rica son: agrietamiento por fatiga, el daño por humedad y la deformación permanente. El incremento en el tráfico vehicular, y del porcentaje de vehículos pesados y la magnitud de éstos, las crecientes temperaturas ambientales durante la época seca, así como la incertidumbre asociada a la proyección de estos, hacen que el ahuellamiento sea una de las fallas más frecuentes y severas que afectan los pavimentos, aunado a la falla prematura por la presencia de agua en la MAC. La práctica actual tiende a hacer del ahuellamiento probable uno de los indicadores a controlar durante el diseño del pavimento, buscando principalmente la preservación de la velocidad y seguridad, al evitar el fenómeno de hidropilano (Leiva, Pérez, Aguiar, & Loría, 2016). Las especificaciones técnicas del país indican ensayos de desempeño para la aceptación de mezcla asfáltica, entre ellos el pago en función de la calidad para el ensayo de laboratorio, de la deformación permanente, utilizando el equipo Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA Jr.). Sin embargo, existen varias metodologías para determinar la susceptibilidad a la deformación permanente de mezclas asfálticas, en el país se realizan con mayor

frecuencia mediante la prueba APA y por medio del ensayo utilizando la Rueda de Hamburgo, el primero posee especificaciones claras de cumplimiento dentro de la normativa nacional; el segundo, los laboratorios al no tener una especificación nacional explícita y acorde a los materiales, producción y proceso constructivo, utilizan lo indicado en la norma AASHTO T-324, como límite máximo para la deformación permanente 20 mm o más de 20000 ciclos de carga, lo que suceda primero (AASHTO, 2017). Las dos pruebas tienen diferencias, desde sus dispositivos de ensayo hasta el condicionamiento de los especímenes y aun así predicen la misma variable. La Rueda de Hamburgo, pronostica también la susceptibilidad al daño por humedad, donde una de las condiciones de la prueba es sumergir en agua el espécimen durante todo el ensayo. Desde este punto de vista, la Rueda de Hamburgo representa, al espécimen de ensayo, una condición más crítica, se esperaría entonces, que el valor de deformación indicado en las especificaciones técnicas sea mayor al del APA, sin embargo, las especificaciones nacionales no tienen un valor de aceptación para el método de ensayo utilizando la Rueda de Hamburgo y se conocen pocos documentos que indiquen un parámetro. Como ejemplo, se tiene un cartel de especificación donde se planteó una especificación para la Rueda de Hamburgo de menor o igual a 5,00 mm, y se desconoce el criterio con el que se tomó la decisión (Conavi, 2013)

El Laboratorio de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR) como parte de la fiscalización técnica que le compete a los proyectos de la red vial nacional, ha muestreado las mezclas asfálticas en las diferentes plantas productoras del país y realiza los ensayos de desempeño a las mezclas asfálticas (Unidad de Investigación LanammeUCR, 2011), realizando publicaciones técnicas de interés para la comunidad ingenieril.

Es necesario y perentorio que las instituciones públicas y privadas adquieran equipos de laboratorio que permitan mejorar la selección de los materiales y efectuar diseños de mezcla que aseguren un mejor comportamiento del pavimento ante las deformaciones permanentes y de esta manera se actualice la normatividad vigente en la que se incluyan nuevas especificaciones técnicas y nuevos ensayos de laboratorio que permitirán evaluar la utilización de mezclas asfálticas, esfuerzo de todos que requiere de investigación para la adecuación de normas y nuevos ensayos adecuados a la realidad de Costa Rica.

Se torna importante, investigar sobre el ensayo de Rueda de Hamburgo, que determinan al final de su procedimiento, utilizando aplicación de cargas cíclicas sobre el espécimen de mezcla asfáltica, ya sea que se diseñó bajo la metodología de diseño Marshall o SuperPave®, la deformación permanente y la susceptibilidad al daño por humedad (en el mismo ensayo) y comparar estos resultados de las mezclas asfálticas tomadas en diferentes plantas productoras con los núcleos extraídos en campo. Este ensayo de Rueda de Hamburgo ofrece a la Administración más opciones para evaluar los materiales de la mezcla asfáltica ya que se ensaya en condiciones sumergidas.

Para los 7781 km de red vial nacional (La Dirección de Planificación Sectorial, del Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 2013) es importante en la actualidad, contar con ensayos de desempeño que garanticen la calidad de la mezcla asfáltica producida en las distintas plantas para proyectos de conservación vial y licitaciones. Por lo tanto, debido a que el ensayo de deformación permanente se puede llevar a cabo con cualquiera de los dos métodos distintos (Rueda de Hamburgo y APA) y que uno reúne condiciones más críticas dentro de su metodología de ensayo (Rueda de Hamburgo), además que existen especificaciones técnicas generales del país para controlar la deformación permanente únicamente para el procedimiento con APA, es oportuno entonces investigar sobre estos posibles valores para las mezclas producidas en el país, en aras de plantear una especificación que sea utilizada en el criterio normativo de aceptación.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Analizar los resultados de mezclas asfálticas en las principales plantas del país, utilizando el ensayo Rueda de Hamburgo, para realizar una propuesta de especificación de la deformación permanente.

1.4.2. Objetivos específicos

- Contrastar el comportamiento de la deformación permanente utilizando los dos métodos de ensayo APA y Rueda de Hamburgo para una misma mezcla asfáltica.
- Comparar los resultados de la deformación permanente utilizando los especímenes moldeados y los núcleos extraídos en campo para los ensayos de Rueda de Hamburgo y APA.
- Proponer una especificación técnica de la deformación permanente para el ensayo de laboratorio Rueda de Hamburgo.

1.5. Alcance y limitaciones

1.5.1. Alcance

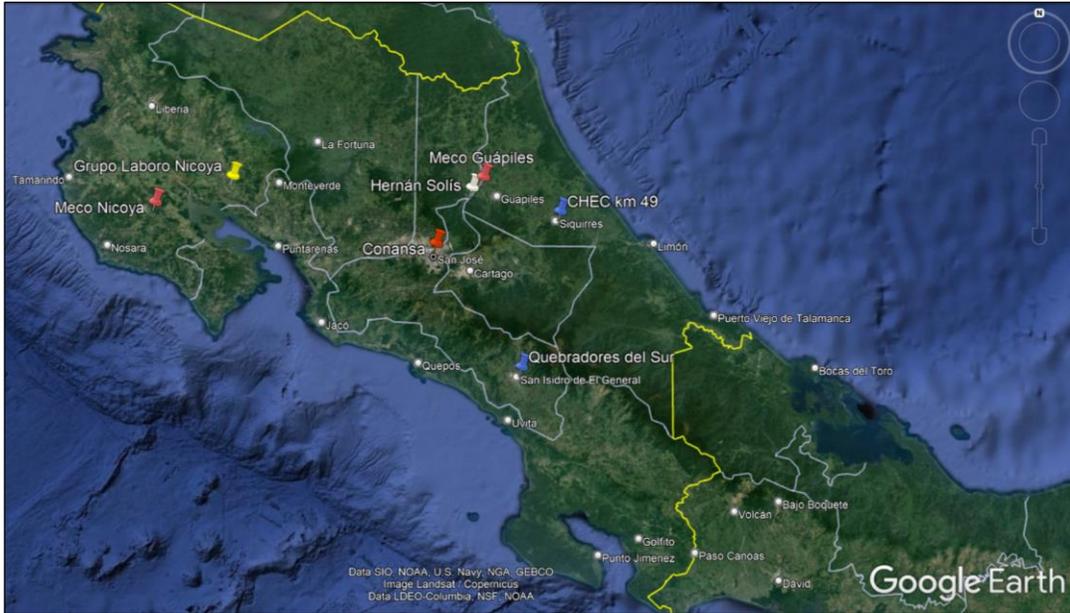
El presente estudio explora mezclas asfálticas de tamaño máximo nominal de 12,7 mm proveniente de 7 de las principales plantas productoras de Costa Rica, contrastando sus resultados de deformación permanente para los ensayos Rueda de Hamburgo y APA, analizando su comportamiento y contrastando los resultados de las pruebas (bajo los dos métodos de ensayo) realizadas con el equipo Analizador de Pavimentos Asfálticos APA Jr.

La actividad comprende el análisis de resultados de dos ensayos de desempeño de mezcla asfáltica APA y Rueda de Hamburgo de núcleos extraídos en campo para dos de las plantas productoras.

Las muestras de mezcla asfáltica utilizadas en la investigación provienen de las siguientes plantas productoras, que más adelante, estos proveedores se denominan de forma aleatoria como A, B, C, D, E, F y G para proteger el anonimato.

Cuadro 1. Fuente de las mezclas asfálticas utilizadas.

Planta Productora	Ubicación	Proyecto	Tipo de planta
Meco	Nicoya	Conservación Vial	Continua
Asfaltos Laboro	Limonal	Ruta 1	Continua
Meco	Guápiles	No informado	Continua
Conansa	Calle Blancos	Ruta 27	Bache
Hernán Solís	Guápiles	Circunvalación Norte	Bache
Chec km 49	Limón	Ruta 32	Bache
Quebradores del Sur	Pérez Zeledón	Municipal	Continua



*Figura 1. Ubicación Geográfica de los centros de producción de MAC utilizados.
Fuente: Google Earth, 2022.*

1.5.2.Limitaciones

Debido a que la materia prima para la investigación es la mezcla asfáltica producida por plantas de origen privado, la cual está condicionada a la demanda de los proyectos del momento para el sector vial del país, se realizó un tipo de muestreo por conveniencia; reduciendo la cantidad de muestra ideal prevista en un inicio para el desarrollo de la investigación, priorizando la mezcla asfáltica de proyectos de importancia nacional o con especificaciones cartelarias robustas, que garantizaran el producto usual utilizado en Costa Rica. Además, parte del desarrollo de la investigación coincidió con el periodo de suspensión de los principales contratos de Conservación Vial y proyectos de la Administración, bajo el contexto de las restricciones impuestas por el Ministerio de Salud a causa de la emergencia internacional del Covid-19, limitando el acceso a muestras representativas y generando incertidumbre sobre la afectación en los proyectos de graduación que involucraban pruebas de campo y laboratorio, provocando atrasos significativos y ajustes en el alcance. La investigación requiere de estudios descriptivos y comparaciones robustos ya que mide y evalúa diversos aspectos del ensayo de deformación permanente, así como para conocer el comportamiento y relación entre las variables, por lo tanto se requiere establecer tamaños de muestra representativos para tomar especímenes de mezcla asfáltica producida en las principales plantas productoras del país, que permitan relacionar y generalizar los resultados para proponer una especificación, así entonces se depende del acceso a estas plantas asfálticas de los Contratistas en el momento de producción, y para enriquecer la base de datos, se solicitó acceso a los resultados de los ensayos de

deformación permanente (APA y Rueda de Hamburgo) que posee el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica ejecutados a las muestras de mezcla asfáltica que recolecta en el país, solicitud que no fue posible obtener.

Estos ensayos requieren ejecutarse con equipos de última tecnología, técnicos especializados y alto costo que solo pocos laboratorios tienen en el país, por lo que un desperfecto mecánico o electrónico atrasaba el cronograma establecido para la investigación y debido a que los recursos son limitados, restringe la cantidad de pruebas por realizar.

La investigación, no contempla resultados obtenidos con otros equipos distintos al APA Jr. utilizado.

Durante el muestreo de mezclas asfálticas, no se tuvo el control del proceso productivo de la MAC, aspecto exclusivo del Contratista.

Para la extracción de núcleos en campo, se obtuvieron permisos para dos de las fuentes estudiadas, sin tener el control sobre personal, equipos de compactación y procesos de colocación de la carpeta asfáltica.

La muestra obedece a la demanda de proyectos actuales al momento de la investigación, diseños de MAC, tipo de plantas productoras disponibles en el sector, accesibilidad al muestreo y contexto de realidad nacional.

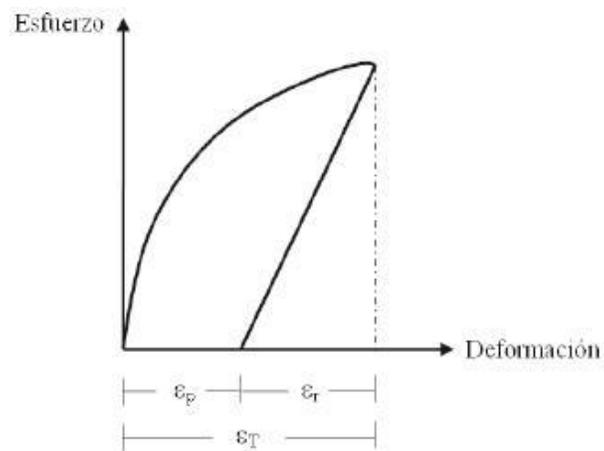
No se discretiza por el tipo de capas inferiores presentes en la estructura de pavimento, si es base granular o base estabilizada con cemento, por ejemplo, solo se ensaya la muestra de mezcla asfáltica sin sus condiciones frontera.

La investigación no discretiza el comportamiento reológico del ligante asfáltico por su grado de desempeño (PG por sus siglas en inglés) de las mezclas asfálticas utilizadas ni las condiciones de servicio como niveles de tránsito, velocidades de operación del tráfico y temperatura de los proyectos donde se colocó el material.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Generalidades sobre deformación permanente

Para una mezcla asfáltica en la ingeniería de pavimentos, se determinan tres tipos de ensayos de desempeño que son importantes de analizar: la fatiga, daño por humedad y la deformación permanente. Este último, en la estructura del pavimento, es generado por deformación plástica del concreto asfáltico o por deformación de capas inferiores y de la subrasante. En los métodos empíricos para predecir esta falla, se consideran factores tales como las propiedades de los materiales (ej. módulo resiliente), temperatura ambiental, presión de inflado de la llanta, duración de la carga, número de ciclos, y velocidad de recorrido (Huang, 2004). Cuando a un material se le inducen ciclos de carga y descarga, parte de la deformación total (ξ_t) que se genera es recuperada y se le conoce como la deformación resiliente (ξ_r). Aquella deformación que no se recupera se acumula con cada repetición del ciclo y se le denomina deformación permanente (ξ_p) (Huamán Guerrero & Chang Albitres, 2011). La siguiente figura esquematiza lo anterior



*Figura 2. Curva típica esfuerzo – deformación en un ciclo de carga y descarga.
Fuente: Rondón & Reyes, 2009*

En un pavimento, estas deformaciones generan hundimientos o desplazamientos que, en exceso, pueden generar fallas funcionales y/o estructurales (Rondón & Reyes, 2009). A esto, se agrega que el ahuellamiento es una falla funcional asociada a las repeticiones de cargas. Es causado por deformaciones permanentes en cualquiera de las capas del pavimento, o en la subrasante, producidas principalmente por consolidación o desplazamiento lateral de los materiales debido al tráfico (Leiva, Pérez, Aguiar, & Loría, 2016), además un ahuellamiento severo puede resultar en hidropilano, y potencialmente la falla estructural en el pavimento (Huang, 2004) ya que estos surcos también retienen agua.

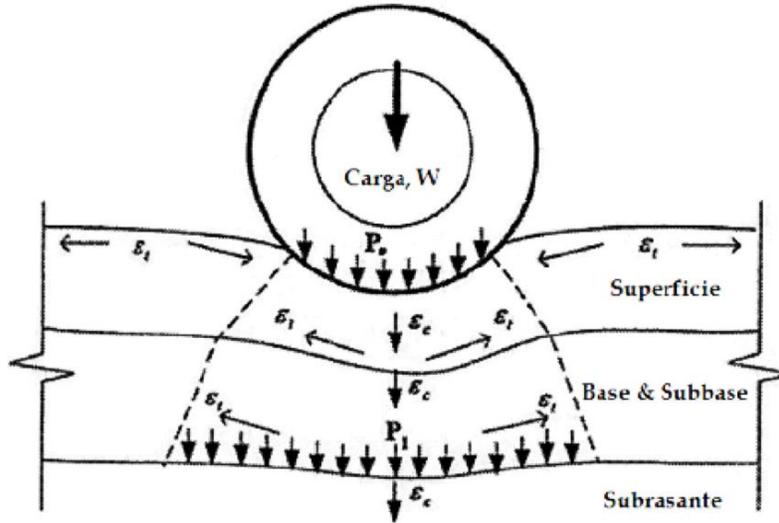


Figura 3. Deformaciones en pavimentos flexibles y distribución de cargas.
Fuente: Du, Shen, & Cross, 2008

A lo largo de los años, diversas instituciones han investigado para correlacionar la deformación vertical a compresión, calculada por la teoría de multicapas elásticas, mediante comportamientos mecanístico-empíricos en cada capa del pavimento y predecir el número de repeticiones de carga (N_d), los modelos presentados se basan en la deformación unitaria a compresión en la superficie de la subrasante (ϵ_c), ignorando el efecto de la deformación permanente en las capas superiores (Leiva, Pérez, Aguiar, & Loría, 2016)

Organización	Modelo
Instituto del asfalto	$N_d = 1.365 \times 10^{-9} (\epsilon_c)^{-4.477}$
Shell Petroleum	$N_d = 6.15 \times 10^{-7} (\epsilon_c)^{-4}$
Universidad de Nottingham	$N_d = 1.13 \times 10^{-6} (\epsilon_c)^{-3.571}$
Mn/ROAD	$N_d = 7.0 \times 10^{15} (\epsilon_c)^{-3.909}$

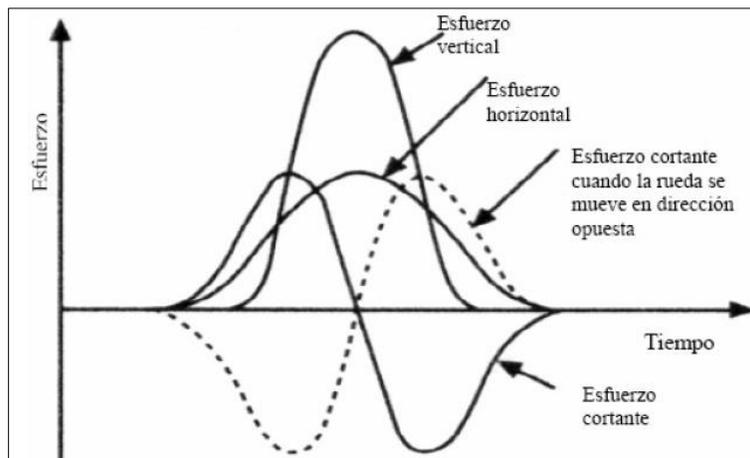
Figura 4. Modelos desarrollados por distintas organizaciones para deformaciones plásticas.
Fuente: tomado de Leiva, Pérez, Aguiar, & Loría, 2016

Debido al comportamiento viscoelástico del asfalto, las cargas repetidas del tránsito generan deformación permanente en la capa asfáltica, especialmente en altas temperaturas y en carpetas asfálticas. La capacidad de una mezcla de resistir este tipo de deformación depende de diversos factores, entre los cuales se puede considerar la consistencia del ligante asfáltico y la volumetría de la mezcla (agregados y ligantes), además características como ligante utilizado, la composición de la mezcla, la forma y tamaño de las partículas, la calidad de los agregados, y los aditivos, si son empleados. (Huamán Guerrero & Chang Albitres, 2011),

influyen en los resultados de este ensayo. Es conveniente entonces, buscar que la mezcla asfáltica se comporte como un sólido elástico cuando reciba carga en altas temperaturas y de esta manera el material recupere su forma original al retirarse la carga.

Esta falla funcional, es asociada a las repeticiones de cargas (Leiva, Pérez, Aguiar, & Loría, 2016). El comportamiento de esta variable con el número de ciclos de carga tiende a un valor asintótico máximo, sin descartar que puede existir un ciclo en el cual la tasa de deformación incrementa hasta llevar al colapso el material.

A lo largo de la investigación de pavimentos, en cuanto a los ensayos más apropiados para estudiar el comportamiento elastoplástico que experimentan materiales, son aquellos en los cuales se pueden inducir cargas cíclicas simulando mejor el comportamiento cíclico de las cargas rodantes y que permite describir los esfuerzos verticales cíclicos, los horizontales y verticales como se muestra en la siguiente figura:



*Figura 5. Variación de esfuerzos con respecto al tiempo cuando se aplica una carga vehicular.
Fuente: Brown, 1996 (extraída de Garnica & Gomes, 2001)*

La mezcla asfáltica en caliente tiene partículas de materiales granulares de cada fracción que la compone. Es por esta razón que es relevante también, resumir la influencia que tienen la granulometría, cantidad de finos, forma de la partícula, entre otras variables, ante la deformación permanente. En el siguiente cuadro, se resumen la tendencia de estas características físico-mecánicas de un material granular para la variable de estudio compilado de Rondón & Reyes, 2009:

Cuadro 2. Características de los materiales granulares y su influencia ante la deformación permanente.

Variable	Comportamiento ante la deformación permanente	Autor
Incremento en el esfuerzo desviador	Aumenta	Gandara y Nazarian (2006)
Alto drenaje de la capa	Disminuye	Freeme y Servas (1985)
Aumento en el contenido de agua	Aumenta ¹	Thom y Brown (1987) Theyse (2002) Gandara y Nazarian, 2006
Incremento en la densidad del material	Disminuye ²	Gidel et al., (2002)
Mayor número de ciclos de carga	Aumenta	Barksdale y Hicks (1973), Brown y Selig (1991)
Aumento en la frecuencia de carga	No afecta significativamente	Wichtmann (2005)
Granulometría	No influye significativamente ³	Werkmeister (2003) Thom y Brown (1987, 1988)
Mayor tamaño máximo de la partícula	Disminuye	Barksdale (1984) ⁴
Incremento en la cantidad de finos plásticos	Aumenta	Barksdale (1984) Thom y Brown (1988) Kolisoja, et al. (2002)
Mayor presencia de partículas fracturadas	Disminuye	Barksdale e Itani (1989)
Mayor resistencia al desgaste (abrasión)	No existe relación	Núñez et al., (2004) Balay et al., (1997)
CBR Alto	Aumenta ⁵	Wolff y Visser (1994)). Kumar et al., (2006)
Incremento del ángulo de fricción	Disminuye	Cheung y Dawson (2002)

¹ Además, el módulo resiliente disminuye cuando se aumenta la cantidad de agua en el material granular (Rada & Witczak, 1981).

² No es tan significativo en estructuras de pavimento con densidades de 95 % a 100 % de la densidad máxima seca del Próctor modificado.

³ El efecto de la granulometría y contenido de finos no es claro y en muchos casos se presentan resultados contradictorios al reportar su influencia (Rondón y Reyes, 2007). Sin embargo, graduaciones continuas incrementan la resistencia a la deformación permanente.

⁴ Principalmente por un aumento en el módulo resiliente del material granular.

⁵ La reducción de la escala de granulometría para realizar el ensayo de CBR sesga los resultados obtenidos sobre el comportamiento ante la deformación permanente, es por esta razón que se prefieren ensayos a escala real y sometidos a cargas cíclicas.

En cuanto a los aspectos propiamente de la mezcla asfáltica y su comportamiento ante la formación de roderas en la carpeta asfáltica, (Garnica Anguas, Delgado Alamilla, & Sandoval Sandoval, 2005) compilan de muy buena manera en su estudio, la tendencia de estos factores, como se detalla en la siguiente figura:

Factores			Resistencia a la deformación permanente
Agregado pétreo	Textura superficial	De liso a rugoso	Incrementa
	Graduación	Abierta a continua	Incrementa
	Angularidad	Redondeada a angular	Incrementa
	Tamaño máximo	Incremento en el tamaño	Incrementa
Ligante asfáltico	Rigidez (a)	Incremento	Incrementa
Mezcla	Contenido de asfalto	Incremento	Reduce
	Contenido de vacíos de aire (b)	incremento	Reduce
	VMA (c)	Incremento	Reduce
	Método de compactación	(d)	(d)
Condiciones en el lugar	Temperatura	Incremento	Reduce
	Estado de esfuerzos/deformaciones	Incremento en la presión de inflado de los neumáticos	Reduce
	Repeticiones de carga	Incremento	Reduce
	Agua	De seco a mojado	Reduce si la mezcla es sensible al agua

(a) Se refiere a la rigidez del ligante a la temperatura en donde la mezcla asfáltica es propensa de presentar roderas. Modificadores al ligante asfáltico pueden ser utilizados para incrementar su rigidez a temperaturas críticas.
(b) Cuando el contenido de vacíos de aire (Va) es menor a un 3%, la propensión de la mezcla asfáltica de presentar roderas, se incrementa.
(c) Se argumenta que muy bajos porcentajes de VAM en la mezcla (menos del 10%) deben evitarse.
(d) El método de compactación, ya sea en campo o en el laboratorio puede influir en gran medida al ahuellamiento de la mezcla asfáltica.

Figura 6. Factores que influyen en la deformación permanente
Fuente: (Garnica Anguas, Delgado Alamilla, & Sandoval Sandoval, 2005)

Donde:

VMA: Vacíos en el agregado mineral.

2.1.1. Ensayos más comunes para determinar la deformación permanente a nivel nacional

Existen muchos equipos de laboratorio y procedimientos de análisis que pueden emplearse durante la etapa de diseño para evaluar si un pavimento es susceptible a la deformación permanente. Entre ellos, los que utilizan ruedas cargadas (*Wheel Tracking*) como lo son el método estándar de ensayo de Rueda de Hamburgo de mezclas de asfalto desarrollado por Helmit-Wind en Alemania y el método de ensayo para la determinación de la susceptibilidad a la deformación permanente de mezclas asfálticas para pavimento utilizando el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA), ambos están normados por AASHTO bajo las designaciones T 324-17 y T 340-10 (2015) respectivamente. En estas pruebas, se somete la mezcla asfáltica en caliente a ensayos cíclicos de carga y debido a que son de naturaleza empírica, permiten evaluar la influencia de varios parámetros, aspecto que es muy distinto de un ensayo.

2.1.1.1. Método estándar de ensayo de Rueda de Hamburgo de mezclas de asfálticas compactadas AASHTO T 324-17

El alcance del método describe un procedimiento para probar la deformación permanente y la susceptibilidad a la humedad de una muestra de pavimento de mezcla asfáltica con el dispositivo de ruedas de Hamburgo según se señala en la norma AASHTO T 324. También describe las pruebas de mezcla asfáltica sumergida y compactada. Esta prueba proporciona información sobre la tasa de deformación permanente de una carga en movimiento y concentrada (AASHTO, 2017). Puede utilizarse con muestras compactadas en laboratorio o alternativamente, con los núcleos extraídos en campo. El método de prueba se utiliza para determinar la susceptibilidad prematura a la falla de la mezcla de asfalto debido a la debilidad en la estructura del agregado, rigidez inadecuada del aglutinante o daño por humedad. Este método de prueba mide la profundidad de la deformación y el número de pasadas para la falla. También mide el potencial efecto de daños por humedad porque las muestras están sumergidas en agua con temperatura controlada durante la aplicación de la carga. Para llevar a cabo este ensayo, se deben también tomar en cuenta otros métodos descritos en AASHTO R 30, *Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt (HMA)*; AASHTOT 166, *Bulk Specific Gravity (Gmb) of Compacted Asphalt Mixtures Using Saturated Surface-Dry Specimens*; T 168, *Sampling Bituminous Paving Mixtures*; AASHTO T 209, *Theoretical Maximum Specific Gravity (Gmm) and Density of Hot Mix Asphalt (HMA)*; AASHTO T 269, *Percent Air Voids in Compacted Dense and Open Asphalt Mixtures*; AASHTO T 312, *Preparing and Determining the Density of Asphalt Mixture Specimens by Means of the SuperPave® Gyrotory Compactor* y del estándar ASTM D6027, *Standard Test Method for Calibrating Linear Displacement Transducers for Geotechnical Purposes (withdrawn 2013)* como pasos previos o intermedios del ensayo en estudio.

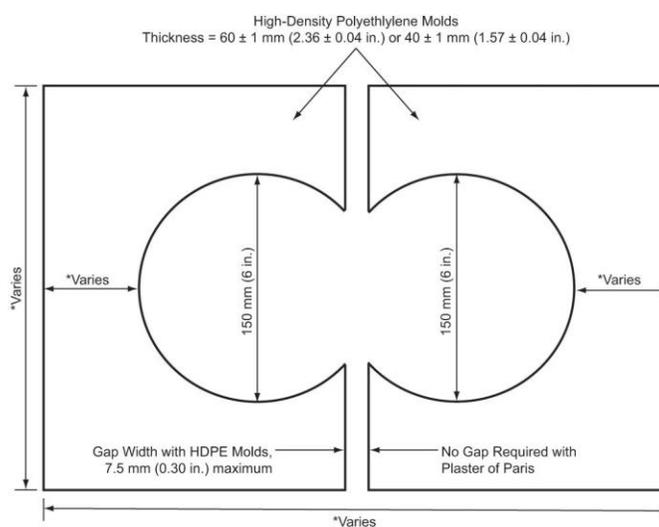
En resumen, la prueba de laboratorio toma dos especímenes de muestra compactada en laboratorio, de mezcla de asfáltica o una muestra de un núcleo aserrado o un núcleo tomado de un pavimento compactado

de acuerdo con la fórmula de trabajo descrita en el diseño de la mezcla asfáltica, que se carga repetitivamente utilizando una rueda de acero recíproca. El espécimen se sumerge en un baño de agua a una temperatura controlada y especificada por las autoridades e ingenierías de proyecto. Se mide la deformación de la muestra, causada por la carga de la rueda. La impresión se traza en función del número de pasadas de rueda. Un aumento abrupto en la tasa de la deformación puede coincidir con la extracción del aglutinante asfáltico del agregado en la muestra de mezcla de asfalto. (AASHTO, 2017)

En cuanto a los equipos que se requieren para los ensayos son: una máquina eléctrica capaz de mover una rueda de acero de 203,2 x 2,0mm ($8 \pm 0,08$ pulgadas), 2 ruedas de acero de 7 mm (1,85 pulgadas) de ancho sobre el centro (ejes X y Y) de la muestra de prueba. La carga en la rueda es de $705 \pm 4,5$ N ($158 \pm 1,0$ lb). La rueda se posiciona sobre la muestra, con la posición variando sinusoidalmente con el tiempo. La rueda hace 52 ± 2 pasadas a través de la muestra por minuto. La velocidad máxima de la rueda, alcanzada en el punto medio de la muestra, es de aproximadamente 0.305 m/s (1 ft/s). También el sistema de control de temperatura es un baño de agua capaz de controlar la temperatura dentro de $1,0 \pm ^\circ\text{C}$ ($1,8 ^\circ\text{F}$) en un rango de 25 a 70 $^\circ\text{C}$ (77 a 158 $^\circ\text{F}$), por lo general entre 40 $^\circ\text{C}$ y 50 $^\circ\text{C}$, con un sistema de circulación mecánico que estabiliza la temperatura dentro del tanque de muestras. El Sistema de medición de datos es el dispositivo LVDT (por sus siglas en inglés: *Linear Variable Diferencial Transducer*) capaz de medir la profundidad de la deformación de la rueda en el centro de $\pm 1/2$ pulgadas. a lo largo de la longitud de la trayectoria de la rueda, dentro de 0,15 mm (0,06 in.), en un rango mínimo de 0 a 20 mm (0 a 0,8 in.). (AASHTO, 2017) El sistema mide la profundidad de la deformación, sin detener la rueda, al menos cada 400 pasadas. La profundidad de la deformación se expresa en función de las pasadas de la rueda. El Contador de paso de rueda es un solenoide, sin contacto que cuenta cada paso de rueda sobre la muestra. La señal de este contador se acopla a la medición de impresión de la rueda, lo que permite que la profundidad de la deformación se exprese en función de las pasadas de la rueda. El Sistema de montaje de muestras es una bandeja de acero inoxidable que se monta rígidamente en la máquina. El sistema de montaje debe restringir el desplazamiento de la muestra dentro de 0,5 mm (0,02 pulgadas) durante el ensayo y debe suspender la muestra para proporcionar un mínimo de 20 mm (0,8 pulgadas) de agua circulante libre en todos los lados. El Sistema de montaje de muestras cilíndricas es un conjunto compuesto por dos moldes de polietileno de alta densidad (HDPE), colocado en una bandeja de acero inoxidable montada rígidamente en la máquina.



*Figura 7. Sistema de montaje de los especímenes.
Fuente: AASHTO T-324, 2017*



* Dimension may vary depending on manufacturer.

*Figura 8. Esquema de los moldes para los especímenes.
Fuente: AASHTO T-324, 2017*

Entre otros equipos de laboratorio que se requieren para la ejecución del ensayo están: Compactador de amasado lineal que es una unidad hidráulica que utiliza una serie de placas de acero alineadas verticalmente para compactar mezclas de asfalto moldeado en losas planas y rectangulares de espesor predeterminado de densidad, una balanza de 12 000-g de capacidad, precisión al 0,1 g; hornos para calentar agregados y aglutinantes de asfalto y compactador giratorio SuperPave® (SGC), moldes conformes a AASHTO T 312 y tazones, cucharas, espátula, etc.

Es importante que las muestras de mezcla asfáltica deben acondicionarse previo al ensayo.

Cuadro 3. Resumen de condiciones para el ensayo de Rueda de Hamburgo

Ensayo de Rueda de Hamburgo	Cantidad de material aproximado por pastilla	2 400-2 650 g
	Altura de los especímenes	62 ± 2 mm
	Vacíos (especímenes moldeados)	7,0 ± 0,5 %
	Acondicionamiento	Agua a 50 °C
	Acondicionamiento de especímenes dentro del equipo	45 minutos
	Presión	130 psi
	Carga en ejes	158 lb
	Cantidad de ciclos	20 000

Fuente: LGC, 2019



Figura 9. Ensayo de Rueda de Hamburgo en ejecución.

Fuente: Barrantes, 2019

El dispositivo de seguimiento de ruedas se detendrá cuando se hayan producido 20.000 pasadas, cuando se haya producido algún otro número predeterminado de pasadas o cuando la prueba haya alcanzado la profundidad máxima de impresión establecida. El software del dispositivo de ensayo guarda automáticamente el archivo de datos de prueba. Los resultados de la prueba se notificarán como el valor medio de ambos especímenes.

Finalmente, el software ofrece la curva de Hamburgo, donde se gráfica el número de ciclos en el eje X y la deformación (mm) en el eje Y. Con estos datos es posible determinar la pendiente e interceptación de la

primera porción de estado estacionario de la curva que indica la consolidación luego de compactada inicialmente la MAC donde la rueda densifica el espécimen, y la pendiente y la interceptación de la segunda porción de estado estacionario de la curva, luego de la post compactación de la muestra y antes del inicio del desgranamiento (si es que sucede), evaluando así la deformación permanente debido al flujo plástico. El punto de inflexión (por sus siglas en inglés SIP) indica el número de pasadas que una soporta (a una temperatura determinada) antes de que las partículas tiendan a separarse, lo anterior, está relacionado con el daño por humedad de la MAC, como se muestra a continuación:

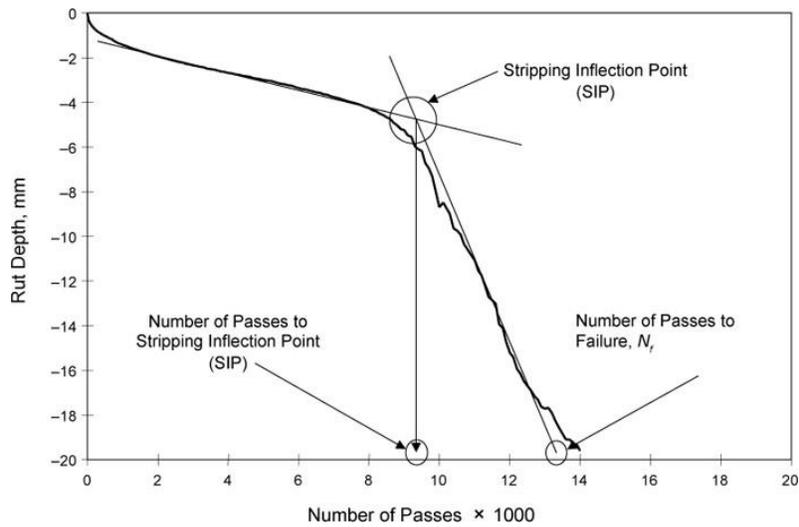


Figura 10. Curva de Rueda de Hamburgo.
Fuente: AASHTO T-324, 2017

El punto SIP está asociado a la susceptibilidad al daño por humedad y es calculado como:

$$\text{Stripping inflection point (SIP)} = \frac{\text{intercepto pasadas (segundo trazo)} - \text{intercepto pasadas (primer trazo)}}{\text{Pendiente (primera curva)} - \text{Pendiente (segunda curva)}} \quad \text{Ecuación 1}$$

La profundidad de la deformación de falla es la profundidad de deformación máxima permitida especificada para la prueba.

2.1.1.2. Método de ensayo para la determinación de la susceptibilidad a la deformación permanente de mezclas asfálticas para pavimento utilizando el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA) AASHTO T 340-10 (2015)

Este método describe el procedimiento para evaluar la susceptibilidad a la deformación permanente de mezclas asfálticas usando aplicaciones de carga cíclica en el Analizador Automático de Pavimentos Asfálticos (APA) según se indica en la norma AASHTO T 340. La importancia de este método de ensayo es que permite distinguir cuáles mezclas asfálticas son más deformables que otras y aplica para especímenes cilíndricos (AASHTO, 2015). La muestra consiste en mezcla asfáltica que puede ser reproducida en laboratorio, tomada en la planta de producción o en la obra antes de la compactación, o tomada en una capa de mezcla asfáltica compactada en el pavimento (extracción de núcleos) o muestras aportadas. Es necesario también tener conocimiento de los siguientes métodos de ensayo para la ejecución de esta prueba: AASHTO T 166, *Bulk Specific Gravity (Gmb) of Compacted Asphalt Mixtures Using Saturated Surface-Dry Specimens*; AASHTO T 168, *Sampling Bituminous Paving Mixtures*; AASHTO T 209, *Theoretical Maximum Specific Gravity (Gmm) and Density of Hot Mix Asphalt (HMA)*; AASHTO T 269, *Percent Air Voids in Compacted Dense and Open Asphalt Mixtures*; AASHTO T 312, *Preparing and Determining the Density of Asphalt Mixture Specimens by Means of the SuperPave® Gyrotory Compactor* y ASTM E1, *Standard Specification for ASTM Liquid-in-Glass Thermometers*.

El equipo involucrado para realizar la prueba, debe ser el equipo APA que es un dispositivo termostático diseñado para probar la susceptibilidad de deformación de MAC mediante la aplicación de cargas lineales repetitivas a muestras de prueba compactadas con mangueras presurizadas a través de ruedas. El APA se controlará termostáticamente para mantener la temperatura de ensayo y la cámara de acondicionamiento en cualquier punto de ajuste entre 4 y 72 °C (40 y 160 °F) dentro de 1 °C (2 °F) y es capaz de aplicar de forma independiente cargas de hasta 578 N (130 lbf) a las ruedas. Las cargas se calibrarán según la carga de ensayo especificada mediante un transductor de fuerza externa. La presión en las mangueras de ensayo se ajusta y mantiene hasta 862 kPa (125 psi) en las mangueras de ensayo. Los moldes de ensayo deberán tener forma rectangular, estar compuestos de polietileno de peso molecular ultra alto (UHMW), ajustarse perfectamente a la posición de ensayo en la cámara de ensayo APA y contener dos orificios en los que insertar las muestras. Las dimensiones de cada orificio serán de $150 \pm 2,0$ mm ($5,91 \pm 0,08$ pulgadas) de diámetro en $75,0 \pm 2,0$ mm ($2,95 \pm 0,08$ pulgadas) de alto. El APA tendrá un contador de ciclo maestro programable que se puede preestablecer en el número deseado de ciclos para una prueba. Y podrá detener automáticamente el ensayo al finalizar el número programado de ciclos. Las mangueras de ensayo estarán compuestas por un tubo de nylon con refuerzo de cordón textil de alta resistencia y una cubierta sintética de hule. El diámetro interior nominal de las mangueras será de 19,0 mm (0,75 in.); el diámetro exterior nominal de las mangueras será

de 29,5 mm (1,16 in.). La presión máxima de trabajo (WP) de las mangueras será de 5,17 MPa (750 psi). Las mangueras deben sustituirse cuando cualquiera de la carcasa exterior de goma presente un desgaste significativo. (AASHTO, 2015)



*Figura 11. Configuración del equipo para el ensayo APA
Fuente: LGC Ingeniería de Pavimentos, 2019*

El número de especímenes para la prueba es de seis especímenes cilíndricos, de 150 mm (5,91 pulgadas) de diámetro por 75 ± 2 mm ($3,0 \pm 0,1$ pulgadas) de alto. En el caso de especímenes de núcleos obtenidos en campo, las muestras de núcleo de carretera deberán tener un diámetro de 140 a 152 mm (5,5 a 6,0 pulgadas) y un mínimo de 50 mm (2 pulgadas) con todas las superficies del perímetro perpendiculares a la superficie del núcleo en un radio de 5 mm (0,2 pulgadas). Los núcleos más altos que la altura deseada se recortarán con una sierra de 75 ± 2 mm ($3,0 \pm 0,1$ in.). Para núcleos con diámetros entre 140 y 152 mm (5,5 y 6,0 pulgadas) o alturas entre 50 y 73 mm (2,0 y 2,9 pulgadas), se puede utilizar yeso de París o material comparable para alcanzar la altura de ensayo adecuada de 75 ± 2 mm ($3,0 \pm 0,1$ pulgadas) y para asegurar que las muestras con diámetros pequeños se ajusten perfectamente dentro del molde de prueba. Las pruebas se llevarán a cabo en la cara sin cortar del núcleo. Las muestras de MAC producidas en plantas se obtendrán de conformidad con la T 168. Las muestras de MAC se reducirán al tamaño de ensayo adecuado y se compactarán mientras el MAC esté dentro del rango de temperatura de compactación determinado por las especificaciones técnicas. Debe evitarse el recalentamiento de la MAC de la planta suelta. (AASHTO, 2015). La temperatura de ensayo se ajustará a la alta temperatura del aglutinante estándar con grado de desempeño (PG). El acondicionamiento de los especímenes de ensayo antes de la prueba se precalentará a la temperatura de ensayo en la cámara de ensayo APA calibrada por temperatura o en un horno calibrado

separado durante un mínimo de 6 h. Los especímenes no deben mantenerse a la temperatura de ensayo durante más de 24 horas antes del ensayo.

Una vez ejecutado el acondicionamiento, se procede a ajustar lectura de presión de la manguera a 690 ± 35 kPa (100 ± 5 psi) y se ajusta también la lectura de la presión del cilindro de carga para cada rueda para lograr una carga de 445 ± 22 N (100 ± 5 lbf) según lo indica la Norma. Seguidamente se aseguran los especímenes precalentados y moldeados en el APA. La cámara APA precalentada no debe estar abierta durante más de 6 minutos al asegurar las muestras de ensayo en la máquina. Se cierran las puertas de la cámara y se dejan un mínimo de 10 minutos para que la temperatura se establezca antes de iniciar la prueba. Se inicia la prueba utilizando el software de computadora APA y cuando la prueba alcance los 8000 ciclos, el APA se detendrá y las ruedas de carga se retirarán automáticamente (AASHTO, 2015).

Por último, se obtienen las profundidades de la deformación de las tres posiciones de prueba que se muestran en el software informático APA. Para la evaluación de valores atípicos se hace calculando la desviación estándar de la muestra para las tres posiciones de prueba. Si la desviación estándar de la muestra de las tres posiciones de prueba es mayor o igual que 2,0 mm (0,08 in.), entonces la posición con la profundidad de la rutina más alejada de la media puede descartarse (AASHTO, 2015). La profundidad de la rutina APA para el MAC es la profundidad media general de la rutina para las tres posiciones de prueba, menos los valores atípicos, de las seis muestras cilíndricas.

Cuadro 4. Resumen de condiciones para el ensayo de APA

Ensayo de APA	Cantidad de material aproximado por pastilla	2 700-2 950 g	
	Altura de los especímenes	75 ± 2 mm	
	Vacíos (especímenes moldeados)	$7,0 \pm 0,5$ %	
	Acondicionamiento	Aire a 60 °C	
	Acondicionamiento de especímenes en el horno	3-4 horas	Total 6 horas mín.
	Acondicionamiento de especímenes en el equipo	2 horas	
	Presión equipo	130 psi	
	Presión de las mangueras	100 psi	
	Carga en ejes	100 lb	
	Cantidad de ciclos	8 000	

Fuente: LGC, 2019

2.1.1.3. Principales diferencias entre los métodos de ensayo APA y Rueda de Hamburgo

De acuerdo con la información anterior, de los dos ensayos de interés para determinar la deformación permanente en esta investigación, se denotan principalmente, diferencias importantes en:

- La geometría de los moldes de los especímenes, estos permiten por ejemplo que en el ensayo de Rueda de Hamburgo se tomen lecturas de deformación en 5 puntos de la muestra, mientras que en APA solo 4. También su altura es más pequeña en Rueda de Hamburgo, lo que provoca que se acomoden con mayor dificultad las partículas de mezcla asfáltica en el espesor disponible, acción que adquiere importancia con mezclas asfálticas de tamaños máximos superiores.
- La carga en ejes es mayor en la Rueda de Hamburgo y llama la atención que además la altura del espécimen es menor como se indicó anteriormente, lo que provocaría concentraciones de esfuerzos mayores en el espécimen de ensayo.
- Acondicionamiento, se tienen más horas de acondicionamiento en el ensayo de APA, esto ocasiona que la mezcla se envejezca un poco más, oxidando el asfalto y permitiendo que los poros permeables del agregado se llenen más con asfalto.
- Cantidad de ciclos, esta diferencia es más notoria ya que en el método de ensayo de Rueda de Hamburgo, son más del doble en número de ciclos que en APA.
- Interfase de contacto espécimen-rueda de carga, en el ensayo de APA, la rueda cargada transfiere su carga a una manguera de caucho con presión en su interior y esta a su vez entra en contacto con la superficie, simulando mejor lo que sucede realmente en la carretera al transitar el vehículo por la vía y cargar el pavimento, mientras que en el ensayo de Hamburgo la rueda metálica entra en contacto directo con el espécimen.
- Por último, la más notoria diferencia entre los dos métodos: la presencia del agua a temperatura de 50 °C solo en el ensayo de Rueda de Hamburgo, dentro de la cual se sumerge el espécimen.

Lo anterior, denota que el ensayo de Rueda de Hamburgo, ofrece más información y se realiza en condiciones más críticas para la mezcla asfáltica, por lo que se considera que sus resultados de deformación permanente son más conservadores en contraste a lo reportado con ensayos de APA, puesto que lo peor que le puede suceder a la carpeta asfáltica (en latitudes como las de Costa Rica) es estar cargada, durante muchos ciclos, sumergida en agua y a temperatura alta.

2.2. Equipos utilizados para la ejecución de los ensayos

2.2.1. APA Jr.

Es un ensayador de rueda de cargada multifuncional que se utiliza para evaluar mezcla fría, mezcla en caliente y lechadas asfálticas, ya sea al aire o sumergido en agua. El APA Jr. muestra automáticamente, en un formato numérico y gráfico, el desarrollo en tiempo real de la deformación plástica acumulada. El equipo puede realizar el Método AASHTO T 324-14 (Rueda de Hamburgo), y la AASHTO T 340-10 (Ahuellamiento con ruedas cóncavas sobre manguera de caucho a presión, APA). El APA Jr. también permite probar mezclas a múltiples velocidades y a múltiples tipos de carga e incorpora reguladores electrónicos digitales que permiten al usuario establecer y mantener la carga durante la prueba. Estos reguladores, combinados con el sistema de control PLC, permiten cambiar la carga durante una prueba, si se desea.



*Figura 12. Equipo APA Jr.
Fuente: Gilson, 2019*

El equipo puede ensayar varios tipos de muestras cilíndricas del compactador giratorio: especímenes Marshall (4 "y 6" de diámetro) o Hveem y núcleos de campo y, además, otros tipos de muestras como viguetas y losas. El APA Jr. tiene dos conjuntos de ruedas de carga: para Hamburgo, Ruedas sólidas de acero inoxidable y APA, de acero inoxidable, cóncavas, sobre mangueras para las pruebas de ahuellamiento. También pueden adaptársele ruedas opcionales de goma para lechadas asfálticas y/o micro aglomerados, ruedas de acero inoxidable sólido, para los ensayos de fatiga y ruedas de caucho con tacos de metal.

El equipo se opera utilizando un sistema de control PLC. El sistema operativo permite al usuario realizar todas las calibraciones y funciones directamente con un ordenador portátil. El APA Jr. tiene "Interruptores laminares", que permiten al usuario obtener hasta 5 mediciones durante una sola pasada a través de una muestra de viga y hasta 3 mediciones durante una sola pasada una muestra cilíndrica. El sistema es extremadamente preciso y puede calcular los datos con precisión de hasta 0,00001 de milímetro. (Pavement Technology, Inc, 2015)

Componentes básicos del APA Jr.:

- Rueda / sistema de carga.
- Sistema de inmersión de agua para la muestra.
- Sistema vertical de medición.
- Dispositivo de medición de la profundidad de roderas.
- Elementos de mando de montaje.
- Sistema de control de temperatura.
- Control de velocidad.
- Control de operaciones.

El equipo tiene un sistema de calentamiento y enfriamiento de la cámara principal que se lleva a cabo por una serie de elementos de calefacción y un ventilador. Existe una unidad de refrigeración opcional, regulada por un controlador de temperatura con microprocesador. La temperatura se puede controlar desde - 9°C a 80°C \pm 1.5°C, utiliza un variador de frecuencia que permite que la velocidad varíe de 0 a 120 revoluciones por minuto.

También, incluye cuatro moldes de muestra, de ultra alto peso molecular (UHMW), dos moldes, para la prueba de la Rueda de Hamburgo, de 150 mm +/- 0,5 mm de diámetro y 62 mm +/- 0,5 mm de altura. Y dos moldes, cilíndricos para la prueba de ahuellamiento en APA, de 150 mm +/- 0,5 mm de diámetro y de 75 mm +/- 0,5 mm de altura. Este equipo cuenta con otros moldes adicionales para investigación para la prueba

de la Rueda de Hamburgo, de 101.6 mm +/- 0,5 mm de diámetro y 62 mm +/- 0,5 mm de altura y dos moldes, cilíndricos para la prueba de ahuellamiento en APA, de 101.6 mm +/- 0,5 mm de diámetro y de 75 mm +/- 0,5 mm de altura.

2.2.2. Compactador Giratorio SuperPave®

Compactador giratorio SuperPave® es un compactador electrohidráulico o electromecánico con un pistón y cabezas de pistón, capaz de aplicar y mantener una presión de (600 ± 18) kPa perpendicular al eje cilíndrico de la muestra durante la compactación (esto para muestras de 150 mm). El compactador debe inclinar los moldes de muestras en un ángulo interno promedio de $(1,16 \pm 0,02)$ grados. También, se debe girar los moldes de muestras a una velocidad de $(30,0 \pm 0,5)$ giros por minuto durante la compactación.

Cuenta, además, con la posibilidad de registrar información de recuento de giros, alturas y cualquier otra que sea necesaria para cálculos posteriores.



Figura 13. Compactador Giratorio SuperPave® (SGC).

Fuente: LGC, 2020.

2.2.3. Moldes y placas para la elaboración de muestras

Los moldes para muestras deben tener paredes de acero de al menos 7,5 mm de espesor, el diámetro interno de los moldes nuevos debe estar entre 149,90 mm y 150,00 mm y deben tener una altura (longitud) mínima de 250 mm.

Las placas serán de acero y deben tener un diámetro entre 149,50 mm y 149,75 mm.

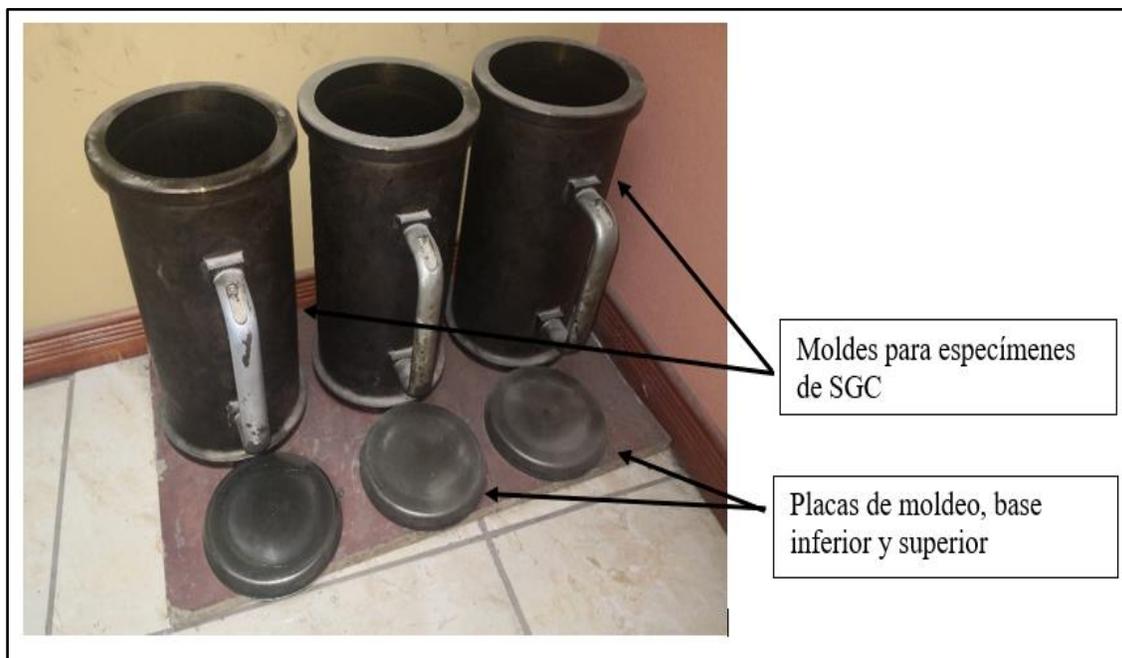


Figura 14. Moldes para la elaboración de especímenes.

Fuente: LGC, 2020.

2.2.4. Moldes para ensayo de APA y Hamburgo

Los moldes para la ejecución de las pruebas de APA y Rueda de Hamburgo se muestran en la siguiente figura:



Figura 15. Moldes para Rueda de Hamburgo (izquierda) y APA (Derecha).

Fuente: LGC, 2020.

2.3. Especificaciones técnicas nacionales sobre deformación permanente

2.3.1. CR-2010 sin actualizaciones

A nivel nacional, el Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes (CR-2010) que estipula los requisitos de calidad, establece estándares y describe los procedimientos más usuales de ejecución, para los trabajos que habitualmente se contemplan en la construcción, mejoramiento, rehabilitación y ampliación de carreteras, contiene alguna normativa para el ensayo de deformación permanente, que se evalúa con la subsección *107.05 Evaluación estadística del trabajo y determinación del factor de pago* y la categoría de pago en función de la calidad para deformación permanente, se indica en la Tabla 403-1 del manual, definiendo que la deformación permanente se aplica para mezcla asfáltica por colocar en capas diseñadas para una vida útil sobre tres millones de ejes equivalentes, o cuando el Contratante así lo requiera (MOPT, 2010) según se denota en la *Sección 403.) MEZCLA ASFÁLTICA RECICLADA PROCESADA EN PLANTA DE PRODUCCIÓN EN CALIENTE.*

Tabla 403-1
Muestreo y ensayo

Material o producto	Propiedad o característica	Categ.	Método de prueba o especificación	Frecuencia	Punto de muestreo
Capa de superficie de concreto asfáltico procesado en planta en caliente, con material reciclado	Contenido de asfalto	I	AASHTO T 164	1 cada 500 Tm	Después de la colocación, antes de la compactación
	Granulometría (1)				
	4,75 mm	I	AASHTO T 30 (4)	1 cada 500 Tm	Después de la colocación, antes de la compactación
	600 µm	II			
	75 µm	I			
	Otros tamices especificados	II			
	Densidad en núcleos (2)	I	AASHT T 166 Y AASHTO T 209	1 cada 500 Tm	En sitio no más de dos semanas después de la compactación
	Regularidad superficial (3)	I	A definir por el Contratante	Sub-lotes de 0,1 m a lo largo de todo el proyecto	En sitio, posterior a la compactación
Deflexión en la superficie del pavimento (3)	I	A definir por el Contratante	Sub-lotes de 0,1 m a lo largo de todo el proyecto	En sitio, posterior a la compactación	
Deformación permanente (4)	I	En sitio, posterior a la compactación	A definir por el Contratante	A definir por el Contratante	
Fatiga (4)	I	En sitio, posterior a la compactación	A definir por el Contratante	A definir por el Contratante	

(1) Usar sólo los tamices requeridos por las especificaciones de granulometría.
(2) Cortar núcleos del pavimento compactado, de acuerdo con AASHTO T 230, método B. Llenar y compactar el hoyo correspondiente al muestreo con mezcla de concreto asfáltico.
(3) Se aplica sólo a capas de superficie.
(4) Para mezcla asfáltica por aplicar en capas asfálticas con vida útil de más de tres millones de ejes equivalentes, o cuando el Contratante lo requiera.

*Figura 16. Requisitos de muestreo y ensayos para MAC con material de reciclado.
Fuente: CR-2010*

También, uno de los apartados que más énfasis hace para esta variable en estudio, se encuentra en la *Sección 418.) MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE PARA USOS ESPECÍFICOS*, utilizadas en capas de superficie, capas intermedias, bases asfálticas y actividades del proyecto conservación vial. Aquí se señala que la mezcla asfáltica bajo la metodología SuperPave® (designación 418 (3)) es una MAC conceptualizada para resistir deformación plástica y daño por humedad, normando la deformación plástica luego de 8000 ciclos de carga en la pista de ensayo de Georgia, a 60 °C, deberá ser menor o igual a 3,00 mm. Se aplicará una carga de compresión que produzca vacíos de aire en los especímenes de ensayo de $7,0 \pm 1$ %. para ensayo APA. (MOPT, 2010, pág. 346)

Tabla 418-1
Tipos de mezclas asfálticas en caliente

Designación	Descripción
418 (1)	Mezcla asfáltica en caliente para bacheo para rutas donde la superficie existente consiste en algún tipo de tratamiento superficial, incluyendo lechadas asfálticas
418 (2)	Mezcla asfáltica en caliente para capas o sobrecapas asfálticas y bacheo donde la superficie existente consiste en concreto asfáltico
418 (3)	Mezcla asfáltica Superpave para resistir deformación plástica y daño por humedad
418 (4)	Mezcla asfáltica Superpave para resistir agrietamiento por fatiga

*Figura 17. Descripción de los tipos de MAC.
Fuente: CR-2010, pág. 336*

418.06.03 Requisitos para la mezcla asfáltica designación 418 (3).
 La mezcla asfáltica diseñada por la metodología Superpave para resistir deformación plástica y daño por humedad deberá cumplir con los requisitos que se indican a continuación.
 En todo caso aplicable se empleará la normativa de preparación de especímenes Superpave del Manual SP-2, Diseño de mezclas Superpave, del Instituto del Asfalto. Previo a la preparación de los especímenes Superpave, la mezcla asfáltica será colocada en un horno a la temperatura de moldeo por un período de 2 horas.

*Figura 18. Requisitos de MAC Sección 418.06.03.
Fuente: CR-2010, pág. 344*

Es importante denotar, que para la recepción del diseño de mezcla y la fórmula de mezcla en la subsección 418.07.02.06 *Diseño de mezcla*, no solo se indican parámetros de deformación plástica luego de 8000 ciclos con el ensayo de APA para la MAC con el porcentaje óptimo de asfalto, sino también establece que se debe de reportar esta prueba para la MAC con el contenido óptimo de asfalto más 0,50 % sobre la mezcla. Esto, es una buena técnica puesto que se analizaría la MAC en una condición crítica para la variable de deformación permanente y que es posible de obtener en el proceso de producción, como se aprecia en la siguiente figura:

g.) Resultado de deformación plástica luego de 8000 ciclos en la pista de ensayo de Georgia, que incluya los valores de deformación acumulada luego de 8000 ciclos y contenido de vacíos. Para el contenido óptimo de asfalto y el contenido óptimo de asfalto más 0,50 % por peso total de mezcla, cuando haya normativa para la mezcla asfáltica en términos de deformación plástica acumulada en pista de ensayo de Georgia.

