

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE POSGRADO



CORRELACIÓN ENTRE MSCR Y RUEDA DE HAMBURGO

PRESENTADO POR:

SAMUEL DE JESÚS CARRILLO CALDERÓN

CHRISTA MARÍA MATA DE LARA

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

MAESTRO(A) EN INGENIERÍA VIAL

CIUDAD UNIVERSITARIA, MAYO 2025

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSc. JUAN ROSA QUINTANILLA

SECRETARIO GENERAL:

LCDO. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

ING. LUIS SALVADOR BARRERA MANCÍA

SECRETARIO:

ARQ. RAÚL ALEXANDER FABIÁN ORELLANA

ESCUELA DE POSGRADO

DIRECTOR:

MSc. ELMER ARTURO CARBALLO RUÍZ

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE POSGRADO

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

MAESTRO(A) EN INGENIERÍA VIAL

Título:

CORRELACIÓN ENTRE MSCR Y RUEDA DE HAMBURGO

Presentado por:

SAMUEL DE JESÚS CARRILLO CALDERÓN

CHRISTA MARÍA MATA DE LARA

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor(a):

Ph.D, P.E. ANDRÉS SOTIL CHÁVEZ

SAN SALVADOR, MAYO 2025

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

Ph.D, P.E. ANDRÉS SOTIL CHÁVEZ

INDICE DE CONTENIDO

1.0 GENERALIDADES.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Antecedentes.....	3
1.2.1 Clasificación de los Ligantes Asfálticos en El Salvador.....	3
1.2.2 Diseño de Mezclas Asfálticas en El Salvador.....	4
1.3 Planteamiento del Problema.....	6
1.4 Objetivos.....	8
1.4.1 Objetivo General.....	8
1.4.2 Objetivos Específicos.....	8
1.5 Alcances.....	8
1.6 Justificación.....	9
2.0 MARCO TEÓRICO.....	11
2.1 Generalidades de Mezclas Asfálticas.....	11
2.2 Método Bailey.....	13
2.2.1 Empaquetamiento del Agregado.....	14
2.3 Multiple Stress Creep And Recovery.....	16
2.3.1 ¿Cómo Funciona el MSCR?.....	19
2.4 Método de Ensayo Estándar de la Rueda de Hamburgo para Mezclas Asfálticas Compactadas (AASHTO T324).....	22
3.0 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	29
3.1 Resultados de Ensayo Rueda de Hamburgo de Asfaltos Convencionales y Modificados.....	29
3.1.1 Muestras de mezclas asfálticas año 2020 y 2021 con asfalto Convencional AC30.....	29
3.1.2 Muestras de mezclas asfálticas año 2020 y 2021 con asfaltos Modificados.....	33

3.2 Resultados de Ensayo MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery) de Asfaltos convencionales y modificados, año 2021 y 2021.....	36
3.3 Resultados de Ensayos de Rueda de Hamburgo de asfaltos convencionales y modificados, año 2022 y 2023.....	40
3.4 Resultados de Ensayo MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery) de asfaltos Convencionales y modificados, año 2022 y 2023.....	46
4.0 ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS.....	51
4.1 Análisis de resultados de ensayo de Rueda de Hamburgo, para mezclas Convencionales 2020.....	51
4.2 Análisis de resultados de ensayo de Rueda de Hamburgo, para mezclas Modificadas año 2020/2021.....	53
4.3 Análisis de resultados de ensayo de Rueda de Hamburgo, para mezclas Modificadas año 2022/2023.....	55
4.4 Análisis de resultados de ensayo Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Para muestras ensayadas en los años 2020/2021.....	59
4.5 Análisis de resultados de ensayo Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Para muestras ensayadas en los años 2022/2023.....	64
5.0 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	70
5.1 Conclusiones.....	70
5.2 Recomendaciones.....	74
6.0 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Superposición Tiempo – Temperatura.....	11
Figura 2: Martillo compactador de impacto Marshall.....	14
Figura 3: Compactador Giratorio (Cizallamiento), metodología Superpave.....	14
Figuras 4, 5 y 6: Fracciones Gruesa, Intermedia y Fina de agregados pétreos, Provenientes de planta trituradora.....	15
Figura 7: Ciclos de carga (1 seg) y descarga (9 seg) en ensayos MSCR.....	18
Figura 8: Comparación de resultados de parámetros en ensayo PG/RTFO y MSCR.....	18
Figura 9: Resultados de deformación permanente en secciones de prueba de Mississippi.....	19
Figura 10: Muestras de prueba de ensayo MSCR.....	19
Figura 11: Gráfica de tiempo vrs esfuerzo aplicado a la muestra de asfalto, en el que se evalúa su recuperación elástica.....	20
Figura 12: Gráfico de cumplimiento de recuperación elástica para asfaltos Modificados.....	22
Figura 13: Compactador Giratorio de Mezclas Asfálticas.....	23
Figura 14: Esquema de montaje de especímenes para 1 huella en el equipo: Rueda de Hamburgo.....	24
Figura 15: Proceso de corte de especímenes para posterior montaje en equipo de Rueda de Hamburgo.....	25
Figura 16: Dos especímenes, luego de ser cortados, montados en moldes de teflón y colocados dentro de la armazón de ensayo.....	25
Figura 17: Equipo de Rueda de Hamburgo.....	26
Figura 18: Esquema de puntos mínimos de medición de la huella.....	27
Figura 19: Esquema de Gráfica de Resultados de Ensayo de Rueda de Hamburgo....	28
Figura 20: Deformación de mezclas convencionales (50°C, 20,000 pasadas).....	30
Figura 21: Deformación de mezclas convencionales (50°C, 20,000 pasadas).....	30

Figura 22: Pendiente de Deformación vrs Deformación, mm (mezclas convencionales; 50°C, 20,000 pasadas).....	31
Figura 23: Comparación de Mezclas TMN ¾”-TMN ½” (50°C, 20,000 pasadas).....	32
Figura 24: Deformación de mezclas modificadas (50°C, 20,000 pasadas).....	33
Figura 25: Pendiente de Deformación de Mezclas Modificadas (50°C, 20,000 pasadas).....	34
Figura 26: Pendiente de Deformación de Mezclas Modificadas (50°C, 20,000 pasadas).....	34
Figura 27: Comparación entre mezclas con asfalto PG64-PG70-PG76 (50°C, 20,000 pasadas).....	35
Figura 28: Resultados MSCR Asfalto Convencional ensayado a 64°C, 2020.....	36
Figura 29: Resultados MSCR Asfalto Modificado PG70 ensayado a 70°C, 2020.....	37
Figura 30: Resultados MSCR Asfalto Convencional ensayado a 64°C, 2021.....	37
Figura 31: Resultados MSCR Asfalto Modificado PG70 ensayado a 70°C, 2021.....	38
Figura 32: Comparación entre resultados MSCR PG64-PG70 (2020/2021).....	39
Figura 33: Deformación de Mezclas Modificadas (55°C, 30,000 pasadas).....	41
Figura 34: Pendiente de deformación de mezclas modificadas (55°C, 30,000 pasadas).....	41
Figura 35: Comparación entre mezclas de TMN ¾” y TMN ½” (55°C, 30,000 pasadas) (Año 2022).....	42
Figura 36: Deformación de mezclas asfálticas modificadas 2023 (55°C, 30,000 pasadas).....	43
Figura 37: Pendiente de Deformación de Mezclas Modificadas 2023 (55°C, 30,000 pasadas).....	44
Figura 38: Pendiente de Deformación vrs Deformación de Mezclas Modificadas 2023 (55°C, 30,000 pasadas).....	44
Figura 39: Comparación de resultados de ensayo de Rueda de Hamburgo, entre mezclas: 2020/2021 – 2022/2023.....	45
Figura 40: Resultados MSCR a 64°C – 2022.....	46