*Figura 19. Sección 418.07.02.06 Diseño de mezcla
Fuente: CR-2010, pág. 355.*

Por último, se indican valores de especificación para el ensayo de APA en otras secciones, por ejemplo, de 5,0 mm (MOPT, 2010, pág. 361) de la *Sección 420 Sistemas de atenuación de reflejo de grietas*.

2.3.2. CR-2010 actualización mayo 2017

El CR-2010, a lo largo del tiempo ha sufrido modificaciones que se publican como actualizaciones de este manual, sin embargo, proyectos cuyo cartel de licitación es anterior a las publicaciones de estas nuevas versiones, deben apegarse a la versión vigente en ese momento. Es así como en la versión actualizada y que se publicó en mayo de 2017 oficializa las modificaciones, actualizaciones y creaciones de algunas secciones y subsecciones del CR-2010, donde modifica algunas de las condiciones de MAC en cuanto a los parámetros de deformación permanente principalmente en las secciones 401,402,403 y 404.

La sección 401.03 Diseño de mezcla asfáltica por el método Marshall categoriza las mezclas como se indica en la siguiente figura:

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

*Mezclas asfálticas de alto desempeño.
 Nota: por el tipo de función que cumplen las mezclas designadas como C y D, se recomienda su uso en capas con un espesor mínimo de 7,5 cm.

*Figura 20. Requisitos de desempeño y aceptación de diseño MAC.
Fuente: CR-2010 (actualización mayo 2017)*

Por lo tanto, según la siguiente figura, sobre la Tabla 401-3 se tienen requisitos de deformación plástica (APA) para las mezclas con designación C y D, en cuyo caso, es de esperar que las mezclas de capa de rodadura tengan exigencias más restrictivas en el parámetro de deformación.

Tabla 401-3
Requisitos para mezclas asfáltica

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

* Todos los ensayos deberán ser realizados con agregados vírgenes (sin pasar por el quemador/secador).

(1) Tanto en la falla seca como en la falla condicionada, las probetas serán moldeadas con mezcla asfáltica elaborada a escala de laboratorio con agregados que no hayan pasado por el secador de la planta. Se aplicará una carga

Figura 21. Requisitos de desempeño para deformación plástica MAC Marshall.

Fuente: CR-2010 (actualización mayo 2017)

Tabla 402-4					
Requisitos para mezclas asfálticas*					
Parámetro	Requisito Mezclas Tipo A	Requisito Mezclas Tipo B	Requisito Mezclas Tipo C	Requisito Mezclas Tipo D	Método de Ensayo
Estabilidad, N	≥ 5500	≥ 8000	≥ 8000	≥ 8000	INTE 04-01-11
Flujo, mm	3 ± 1	2,5 ± 1	2,5 ± 1	2,5 ± 1	INTE 04-01-11
Resistencia al daño inducido por la humedad en mezclas asfálticas compactadas ⁽¹⁾ (sin efectuar período de congelamiento)	≥ 75%	≥ 75%	≥ 85%	≥ 85%	INTE 04-01-05
Resistencia al daño inducido por la humedad en mezclas asfálticas compactadas a 25°C ⁽¹⁾ (especímenes sin condicionar), kPa	-	≥ 700	≥ 700	≥ 700	INTE 04-01-05
Deformación plástica luego de 8000 ciclos de carga a 60°C ⁽²⁾ , mm	-	-	≤ 3,5	≤ 2,5	AASHTO T 340
Cantidad de repeticiones para la falla por fatiga a 20°C para un nivel de deformación unitaria controlada de: ⁽³⁾ 400 µm 600 µm	-	-	≥ 450 000 ≥ 50 000	≥ 300 000 ≥ 25 000	AASHTO T 321

* Todos los ensayos deberán ser realizados con agregados vírgenes (sin pasar por el quemador/secador).
(1) Tanto en la falla seca como en la falla condicionada, las probetas serán moldeadas con mezcla asfáltica elaborada a escala de laboratorio con agregados que no hayan pasado por el secador de la planta. Se aplicará una carga de compactación que produzca vacíos de aire de los especímenes de ensayo de (7,0 ± 1,0) %, en especímenes de 150 ± 3 mm (6 ± 0,1 pulgadas) de diámetro. Los especímenes a ensayar deben tener una altura de 95 ± 5mm.
(2) Se aplicará una carga de compactación que produzca vacíos de aire de los especímenes de ensayo de (7,0 ± 1,0) %. La deformación deberá obtenerse como promedio de 3 corridas del ensayo (6 especímenes). La desviación estándar de las mediciones (3 llantas) no debe ser mayor a 2,0 mm, si esto sucede se puede descartar un solo valor (el más alejado). Se requiere que el ensayo sea realizado con mezcla acondicionada (4 horas ± 5 minutos a 135 ± 3°C), compactada inmediatamente después de este acondicionamiento.
(3) Los especímenes de ensayo son vigas de mezcla asfáltica con longitud de (380 ± 6) mm y sección transversal de (50 ± 6) mm (ancho) por (63 ± 6) mm (altura), densificadas de modo que su contenido de vacíos sea de (7,0 ± 1,0) %. Los especímenes de ensayo compactados deben ser envejecidos, de previo al ensayo, en un horno a 85°C por 5 días. La cantidad de repeticiones de carga deberá obtenerse del promedio de al menos dos vigas.

Figura 22. Requisitos de desempeño para deformación plástica MAC SuperPave®.

Fuente: CR-2010 (actualización mayo 2017)

De igual forma, para diseños de MAC por el método SuperPave® Tabla 402-1 y Tabla 402-4 contienen los mismos rangos de exigencia que el método Marshall para ensayo APA.

Según lo anterior, nótese que el CR-2010 establece parámetros de desempeño para una mezcla asfáltica bajo la metodología Marshall, para lo cual tradicionalmente en el país, se ha tenido la idea de que sólo MAC tipo

SuperPave® son las que deben cumplir con pruebas de desempeño ante la deformación permanente y fatiga, sin embargo, la legislación es clara.

Se debe prestar atención a las notas aclaratorias al pie de las Tablas 401-3 y 402-4, ya que enfatizan: todos los ensayos deberán ser realizados con agregados vírgenes (sin pasar por el quemador/secador) (MOPT, Mayo 2017). Esto quiere decir que la mezcla se tiene que reproducir en laboratorio con los agregados en su estado natural. Sin embargo, en la *Tabla 405-3. Requerimientos Mínimos de Muestreo y Ensayos* de esta actualización, se indica que este ensayo se debe de realizar al menos 1 por mes en producción constante en góndola de vagoneta según la que indique la Administración. (MOPT, Mayo 2017). Este aspecto se contradice con lo expuesto anteriormente y puede provocar grandes cambios en los resultados de deformación permanente, puesto que se cambian las condiciones de muestreo y reproducción del producto, donde por un lado se tiene una MAC reproducida en condiciones controladas; y, por otro lado, el producto que resultó del proceso efectuado por la planta asfáltica.

Está claro, que una mezcla asfáltica durante su etapa de diseño en laboratorio, debe cumplir con los parámetros de desempeño utilizando su contenido de asfalto óptimo. Sin embargo, es vital, comprobar su desempeño también de un bache de prueba, producido por la planta, ya que es el producto que se colocará finalmente en el proyecto. Por lo tanto, se considera que tienen que existir también parámetros para indicar, que una MAC muestreada en la vagoneta transportadora cumple o no con estos requisitos. Lo anterior, a pesar de no formar parte de esta investigación, se considera importante de señalar para futuros proyectos.

2.3.3. Cartel de Conservación Vial

Uno de los carteles de licitación más importantes, a nivel nacional es el *MP Y R: Mantenimiento Periódico y Rehabilitación del Pavimento de la Red Vial Nacional Pavimentada de la licitación pública No. 2014LN-000018-0CV00*, que establece la especificación especial de mezcla asfáltica en caliente, en su sección 5. *Requisitos Mezcla asfáltica* señalando lo expresado en el punto anterior que se realizan los ensayos tanto a la MAC reproducida en laboratorio como para la mezcla de campo (ver siguiente figura)

5. Requisitos para la mezcla asfáltica

Estos requisitos deberán cumplirse tanto para la fórmula de la mezcla para trabajo, como para la producción de mezcla asfáltica de aplicación en la obra.

5.1. Requisitos para la mezcla asfáltica en caliente

Estos requisitos deberán cumplirse tanto para la fórmula de la mezcla (diseño de mezcla), como para la mezcla asfáltica producida en la obra (formula de mezcla para el trabajo).

*Figura 23. Requisitos mezcla asfáltica.
Fuente: (Consejo Nacional de Vialidad, 2015, pág. 154)*

Lo anterior, es aplicable para la ejecución de los reglones de pago M41(A2) Bacheo a profundidad parcial con mezcla asfáltica en caliente, M45 (A) Pavimento bituminoso en caliente y M45 (E) Pavimento Bituminoso en caliente con polímeros, señala requisitos de deformación permanente solo para las mezclas del renglón de pago M45 (E) (Consejo Nacional de Vialidad, 2015, pág. 157) y establece lo indicado en la siguiente figura:

Las mezclas asfálticas modificadas con polímeros tipo SBR deberán cumplir, además de los requisitos anteriores, los indicados en la Tabla A según la designación que corresponda:

- Para usar sobre la base en una sola capa
- Designación C: Exclusivamente como capa asfáltica intermedia y capa de base
- Designación D: Exclusivamente como capa asfáltica de rodadura

TABLA A REQUISITOS PARA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON POLÍMEROS SBR				
Parámetro	Método de ensayo	Requisitos		
		Para usar sobre una base en una sola capa	Designación C	Designación D
Resistencia a la tensión diametral retenida (sin efectuar período de congelamiento). (1)	INTE 04-01-05-05	≥ 85 %	≥ 85 %	≥ 85 %
Resistencia a la tensión diametral a 25°C (especímenes acondicionados). (1)	INTE 04-01-05-05	> 750 KPa	> 750 KPa	> 750 KPa
Deformación plástica luego de 8000 ciclos de carga a 60°C. (2)	AASHTO T 340	≤ 2,5 mm	≤ 3,5 mm	≤ 2,5 mm
Cantidad de repeticiones para la falla por fatiga a 20°C para un nivel de deformación unitaria controlada de: (3)	AASHTO T 321			
400E-6 mm/mm		≥ 450 000	≥ 450 000	≥ 300 000
600 E-6 mm/mm		≥ 50 000	≥ 50 000	≥ 30 000

(1) Se aplicará una carga de compactación que produzca vacíos de aire de los especímenes de ensayo de $(7,0 \pm 1,0) \%$, en especímenes de 150 ± 3 mm ($6 \pm 0,1$ pulgadas). Los especímenes a ensayar deben tener una altura de 95 ± 5 mm.

(2) Se aplicará una carga de compactación que produzca vacíos de aire de los especímenes de ensayo de $(7,0 \pm 1,0) \%$. La deformación deberá obtenerse como promedio de 3 corridas del ensayo (6 especímenes). Se requiere que la desviación estándar no exceda 2,00 mm para las tres posiciones de las llantas. Se requiere que el ensayo sea realizado con mezcla únicamente acondicionada a corto plazo (4 horas \pm 5 minutos a $135 \pm 3^\circ\text{C}$), compactada inmediatamente después de este acondicionamiento.

(3) Los especímenes de ensayo son vigas de mezcla asfáltica con longitud de 380 mm y sección transversal de 50 mm (ancho) por 63 mm (altura), densificadas de modo que su contenido de vacíos sea de $(7,0 \pm 1,0) \%$. Los especímenes de ensayo compactados deben ser envejecidos, de

*Figura 24. Requisitos de MAC modificada con polímeros.
Fuente: Consejo Nacional de Vialidad, 2015, pág. 157.*

Este cartel de especificación para los proyectos de conservación vial solo señala parámetros para el método AASHTO T 340, y una frecuencia de muestreo para la ejecución del ensayo de al menos 1 vez al mes y como una prueba cuyo método de aceptación es de conformidad determinada o ensayada (Consejo Nacional de Vialidad, 2015, pág. 172).

Según se interpreta, que tanto las mezclas convencionales como las modificadas con polímeros se les debería de solicitar requisitos para la deformación permanente. Sin embargo, es de práctica común a nivel nacional, que solo se le pida cumplimiento de este parámetro a MAC modificadas con polímeros viéndose como un requisito adicional. Así mismo, este cartel sí ofrece la posibilidad de realizar estos ensayos a la MAC de laboratorio como la muestreada en campo.

Según se muestra en la siguiente figura, se debe controlar, además, la deformación plástica para el contenido óptimo de asfalto más 0.50 % sobre la mezcla.

- f) Cuando aplique normativa para la mezcla asfáltica en términos de deformación plástica acumulada, el Contratista presentará el resultado de deformación plástica luego de los ciclos de carga especificados, que incluya los valores de deformación acumulada y contenido de vacíos. Para el contenido óptimo de asfalto y el contenido óptimo de asfalto más 0,50 % por peso total de mezcla.

*Figura 25. 6.1. Recepción del diseño de mezcla y la fórmula de mezcla.
Fuente: Consejo Nacional de Vialidad, 2015, pág. 161.*

Lo anterior, es confuso, puesto que las metodologías de diseño evalúan las propiedades de desempeño con el contenido óptimo de asfalto.

2.3.4. Carteles de licitaciones públicas para proyectos

Pocos y casi nulos, proyectos importantes, han tenido escrito dentro de las especificaciones contractuales del cartel de licitación, el parámetro de deformación permanente y en mucho menos medida, personalizado al ensayo de Rueda de Hamburgo, el cual, por ejemplo, en el Cartel de Licitación Pública Internacional No. 2013LI-000011-0DE00 Para la Contratación del Diseño y Construcción de la Carretera La Abundancia Florencia y Radial Ciudad Quesada, Carretera San Carlos, Ruta Nacional No. 35 se estableció una especificación para el ensayo de Rueda de Hamburgo menor o igual a 5,00 mm; desconociendo las razones del por qué se indicó ese umbral de aceptación para esta prueba de desempeño.

Otro ejemplo, es el proyecto de diseño, rehabilitación y Ampliación de la ruta nacional n°32 carretera Braulio Carillo, sección: intersección ruta nacional N.º 4 (cruce a Sarapiquí)- Limón, el cual especifica en la sección 3 *Mezcla asfáltica en caliente*, subsección 3.1. *Reglón de pago 418(3) mezcla asfáltica SuperPave para resistir deformación plástica y daño por humedad* parámetros de cumplimiento para el ensayo de rueda de Hamburgo señalando que la deformación plástica luego de 20000 ciclos de carga en la pista de ensayo de Hamburgo (HWTD), a 50 ° C, deberá ser menor o igual a 5,00 mm. Esta deformación deberá obtenerse como promedio de 2 corridas de ensayo (4 especímenes). Adicionalmente debe verificarse que el punto de inflexión de la curva de deformación versus número de pasadas, no ocurra antes de 10000 pasadas de la rueda (Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 2013)

En general, en Costa Rica se han realizado ensayos de Rueda de Hamburgo (principalmente por parte de laboratorios públicos) para contrastar los resultados de deformación permanente de mezclas asfálticas sometidas a la prueba de APA o investigación, no así como un requerimiento contractual, por ejemplo, el informe LM-PI-AT-033-19 titulado: *Evaluación de la calidad de la mezcla asfáltica producida durante el 2018 en las plantas asfálticas de los proyectos de Conservación Vial Licitación pública No. 2014LN-000018-OCV00. Varias Zonas*. En este informe, se valora (de forma general) la calidad de la mezcla asfáltica producida por los diversos contratistas (TMN de 12 mm y 19 mm), para ser utilizada en los procesos de conservación vial aplicados por el Conavi. En uno de sus apartados, se analiza el comportamiento de la MAC ante el ensayo de Rueda de Hamburgo y a manera de criterio de falla de referencia se utiliza la especificación definida en la ciudad de Hamburgo que es de 4 mm de deformación máxima para autopistas, para considerar que la mezcla cumple con las expectativas de desempeño (LanammeUCR, 2018). Además, más adelante, el documento aclara que esta especificación es muy conservadora diciendo que se considera que esta normativa es sumamente exigente, por lo que algunos estados de EEUU (Texas y Colorado) han establecido el límite de la especificación hasta 12,5 mm (LanammeUCR, 2018).

2.4. Tipos de Plantas de asfalto

Según el CR-2010, las plantas de mezclado del material asfáltico y los agregados deberán cumplir con lo especificado en AASHTO M 156, complementado con lo siguiente:

- Controles automatizados. La planta debe tener control automatizado en el proporcionamiento, mezclado y descarga de los materiales.
- Colector de Polvo. La planta asfáltica deberá ser equipada con un colector de polvo. El material recolectado deberá ser dispuesto adecuadamente. En el caso de que la planta posea una casa de finos como dispositivo de recolección, el material deberá ser eliminado y dispuesto adecuadamente o devuelto al proceso de mezclado de forma uniforme. El uso de casas de finos en plantas de mezcla asfáltica requiere de la aprobación del Ingeniero de Proyecto.
- Pavimento de mezcla asfáltica reciclada. Cuando se incorpora material asfáltico reciclado en la mezcla, la planta deberá ser modificada de acuerdo con las recomendaciones del fabricante.

2.4.1. Plantas de tambor de secado

- Tolvas. La planta deberá tener una tolva en frío para cada uno de los apilamientos que proveen el agregado, de acuerdo con el diseño de mezcla. Las tolvas deberán tener tamaño suficiente para

mantener una cantidad adecuada de material de modo que se garantice la operación continua de la planta asfáltica. Adicionalmente, se debe prevenir que el material de una tolva no se rebalse en el de otra tolva.

- Procedimiento para preparar los apilamientos. El agregado debe ser separado en al menos 4 apilamientos con diferente granulometría y tamaño máximo de agregado. Al menos uno de los apilamientos deberá ser para agregado fino (material pasando la malla de 4,75 mm).

2.4.2. Plantas de bache

- Tolva de agregado en caliente. Se deberán proveer suficientes tolvas para almacenar y tamizar las fracciones de agregado que serán utilizadas en la mezcla asfáltica. Las tolvas deberán ser diseñadas de modo que se prevenga que el material de una tolva no se mezcle con el de las otras.
- Sistemas de pesaje. En las plantas de bache se deben usar celdas de carga calibradas o mecanismos de pesaje calibrados aprobados por el Contratante.
- Pavimento de mezcla asfáltica reciclada. Las plantas de bache deben ser modificadas cuando van a mezclar material reciclado. En este caso, la mezcla reciclada deberá ser introducida en el proceso después del secado del agregado en el tambor secador. La tolva especial en frío para el material reciclado y la banda transportadora deben ser diseñadas de forma tal que se evite la segregación y que el material reciclado se adhiera en las paredes de la tolva y de la banda. El agregado deberá ser calentado a una temperatura adecuada de modo que se transfiera calor suficiente al material reciclado para producir una mezcla que tenga una temperatura uniforme dentro del rango especificado en la fórmula de trabajo aprobada por el Ingeniero de Proyecto.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1. Tipo de investigación por realizar

De los 3 tipos de investigación: cualitativa, cuantitativa o mixta, la investigación se enmarca en la **cuantitativa**, debido a que, al ser un estudio de una propiedad de desempeño de la mezcla asfáltica en caliente (MAC) como su comportamiento ante la **deformación permanente**, bajo dos ensayos de laboratorio (APA y Rueda de Hamburgo), tiene planteamientos acotados en los que se medirá este fenómeno y sus variables en el contexto de la producción de mezcla asfáltica, para la principales plantas productoras del país, recolectando la MAC producida en planta y en dos de ellas la extracción de núcleos en sitio, para luego analizar y concluir sobre los resultados obtenidos del ensayo, mediante estudios con elementos descriptivos, siguiendo el proceso cuantitativo de la siguiente figura:

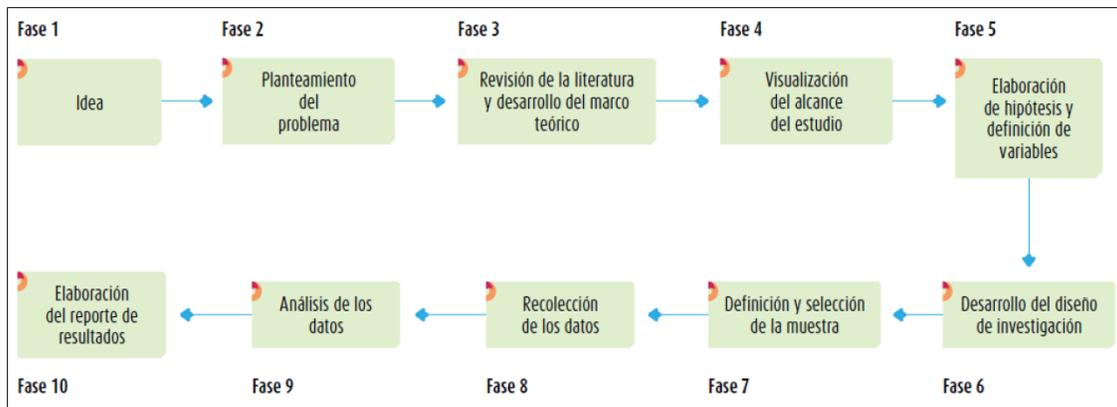


Figura 26. Proceso cuantitativo
Fuente: Hernández Sampieri, 2018

Estas conclusiones se estudian para asociarlas como un patrón predecible, a la población de MAC producida, describiendo la tendencia del comportamiento de la mezcla asfáltica analizada.

3.2. Formulación de hipótesis

- Es la propuesta de especificación de la deformación permanente mayor para el ensayo de Rueda de Hamburgo que la establecida en el CR-2010 para el ensayo APA.
- La deformación permanente de una misma MAC es menor utilizando el ensayo de APA que con el ensayo de Rueda de Hamburgo.
- Los núcleos de MAC compactada extraídos de la carretera tienen resultados similares ante el comportamiento de la deformación permanente de la misma mezcla, pero moldeada.

3.3. Técnicas e instrumentos de investigación

La secuencia metodológica planteada para el desarrollo de la investigación se ilustra en la siguiente figura



Figura 27. Flujograma del proceso de investigación.

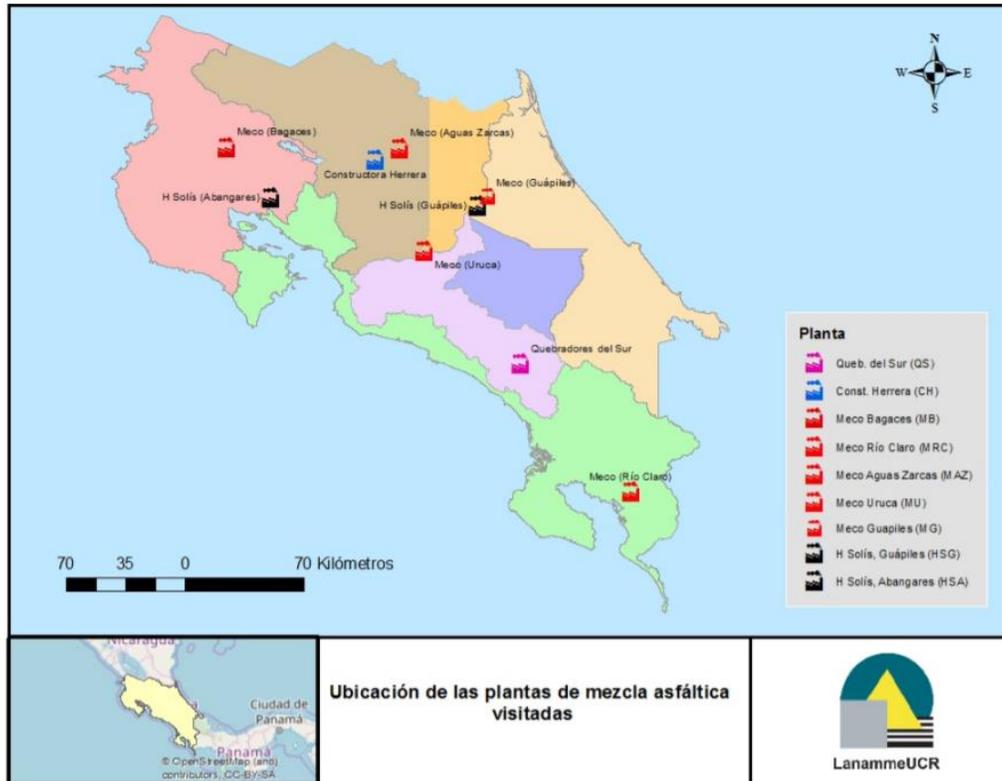
Los instrumentos utilizados son:

3.4. Población de interés

Por el tipo de investigación desarrollada, la población de interés es la MAC de tamaño máximo nominal de 12,7 mm de las principales plantas productoras del país⁶. En la actualidad, los contratistas y las principales plantas de producción de mezcla asfáltica en caliente del país son:

- Hernán Solís, Abangares
- Hernán Solís, Guápiles
- Meco, Aguas Zarcas
- Meco, Bagaces
- Meco, Guápiles
- Meco, Río Claro
- Meco, Uruca
- Constructora Herrera, San Carlos
- Quebradores del Sur, Pérez Zeledón
- Conansa, Calle Blancos y Quepos
- Chec km 49, Ruta 32
- Grupo Laboro, Limonal
- Grupo Orosi, Curridabat, Las trancas y Cartago
- Asfaltos Pedregal, San Antonio de Belén-Heredia Nicoya
- Asfaltos CBZ, San Miguel de Heredia
- Pavicen, Alajuela
- Entre otras.

⁶ Según entrevista realizada a profesionales de experiencia y encargados de 12 centros de producción de mezcla asfáltica en caliente y distribuidos a lo largo de todo el territorio nacional, indican que alrededor del 60 % de la MAC producida en el último año, es de un TMN de 12,7 mm en el sector, razón por la cual se realiza el presente estudio a este tipo de mezcla asfáltica.



*Figura 28. Ubicación principales plantas de producción de MAC
Fuente: Lanamme-UCR, 2018*

3.5. Tipo de muestreo

Se elige un número de 7 muestras de MAC para realizar el estudio ya que, por limitaciones económicas, de equipo y de tiempo es la cantidad de ensayos que se pueden ejecutar. El costo de estos ensayos según datos obtenidos del Laboratorio LGC Ingeniería de Pavimentos S.A. es de aproximadamente \$500 cada uno y tienen una duración de aproximadamente dos días solo de ejecución del ensayo, sin contar el periodo correspondiente a las pruebas para la determinación de vacíos, acondicionamiento y ensayos para determinar los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica.

Según lo anterior, se trató de abarcar las diferentes plantas de producción elegidas de acuerdo con su ubicación geográfica (fuentes usuales y de mayor consumo a nivel nacional), la facilidad de acceso a la información, con producción estable y que obedeciera a proyectos de importancia a nivel nacional, pues esto último haría que se tuvieran más controles de calidad en el momento de la producción de la mezcla asfáltica, logrando muestrear las plantas ubicadas en: Guápiles (2 plantas de las plantas de mayor producción), Limonal, Nicoya, Pérez Zeledón, Limón y Calle Blancos, lo cual permite abarcar la mayoría

del territorio nacional y los centros de importancia económica de producción para la red vial cantonal, como se muestra en la siguiente figura:

Línea	Zona	Contratista	Planta Suplidora	Tipo	Monto del contrato
Línea 1	1-1 San José	MECO	Meco Uruca	Continua	C 17.421.740.931,25
	1-2 Puriscal				
	1-9 Heredia				
Línea 2	1-4 Alajuela Sur	H. Solís	HS Guápiles	Bache	C 18.046.845.437,66
	1-5 Alajuela Norte				
	1-6 San Ramón				
Línea 3 ^(S)	1-3 Los Santos	H. Solís	HS Guápiles	Bache	C 42.451.794.700,00 [C 17.925.897.309,69]
	1-7 Cartago				
	1-8 Turrialba				
Línea 4 ^(S)	2-1 Liberia	H. Solís	HS Abangares	Bache	C 21.298.404.484,25 [C 8.808.764.040,12]
Línea 5	2-3 Santa Cruz	MECO	Meco Bagaces	Continua	C 17.406.722.878,73
	2-4 Nicoya				
Línea 6	2-2 Cañas-Upala	H. Solís	HS Abangares	Bache	C 16.179.228.040,23
	3-1 Puntarenas				
	3-2 Quepos				
Línea 7	4-1 Pérez Zeledón	Q. Sur	Q. Sur	Continua	C 20.340.597.830,16 [C 8.020.962.779,55]
	4-2 Buenos Aires				
Línea 8	4-3 Río Claro	MECO	Meco Río Claro	Continua	C 22.012.230.200,90 [C 10.226.567.455,93]
Línea 9	5-1 Guápiles	MECO	Meco Guápiles	Continua	C 11.995.565.725,90
	5-2 Limón				
Línea 10	6-1 Ciudad Quesada	MECO	Meco Aguas Zarcas	Continua	C 19.743.913.615,04 [C 8.820.707.675,24]
	6-2 Los Chiles				

Figura 29. Zonas adjudicadas para cada contratista y planta suplidora (Conservación Vial Licitación pública No. 2014LN-000018-0CV00).

Fuente: Lanamme-UCR, 2018

Estas 7 muestras, se distribuyen en las 7 plantas principales (1 por planta) de donde se obtuvieron las muestras de MAC para realizar los ensayos de APA y Rueda de Hamburgo, así como la extracción de los núcleos para la misma mezcla solo que una vez compactada en la carretera, esto para la MAC de dos centros de producción. Por confidencialidad de la información, y debido a que los objetivos del estudio es obtener información de forma agregada para análisis generales y no específicos de una planta productora, en adelante se llamarán a los centros de producción de acuerdo con el siguiente cuadro para proteger el anonimato:

Cuadro 5. Nomenclatura de los centros de producción de MAC.

Planta Productora	MAC en planta	Núcleos en campo	Metodología de diseño
Planta A	X	X	Marshall
Planta B	X		Marshall
Planta C	X		Marshall
Planta D	X		Marshall
Planta E	X		Marshall
Planta F	X	X	SuperPave®
Planta G	X		Marshall

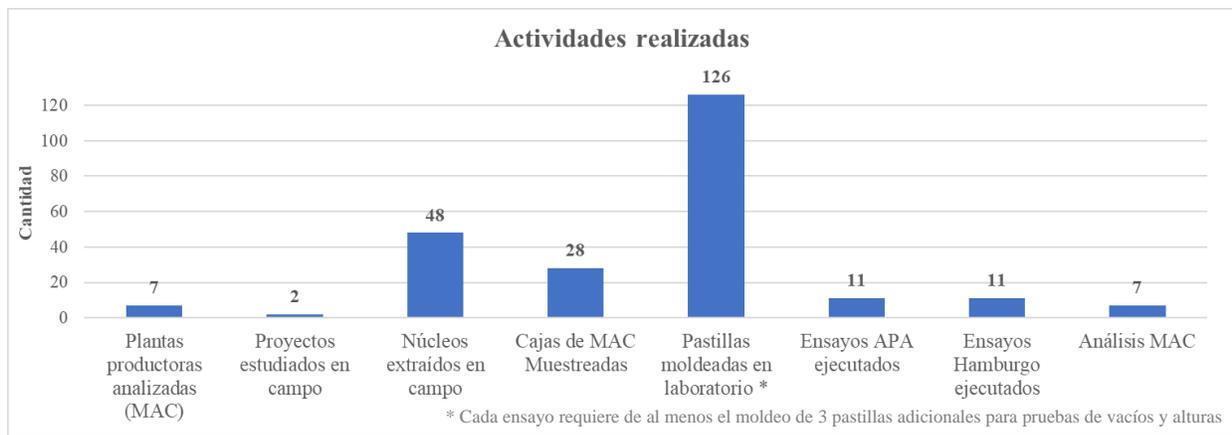


Figura 30. Resumen de actividades realizadas

3.6. Unidad de muestreo

La unidad de muestreo son las pastillas moldeadas y núcleos compactados extraídos en campo, extraídos de forma aleatoria, a los cuales se le realizarán los ensayos de deformación permanente APA y Hamburgo, que son pruebas destructivas.



Figura 31. Pastillas MAC como unidad de muestreo
Fuente: LGC Ingeniería de Pavimentos, 2019



Figura 32. Unidad de muestreo una pista compuesta por dos especímenes.
Fuente: LGC Ingeniería de Pavimentos, 2019

3.7. Unidad informante

Según la prueba estadística para determinación de normalidad ejecutada para los grupos de datos de deformación permanente, se determina que la unidad informante serán las líneas (lado izquierdo y/o lado derecho) que se compone del promedio de 5 lecturas de deformación permanente para el caso del ensayo de rueda de Hamburgo y el promedio de 4 datos para la prueba de APA, de las cuales se tienen 3 réplicas de la misma MAC.

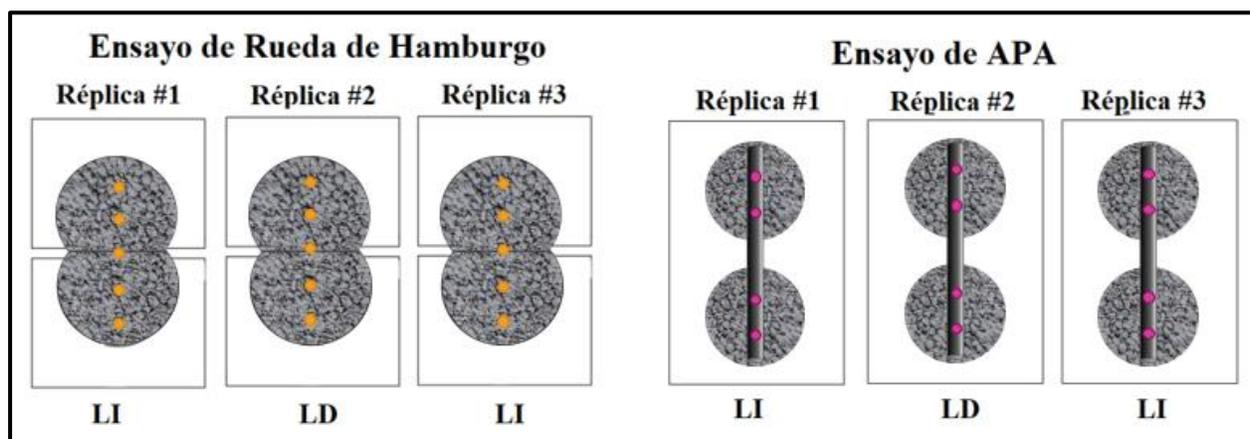


Figura 33. Unidad informante

Previamente a la ejecución de cada ensayo (APA y Rueda de Hamburgo), se moldearon al menos 3 pastillas para las pruebas iniciales, que determinan el contenido de vacíos y altura de los especímenes conforme a lo indicado por la normativa internacional.

Así mismo, a cada mezcla asfáltica (7 en total) se realizó el análisis de los principales parámetros volumétricos, según su metodología de diseño que se detallan en la sección de análisis de resultados.

La manera en que se realizaron estos muestreos en planta, fue con técnicos de laboratorio de campo, los cuales están dentro del alcance de acreditación del laboratorio bajo la norma INTE-ISO/IEC 17025:2005 “Requisitos generales para la competencia de laboratorios de ensayo y calibración” y el método para el muestreo de mezclas asfálticas AASHTO T-168: *Standard Method of test for sampling bituminous paving mixtures* y ASTM D-5361: *Standard Practice for Sampling Compacted Asphalt Mixtures for Laboratory Testing*, con conocimiento en el manejo de la muestra, muestreo en campo, muestreo de mezcla asfáltica en camión, muestreo de mezcla asfáltica bituminosa en camino después de la compactación en carretera y muestreo de mezclas asfálticas bituminosas en camino antes de la compactación en carpeta.

Independientemente del procedimiento a utilizar, se inspeccionó la mezcla para detectar e informar situaciones particulares como:

- Contenidos anormales de asfalto.
- Mezcla asfáltica con segregación.
- Unidad de transporte con contaminación (materiales distintos al asfalto adheridos).
- Olores que evidencien contaminación con otros productos.
- Coloración anormal de la mezcla.

3.8. Ejecución de ensayos

Las pruebas por realizar son estandarizadas (AASHTO, 2017) bajo las designaciones AASHTO T-324 y T-340.

3.9. Procedimiento de muestreo de MAC

Para garantizar la confiabilidad, validez y objetividad, se realizó el muestreo dentro de los escenarios comunes de producción de MAC.

Existen 3 escenarios para el muestreo de la unidad experimental (LGC Ingeniería de Pavimentos S.A., 2017):

3.9.1. Muestreo de mezcla asfáltica en camión

- Se determina el volumen total a ser muestreado, la capacidad promedio de los camiones de transporte y se consulta la frecuencia de muestreo solicitada.
- Se determina la cantidad de muestras requeridas calculando la relación volumen total / frecuencia.
- Se requieren 3 incrementos de muestra para obtener una muestra por cada camión seleccionado.
- Se utiliza procedimiento de números aleatorios para definir los camiones a ser muestreados y el esquema de muestreo por camión
- En cada camión según el esquema de muestreo se toman 3 incrementos con la pala y se colocan una en la caja.
- Se unen los incrementos para tener la muestra final del ensayo.

- Se anota la temperatura de la mezcla asfáltica al momento de realizar el muestreo



*Figura 34. Muestreo de mezcla asfáltica en camión
Fuente: LGC, 2017*

3.9.2. Muestreo de mezcla asfáltica en campo antes de la compactación en carretera

- Se determina la longitud de carretera a ser muestreada, el ancho promedio de la sección (carril o vía completa) y se consulte la frecuencia de muestreo solicitada para el proyecto.
- Se determina la cantidad de muestras requeridas calculando la relación Longitud / Frecuencia.
- Para cada una de las muestras calculadas en el paso anterior, se determina la ubicación de 3 incrementos muestrales.
- Se utiliza el Procedimiento de Números aleatorios para definir los puntos de muestreo para cada incremento.
- Se recolecta cada incremento con una pala de la mezcla dentro del equipo de colocación (Finisher).
- Se unen los incrementos para tener la muestra final del ensayo.
- Se anota la temperatura de la mezcla asfáltica al momento de realizar el muestreo al 0,5 °C más cercano.



*Figura 35. Muestreo de mezcla asfáltica en camino antes de la compactación en carretera
Fuente: LGC, 2017*

3.9.3. Muestreo de mezcla asfáltica en camino después de la compactación en carretera

- Se determina la longitud de carretera a ser muestreada, el ancho promedio de la sección (carril o vía completa) y se consulta la frecuencia de muestreo solicitada para el proyecto.
- Se determina la cantidad de muestras requeridas calculando la relación Longitud / Frecuencia.
- Se consulta el diámetro de la broca requerido para las muestras con el personal de laboratorio.
- Se corta la muestra en toda su profundidad con la extractora de núcleos o la sierra, teniendo cuidado de no incluir material granular o subrasante, utilizando agua para enfriar la broca o la sierra durante la extracción y evitar la pulverización por fricción del núcleo o bloque aserrado.
- Si el núcleo o bloque aserrado no sale, se perfora una mayor profundidad.



Figura 36. Muestreo de mezcla asfáltica en camino después de la compactación en carretera en camión

Fuente: LGC, 2017

3.9.4. Procedimiento de números aleatorios

La importancia del uso de la tabla de números aleatorios radica en el hecho que asegura la integridad del muestreo que se realiza, ya que no permite la interferencia de las partes involucradas (constructor, inspección, laboratorio), asegurando que la muestra es representativa y no obedece a una selección particular de un involucrado.

3.10. Software estadístico

Para el análisis de datos y la interpretación de la estadística descriptiva (tendencias, frecuencias, errores, varianza, etc.) se utilizó el software estadístico Minitab®⁷, con estos resultados se realizará la inferencia estadística a la población siguiendo el procedimiento indicado en la siguiente figura:

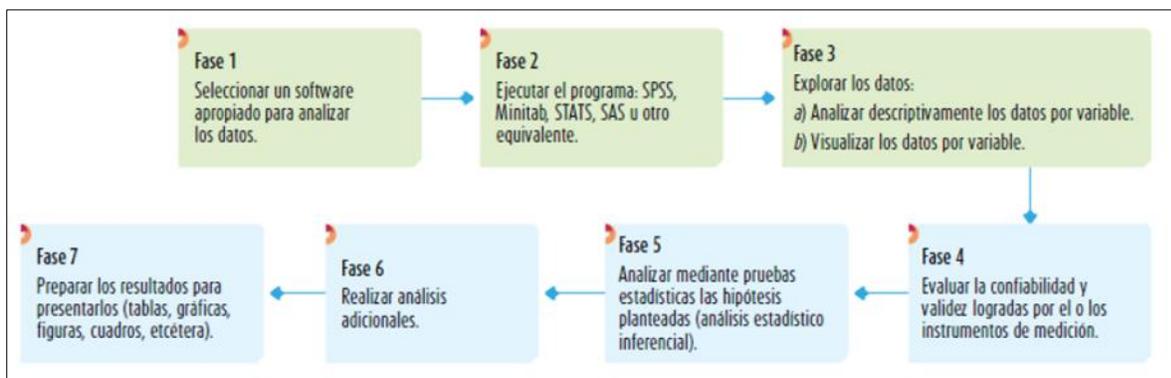


Figura 37. Proceso análisis estadístico
Fuente: Hernández Sampieri, 2018

⁷ Partes de la información que contiene esta publicación se incluyeron con el permiso de Minitab, LLC. Todo ese material sigue siendo propiedad exclusiva de Minitab, LLC., que es el titular de los derechos de autor. *All rights reserved.* Minitab® y todas las otras marcas comerciales y logotipos de los productos y servicios de la Empresa son propiedad exclusiva de Minitab, LLC. Todas las demás marcas a las que se hace referencia son propiedad de sus respectivos dueños. Para obtener más información, visite minitab.com.

CAPÍTULO 4. ESPECIFICACIONES INTERNACIONALES PARA DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA EL ENSAYO DE RUEDA DE HAMBURGO

Para declarar conformidad de la mezcla asfáltica ante el fenómeno de deformación permanente, se verifica mediante las especificaciones técnicas que plantean los Organismos de la Administración o Entes Gubernamentales, encargados de publicar los límites o umbrales máximos de esta variable. A continuación, se muestra un resumen de varias de estos requisitos internacionales que sirven como punto de partida en la determinación de una especificación para Costa Rica y mejorar la aplicabilidad de la metodología mecanístico- empírica.

4.1. Alemania

La especificación de Rueda de Hamburgo, como se mencionó anteriormente, nace en Alemania, cuya especificación establecida en la ciudad de Hamburgo es de 4 mm de deformación máxima en autopistas y 2.5 mm en zonas industriales, lo cual es muy conservador, en contraste a lo definido en otros lugares como se indica adelante.

4.2. Estados Unidos

Una de las investigaciones más exhaustivas sobre el ensayo de Rueda de Hamburgo para determinar la deformación permanente de MAC, es el Reporte 219 del Programa de Investigación de la Carretera Nacional Cooperativa (NCHRP por sus siglas en inglés) donde se compila la lista de especificaciones estatales de la mayoría de regiones de Estados Unidos. La siguiente figura, muestra un resumen de la información:

Departamento de Transporte	Temperatura de prueba (°C)	Grado de desempeño (PG)	Especificación	
			Núm. de pasadas	Deformación permanente (mm)
Texas	50	64	10 000	12.5
		70	15 000	
		76	20 000	
Colorado	45	58	20 000 10 000	10.0 4.0 ^c
	50	64		
	55	70		
	55	76		
California	45	58	10 000	12.5
	50	64	15 000	
	55	70	20 000	
		76 o >	25 000	
Montana	44	58	10 000 ^a	12.5
	50	64	15 000 ^b	
	56	70		
Luisiana	50	58	12 000	12.5
		64	20 000	
		70 (OGFC)	7 500	
Illinois	50	58 o <	5 000	12.5
		64	7 500	
		70	15 000	
		76 o >	20 000	
Utah	46	58	20 000	20.0
	50	64		
	54	70		

a. Mezcla producida en planta
b. Mezcla de diseño
c. Profundidad de rodera >4 mm antes de 10 000 pasadas se considera que no pasa

Figura 38. Especificaciones de deformación permanente para la rueda de carga de Hamburgo.
Fuente: Reporte 219, NCHRP, compilado por Flores et al., 2018)

Como se puede observar en la figura anterior, la mayoría de los Departamentos de Transporte de Estados Unidos, utilizan como temperaturas de prueba entre los 44 °C y 56 °C, cabe recordar que la especificación AASHTO T-324 no establece una temperatura de prueba, solo indica que el sistema de control de temperatura del equipo debe ser capaz de controlar un rango (bastante amplio) entre 25 °C a 70 °C⁸. Además, se debe prestar atención especial a las especificaciones para grado de desempeño (PG) del asfalto 64, valor que se aproxima a las condiciones del cemento asfáltico que se comercializa en Costa Rica (AC-30). De

⁸ Por esta razón, los estados de Texas, Colorado y Montana usan su propia norma Tex -242F, CP-L 5112 y MT-334, respectivamente (Flores Flores, Delgado Alamilla, & Gómez López, 2018)

forma general, a mayor PG, más cantidad de números de pasadas al que se establece la falla. Exceptuando el estado de Illinois, el resto de regiones indica valores para los ciclos de carga entre 10 000 y 20 000 pasadas, siendo el más frecuente el de 20 000 ciclos.

Es relevante notar, en el caso de Montana, tiene dos condiciones en el número de pasadas, una para las MAC producidas en laboratorio para la fase de diseño (10 000 ciclos) y otra para la MAC producida en planta (15 000 ciclos), ambas con especificación de 12,5 mm como máxima deformación permitida; siendo así un poco menos conservadora para las MAC de planta.

Para el valor máximo de deformación permanente del ensayo, el más común entre los distintos estados es 12.5 mm.

Como tendencia, parece que muchos estados están en el proceso de adoptar esta prueba en sus especificaciones y se esperaría que la cantidad de estados que usan el ensayo de Rueda de Hamburgo aumente significativamente. Por ejemplo, Vermont, Georgia, Nueva York y Carolina del Sur indicaron en sus respuestas la posibilidad de adoptar esta prueba en un futuro próximo. (Mohammad, Elseifi, Raghavendra, & Ye, 2015)

4.3. México

En México, el método de ensayo se realiza a una temperatura de 50 °C y la cantidad mínima de pasadas especificadas para una deformación máxima de 10 mm depende del nivel de tránsito (para un nivel bajo, medio, alto y muy alto, el número de pasadas especificado es de 10 000, 15 000 y 20 000, respectivamente (Flores Flores, Delgado Alamilla, & Gómez López, 2018) siguiendo lo indicado en el Protocolo AMAAC PA-MA 01/2013 y es independiente si el asfalto es modificado o no.

Cuadro 6. Especificación Mexicana para el ensayo de Rueda de Hamburgo.

Nivel de tránsito	Pasadas mínimas para una deformación máxima de 10 mm
Bajo	10 000
Medio	15 000
Alto	20 000
Muy alto	20 000

Fuente: Asociación Mexicana del Asfalto (AMAAC, A.C). Protocolo AMAAC PA-MA 01/2013.

4.4. Perú

En Perú, el Manual de Carreteras, para la mezcla asfáltica reciclada en caliente y diseñadas con la metodología Marshall, establece que deberá ser verificada mediante la prueba de Hamburgo Wheel Track (AASHTO T324) sin indicar un valor explícito de deformación permanente como umbral máximo. Si este requisito no se cumple, se deberá efectuar los ajustes necesarios en el diseño de la mezcla, lo cual debe

contar con la aprobación del Supervisor. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, Dirección de Normatividad Vial, 2013). También señala que el lugar del muestreo de este material puede ser en pista/planta.

CAPÍTULO 5. ESTIMACIÓN DE LA PRECISIÓN E INCERTIDUMBRES PARA LOS MÉTODOS DE ENSAYO APA Y RUEDA DE HAMBURGO

La evaluación de la incertidumbre de la medición no es ni una tarea rutinaria ni una puramente exacta, esto depende del conocimiento exhaustivo de la naturaleza del mensurado y de la medición. La calidad y utilidad de la incertidumbre reportada para el resultado de una medición depende principalmente de la comprensión, análisis crítico e integridad de aquellas personas que contribuyen a la obtención de su valor (Chavarría Blanco, Julio 2018). Es por esta razón que se considera dentro de este estudio, determinar la incertidumbre para los métodos de deformación permanente y de esta forma, el profesional que realice estudios con estos ensayos, tendrá un orden de magnitud del valor de incertidumbre de los métodos para tomarlo en cuenta en los análisis respectivos. Así mismo, el cálculo del valor de la incertidumbre del método de ensayo, es fundamental cuando se utiliza una de regla de decisión para establecer un criterio normativo de aceptación y decidir si la muestra ensayada cumple o no. Esta regla describe cómo se tienen en cuenta la incertidumbre de medición cuando se declara conformidad con un requisito especificado (INTECO, 2017). Cuando se realiza una medición y en base a ella se realizan declaraciones de conformidad, por ejemplo, dentro o fuera de tolerancia de las especificaciones del fabricante o pasa/no pasa respecto a un requisito particular, existen dos posibles resultados: se realiza una decisión correcta sobre la conformidad con la especificación o se realiza una decisión incorrecta sobre la conformidad con la especificación. (ILAC - Cooperación Internacional de Acreditación de Laboratorios, 2019)

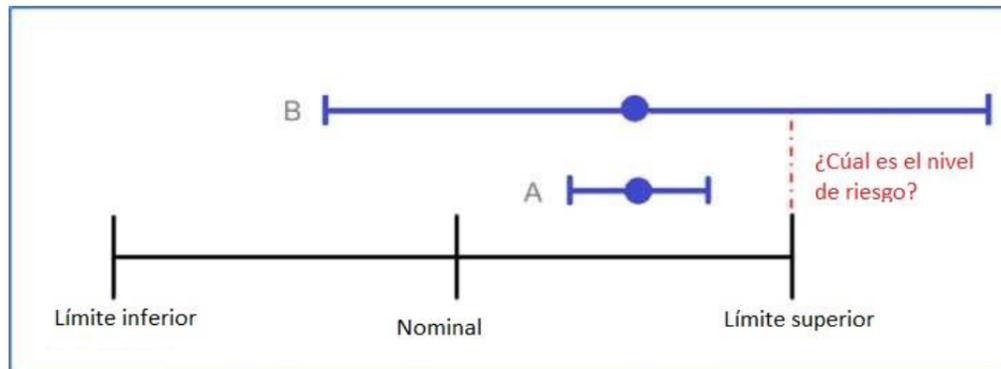


Figura 1. Ilustración del Riesgo de decisión en la medición

Cada valor medido tiene una incertidumbre de medida asociada. La figura 1. muestra dos resultados de mediciones idénticos, pero con diferentes incertidumbres de medida [3]. La incertidumbre expandida de medida en el resultado de abajo (caso A) está completamente dentro del límite de tolerancia. El caso de arriba (caso B) tiene una incertidumbre de medida mucho mayor. El riesgo de aceptar falsamente un resultado en el caso B es mayor debido a la gran incertidumbre de medida. (esto es: véase “¿Cuál es el nivel de riesgo?” en la figura 1)

Figura 39. Riesgo de decisión en la medición.

Fuente: (ILAC - Cooperación Internacional de Acreditación de Laboratorios, 2019)

La norma INTE/ISO/IEC 17025:2017, establece que los laboratorios evalúen la incertidumbre de medida y que apliquen una regla de decisión documentada cuando establezcan declaraciones de conformidad (INTECO, 2017), razón por la que en esta investigación se dedica este capítulo a su cálculo.

Para la determinación de la precisión de ambos métodos de ensayo de la deformación permanente APA y Hamburgo, en todas las mediciones realizadas por los técnicos de laboratorio, se valoraron todos los parámetros de norma, tanto para desviaciones estándar como para rango aceptable de resultados, de un solo operador y varios, según sea el caso. También, se realizó la estimación de la incertidumbre, que involucra la cuantificación de las fuentes de incertidumbre de la medición ($U \times k$, donde $k=2$).

En la prueba de hipótesis por cambio del técnico, se realizan entre 7 y 10 ensayos por cada técnico sobre la misma muestra y se realizó una gráfica de control utilizando el valor de la media de los valores obtenidos como referencia y el error permitido por norma para establecer los límites de control. Para el proceso de confección de especímenes de prueba para los ensayos de APA y Hamburgo, no existen parámetros de control por norma, por ello se valora el comportamiento de los especímenes moldeados, basándose en los

resultados de las pruebas aplicadas a estos, si no existe este parámetro, se utilizarán dos desviaciones estándar (2ds) para calcular dichos límites y así estar dentro del 95% de confianza.

5.1. Estimación de incertidumbre para la medición de la deformación permanente de las mezclas asfálticas por APA

5.1.1. Función de medición

La medición corresponde a una lectura directa del instrumento de medición, por lo que no existe una función de medición como tal. La identificación de las fuentes de incertidumbre de la medición se puede observar en la siguiente figura:

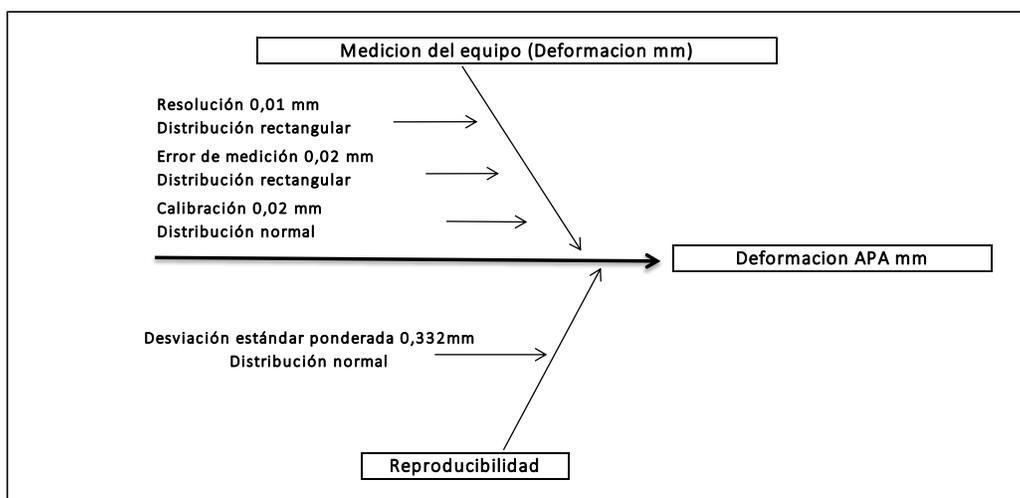


Figura 40. Diagrama de causa y efecto para fuentes de incertidumbre APA

5.1.2. Incertidumbres tipo B

La medición del equipo es directa se verifica su correcta medición con equipos denominados Vernier. Estimación de incertidumbre estándar asociada a medición de deformación, vernier LGC 068-005, certificado N.º 067-2019 M (ver anexo 1)

$$\text{i. Incertidumbre por resolución } (u_{\text{resol}}) = \frac{0,01}{2\sqrt{3}} = 0,003 \text{ mm}$$

$$\text{ii. Incertidumbre por error de medición } (u_{\text{em}}) = \frac{0,01}{\sqrt{3}} = 0,012 \text{ mm}$$

$$\text{iii. Incertidumbre por calibración } (u_{\text{cal}}) = \frac{0,02}{2} = 0,01 \text{ mm}$$

$$\text{iv. Incertidumbre estándar combinada } (u_c) = \sqrt{u_{\text{resol}}^2 + u_{\text{em}}^2 + u_{\text{cal}}^2}$$

$$v. \text{Incertidumbre estándar combinada } (u_c) = \sqrt{0,003^2 + 0,012^2 + 0,010^2} = \mathbf{0,016 \text{ mm}}$$

Cuadro 7. Estimación de la incertidumbre del vernier para medir las diferentes alturas de comprobación del equipo.

Código de equipo	Certificado calibración	Resolución (mm)	Error medición (mm)	U _{exp} 95% (mm)	U _{res}	U _{em}	U _{cal}	Incertidumbre estándar combinada (u _c)
					D. rectangular	D. rectangular	D. normal	
LGC 068-004	066-2019 M	0,01	0,01	0,02	0,003	0,006	0,010	0,012
LGC 068-005	067-2019 M	0,01	0,02	0,02	0,003	0,012	0,010	0,016

5.1.3. Incertidumbre tipo A

En cuanto a la estimación de incertidumbre estándar por reproducibilidad, se realizó un análisis de varianza de un sólo factor para determinar si existe diferencia significativa de los resultados entre técnicos. De no existir esta diferencia se calcula una desviación estándar ponderada, que corresponde a la incertidumbre estándar por reproducibilidad.

Cuadro 8. Repeticiones del ensayo APA

n	Técnicos									
	JMBC	AAM								
	Técnico 1	Técnico 2	Técnico 3	Técnico 4	Técnico 5	Técnico 6	Técnico 7	Técnico 8	Técnico 9	Técnico 10
1	1,806	2,523								
2	2,222	1,776								
3	2,114	1,906								
4	2,235	2,168								
5	2,691	2,183								
6	2,851	2,334								
7	2,706	2,114								
Y _i promedio	2,375	2,143	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
S _{y_i}	0,381	0,250	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Σy _i	16,623	15,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Σ(Σy _i) ²	501,338	ΣΣy _i	31,624	Σ(Σy _i) ²	72,865					
	Suma cuadrados		gl							
Entre grupos	SSA	0,188	1	S _b ²	0,1878044	F_{calc}	1,809			
Dentro grupos	SSE	1,246	12	S _w ²	0,1038107	F_{crit}	4,747			
Total	SST	1,434	13	gl = N-1	6					
Sp	0,332			gl a usar	12			Sy _i máxima	0,381	

Cuadro 9. Fórmulas para análisis de varianza de un factor (ANOVA)

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados (MS)	F	Valor crítico para F
Entre grupos (tratamientos)	$SSA = \frac{\sum_{j=1}^k (\sum_{i=1}^n y_{ij})^2}{n} - \frac{(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k y_{ij})^2}{nk}$	k-1	$s_b^2 = \frac{SSA}{k-1}$	$f_{calc} = \frac{s_b^2}{s_w^2}$	f_{crit}
Dentro de grupos (aleatorio)	$SSE = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k y_{ij}^2 - \frac{\sum_{j=1}^k (\sum_{i=1}^n y_{ij})^2}{n}$	k(n-1)	$s_w^2 = \frac{SSE}{k(n-1)}$		
Total	SST=SSA+SSE	kn-1			
Incertidumbre estándar ponderada	$S_p = \sqrt{\frac{SST}{kn-1}}$	Si $f_{calc} > f_{crit}$: se asegura que, para un nivel de confianza dado, los efectos debidos al factor en estudio son significativamente mayores que los efectos aleatorios			

Para el análisis de varianza se utiliza un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$. Si se determina que existe una diferencia significativa de los resultados entre técnicos ($f_{calc} > f_{crit}$), no es válido el cálculo de una desviación estándar ponderada. En este caso, se toma para la estimación de incertidumbre la mayor desviación estándar entre técnicos con sus respectivos grados de libertad.

La desviación estándar máxima del ensayo es igual a 0,332 con 12 grados de libertad.

i. Incertidumbre estándar por repetibilidad (u_{rep}) = 0,332

5.1.4. Coeficientes de sensibilidad para la deformación permanente por APA en (mm)

Datos de prueba: lectura = 5,00 mm

$$\frac{\partial DP \text{ APA mm}}{\partial Lectura} = 1$$

5.1.5. Estimación de la incertidumbre estándar combinada

$$u_c(DP \text{ APA}) = \sqrt{(1 * u_{eq})^2 + (1 * u_{rep})^2}$$

$$u_c(DP \text{ APA}) = \sqrt{(1 * 0,016)^2 + (1 * 0,332)^2} = \mathbf{0,332 \text{ mm}}$$

Cuadro 10. Estimación de la incertidumbre combinada APA

Variable	Valor	Incertidumbre estándar (u_i)	Tipo distribución	Grados de libertad	Origen de información	Coficiente sensibilidad (C_i)	Contribución ($u_i * C_i$)
Incertidumbre tipo B	5,00	0,016	Normal	50	Tabla 2	1	0,016
Reproducibilidad	0,332	0,332	Normal	12	Tabla 7	1	0,332
					Incertidumbre combinada (u_c)		0,332

5.1.6. Incertidumbre expandida

Grados efectivos de libertad (fórmula de Welch-Satterwaite):

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{c_i^4 u^4(x_i)}{v_i}}$$

Donde,

v_{eff} = grados efectivos de libertad

$u_c(y)$ = incertidumbre expandida

$u(x_i)$ = incertidumbres estándar de cada contribución

c_i = coeficiente de sensibilidad

v_i = grados de libertad de cada contribución de incertidumbre

Esta fórmula es aplicable cuando el $f_{calc} < f_{crit}$, y se puede utilizar la desviación estándar ponderada, de lo contrario no es aplicable. Para este caso es aplicable por lo tanto los grados de libertad son:

$$v_{efectivos} = \frac{0,332^4}{\frac{0,016^4 \cdot 1^4}{50} + \frac{0,332^4 \cdot 1^4}{12}} = 12$$

$$v_{efectivos} = 12$$

T student a un nivel de confianza p de 95 % (ver anexo 2) para 12 grados efectivos de libertad igual a:

$$t_{95\%}(v_{eff}) = 2,18$$

$$Incertidumbre\ expandida\ 95\ \% = U_{95\%} = t_{95\%}(v_{eff}) \cdot u_c = k \cdot u_c = 2,18 \cdot 0,332 = \mathbf{0,724}$$

Cuadro 11. Estimación de la incertidumbre expandida APA.

Variable	Valor	Incertidumbre estandar (u_i)	Tipo distribución	Grados de libertad	Origen de información	Coefficiente sensibilidad (C_i)	Contribucion ($u_i \cdot C_i$)
Incertudumbre tipo B	5,00	0,016	Normal	50	Tabla 2	1	0,016
Reproducibilidad	0,332	0,332	Normal	12	Tabla 7	1	0,332
					Incertidumbre combinada (u_c)		0,332
					Grados efectivos de libertad (v_{ef})		12
					Probabilidad de cobertura (P)		95
					Factor de cobertura (k)		2,179
					Incertidumbre expandida (U_{exp})		0,724

El resultado de ensayo se reportaría de la siguiente manera:

- Deformación Permanente APA (mm) = $(5 \pm 0,724)$ (k = 2,18; 95 %; distribución normal)
- Deformación Permanente APA (mm) = $(5 \text{ mm} \pm 14,5 \%)$ (k = 2,18; 95 %; distribución normal)

5.2. Estimación de incertidumbre para la medición de la deformación permanente de las mezclas asfálticas por rueda de Hamburgo

5.2.1. Función de medición

La medición corresponde a una lectura directa del instrumento de medición, por lo que no existe una función de medición como tal.

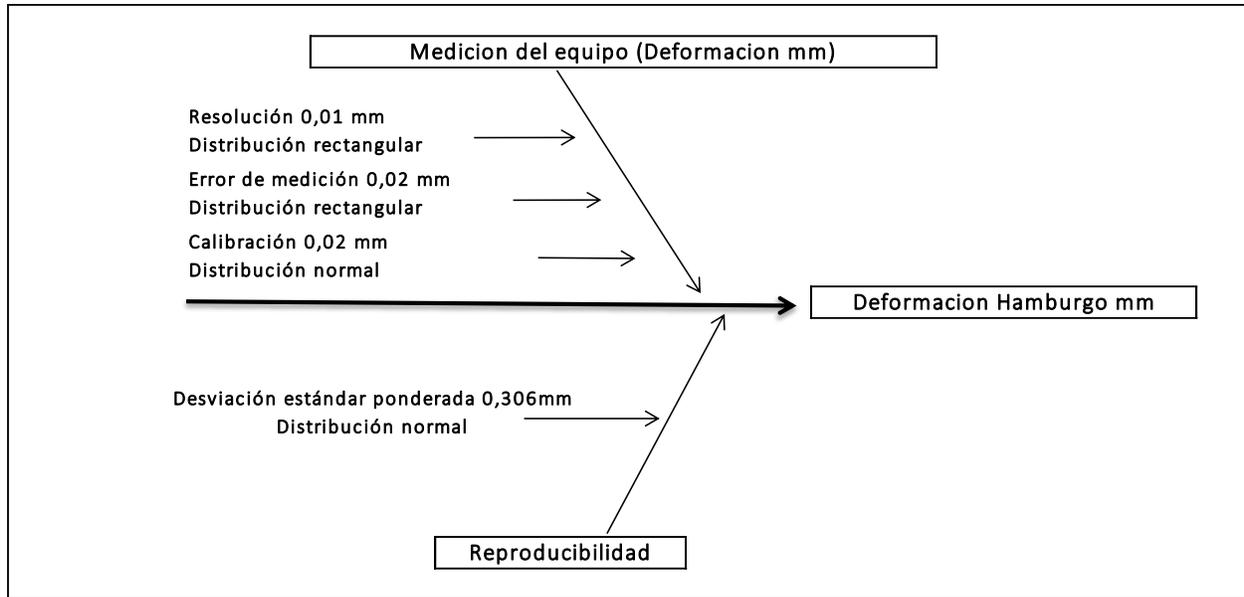


Figura 41. Diagrama de causa y efecto para fuentes de incertidumbre para Rueda de Hamburgo

5.2.2. Incertidumbres tipo B

Esta incertidumbre se estima por medios distintos a la evaluación estadística. Debido a que la medición del equipo es directa se verifica su correcta medición con equipos denominados Vernier.

La estimación de incertidumbre estándar asociada a medición de deformación, vernier LGC 068-005, certificado N° 067-2019 M (ver anexo).

- i. Incertidumbre por resolución (u_{resol}) = $\frac{0,01}{2\sqrt{3}} = 0,003 \text{ mm}$
- ii. Incertidumbre por error de medición (u_{em}) = $\frac{0,01}{\sqrt{3}} = 0,012 \text{ mm}$
- iii. Incertidumbre por calibración (u_{cal}) = $\frac{0,02}{2} = 0,01 \text{ mm}$
- iv. Incertidumbre estándar combinada (u_c) = $\sqrt{u_{resol}^2 + u_{em}^2 + u_c^2}$
- v. Incertidumbre estándar combinada (u_c) = $\sqrt{0,003^2 + 0,012^2 + 0,010^2} = \mathbf{0,016 \text{ mm}}$

Cuadro 12. Estimación de la incertidumbre de medición del vernier en diferentes alturas.

Código de equipo	Certificado calibración	Resolución (mm)	Error medición (mm)	U _{exp} 95% (mm)	U _{res}	U _{em}	U _{cal}	Incertidumbre estándar combinada (u _c)
					D. rectangular	D. rectangular	D. normal	
LGC 068-004	066-2019 M	0,01	0,01	0,02	0,003	0,006	0,010	0,012
LGC 068-005	067-2019 M	0,01	0,02	0,02	0,003	0,012	0,010	0,016

5.2.3. Incertidumbre tipo A

Para la estimación de incertidumbre estándar por reproducibilidad, se realiza un análisis de varianza de un sólo factor para determinar si existe diferencia significativa de los resultados entre técnicos. De no existir esta diferencia se calcula una desviación estándar ponderada, que corresponde a la incertidumbre estándar por reproducibilidad.

Cuadro 13. Repetibilidad y análisis de varianza de un factor

n	Técnicos									
	JMBC	AAM								
	Técnico 1	Técnico 2	Técnico 3	Técnico 4	Técnico 5	Técnico 6	Técnico 7	Técnico 8	Técnico 9	Técnico 10
1	2,008	2,822								
2	2,161	2,080								
3	2,712	2,932								
4	2,369	2,670								
5	2,686	2,508								
6	2,817	2,887								
7	2,351	2,411								
ȳ _{promedio}	2,443	2,616	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
S _y	0,304	0,305	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Σȳ _i	17,104	18,310	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Σ(Σȳ _i) ²	627,803	Σȳ _y	35,414	Σ(Σȳ _i) ²	90,800					
	Suma cuadrados		gl							
Entre grupos	SSA	0,104	1	S _o ²	0,1038883	F_{calc}	1,119			
Dentro grupos	SSE	1,114	12	S _w ²	0,0928006	F_{crit}	4,747			
Total	SST	1,217	13	gl = N-1	6					
Sp	0,306			gl a usar	12			S _y , máxima	0,305	

Cuadro 14. Fórmulas para análisis de varianza de un factor (ANOVA)

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados (MS)	F	Valor crítico para F
Entre grupos (tratamientos)	$SSA = \frac{\sum_{j=1}^k (\sum_{i=1}^n y_{ij})^2}{n} - \frac{(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k y_{ij})^2}{nk}$	k-1	$s_b^2 = \frac{SSA}{k-1}$	$f_{calc} = \frac{s_b^2}{s_w^2}$	f_{crit}
Dentro de grupos (aleatorio)	$SSE = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k y_{ij}^2 - \frac{\sum_{j=1}^k (\sum_{i=1}^n y_{ij})^2}{n}$	k(n-1)	$s_w^2 = \frac{SSE}{k(n-1)}$		
Total	SST=SSA+SSE	kn-1			
Incertidumbre estándar ponderada	$S_p = \sqrt{\frac{SST}{kn-1}}$	Si $f_{calc} > f_{crit}$: se asegura que, para un nivel de confianza dado, los efectos debidos al factor en estudio son significativamente mayores que los efectos aleatorios.			

Para el análisis de varianza se utiliza un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$. Si se determina que existe una diferencia significativa de los resultados entre técnicos ($f_{calc} > f_{crit}$), no es válido el cálculo de una desviación estándar ponderada. En este caso, se toma para la estimación de incertidumbre la mayor desviación estándar entre técnicos con sus respectivos grados de libertad.

La desviación estándar máxima del ensayo es igual a 0,306 con 12 grados de libertad.

- Incertidumbre estándar por repetibilidad (u_{rep}) = 0,306

5.2.4. Coeficientes de sensibilidad para la deformación permanente por Rueda de Hamburgo en (mm)

Datos de prueba:

Lectura = 5,00 mm

$$\frac{\partial DP \text{ HAMBURGO } mm}{\partial \text{Lectura}} = 1$$

5.2.5. Estimación de la incertidumbre estándar combinada

$$u_c(DP HAMBURGO) = \sqrt{(1 * u_{eq})^2 + (1 * u_{rep})^2}$$

$$u_c(DP HAMBURGO) = \sqrt{(1 * 0,016)^2 + (1 * 0,306)^2} = 0,306 \text{ mm}$$

Cuadro 15. Estimación de la incertidumbre combinada.

Variable	Valor	Incertidumbre estándar (u_i)	Tipo distribución	Grados de libertad	Origen de información	Coficiente sensibilidad (C_i)	Contribución ($u_i * C_i$)
Incertidumbre tipo B	5,00	0,016	Normal	50	Tabla 2	1	0,016
Reproducibilidad	0,306	0,306	Normal	12	Tabla 8	1	0,306
					Incertidumbre combinada (u_c)		0,306

5.2.6. Incertidumbre expandida

Grados efectivos de libertad (fórmula de Welch-Satterwaite):

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{c_i^4 u_i^4(x_i)}{v_i}}$$

Donde,

v_{eff} = grados efectivos de libertad

$u_c(y)$ = incertidumbre expandida

$u(x_i)$ = incertidumbres estándar de cada contribución

c_i = coeficiente de sensibilidad

v_i = grados de libertad de cada contribución de incertidumbre

Esta fórmula es aplicable cuando el $f_{calc} < f_{crit}$, y se puede utilizar la desviación estándar ponderada, de lo contrario no es aplicable. Para este caso es aplicable por lo tanto los grados de libertad son:

$$v_{efectivos} = \frac{0,306^4}{\frac{0,016^4 \cdot 1^4}{50} + \frac{0,306^4 \cdot 1^4}{12}} = 12$$

$$v_{efectivos} = 12$$

T student a un nivel de confianza p de 95 % (ver anexo 2) para 12 grados efectivos de libertad igual a:

$$t_{95\%}(v_{eff}) = 2,18$$

$$Incertidumbre\ expandida\ 95\ \% = U_{95\%} = t_{95\%}(v_{eff}) \cdot u_c = k \cdot u_c = 2,18 \cdot 0,306 = 0,668$$

Cuadro 16. Estimación de la incertidumbre expandida

Variable	Valor	Incertidumbre estandar (u_i)	Tipo distribución	Grados de libertad	Origen de información	Coefficiente sensibilidad (C_i)	Contribución ($u_i^2 C_i$)
Incertudumbre tipo B	5,00	0,016	Normal	50	Tabla 2	1	0,016
Reproducibilidad	0,306	0,306	Normal	12	Tabla 8	1	0,306
					Incertidumbre combinada (u_c)		0,306
					Grados efectivos de libertad (v_{ef})		12
					Probabilidad de cobertura (P)		95
					Factor de cobertura (k)		2,179
					Incertidumbre expandida (U_{exp})		0,668

El resultado de ensayo se reportaría de la siguiente manera:

- Deformación Permanente Hamburgo (mm) = (5 ± 0,668) (k = 2,18; 95 %; distribución normal)
- Deformación Permanente Hamburgo (mm) = (5 mm ± 13,4 %) (k = 2,18; 95 %; distribución normal)

CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En esta sección se muestran los resultados de las propiedades volumétricas y deformación permanente que se realizaron a los especímenes moldeados con el compactador giratorio y núcleos extraídos de MAC para las principales plantas productoras del país. A una misma mezcla asfáltica, se le realizaron ambos ensayos de deformación permanente (APA y Rueda de Hamburgo), determinándose los valores de ahuellamientos para cada una de las mezclas asfálticas ensayadas. Además, se obtuvieron los principales parámetros volumétricos de cada MAC mediante especímenes remoldeados.

6.1. Parámetros volumétricos de la MAC

Una vez muestreada la mezcla asfáltica, en el laboratorio de LGC Ingeniería de Pavimentos S.A. se realizaron los procedimientos estandarizados usuales de reducción de muestras y preparación de la MAC para ser sometida a los métodos de ensayo acreditados y obtener los principales parámetros volumétricos de la mezcla, los cuales se muestran de forma resumida en el siguiente cuadro:

Cuadro 17. Resultados de parámetros volumétricos de la MAC por planta productora.

Centro de producción	Planta A	Planta B	Planta C	Planta D
Parámetro	Resultados obtenidos			
Gravedad Específica de las pastillas	2.341	2.366	2.358	2.340
Gravedad Específica Máxima Teórica	2.446	2.468	2.452	2.470
Estabilidad (kgf)	1542	1752	1716	1661
Flujo (cm/100)	32.5	29.8	30.5	29.3
Contenido Asfalto/Agregado (%)	5.90	6.17	5.73	5.65
Contenido Asfalto/Mezcla (%)	5.54	5.73	5.38	5.31
Vacíos de Aire Totales (%)	4.3	4.1	3.8	5.3
VMA (%)	14.7	14.3	15.6	15.7
VFA (%)	71	71	75	66
Relación Polvo / Asfalto Efectivo (%)	1.9	1.3	1.4	1.4
Gravedad Específica Efectiva	2.659	2.695	2.659	2.677
Absorción Asfalto (%)	1.024	1.386	0.243	0.730
Gravedad Específica del Asfalto	1.035	1.035	1.036	1.039
Asfalto Efectivo (%)	4.573	4.424	5.150	4.619
GBS de fracción fina	2.556	2.515	2.631	2.617
GBS de fracción gruesa	2.632	2.646	2.654	2.638
GBS Combinados	2.590	2.601	2.642	2.627
Análisis granulométrico	Porcentaje pasando (%)			
Tamiz 25,4 mm	100	100	100	100

Centro de producción	Planta A	Planta B	Planta C	Planta D
Tamiz 19,0 mm	100	97	100	100
Tamiz 12,7 mm	94	83	96	98
Tamiz 9,5 mm	81	50	82	85
Tamiz N° 4	55	34	52	51
Tamiz N° 8	35	24	34	28
Tamiz N° 16	25	17	25	20
Tamiz N° 30	18	13	19	15
Tamiz N° 50	14	9	14	12
Tamiz N° 200	8.5	5.7	7.3	6.4
Identificación de la Muestra	01-16756-2021	01-19405-2021	01-20555-2021	01-20566-2021

Cuadro 18. Resultados de parámetros volumétricos de la MAC por planta productora (continuación)

Centro de producción	Planta D	Planta E	Planta F	Planta G
Parámetro	Resultados obtenidos			
Gravedad Específica de las pastillas	2.340	2.367	2.387	2.411
Gravedad Específica Máxima Teórica	2.470	2.469	2.498	2.506
Estabilidad (kgf)	1661	1683	1712	2033
Flujo (cm/100)	29.3	28.0	29.3	31.8
Contenido Asfalto/Agregado (%)	5.65	5.06	5.27	5.70
Contenido Asfalto/Mezcla (%)	5.31	5.73	5.56	5.36
Vacíos de Aire Totales (%)	5.3	4.1	4.4	3.8
VMA (%)	15.7	14.5	15.0	14.4
VFA (%)	66	71	70	74
Relación Polvo / Asfalto Efectivo (%)	1.4	1.2	1.1	1.2
Gravedad Específica Efectiva	2.677	2.694	2.724	2.725
Absorción Asfalto (%)	0.730	0.889	0.804	0.861
Gravedad Específica del Asfalto	1.039	1.039	1.038	1.036
Asfalto Efectivo (%)	4.619	4.892	4.800	4.546
GBS de fracción fina	2.617	2.641	2.680	2.610
GBS de fracción gruesa	2.638	2.628	2.658	2.720
GBS Combinados	2.627	2.634	2.667	2.665
Análisis granulométrico	Porcentaje pasando (%)			
Tamiz 25,4 mm	100	100	100	100
Tamiz 19,0 mm	100	100	100	100
Tamiz 12,7 mm	98	86	94	93
Tamiz 9,5 mm	85	73	76	84

Centro de producción	Planta D	Planta E	Planta F	Planta G
Tamiz N° 4	51	44	42	50
Tamiz N° 8	28	28	30	32
Tamiz N° 16	20	20	23	21
Tamiz N° 30	15	15	17	15
Tamiz N° 50	12	12	11	11
Tamiz N° 200	6.4	6.0	5.3	5.4
Identificación de la Muestra	01-20566-2021	01-20567-2021	01-20749-2021	01-23823-2021

Cuadro 19. Resumen de estadísticos descriptivos de los parámetros volumétricos de la MAC

Parámetro	Estadísticos descriptivos				
	Promedio	Desviación estándar	Máximo	Mínimo	Coefficiente de variación
Gravedad Específica de las pastillas	2.367	0.025	2.411	2.340	0.01
Gravedad Específica Máxima Teórica	2.473	0.022	2.506	2.446	0.01
Estabilidad (kgf)	1728	150	2033	1542	0.09
Flujo (cm/100)	30.2	1.6	32.5	28.0	0.05
Contenido Asfalto/Agregado (%)	5.64	0.37	6.17	5.06	0.07
Contenido Asfalto/Mezcla (%)	5.52	0.17	5.73	5.31	0.03
Vacíos de Aire Totales (%)	4.3	0.5	5.3	3.8	0.12
VMA (%)	14.9	0.6	15.7	14.3	0.04
VFA (%)	71	3	75	66	0.04
Relación Polvo / Asfalto Efectivo (%)	1.4	0.2	1.9	1.1	0.18
Gravedad Específica Efectiva	2.690	0.028	2.725	2.659	0.01
Absorción Asfalto (%)	0.848	0.343	1.386	0.243	0.40
Gravedad Específica del Asfalto	1.037	0.002	1.039	1.035	0.00
Asfalto Efectivo (%)	4.71	0.25	5.15	4.42	0.05
GBS de fracción fina	2.607	0.055	2.680	2.515	0.02
GBS de fracción gruesa	2.654	0.031	2.720	2.628	0.01
GBS Combinados	2.632	0.029	2.667	2.590	0.01
Análisis granulométrico	Porcentaje pasando (%)				
Tamiz 25,4 mm	100	0	100	100	0.00
Tamiz 19,0 mm	100	1	100	97	0.01
Tamiz 12,7 mm	92	6	98	83	0.06
Tamiz 9,5 mm	76	12	85	50	0.16
Tamiz N° 4	47	7	55	34	0.15
Tamiz N° 8	30	4	35	24	0.13

Parámetro	Estadísticos descriptivos				
	Promedio	Desviación estándar	Máximo	Mínimo	Coefficiente de variación
Tamiz N° 16	22	3	25	17	0.12
Tamiz N° 30	16	2	19	13	0.14
Tamiz N° 50	12	2	14	9	0.17
Tamiz N° 200	6.4	1.2	8.5	5.3	0.18

Es conveniente describir, de forma general la tendencia de estos parámetros en los centros de producción que se consideraron y sus fuentes de agregados, con el fin de conocer el orden de magnitud de los resultados de las MAC analizadas según los cuadros anteriores. Así las cosas, la materia prima ensayada posee gravedades específicas de las pastillas moldeadas de 2,367 en promedio; las gravedades específicas máximas teóricas de las mezclas se ubican entre 2,446 y 2,506; valores típicos para las MAC del país. Es usual, que las MAC de Costa Rica superen por mucho los rangos mínimos de estabilidad (mayor a 800 kgf) que en la mayoría de los casos es más del doble al solicitado, no obstante, llama la atención la desviación estándar tan alta entre las MAC analizadas el cual es de 150,01 kgf según los datos mostrados en el cuadro anterior. En cuanto a flujo, es de esperar valores promedio de 30,2 cm/100 de las principales plantas productoras del país.

El contenido de asfalto sobre la mezcla promedio de las muestras analizadas fue de 5,52 % con valores entre los 5,31 % y 5,73 %. El porcentaje de vacíos de aire de las MAC estudiadas se encuentra entre los 3,0 % y 5,0 %, con excepción de la MAC de la Planta B, que alcanzó los 5,3 % de vacíos, valor que se encuentra fuera del máximo permitido. Los vacíos en el agregado mineral (VMA) promedian valores de 14,9 % cercanos al valor mínimo permitido. Contrario a lo expresado en el VFA, donde el promedio de los datos (71 %) se encuentran cercanos al límite máximo de 75 %. El promedio de las relaciones polvo/asfalto efectivo de las MAC se encuentra en 1,4; lo cual se sale del rango máximo utilizado típicamente a nivel nacional, e inclusive la Planta A obtiene 1,9 en esta misma variable. El anterior comportamiento, se puede explicar debido a los porcentajes pasando de las graduaciones en el tamiz #200⁹, lo que puede ocasionar mezclas más rígidas.

⁹ A lo largo de los años, se ha observado que la relación polvo/asfalto posee una interrogante en el límite de especificación superior de 1.3, ya que las fuentes del país tienden a dar resultados superiores y se ha detectado que la investigación para establecer el rango de la relación polvo/asfalto aún se encuentra en análisis. Esto con el fin de “tropicalizarla” a la realidad de los materiales de mezcla asfáltica presentes en las fuentes disponibles del país y se ha recomendado aumentar este límite superior a 1.6 según oficio LM-IC-D-0455-16 y LM-PI-130-2016 del LanammeUCR. Aunado a lo anterior, el oficio LM-IC-D-0722-2020 también del LanammeUCR, indica que se está realizando una investigación exhaustiva sobre este parámetro teniendo pendiente aún ensayos de laboratorio y análisis de resultados.

Las gravedades específicas de las mezclas asfálticas estudiadas, oscilan entre 2,659 y 2,725. En cuanto a las gravedades específicas del asfalto, es de esperar, que debido a que, en Costa Rica la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE) solo comercializa un tipo de ligante asfáltico (AC-30), estos valores en promedio se encuentran en 1,037; según los certificados de asfalto analizados para las 7 plantas productoras.

Por último, los análisis granulométricos de las MAC evidencian porcentajes pasando en el tamiz #4 de 47 % promedio. Se debe prestar atención, al detalle que el tamiz cuya desviación estándar es mayor (12.113 %) es el de abertura de 9,5 mm, y la Planta B es la que presenta 50 % pasando, la más baja en este mismo tamiz. La malla #30 según los resultados, tiene porcentajes pasando de 30 % y el tamiz #200 valores que oscilan entre 5,3 % (Planta F) hasta 8,5 % para la planta A. Los GBS de los agregados combinados, fueron proporcionados por los productores, quienes facilitaron el valor indicado en los diseños de mezcla asfáltica, estos oscilan entre el valor mínimo de 2,590 (Planta A) y como máximo 2,667 (Planta F) de los 7 centros de producción de MAC analizados. Según los resultados de Coeficiente de variación, el parámetro que mayor dispersión relativa presentó fue la absorción del asfalto con 0,40 lo cual indica una variabilidad moderada, seguido de la relación polvo/asfalto y el porcentaje pasando del tamiz N° 200 (ambos con C.V. = 0.18), que señalan baja variabilidad, los demás parámetros se encuentran con variabilidades bajas.

6.2. Resultados de deformación permanente

Para las 7 principales plantas productoras muestreadas, se sometió la MAC a ensayos empíricos de ciclos de carga bajo el método para determinar la deformación permanente y la susceptibilidad a la humedad con el dispositivo de ruedas de Hamburgo, según se señala en la norma AASHTO T 324, también con el método de ensayo para la determinación de la susceptibilidad a la deformación permanente de mezclas asfálticas para pavimento utilizando el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA) AASHTO T 340-10 (2015) y el número de ciclos en el que ocurre el punto de inflexión si es que se presentó. Cada muestra en el diferente ensayo tuvo 3 réplicas.

6.2.1. Resultados de Rueda de Hamburgo MAC moldeada

Cuadro 20. Resultados de Rueda de Hamburgo MAC Moldeada

Ensayos de Hamburgo	Réplica 1 Lado Izquierdo		Réplica 2 Lado Derecho		Réplica 3 Lado Izquierdo		Promedio General Deform. (mm)	Desviación Estándar (mm)	CV
	Máx. Deform. (mm)	Ciclo Máx. Deform.	Máx. Deform. (mm)	Ciclo Máx. Deform.	Máx. Deform. (mm)	Ciclo Máx. Deform.			
Planta A	5.682	19996	4.924	19996	5.072	19896	5.226	0.393	0.075
Planta B	3.267	19860	4.532	19942	3.705	19801	3.834	0.510	0.133
Planta C	4.308	19976	4.533	19816	4.294	19797	4.378	0.153	0.035
Planta D	3.829	19902	3.803	19870	3.628	19787	3.753	0.130	0.035
Planta E	5.063	19876	3.943	19404	4.278	19542	4.428	0.483	0.109
Planta F *	3.748	19610	3.419	19604	3.454	19509	3.540	0.215	0.061
Planta G	3.834	19724	3.898	19738	3.723	19632	3.818	0.123	0.032
Promedio							4.140	0.287	0.069

* MAC SuperPave

Como se puede observar en el cuadro anterior, el ciclo de deformación máxima se da muy cerca de las 20 000 pasadas de la prueba para todas las muestras. Los resultados que mayor dispersión relativa presentaron fueron las plantas B y E, sin embargo, de forma general se considera de baja variabilidad. La deformación permanente promedio de todas las muestras es igual a 4,14 mm. Ninguna de las réplicas de las muestras de cada planta productora presentó, en el gráfico de deformación permanente versus el número de ciclos, algún punto de inflexión que indicara el daño por humedad (ver anexo 3). Las muestras de los centros de producción A, C y E son las que presentaron mayor deformación permanente (superior a 4,300 mm) y contrario a esto, los especímenes correspondientes a la planta F son los que menor ahuellamiento tuvieron (menor a 3,540 mm).

6.2.2. Resultados de APA MAC moldeada

Cuadro 21. Resultados de APA MAC Moldeada

Ensayos de APA	Réplica 1 Lado Izquierdo Deformación (mm) Promedio	Réplica 2 Lado Derecho Deformaciones (mm) Promedio	Réplica 3 Lado Izquierdo Deformaciones (mm) Promedio	Promedio General Deform. (mm)	Desviación Estándar (mm)	CV
Planta						
Planta A	2.225	2.027	2.070	2.107	0.093	0.044
Planta B	1.592	2.236	1.820	1.883	0.283	0.150
Planta C	3.335	3.006	3.225	3.189	0.157	0.049
Planta D	2.293	2.407	2.257	2.319	0.086	0.037
Planta E	2.006	2.887	2.339	2.411	0.383	0.159
Planta F *	1.779	1.699	1.897	1.792	0.090	0.050
Planta G	2.847	3.616	3.126	3.196	0.336	0.105
			Promedio	2.414	0.204	0.085

* MAC SuperPave

Los resultados anteriores, denotan coeficientes de variación menores a 16 %, lo que indica que los resultados obtenidos de cada una de las 3 réplicas son compactos. El orden de magnitud de la deformación permanente por medio del ensayo de APA según el promedio general es de 2,4 mm. Las muestras ensayadas de las plantas C y G presentaron la mayor deformación (superior a 3,180 mm) y las plantas B y F tuvieron muestras con ahuellamientos menores a 1,900 mm.

Nótese en las muestras pertenecientes a las plantas C y F, hay coincidencia en que la muestra que presentó la mayor deformación permanente determinada con el ensayo APA, resulte en la planta con mayor ahuellamiento si se realiza con el ensayo de Rueda de Hamburgo, esto en el caso de la planta C. También, referente a los resultados de la planta con menor deformación permanente utilizando la norma AASHTO T-340, corresponde a resultados con ahuellamientos menores bajo el estándar AASHTO T-324 (planta F).

6.2.3. Deformación permanente de núcleos extraídos en campo

Para dos de las plantas productoras de MAC estudiadas, fue posible obtener muestras de núcleos aserrados, extraídos en campo, de la misma producción de MAC y que cumplieran con los espesores mínimos establecidos en las normas AASHTO T340 y AASHTO T324. Para núcleos de MAC compactada (extraídos en campo) la norma AASHTO T-324 expresa en el punto 6.4.1 que el espesor típico es de 38 mm, sin embargo, si el núcleo es más pequeño se pueden utilizar calzas o cuñas. Este último aditamento, podría

generar alguna afectación por el reflejo de la reacción de la carga aplicada en la superficie. Esta misma norma, en otro apartado para mezcla moldeada, numeral 6.2.6.1, indica que el espesor de la muestra debe ser al menos el doble del tamaño máximo nominal del agregado, lo que generalmente produce una muestra de 38 a 100 mm (1,5 a 4 pulgadas) de espesor. En cuanto a los espesores mínimos de los núcleos de MAC compactada, utilizando el estándar internacional de APA, AASHTO T-340, el punto 4.2.1 dice que el espécimen deberá tener un mínimo de 50 mm (2 pulg.) de altura con todas las superficies del perímetro perpendiculares a la superficie del núcleo dentro de 5 mm (0,2 pulg.) y agrega que se puede utilizar yeso blanco para lograr la altura de la prueba adecuada. Lo anterior, es fundamental de conocer antes de proceder con análisis para deformación permanente de muestras de campo, e inclusive las tolerancias de diámetros de ambas pruebas están sujetas a que el equipo extractor utilizado, tenga estas dimensiones internas. Por lo anterior, es que estas dos plantas productoras (A y F) y sus proyectos asociados, cumplieran las condiciones mínimas para llevar a cabo estos ensayos.

Otro aspecto relevante, en el caso de ensayar núcleos aserrados de MAC compactada, es que el porcentaje de vacíos que señalan las normas mencionadas anteriormente de $7,0 \pm 0,5 \%$, difícilmente se obtienen en los núcleos extraídos, ya que el método de compactación influye en gran medida al ahuellamiento de la mezcla asfáltica y el espíritu de este porcentaje de vacíos es ensayar muestras en una condición crítica, puesto que un espécimen con vacíos altos es más susceptible a la deformación permanente producto de las cargas cíclicas. Este es el factor más controversial a la hora de analizar resultados de deformación permanente de MAC compactada, sin embargo, ambas normas AASHTO T324 (numeral 7.3) y AASHTO T340 (punto 4.21.) permiten ensayar estos especímenes con el porcentaje de vacíos real que presenta en campo.

Una alternativa para buscar obtener especímenes compactados de campo con porcentajes de vacíos cercanos a las muestras moldeadas en laboratorio ($7,0 \pm 0,5 \%$) puede ser realizar un “mapeo” distribuyendo los ensayos a lo largo y ancho sobre el tramo de estudio con la prueba, no destructiva, de porcentaje de compactación con densimetría nuclear (AASHTO T310) y de esta forma, al menos, seleccionar el sitio que presente menor densidad o porcentaje de compactación de la MAC y extraer las muestras en ese punto, lo que conllevaría a analizar las muestras representativas de la condición más crítica (con porcentajes de vacíos altos), si los resultados cumplen en esta condición, es de esperar que en el resto del tramo también cumplirían, lo que sería conservador.

La deformación permanente de núcleos de campo en esta investigación, se determinó para contrastar los resultados obtenidos en el punto anterior, utilizando MAC moldeada en laboratorio. En cuanto a la planta F, por las condiciones del proyecto donde se colocó esta mezcla, fue viable la obtención de más muestras

de campo, lo que contribuyó con mayor cantidad de datos que permitan describir el comportamiento de la deformación permanente. También, para la planta A, se realizó la extracción de especímenes cilíndricos del sitio, donde se colocó la misma vagoneta que se muestreó en planta. Los siguientes cuadros resumen los resultados obtenidos para ambos ensayos (Rueda de Hamburgo y APA):

Cuadro 22. Resultados de ensayo de Rueda de Hamburgo a núcleos extraídos en campo.

Núcleos de campo Rueda Hamburgo	Réplica 1 Lado Izquierdo Deformaciones (mm)		Réplica 2 Lado Derecho Deformaciones (mm)		Réplica 3 Lado Izquierdo Deformaciones (mm)		Promedio General	Desviación Estándar	CV	% Vacíos promedio	
	Máx. Deform.	Ciclo Máx. Deform.	Máx. Deform.	Ciclo Máx. Deform.	Máx. Deform.	Ciclo Máx. Deform.					
Planta A	4.389	19870	4.788	20006	4.301	19838	4.493	0.183	0.041	4.6	
Planta F * Sitio #1	5.259	19948	4.519	19822	4.649	19786	4.809	0.358	0.074	5.4	
Planta F * Sitio #2	3.518	18400	4.073	18386	3.528	18301	3.706	0.301	0.081	3.5	
Planta F * Sitio #3	3.575	19984	3.587	19860	3.298	19822	3.486	0.144	0.041	3.4	
* MAC SuperPave							Promedio	4.124	0.246	0.060	4.23

Según el cuadro anterior, para las muestras ensayadas la deformación permanente (Rueda de Hamburgo) en promedio resultó en 4,12 mm con desviaciones de las muestras ente 0,144 y 0,358 mm, lo que conlleva a coeficientes de variación menores a 9 % que indican variabilidad baja. Las muestras sometidas al ensayo poseen vacíos entre 3,4 % y hasta 5.6 %.

Cuadro 23. Resultados de ensayo de APA a núcleos extraídos en campo.

Núcleos de campo APA	Réplica 1 Lado Izquierdo Deformaciones (mm)	Réplica 2 Lado Derecho Deformaciones (mm)	Réplica 3 Lado Izquierdo Deformaciones (mm)	Promedio General	Desviación Estándar	CV	% Vacíos promedio	
Planta	Promedio	Promedio	Promedio					
Planta A	1.896	1.849	1.806	1.850	0.095	0.052	4.4	
Planta F * Sitio #1	2.032	2.548	2.826	2.469	0.351	0.142	6.3	
Planta F * Sitio #2	1.698	2.411	2.100	2.070	0.311	0.150	5.0	
Planta F * Sitio #3	2.037	2.138	2.112	2.096	0.066	0.031	4.2	
* MAC SuperPave				Promedio	2.121	0.206	0.097	4.98

Observando los resultados del cuadro anterior, el ahuellamiento promedio obtenido es de 2,12 mm con coeficientes de variación menores o iguales a 15,0 %. Estos núcleos extraídos, contienen porcentajes de vacíos que oscilan entre los 4,2 % y hasta 6,3 %.

Para todos los escenarios anteriores (muestras moldeadas en laboratorio y núcleos extraídos en campo), la deformación permanente obtenida por medio del ensayo de Rueda de Hamburgo es mayor que la obtenida por medio de la prueba de APA.

6.3. Características de los datos de deformación permanente

Como se explicó antes, la deformación que no se recupera y se acumula con cada repetición del ciclo de carga es la deformación permanente (Huamán Guerrero & Chang Albitres, 2011), y generalmente las especificaciones internacionales utilizan el promedio general de varios puntos de deformación, de ambos lados o líneas, medidos sobre el espécimen (5 puntos de deformación para Rueda de Hamburgo y 4 puntos en el caso de APA por lado, de acuerdo a la configuración del rack y moldes del equipo), sometido a la prueba para estimar el cumplimiento por parte del constructor, con respecto a una norma establecida en un contrato como se muestra a continuación:

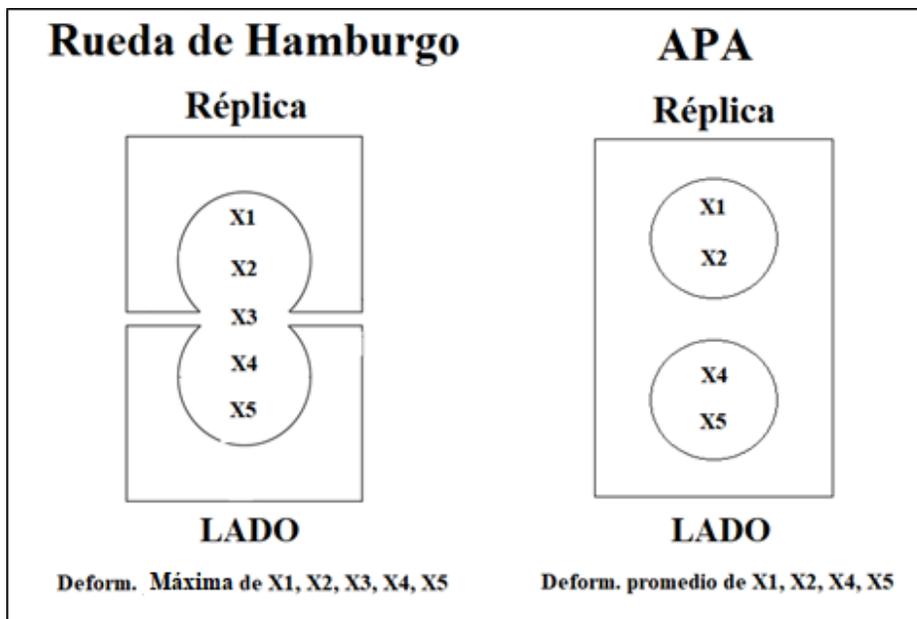


Figura 42. Puntos por lado donde se toma lectura de la deformación permanente en las pruebas.

El promedio es un estadístico aplicable para datos que proceden de una población cuya distribución es normal, sin embargo, los valores de deformación permanente no necesariamente provienen de una población con esta distribución.

Las muestras utilizadas en la investigación, provienen de plantas productoras distintas y fuentes de materiales diferentes, esto se puede evidenciar con los contrastes entre resultados de parámetros volumétricos de la MAC por planta productora de los cuadros 17 y 18, principalmente con el parámetro de densidad máxima, la cual se puede afirmar que es el ADN de una mezcla asfáltica, pues refleja características únicas de material compuesto y su proceso productivo. Por lo que, si se desea generalizar estos resultados de deformación permanente y utilizar estadísticos descriptivos entre resultados de varias plantas, es necesario comprobar que todos los datos de deformación o grupos de ellos, siguen una distribución normal.

Seguidamente, se procede a demostrar esta característica, a partir de toda la nube de datos de deformación permanente obtenidos de las plantas productoras seleccionadas, utilizando el equipo de Analizador de Pavimentos Asfálticos APA Jr. propiedad de LGC Ingeniería de Pavimentos S.A. Para el ensayo de APA, se tomaron 84 datos en total y en el caso de la prueba de Rueda de Hamburgo, 105 valores de deformación permanente. En ambas pruebas, todos los valores de ahuellamiento ubicados sobre el espécimen de ensayo que reporta el equipo formaron parte del análisis (5 puntos de deformación para Rueda de Hamburgo y 4 puntos en el caso de APA por lado).

Con la utilización de la herramienta informática de análisis estadístico Minitab®, se realizan las comprobaciones para determinar si los datos siguen una distribución normal. Para esto, se utilizó la prueba de normalidad de Anderson-Darling, definiéndose de la siguiente manera:

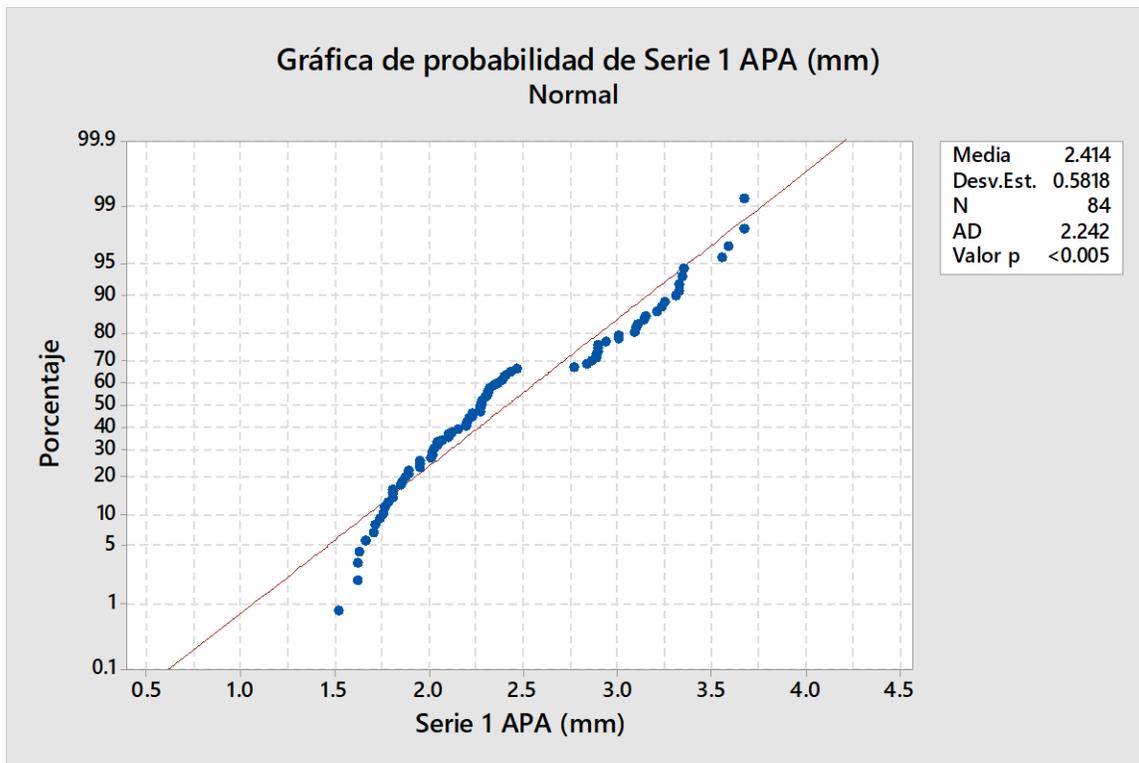
- H_0 : Los datos siguen una distribución normal
- H_1 : Los datos no siguen una distribución normal

Como medida cuantitativa para notificar los resultados de la prueba de normalidad, se emplea el “valor p”, ya que un valor p grande (mayor o igual a 0,05) es una indicación de que la hipótesis nula (H_0) es verdadera, por lo tanto, se concluiría que los datos siguen una distribución normal con un 95 % de confianza o más.

Cuadro 24. Series de datos del Ensayo de APA.

Centro de producción	Primera serie Deformación (mm)	Segunda serie Promedio de deformación (mm)
Planta A	2.222	2.225
	2.222	
	2.190	
	2.265	
	2.007	2.027
	2.017	
	2.042	
	2.042	
	2.066	2.070
	2.096	
	2.020	
2.099		
Planta B	1.623	1.592
	1.513	
	1.616	
	1.616	
	2.290	2.236
	2.151	
	2.195	
	2.308	
	1.847	1.820
	1.779	
1.801		
1.851		
Planta C	3.342	3.335
	3.323	
	3.326	
	3.347	
	2.997	3.006
	2.997	
	2.890	
	3.141	
	3.309	3.225
	3.249	
3.138		
3.203		
Planta D	2.268	2.293
	2.188	
	2.320	
	2.397	
	2.424	2.407
	2.463	
	2.359	
	2.382	
	2.273	2.257
	2.209	
2.270		
2.277		
Planta E	1.949	2.006
	1.949	
	2.115	
	2.011	
	2.835	2.887
	2.933	
	2.890	
	2.890	
	2.297	2.339
	2.341	
2.405		
2.312		
	1.752	1.779

Centro de producción	Primera serie Deformación (mm)	Segunda serie Promedio de deformación (mm)
Planta F	1.757	1.699
	1.805	
	1.800	
	1.697	
	1.655	
	1.711	
	1.734	
	1.884	
	1.866	
	1.948	
Planta G	1.890	2.847
	2.883	
	2.883	
	2.860	
	2.763	
	3.551	
	3.665	
	3.665	
	3.581	
	3.093	
Planta G	3.100	3.126
	3.229	
	3.082	



*Figura 43. Prueba de normalidad primera serie de resultados de APA.
Fuente: (Minitab 18.1, LLC, 2021).*

Según la figura anterior, el valor de $p < 0,05$ por lo que se concluye que los datos de APA de la primera serie, no siguen una distribución normal.

Cuadro 25. Series de datos del ensayo de Rueda de Hamburgo.

Centro de Producción	Primera serie Deformación (mm)	Segunda serie Máxima deformación (mm)
Planta A	4.865	5.682
	5.465	
	5.433	
	5.649	
	5.682	
	4.369	4.924
	4.860	
	4.823	
	4.924	
	4.924	
	4.386	5.072
	4.954	
	4.872	
5.072		
5.038		
Planta B	3.110	3.267
	3.110	
	3.221	
	3.221	
	3.267	
	4.180	4.532
	4.126	
	4.474	
	4.423	
	4.532	
	3.513	3.705
	3.487	
	3.655	
3.681		
3.705		
Planta C	4.113	4.308
	4.113	
	4.308	
	4.280	
	4.296	
	4.178	4.533
	4.410	
	4.410	
	4.533	
	4.533	
	4.038	4.294
	4.099	
	4.191	
4.286		
4.294		
Planta D	3.694	3.829
	3.580	

Centro de Producción	Primera serie Deformación (mm)	Segunda serie Máxima deformación (mm)
	3.817	
	3.829	
	3.786	
	3.570	
	3.566	3.803
	3.691	
	3.703	
	3.803	
	3.451	3.628
	3.394	
	3.616	
	3.628	
3.605		
3.605		
Planta E	4.775	5.063
	4.815	
	4.913	
	4.913	
	5.063	
	3.639	3.943
	3.739	
	3.826	
	3.826	
	3.943	4.278
	4.092	
	4.092	
	4.201	
	4.151	
4.278		
Planta F	3.748	3.748
	3.714	
	3.513	
	3.513	
	3.633	3.419
	3.419	
	3.284	
	3.284	
	3.115	
	3.062	3.454
	3.454	
	3.324	
	3.229	
	3.148	
3.230		
Planta G	3.834	3.834
	3.759	
	3.759	
	3.639	
	3.639	3.898
	3.898	
	3.765	
	3.657	
	3.641	3.723
	3.641	
	3.723	
	3.624	
	3.573	
	3.458	
3.458		

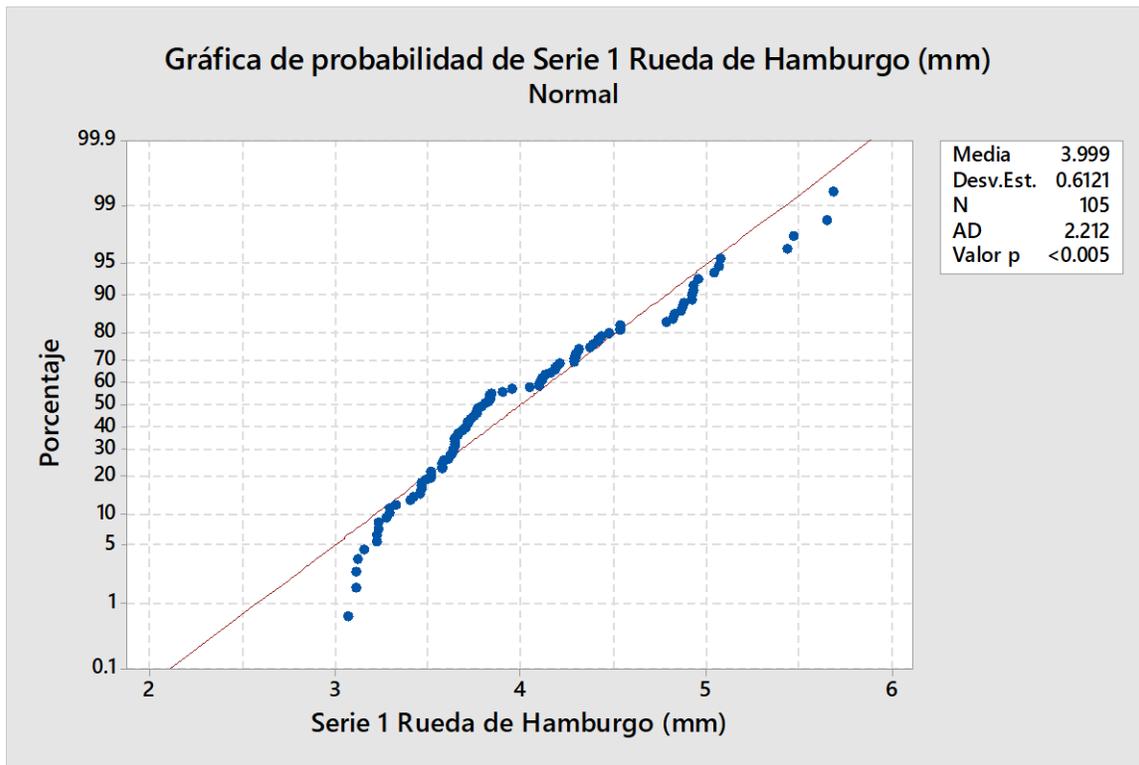
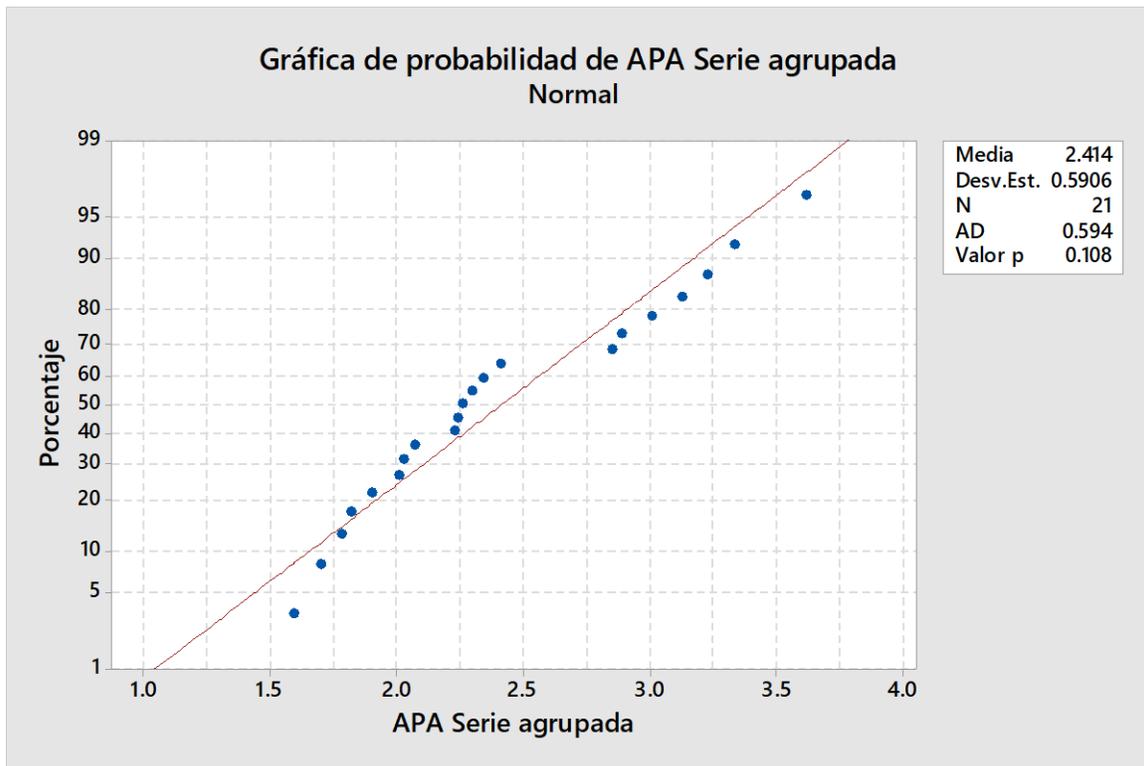


Figura 44. Prueba de normalidad primera serie de datos de Rueda de Hamburgo.
Fuente: (Minitab 18.1, LLC, 2021).

Según la figura anterior, el valor de $p < 0,05$ por lo que se concluye que la primera serie de datos de resultados para el ensayo de Rueda de Hamburgo, no siguen una distribución normal.

Por otra parte, el Teorema de Límite Central permite trabajar con los promedios de deformación, a pesar de que la distribución de estos datos no sea normal. En el caso de una población cualquiera con media μ y varianza σ^2 , la distribución de las medias de las muestras \bar{X} , obtenida a partir de todas las muestras aleatorias de tamaño n de la población, estará distribuida aproximadamente en forma normal si el tamaño n de las muestras es grande. (Nieves Hurtado & Domínguez Sánchez, 2010).

Por lo anterior, se procede a agrupar la serie de datos utilizando los promedios de deformación por línea o pista (réplica) en el caso de APA; y para el ensayo de Rueda de Hamburgo, se toma la deformación mayor registrada en la línea o pista (réplica). Se realiza de nuevo las comprobaciones para determinar si los datos de las segundas series agrupadas siguen una distribución normal. De igual forma, en las siguientes figuras, se muestran los resultados agrupados de la nueva serie de datos y el gráfico de normalidad asociado, los datos de la segunda serie agrupada, se muestran en la tercera columna del cuadro 24 (APA) y del cuadro 25 (Rueda de Hamburgo):



*Figura 45. Prueba de normalidad segunda serie de datos (agrupada) de APA.
Fuente: (Minitab 18.1, LLC, 2021).*

Según la figura anterior, una vez agrupados los datos de resultados de APA, la serie agrupada muestra un comportamiento de normalidad ya que el valor de “p” es mayor a 0,05.

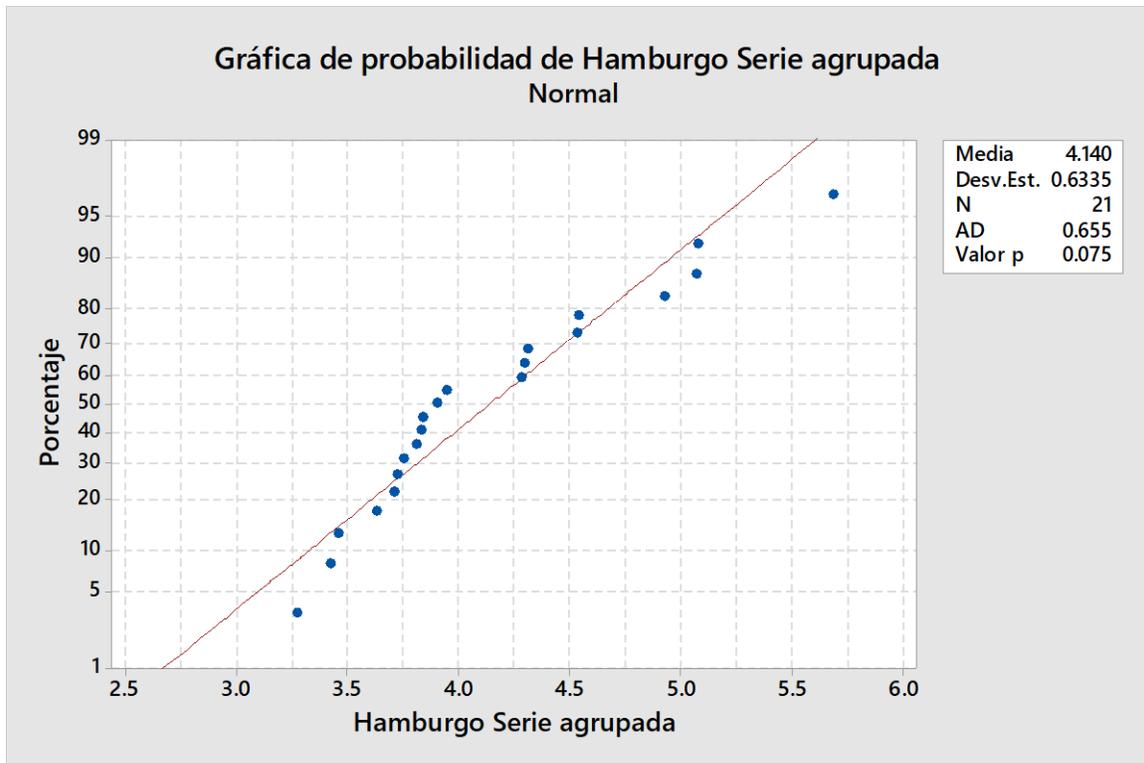


Figura 46. Prueba de normalidad segunda serie de datos (agrupada) de Rueda de Hamburgo.
Fuente: (Minitab 18.1, LLC, 2021).

También, con el caso de los resultados de Rueda de Hamburgo agrupados, se describe una distribución normal ($p = 0.075 > 0.05$).

Por lo tanto, para ambos resultados de las pruebas de APA y Hamburgo, se concluye que la hipótesis nula (H_0) es verdadera, razonablemente, los datos siguen una distribución normal con al menos un 95 % de confianza.

Con lo anterior, las dos series de datos muestran los siguientes estadísticos descriptivos:

Estadísticas								
Variable	N	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Varianza	CoefVar	Suma de cuadrados	Mínimo
APA Serie agrupada	21	2.414	0.129	0.591	0.349	24.47	129.324	1.592
Variable	Q1	Mediana	Q3	Máximo	Asimetría	Curtosis		
APA Serie agrupada	1.952	2.257	2.947	3.616	0.56	-0.82		

Figura 47. Estadísticos descriptivos de la serie de datos agrupada de los resultados de APA.
Fuente: (Minitab 18.1, LLC, 2021).

Estadísticas								
Variable	N	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Varianza	CoefVar	Suma de cuadrados	Mínimo
Hamburgo Serie agrupada	21	4.140	0.138	0.633	0.401	15.30	367.928	3.267
Variable	Q1	Mediana	Q3	Máximo	Asimetría	Curtosis		
Hamburgo Serie agrupada	3.714	3.898	4.533	5.682	0.88	0.19		

Figura 48. Estadísticos descriptivos de la serie de datos agrupada de los resultados de Rueda de Hamburgo.
Fuente: (Minitab 18.1, LLC, 2021).

Como se observa de las figuras anteriores, para los 21 datos de resultados de los dos ensayos de deformación permanente, la media de la nube de datos de APA es de 2,41 mm con valores que oscilan entre 1,592 mm y 3,616 mm y para Rueda de Hamburgo su media de la totalidad de la nube de datos es de 4,14 mm, para un mínimo de deformación de 3,267 mm y un máximo de 5,682 mm.

También, a las series agrupadas, se les realizó la prueba de valores atípicos, la cual en ambos casos indica que no hay valores atípicos en los datos.