Figura 41: Resultados MSCR a 70°C – 2022.....	47
Figura 42: Resultados MSCR a 64°C – 2023.....	48
Figura 43: Resultados MSCR a 70°C – 2023.....	48
Figura 44: Comparación MSCR 64°C (2020/2021/2022/2023).....	49
Figura 45: Comparación MSCR 70°C (2020/2021/2022/2023).....	50
Figura 46: Muestra de TMN ½” luego de terminar prueba.....	57
Figura 47: Muestra luego de fallar por desnudamiento (55°C-30,000).....	58
Figura 48: Selección del peso unitario escogido de los agregados.....	73

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Designaciones de bandas granulométricas según tamaño máximo nominal Seleccionado.....	15
Tabla 2: Recomendaciones para el Grade-Bumping.....	17
Tabla 3: Tabla de clasificación de asfaltos por desempeño por medio del ensayo MSCR.....	21
Tabla 4: Resultados obtenidos en Rueda de Hamburgo, Mezclas con Asfalto Convencional, año 2020.....	52
Tabla 5: Resultados obtenidos en Rueda de Hamburgo, Mezclas con Asfalto } Modificado Año 2020.....	53
Tabla 6: Resultados obtenidos en Rueda de Hamburgo, Mezclas con Asfalto Modificado Año 2021.....	54
Tabla 7: Resultados obtenidos en Rueda de Hamburgo, Mezclas con Asfalto Modificado Año 2022.....	56
Tabla 8: Resultados obtenidos en ensayo MSCR, Mezclas Asfálticas, año 2020.....	60
Tabla 9: Resultados obtenidos en ensayo MSCR, Mezclas Asfálticas año 2021.....	63
Tabla 10: Resultados obtenidos en ensayo MSCR, Mezclas Asfálticas, año 2022.....	69

1.0 CAPÍTULO UNO: GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

El diseño de mezclas asfálticas juega un papel preponderante en toda estructura de carreteras, ya que, si bien una estructura consta de diversas capas para resistir las solicitaciones de cargas, es la capa de rodamiento la que debe resistir los embates directos de abrasión del tráfico y la intemperie.

La tendencia a nivel mundial en el diseño de mezclas asfálticas es la utilización de metodologías de estudio mecánicas, que predigan de una manera aproximada el desempeño que presentará la carpeta asfáltica durante su servicio. Además, también se ha determinado que las características del ligante asfáltico utilizado es un componente relevante dentro de la estructura y que, si éste no es diseñado para las condiciones de tráfico y clima a las que estará expuesto, la carpeta asfáltica durará menos tiempo de lo esperado.

La metodología de diseño de mezclas asfálticas en caliente utilizada en El Salvador, es la propuesta por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas de Mississippi, que fue creada en el año 1943. Dicha metodología de diseño solo consta de procedimientos empíricos, cuyo objetivo es el control de propiedades volumétricas en mezclas asfálticas, lo cual no predice su desempeño cuando es puesta en servicio.

Desde la década de los noventa, la American Association of State Transportation Officials (de aquí en adelante: AASHTO) lideró la iniciativa de cambiar el enfoque empírico de las pruebas realizadas en la etapa de diseño de mezclas asfálticas hacia un enfoque mecánico. De esta iniciativa nació el sistema SuperPave, el cual cambió la forma de evaluar el asfalto e introdujo algunos cambios a la evaluación de los agregados y al diseño de la mezcla.

La evaluación del asfalto cambió completamente su enfoque de ensayos empíricos a ensayos mecánicos (basados en esfuerzos y deformaciones). Por otro lado, en el diseño de la mezcla, se introdujo el uso del compactador giratorio, puntos de control, relación filler-

asfalto, evaluación del daño por humedad, entre otros. Si bien se establecieron niveles y en el nivel más alto se involucraba evaluaciones por módulo dinámicos y fatiga, en esencia, el diseño mantuvo su enfoque volumétrico.

En la última década, se vio un nuevo empuje hacia un nuevo método de diseño. En esta ocasión, el enfoque es completamente hacia el desempeño. Esto quiere decir que la metodología de pruebas para diseñar será por desempeño y enfocadas hacia predecir las patologías de deformación permanente y fatiga en las mezclas asfálticas. De este empuje nace el Método de Diseño Balanceado.

El Método de Diseño Balanceado se encuentra ya en etapa de implementación en los Estados Unidos de América, contando ya con normativas por parte de AASHTO para alentar y regular su uso. Su concepto es que se diseñe para predecir las patologías que se busca evitar (deformación permanente, fatiga, agrietamiento térmico), y para esto se pueden usar diferentes ensayos que se detallan en la normativa.

Dada la naturaleza única de los materiales asfálticos (origen orgánico altamente variable), su caracterización y la predicción de su comportamiento es difícil de realizarse por medios empíricos, y aún, químicos. Por esto, la tendencia mundial, es ir dejando paulatinamente de lado, el diseño volumétrico y caminar hacia el desempeño.

Uno de los ensayos por desempeño que tiene una relación directa con el comportamiento en campo de mezclas asfálticas en caliente, es el ensayo de la Rueda de Hamburgo; el cual es el ensayo que se estudia en el presente trabajo de grado. Dado el avance que experimenta la industria de la construcción mediante el uso de asfaltos modificados con polímeros, las pruebas empíricas del pasado no pueden arrojar resultados por desempeño de estos nuevos materiales.

1.2 ANTECEDENTES

1.2.1 Clasificación de los Ligantes Asfálticos en El Salvador

En el pasado cercano, el sistema de clasificación de ligantes asfálticos más utilizado en El Salvador fue la clasificación por grado de viscosidad, cuyos parámetros de evaluación, si bien muestran propiedades reológicas del betún asfáltico, no arrojan resultados que determinen su desempeño al momento de ser utilizado en mezclas asfálticas, debido principalmente, a que sus ensayos se realizan a temperaturas fijas.

La clasificación por grado de viscosidad surgió en los Estados Unidos de América, en la década de los 60's, con el objetivo de contar con una alternativa que sustituyera al método tradicional empírico, de clasificación de asfaltos por penetración. Su principio fundamental, se basa en encontrar la viscosidad absoluta a 60 °C, y asignar como resultado o consistencia obtenida el grado AC correspondiente. Así por ejemplo el asfalto clasificado tipo AC-30, es un asfalto cuya viscosidad absoluta a 60°C ronda por los: 3000 ± 600 N s/m²; de la misma forma un asfalto tipo AC-20, su viscosidad absoluta rondará por: 2000 ± 400 N s/m².