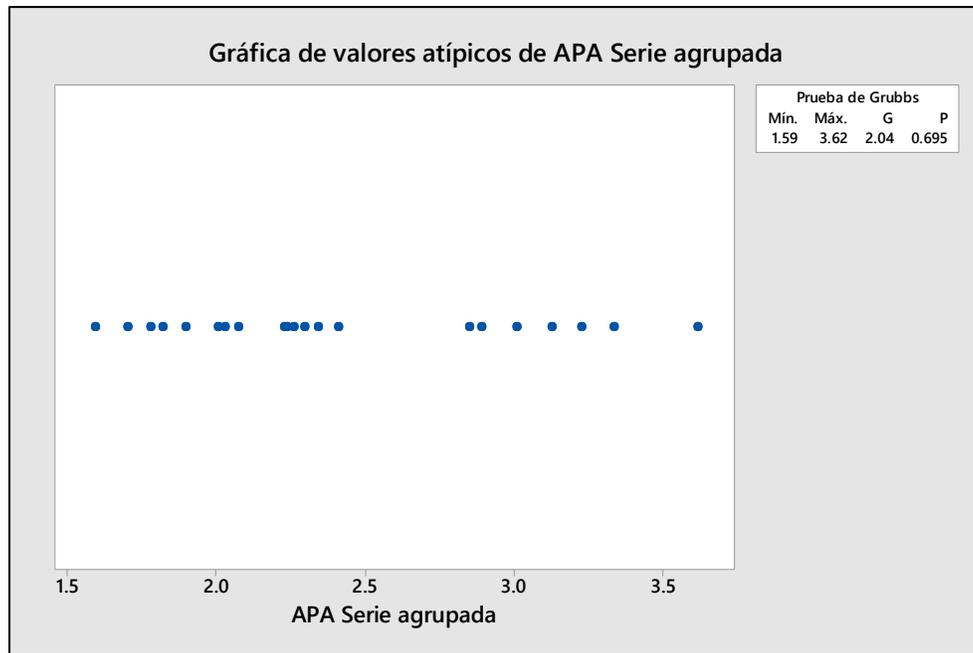


Figura 49. Prueba de valores atípicos a la serie de datos agrupada de los resultados de APA.
Fuente: (Minitab 18.1, LLC, 2021).

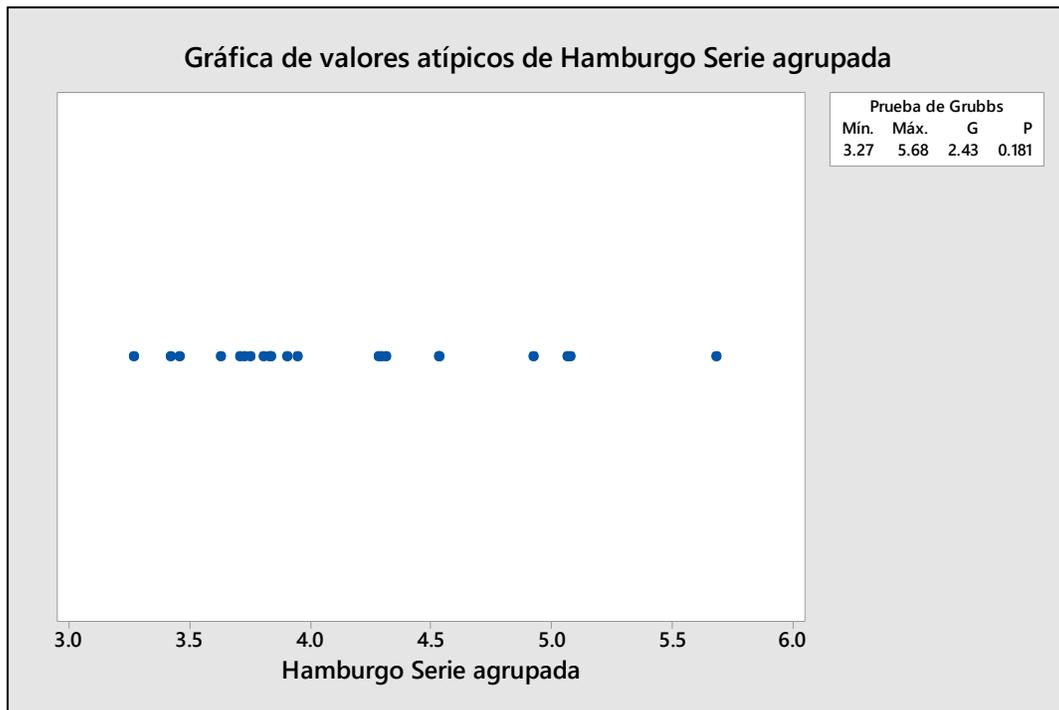


Figura 50. Prueba de valores atípicos a la serie de datos agrupada de los resultados de Rueda de Hamburgo.
Fuente: (Minitab 18.1, LLC, 2021).

Al realizar la prueba de Grubbs no se encontraron datos atípicos en ninguna de las dos series agrupadas, ya que no se cuenta con suficiente certidumbre para concluir que existe un valor atípico.

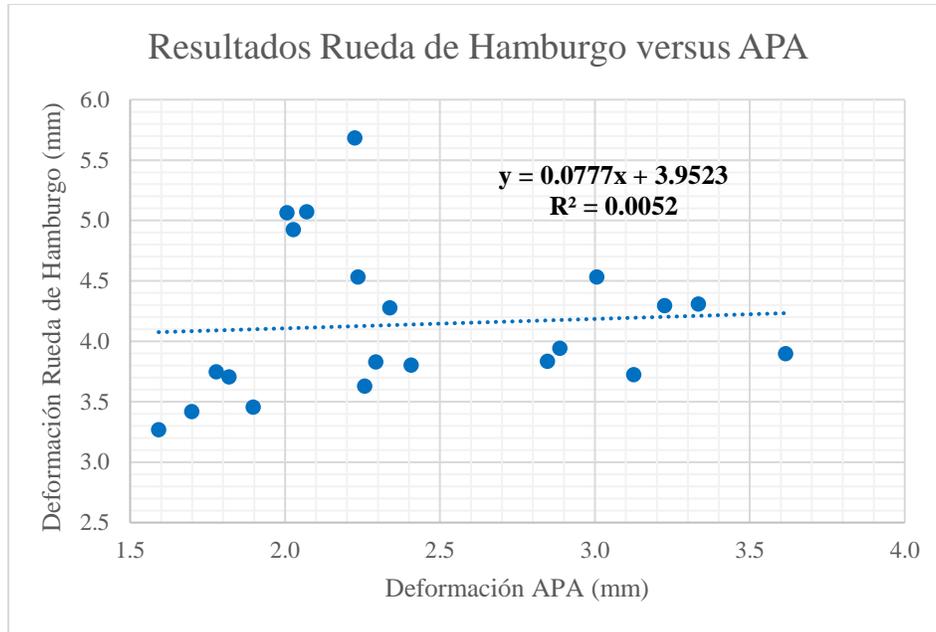


Figura 51. Relación entre resultados de Rueda de Hamburgo versus de APA.

La figura anterior, en el eje de las abscisas, se tienen los 21 resultados obtenidos de deformación permanente con el método de ensayo APA y en el eje vertical los correspondientes utilizando el estándar de Rueda de Hamburgo para la misma mezcla asfáltica. Como se puede observar, a pesar de obtener un coeficiente de determinación (R^2) muy bajo, los valores indican una relación real entre los predictores significativos y la variable de respuesta. Se muestra una tendencia creciente que, a mayor ahuellamiento obtenido con APA, implica una mayor deformación a través del ensayo de Rueda de Hamburgo y además los resultados de este último ensayo, son mayores en todos los casos que los obtenidos con el primer método. Una mayor cantidad de muestras podría contribuir en obtener bondades de ajuste bajas, sin embargo, las interpretaciones de las variables significativas son las mismas.

Aunado a lo anterior, al calcular el coeficiente de correlación de Pearson de la relación de estas dos variables, se obtiene un valor de 0,072, que indica una relación lineal (fuerza) muy baja entre las variables. Sin embargo, el signo positivo del coeficiente indica que la dirección es creciente, o sea, una variable tiende a incrementarse con el crecimiento de la otra, como se indicó anteriormente. Además, como el valor de $p > \alpha$ no puede concluir que la correlación es diferente de 0 por lo que no es estadísticamente significativa.

Correlaciones	
Correlación de Pearson	0.072
Valor p	0.755

*Figura 52. Resultados Correlación de Pearson.
Fuente: (Minitab 18.1, LLC, 2021).*

6.4. Comparativa entre MAC moldeada y núcleos de campo y relación entre variables

Con los resultados promedios de ambos casos de estudio de la deformación permanente: con muestras moldeadas con el compactador giratorio y muestras aserradas extraídas de campo, se contrastan los resultados con el objetivo de determinar si presentan relación y alguna tendencia, puesto que ambos métodos de ensayo analizados, miden deformación permanente. Así mismo, comparan los resultados de las muestras de campo, ya que, si bien es cierto al ensayar muestras moldeadas en laboratorio, debe tenerse también especial interés en lo que sucede con la mezcla compactada en campo, puesto que este producto final es el que se espera tenga un desempeño adecuado.

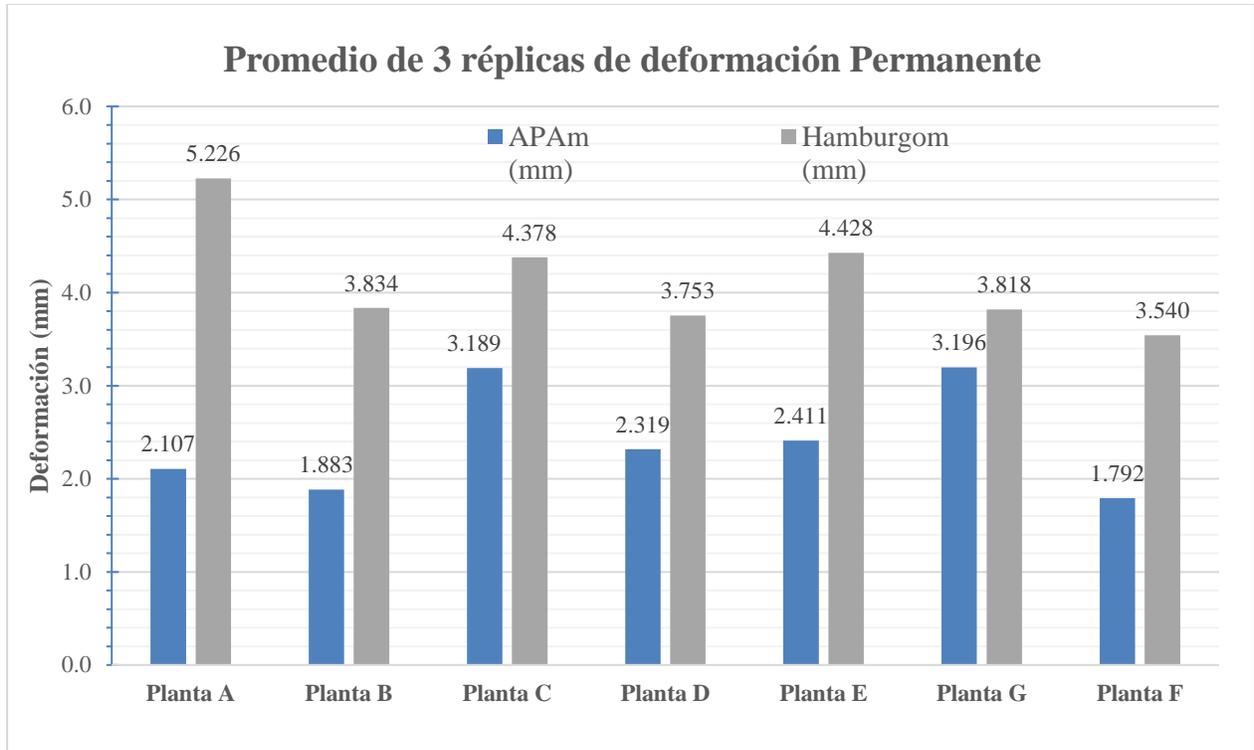


Figura 53. Gráfico resumen de resultado de deformación permanente para todas las plantas productoras analizadas MAC moldeada en laboratorio (m=moldeada).

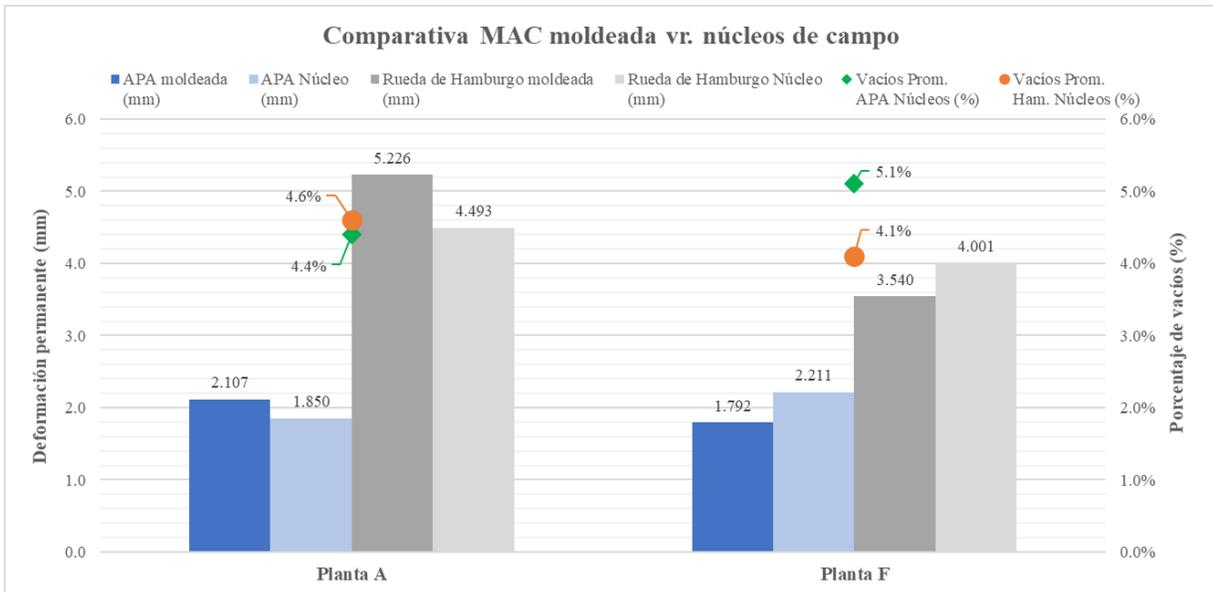


Figura 54. Gráfica comparativa resultados obtenidos utilizando MAC moldeada versus núcleos de campo

Cuadro 26. Comparativa de resultados promedio de deformación permanente MAC moldeada y núcleos extraídos.

Planta	Resultados de ensayos a MAC moldeada			Resultados de ensayos a Núcleos MAC			
	Promedio APA (mm)	Promedio Rueda de Hamburgo RH (mm)	Razón APA / RH MAC Moldeada (%)	APA Núcleos (mm)	Hamburgo Núcleos (mm)	Razón APA / RH Núcleos (%)	Porcentaje de Vacíos Prom. APA _N / Ham. N (%)
Planta A	2.107	5.226	40.3 %	1.850	4.493	41.2 %	4.4/4.6
Planta B	1.883	3.834	49.1 %	-	-	-	-
Planta C	3.189	4.378	72.8 %	-	-	-	-
Planta D	2.319	3.753	61.8 %	-	-	-	-
Planta E	2.411	4.428	54.4 %	-	-	-	-
Planta G	3.196	3.818	83.7 %	-	-	-	-
Planta F ¹⁰	1.792	3.540	50.6 %	2.469	4.809	51.3 %	6.3/5.4
				2.070	3.706	55.8 %	5/3.5
				2.096	3.486	60.1 %	4.2/3.4
Promedio general	2.414	4.140	59.0 %	2.121	4.124	52.1 %	5.0/4.2

El cuadro anterior denota, de forma general, para las muestras ensayadas que la deformación permanente por medio del método de ensayo de APA son un 59,0 % en orden de magnitud sobre los resultados utilizando el ensayo de Rueda de Hamburgo de la MAC moldeada y de un 52,1 % para los núcleos de campo, aspecto interesante, ya que con estos valores se puede “predecir” de una forma simple, los resultados de un método u otro. Nótese además que la deformación por medio de Rueda de Hamburgo siempre fue mayor a la del APA, aspecto esperado debido a las condiciones de las pruebas. En el caso de la planta A, los datos de deformación fueron menores en los núcleos de campo que la obtenida con los especímenes moldeados con condiciones controladas en laboratorio; no así sucedió con la planta F, que los resultados de ahuellamiento resultaron mayores si en contraposición al utilizar especímenes moldeados.

El porcentaje promedio de vacíos de los núcleos de campo, en su mayoría son menores (5,0 % APA y 4.2 % Rueda de Hamburgo) a los que establece la norma de ensayo para los especímenes moldeados (7,0 + 0,5 %). Esta variable, influye significativamente en los resultados de deformación.

¹⁰ MAC SuperPave.

Cuadro 27. Resumen de datos de desviaciones estándar y coeficientes de variación MAC moldeada y compactada.

Ensayo	Mezcla Moldeada			Mezcla compactada		
	Promedio deformación (mm)	Desviación estándar (mm)	Coefficiente de variación	Promedio deformación (mm)	Desviación estándar (mm)	Coefficiente de variación
APA	2.414	0.575	0.238	2.121	0.257	0.121
Rueda de Hamburgo	4.140	0.581	0.140	4.124	0.629	0.152
Promedio	-	0.578	0.189	-	0.443	0.137

Como se nota en el cuadro anterior, las desviaciones estándar y los coeficientes de variación obtenidos de los resultados de deformación plástica, son muy similares y mantienen el orden de magnitud general entre los valores obtenidos para mezclas moldeadas en laboratorio como las muestreadas en campo. Así mismo, se observan valores de desviaciones estándar mayores en Rueda de Hamburgo que en APA para los núcleos. Contrario a lo anterior, sucede con el coeficiente de variación de las MAC moldeadas que es mayor en APA que en el ensayo de Rueda de Hamburgo.

6.5. Tendencia de los parámetros volumétricos versus deformación permanente obtenida por medio del ensayo de Rueda de Hamburgo.

Debido a que se logró en la investigación, determinar los parámetros de la mezcla asfáltica ensayada ante la deformación plástica, seguidamente se analiza el efecto que tienen otras propiedades de la mezcla asfáltica (expuestos en los cuadros 17, 18 y 19) sobre la deformación permanente obtenida por medio del ensayo de Rueda de Hamburgo (AASHTO T-324), por lo que a continuación, se muestran gráficos de estas tendencias, a pesar de que los datos son pocos y los coeficientes R^2 bajos, los valores indican una relación real entre los predictores significativos y la variable de respuesta.

6.5.1. Propiedades de la MAC que indican relación creciente sobre la deformación plástica del ensayo Rueda de Hamburgo.

Los parámetros de flujo, contenido de asfalto sobre el agregado, contenido de asfalto sobre la mezcla, asfalto efectivo, VFA, relación polvo / asfalto, y los porcentajes pasando de los tamices de 12,7 mm; 9,5 mm, y los número 4, 8, 16, 30 50 y 200, mostraron tendencia a ser creciente en los resultados de esta investigación, lo que significa que, a medida en que aumentan, también crece la deformación plástica por medio del ensayo de Rueda de Hamburgo. Las relaciones anteriores, se muestran en las siguientes figuras:

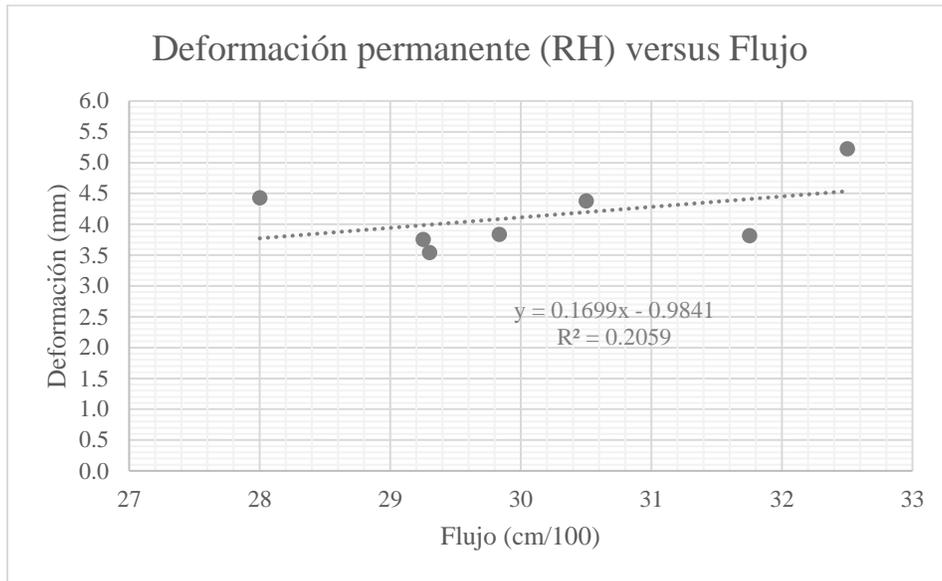


Figura 55. Gráfica relación deformación plástica (RH) versus flujo.

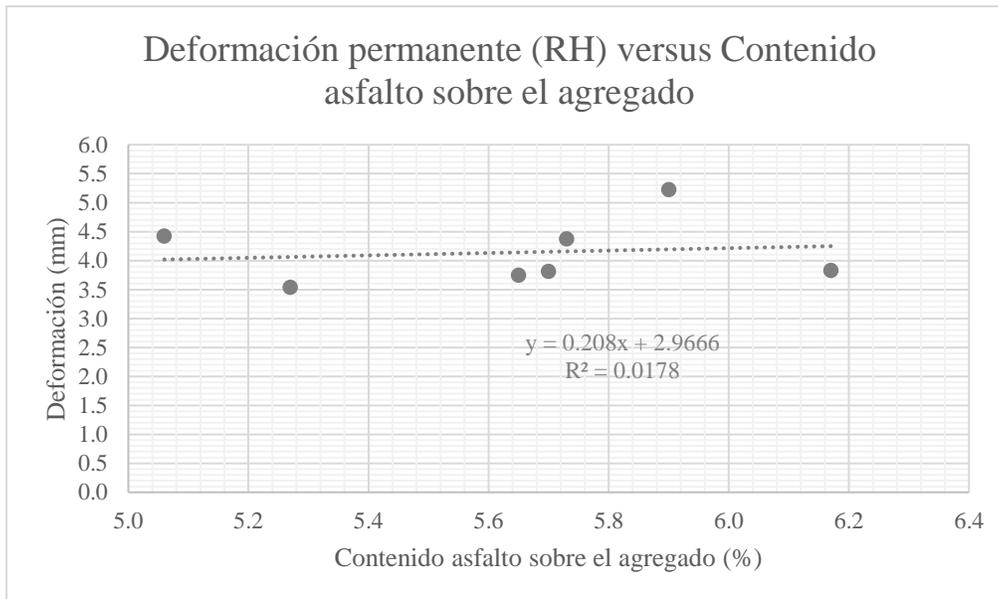


Figura 56. Gráfica relación deformación plástica (RH) versus contenido de asfalto sobre el agregado.

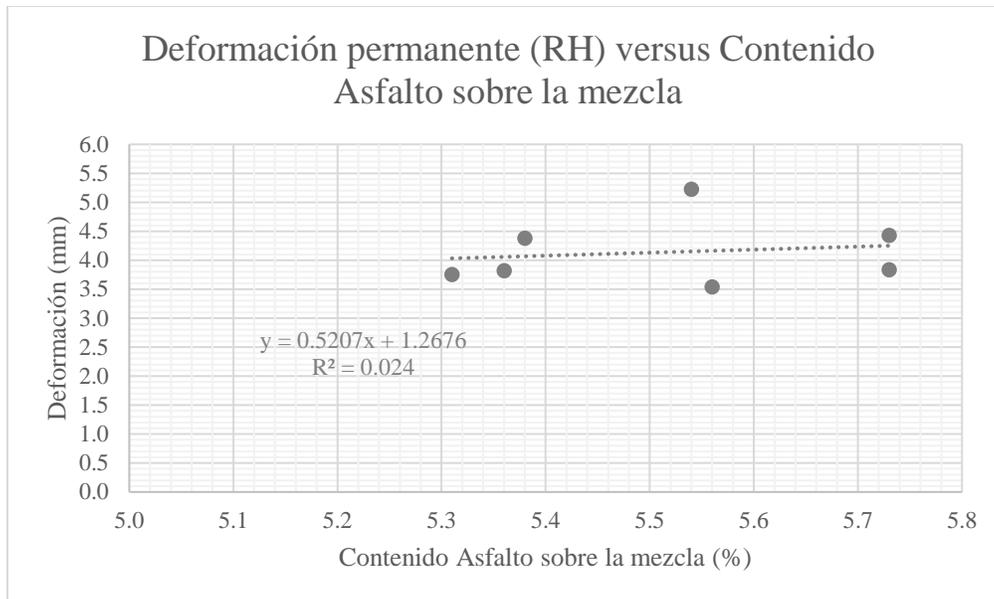


Figura 57. Gráfica relación deformación plástica (RH) versus contenido de asfalto sobre la mezcla.

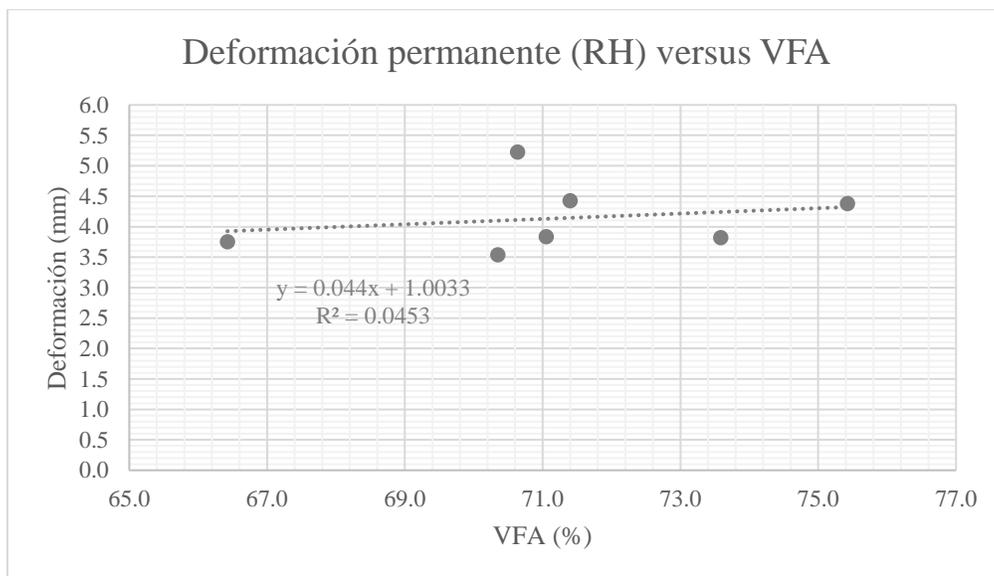


Figura 58. Gráfica relación deformación plástica (RH) versus VFA.

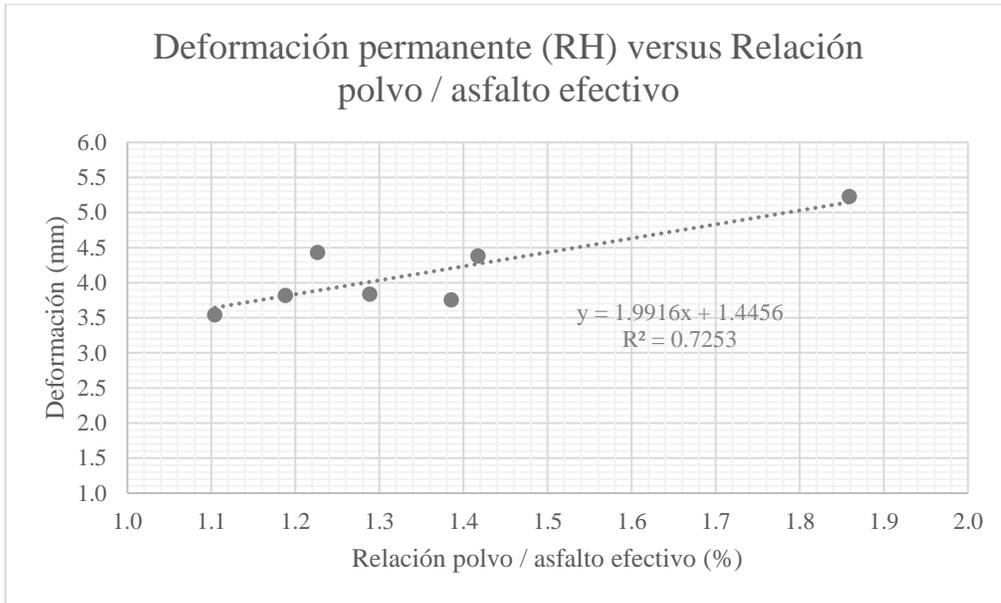


Figura 59. Gráfica relación deformación plástica (RH) versus relación polvo / asfalto.

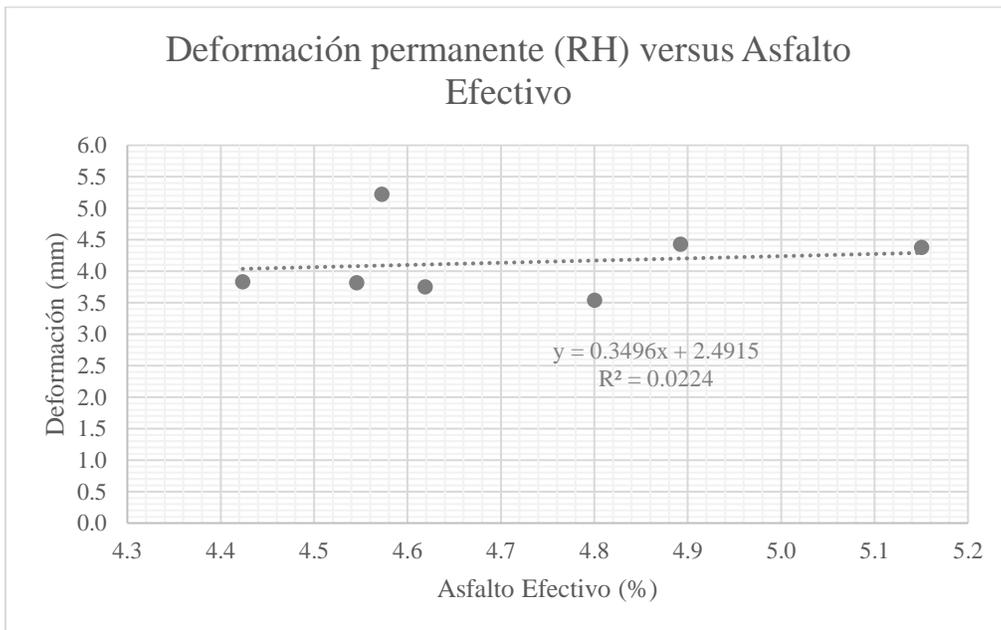


Figura 60. Gráfica relación deformación plástica (RH) versus asfalto efectivo.

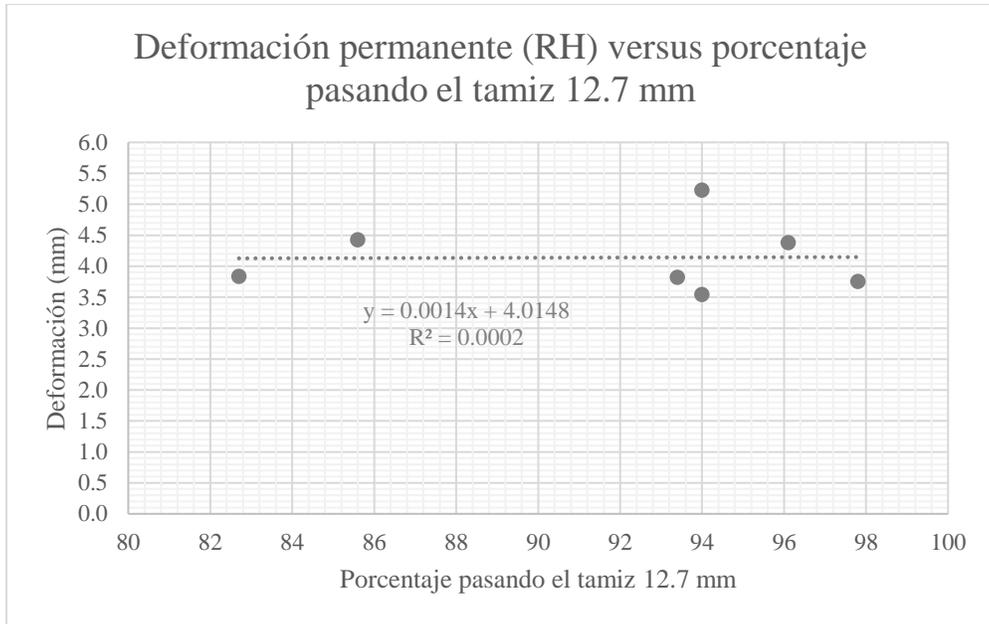


Figura 61. Gráfica relación deformación plástica (RH) versus porcentaje pasando el tamiz 12.7 mm.

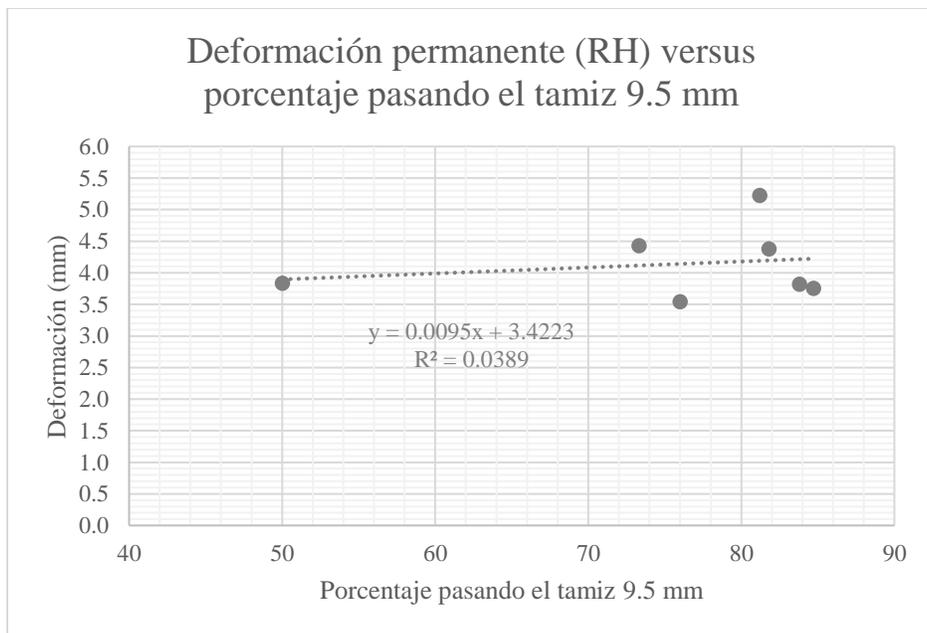


Figura 62. Gráfica relación deformación plástica (RH) versus porcentaje pasando el tamiz 9.5 mm.

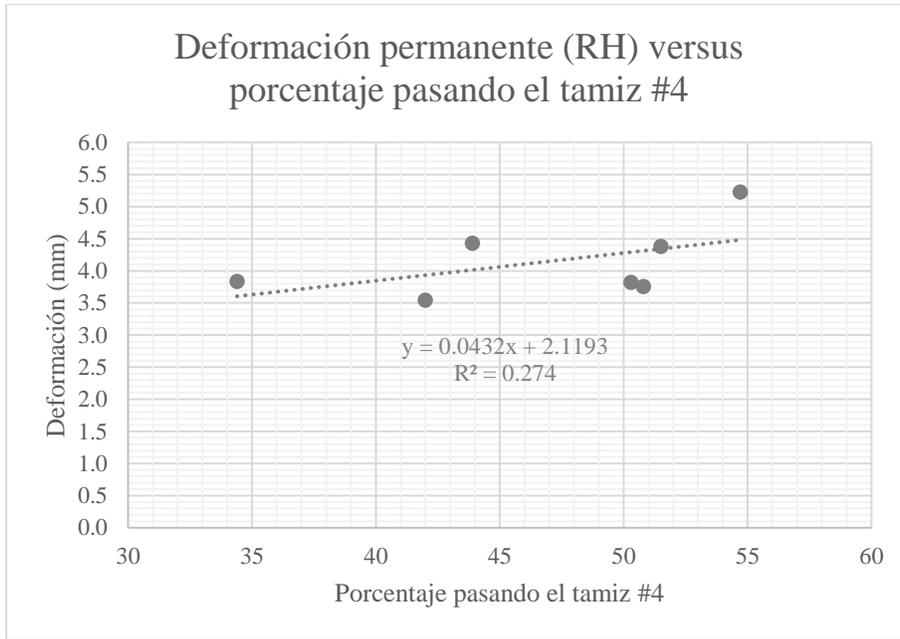


Figura 63. Gráfica relación deformación plástica (RH) versus porcentaje pasando el tamiz #4.

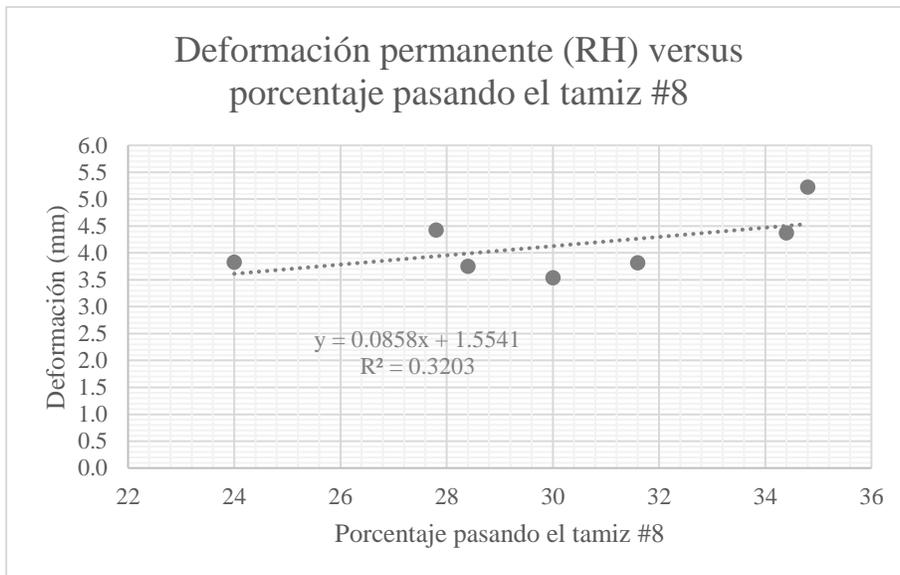


Figura 64. Gráfica relación deformación plástica (RH) versus porcentaje pasando el tamiz #8.

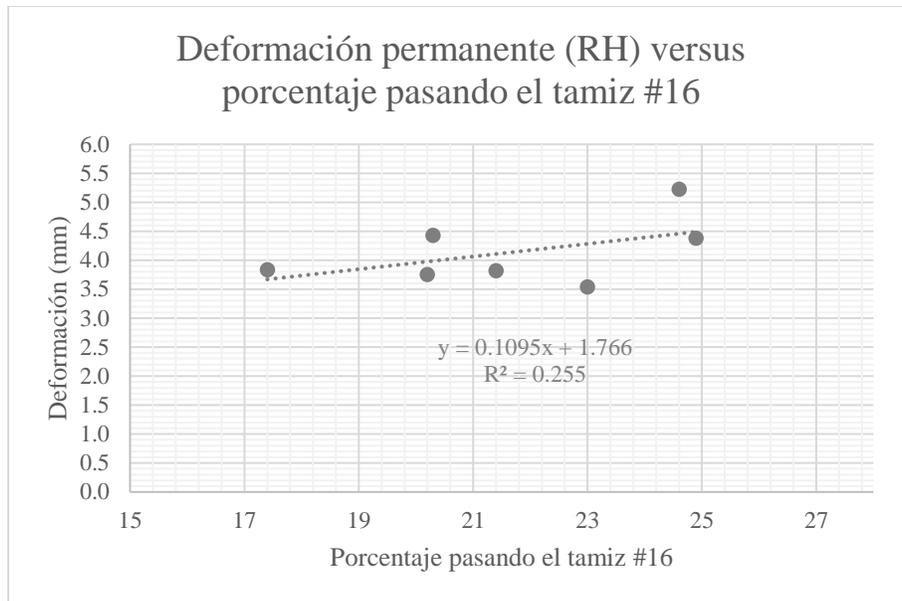


Figura 65. Gráfica relación deformación plástica (RH) versus porcentaje pasando el tamiz #16.

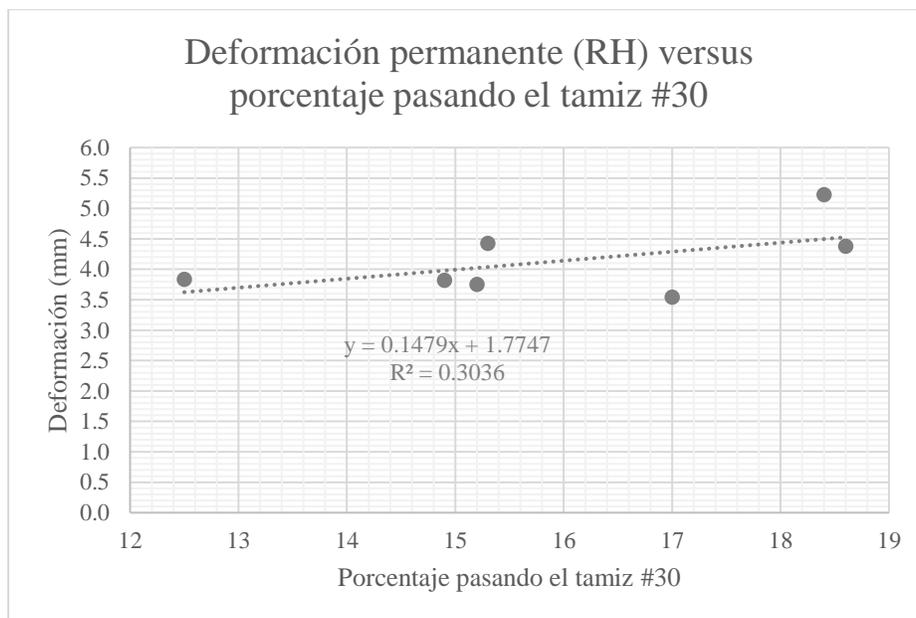


Figura 66. Gráfica relación deformación plástica (RH) versus porcentaje pasando el tamiz #30.

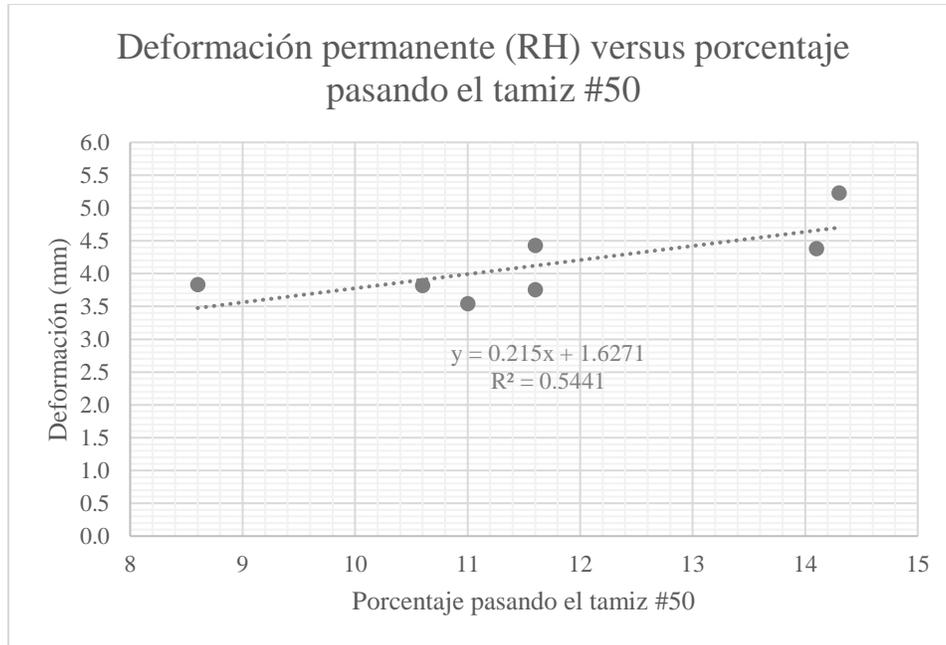


Figura 67. Gráfica relación deformación plástica (RH) versus porcentaje pasando el tamiz #50.

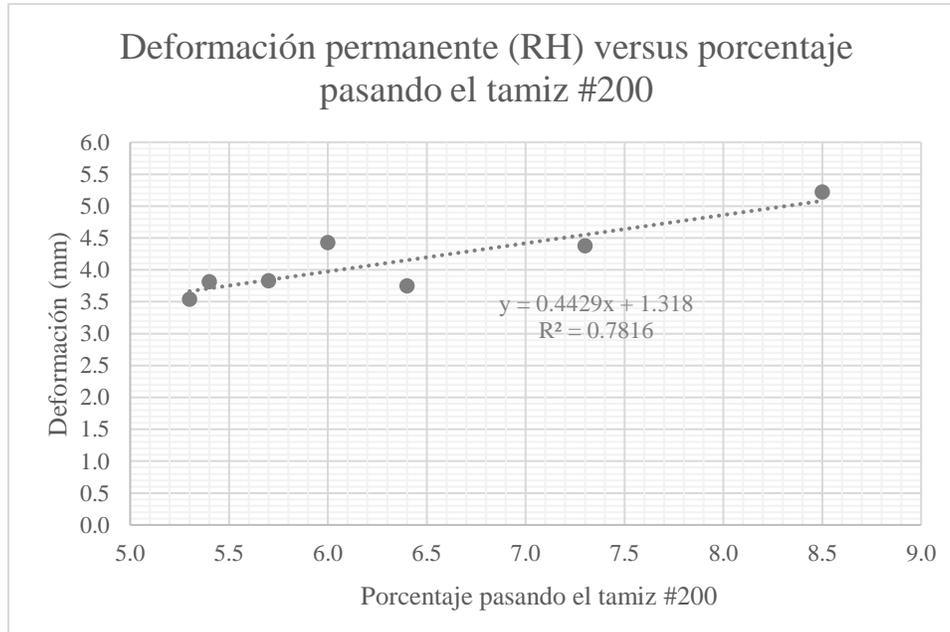


Figura 68. Gráfica relación deformación plástica (RH) versus porcentaje pasando el tamiz #200.

6.5.2. Propiedades de la MAC que indican relación decreciente sobre la deformación plástica del ensayo Rueda de Hamburgo.

Las propiedades de la mezcla asfáltica: GBS de las pastillas MAC, gravedad específica máxima teórica (GEMT), estabilidad, porcentaje de vacíos, VMA, GBS de los agregados (combinado, fracción fina y fracción gruesa), gravedad específica efectiva, porcentaje de absorción de asfalto y gravedad específica del aglutinante mostraron relación decreciente en los resultados de esta investigación, lo que quiere decir, que a medida en que aumentan su magnitud, decrece la deformación plástica por medio del ensayo de Rueda de Hamburgo. En las siguientes figuras, se muestran estas tendencias:

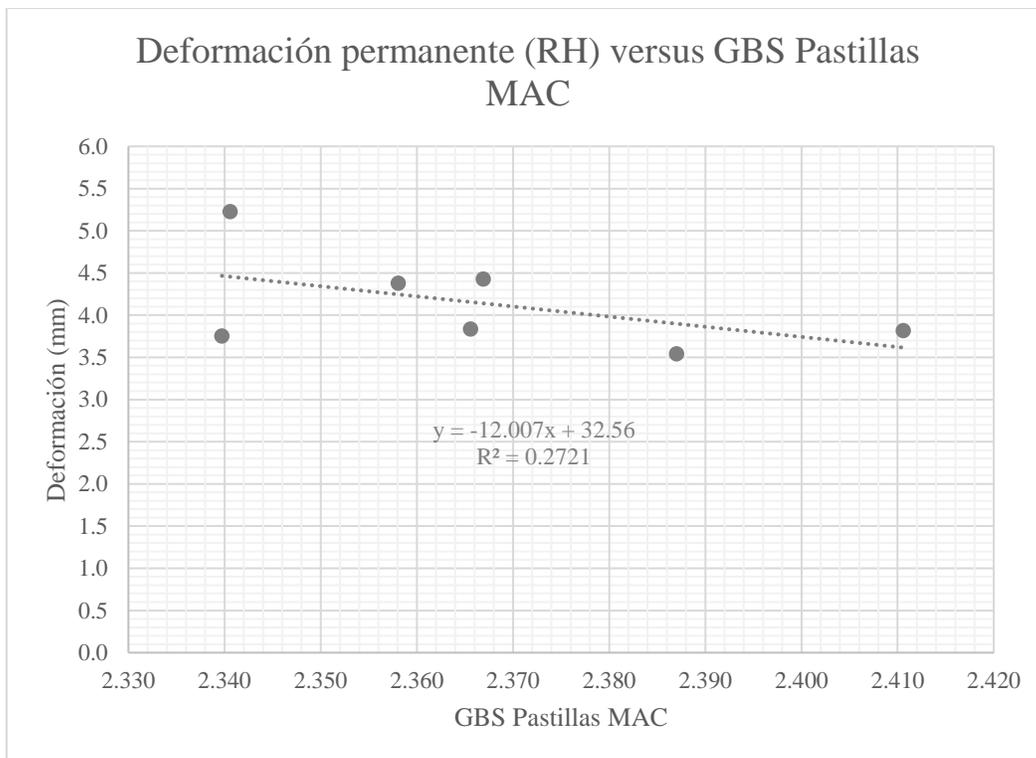


Figura 69. Gráfica relación deformación plástica (RH) versus GBS de las pastillas MAC.

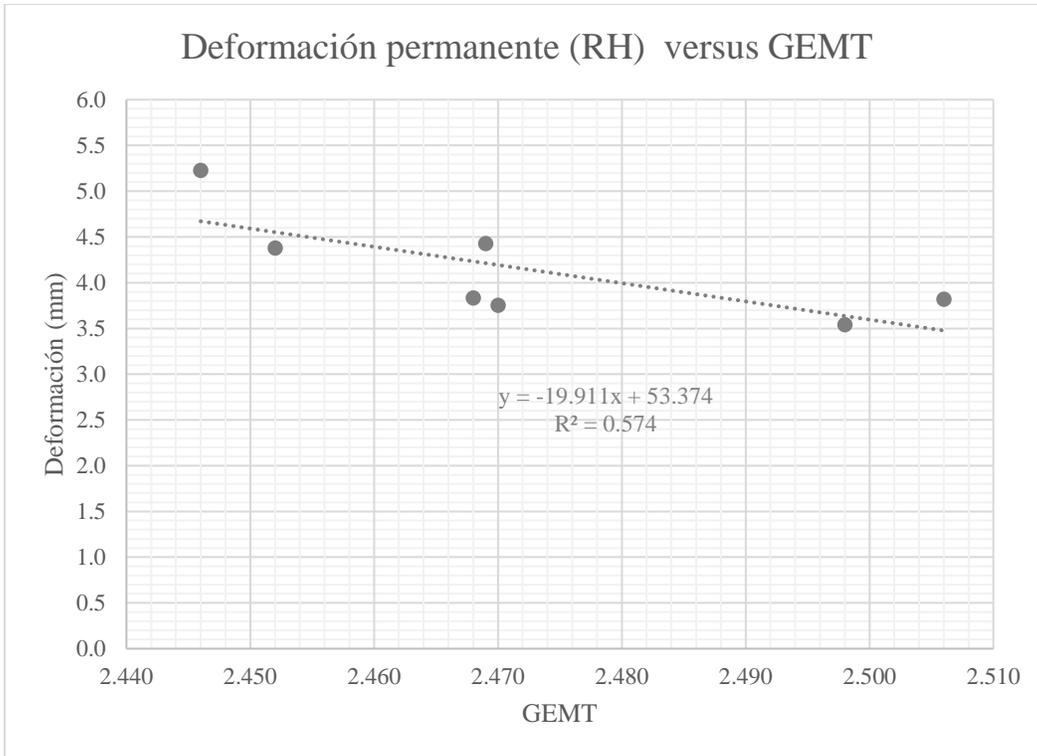


Figura 70. Gráfica relación deformación plástica (RH) versus GEMT.

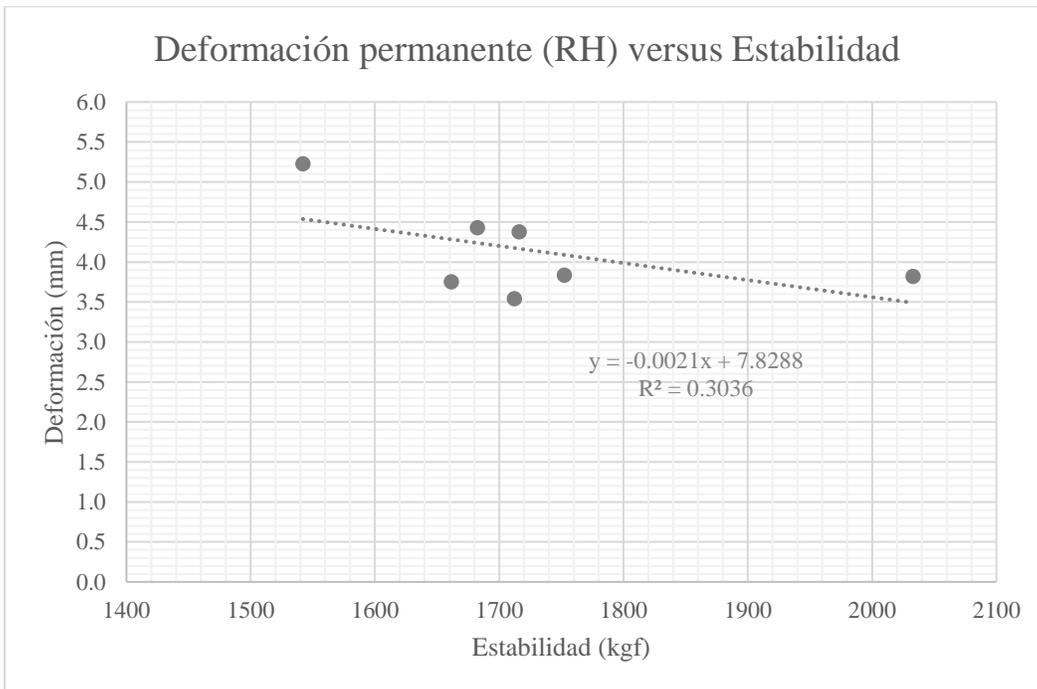


Figura 71. Gráfica relación deformación plástica (RH) versus estabilidad.

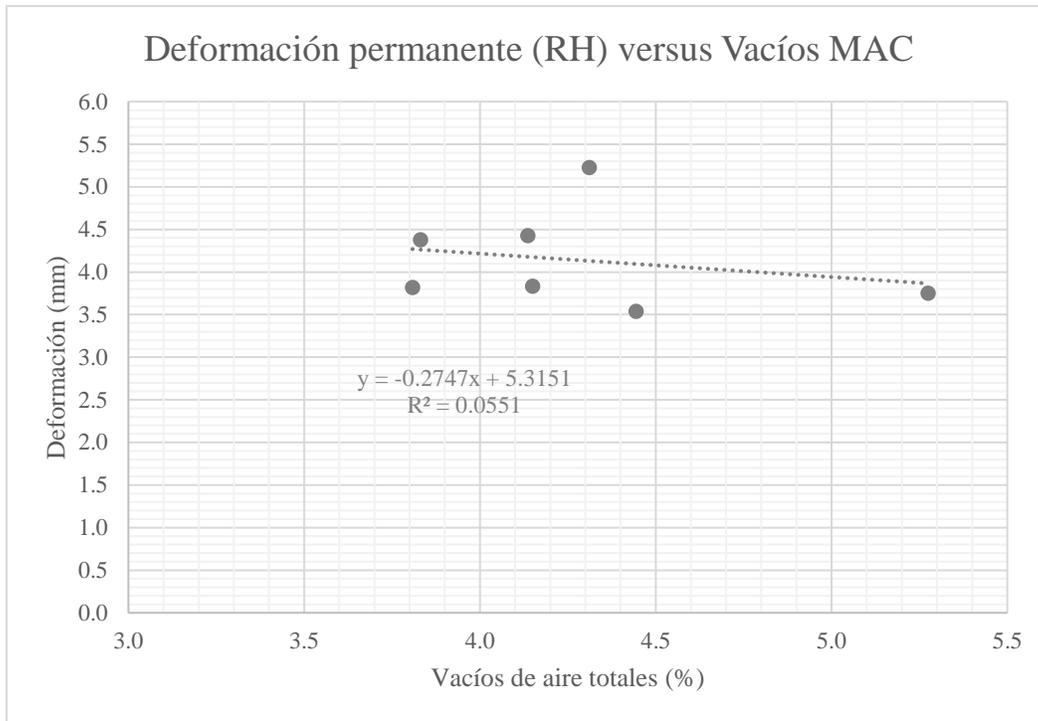


Figura 72. Gráfica relación deformación plástica (RH) versus porcentaje de vacíos MAC.

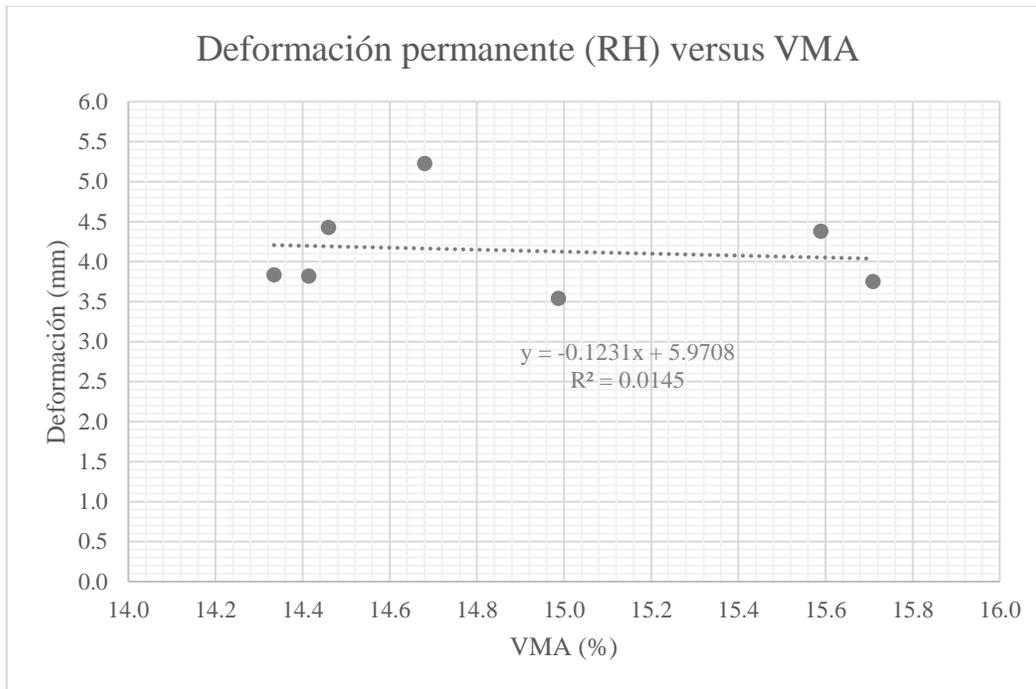


Figura 73. Gráfica relación deformación plástica (RH) versus VMA.

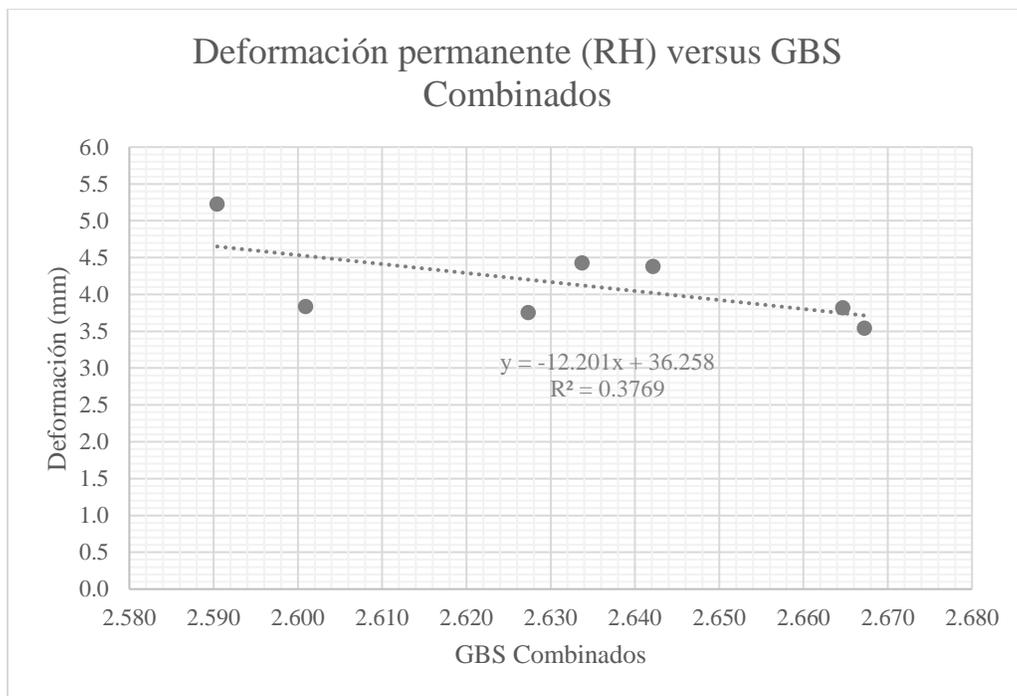


Figura 74. Gráfica relación deformación plástica (RH) versus GBS Combinado de los agregados.