El uso durante el tiempo de este sistema de clasificación nos ha demostrado que no existe una buena correlación entre asfaltos clasificados con el mismo grado de viscosidad, cuando provienen de distintas fuentes de suministro. Aunado a lo anterior, los asfaltos modificados no pueden ser caracterizados por viscosidad (Instituto del Asfalto, 2007).

En el año 1987, surge un programa de investigación en los Estados Unidos, el cual fue denominado: Strategic Highway Research Program (de aquí en adelante: SHRP), cuyas principales metas era la obtención de nuevas especificaciones, ensayos y normas de diseño para materiales asfálticos, tomando como principal criterio de diseño: el desempeño del mismo. Como resultado de este programa, surge una nueva clasificación de ligantes asfálticos, el cual es la clasificación por grado de desempeño (PG, Performance Grade).

El equipo de laboratorio seleccionado para la clasificación de asfaltos por desempeño es, principalmente, el Reómetro de Corte Dinámico (Dynamic Shear Rheometer, DSR), el cual busca predecir la aportación del ligante ante las fallas más comunes de mezclas asfálticas, como lo son: ahuellamiento y fatiga. También se desarrolló otro tipo de reómetro

para la evaluación del ligante a temperaturas bajas, llamado el Reómetro de Viga a Flexión (Bending Beam Rheometer, BBR). A la par del BBR, se desarrolló también para temperaturas bajas el Aparato a Tensión Directa (Direct Tension Tester, DTT), el cual en la actualidad está cayendo en desuso). La falla que se busca predecir con estos equipos es el agrietamiento térmico que se presenta en temperaturas muy bajas.

A partir del año 2014, en el país se instaló el primer DSR y el equipo necesario para llevar a cabo los ensayos por desempeño a temperaturas altas e intermedias. No se instaló, aún a la fecha, equipo para ensayos a temperaturas bajas.

Este fue el banderillazo de salida para iniciar la transición del sistema por viscosidad al sistema por desempeño. Del 2014 al 2016, la clasificación por desempeño se utilizó solamente en investigación sobre los asfaltos locales, siendo los resultados presentados en el 1^{er} y 2^o Congreso Salvadoreño del Asfalto.

A partir de 2017, el Fondo de Conservación Vial incluyó en sus términos de referencia para los mantenimientos rutinarios y periódicos la realización de los ensayos por desempeño, requiriéndolos para fines de investigación. Esto continuó hasta 2019, pasando en el año 2020 a requerirse la clasificación por desempeño en toda su capacidad, y quedando en desuso la clasificación por viscosidad.

En la actualidad, la gran mayoría de proyectos se ejecuta utilizando la clasificación por desempeño para los ligantes asfálticos. No obstante, todavía existen algunos proyectos que fueron formulados utilizando la clasificación de asfalto por viscosidad y que se están ejecutando en el presente, o que están en la fase de licitación.

1.2.2 Diseño de Mezclas Asfálticas en El Salvador

Como en la mayoría de los países de Latinoamérica, en El Salvador el diseño de las mezclas asfálticas se hace a través de la metodología Marshall. Dicha metodología es la implementada en todos los proyectos que ejecuta el país, y el cumplimiento de sus parámetros otorga la validación para el proceso de pago de estimaciones de obra.

Sin embargo, en materia de control de calidad de mezclas asfálticas modificadas, se ha ido avanzando; ya que para este tipo de mezclas, instituciones como El Ministerio de Obras Públicas (MOP) y el Fondo de Conservación Vial (FOVIAL), exigen el cumplimiento

del asfalto en ensayos de desempeño tales como: Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR), Resultados de Prueba de Clasificación por Desempeño de Ligante Asfáltico (Performance Grade, PG) del asfalto original y después de envejecimiento por PAV (Pressurized Aging Vessel) y Prueba de Separación de Ligantes Asfálticos. Con la exigencia del cumplimiento de grados de desempeño en ligantes asfálticos, se ha buscado mezclas con mejores resistencias al ahuellamiento y menor susceptibilidad a la fatiga.

De la misma forma en que se evolucionó con ensayos por desempeño del ligante asfáltico, también el país se encuentra en etapa de investigación en lo que respecta al ensayo AASHTO: T 324 Pruebas de Mezclas Asfálticas Compactadas con la Rueda de Hamburgo. Dicha base de datos es la información principal en la cual se sustenta el presente trabajo de grado.

Se han venido estudiando desde el año 2018 diferentes diseños de mezclas asfálticas convencionales y modificadas con granulometrías de tamaño máximo nominal de $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{4}$ ". Se pretende que, en un futuro cercano, el ensayo de la Rueda de Hamburgo sea requisito su cumplimiento como verificación del desempeño de las mezclas asfálticas a la deformación permanente, acorde a las temperaturas a las que estará expuesta y su susceptibilidad a la humedad.

La Rueda de Hamburgo es un equipo de laboratorio usado para medir la susceptibilidad a la deformación permanente y el daño por humedad de mezclas asfálticas usando especímenes sumergidos bajo la acción de una rueda oscilante (AASHTO T324). Este equipo fue desarrollado en 1970 en Alemania por Esso A.G. de Helmut-Wind Inc., y se introdujo en Estados Unidos en los años noventa con el objetivo de detectar mezclas propensas a la deformación permanente (Evaluación del desempeño de mezclas asfálticas con la rueda cargada de Hamburgo, Publicación Técnica No. 568).

Aschenbrener et al, (1993) fueron los pioneros en realizar estudios con la rueda cargada de Hamburgo: evaluaron los factores que influyen los resultados de la rueda cargada de Hamburgo (HWTD, por sus siglas en inglés), en 20 mezclas cuyo desempeño al desgranamiento era conocido, las pruebas se realizaron en un rango de temperaturas de 35 a 65°C. Los resultados obtenidos en laboratorio se compararon con el desempeño en campo y se obtuvo una excelente correlación entre los datos de campo y laboratorio. En estos estudios

se encontró que los resultados de la prueba son sensibles a la calidad del agregado, rigidez del asfalto, duración del envejecimiento a corto plazo, procesos de refinamiento del asfalto, aditivos antidesprendimiento, cal hidratada y temperatura de compactación. Se concluyó que la temperatura de prueba de la rueda cargada de Hamburgo debe seleccionarse con base en la temperatura del sitio y se sugiere realizar el ensayo para un asfalto con un PG 70 a 55°C, PG 64 a 50°C, PG 58 a 45 °C y PG 52 a 40 °C.

Walubita et al. (2016) estudiaron el efecto del tiempo de maduración en muestras de mezcla asfáltica y la variación de la temperatura de prueba en la rueda cargada de Hamburgo. Cinco tipos de mezclas asfálticas usadas comúnmente en el estado de Texas se ensayaron a diferentes tiempos de maduración (1,3, 5, 7 y 14 días) y a tres temperaturas de prueba (50, 60 y 70 °C) siguiendo el procedimiento del Departamento de Transporte de Texas. Los hallazgos encontrados fueron que la resistencia a la deformación permanente de las mezclas mejora al incrementar el tiempo de maduración de la mezcla y que la deformación permanente se incrementa de manera importante con el incremento de la temperatura, por lo que proponen ensayar los especímenes compactados en el laboratorio después de 5 días de fabricados y realizar la prueba de la rueda cargada de Hamburgo a una temperatura más alta (>50 °C) o a diferentes temperaturas (50, 55 y 60°C), especialmente en mezclas que van a estar sujetas a temperaturas altas y esfuerzos cortantes altos.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los pavimentos asfálticos tienden a desarrollar diferentes patologías a través de su vida útil. Uno de los objetivos de los diseños de mezclas y las evaluaciones de laboratorio es el de intentar predecir la tendencia de un material hacia desarrollar esas patologías.