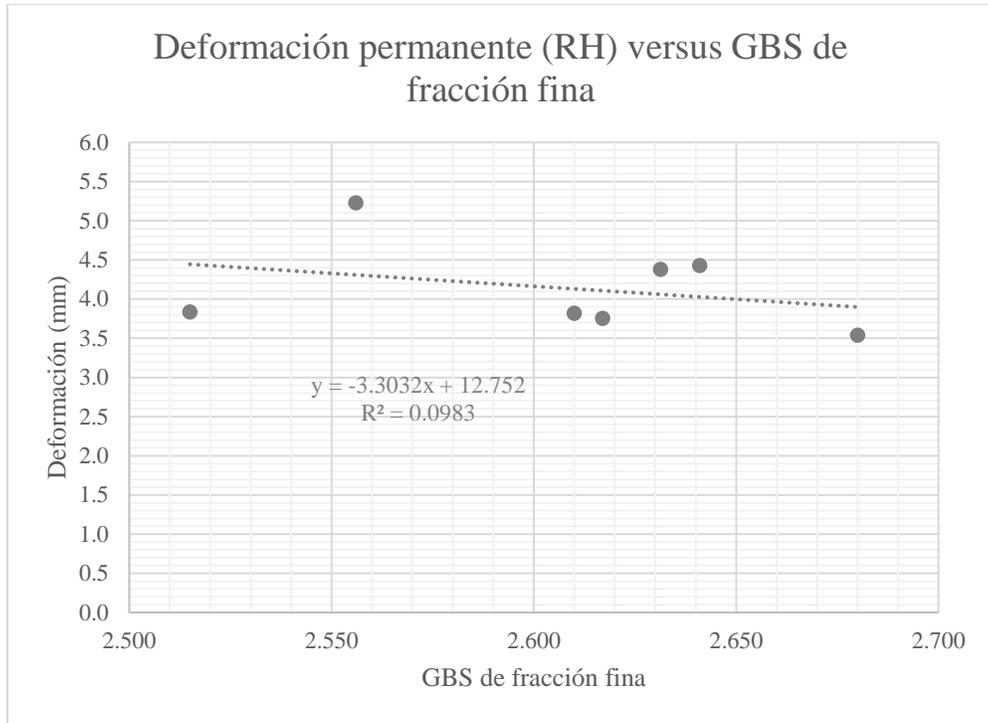


Figura 75. Gráfica relación deformación plástica (RH) versus GBS de la fracción fina de agregado.

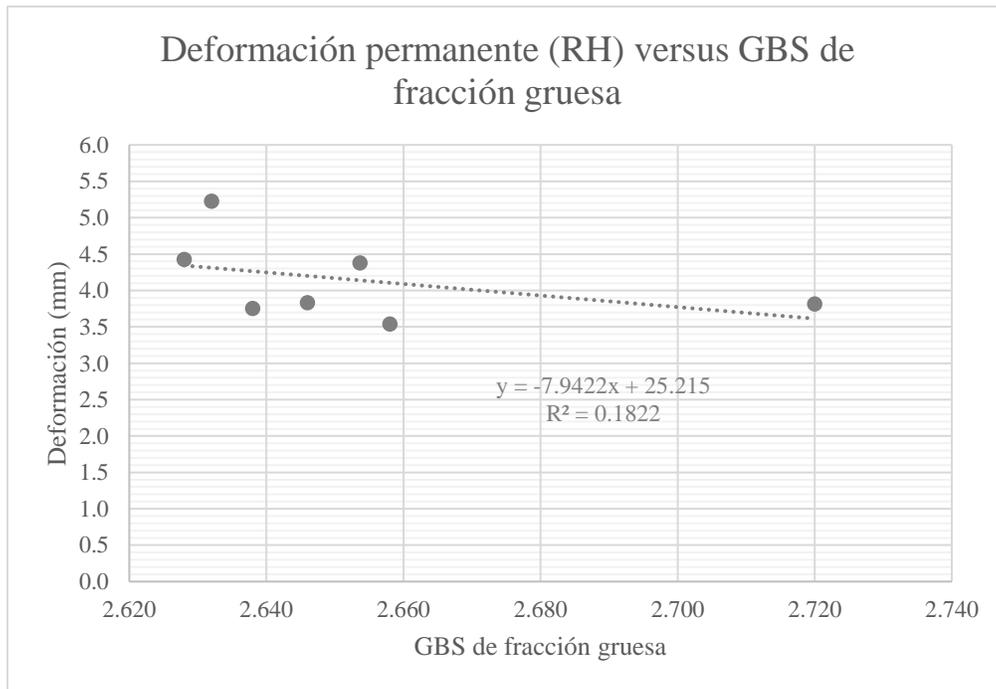


Figura 76. Gráfica relación deformación plástica (RH) versus GBS de la fracción gruesa de agregado.

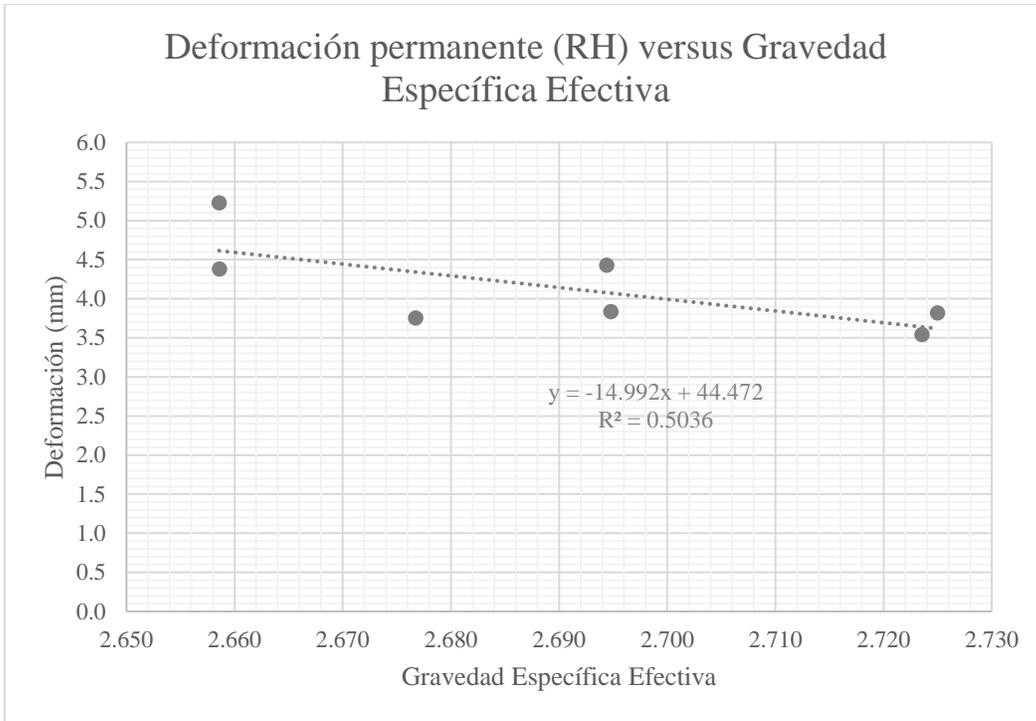


Figura 77. Gráfica relación deformación plástica (RH) versus gravedad específica efectiva.

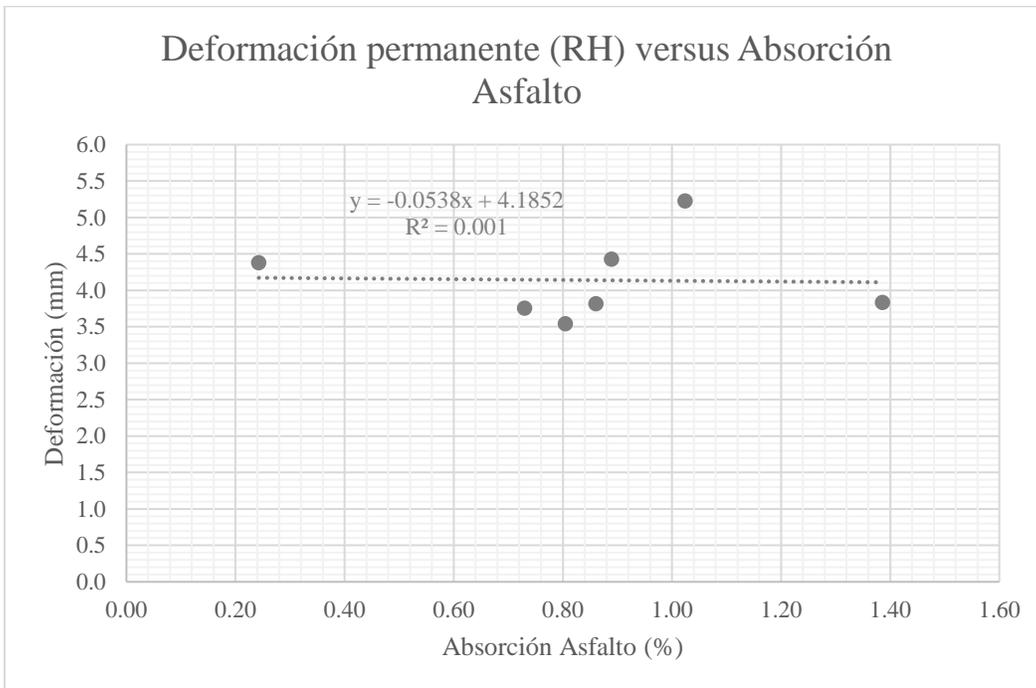


Figura 78. Gráfica relación deformación plástica (RH) versus absorción de asfalto.

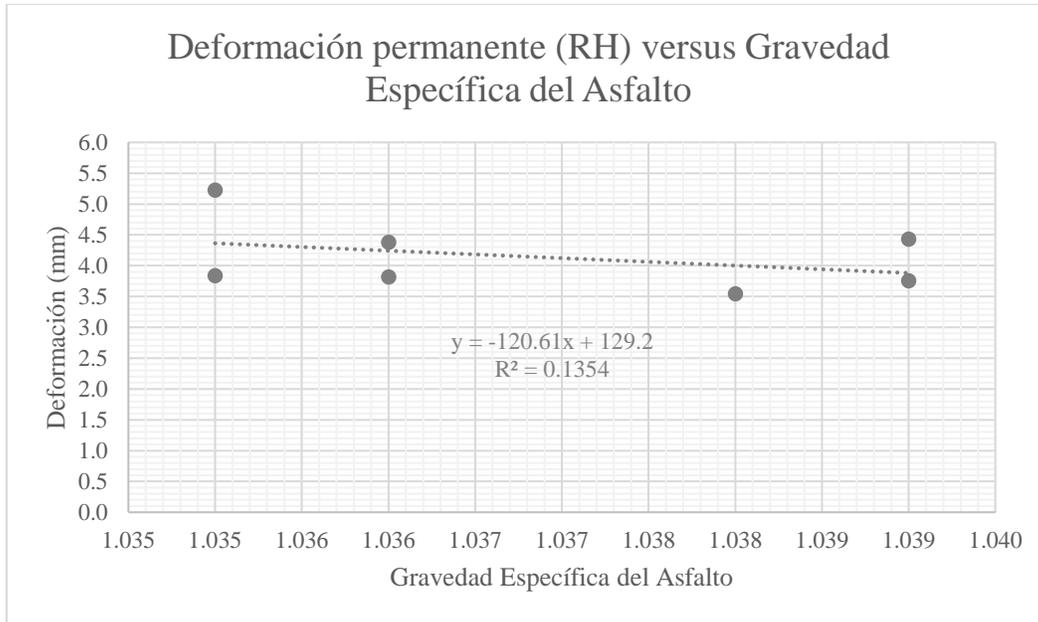


Figura 79. Gráfica relación deformación plástica (RH) versus gravedad específica del asfalto.

Como se puede observar anteriormente, a pesar de obtener un coeficiente de determinación (R^2) bajo, los valores indican una relación real entre los predictores significativos y la variable de respuesta.

Una mayor cantidad de muestras podría contribuir en obtener bondades de ajuste bajas, sin embargo, las interpretaciones de las variables significativas son las mismas.

6.6. Propuesta de especificación para Costa Rica del ensayo de deformación permanente Rueda de Hamburgo

Cuando se tienen pruebas de control de calidad rutinarias para la aceptación o rechazo de un material, hay que tomar en cuenta que estos resultados se ven afectados por muchas razones, como por ejemplo, la variabilidad de la prueba en sí, los cambios en los materiales (muchos principios se basan en que el material es isotrópico y que se encuentra en el rango elástico por citar algunos casos), la forma en que se realiza el muestreo, el personal, los equipos y hasta la latitud en donde se realizan los ensayos, entre otros. Las personas que realizan estudios para determinar especificaciones técnicas, deben de considerar estas fuentes de variabilidad al establecer los límites de especificación, para controlar el riesgo del productor de rechazar una gran cantidad de material aceptable y el riesgo del comprador de aceptar una gran cantidad de material deficiente (ASTM International, 2015).

Aunado a lo anterior, es oportuno señalar que en general, el establecimiento de especificaciones técnicas consiste en un riguroso análisis técnico-científico, en donde se estudia mediante ensayos de desempeño (fatiga, deformación permanente propiedades mecánicas-dinámicas y daño por humedad, mayormente) y monitoreo riguroso en sitio, para determinar cuál es el comportamiento del material ante ciertas condiciones. Cuando se adolece de investigación tropicalizada, se han adoptado especificaciones de otros países, lo cual también debe hacerse con cuidado, ya que eventualmente podría implicar modificaciones o ajustes imprevistos durante la ejecución de los procesos y esto genera a su vez inseguridad jurídica, atrasos, altos costos y riesgos de futuros problemas de calidad o vicios ocultos en las obras (Loría Salazar, 2016).

También, a mayor cantidad de datos puede lograrse reducir la variabilidad del ensayo y reducir la incertidumbre, sin embargo, esto incrementa los costos de investigación, por lo que llegar a un punto de equilibrio es lo recomendable.

La presente propuesta de especificación se basa en los resultados obtenidos de los ensayos de Rueda de Hamburgo para las principales plantas productoras del país (utilizando mezclas asfálticas de TMN de 12,7 mm con agregados de fuentes propias de las latitudes nacionales), el equipo APA Jr. descrito en el capítulo 2. Se toma en cuenta las variables estudiadas en el capítulo 5 de la estimación de la incertidumbre, la experiencia internacional sobre normativas de deformación plástica expuestas en el capítulo 4 y la metodología para establecer límites de especificación de la norma ASTM D6607 *Standard Practice for Inclusion of Precision Statement Variation in Specification Limits* que proporciona la guía para determinar una especificación racional.

Cuadro 28. Resultados de deformación Rueda de Hamburgo

Centro de producción	Rueda de Hamburgo Resultados de deformación Segunda serie Máxima deformación (mm)
Planta A	5.682
	4.924
	5.072
Planta B	3.267
	4.532
	3.705
Planta C	4.308
	4.533
	4.294
Planta D	3.829
	3.803

	3.628
Planta E	5.063
	3.943
	4.278
Planta F	3.748
	3.419
	3.454
Planta G	3.834
	3.898
	3.723
Promedio	4.140
Desviación estándar	0.633
Coefficiente de variación	0.153
Promedio (+) 1 Desv.	4.773
Promedio (+) 2 Desv.	5.407

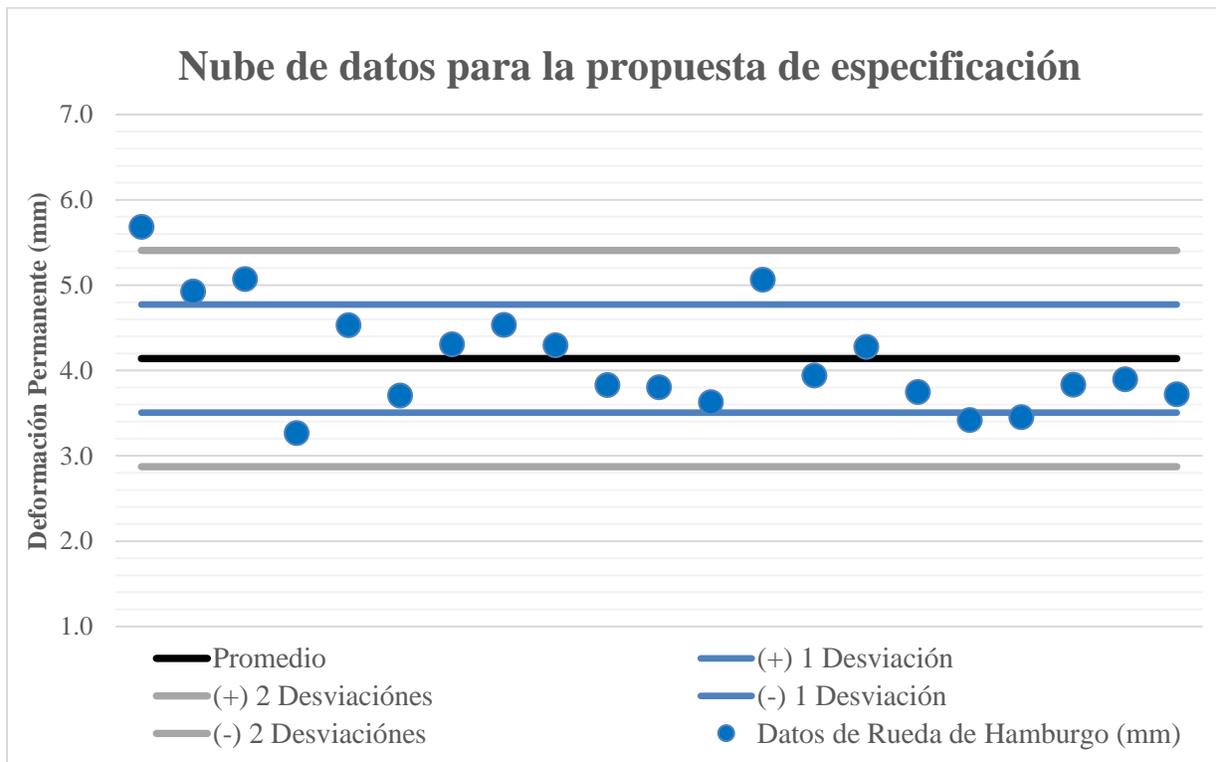


Figura 80. Gráfica nube de datos Rueda de Hamburgo.

Como primer punto a considerar, es el cálculo de la desviación estándar efectiva (σ_x), que combina la desviación estándar de los resultados de ensayo (σ_M), la cual se determina cuando se realiza la prueba en un ambiente controlado y obedece a la desviación estándar determinada para la serie de resultados de esta prueba de Rueda de Hamburgo del cuadro anterior; con la desviación estándar que indica la norma de ensayo

del método en la sección de precisión y exactitud (σ_T); por lo que la expresión σ_X se calcula de la siguiente manera:

$$\sigma_X = \sqrt{(\sigma_M^2 + \sigma_T^2)}$$

Donde:

σ_X = desviación estándar efectiva

σ_M = desviación estándar del promedio de los resultados de ensayo

σ_T = desviación estándar que indica la norma de ensayo del método en la sección de precisión y exactitud

La norma AASHTO T324 señala que la precisión y exactitud del ensayo se encuentra aún en desarrollo como se muestra en la siguiente figura:

<p>11. PRECISION AND BIAS</p> <p>11.1. Work is underway to develop precision and bias statements for this standard.</p> <p>Note 10—Field-compacted samples have proven to be insufficiently controlled for inclusion in a precision and bias statement.</p>

Figura 81. Sección 11 Precisión y exactitud de la norma AASHTO T324.

Por lo tanto, la expresión para obtener la desviación combinada se reduce a $\sigma_X = \sigma_M$, y según los datos del cuadro anterior, $\sigma_X=0,633$ mm.

Seguidamente, se determina la desviación estándar del promedio de los resultados ($\sigma_{\bar{x}}$) con la siguiente expresión:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_X}{\sqrt{n}}$$

Donde:

$\sigma_{\bar{x}}$ = desviación estándar del promedio de los resultados

n = número de ensayos desarrollados.

En este caso, debido a que el usuario final solamente va a contrastar su resultado de deformación permanente contra la especificación máxima por proponer, $n=1$ ya que es una sola ocurrencia, por lo tanto, la ecuación anterior se reduce a:

$$\sigma_{\bar{X}} = \sigma_X$$

La deformación permanente requiere solamente de un límite superior de especificación, por lo que el promedio de un resultado del ensayo (\bar{X}) se puede comparar contra el límite superior de especificación (de un solo extremo) calculado con la siguiente ecuación:

$$\bar{X} \leq \mu + Z_{\alpha} \sigma_{\bar{X}}$$

Donde:

μ = Propiedad objetivo, en este caso el promedio de la serie de datos (nube de resultados) de deformación permanente para Rueda de Hamburgo (4.140 mm del cuadro 27).

Z_{α} = valor crítico para el nivel de significación. $(1 - \alpha)$ es el nivel de confianza.

La norma ASTM D6607, muestra la tabla de valores Z_{α} para los diferentes niveles de confianza como se observa en la siguiente figura:

TABLE 1 Z-Values for Different Confidence Levels				
Confidence Level (1 - α):	90 %	95 %	97.5 %	99.0 %
$Z_{\alpha/2}$ (Two-End Specification)	1.645	1.960	2.243	2.575
Z_{α} (One-End Specification)	1.282	1.645	1.960	2.327

Figura 82. Valores Z_{α} para distintos niveles de confianza.
Fuente: (ASTM International, 2021).

Para este caso de estudio, se utiliza el estadístico correspondiente a una distribución normal de una cola, debido a que es un límite máximo lo que se propone y con un nivel de confianza de 97,5 %, por lo que el valor $Z_{\alpha} = 1,960$.

Sustituyendo la expresión:

$$\bar{X} \leq \mu + Z_{\alpha} \sigma_{\bar{X}}$$

$$\Rightarrow \bar{X} \leq 4.140 \text{ mm} + 1,96 * 0,633 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow \bar{X} \leq 5.380 \text{ mm}$$

Lo anterior significa que el límite máximo de especificación propuesto para el ensayo de deformación permanente empleando el método de Rueda de Hamburgo es de **5,380 mm** utilizando un nivel de confianza de 97,5 %.

Si se contrasta esta propuesta contra las especificaciones internacionales recopiladas en el capítulo 4, se nota que la mayoría de especificaciones internacionales se encuentra superior a 10 mm. Un valor de especificación en ese ámbito, no tendría sentido puesto que para Costa Rica prácticamente cualquier MAC cumpliría. Por lo tanto, el límite máximo propuesto en este proyecto, a pesar de que se considera conservador, obedece a la tendencia de los tipos de materiales y procesos productivos para las condiciones de nuestro país.

A este valor, se propone agregar que el punto de inflexión de la curva número de ciclos versus deformación, no se dé antes de la finalización de los 20 000 ciclos de carga. En ningún caso, las mezclas analizadas presentaron punto de inflexión que indique el inicio del daño por humedad. Por esta razón, el establecer este requisito adicional es muy importante, ya que una MAC que llegue a presentar daño por humedad no se desempeñará adecuadamente en su periodo de diseño que es el fin de cualquier diseño.

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

Al analizar los resultados de deformación permanente de 7 principales plantas productoras de mezcla asfáltica de TMN de 12,7 mm en el país, se concluye que:

- Una propuesta razonable del límite máximo de especificación para el ensayo de deformación permanente de las MAC de TMN de 12,7 mm de Costa Rica utilizando el método de Rueda de Hamburgo es de 5,380 mm empleando un nivel de confianza de 97,5 % y que la curva número de ciclos versus deformación, no presente el punto de inflexión que obedece al inicio del daño por humedad de la MAC. No obstante, se requiere que ese valor sea fundamentado ampliando la nube de datos para verificar su correcta aplicación.
- Al contrastar el comportamiento de la deformación permanente utilizando los dos métodos de ensayo APA y Rueda de Hamburgo, se obtuvieron tendencias crecientes, a mayor ahuellamiento obtenido con APA, implica una mayor deformación a través del ensayo de Rueda de Hamburgo. Además, los resultados de Rueda de Hamburgo, son mayores en todos los casos que los obtenidos con el primer método, a pesar de que los análisis estadísticos indican una relación lineal (fuerza) muy baja entre las variables por lo que no es estadísticamente significativa, lo anterior debido a que el ensayo de Rueda de Hamburgo se realiza en una condición más crítica, ya que los especímenes se sumergen en agua a una temperatura de 50 °C, lo que ocasiona un resultado de deformación mayor al del APA.
- Para dos de las plantas productoras de MAC estudiadas A y F, fue posible obtener muestras de núcleos aserrados. De forma general, la deformación permanente por medio del método de ensayo de APA son un 59,0 % en orden de magnitud sobre los resultados utilizando el ensayo de Rueda de Hamburgo de la MAC moldeada y de un 52,1 % para los núcleos de campo, aspecto interesante, ya que con estos valores se puede “predecir” de una forma simple, los resultados de un método u otro.
- Las desviaciones estándar y los coeficientes de variación obtenidos de los resultados de deformación plástica, son muy similares y mantienen el orden de magnitud general entre los valores de las mezclas moldeadas en laboratorio como las muestreadas en campo.
- El ensayo de Rueda de Hamburgo ofrece más información que el de APA y se realiza en condiciones más críticas para la mezcla asfáltica, por lo que se considera que sus resultados de deformación permanente son más conservadores en contraste a lo reportado con ensayos de APA, puesto que lo peor que le puede suceder a la carpeta asfáltica (en latitudes como las de Costa Rica) es estar cargada,

durante muchos ciclos, sumergida en agua y a temperatura alta, condiciones que ofrece el ensayo de Rueda de Hamburgo y permite identificar MAC con estructuras minerales deficientes.

- Sobre ambos métodos de ensayo AASHTO T-340 y AASHTO T-324 Rueda de Hamburgo, ninguno contempla dentro de la sección de la norma precisión y exactitud, los valores característicos, esto denota que estas metodologías aún se encuentran en investigación. También, el método AASHTO T-324 no es claro en el procedimiento para determinar el punto de inflexión en la gráfica del ensayo para encontrar la "porción de estado estable" y trazar la pendiente de fluencia, esto puede ocasionar que al tratar de automatizar con un software la determinación de este valor, se comentan errores, máxime si en algún punto del ensayo ocurre un reacomodo de partículas a un determinado número de ciclos.
- Existen diferencias importantes entre los dos métodos de ensayo analizados a pesar de que ambos miden la misma variable (deformación permanente), que van desde la configuración y aplicación de las cargas, geometría de los especímenes, procedimiento de curado de las muestras, interfase de contacto espécimen-rueda de carga y cantidad de ciclos, todos son considerados más críticos en el ensayo de Rueda de Hamburgo. Por lo tanto, se concluye que este ensayo es más conservador y son las razones de las diferencias en los resultados para las mismas muestras.
- En cuanto a las especificaciones nacionales, el CR-2010 sí establece parámetros de desempeño para una mezcla asfáltica bajo la metodología Marshall, lo cual tradicionalmente en el país, se ha tenido la idea de que sólo MAC tipo SuperPave® son las que deben cumplir con pruebas de desempeño ante la deformación permanente y fatiga. Un principio básico de las pruebas de desempeño es probar la MAC independientemente de la metodología con que se diseñó y sea para fines estructurales. Las especificaciones de APA actuales para el país, para la deformación permanente son muy conservadoras.
- En general, en Costa Rica se han realizado ensayos de Rueda de Hamburgo (principalmente por parte de laboratorios públicos y muy pocos privados) para contrastar los resultados de deformación permanente de mezclas asfálticas sometidas a la prueba de APA o investigación, no así, como un requerimiento contractual.
- Los ensayos de deformación permanente (APA y Rueda de Hamburgo) utilizando el equipo de APA Jr. resultan en una práctica de simulación útil para llevar a cabo labores de control de calidad en los proyectos, son un insumo importante para la toma de decisiones de los profesionales en ingeniería vial y son pruebas que complementan muy bien los diseños de mezcla asfáltica.
- La mayoría de especificaciones internacionales estudiadas, tienen como límite máximo de deformación utilizando el ensayo de Rueda de Hamburgo superior a 10 mm (con excepción de Alemania que establece 4 mm máximo), siendo el más común de 12,5 mm, lo que concluye que el

orden de magnitud de los resultados obtenidos en las muestras de este estudio es bajo, indicando que las MAC nacionales de forma general, se comportan muy bien ante la deformación. También, el valor máximo de especificación propuesto de 5,380 mm es conservador si se contrasta con legislación internacional, pero establecer un umbral para Costa Rica similar a otros países, ocasionaría que la mayoría de mezclas cumplan muy fácilmente esa prueba, lo que no incentiva la mejora continua de los procesos productivos de MAC.

- La incertidumbre expandida relativa de los ensayos de APA y Rueda de Hamburgo, se determinó en 13,4 % para Rueda de Hamburgo y 14,5 % para APA, sobre el mensurando del resultado, esto con el fin de que el profesional que realice estudios con estos ensayos, tiene un orden de magnitud del valor de incertidumbre de los métodos para tomarlo en cuenta en los análisis respectivos. Así mismo, el cálculo del valor de la incertidumbre del método de ensayo, es fundamental cuando se utiliza una de regla de decisión para establecer un criterio normativo de aceptación y decidir si la muestra ensayada cumple o no.
- Según los resultados de coeficiente de variación, de los parámetros volumétricos de las MAC analizadas, el que mayor dispersión relativa presentó fue la absorción del asfalto con 0,40%; lo cual indica una variabilidad moderada, seguido de la relación polvo/asfalto y el porcentaje pasando del tamiz N° 200 (ambos con C.V. = 0.18%), que señalan baja variabilidad, los demás parámetros se encuentran con variabilidades bajas.
- En ningún caso, las muestras presentaron punto de inflexión en el gráfico de deformación del ensayo de Rueda de Hamburgo, lo que es indicador de que son MAC con buen desempeño. Este punto de desnudamiento es un daño muy importante de analizar en países lluviosos y tropicales como Costa Rica.
- El factor más controversial a la hora de analizar resultados de deformación permanente de MAC compactada, es la incertidumbre de los vacíos de los núcleos extraídos, que puede distar mucho del especificado en las normas para muestras moldeadas en laboratorio ($7,0 \% \pm 0,5 \%$) sin embargo, ambas normas AASHTO T324 (numeral 7.3) y AASHTO T340 (punto 4.21.) permiten ensayar estos especímenes con el porcentaje de vacíos real que presenta en campo. Por lo general, los núcleos extraídos tendrán menor contenido de vacíos de $7,0 \% \pm 0,5 \%$, esto es más representativo del producto colocado que es lo que al final debe desempeñarse correctamente.
- Las series de datos de deformación permanente en ambos ensayos, no siguen una distribución normal, si se toman los valores individuales de cada punto de medición en los especímenes de ensayo. No obstante, utilizando el teorema del límite central y agrupando las series de datos al promedio de deformación por línea o pista (réplica), estas segundas series de datos de APA y Rueda de Hamburgo, siguen una distribución normal con al menos un 95 % de confianza.

- Al comparar los parámetros volumétricos de la MAC contra los resultados de deformación permanente del ensayo de Rueda de Hamburgo, los gráficos muestran tendencias, a pesar de que los datos son pocos y los coeficientes R^2 bajos, los valores indican una relación real entre los predictores significativos y la variable de respuesta. El flujo, contenido de asfalto sobre el agregado, contenido de asfalto sobre la mezcla, asfalto efectivo, VFA, relación polvo / asfalto, y los porcentajes pasando de los tamices de 12,7 mm; 9,5 mm, y los número 4, 8, 16, 30 50 y 200, a medida en que aumentan, también crece la deformación plástica por medio del ensayo de Rueda de Hamburgo. Las propiedades de la mezcla asfáltica de GBS de las pastillas MAC, gravedad específica máxima teórica (GEMT), estabilidad, porcentaje de vacíos, VMA, GBS de los agregados (combinado, fracción fina y fracción gruesa), gravedad específica efectiva, porcentaje de absorción de asfalto y gravedad específica del aglutinante mostraron relación decreciente, lo que quiere decir, a medida en que aumentan su magnitud, decrece la deformación plástica por medio del ensayo de Rueda de Hamburgo.

7.2. Recomendaciones

- Se recomienda continuar con la investigación y realizar un estudio similar con las MAC de tamaño máximo nominal de 19,0 mm aumentando la cantidad de muestra, las cuales también tienen una importante producción en el país.
- Se sugiere que el valor máximo de especificación para el ensayo de deformación permanente de MAC con TMN de 12,7 mm sea fundamentado ampliando la nube de datos para verificar su correcta aplicación y que la Administración y los laboratorios de referencia realicen estudios a escala real y tramos de prueba.
- Una vez que las normativas AASHTO T-340 y AASHTO T-324 publiquen parámetros en la sección de precisión y exactitud de la norma, se debe de actualizar el valor de la desviación estándar del método de ensayo (σ_T) que modificaría la propuesta de especificación planteada.
- Se recomienda utilizar el ensayo de Rueda de Hamburgo en lugar del APA para determinar la deformación permanente de MAC, puesto que el primero ofrece más información, determina también la susceptibilidad al daño por humedad y es más representativo de las condiciones críticas en países lluviosos y tropicales como Costa Rica, utilizar los dos o dejarlo a elección del Contratista, podría provocar contradicciones con los resultados.
- Una alternativa para buscar obtener especímenes compactados de campo con porcentajes de vacíos cercanos a las muestras moldeadas en laboratorio ($7,0 \pm 0,5$ %) puede ser realizar un “mapeo” distribuyendo los ensayos a lo largo y ancho sobre el tramo de estudio con la prueba, no destructiva, de porcentaje de compactación con densimetría nuclear (AASHTO T310) y de esta forma, al menos, seleccionar el sitio que presente menor densidad o porcentaje de compactación de la MAC y extraer las muestras en ese punto, lo que conllevaría a analizar las muestras representativas de la condición más crítica (con porcentajes de vacíos altos), si los resultados cumplen en esta condición, es de esperar que en el resto del tramo también cumplirían, lo que sería conservador.
- Como se pudo observar, a pesar de obtener coeficientes de determinación (R^2) bajos en los análisis de la investigación, los valores indican una relación real entre los predictores significativos y la variable de respuesta. Aumentar a una mayor cantidad de muestras podría contribuir en obtener correlaciones significativas.
- Se tiene la hipótesis de que las especificaciones internacionales de la deformación permanente utilizando Rueda de Hamburgo son altas porque con mayor frecuencia las MAC de otros países presentan daño por humedad, se puede investigar más este fenómeno.

- Se invita a todos los profesionales involucrados a que todos los análisis sobre deformación permanente se realicen con equipos debidamente estandarizados y operados por personal acreditado, a fin de obtener datos confiables en el proyecto.
- Se sugiere realizar una investigación propia de comparar resultados de deformación permanente con mezclas combinadas en laboratorio versus las muestreadas en boca de planta, para determinar el impacto en los resultados con agregados sin pasar por el quemador de la planta a los pasando por el mismo (muestreada en la góndola de la vagoneta) aspecto de controversia en el sector actualmente para las pruebas de desempeño, lo anterior aunque no forma parte de esta investigación, se considera importante señalar para futuros proyectos.
- En cuanto a los resultados de deformación permanente con núcleos extraídos, se recomienda dar un seguimiento al tramo de MAC en el tiempo, con el fin de determinar su comportamiento, ya que, si bien es cierto al ensayar muestras moldeadas en laboratorio, debe tenerse también especial interés en lo que sucede con la mezcla compactada en campo, puesto que este producto final es el que se espera tenga un desempeño adecuado. Puede plantearse, por ejemplo, una especificación diferenciada para las MAC muestreadas en planta y otra en campo.
- Se recomienda al Conavi incorporar las especificaciones de deformación permanente con Rueda de Hamburgo en los carteles de mantenimiento rutinario y conservación vial para las MAC diseñadas con la metodología Marshall y SuperPave y que sea revisada con una periodicidad de 5 años máximo ya que las tecnologías de los productos cambian.

REFERENCIAS

- AASHTO. (2015). T 340-10 Standard Method of Test for Determining Rutting Susceptibility of Hot Mix Asphalt (HMA) Using the Asphalt Pavement Analyzer (APA).
- AASHTO. (2017). T 324-17 Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Asphalt Mixtures.
- ASTM International. (2015). ASTM C670 – 15. Standard Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials. Estados Unidos.
- ASTM International. (2021). ASTM D6607 – 21 Standard Practice for Inclusion of Precision Statement Variation in Specification Limits. Estados Unidos.
- Chavarría Blanco, L. A. (Julio 2018). *Estimación de las incertidumbre de las mediciones aplicado a ensayos de materiales, metrología básica e interpretación de certificados*. San José: Asesoría Profesional en Ingeniería y Mercadeo Aproimsa.
- Conavi. (2013, Junio). *Cartel de Licitación Pública Internacional No. 2013LI-000011-0DE00 Para la Contratación del Diseño y Construcción de la Carretera La Abundancia Florencia y Radial Ciudad Quesada, Carretera San Carlos, Ruta Nacional No. 35*.
- Consejo Nacional de Vialidad. (2015). *LICITACIÓN PÚBLICA No. 2014LN-000018-0CV00, MP Y R: MANTENIMIENTO PERIÓDICO Y*. San José.
- Du, J., Shen, D., & Cross, S. (2008). *Pavement Rutting Dynamic Prediction Model*. International Journal of Pavement Research and Technology.
- Flores Flores, M., Delgado Alamilla, H., & Gómez López, J. (2018). *Evaluación del desempeño de mezclas asfálticas con la rueda cargada de Hamburgo*. Querétaro, México: Instituto Mexicano del Transporte (IMT).
- Garnica Anguas, P., Delgado Alamilla, H., & Sandoval Sandoval, D. (2005). *Análisis de varianza del efecto de algunos factores que influyen en la deformación permanente de mezclas asfálticas*. Querétaro: Publicaciones IMT.
- Hernández Sampieri, R. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. México: McGraw-Hill Education.
- Huamán Guerrero, N., & Chang Albitres, C. (2011). *La deformación permanente en las mezclas asfálticas y el consecuente deterioro de los pavimentos asfálticos en el Perú*. Lima Perú.
- Huang, Y. (2004). *Pavement Analysis and Design*. New Jersey, USA: Prentice Hall.
- ILAC - Cooperación Internacional de Acreditación de Laboratorios. (2019). *Guía para establecer reglas de decisión en la declaración de conformidad*. Australia.
- INTECO. (2017, 12 12). *INTE/ISO/IEC 17025:2017. Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración. Requisitos*. San José, Costa Rica.
- La Dirección de Planificación Sectorial, del Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2013). *Costa Rica: Anuario Estadístico del Sector Transporte e Infraestructura, 2013*. San José: MOPT.
- LanammeUCR. (2018). *Evaluación de la mezcla asfáltica producida en las plantas asfálticas de los proyectos de conservación Vial durante el año 2018. Licitación pública No. 2014LN-000018-0CV00. Varias zonas*. San José: UCR.
- Leiva, F., Pérez, E., Aguiar, J., & Loría, L. (2016). *Modelo de deformación permanente para la evaluación de la condición del pavimento*. San Pedro Costa Rica.
- LGC Ingeniería de Pavimentos S.A. (2017). *Método para el muestreo de mezclas asfálticas*. Desamparados.

- Loría Salazar, L. G. (2016, Agosto 30). Oficio LM-PI-130-2016. Respuesta de asesoramiento técnico del LANammeUCR al Ministro de Obras Públicas y Transportes. San José, Costa Rica.
- Loría, L., Aguiar, J., Padilla, P., & Villacorta, F. (2014). *Éxito de los ensayos acelerados a escala natural en Costa Rica*. Costa Rica: Revista Ingeniería de Obras Civiles.
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2013). *Memorándum de acuerdo para el proyecto de diseño, rehabilitación y Ampliación de la ruta nacional n° 32 carretera Braulio Carillo, sección intersección ruta nacional n° 4 (cruce a Sarapiquí)- Limón*. San José.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, Dirección de Normatividad Vial. (2013). *Manual de Carrereras: Especificaciones Técnicas Generales para Construcción (EG-2013)*. Lima, Perú.
- Minitab 18.1, LLC. (2021). Getting Started with Minitab. Retrieved from www.minitab.com
- Mohammad, L., Elseifi, M., Raghavendra, A., & Ye, M. (2015). *Hamburg Wheel-Track Test Equipment Requirements and Improvements to AASHTO T 324*. Luisiana: National Cooperative Highway Research Program (NCHRP).
- MOPT. (2010). *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes CR-2010*. Costa Rica.
- MOPT. (Mayo 2017). *Decreto N° 40333-MOPT*. San José: La Gaceta, Imprenta Nacional.
- Mora Valverde, M. (2015). *Fórmulas y tablas estadísticas*. San José: UCR.
- Nieves Hurtado, A., & Domínguez Sánchez, F. C. (2010). *Probabilidad y estadística para ingeniería un enfoque moderno*. México D.F.: McGraw-Hill.
- Pavement Technology, Inc. (2015). *Asphalt Pavement Analyzer-Junior (APA JR.) Specification*. Covington.
- Rondón, H. A., & Reyes, F. (2009). *Deformación permanente de materiales granulares en pavimentos flexibles: estado del conocimiento*. Medellín Colombia.
- Unidad de Auditoría Técnica, LanammeUCR. (2019). *Evaluación de la calidad de la mezcla asfáltica producida durante el 2018 en las plantas asfálticas de los proyectos de Conservación Vial. Licitación Pública No. 2014LN-000018-0CV00. Varias Zonas*. San José: UCR.
- Unidad de Investigación LanammeUCR. (2011). *Propuesta de modificación al anexo 1 del cartel de licitación pública 2009LN-000003-CV "Conservación Vial De La Red Vial Nacional Pavimentada*. San José: UCR.

ANEXOS

Anexo 1: Certificado de calibración.





UNIVERSIDAD NACIONAL
ESCUELA DE CIENCIAS AMBIENTALES
PROGRAMA DE ESTUDIOS EN CALIDAD, AMBIENTE Y METROLOGÍA
LABORATORIO DE METROLOGÍA

Página 2 de 3

ANEXO AL CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN 067-2019 M

RESULTADOS DE LAS MEDICIONES

Tabla 1. Error de indicación Bocas Exteriores

Puntos comprobados	Valor convencional de los patrones	Indicaciones del Instrumento (Promedio)	Error de Indicación	Incertidumbre Expandida $k = 2$
mm	mm	mm	mm	mm
1	1,00	1,01	0,01	0,02
5	5,00	5,02	0,02	0,02
10	10,00	10,01	0,01	0,02
20,5	20,50	20,52	0,01	0,02
25	25,00	25,01	0,00	0,02
50	50,00	50,01	0,01	0,02
100	100,00	100,00	0,00	0,02
125	125,00	125,01	0,00	0,02
150	150,00	150,01	0,01	0,02
200	200,00	200,01	0,01	0,02

Figura 83. Certificado de calibración N° 067-2019 M. Equipo galgas LGC-068-005

Fuente: LGC, 2021.

Anexo 2: Tabla de valores de la t-Student a niveles de confianza (a dos colas)

Table G.2 — Value of $t_p(v)$ from the t -distribution for degrees of freedom v that defines an interval $-t_p(v)$ to $+t_p(v)$ that encompasses the fraction p of the distribution

Degrees of freedom v	Fraction p in percent					
	68,27 ^{a)}	90	95	95,45 ^{a)}	99	99,73 ^{a)}
1	1,84	6,31	12,71	13,97	63,66	235,80
2	1,32	2,92	4,30	4,53	9,92	19,21
3	1,20	2,35	3,18	3,31	5,84	9,22
4	1,14	2,13	2,78	2,87	4,60	6,62
5	1,11	2,02	2,57	2,65	4,03	5,51
6	1,09	1,94	2,45	2,52	3,71	4,90
7	1,08	1,89	2,36	2,43	3,50	4,53
8	1,07	1,86	2,31	2,37	3,36	4,28
9	1,06	1,83	2,26	2,32	3,25	4,09
10	1,05	1,81	2,23	2,28	3,17	3,96
11	1,05	1,80	2,20	2,25	3,11	3,85
12	1,04	1,78	2,18	2,23	3,05	3,76
13	1,04	1,77	2,16	2,21	3,01	3,69
14	1,04	1,76	2,14	2,20	2,98	3,64
15	1,03	1,75	2,13	2,18	2,95	3,59
16	1,03	1,75	2,12	2,17	2,92	3,54
17	1,03	1,74	2,11	2,16	2,90	3,51
18	1,03	1,73	2,10	2,15	2,88	3,48
19	1,03	1,73	2,09	2,14	2,86	3,45
20	1,03	1,72	2,09	2,13	2,85	3,42
25	1,02	1,71	2,06	2,11	2,79	3,33
30	1,02	1,70	2,04	2,09	2,75	3,27
35	1,01	1,70	2,03	2,07	2,72	3,23
40	1,01	1,68	2,02	2,06	2,70	3,20
45	1,01	1,68	2,01	2,06	2,69	3,18
50	1,01	1,68	2,01	2,05	2,68	3,16
100	1,005	1,660	1,984	2,025	2,626	3,077
∞	1,000	1,645	1,960	2,000	2,576	3,000

a) For a quantity z described by a normal distribution with expectation μ_z and standard deviation σ , the interval $\mu_z \pm k\sigma$ encompasses $p = 68,27$ percent, $95,45$ percent and $99,73$ percent of the distribution for $k = 1, 2$ and 3 , respectively.

Figura 84. Tabla de valores de la t-Student a niveles de confianza (a dos colas)
Fuente: Guide to the expression of uncertainty in measurement JCGM 100:2008.

Anexo 3: Informes de ensayo por parte del laboratorio LGC Ingeniería de Pavimentos S.A.

	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.26
		Aprobado: 2021-01-20
		Página: 1 de 70
		Nº Informe 01-2539-2021

San José, Costa Rica, 7 de diciembre del 2021

Proyecto: Tesis de Maestría

Señor

Ing. Amed Aldi Bolaños
 Teléfono: 8914-9633
 Coronado, San José

Estimados Señores:



A continuación, le presento el resultado de los ensayos realizados al material de Mezcla Asfáltica en Caliente para el proyecto de referencia.

Información de la muestra

Fecha de recepción de la muestra: 2020-06-01, 2020-06-04, 2021-07-30, 2021-08-19, 2021-08-24, 2021-10-11, 2021-10-28
 Identificación de la muestra: Ver anexos
 Descripción: Mezcla asfáltica en caliente

Muestreo (s)

(-) Cliente
 (X) Personal del laboratorio

Ingreso de Muestra:

(X) RC-05: 9166, 9233, 19546, 19890, 19896, 19957, 20828, 21172
 (-) 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: 2020-06-01, 2020-06-03, 2021-07-29, 2021-08-19, 2021-08-23, 2021-10-10, 2021-10-28
 Lugar del muestreo: Planta A, Planta B, Planta C, Planta D, Planta E, Planta F, Planta G. Costa Rica
 Lugar de realización del ensayo: Laboratorio 01 LGC Ingeniería de Pavimentos S.A.

Ensayos Realizados:

Nombre del Ensayo	Método de Ensayo	Ensayo Acreditado (*)	Ensayo No Acreditado (**)
Método de ensayo para determinar la deformación permanente en mezclas asfálticas compactadas utilizando el Analizador de Pavimentos Asfálticos APA JR	AASHTO T-340	X	-
Moldeo De Especímenes MAC Por Medio Del Compactador Giratorio	AASHTO T-312	X	-
Método de ensayo para el porcentaje de vacíos de aire de mezclas asfálticas densas y abiertas para pavimentos.	AASHTO T-269 INTE C4	X	-



	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.26
		Aprobado: 2021-01-20
		Página: 2 de 70
		N° Informe 01-2539-2021

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	INTE C1	X	-
Método de ensayo para la Gravedad específica máxima teórica de mezclas asfálticas	INTE C3	X	-
Método de ensayo para la Reducción de muestras Método A Mezcla Asfáltica	AASHTO R-47	X	-
Método de ensayo para determinar la deformación permanente y daño por humedad en mezclas asfálticas por medio de la Rueda de Hamburgo	AASHTO T-324	X	-
Método de ensayo para el Análisis mecánico del agregado extraído de mezclas asfálticas	AASHTO T-30	X	-
Método de ensayo para la elaboración de especímenes y determinación de la Estabilidad y Flujo Marshall método automático	AASHTO R68 AASHTO T-245	X	-
GBS MAC Pastillas Moldeadas	C-1	X	-
Relación Polvo-Asfalto	-	-	X
Método para el Muestreo de mezclas asfálticas	AASHTO T-168 ASTM D-979 ASTM D-5361	X	-
Vacios Llenos De Asfalto VFA	-	-	X
Método de ensayo para el Contenido de humedad en mezclas asfálticas	AASHTO T-329	X	-
VACIOS EN EL AGREGADO MINERAL VMA	-	-	X
Método de ensayo para el Contenido de asfalto de mezclas asfálticas MAC mediante el método de ignición método B	INTE C9	X	-

(Ampliar o reducir esta tabla según lo requerido)

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

No hay

Resultados de Ensayos

Anexo N°	Descripción	Página (s)
1	Deformación Permanente APA	4-47
2	Rueda de Hamburgo	48-69
3	Análisis Mezcla Asfáltica en Caliente	70

	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.26
		Aprobado: 2021-01-20
		Página: 3 de 70
		Nº Informe 01-2539-2021

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

Atentamente,

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

Jose Manuel Barrantes
 Gestor Técnico
LGC Ingeniería de Pavimentos S.A.
Encargado de revisar el Informe

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

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 reportara la condición del ítem; 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 ítems 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, lgcingeneriadepavimentos@gmail.com.
- Nota7:** Si desea formular una queja o reclamo, comunicarse con gestor de calidad o al correo gestordecalidad@lgcingeneria.net
- Nota8:** Si desea conocer el alcance del laboratorio puede visitar el sitio web del ECA www.eca.or.cr
- 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-----

Anexo N°1 Deformación Permanente APA

Muestra: 01-16756-2020

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: 2021-08-27

Muestra Izquierda							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	62,7	2,222	2,222	0,000	2,190	2,265	2,225

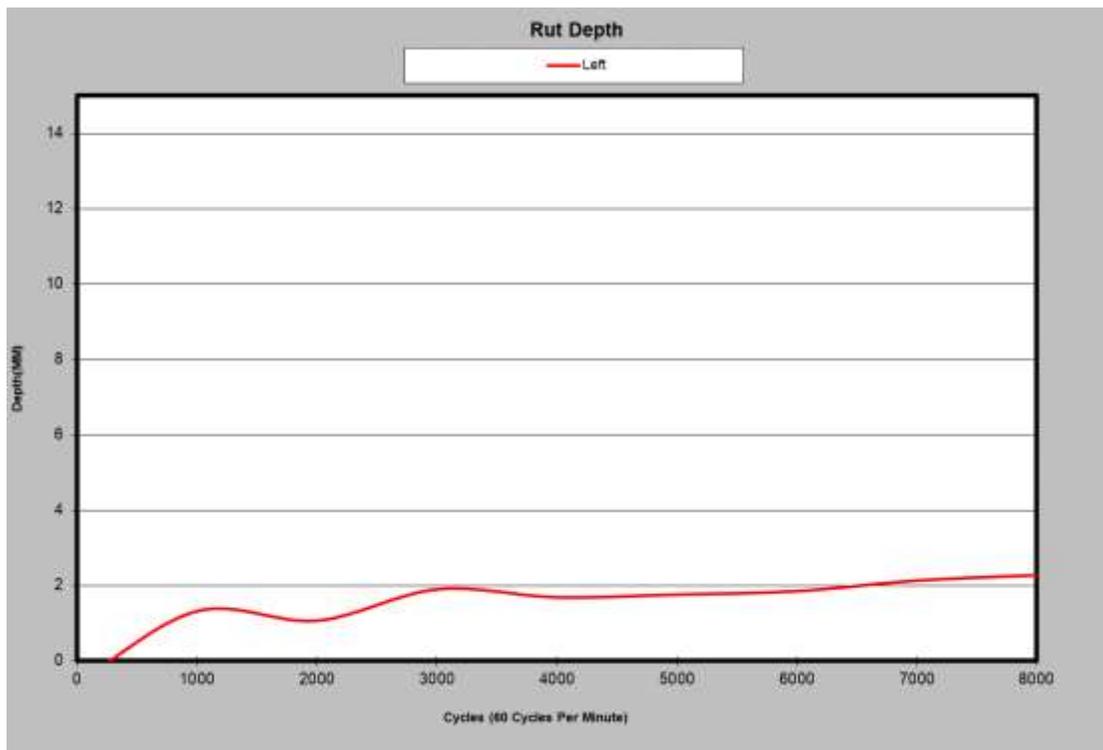


Gráfico 1. Deformación Muestra 01-16756-2021

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: 2021-08-27

Muestra Derecha							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	62,7	2,007	2,017	0,000	2,042	2,042	2,027

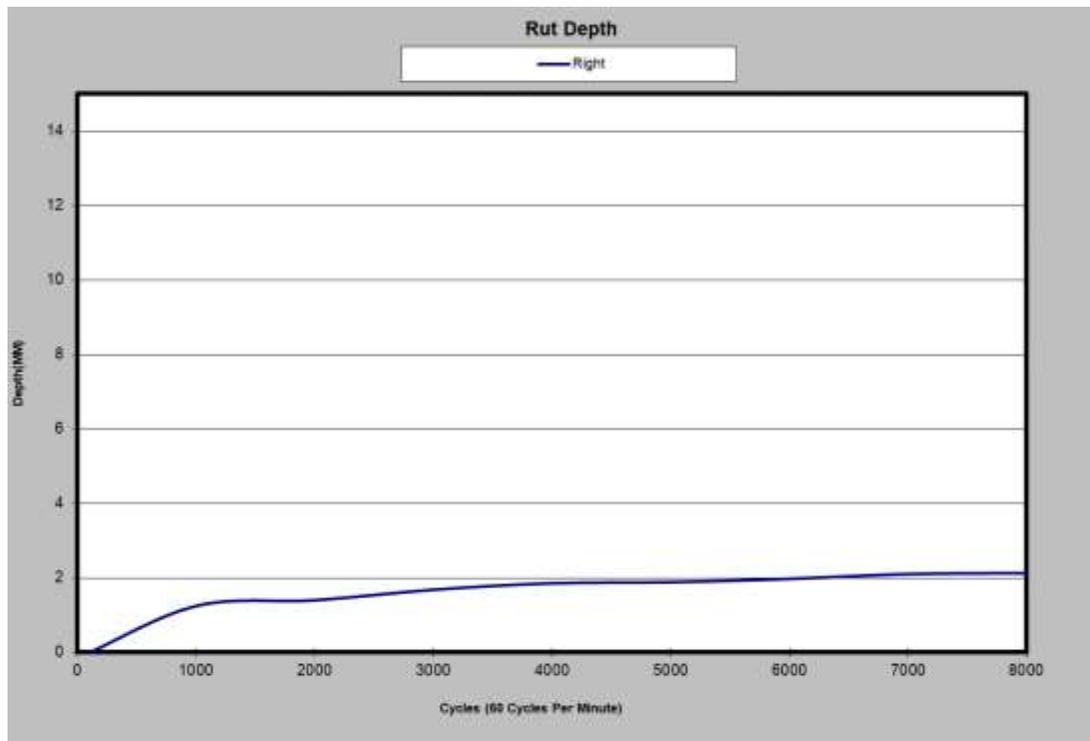


Gráfico 2. Deformación Muestra 01-16756-2021

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: 2021-08-27

Muestra Izquierda							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	59,8	2,066	2,096	0,000	2,020	2,099	2,070

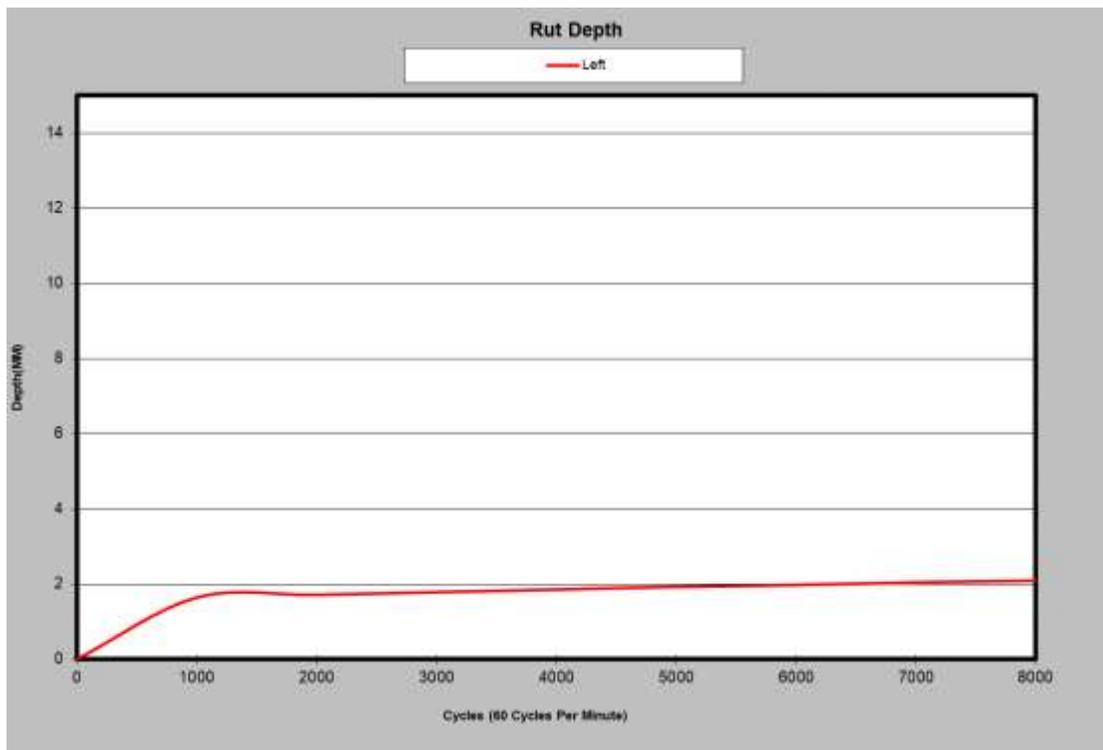


Gráfico 3. Deformación Muestra 01-16756-2021

Deformación general promedio de las 6 muestras ensayadas:	2,107 mm
--	-----------------

	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.26
		Aprobado: 2021-01-20
		Página: 7 de 70
		N° Informe 01-2539-2021

Tabla N°4
Resultados de Ensayos

MUESTRA	FECHA(S) DE REALIZACIÓN	MÉTODO DE ENSAYO	ENSAYO	RESULTADOS								
				Temperatura de moldeo: 155,0 °C			Temperatura Ambiente: 24,5 °C					
01-16756-2020	2021-08-26	(*) INTE C4 AASHTO T-269	Método de ensayo para el Porcentaje de vacíos de aire de mezclas asfálticas densas y abiertas para pavimentos	Primera Prueba								
				Pastilla	GEMT	Peso seco (g)	Peso SSS (g)	Peso sum. (g)	GBS	Vacíos (%)		
				1, LI	2,446	2886,4	2898,8	1631,6	2,278	6,9		
				4, LI		2880,4	2890,6	1626,6	2,279	6,8		
				2, LD		2885,9	2902,1	1630,2	2,269	7,2		
				3, LD	2888,7	2909,1	1638,6	2,274	7,0			
				Segunda Prueba								
				5, LI	2,446	2884,9	2913,7	1644,0	2,272	7,1		
				6, LI		2884,2	2913,0	1647,5	2,279	6,8		

-----Salto de Página-----

Muestra: 01-19405-2021

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: 2021-08-22

Muestra Izquierda							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	60,1	1,623	1,513	0,000	1,616	1,616	1,592

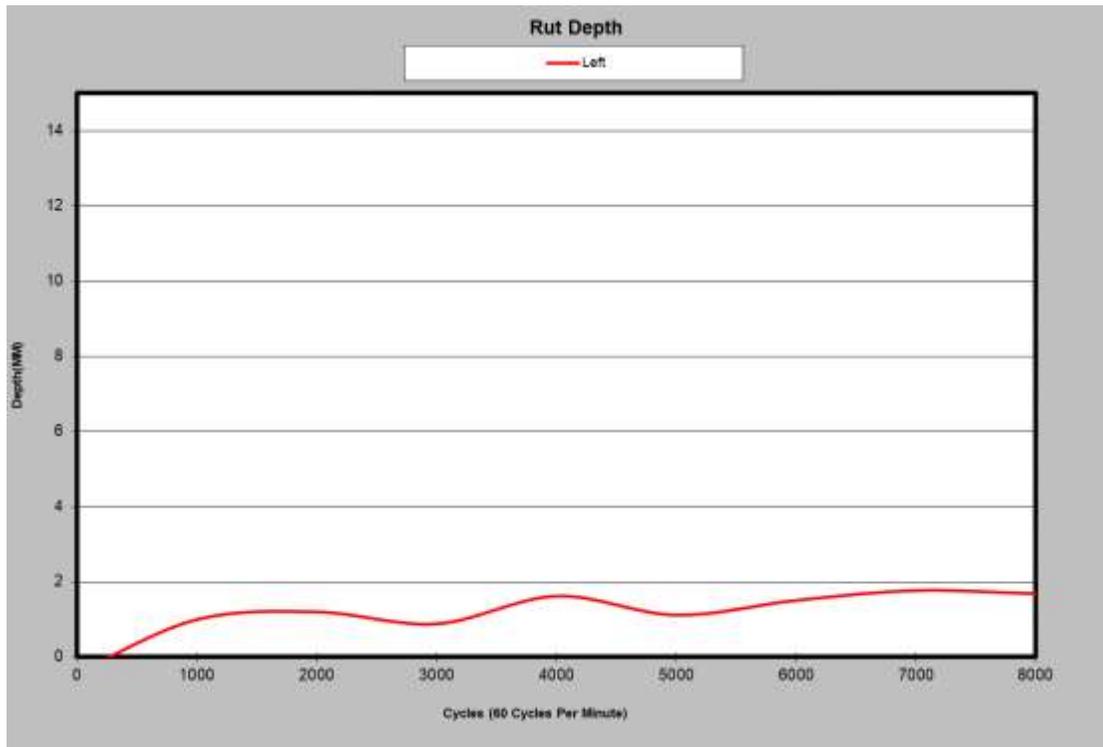


Gráfico 4. Deformación Muestra 01-19405-2021

Tabla 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: 2021-08-22

Muestra Derecha							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	60,1	2,290	2,151	0,000	2,195	2,308	2,236

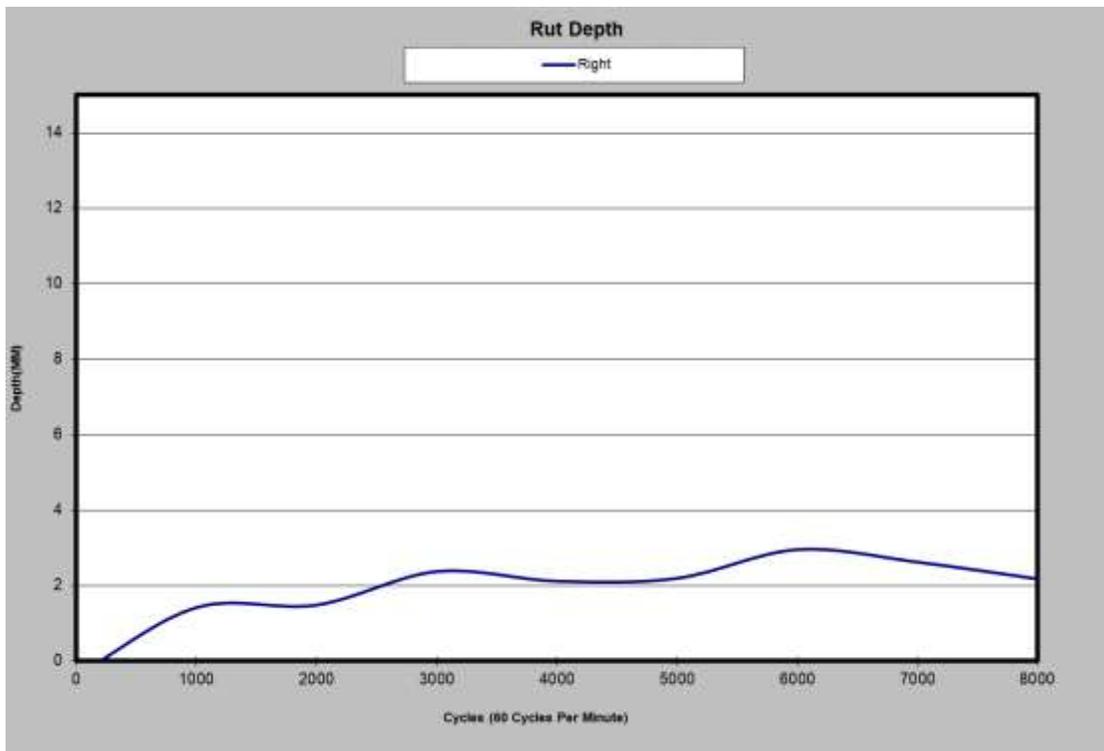


Gráfico 5. Deformación Muestra 01-19405-2021

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: 2021-08-22

Muestra Derecha							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	60,0	1,847	1,779	0,000	1,801	1,851	1,820

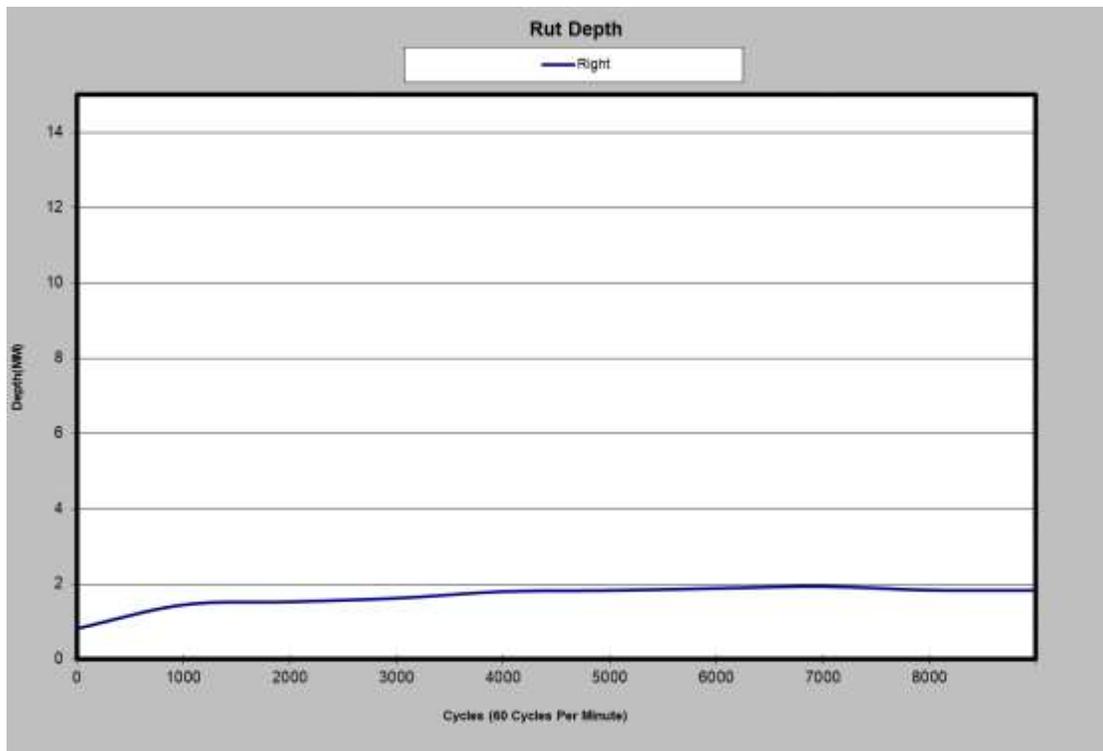


Gráfico 6. Deformación Muestra 01-19405-2021

Deformación general promedio de las 6 muestras ensayadas:	1,883 mm
--	-----------------

	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.26
		Aprobado: 2021-01-20
		Página: 11 de 70
		N° Informe 01-2539-2021

Tabla N°8
Resultados de Ensayos

MUESTRA	FECHA(S) DE REALIZACIÓN	MÉTODO DE ENSAYO	ENSAYO	RESULTADOS								
				Temperatura de moldeo: 155,0 °C			Temperatura Ambiente: 25,6 °C					
01-19405-2021	2021-08-20	(*) INTE C4 AASHTO T-269	Método de ensayo para el Porcentaje de vacíos de aire de mezclas asfálticas densas y abiertas para pavimentos	Primera Prueba								
				Pastilla	GEMT	Peso seco (g)	Peso SSS (g)	Peso sum. (g)	GBS	Vacíos (%)		
				1, LI	2,468	2891,0	2909,7	1650,0	2,295	7,0		
				5, LI		2888,0	2905,7	1644,4	2,290	7,2		
				2, LD		2889,2	2908,9	1652,0	2,299	6,9		
				4, LD	2886,2	2898,9	1642,5	2,297	6,9			
				Segunda Prueba								
				3, LI	2,468	2890,1	2919,0	1660,0	2,296	7,0		
				6, LI		2890,7	2919,6	1661,9	2,298	6,9		

-----Salto de Página-----

Muestra: 01-20555-2021

Tabla N°9
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: 2021-08-30

Muestra Izquierda							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	58,9	3,342	3,323	0,000	3,326	3,347	3,335

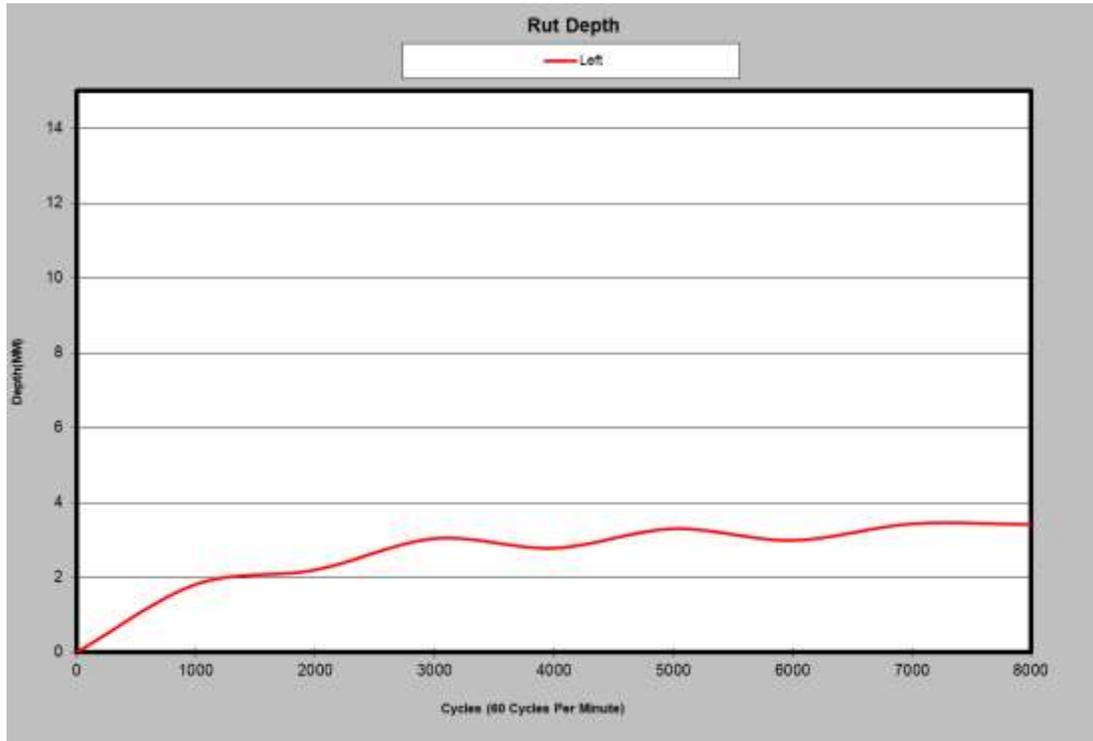


Gráfico 7. Deformación Muestra 01-20555-2021

Tabla N°10
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: 2021-08-30

Muestra Derecha							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	58,9	2,997	2,997	0,000	2,890	3,141	3,006

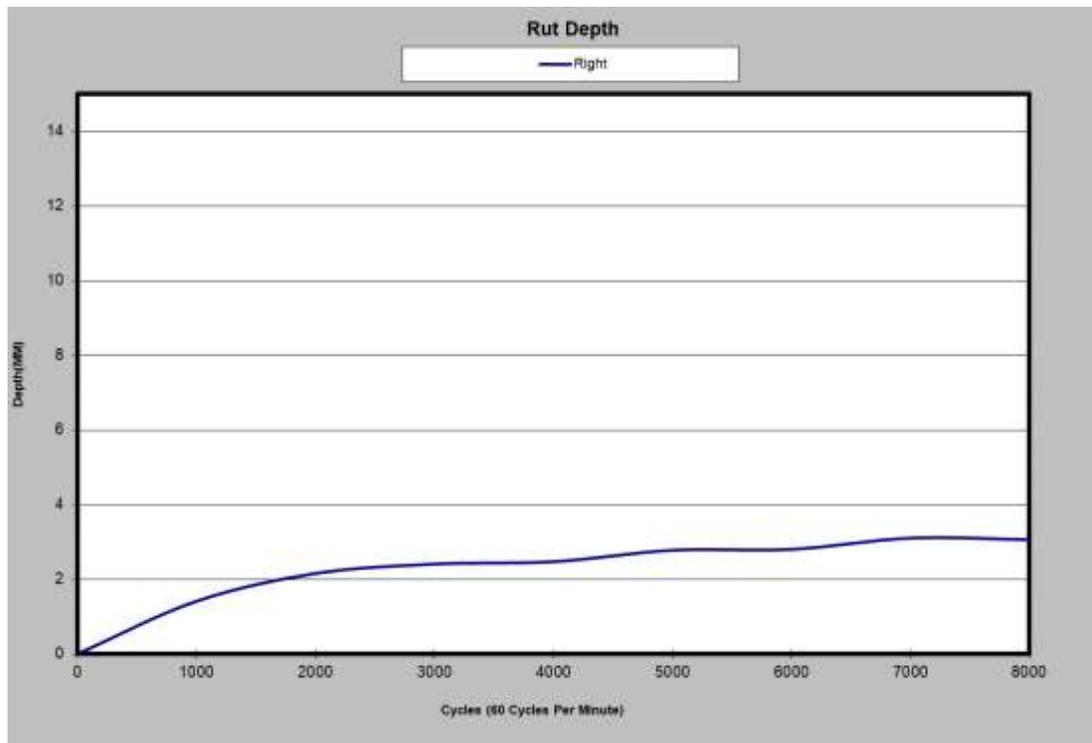


Gráfico 8. Deformación Muestra 01-20555-2021

Tabla N°11
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: 2021-08-30

Muestra Izquierda							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	59,4	3,309	3,249	0,000	3,138	3,203	3,225

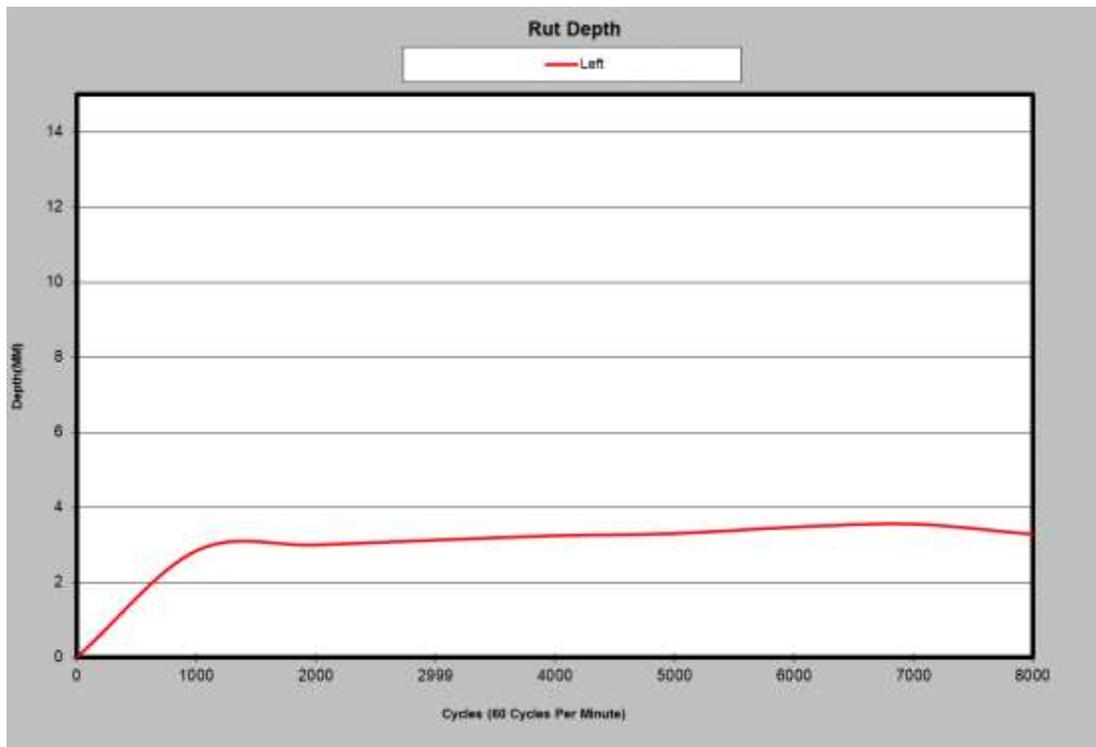


Gráfico 9. Deformación Muestra 01-20555-2021

Deformación general promedio de las 6 muestras ensayadas:	3,189 mm
--	-----------------

	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.26
		Aprobado: 2021-01-20
		Página: 15 de 70
		N° Informe 01-2539-2021

Tabla N°12
Resultados de Ensayos

MUESTRA	FECHA(S) DE REALIZACIÓN	MÉTODO DE ENSAYO	ENSAYO	RESULTADOS						
				Temperatura de moldeo: 155,0 °C			Temperatura Ambiente: 25,3 °C			
01-20555-2021	2021-09-01	(*) INTE C4 AASHTO T-269	Método de ensayo para el Porcentaje de vacíos de aire de mezclas asfálticas densas y abiertas para pavimentos	Primera Prueba						
				Pastilla	GEMT	Peso seco (g)	Peso SSS (g)	Peso sum. (g)	GBS	Vacíos (%)
				2, LI	2,452	2904,8	2928,9	1650,0	2,271	7,4
				5, LI		2907,1	2938,0	1658,4	2,272	7,4
				3, LD		2904,1	2916,5	1638,8	2,273	7,3
				6, LD		2905,7	2920,9	1643,0	2,274	7,3
				Segunda Prueba						
				1, LI	2,452	2905,6	2934,7	1660,0	2,280	7,0
				4, LI		2902,7	2931,7	1661,9	2,286	6,8

-----Salto de Página-----

Muestra: 01-20566-2021

Tabla N°13
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: 2021-08-23

Muestra Izquierda							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	60,2	2,268	2,188	0,000	2,320	2,397	2,293

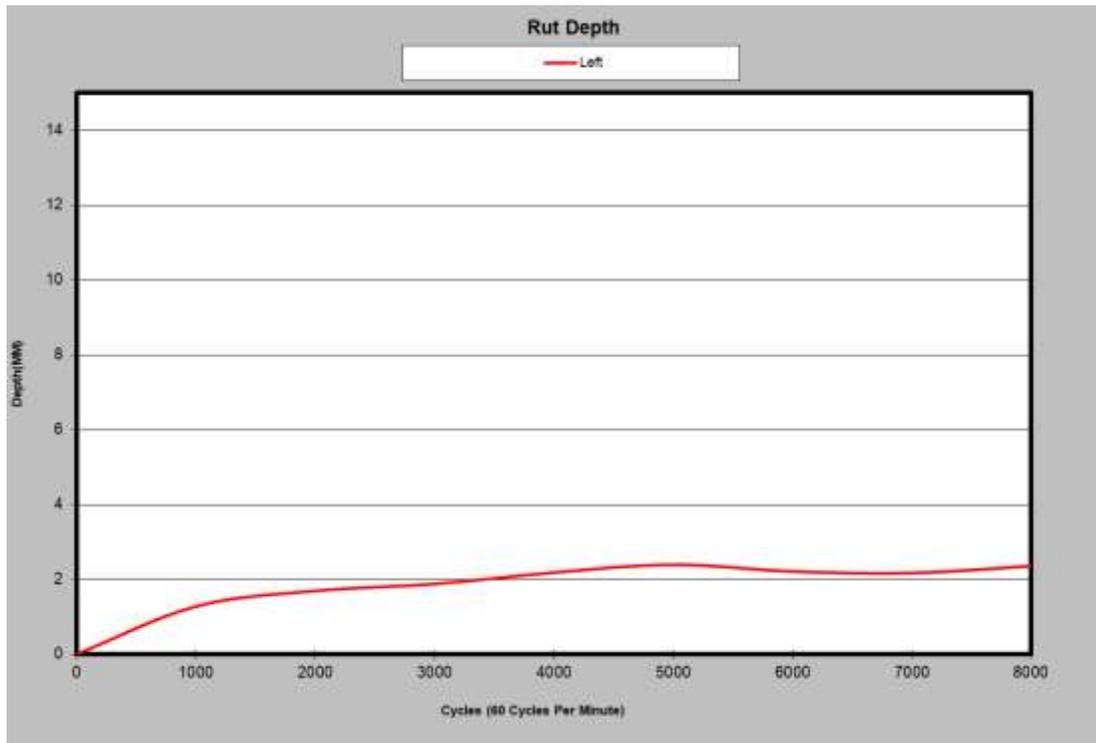


Gráfico 20. Deformación Muestra 01-20566-2021

Tabla N°14
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: 2021-08-23

Muestra Derecha							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	60,2	2,424	2,463	0,000	2,359	2,382	2,407

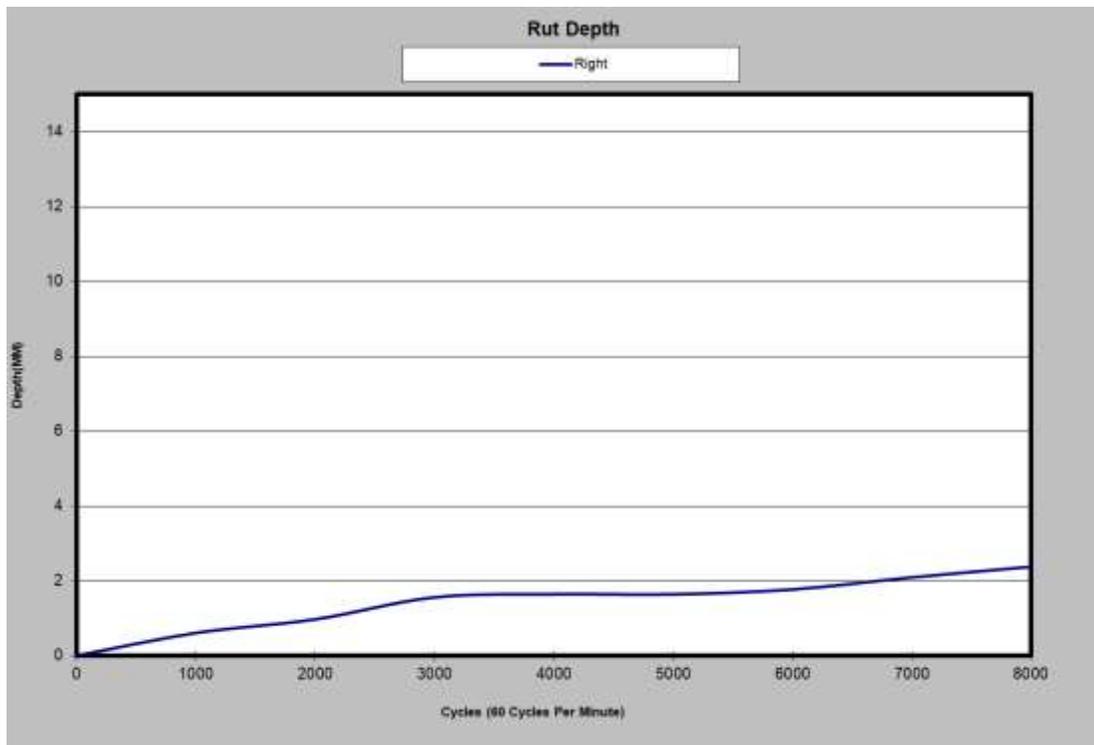


Gráfico 11. Deformación Muestra 01-20566-2021

Tabla N°15
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: 2021-08-23

Muestra Derecha							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	60,0	2,273	2,209	0,000	2,270	2,277	2,257

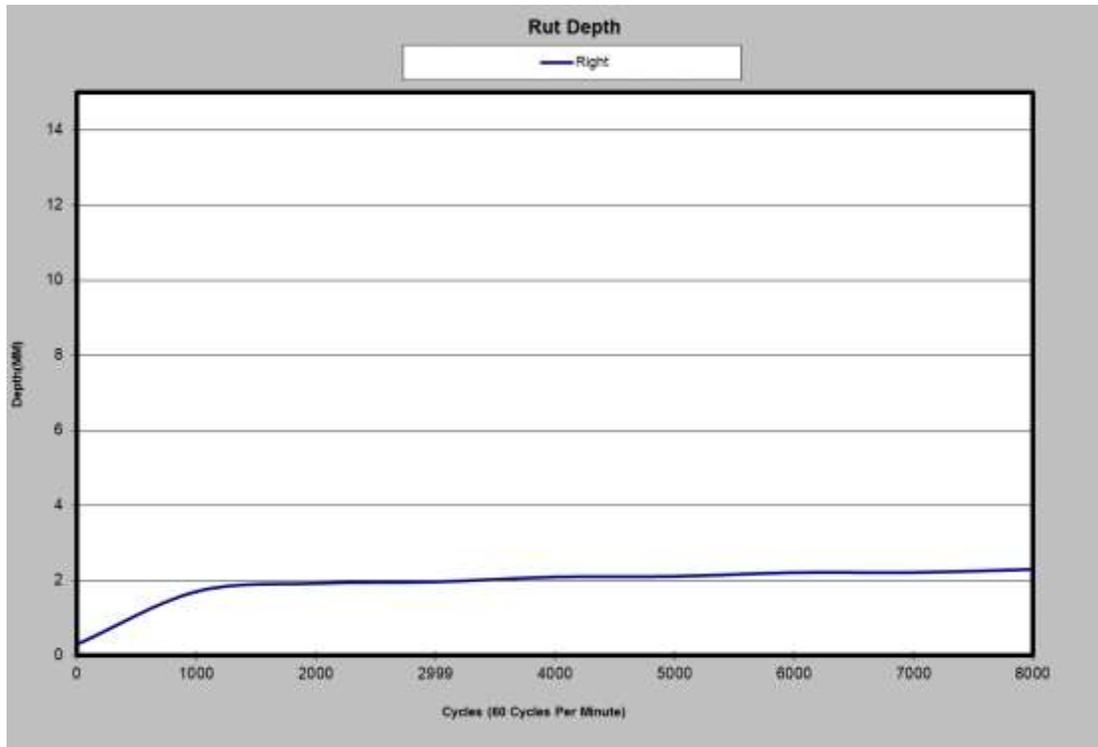


Gráfico 12. Deformación Muestra 01-20566-2021

Deformación general promedio de las 6 muestras ensayadas:	2,319 mm
--	-----------------

	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.26
		Aprobado: 2021-01-20
		Página: 19 de 70
		N° Informe 01-2539-2021

Tabla N°16
Resultados de Ensayos

MUESTRA	FECHA(S) DE REALIZACIÓN	MÉTODO DE ENSAYO	ENSAYO	RESULTADOS						
				Temperatura de moldeo: 155,0 °C			Temperatura Ambiente: 25,5 °C			
01-20566-2021	2021-08-19	(*) INTE C4 AASHTO T-269	Método de ensayo para el Porcentaje de vacíos de aire de mezclas asfálticas densas y abiertas para pavimentos	Primera Prueba						
				Pastilla	GEMT	Peso seco (g)	Peso SSS (g)	Peso sum. (g)	GBS	Vacíos (%)
				1, LI	2,470	2896,4	2905,6	1638,2	2,285	7,5
				2, LI		2900,0	2904,4	1641,6	2,296	7,0
				3, LD		2893,1	2895,0	1640,3	2,306	6,6
				4, LD		2895,4	2902,8	1638,6	2,290	7,3
				Segunda Prueba						
				7, LI	2,470	2898,6	2927,6	1662,6	2,291	7,2
				8, LI		2899,2	2928,2	1660,3	2,287	7,4

-----Salto de Página-----

Muestra: 01-20567-2021

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: 2021-08-20

Muestra Izquierda							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	60,8	1,949	1,949	0,000	2,115	2,011	2,006

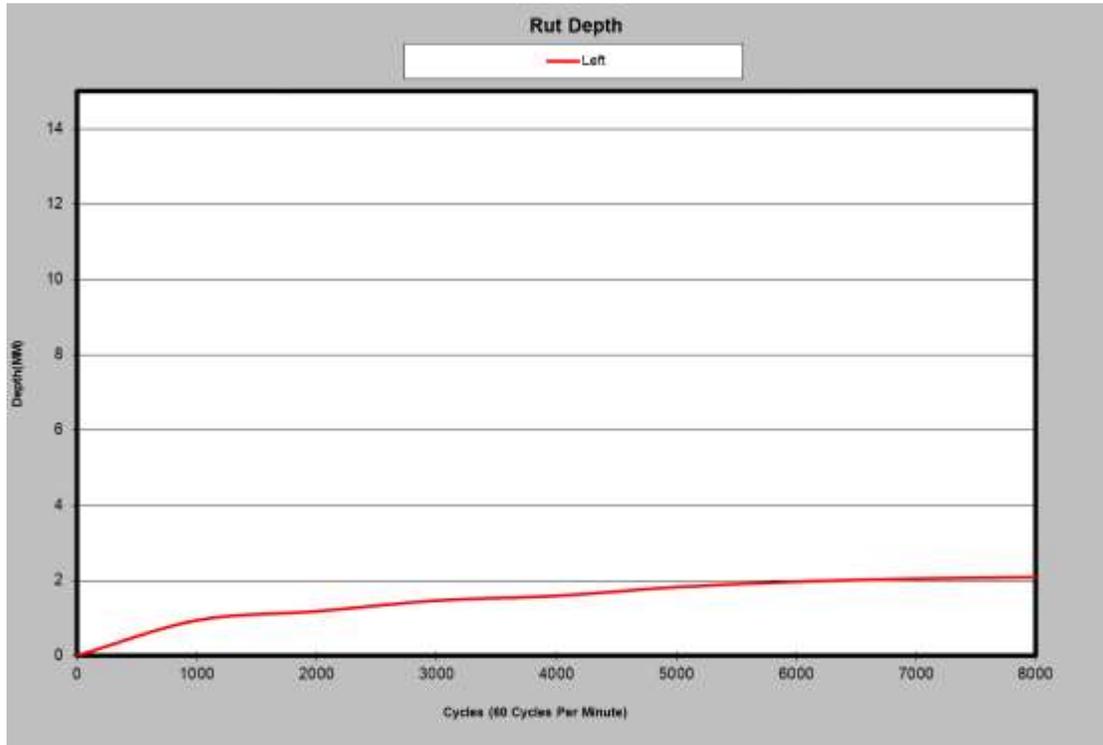


Gráfico 33. Deformación Muestra 01-20567-2021

Tabla N°18
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: 2021-08-20

Muestra Derecha							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	60,8	2,835	2,933	0,000	2,890	2,890	2,887

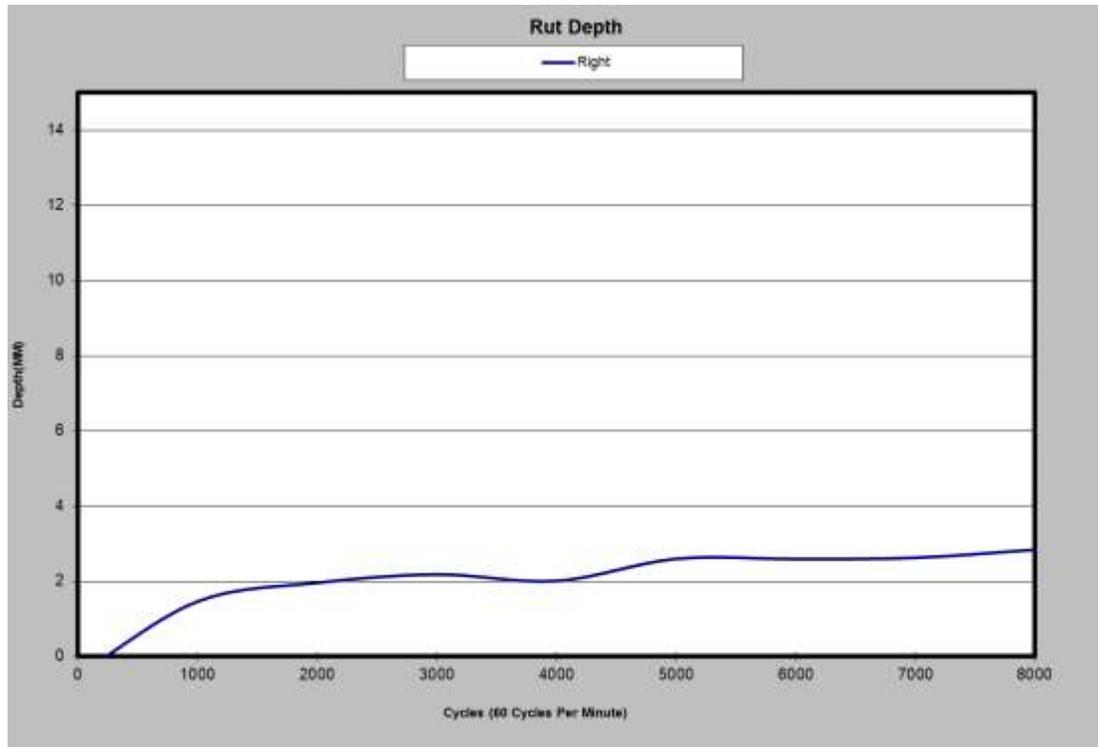


Gráfico 14. Deformación Muestra 01-20567-2021

Tabla N°19
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: 2021-08-20

Muestra Izquierda							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	60,5	2,297	2,341	0,000	2,405	2,312	2,339

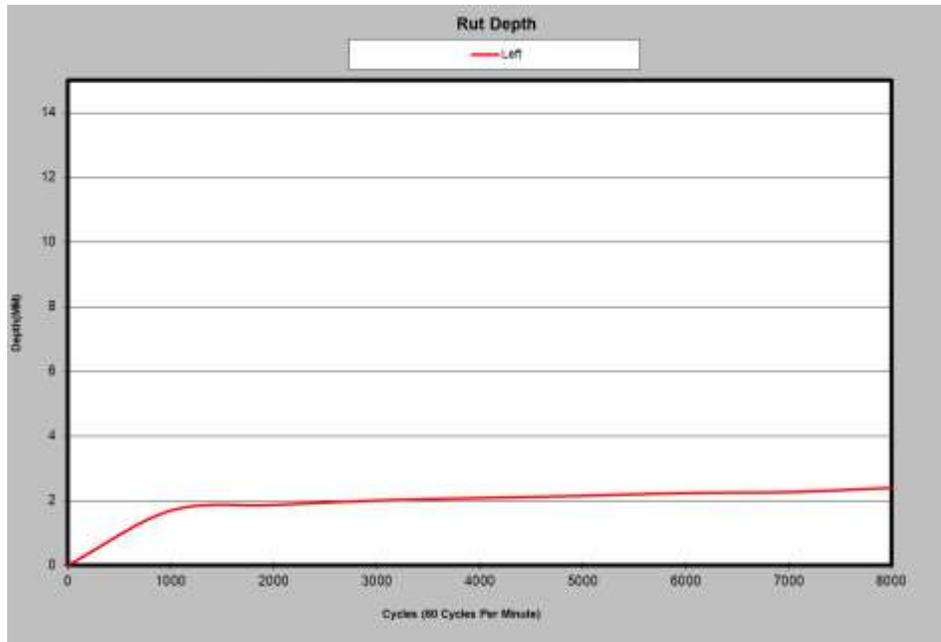


Gráfico 15. Deformación Muestra 01-20567-2021

Deformación general promedio de las 6 muestras ensayadas:	2,411 mm
--	-----------------

	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.26
		Aprobado: 2021-01-20
		Página: 23 de 70
		N° Informe 01-2539-2021

Tabla N°20
Resultados de Ensayos

MUESTRA	FECHA(S) DE REALIZACIÓN	MÉTODO DE ENSAYO	ENSAYO	RESULTADOS						
				Temperatura de moldeo: 155,0 °C			Temperatura Ambiente: 25,0 °C			
01-20567-2021	2021-08-20	(*) INTE C4 AASHTO T-269	Método de ensayo para el Porcentaje de vacíos de aire de mezclas asfálticas densas y abiertas para pavimentos	Primera Prueba						
				Pastilla	GEMT	Peso seco (g)	Peso SSS (g)	Peso sum. (g)	GBS	Vacíos (%)
				1, LI	2,469	2911,9	2925,4	1657,0	2,296	7,0
				2, LI		2912,5	2926,0	1657,9	2,297	7,0
				5, LD		2910,8	2924,5	1658,8	2,300	6,9
				6, LD		2907,7	2914,9	1650,2	2,299	6,9
				Segunda Prueba						
				3, LI	2,469	2908,0	2937,1	1664,8	2,286	7,4
				4, LI		2909,5	2938,6	1665,9	2,286	7,4

-----Salto de Página-----

Muestra: 01-20749-2021

Tabla N°21
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: 2021-08-23

Muestra Izquierda							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	60,9	1,752	1,757	0,000	1,805	1,800	1,779

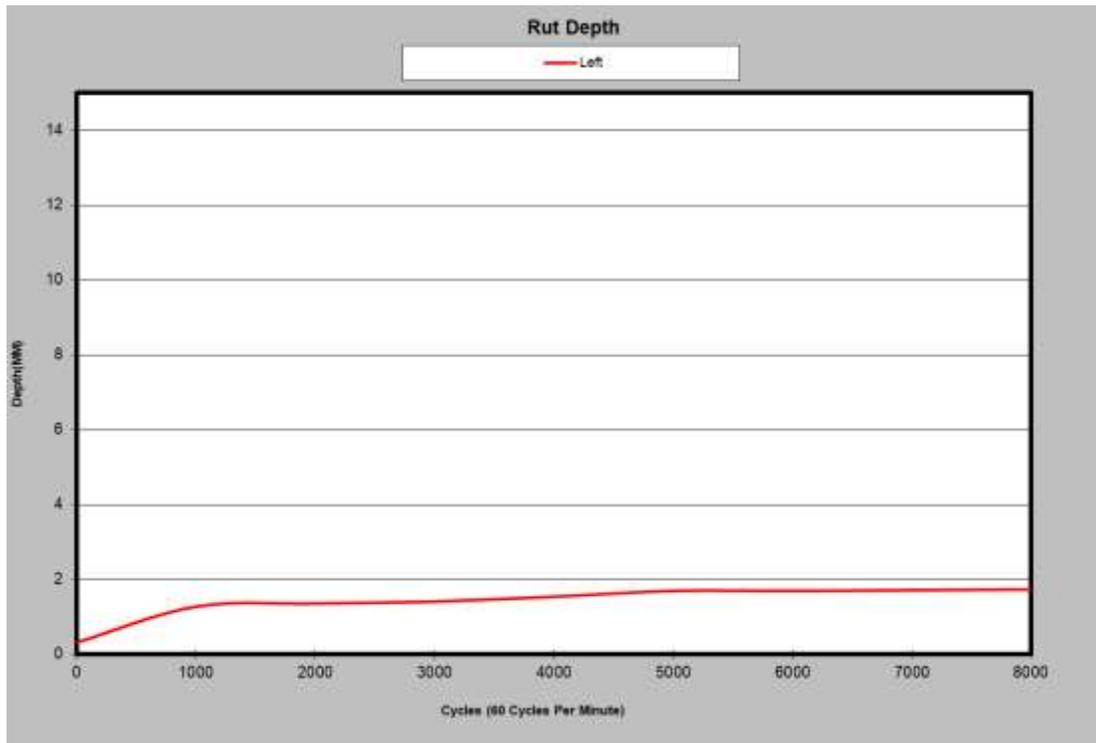


Gráfico 46. Deformación Muestra 01-20749-2021

Tabla N°22
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: 2021-08-23

Muestra Derecha							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	60,9	1,697	1,655	0,000	1,711	1,734	1,699

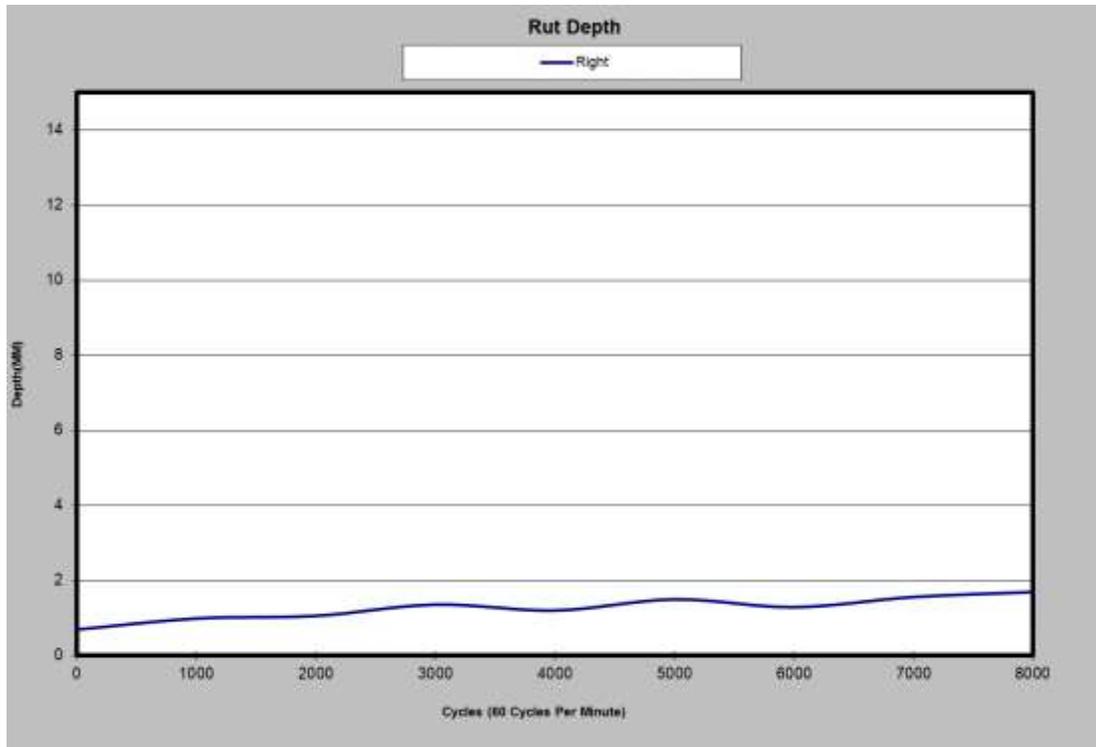


Gráfico 17. Deformación Muestra 01-20749-2021

Tabla N°23
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: 2021-08-23

Muestra Derecha							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	60,3	1,884	1,866	0,000	1,948	1,890	1,897

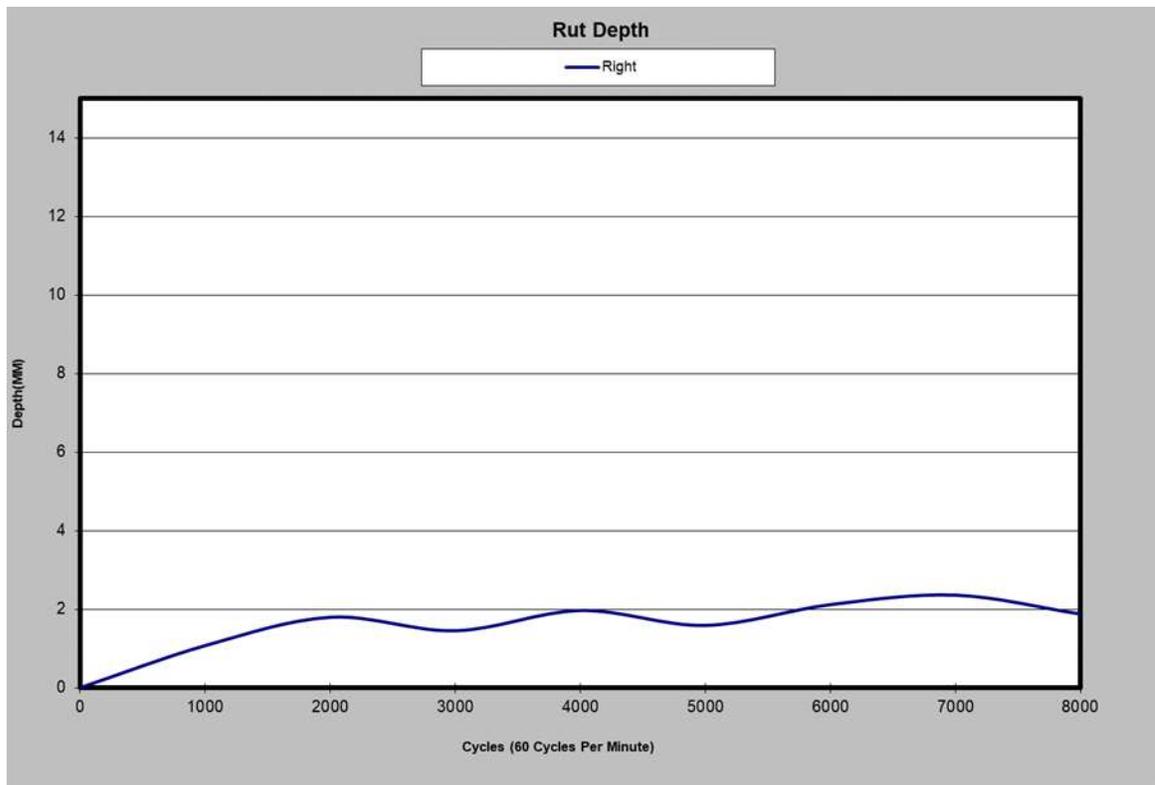


Gráfico 18. Deformación Muestra 01-20749-2021

Deformación general promedio de las 6 muestras ensayadas:	1,792 mm
--	-----------------

	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.26
		Aprobado: 2021-01-20
		Página: 27 de 70
		N° Informe 01-2539-2021

Tabla N°24
Resultados de Ensayos

MUESTRA	FECHA(S) DE REALIZACIÓN	MÉTODO DE ENSAYO	ENSAYO	RESULTADOS						
				Temperatura de moldeo: 155,0 °C			Temperatura Ambiente: 25,8 °C			
01-20749-2021	2021-08-19	(*) INTE C4 AASHTO T-269	Método de ensayo para el Porcentaje de vacíos de aire de mezclas asfálticas densas y abiertas para pavimentos	Primera Prueba						
				Pastilla	GEMT	Peso seco (g)	Peso SSS (g)	Peso sum. (g)	GBS	Vacíos (%)
				4, LI	2,498	2838,5	2868,4	1640,0	2,311	7,5
				6, LI		2844,3	2875,5	1646,0	2,313	7,4
				1, LD		2840,1	2863,6	1637,1	2,316	7,3
				10, LD		2843,9	2867,4	1637,9	2,313	7,4
				Segunda Prueba						
				9, LI	2,498	2838,1	2866,5	1644,2	2,322	7,0
				1, LI		2839,5	2867,9	1645,5	2,323	7,0

-----Salto de Página-----

Muestra: 01-23823-2021

Tabla N°25
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

Muestra Izquierda							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	59,7	2,883	2,883	0,000	2,860	2,763	2,847

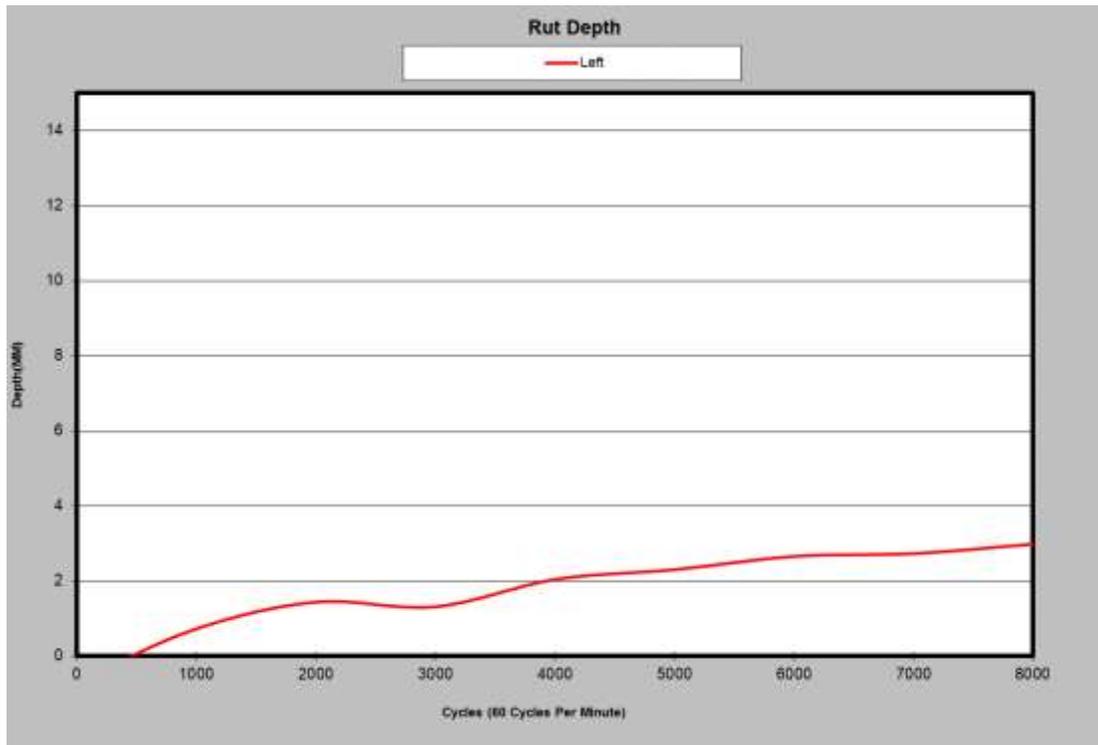


Gráfico 59. Deformación Muestra 01-23823-2021

Tabla N°26
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

Muestra Derecha							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	59,7	3,551	3,665	0,000	3,665	3,581	3,616

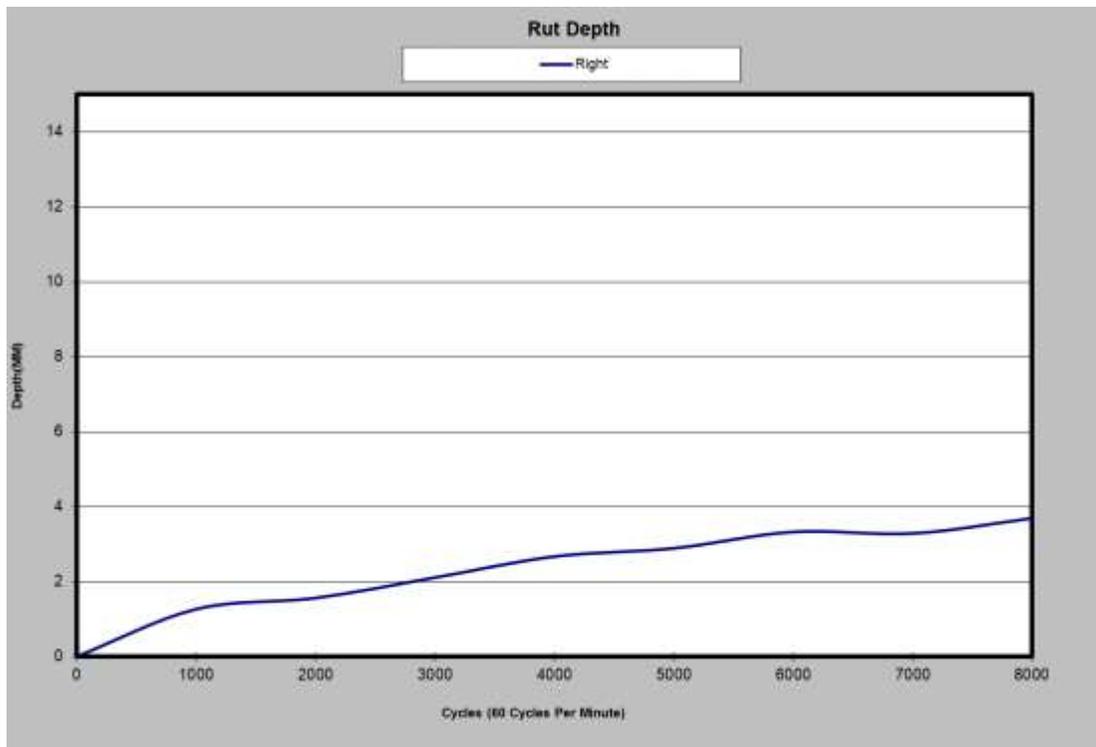


Gráfico 20. Deformación Muestra 01-23823-2021

Tabla N°27
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

Muestra Derecha							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	59,9	3,093	3,100	0,000	3,229	3,082	3,126

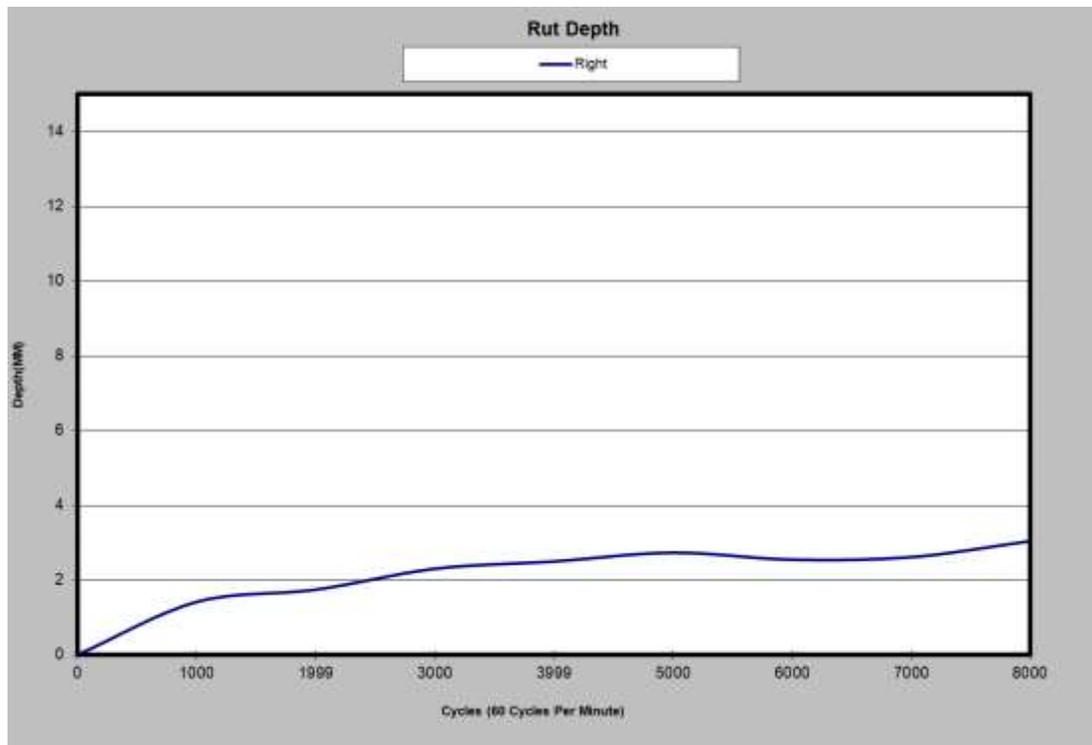


Gráfico 21. Deformación Muestra 01-23823-2021

Deformación general promedio de las 6 muestras ensayadas:	3,196 mm
--	-----------------

	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.26
		Aprobado: 2021-01-20
		Página: 31 de 70
		N° Informe 01-2539-2021

Tabla N°28
Resultados de Ensayos

MUESTRA	FECHA(S) DE REALIZACIÓN	MÉTODO DE ENSAYO	ENSAYO	RESULTADOS						
				Temperatura de moldeo: 155,0 °C			Temperatura Ambiente: 24,0 °C			
01-23823-2021	2021-11-05	(*) INTE C4 AASHTO T-269	Método de ensayo para el Porcentaje de vacíos de aire de mezclas asfálticas densas y abiertas para pavimentos	Primera Prueba						
				Pastilla	GEMT	Peso seco (g)	Peso SSS (g)	Peso sum. (g)	GBS	Vacíos (%)
				3, LI	2,506	2991,1	2998,1	1714,0	2,329	7,1
				6, LI		2986,6	3000,5	1717,5	2,328	7,1
				4, LD		2990,0	2999,6	1720,1	2,337	6,8
				5, LD		2990,0	2998,3	1719,7	2,338	6,7
				Segunda Prueba						
				9, LI	2,506	2992,2	3022,1	1735,6	2,326	7,2
				10, LI		2992,8	3022,7	1738,2	2,330	7,0

-----Salto de Página-----

Muestra: 01-17316-2020

Tabla N°29

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: 2021-11-09

Muestra Izquierda							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	60,7	1,976	1,951	0,000	1,962	1,694	1,896

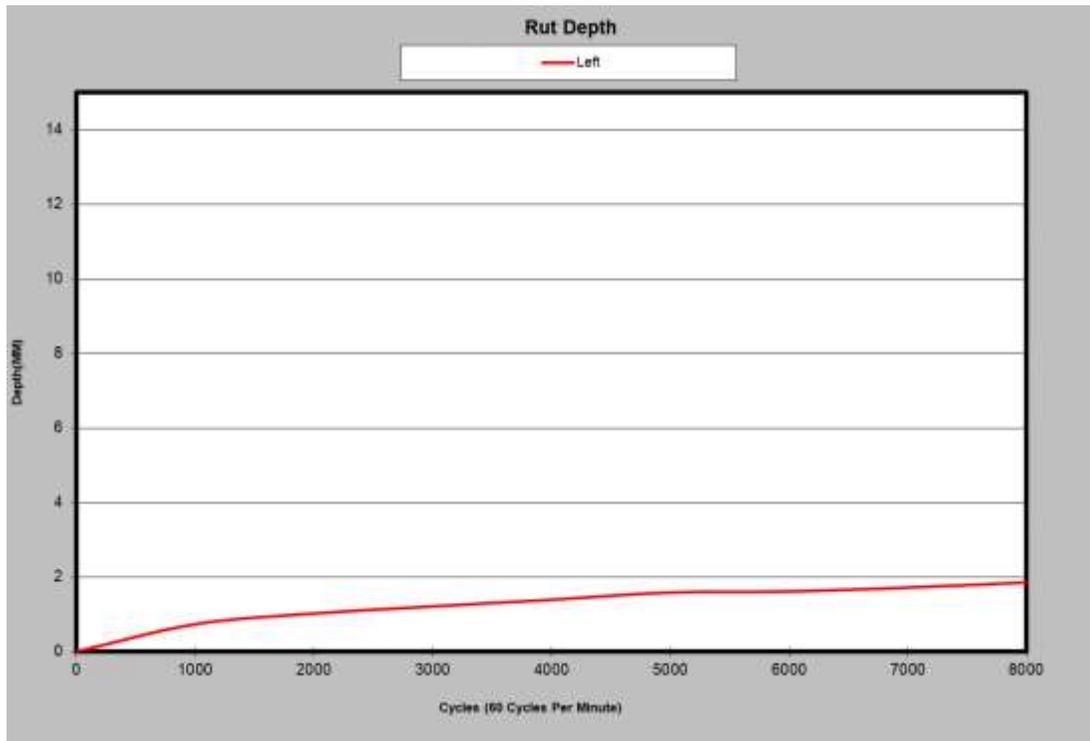


Gráfico 22. Deformación Muestra 01-17316-2021

Tabla N°30
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: 2021-11-09

Muestra Derecha							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	60,7	1,911	1,793	0,000	1,812	1,880	1,849