Una de dichas patologías es la deformación permanente en la mezcla asfáltica. Esta resulta de la acumulación de pequeñas deformaciones no recuperables por las cargas repetitivas aplicadas al pavimento. Se puede manifestar como ahuellamiento en las roderas, corrimientos u ondulaciones.

Se presenta en la vida temprana del pavimento asfáltico, usualmente dentro de los primeros dos años después de su construcción.

En nuestro país, la deformación permanente en la mezcla ha sido una patología recurrente en diferentes proyectos, la cual se ha buscado contrarrestar a través de mejorar los asfaltos. Se ha considerado como principal contribuyente de deformación permanente a las altas temperaturas ambiente de El Salvador, y a su efecto sobre los asfaltos que se utiliza localmente.

Siendo un país con limitados recursos, y siendo las inversiones en pavimentos de las más grandes que hace un país, es de suma importancia procurar que los pavimentos se desempeñen para el período que fueron diseñados. Una falla por deformación permanente es crítica y altamente problemática, pues se da en la edad temprana del pavimento, evitando que alcance su período de diseño, costos de operación más elevados, entre otros.

Es por este motivo que El Salvador y los países de la región centroamericana, necesitan contar con ensayos que predigan de mejor manera el desempeño de los materiales de construcción en el área vial. Entre ellos se encuentra la Rueda Cargada de Hamburgo, el cual es un ensayo que busca predecir mezclas propensas a la deformación permanente y susceptibilidad a la humedad. También es un indicativo de la adherencia entre el agregado y el ligante asfáltico.

Con este trabajo de grado se busca contribuir con la investigación del comportamiento de distintos tipos de ligantes asfálticos modificados y convencionales, con diferentes granulometrías y diferentes temperaturas; para poder obtener conclusiones sobre la influencia de estas variables en la deformación permanente de mezclas asfálticas; y dicha información pueda ser utilizada para futuras investigaciones y para las agencias que tienen en su gestión la construcción de carreteras, como herramienta para la selección del tipo de ligantes asfálticos en los distintos proyectos viales.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la correlación entre la rigidez del ligante asfáltico y la deformación permanente de la mezcla asfáltica en caliente, mediante los ensayos del MSCR y HWTD.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar la deformación permanente entre mezclas asfálticas modificadas y mezclas asfálticas convencionales.
- Evaluar el aporte del agregado pétreo a la deformación permanente.
- Evaluar los parámetros más utilizados por instituciones referentes para el ensayo de la Rueda de Hamburgo.
- Evaluar la influencia del asfalto modificado en la deformación permanente de mezclas asfálticas en caliente.

1.5 ALCANCES

El enfoque del presente trabajo de grado consiste en analizar mezclas asfálticas con asfalto convencional y con asfalto modificado con polímeros. Ambos tipos de mezclas asfálticas son utilizadas para carpetas asfálticas, o para bacheo. Su granulometría es densa-fina con tamaños máximos nominales (TNM) de $\frac{3}{4}$ " y $\frac{1}{2}$ ". En su gran mayoría, todo el agregado viene de la misma cantera. El asfalto analizado también es del uso corriente en proyectos públicos, ya sean asfaltos convencionales, cuya clasificación por viscosidad es AC-30, o asfaltos modificados, clasificados según AASHTO M332. La fuente de los asfaltos es más variada, pues provienen de diferentes compañías, sea convencional o modificado.

Las mezclas han sido diseñadas por el método Marshall. Las mezclas serán sometidas al ensayo Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Asphalt Mixtures (Ensayo Rueda Cargada de Hamburgo, AASHTO T 324) y el asfalto al MSCR (Múltiple Stress Creep and Recovery, AAHTO T350). De los ensayos realizados, se pretende buscar una correlación o correspondencia entre propiedades del ligante asfáltico y la deformación permanente en mezclas asfálticas.

1.6 JUSTIFICACIÓN

Muchos proyectos de mediana a gran envergadura en El Salvador han presentado deformación permanente, aun cuando han utilizado asfaltos modificados. En su momento la clasificación utilizada para medir la calidad de los asfaltos era la clasificación por viscosidad, la cual se basa en tratar de predecir el comportamiento a través de cambios de consistencia en el material. Es por esa razón que no se podía identificar un ligante asfáltico como adecuado o no, para un diseño de mezcla en específico y acorde a la cantidad de Esales y clima al que estaría expuesto.

En los últimos 3 años, el Fondo de Conservación Vial ha iniciado la migración hacia la clasificación por desempeño, la cual se basa en la medición de esfuerzos y deformaciones para predecir el comportamiento del asfalto. Estos ensayos son mejores predictores de las patologías del asfalto, y usan la norma AASHTO T350, conocido por MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery) para la predicción del ahuellamiento. Con ello, se cuenta con información clave con base a propiedades mecánicas del ligante para diseño de mezclas resistentes a la deformación.

Sin embargo, como es bien sabido, el agregado pétreo forma la parte fundamental para la resistencia a la deformación permanente de las mezclas asfálticas, por lo que el cumplimiento por grado de desempeño de un ligante asfáltico, no garantiza el buen desempeño de una mezcla asfáltica al momento de su puesta en servicio. Es necesario también, un adecuado agregado pétreo con una adecuada granulometría y no está demás decir un buen proceso constructivo al momento de su colocación.

Es por esos motivos, que es necesario también contar con ensayos por desempeño realizados a la mezcla asfáltica, para comprobar que el desempeño de la combinación granulométrica junto con el ligante asfáltico convencional o modificado, cumplen con las solicitudes requeridas.

Uno de los mejores ensayos para poder determinar la susceptibilidad a la deformación permanente y humedad de mezclas asfálticas, es el ensayo de la Rueda de Hamburgo. Ensayo que en el país se ha introducido a nivel investigativo. Parte del proceso investigativo, ha sido llevado a cabo para el desarrollo de la presente tesis, que tiene en uno de sus objetivos, brindar

información pertinente al comportamiento de distintas mezclas asfálticas a la deformación permanente a diferentes temperaturas.

Contamos entonces con dos nuevas formas de predecir la deformación permanente en la mezcla, las cuales se ha demostrado que tienen buena correlación con resultados en el campo. Dada esta situación y el gran impacto económico que significa un fallo de un proyecto por deformación permanente, es una oportunidad para verificar a través de los resultados del presente trabajo de grado, si los diseños de mezclas asfálticas que se están usando en la actualidad, presentan un buen comportamiento ante la deformación permanente y daños por humedad.

(Espacio en blanco dejado intencionalmente)

2.0 CAPÍTULO DOS: MARCO TEÓRICO

2.1 Generalidades de Mezclas Asfálticas

Los pavimentos asfálticos están compuestos, en términos generales, aproximadamente de 94.5% de agregado pétreo y 5.5% de ligante asfáltico. El ligante asfáltico es un material con un comportamiento particular, dado que es un material viscoelástico y de procedencia orgánica. Su participación en el concreto asfáltico le confiere al mismo las propiedades viscoelásticas que posee; Esto conlleva a la pregunta, ¿qué es la viscoelasticidad?

En la ciencia de materiales, la viscoelasticidad es la propiedad que exhiben ciertos materiales cuando presentan características tanto elásticas (sólidas) como viscosas (fluidas) al someterse a la deformación. El asfalto exhibe comportamiento elástico/sólido a bajas temperaturas, y comportamiento viscoso/fluido a altas temperaturas. Este comportamiento también se ve afectado por la tasa de carga o el tiempo que la carga es aplicada. Es decir, los efectos del tiempo y la temperatura están relacionados en la medición de las propiedades de flujo de un ligante asfáltico. Entonces, el flujo de un asfalto a alta temperatura y cargado por período corto de tiempo puede ser equivalente al flujo ocurrido a una temperatura menor y cargado por un período de tiempo mayor. Este es un concepto conocido como *Superposición Tiempo – Temperatura*, y se aplica cuando los materiales viscoelásticos tienen comportamiento lineal (ver figura 1).

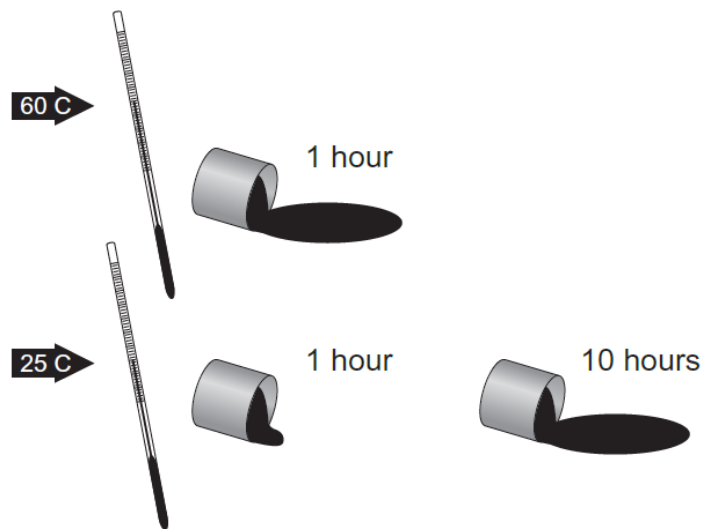


Figura 1. Superposición Tiempo – Temperatura
Fuente: MS-26, Asphalt Binder Handbook. Asphalt Institute

A temperaturas altas, los asfaltos actúan típicamente como fluidos Newtonianos o con comportamiento no Newtoniano cuando se cambia la tasa de corte. Los fluidos Newtonianos tienen una relación lineal entre resistir fuerza (esfuerzo cortante) y la velocidad relativa (tasa de deformación cortante). Dicho de otra forma, si se aplica dos veces la fuerza a un fluido Newtoniano, se moverá dos veces más rápido. El aire, agua y asfalto caliente (a temperaturas mayores de 60°C) son fluidos newtonianos comunes.

Por otro lado, los agregados pétreos componen entre el 80% - 90% del volumen total o el 94% - 95% de la masa total de la mezcla asfáltica en caliente.

En ingeniería de carreteras el rol de los agregados es identificado como el esqueleto de la mezcla. Los agregados gruesos y finos son la base de cualquier capa en el pavimento, aglutinada o no, y son los responsables principales de la capacidad de soporte ante las cargas de este. De hecho, la mayor parte de la fuerza compresiva y de la resistencia al movimiento bajo cargas de “camiones” viene del agregado. Las propiedades del esqueleto están directamente relacionadas a la dureza, forma, textura y gradación del agregado.

Las características físicas que afectan la disipación de la carga y la trabazón a menudo diferencian los agregados de "buena calidad" de los de "mala calidad". El Reporte 405 de la NCHRP (Aggregate Tests Related to Asphalt Concrete Performance in Pavements (Kandhal and Parker 1998)), identificó varias propiedades de los agregados que afectan el desempeño de las mezclas asfálticas. Estas propiedades son: (1) gradación y tamaño; (2) forma de la partícula, angularidad y textura superficial; (3) porosidad y absorción; (4) limpieza y materiales deletéreos; (5) dureza y abrasión; (6) durabilidad y sanidad; (7) características expansivas; (8) resistencia al pulimiento y características friccionales; (9) mineralogía y petrografía; y (10) propiedades químicas.

En El Salvador, la mayoría de los diseños de mezclas asfálticas poseen granulometrías revisadas por la metodología Bailey, la cual considera las características del empaquetamiento de los agregados. Los parámetros en dicho método están relacionados directamente con los vacíos en el agregado Mineral (VMA), vacíos de aire y las propiedades de compactación. Cabe aclarar que el método Bailey no es una guía de diseño de mezclas asfálticas, ya que no trata las propiedades de los agregados o de las propiedades que debe tener la mezcla asfáltica, para garantizar su buena calidad.

Si bien, en El Salvador la mayoría de los diseños de mezclas asfálticas van revisadas por la metodología Bailey, hasta la fecha no se registra su cumplimiento, como parte de requerimiento de pago. Sin embargo, su implementación sin lugar a duda ha contribuido en los últimos años a que los diseños utilizados de mezclas asfálticas presenten un mejor desempeño ante la deformación permanente.

2.2 Método Bailey

El Método Bailey es una herramienta para poder configurar la granulometría combinada de agregados que componen una MAC (de aquí en adelante, Mezcla Asfáltica en Caliente). Dicha configuración busca un empaquetamiento que genere una trabazón de agregados adecuada para evitar fallas por ahuellamiento en su puesta en servicio y al mismo tiempo manteniendo las propiedades volumétricas que proveen la resistencia a la degradación medioambiental. Los parámetros en el método están relacionados directamente a los vacíos en el agregado mineral (VMA), vacíos de aire y las propiedades de compactación.

En el método Bailey la trabazón o empaquetamiento de los agregados combinados (fracción gruesa, fracción intermedia y fracción fina), son datos de entrada para un diseño de MAC; es decir que antes de proceder a la elaboración de briquetas de prueba con distintos porcentajes de asfalto, se debe revisar el empaquetamiento de la granulometría seleccionada como de diseño, por el método Bailey.

El Método Bailey usa dos principios que son la base de la relación entre la granulometría de los agregados y la volumetría de la mezcla:

- El Empaquetamiento de los agregados
- Definición de agregados grueso y fino

Con estos principios, los pasos principales en el método Bailey son:

- Combinar los agregados por volumen
- Analizar la combinación mezclada

2.2.1 Empaquetamiento del agregado:

Las partículas de un agregado no pueden ser empaquetadas para llenar completamente un volumen. Siempre habrá espacio entre las partículas de los agregados. El grado de empaquetamiento depende de:

- El tipo y cantidad de energía de compactación. Varios tipos de fuerzas de compactación pueden utilizarse, incluyendo presión estática, impacto (por ejemplo, el martillo Marshall), o cizallamiento (por ejemplo, el compactador giratorio o compactador de California). Se puede lograr una mayor densidad al incrementar el esfuerzo de compactación (es decir, mayor presión estática, más golpes del martillo o más giros). Para el caso de El Salvador, al ser todos los diseños de MAC, elaborados por la metodología Marshall, el martillo utilizado es el de impacto.