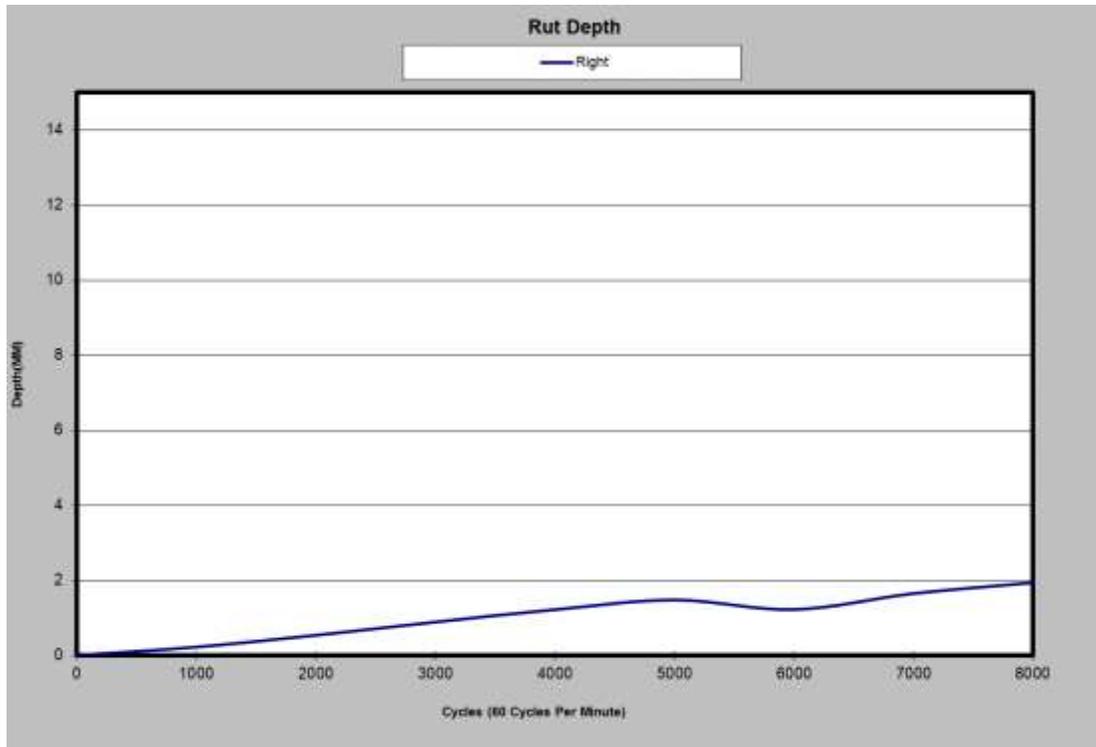


Gráfico 23. Deformación Muestra 01-17316-2021

Tabla N°31
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: 2021-11-10

Muestra Derecha							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	60,7	1,894	1,829	0,000	1,802	1,698	1,806

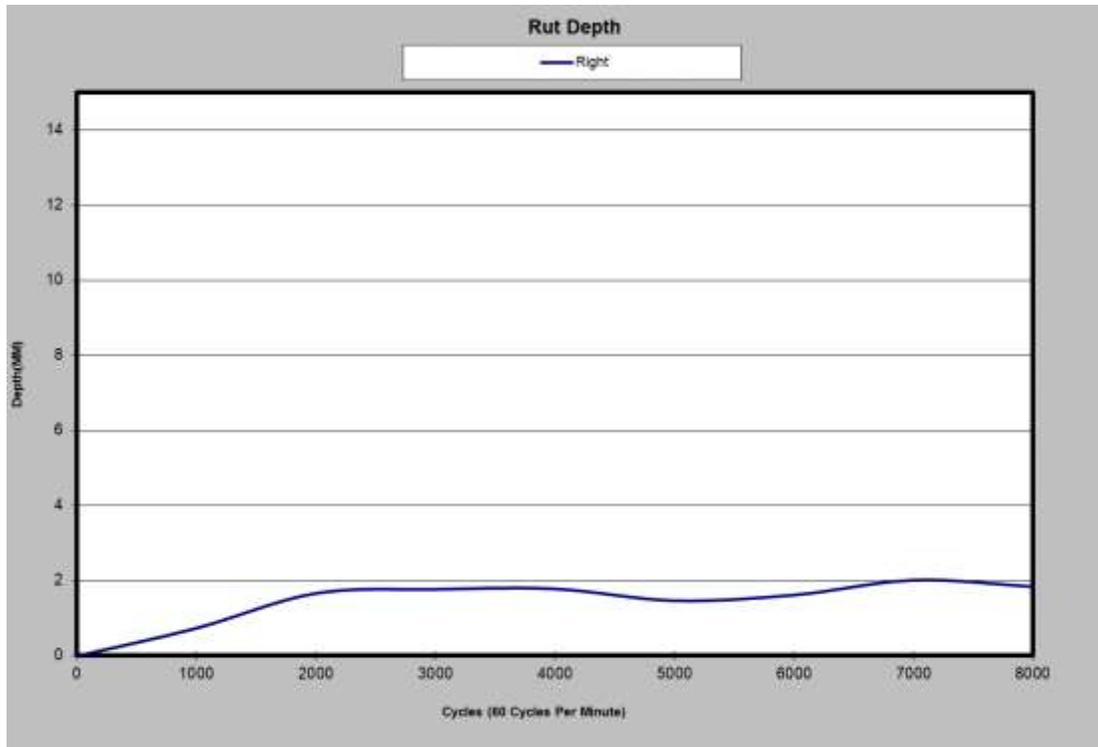


Gráfico 24. Deformación Muestra 01-17316-2021

Deformación general promedio de las 6 muestras ensayadas:	1,850 mm
--	-----------------

	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.26
		Aprobado: 2021-01-20
		Página: 35 de 70
		N° Informe 01-2539-2021

Tabla N°32
Resultados de Ensayos

MUESTRA	FECHA(S) DE REALIZACIÓN	MÉTODO DE ENSAYO	ENSAYO	RESULTADOS						
				Temperatura de moldeo: 155,0 °C		Temperatura Ambiente: 24,2 °C				
01-17316-2020	2021-11-06	(*) INTE C4 AASHTO T-269	Método de ensayo para el Porcentaje de vacíos de aire de mezclas asfálticas densas y abiertas para pavimentos	Primera Prueba						
				Pastilla	GEMT	Peso seco (g)	Peso SSS (g)	Peso sum. (g)	GBS	Vacíos (%)
				1, LI	2,446	2853,1	2995,8	1788,1	2,363	3,4
				4, LI		2868,2	3011,6	1796,3	2,360	3,5
				2, LD		2878,0	3021,9	1786,0	2,329	4,8
				5, LD		2844,6	2986,8	1771,5	2,341	4,3
				Segunda Prueba						
				7, LI	2,446	2849,7	2992,2	1761,8	2,316	5,3
				9, LI		2860,1	3003,1	1772,6	2,324	5,0

-----Salto de Página-----

Muestra: 01-25225-2021

Tabla N°33
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: 2021-11-10

Muestra Izquierda							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	60,2	2,099	2,044	0,000	1,997	1,987	2,032

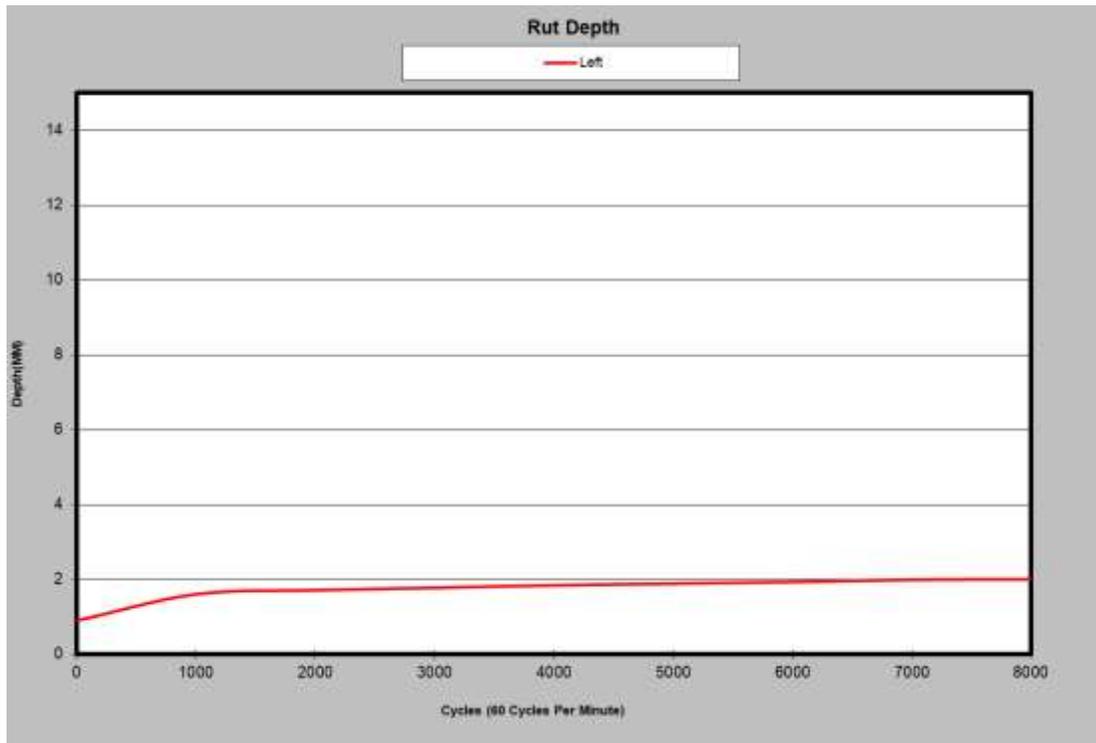


Gráfico 25. Deformación Muestra 01-25225-2021

Tabla N°34
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: 2021-11-10

Muestra Derecha							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	60,2	2,640	2,434	0,000	2,562	2,557	2,548

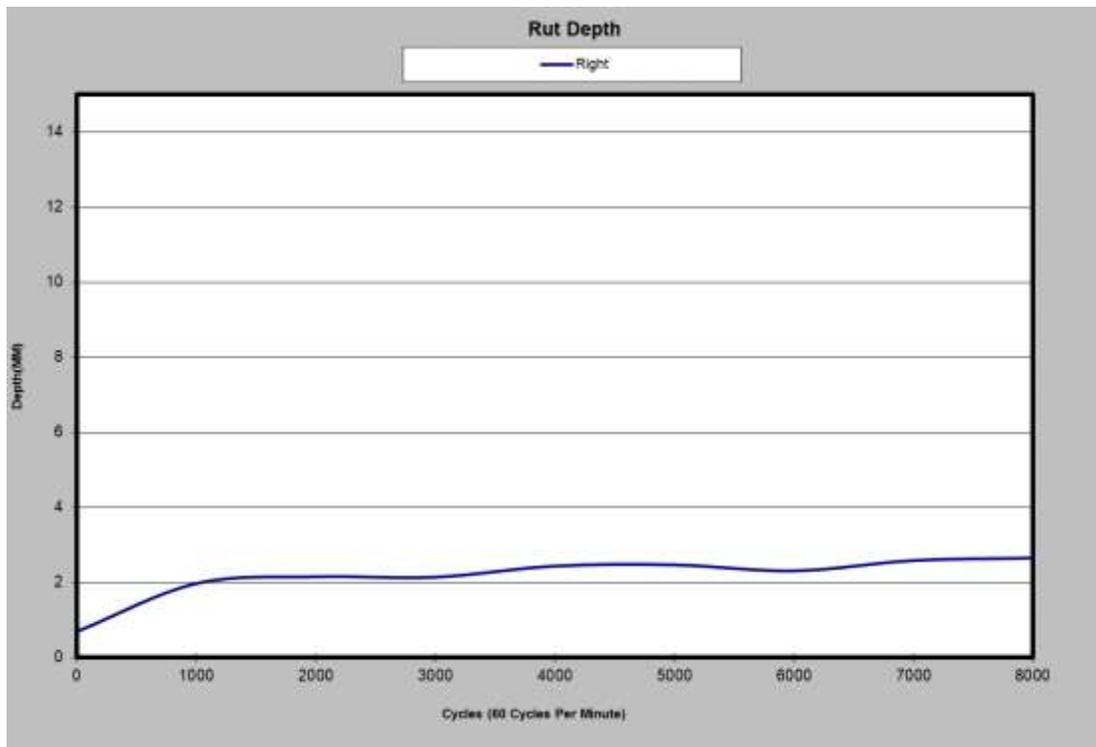


Gráfico 26. Deformación Muestra 01-25225-2021

Tabla N°35
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: 2021-11-11

Muestra Izquierda							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	60,0	2,792	2,770	0,000	2,763	2,977	2,826

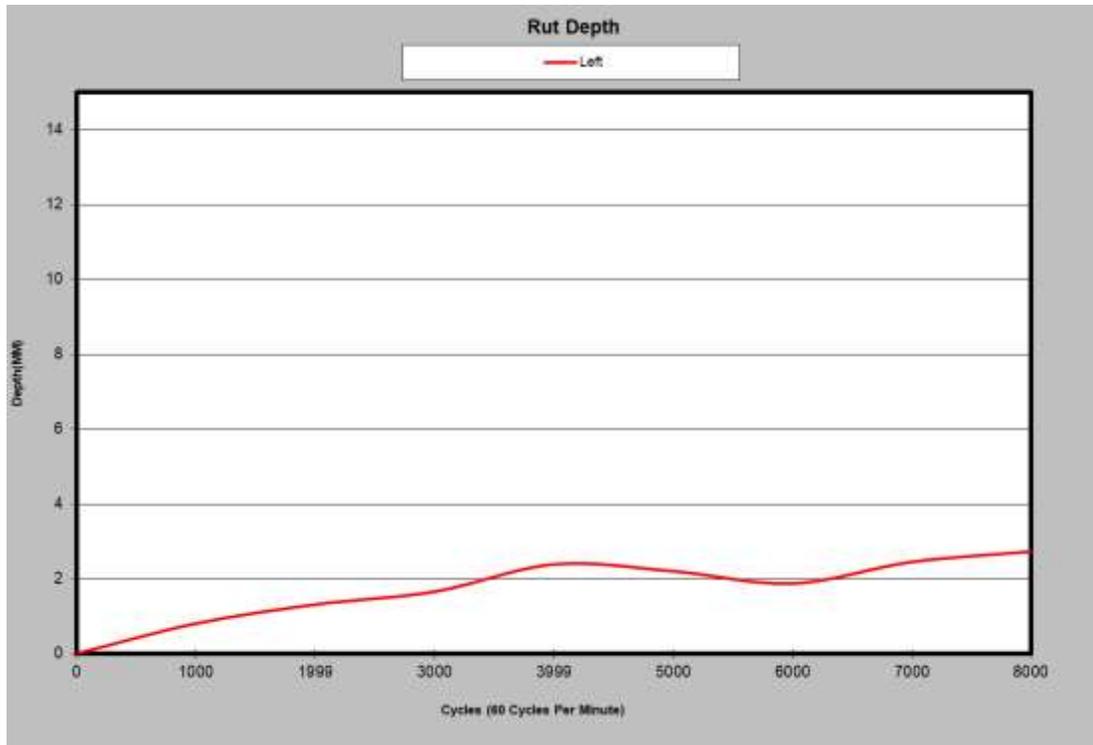


Gráfico 27. Deformación Muestra 01-25225-2021

Deformación general promedio de las 6 muestras ensayadas:	2,469 mm
--	-----------------

	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.26
		Aprobado: 2021-01-20
		Página: 39 de 70
		N° Informe 01-2539-2021

Tabla N°36
Resultados de Ensayos

MUESTRA	FECHA(S) DE REALIZACIÓN	MÉTODO DE ENSAYO	ENSAYO	RESULTADOS						
				Temperatura de moldeo: 155,0 °C		Temperatura Ambiente: 24,7 °C				
01-25225-2021	2021-11-07	(*) INTE C4 AASHTO T-269	Método de ensayo para el Porcentaje de vacíos de aire de mezclas asfálticas densas y abiertas para pavimentos	Primera Prueba						
				Pastilla	GEMT	Peso seco (g)	Peso SSS (g)	Peso sum. (g)	GBS	Vacíos (%)
				4, LI	2,498	2839,4	2981,4	1763,0	2,330	6,7
				6, LI		2836,1	2977,9	1761,5	2,332	6,7
				1, LD		2834,8	2976,5	1767,9	2,345	6,1
				7, LD		2839,0	2981,0	1770,6	2,346	6,1
				Segunda Prueba						
				2, LI	2,498	2837,6	2979,5	1768,0	2,342	6,2
				3, LI		2839,4	2981,4	1771,7	2,347	6,0

-----Salto de Página-----

Muestra: 01-25227-2021

Tabla N°37

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: 2021-11-13

Muestra Izquierda							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	60,4	1,709	1,779	0,000	1,709	1,595	1,698

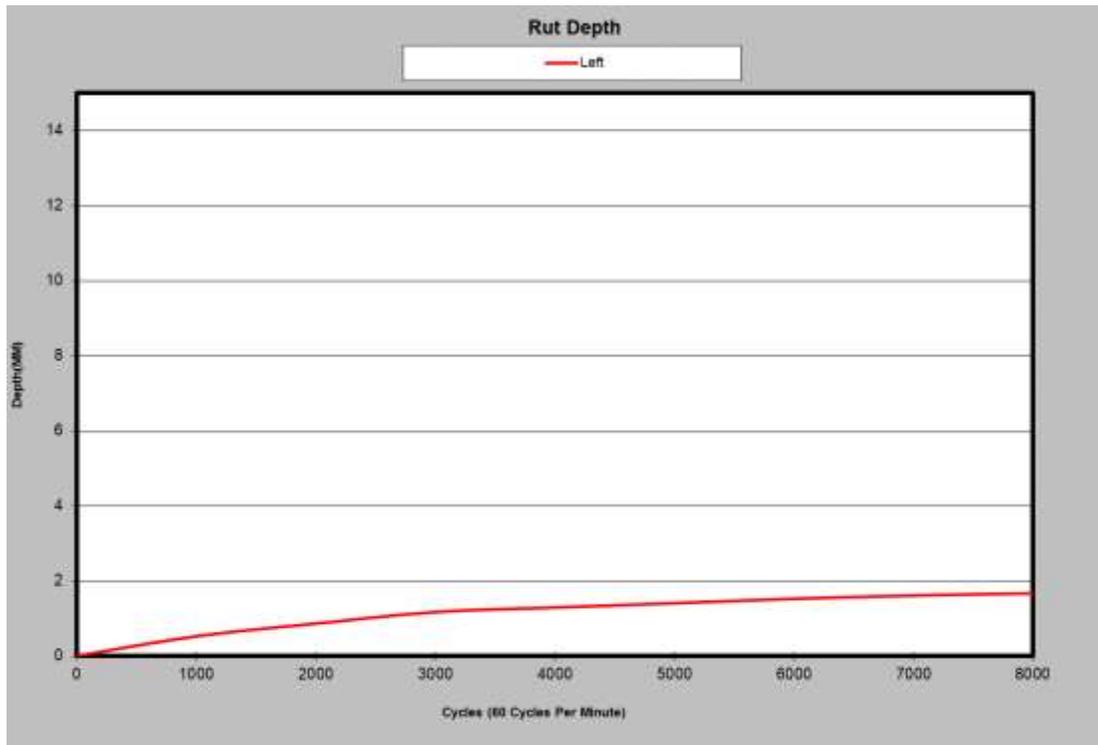


Gráfico 28. Deformación Muestra 01-25227-2021

Tabla N°38
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: 2021-11-13

Muestra Derecha							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	60,4	2,412	2,412	0,000	2,515	2,304	2,411

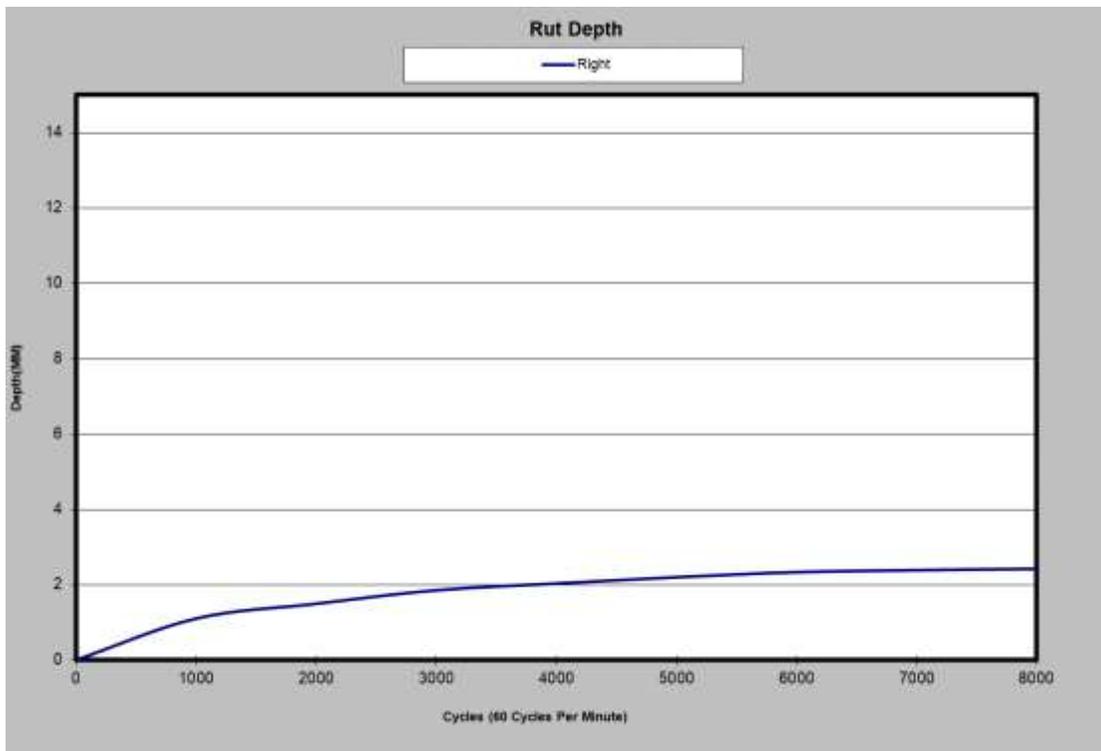


Gráfico 29. Deformación Muestra 01-25227-2021

Tabla N°39
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: 2021-11-13

Muestra Izquierda							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	60,3	2,109	2,051	0,000	2,120	2,120	2,100

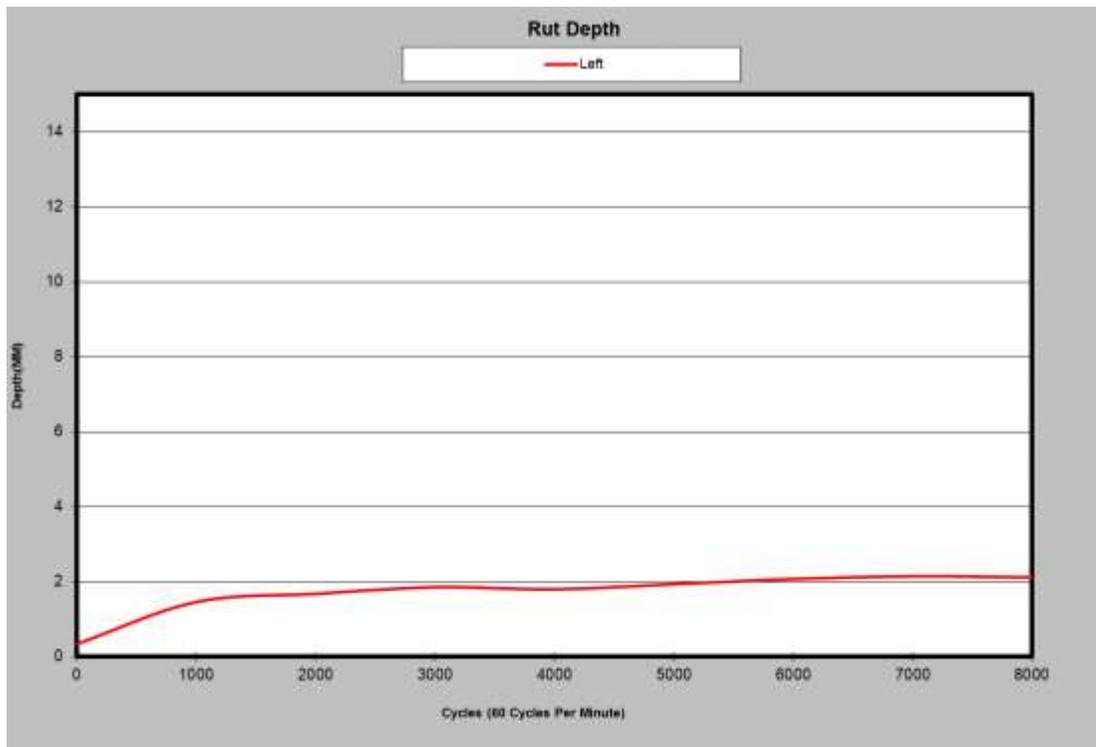


Gráfico 30. Deformación Muestra 01-25227-2021

Deformación general promedio de las 6 muestras ensayadas:	2,070 mm
--	-----------------

	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.26
		Aprobado: 2021-01-20
		Página: 43 de 70
		N° Informe 01-2539-2021

Tabla N°40
Resultados de Ensayos

MUESTRA	FECHA(S) DE REALIZACIÓN	MÉTODO DE ENSAYO	ENSAYO	RESULTADOS						
				Temperatura de moldeo: 155,0 °C			Temperatura Ambiente: 25,5 °C			
01-25227-2021	2021-11-09	(*) INTE C4 AASHTO T-269	Método de ensayo para el Porcentaje de vacíos de aire de mezclas asfálticas densas y abiertas para pavimentos	Primera Prueba						
				Pastilla	GEMT	Peso seco (g)	Peso SSS (g)	Peso sum. (g)	GBS	Vacíos (%)
				1, LI	2,498	2772,9	2911,5	1748,8	2,385	4,5
				3, LI		2769,6	2908,1	1745,5	2,382	4,6
				4, LD		2791,2	2930,8	1740,6	2,345	6,1
				5, LD		2794,6	2934,3	1748,0	2,356	5,7
				Segunda Prueba						
				2, LI	2,498	2769,6	2908,1	1748,4	2,388	4,4
				7, LI		2767,4	2905,8	1746,0	2,386	4,5

-----Salto de Página-----

Muestra: 01-25229-2021

Tabla N°41
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: 2021-11-15

Muestra Izquierda							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	61,6	2,082	2,082	0,000	1,973	2,008	2,037

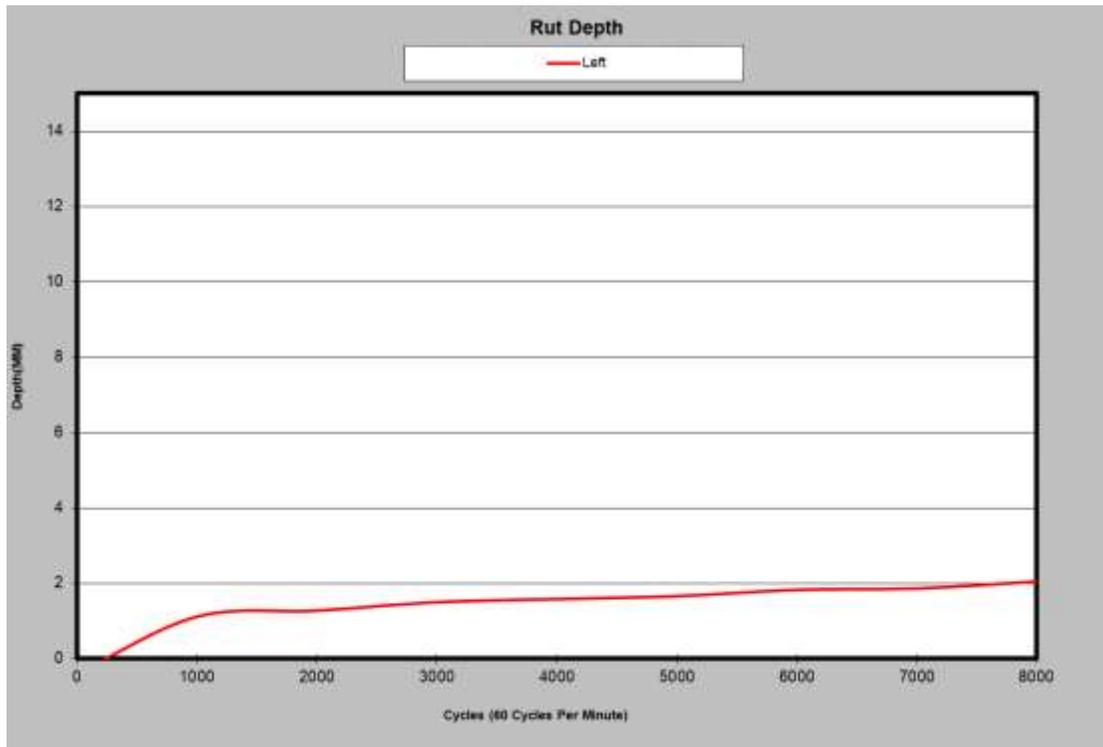


Gráfico 36. Deformación Muestra 01-25229-2021

Tabla N°42
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: 2021-11-15

Muestra Derecha							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	61,6	2,215	2,145	0,000	2,129	2,064	2,138

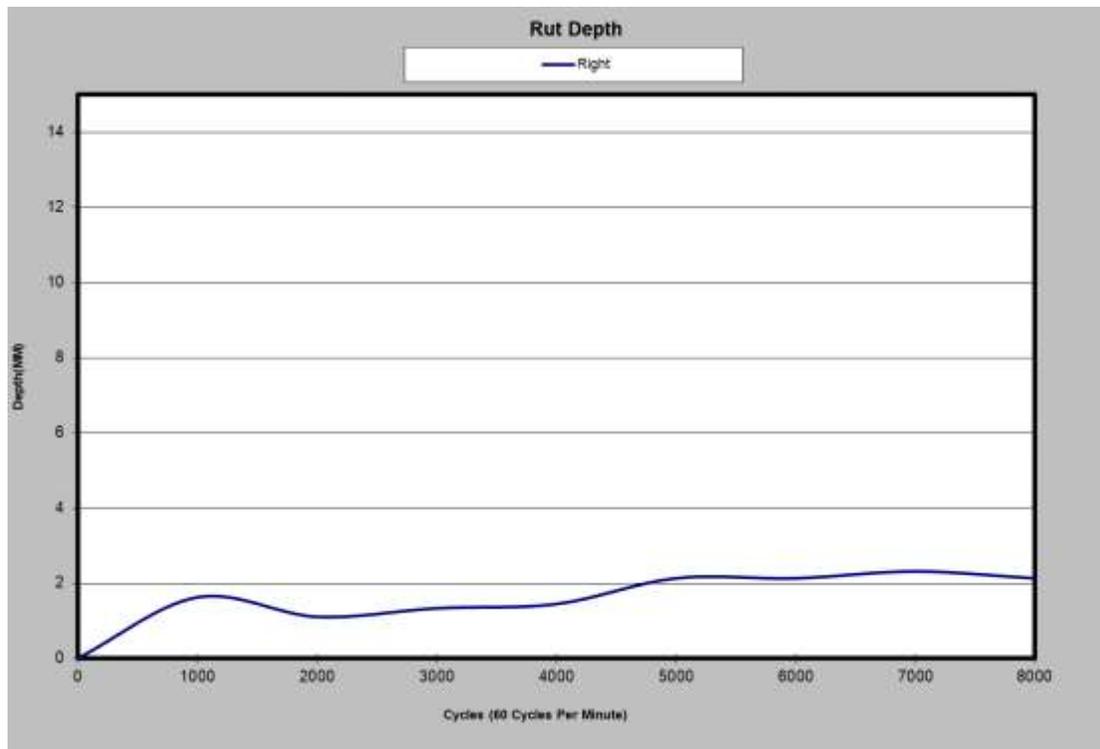


Gráfico 32. Deformación Muestra 01-25229-2021

Tabla N°43
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: 2021-11-15

Muestra Izquierda							
Ciclos	Temperatura °C	Lectura del medidor de profundidad (mm)					APA Promedio
		1	2	3	4	5	
8000	60,5	2,102	2,078	0,000	2,171	2,098	2,112

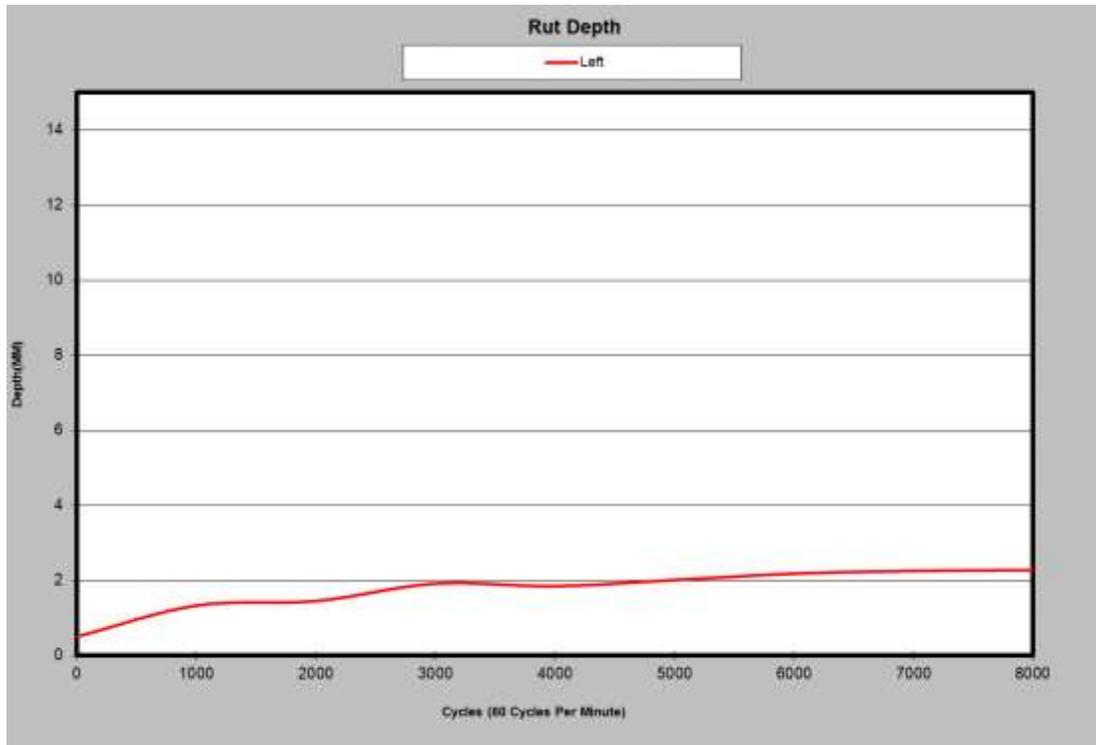


Gráfico 33. Deformación Muestra 01-25229-2021

Deformación general promedio de las 6 muestras ensayadas:	2,096 mm
--	-----------------

	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.26
		Aprobado: 2021-01-20
		Página: 47 de 70
		N° Informe 01-2539-2021

Tabla N°44
Resultados de Ensayos

MUESTRA	FECHA(S) DE REALIZACIÓN	MÉTODO DE ENSAYO	ENSAYO	RESULTADOS						
				Temperatura de moldeo: 155,0 °C			Temperatura Ambiente: 24,8 °C			
01-25229-2021	2021-11-13	(*) INTE C4 AASHTO T-269	Método de ensayo para el Porcentaje de vacíos de aire de mezclas asfálticas densas y abiertas para pavimentos	Primera Prueba						
				Pastilla	GEMT	Peso seco (g)	Peso SSS (g)	Peso sum. (g)	GBS	Vacíos (%)
				1, LI	2,498	2810,1	2950,6	1783,2	2,407	3,6
				2, LI		2812,6	2953,2	1785,4	2,408	3,6
				3, LD		2811,7	2952,3	1770,0	2,378	4,8
				4, LD		2810,8	2951,3	1775,3	2,390	4,3
				Segunda Prueba						
				5, LI	2,498	2811,2	2951,8	1776,6	2,392	4,2
				6, LI		2812,4	2953,0	1772,3	2,382	4,6

-----Salto de Página-----

Anexo N°2 Rueda de Hamburgo

Muestra: 01-16756-2020

Tabla 45
Análisis de deformación plástica (Rueda de Hamburgo)
 Fecha de realización del ensayo: 2021-08-23

Muestra LGC	Lectura del medidor de profundidad (mm)					Deformación Máxima (mm)	Número de pasadas al momento de la Deformación Máxima (Ciclos)	Punto de Inflexión por Húmedad "Stripping Inflection Point" (SIP)
	1	2	3	4	5			
01-16756-2020 (Left)	4,865	5,465	5,433	5,649	5,682	5,682	19996	N/A
01-16756-2020 (Right)	4,369	4,860	4,823	4,924	4,924	4,924	19996	N/A
01-16756-2020 (Right)	4,386	4,954	4,872	5,072	5,038	5,072	19896	N/A
Promedio						5,226		

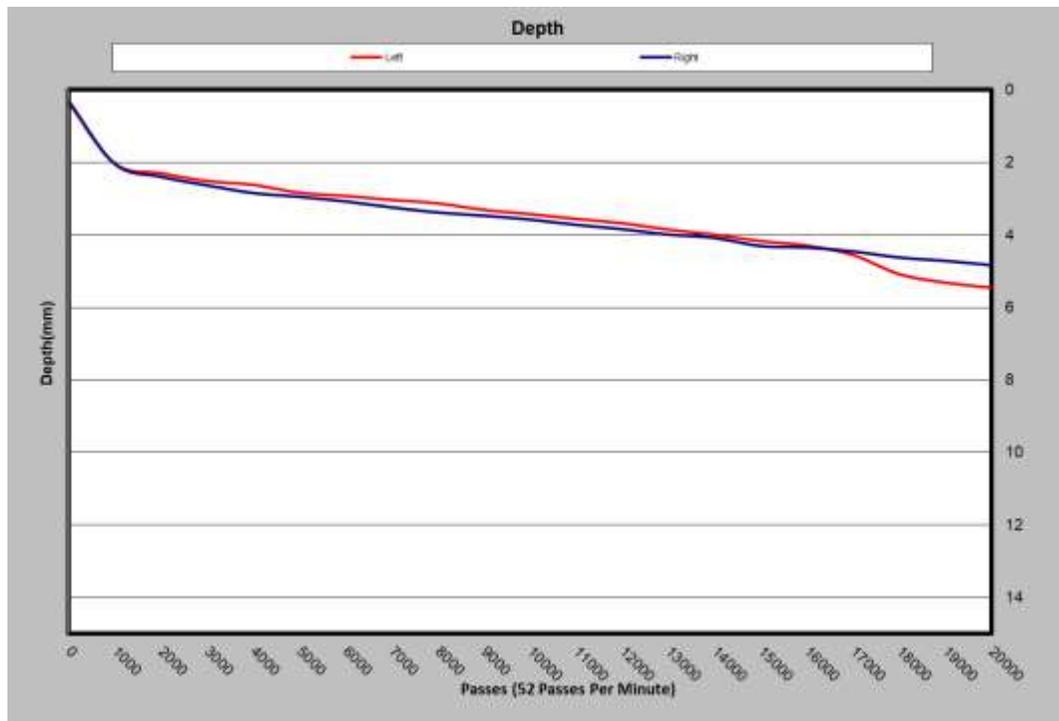


Gráfico 34. Deformación Plástica Muestra 01-16756-20202 (Left y Right)

Nota: No se logró alcanzar el punto de inflexión para determinar la susceptibilidad al daño por humedad (SIP)

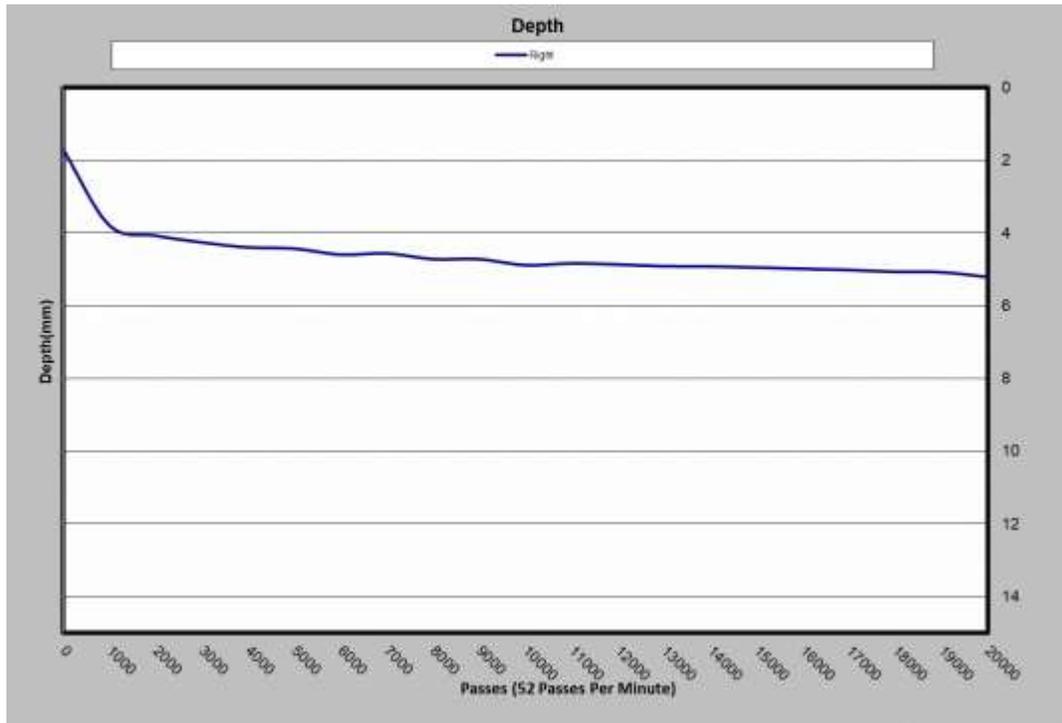


Gráfico 35. Deformación Plástica Muestra 01-16756-20202 (Right)

Nota: No se logró alcanzar el punto de inflexión para determinar la susceptibilidad al daño por humedad (SIP)

Tabla N° 46 Resultados de Ensayos

MUESTRA	FECHA(S) DE REALIZACIÓN	MÉTODO DE ENSAYO	ENSAYO	RESULTADOS						
				Pastilla	GMT	Peso seco (g)	Peso SSS (g)	Peso sum. (g)	GBS	Vacios (%)
01-16756-2020	2021-08-21	(*) AASHTO T-269 INTE C4	Método de ensayo para el Porcentaje de vacíos de aire de mezclas asfálticas densas y abiertas para pavimentos	Primera Prueba						
				1, LI	2,446	2351,2	2356,9	1319,6	2,267	7,4
				2, LI		2345,4	2353,3	1319,3	2,268	7,3
				3, LD		2338,0	2345,4	1312,3	2,263	7,5
				5, LD		2347,1	2356,8	1319,6	2,263	7,5
				Segunda Prueba						
				4, LI	2,446	2347,1	2360,2	1323,9	2,265	7,4
				6, LI		2347,6	2359,2	1322,5	2,264	7,4

Muestra: 01-19405-2021

Tabla 47
Análisis de deformación plástica (Rueda de Hamburgo)
 Fecha de realización del ensayo: 2021-08-21

Muestra LGC	Lectura del medidor de profundidad (mm)					Deformación Máxima (mm)	Número de pasadas al momento de la Deformación Máxima (Ciclos)	Punto de Inflexión por Humedad "Stripping Inflection Point" (SIP)
	1	2	3	4	5			
01-19405-2021 (Left)	3,110	3,110	3,221	3,221	3,267	3,267	19860	N/A
01-19405-2021 (Right)	4,180	4,126	4,474	4,423	4,532	4,532	19942	N/A
01-19405-2021 (Left)	3,513	3,487	3,655	3,681	3,705	3,705	19801	N/A
Promedio						3,834		

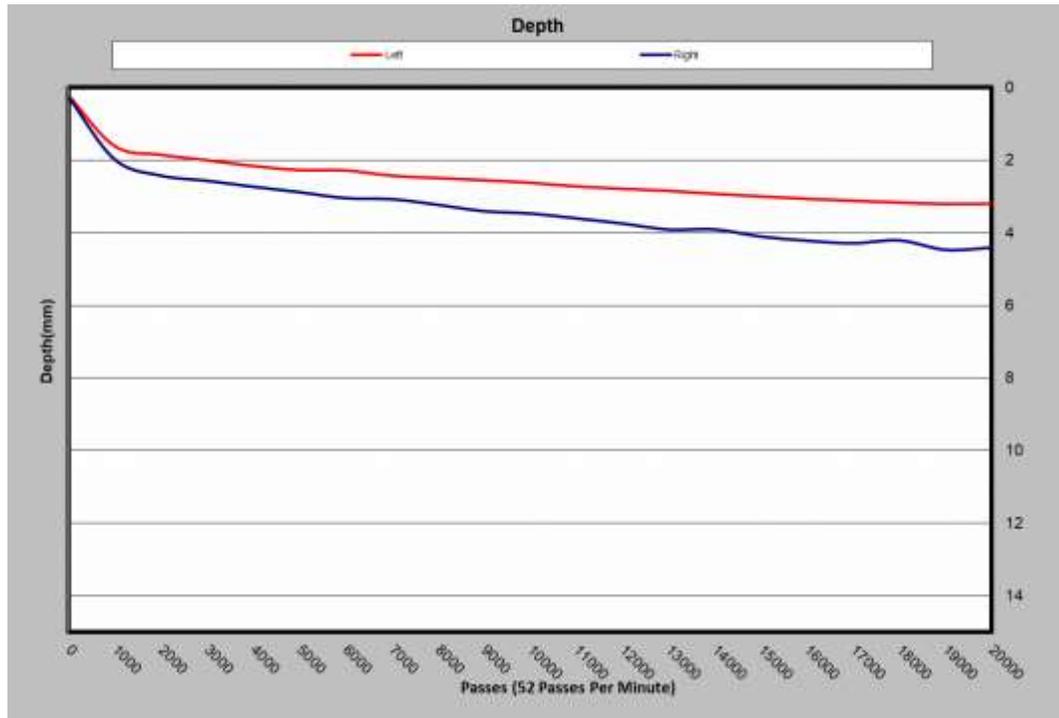


Gráfico 36. Deformación Plástica Muestra 01-19405-2021 (Left y Right)

Nota: No se logró alcanzar el punto de inflexión para determinar la susceptibilidad al daño por humedad (SIP)

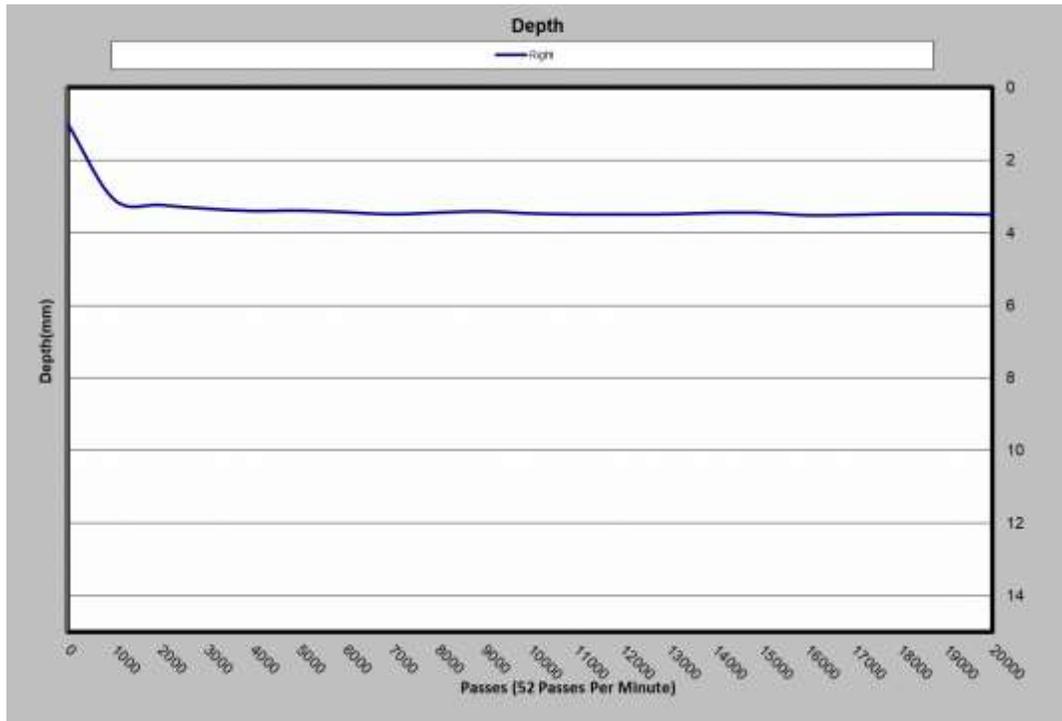


Gráfico 37. Deformación Plástica Muestra 01-19405-2021 (Right)

Nota: No se logró alcanzar el punto de inflexión para determinar la susceptibilidad al daño por humedad (SIP)

Tabla N° 48 Resultados de Ensayos

MUESTRA	FECHA(S) DE REALIZACIÓN	MÉTODO DE ENSAYO	ENSAYO	RESULTADOS						
				Pastilla	GEMT	Peso seco (g)	Peso SSS (g)	Peso sum. (g)	GBS	Vacios (%)
01-19405-2021	2021-08-20	(*) AASHTO T-269 INTE C4	Método de ensayo para el Porcentaje de vacíos de aire de mezclas asfálticas densas y abiertas para pavimentos	Primera Prueba						
				1, LI	2,468	2344,2	2362,1	1336,1	2,285	7,4
				4, LI		2341,1	2358,2	1334,1	2,286	7,4
				2, LD		2343,0	2356,8	1337,3	2,298	6,9
				5, LD		2340,4	2352,7	1332,2	2,293	7,1
				Segunda Prueba						
				3, LI	2,468	2344,2	2361,2	1336,8	2,288	7,3
				6, LI		2344,4	2357,1	1331,8	2,287	7,4

Muestra: 01-20555-2021

Tabla 49
Análisis de deformación plástica (Rueda de Hamburgo)
 Fecha de realización del ensayo: 2021-09-03

Muestra LGC	Lectura del medidor de profundidad (mm)					Deformación Máxima (mm)	Número de pasadas al momento de la Deformación Máxima (Ciclos)	Punto de Inflexión por Humedad "Stripping Inflection Point" (SIP)
	1	2	3	4	5			
01-20555-2021 (Left)	4,113	4,113	4,308	4,280	4,296	4,308	19976	N/A
01-20555-2021 (Right)	4,178	4,410	4,410	4,533	4,533	4,533	19816	N/A
01-20555-2021 (Left)	4,038	4,099	4,191	4,286	4,294	4,294	19797	N/A
Promedio						4,378		

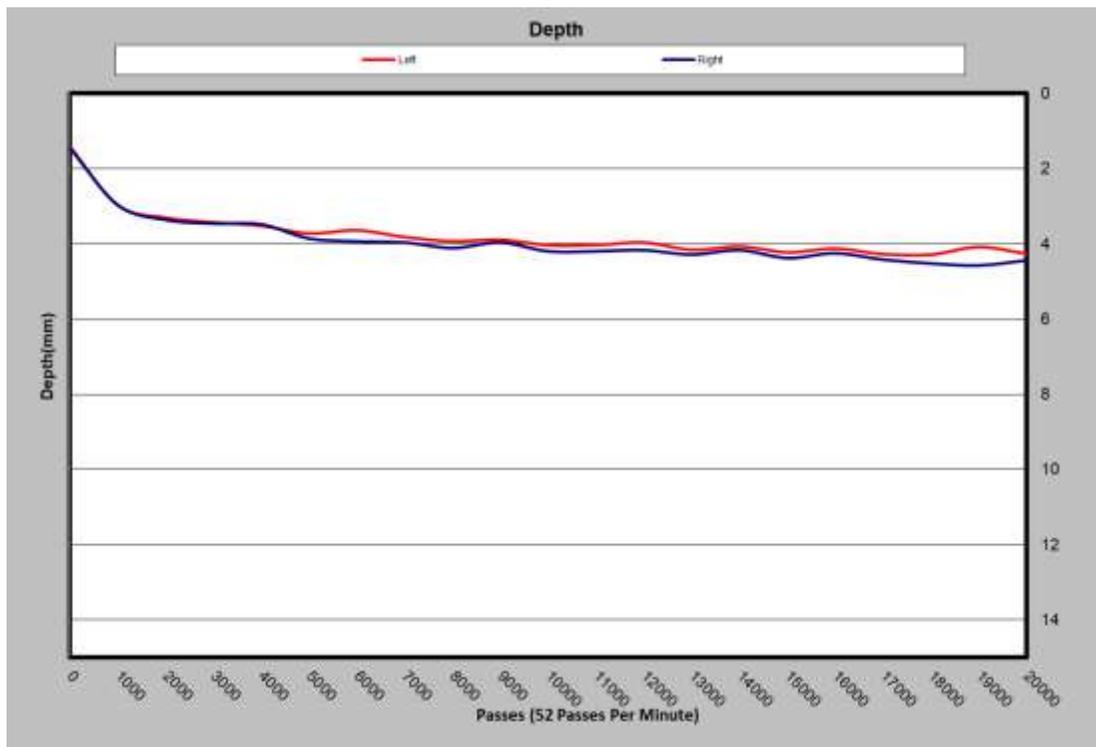


Gráfico 38. Deformación Plástica Muestra 01-20555-2021 (Left y Right)

Nota: No se logró alcanzar el punto de inflexión para determinar la susceptibilidad al daño por humedad (SIP)

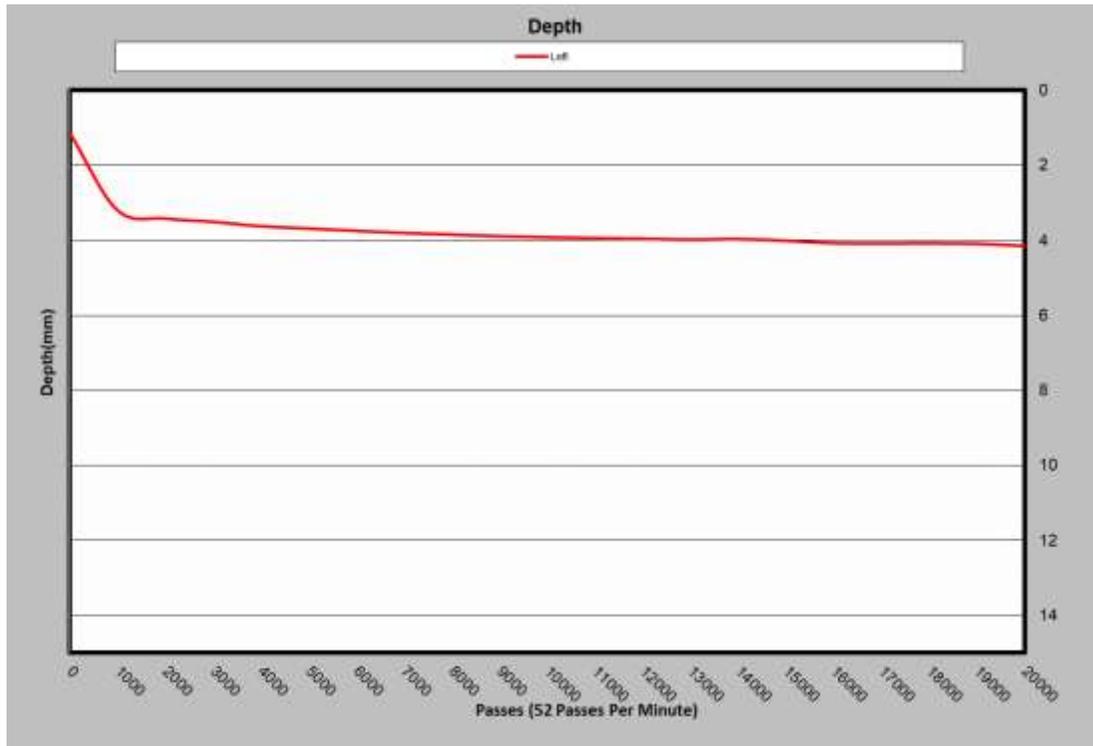


Gráfico 39. Deformación Plástica Muestra 01-20555-2021 (Left)

Nota: No se logró alcanzar el punto de inflexión para determinar la susceptibilidad al daño por humedad (SIP)

Tabla N° 50
Resultados de Ensayos

MUESTRA	FECHA(S) DE REALIZACIÓN	MÉTODO DE ENSAYO	ENSAYO	RESULTADOS						
				Pastilla	GEMT	Peso seco (g)	Peso SSS (g)	Peso sum. (g)	GBS	Vacios (%)
01-20555-2021	2021-09-01	(*) AASHTO T-269 INTE C4	Método de ensayo para el Porcentaje de vacíos de aire de mezclas asfálticas densas y abiertas para pavimentos	Primera Prueba						
				1, LI	2,452	2294,2	2313,1	1302,2	2,269	7,5
				3, LI		2294,3	2313,1	1303,3	2,272	7,3
				2, LD		2295,8	2317,3	1309,6	2,278	7,1
				6, LD		2293,7	2316,8	1309,6	2,277	7,1
				Segunda Prueba						
				4, LI	2,452	2298,3	2319,2	1306,3	2,269	7,5
				5, LI		2298,1	2315,7	1303,1	2,270	7,5

Muestra: 01-20566-2021

Tabla 51
Análisis de deformación plástica (Rueda de Hamburgo)
 Fecha de realización del ensayo: 2021-08-19

Muestra LGC	Lectura del medidor de profundidad (mm)					Deformación Máxima (mm)	Número de pasadas al momento de la Deformación Máxima (Ciclos)	Punto de Inflexión por Húmedad "Stripping Inflection Point" (SIP)
	1	2	3	4	5			
01-20566-2021 (Left)	3,694	3,580	3,817	3,829	3,786	3,829	19902	N/A
01-20566-2021 (Right)	3,570	3,566	3,691	3,703	3,803	3,803	19870	N/A
01-20566-2021 (Left)	3,451	3,394	3,616	3,628	3,605	3,628	19787	N/A
Promedio						3,753		