Figura 2. Martillo compactador de impacto Marshall.

Fuente: Imagen tomada en Laboratorio CATECOLAB



Figura 3. Compactador giratorio (cizallamiento), metodología superpave.

Fuente: www.matest.com

- Forma de las partículas. Partículas planas y alargadas tienden a resistir el empaquetamiento de configuración densa. Las partículas cúbicas tienden a arreglar en configuraciones densas. Por normativa, en El Salvador los agregados pétreos que conforman una mezcla asfáltica, deben ser producto de la trituración de rocas, por lo cual las mezclas cumplen con la cubicidad deseada.



Figura 4,5 y 6. Fracciones Gruesa, intermedia y fina de agregados pétreos, provenientes de planta trituradora.

Fuente: Fotos tomadas en acopio de Planta Asfáltica CATECO, S.A. DE C.V.

- La textura superficial de las partículas. Partículas con texturas lisas se reorientarán más fácilmente a configuraciones más densas. Partículas con superficies rugosas resistirán el deslizamiento entre ellas. Una textura rugosa satisfactoria es lograda cuando los agregados se obtienen producto de una trituración.
- Distribución del tamaño (granulometría) de las partículas. Partículas de un solo tamaño no se empaquetarán tan densamente como una mezcla de diferentes tamaños de partículas. En el caso de las MAC en El Salvador, instituciones como el Fondo de Conservación Vial (FOVIAL), exigen que el agregado cumpla con designaciones granulométricas según el tamaño máximo nominal seleccionado; con esto se logra obtener granulometrías bien graduadas.

Tamaño de Tamiz	Designación de la Mezcla Usando el Tamaño Máximo Nominal de Agregado (% que pasa)				Tolerancias a la fórmula de trabajo.
	25.0mm (1")	19.0 mm (3/4")	12.5mm (1/2")	9.5 mm (3/8")	
50mm (2")	---	---	---	---	---
37.5mm (1 1/2")	100	---	---	---	±6%
25.0 mm (1.0")	90-100	100	---	---	±6%
19.0mm(3/4")	---	90-100	100	---	±6%
12.5m (1/2")	56-80	---	90-100	100	±6%
9.5mm (3/8")	---	56-80	---	90-100	±5%
4.75mm(No.4)	29-59	35-65	44-74	55-85	±5%
2.36mm(No. 8)	19-45	23-49	25-58	32-67	±4%
0.300mm(No.50)	5-17	5-19	5-21	7-23	±4%
0.075mm(No.200)	1-7	2-8	2-10	2-10	±2%
Cemento Asfáltico (% del peso total de la mezcla)	3-9	4-10	4-11	5-12	±0.3%
Espesor mínimo de carpeta	7.5 cm	5.0 cm	3.0 cm	3.0 cm	---
Razón de filler / asfalto efectivo	0.6 a 1.6				

Tabla 1. Designaciones de bandas granulométricas según Tamaño Máximo Nominal Seleccionado

Fuente: Condiciones técnicas, FOVIAL año 2023.

- Dureza de las partículas. La dureza de las partículas del agregado afecta directamente la cantidad de degradación que ocurren en un compactador o bajo los rodos. Agregados más suaves típicamente se degradan más que agregados duros y permiten que se logre un empaquetamiento más denso. La mayoría de las mezclas asfálticas

que se producen en El Salvador, utilizan rocas del tipo basálticas, las cuales poseen resistencias al desgaste mediante la máquina de los ángeles, por debajo del 25%; lo cual se considera satisfactorio para agregados que se utilizan en pavimentos.

Según el método, se establece que las propiedades listadas arriba son una herramienta para caracterizar agregados gruesos y finos. Es bien sabido que no basta una buena granulometría para considerar una fuente de agregados como buena. Además, debe evaluarse su buen desempeño en combinación con las otras fuentes de agregados seleccionadas.

No está dentro del alcance de este trabajo el analizar el impacto del Método Bailey, por lo que no ahondaremos en él. Si desea conocer más sobre el método, le sugerimos leer la Circular E-C044: Bailey Method for Gradation Selection in Hot-Mix Asphalt Mixture Design publicada por el TRB (Transportation Research Board).

2.3 Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR, AASHTO T350)

El ensayo del MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery) o Ensayo de Esfuerzos Múltiples a Fluencia y Recuperación, es una mejora al sistema de clasificación por desempeño SUPERPAVE (Superior Performing Pavement). Provee al usuario con una especificación para la temperatura alta que indica con mayor certeza el desempeño frente al ahuellamiento del ligante asfáltico.

Previo a su introducción, era todavía necesario utilizar algunos ensayos empíricos (recuperación elástica por ductilómetro, tenacidad, fuerza de la ductilidad, etc) para identificar la presencia de polímero en el asfalto. Un ensayo de MSCR puede proveer información de desempeño y sobre la formulación del ligante asfáltico (Fuente: MSCR Techbrief de la FHWA).

Es necesario comprender que la especificación inicial propuesta por SUPERPAVE se hizo con base a investigación realizada con asfaltos convencionales, no con asfaltos modificados. Luego de su implementación, se hizo evidente que el parámetro utilizado para la predicción de la deformación permanente, $G^*/\text{sen } \delta$ luego de su envejecimiento a corto plazo, no estaba prediciendo certeramente la patología.

Se ideó el “grade-bumping” o la elevación de los grados de desempeño, con base a la observación que cuando existía mayores cantidades de tráfico o carga, el pavimento siempre

sufría deformación permanente. Se decidió entonces que necesitaba mayor rigidez para soportar cargas mayores, y con relación a la cantidad de ESAL's se elevaba uno o dos grados PG.

Table 1—Binder Selection on the Basis of Traffic Speed and Traffic Level

Design ESALs ^b (Million)	Adjustment to the High-Temperature Grade of the Binder ^a		
	Traffic Load Rate		
	Standard ^c	Slow ^d	Standing ^e
<0.3	—	—	— ^f
0.3 to <3	—	1	2
3 to <10	—	1	2
10 to <30	—	1	2
≥30	1	1	2

^a Increase the high-temperature grade by the number of grade equivalents indicated (one grade is equivalent to 6°C). Use the low-temperature grade as determined in Section 5.

^b The anticipated project traffic level expected on the design lane over a 20-year period. Regardless of the actual design life of the roadway, determine the design ESALs for 20 years.

^c Standard traffic—where the average traffic speed is greater than 70 km/h.

^d Slow traffic—where the average traffic speed ranges from 20 to 70 km/h.

^e Standing traffic—where the average traffic speed is less than 20 km/h.

^f Consideration should be given to increasing the high-temperature grade by one grade equivalent.

Tabla 2. Recomendaciones para el Grade-Bumping

Fuente: AASHTO M323.

No obstante, aún con esta rigidización adicional los pavimentos seguían mostrando deformación permanente. Dado todo esto, se comisionó un estudio que revisara el comportamiento reológico de los ligantes modificados (NCHRP 459).

Para el caso de la deformación permanente, decidieron utilizar el protocolo reológico del “creep and recovery”, o fluencia y recuperación. Es el concepto de aplicar una carga a un material, luego descargarlo y observar cuánto se recupera.

Se carga por 1 segundo y a un esfuerzo bajo (0.1 kPa) y se deja que se recupere por 9 segundos. Este proceso se considera un ciclo. Esto se repite 20 veces en este esfuerzo bajo, de los cuales los primeros 10 ciclos son de acondicionamiento, por lo que las mediciones empiezan a registrarse a partir del ciclo 11. Luego se incrementa el esfuerzo a 3.2 kPa y se repite el ciclo de cargar de 1 segundo y descargar 9 segundos por 10 ciclos.

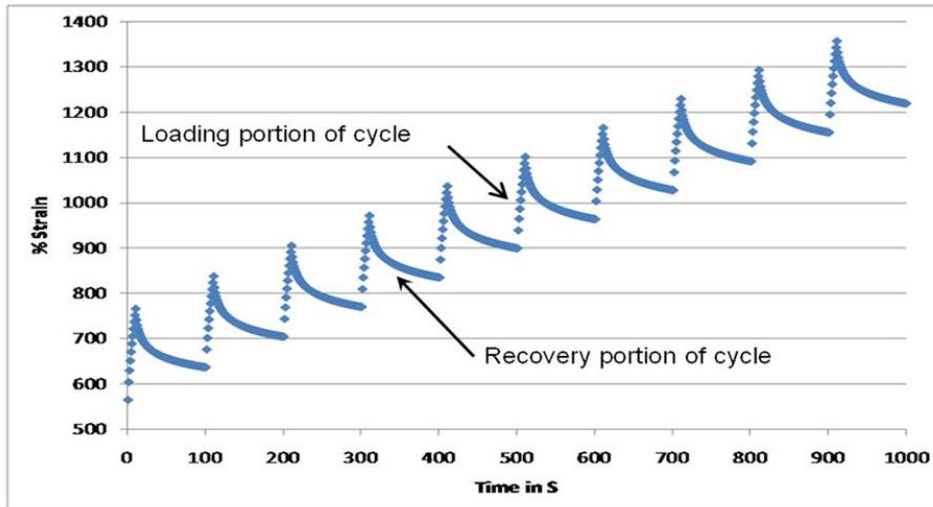


Figura 7. Ciclos de carga (1 seg) y descarga (9 seg) en ensayos MSCR
Fuente: Techbrief

Se hicieron varios estudios a escala, siendo uno en el HVS (Heavy Vehicle Simulator) en las instalaciones de la FHWA (Federal Highway Agency) en Turner-Fairbanks para validar el uso de este ensayo. Se compararon los dos parámetros de medición de cada ensayo: $G^*/\text{sen}\delta$ y J_{nr} .

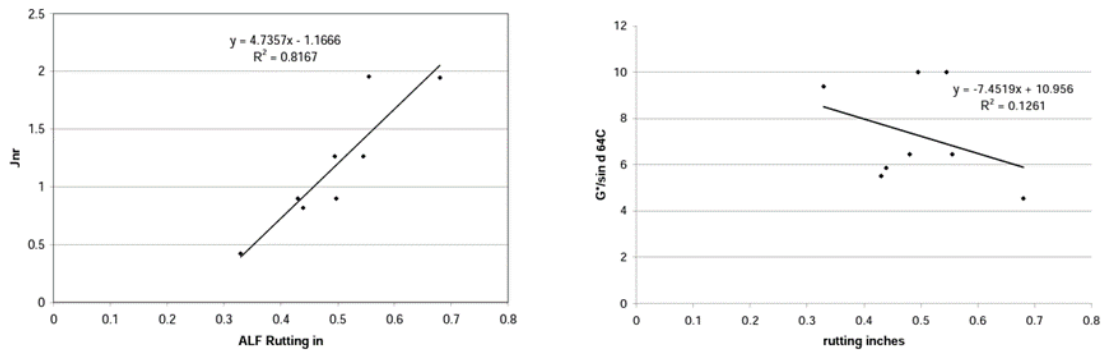


Figura 8. Comparación de resultados de parámetros en ensayo PG D/RTFO y MSCR
Fuente: Techbrief

Los resultados de este estudio mostraron el $G^*/\text{sen}\delta$ tenía una correlación muy baja con el desempeño real, y que, por el contrario, el J_{nr} mostraba una correlación muy buena. Esta correlación se confirmó secciones de prueba hechas en la carretera I-55 de Mississippi. Las secciones se monitorearon por 6 años, y nuevamente el parámetro J_{nr} demostró buena correlación con la predicción del ahuellamiento.

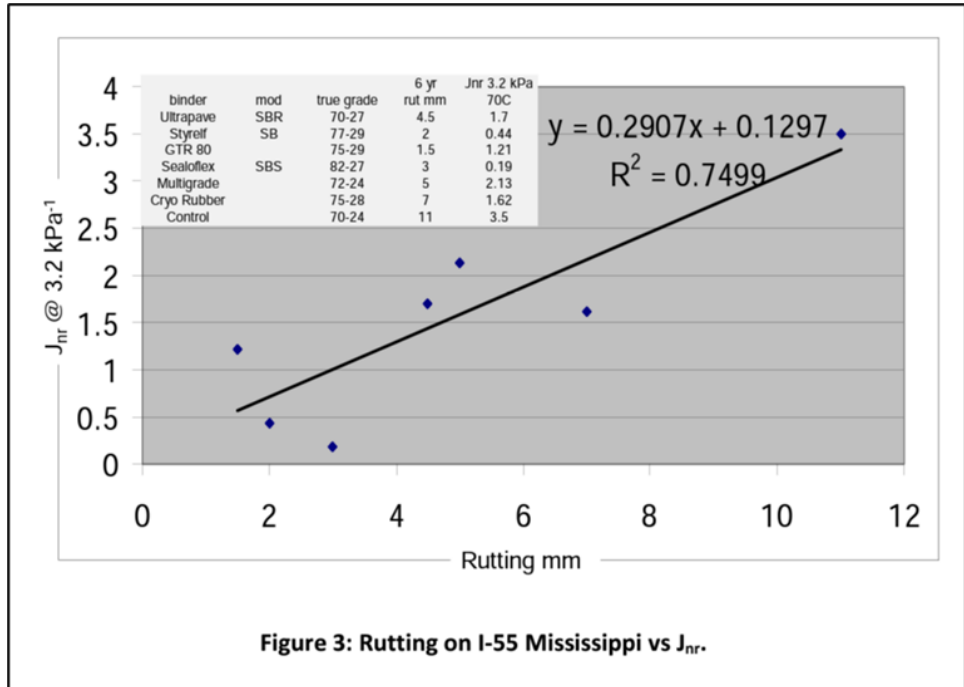


Figura 9. Resultados de deformación permanente en secciones de prueba de Mississippi
Fuente: Techbrief

2.3.1 ¿Cómo funciona el MSCR?