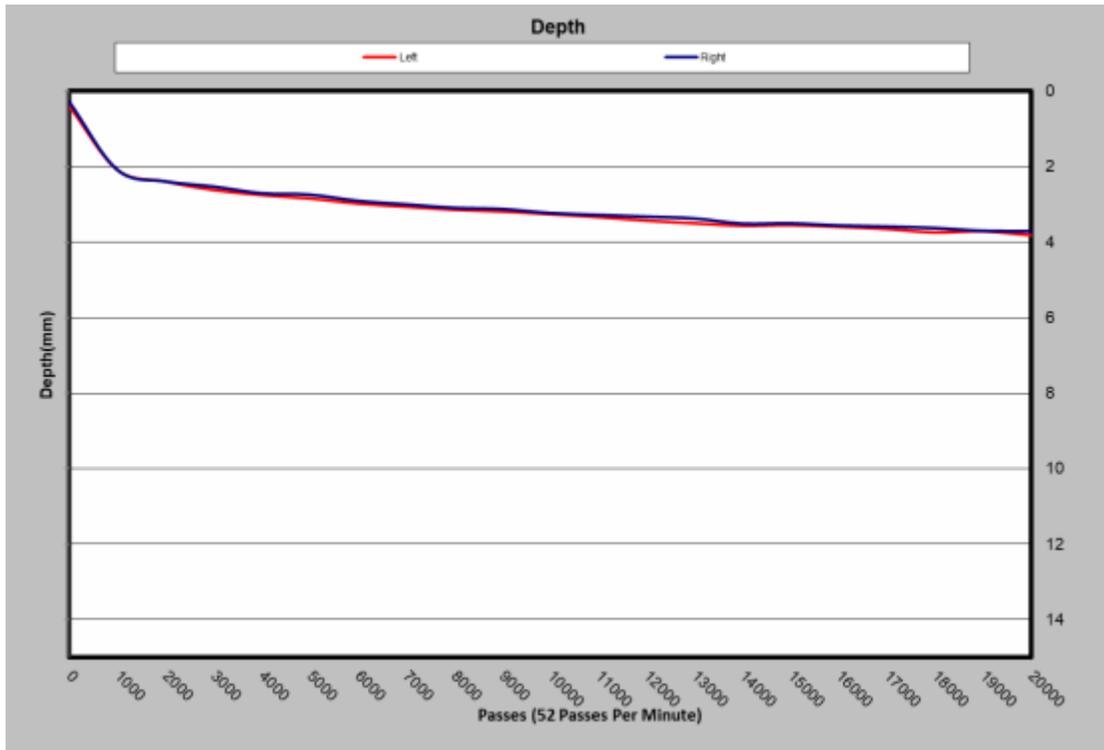


Gráfico 40. Deformación Plástica Muestra 01-20566-2021 (Left y Right)

Nota: No se logró alcanzar el punto de inflexión para determinar la susceptibilidad al daño por humedad (SIP)

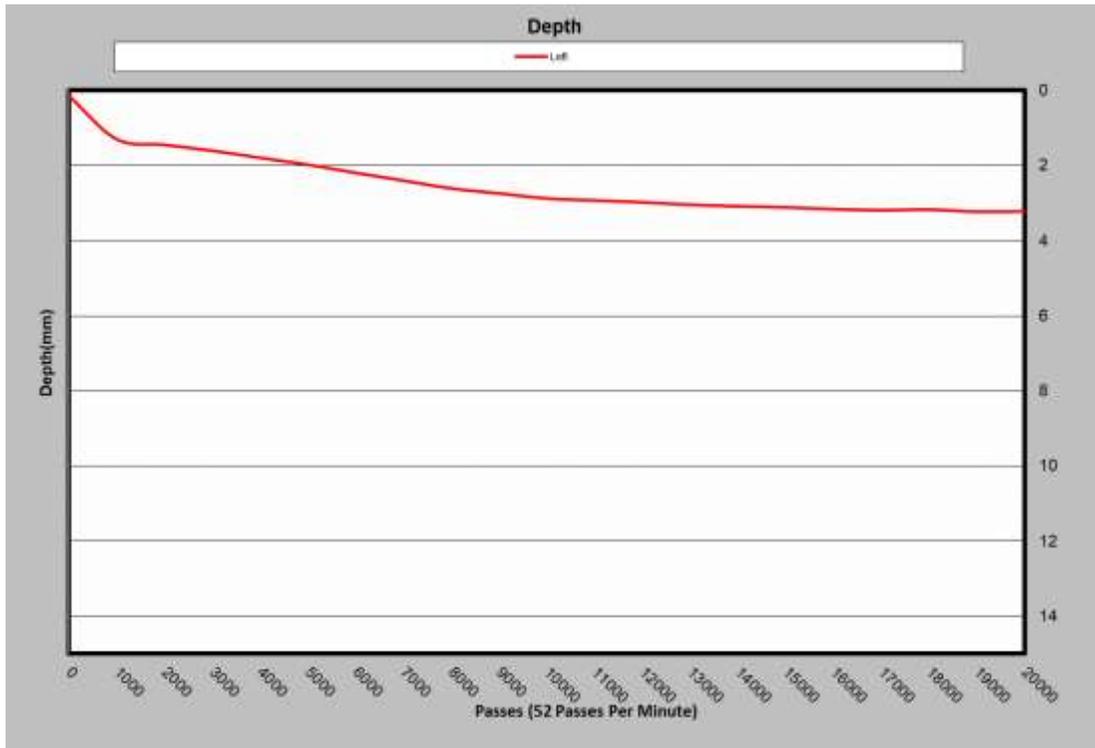


Gráfico 41. Deformación Plástica Muestra 01-20566-2021 (Left)

Nota: No se logró alcanzar el punto de inflexión para determinar la susceptibilidad al daño por humedad (SIP)

Tabla N° 52 Resultados de Ensayos

MUESTRA	FECHA(S) DE REALIZACIÓN	MÉTODO DE ENSAYO	ENSAYO	RESULTADOS						
				Pastilla	GEMT	Peso seco (g)	Peso SSS (g)	Peso sum. (g)	GBS	Vacios (%)
01-20566-2021	2021-08-19	(*) AASHTO T-269 INTE C4	Método de ensayo para el Porcentaje de vacíos de aire de mezclas asfálticas densas y abiertas para pavimentos	Primera Prueba						
				1, LI	2,470	2338,8	2351,4	1334,0	2,299	6,9
				3, LI		2338,9	2349,9	1331,0	2,296	7,1
				4, LD		2339,2	2350,2	1330,3	2,294	7,1
				5, LD		2336,9	2348,3	1330,3	2,296	7,1
				Segunda Prueba						
				6, LI	2,470	2336,8	2353,0	1332,3	2,289	7,3
				2, LI		2335,2	2350,6	1331,2	2,291	7,3

Muestra: 01-20567-2021

Tabla 53
Análisis de deformación plástica (Rueda de Hamburgo)
 Fecha de realización del ensayo: 2021-09-02

Muestra LGC	Lectura del medidor de profundidad (mm)					Deformación Máxima (mm)	Número de pasadas al momento de la Deformación Máxima (Ciclos)	Punto de Inflexión por Húmedad "Stripping Inflection Point" (SIP)
	1	2	3	4	5			
01-20567-2021 (Left)	4,775	4,815	4,913	4,913	5,063	5,063	19876	N/A
01-20567-2021 (Right)	3,639	3,739	3,826	3,826	3,943	3,943	19404	N/A
01-20567-2021 (Left)	4,092	4,092	4,201	4,151	4,278	4,278	19542	N/A
Promedio						4,428		

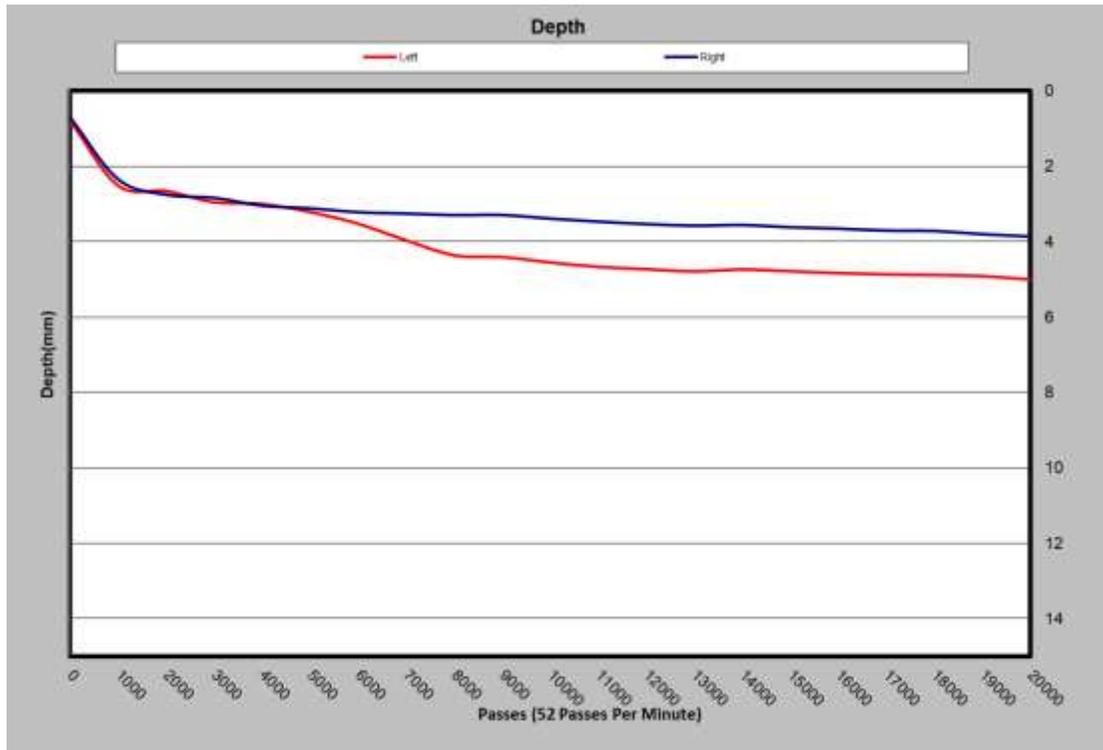


Gráfico 42. Deformación Plástica Muestra 01-20567-2021 (Left y Right)

Nota: No se logró alcanzar el punto de inflexión para determinar la susceptibilidad al daño por humedad (SIP)

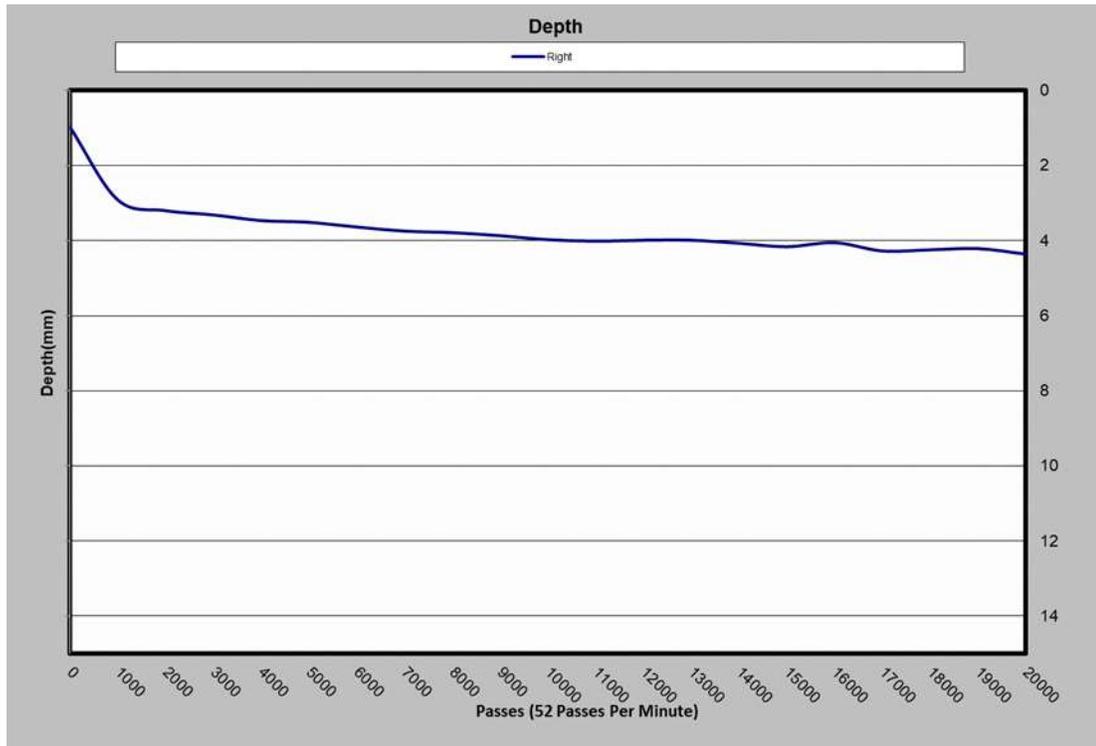


Gráfico 43. Deformación Plástica Muestra 01-20567-2021 (Right)

Nota: No se logró alcanzar el punto de inflexión para determinar la susceptibilidad al daño por humedad (SIP)

Tabla N° 54 Resultados de Ensayos

MUESTRA	FECHA(S) DE REALIZACIÓN	MÉTODO DE ENSAYO	ENSAYO	RESULTADOS						
				Pastilla	GEMT	Peso seco (g)	Peso SSS (g)	Peso sum. (g)	GBS	Vacios (%)
01-20567-2021	2021-09-01	(*) AASHTO T-269 INTE C4	Método de ensayo para el Porcentaje de vacíos de aire de mezclas asfálticas densas y abiertas para pavimentos	Primera Prueba						
				1, LI	2,469	2405,0	2418,6	1366,2	2,285	7,4
				2, LI		2405,5	2416,3	1369,0	2,297	7,0
				5, LD		2396,7	2408,7	1365,2	2,297	7,0
				6, LD		2404,1	2409,9	1365,0	2,301	6,8
				Segunda Prueba						
				3, LI	2,469	2403,6	2416,9	1365,7	2,287	7,4
				4, LI		2405,2	2420,2	1367,5	2,285	7,5

Muestra: 01-20749-2021

Tabla 55
Análisis de deformación plástica (Rueda de Hamburgo)
 Fecha de realización del ensayo: 2021-08-24

Muestra LGC	Lectura del medidor de profundidad (mm)					Deformación Máxima (mm)	Número de pasadas al momento de la Deformación Máxima (Ciclos)	Punto de Inflexión por Húmedad "Stripping Inflection Point" (SIP)
	1	2	3	4	5			
01-20749-2021 (Left)	3,748	3,714	3,513	3,513	3,633	3,748	19610	N/A
01-20749-2021 (Right)	3,419	3,284	3,284	3,115	3,062	3,419	19604	N/A
01-20749-2021 (Left)	3,454	3,324	3,229	3,148	3,230	3,454	19509	N/A
Promedio						3,540		

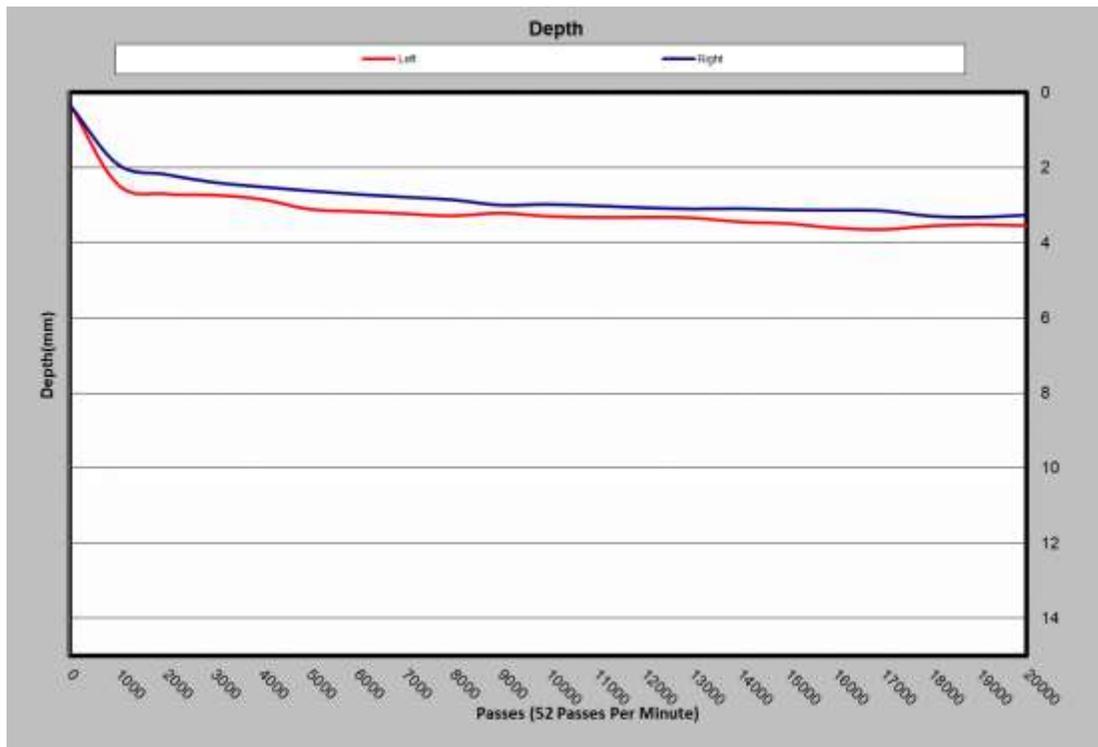


Gráfico 44. Deformación Plástica Muestra 01-20749-2021

Nota: No se logró alcanzar el punto de inflexión para determinar la susceptibilidad al daño por humedad (SIP)

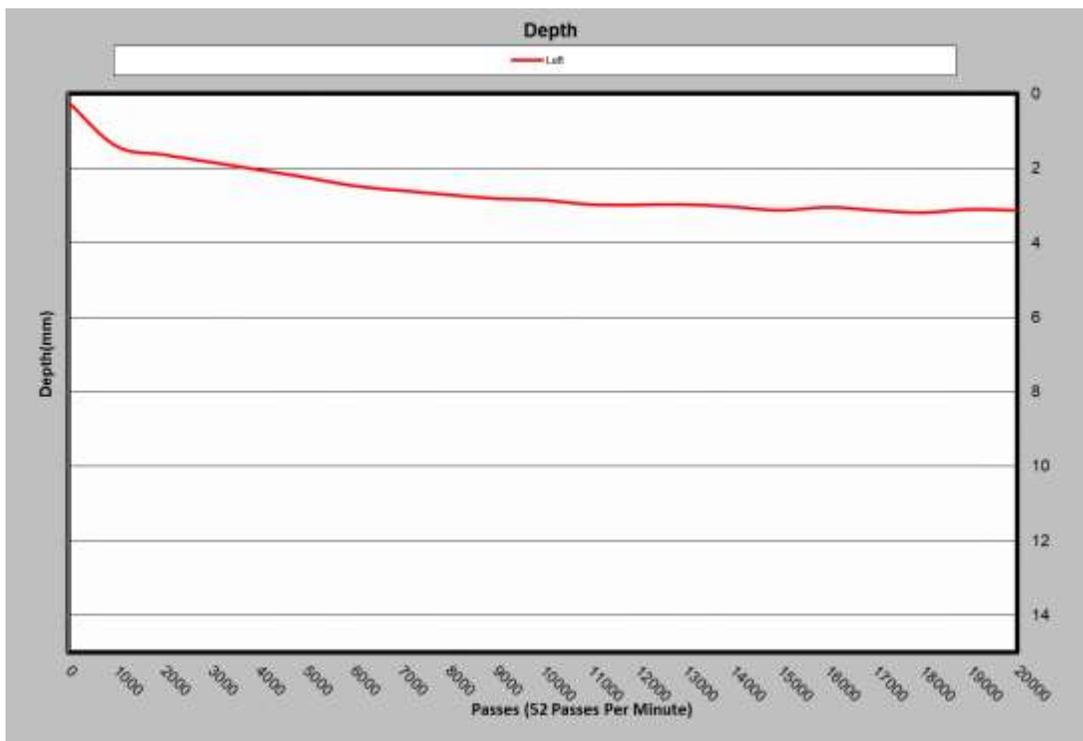


Gráfico 45. Deformación Plástica Muestra 01-20749-2021 (Left)

Nota: No se logró alcanzar el punto de inflexión para determinar la susceptibilidad al daño por humedad (SIP)

Tabla N° 56
Resultados de Ensayos

MUESTRA	FECHA(S) DE REALIZACIÓN	MÉTODO DE ENSAYO	ENSAYO	RESULTADOS						
				Pastilla	GMT	Peso seco (g)	Peso SSS (g)	Peso sum. (g)	GBS	Vacios (%)
01-20749-2021	2021-08-19	(*) AASHTO T-269 INTE C4	Método de ensayo para el Porcentaje de vacíos de aire de mezclas asfálticas densas y abiertas para pavimentos	Primera Prueba						
				2, LI	2,498	2329,5	2345,5	1342,8	2,323	7,0
				5, LI		2330,6	2347,8	1346,6	2,328	6,8
				4, LD		2329,5	2346,5	1341,5	2,318	7,2
				6, LD		2328,0	2346,9	1343,9	2,321	7,1
				Segunda Prueba						
				1, LI	2,498	2330,3	2349,0	1345,9	2,323	7,0
				3, LI		2330,5	2344,5	1346,2	2,334	6,6

Muestra: 01-23823-2021

Tabla 57
Análisis de deformación plástica (Rueda de Hamburgo)
 Fecha de realización del ensayo: 2021-11-04

Muestra LGC	Lectura del medidor de profundidad (mm)					Deformación Máxima (mm)	Número de pasadas al momento de la Deformación Máxima (Ciclos)	Punto de Inflexión por Humedad "Stripping Inflection Point" (SIP)
	1	2	3	4	5			
01-23823-2021 (Left)	3,834	3,759	3,759	3,639	3,639	3,834	19724	N/A
01-23823-2021 (Right)	3,898	3,765	3,657	3,641	3,641	3,898	19738	N/A
01-23823-2021 (Left)	3,723	3,624	3,573	3,458	3,458	3,723	19632	N/A
Promedio						3,818		

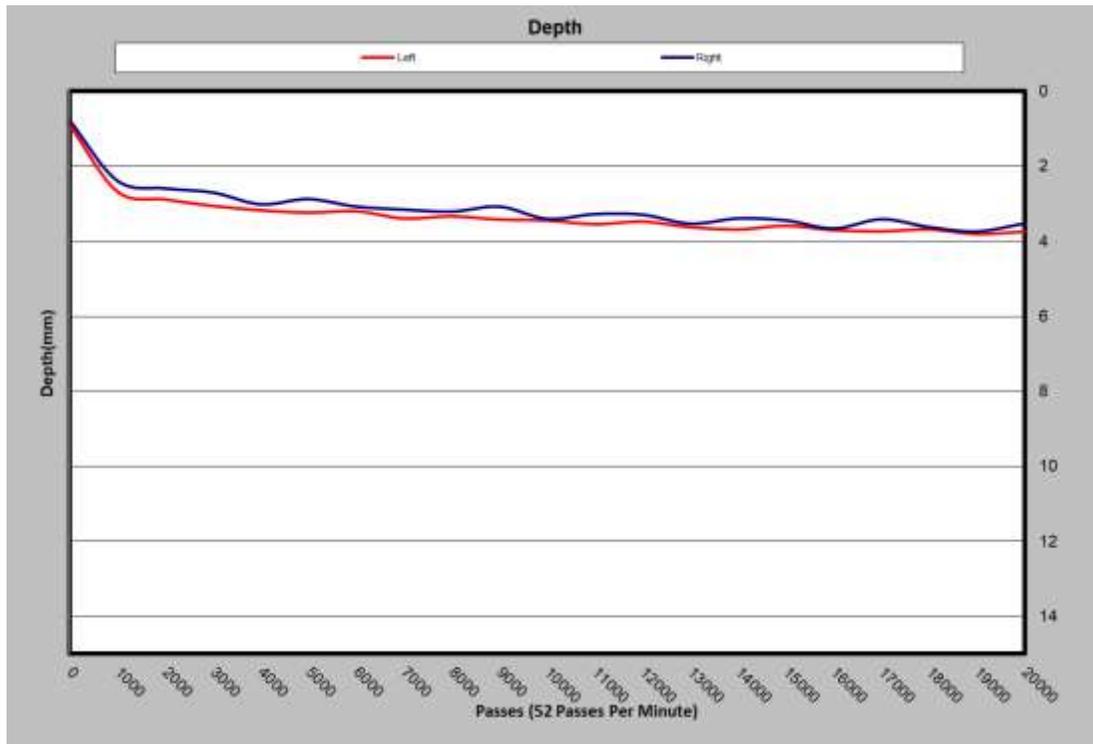


Gráfico 46. Deformación Plástica Muestra 01-23823-2021 (Left y Right)

Nota: No se logró alcanzar el punto de inflexión para determinar la susceptibilidad al daño por humedad (SIP)

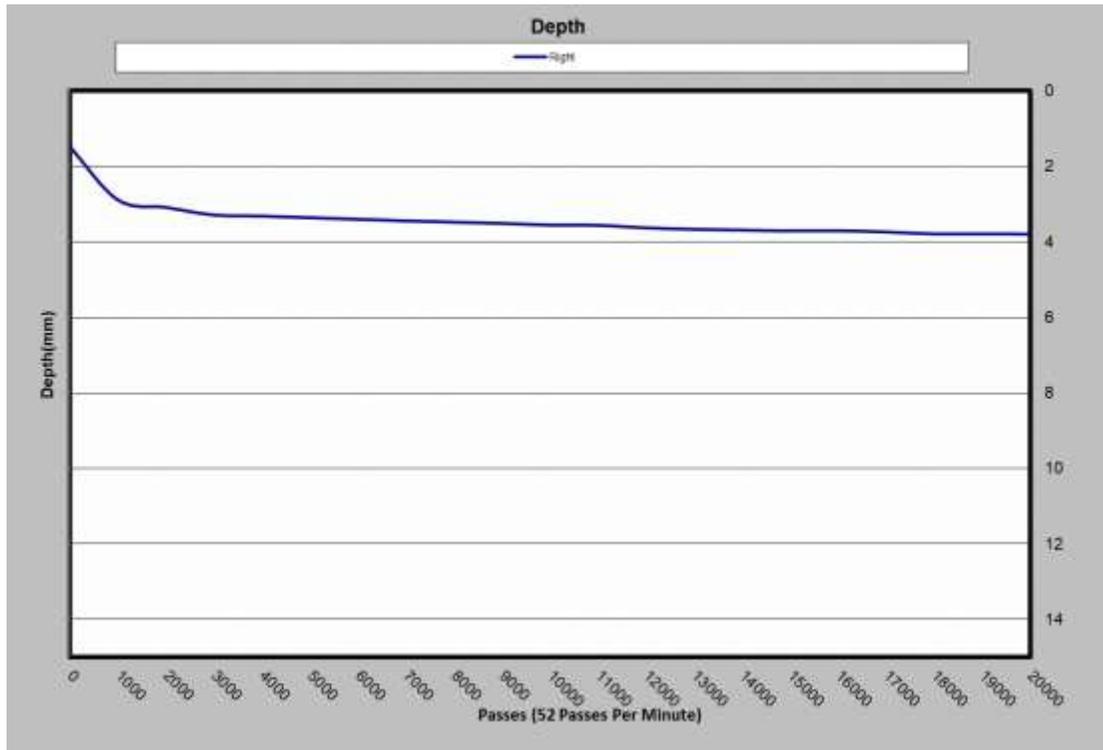


Gráfico 47. Deformación Plástica Muestra 01-23823-2021 (Left)

Nota: No se logró alcanzar el punto de inflexión para determinar la susceptibilidad al daño por humedad (SIP)

Tabla N° 58 Resultados de Ensayos

MUESTRA	FECHA(S) DE REALIZACIÓN	MÉTODO DE ENSAYO	ENSAYO	RESULTADOS						
				Pastilla	GEMT	Peso seco (g)	Peso SSS (g)	Peso sum. (g)	GBS	Vacíos (%)
01-23823-2021	2021-11-02	(*) AASHTO T-269 INTE C4	Método de ensayo para el Porcentaje de vacíos de aire de mezclas asfálticas densas y abiertas para pavimentos	Primera Prueba						
				1, LI	2,506	2443,6	2455,9	1412,7	2,342	6,52
				6, LI		2471,9	2463,9	1407,6	2,340	6,61
				3, LD		2449,7	2456,5	1402,1	2,323	7,29
				5, LD		2458,1	2464,2	1409,0	2,330	7,04
				Segunda Prueba						
				2, LI	2,506	2449,3	2459,8	1405,6	2,323	7,28
				4, LI		2457,5	2460,9	1406,2	2,330	7,02

Muestra: 01-17322-2020

Tabla 59
Análisis de deformación plástica (Rueda de Hamburgo)
 Fecha de realización del ensayo: 2021-11-04

Muestra LGC	Lectura del medidor de profundidad (mm)					Deformación Máxima (mm)	Número de pasadas al momento de la Deformación Máxima (Ciclos)	Punto de Inflexión por Húmedad "Stripping Inflection Point" (SIP)
	1	2	3	4	5			
01-17322-2020 (Left)	4,314	4,162	4,389	4,294	4,223	4,389	19870	N/A
01-17322-2020 (Right)	4,474	4,788	4,528	4,528	4,615	4,788	20006	N/A
01-17322-2020 (Left)	4,174	4,301	4,285	4,190	4,248	4,301	19838	N/A
Promedio						4,493		

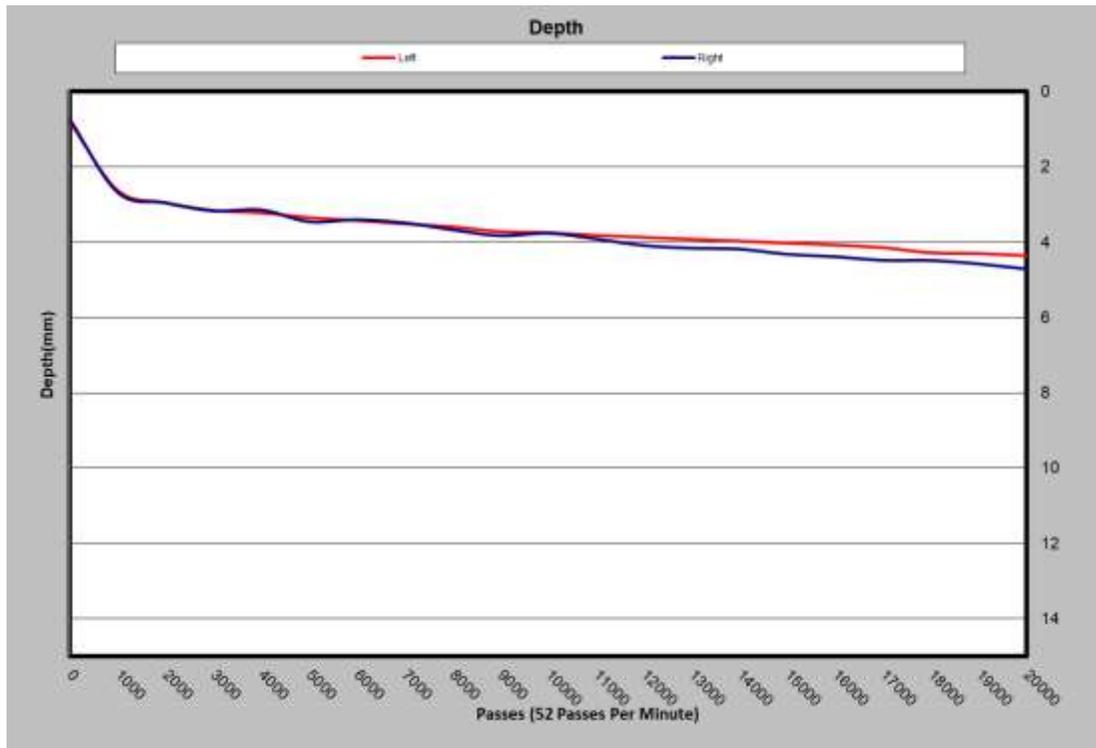


Gráfico 48. Deformación Plástica Muestra 01-17322-2020 (Left y Right)

Nota: No se logró alcanzar el punto de inflexión para determinar la susceptibilidad al daño por humedad (SIP)

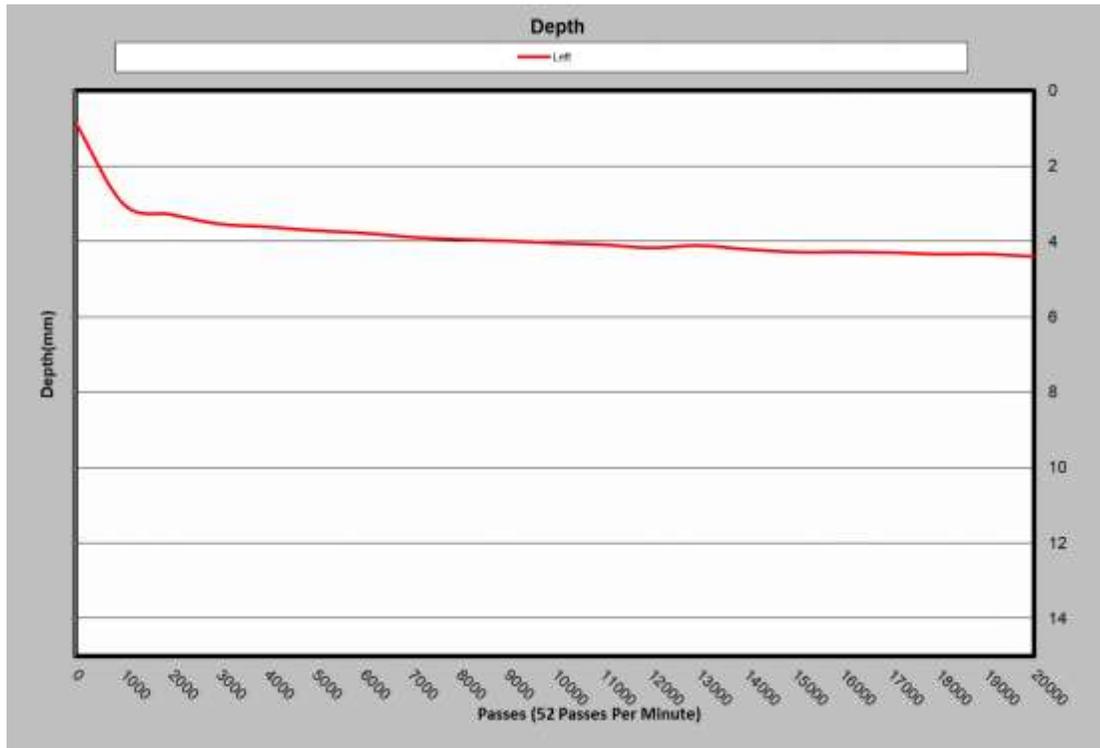


Gráfico 49. Deformación Plástica Muestra 01-17322-2020 (Left)

Nota: No se logró alcanzar el punto de inflexión para determinar la susceptibilidad al daño por humedad (SIP)

Tabla N° 60 Resultados de Ensayos

MUESTRA	FECHA(S) DE REALIZACIÓN	MÉTODO DE ENSAYO	ENSAYO	RESULTADOS						
				Pastilla	GEMT	Peso seco (g)	Peso SSS (g)	Peso sum. (g)	GBS	Vacios (%)
01-17322-2020	2021-11-03	(*) AASHTO T-269 INTE C4	Método de ensayo para el Porcentaje de vacíos de aire de mezclas asfálticas densas y abiertas para pavimentos	Primera Prueba						
				1, LI	2,446	2811,6	2839,7	1605,2	2,277	6,9
				2, LI		2812,2	2840,3	1604,6	2,276	7,0
				4, LD		2810,7	2838,8	1600,0	2,269	7,2
				5, LD		2811,0	2839,1	1601,5	2,271	7,1
				Segunda Prueba						
				3, LI	2,446	2812,3	2840,4	1610,7	2,287	6,5
				6, LI		2809,9	2838,0	1609,4	2,287	6,5

Muestra: 01-25226-2021

Tabla 61
Análisis de deformación plástica (Rueda de Hamburgo)
 Fecha de realización del ensayo: 2021-11-17

Muestra LGC	Lectura del medidor de profundidad (mm)					Deformación Máxima (mm)	Número de pasadas al momento de la Deformación Máxima (Ciclos)	Punto de Inflexión por Humedad "Stripping Inflection Point" (SIP)
	1	2	3	4	5			
01-25226-2021 (Left)	5,259	5,121	5,092	5,003	4,939	5,259	19948	N/A
01-25226-2021 (Right)	4,519	4,511	4,352	4,394	4,121	4,519	19822	N/A
01-25226-2021 (Left)	4,649	4,627	4,387	4,393	4,213	4,649	19786	N/A
Promedio						4,809		

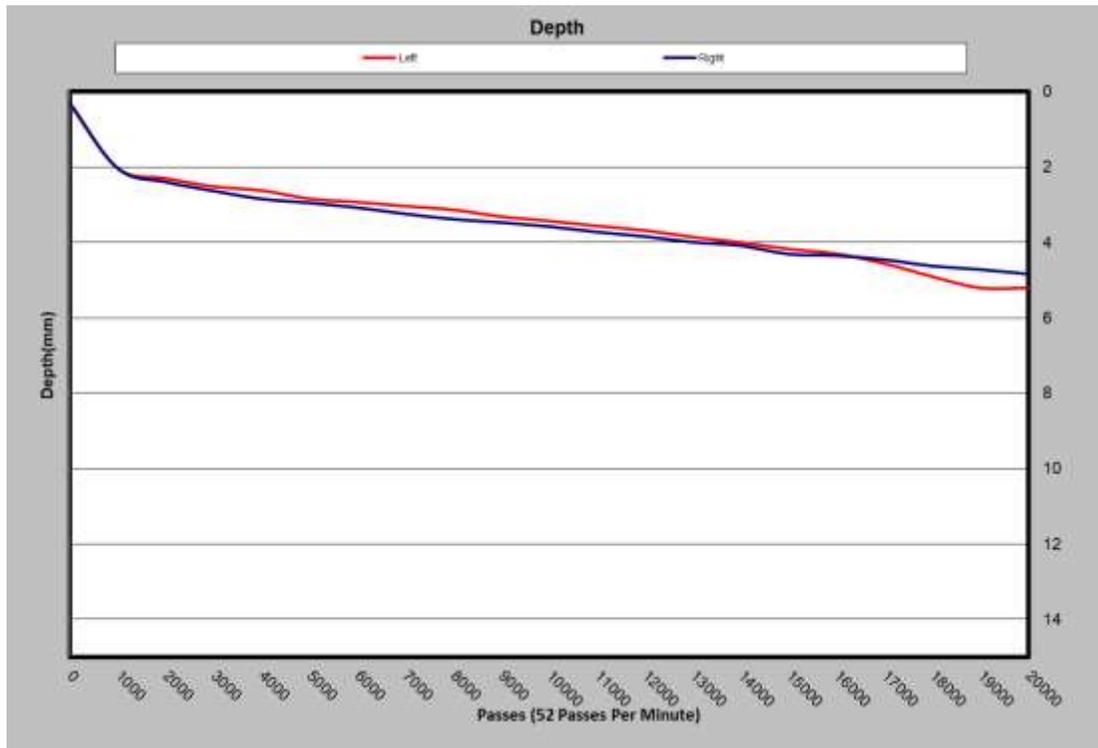


Gráfico 50. Deformación Plástica Muestra 01-25226-2021 (Left y Right)

Nota: No se logró alcanzar el punto de inflexión para determinar la susceptibilidad al daño por humedad (SIP)

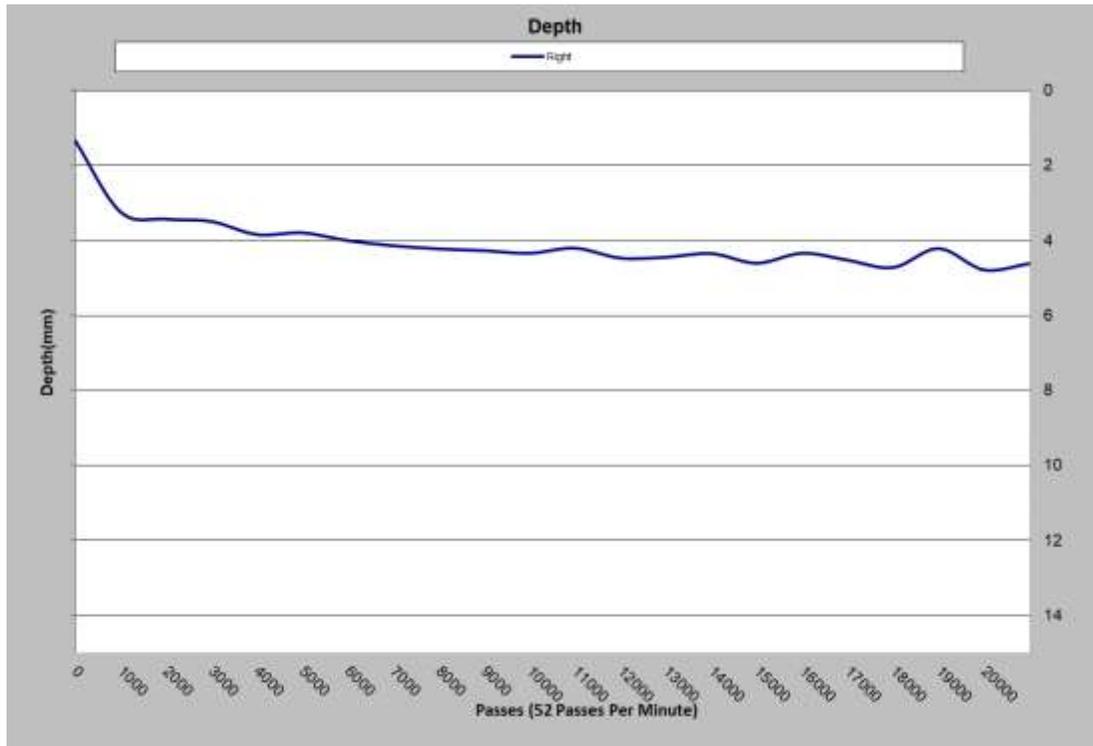


Gráfico 51. Deformación Plástica Muestra 01-25226-2021 (Left)

Nota: No se logró alcanzar el punto de inflexión para determinar la susceptibilidad al daño por humedad (SIP)

Tabla N° 62 Resultados de Ensayos

MUESTRA	FECHA(S) DE REALIZACIÓN	MÉTODO DE ENSAYO	ENSAYO	RESULTADOS						
				Pastilla	GEMT	Peso seco (g)	Peso SSS (g)	Peso sum. (g)	GBS	Vacios (%)
01-25226-2021	2021-11-16	(*) AASHTO T-269 INTE C4	Método de ensayo para el Porcentaje de vacíos de aire de mezclas asfálticas densas y abiertas para pavimentos	Primera Prueba						
				2, LI	2,498	2806,2	2834,3	1620,3	2,312	7,5
				5, LI		2804,6	2832,6	1619,4	2,312	7,5
				1, LD		2804,1	2832,1	1622,3	2,318	7,2
				4, LD		2802,0	2830,0	1621,4	2,318	7,2
				Segunda Prueba						
				3, LI	2,498	2803,4	2831,4	1625,0	2,324	7,0
				6, LI		2804,9	2832,9	1623,2	2,319	7,2

Muestra: 01-25228-2021

Tabla 63
Análisis de deformación plástica (Rueda de Hamburgo)
 Fecha de realización del ensayo: 2021-11-12

Muestra LGC	Lectura del medidor de profundidad (mm)					Deformación Máxima (mm)	Número de pasadas al momento de la Deformación Máxima (Ciclos)	Punto de Inflexión por Humedad "Stripping Inflection Point" (SIP)
	1	2	3	4	5			
01-25228-2021 (Left)	3,373	3,083	3,382	3,382	3,518	3,518	18400	N/A
01-25228-2021 (Right)	4,073	3,886	3,832	4,017	3,769	4,073	18386	N/A
01-25228-2021 (Left)	3,488	3,216	3,528	3,371	3,270	3,528	18301	N/A
Promedio						3,706		

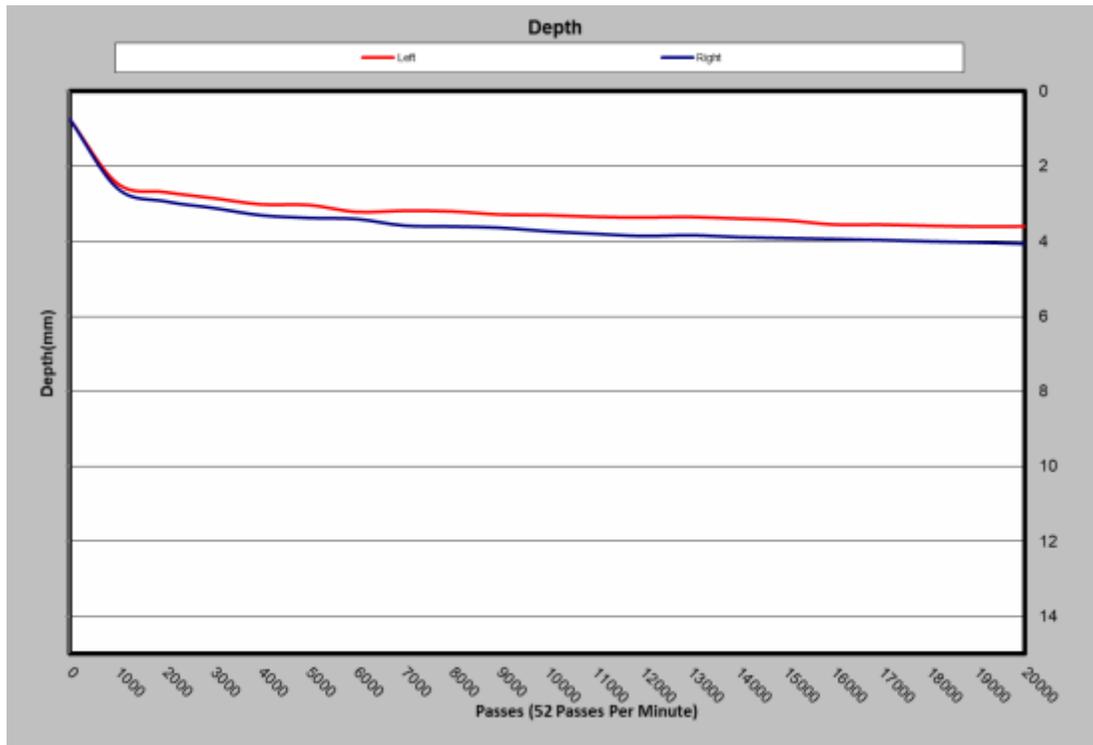


Gráfico 52. Deformación Plástica Muestra 01-25228-2021 (Left y Right)

Nota: No se logró alcanzar el punto de inflexión para determinar la susceptibilidad al daño por humedad (SIP)

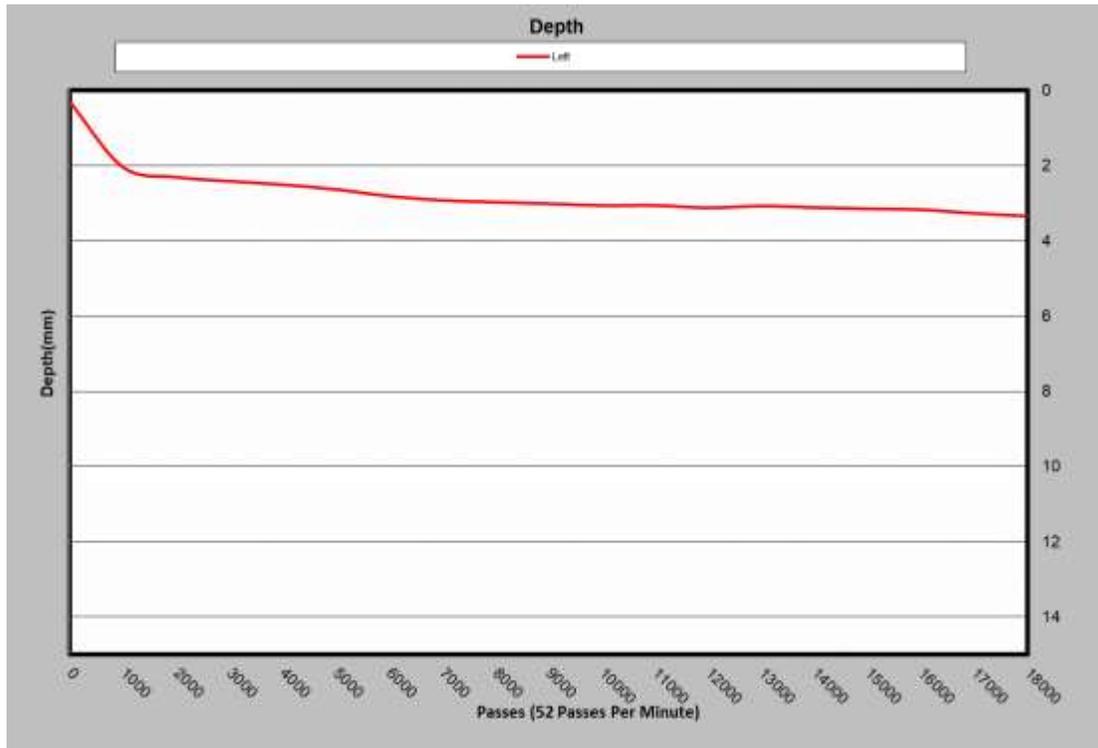


Gráfico 53. Deformación Plástica Muestra 01-25228-2021 (Left)

Nota: No se logró alcanzar el punto de inflexión para determinar la susceptibilidad al daño por humedad (SIP)

Tabla N° 64 Resultados de Ensayos

MUESTRA	FECHA(S) DE REALIZACIÓN	MÉTODO DE ENSAYO	ENSAYO	RESULTADOS						
				Pastilla	GEMT	Peso seco (g)	Peso SSS (g)	Peso sum. (g)	GBS	Vacios (%)
01-25228-2021	2021-11-10	(*) AASHTO T-269 INTE C4	Método de ensayo para el Porcentaje de vacíos de aire de mezclas asfálticas densas y abiertas para pavimentos	Primera Prueba						
				7, LI	2,498	2809,7	2837,8	1635,2	2,336	6,5
				2, LI		2810,3	2838,4	1632,3	2,330	6,7
				1, LD		2810,0	2838,1	1627,6	2,321	7,1
				4, LD		2811,4	2839,5	1626,5	2,318	7,2
				Segunda Prueba						
				3, LI	2,498	2808,9	2837,0	1630,4	2,328	6,8
				5, LI		2809,6	2837,7	1629,8	2,326	6,9

Muestra: 01-25230-2021

Tabla 65
Análisis de deformación plástica (Rueda de Hamburgo)
 Fecha de realización del ensayo: 2021-11-06

Muestra LGC	Lectura del medidor de profundidad (mm)					Deformación Máxima (mm)	Número de pasadas al momento de la Deformación Máxima (Ciclos)	Punto de Inflexión por Humedad "Stripping Inflection Point" (SIP)
	1	2	3	4	5			
01-25230-2021 (Left)	3,575	3,434	3,487	3,397	3,544	3,575	19984	N/A
01-25230-2021 (Right)	3,475	3,437	3,587	3,587	3,422	3,587	19860	N/A
01-25230-2021 (Left)	3,298	3,127	3,219	3,267	3,260	3,298	19822	N/A
Promedio						3,486		

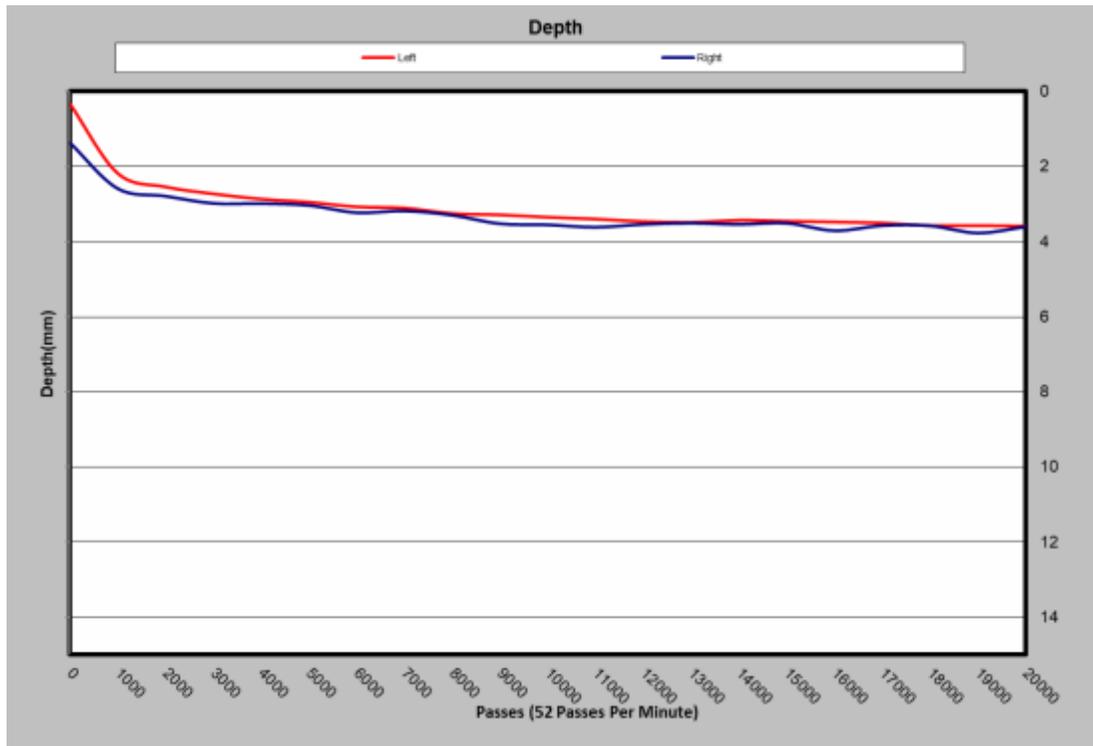


Gráfico 54. Deformación Plástica Muestra 01-25230-2021 (Left y Right)

Nota: No se logró alcanzar el punto de inflexión para determinar la susceptibilidad al daño por humedad (SIP)

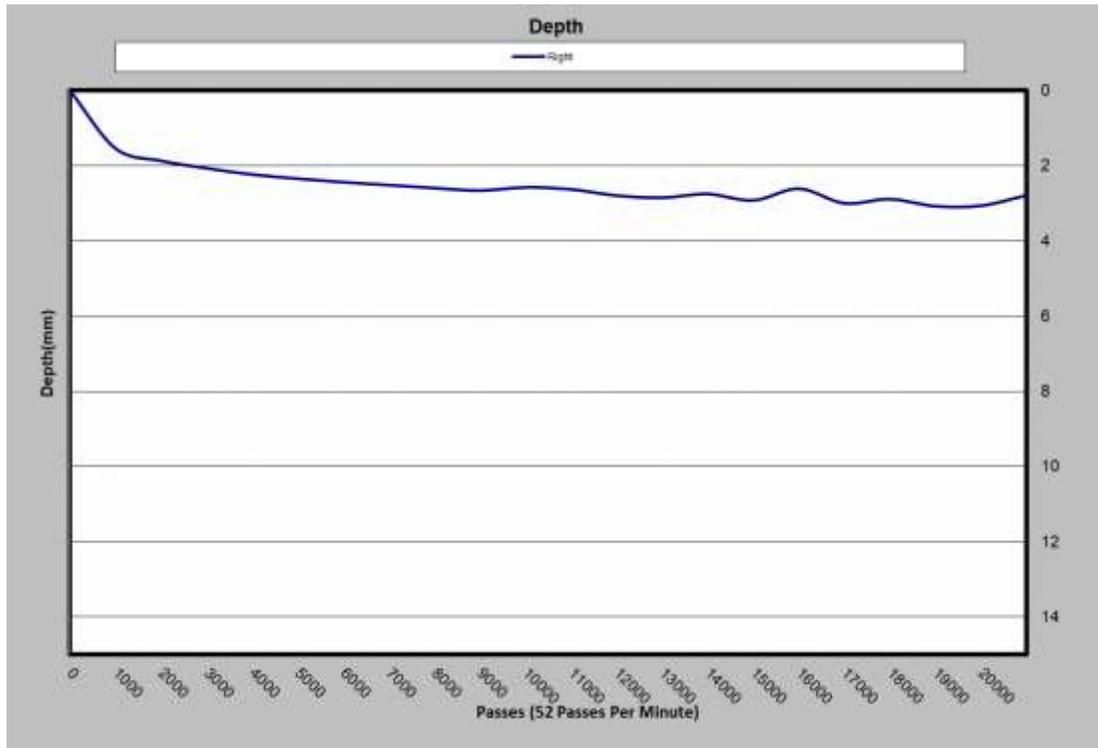


Gráfico 55. Deformación Plástica Muestra 01-25230-2021 (Left)

Nota: No se logró alcanzar el punto de inflexión para determinar la susceptibilidad al daño por humedad (SIP)

Tabla N° 66 Resultados de Ensayos

MUESTRA	FECHA(S) DE REALIZACIÓN	MÉTODO DE ENSAYO	ENSAYO	RESULTADOS						
				Pastilla	GEMT	Peso seco (g)	Peso SSS (g)	Peso sum. (g)	GBS	Vacios (%)
01-25230-2021	2021-11-05	(*) AASHTO T-269 INTE C4	Método de ensayo para el Porcentaje de vacíos de aire de mezclas asfálticas densas y abiertas para pavimentos	Primera Prueba						
				1, LI	2,498	2808,1	2836,2	1631,4	2,331	6,7
				2, LI		2807,5	2835,6	1630,3	2,329	6,8
				3, LD		2809,6	2837,7	1633,6	2,333	6,6
				4, LD		2804,6	2832,6	1629,8	2,332	6,7
				Segunda Prueba						
5, LI	2,498	2805,3	2833,4	1625,0	2,322	7,1				
6, LI		2807,2	2835,3	1624,2	2,318	7,2				

Anexo N°3 Análisis Mezcla Asfáltica en Caliente

LGC INGENIERIA DE PAVIMENTOS S.A. Tesis de Maestría		LGC INGENIERIA DE PAVIMENTOS						
Gravedad Específica	INTE C1	2,341	2,366	2,358	2,340	2,367	2,387	2,411
Gravedad Esp. Máxima Teórica	INTE C3	2,446	2,468	2,452	2,470	2,469	2,498	2,506
Estabilidad (kgf)	AASHTO T-245 / AASHTO R-68	1542	1752	1716	1661	1683	1712	2033
Flujo (cm/100)	AASHTO T-245 / AASHTO R-68	32,5	29,8	30,5	29,3	28,0	29,3	31,8
Contenido Asf./Agreg. (%)	INTE C9	5,90	6,17	5,73	5,65	5,06	5,27	5,70
Contenido Asf./Mezcla (%)		5,54	5,73	5,38	5,31	5,73	5,56	5,36
Vacíos de Aire Totales (%)	AASHTO T-269 / INTE	4,3	4,1	3,8	5,3	4,1	4,4	3,8
VMA (%)	-	14,7	14,3	15,6	15,7	14,5	15,0	14,4
VFA(%)	-	71	71	75	66	71	70	74
Relación Polvo / Asfalto Efectivo (%)	-	1,9	1,3	1,4	1,4	1,2	1,1	1,2
GS Efectiva	-	2,659	2,695	2,659	2,677	2,694	2,724	2,725
Absorción Asfalto (%)	-	1,024	1,386	0,243	0,730	0,889	0,804	0,861
Grav. Esp. Asfalto	-	1,035	1,035	1,036	1,039	1,039	1,038	1,036
Asfalto Efectivo (%)	-	4,573	4,424	5,150	4,619	4,892	4,800	4,546

GRANULOMETRIA		PASANDO (%)						
Tamiz 25,4 mm	AASHTO T-30	100	100	100	100	100	100	100
Tamiz 19,0 mm		100	97	100	100	100	100	100
Tamiz 12,7 mm		94	83	96	98	86	94	93
Tamiz 9,5 mm		81	50	82	85	73	76	84
Tamiz N° 4		55	34	52	51	44	42	50
Tamiz N° 8		35	24	34	28	28	30	32
Tamiz N° 16		25	17	25	20	20	23	21
Tamiz N° 30		18	13	19	15	15	17	15
Tamiz N° 50		14	9	14	12	12	11	11
Tamiz N° 200		8,5	5,7	7,3	6,4	6,0	5,3	5,4
Identificación de la Muestra		01-16756-2021	01-19405-2021	01-20555-2021	01-20566-2021	01-20567-2021	01-20749-2021	01-23823-2021
GBS FINOS		2,556	2,515	2,631	2,617	2,641	2,680	2,610
GBS GRUESOS		2,632	2,646	2,654	2,638	2,628	2,658	2,720
GBS COMBINADO		2,590	2,601	2,642	2,627	2,634	2,667	2,665

-----Última Línea-----