En un Reómetro de Corte Dinámico (DSR, Dynamic Shear Rheometer), se coloca una “pastilla” de asfalto envejecido en RTFO (Rolling Thin Film Oven), usando la geometría de platos paralelos de 25 mm. Se ensaya a la temperatura alta PG solicitada del proyecto.

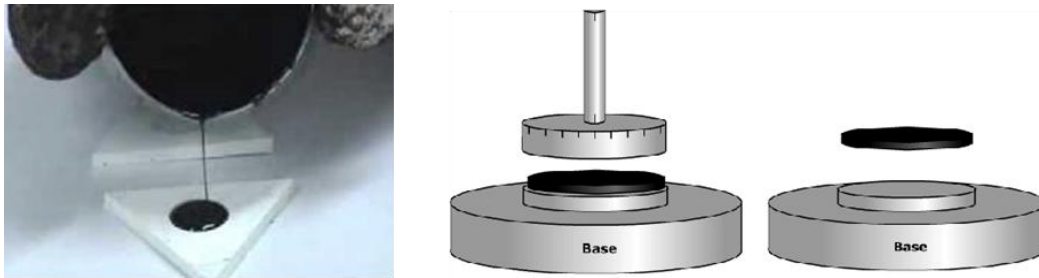


Figura 10. Muestras de prueba de ensayo MSCR

Fuente: <https://www.semanticscholar.org/paper/Evaluation-of-Dynamic-Shear-Rheometer-Test-and-of-Tanzadeh-Shafabakhsh/5f9b21720349a4099caa908e6b2c05abb3f4e627>

Luego del acondicionamiento térmico, el software del DSR procede a correr la rutina de ciclos carga-descarga primero a 0.1kPa (20) y luego a 3.2 kPa (10). Cada ciclo mide: Recuperación elástica (RE), Deformación No Recuperable (Jnr) y la diferencia entre ellas (RE_{diff} ; Jnr_{diff}) para cada uno de los dos esfuerzos.

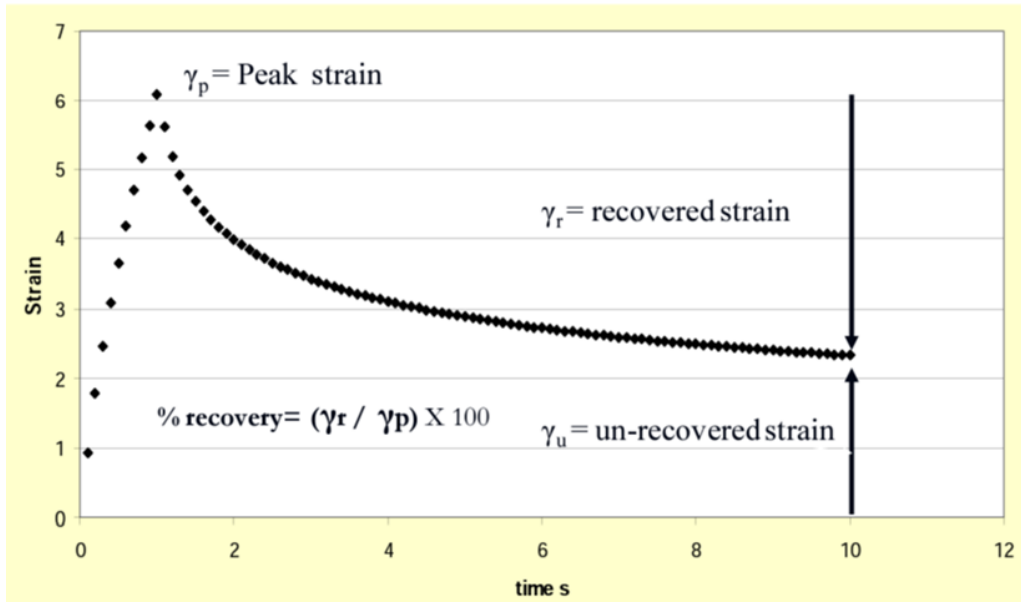


Figura 11. Gráfica de tiempo vrs esfuerzo aplicado a la muestra de asfalto, en el que se evalúa su recuperación elástica
Fuente: TechBrief

El Jnr es el parámetro que predice el ahuellamiento, y la recuperación elástica es el parámetro que identifica la presencia de polímero en el ligante.

Durante el ciclo, la pastilla de asfalto es cargada por 1 segundo, llegando a una deformación pico, y luego se descarga por 9 segundos y se mide tanto cuanto se recupera como cuánto se deforma. El ensayo nos proporciona la siguiente información:

- **Porcentaje de Recuperación Elástica, RE:** es una medida de cuánto regresa la muestra a su forma previa luego de ser estirado y relajado repetidamente
- **Deformación No Recuperable, Jnr:** Una medida de la cantidad de deformación residual que queda en el espécimen después de someterlo repetidamente a fluencia y recuperación, relativo a la cantidad de esfuerzo aplicado.
- **Diferencia Porcentual de la Deformación No Recuperable, Jnr_{diff}:** Para los asfaltos modificados, la respuesta a la deformación no es lineal y es sensible al nivel

del esfuerzo del ensayo. Las cadenas poliméricas se pueden reacomodar sustancialmente al incrementarse los esfuerzos. Este parámetro es un chequeo sobre ese fenómeno.

El MSCR incorporó la influencia de la carga y la velocidad de marcha limitando la Deformación No Recuperable, Jnr, y la Recuperación Elástica. Generaron 4 niveles de tráfico:

NIVEL	TRÁNSITO	VELOCIDAD	Jnr _{3.2} (kpa-1)
Estandar (S)	<10Mill ESAL	y >70 km/h	≤4.0
Alto (H)	10 -30 Mill ESAL	ó 20 - 70 km/h	≤2.0
Muy alto (V)	>30Mill ESAL	ó <20 km/h	≤1.0
Extremo (E)	>30Mill ESAL	y <20 km/h	≤0.5

Tabla 3. Tabla de clasificación de asfaltos por desempeño por medio del ensayo MSCR
Fuente: AASHTO M332.

Como se explicó anteriormente, el MSCR también mide recuperación elástica, la cual es importante para resistir la deformación permanente. Sin embargo, solo manejar el parámetro de deformación No Recuperable, puede prestarse a solo rigidizar el ligante, lo cual ayuda con la deformación permanente, pero no garantiza un buen comportamiento con la fatiga. Es por esto, que existen umbrales mínimos para la recuperación elástica.

Inicialmente, el Instituto del Asfalto emitió una recomendación con mínimos de recuperación elástica con base a el Jnr. Esta recomendación no era parte de la especificación AASHTO en su momento, pero en 2018 se generó la práctica AASHTO R92 “Evaluando el Comportamiento Elástico de Ligantes Asfálticos Usando la prueba MSCR”.

Según lo expuesto en el alcance de la norma misma, “esta práctica provee una forma de evaluar el comportamiento elástico de un ligante asfáltico utilizando los resultados de una prueba de MSCR”. Se usan los resultados de recuperación elástica y Jnr a 3.2 kPa y se grafican en una curva de R en función del Jnr.

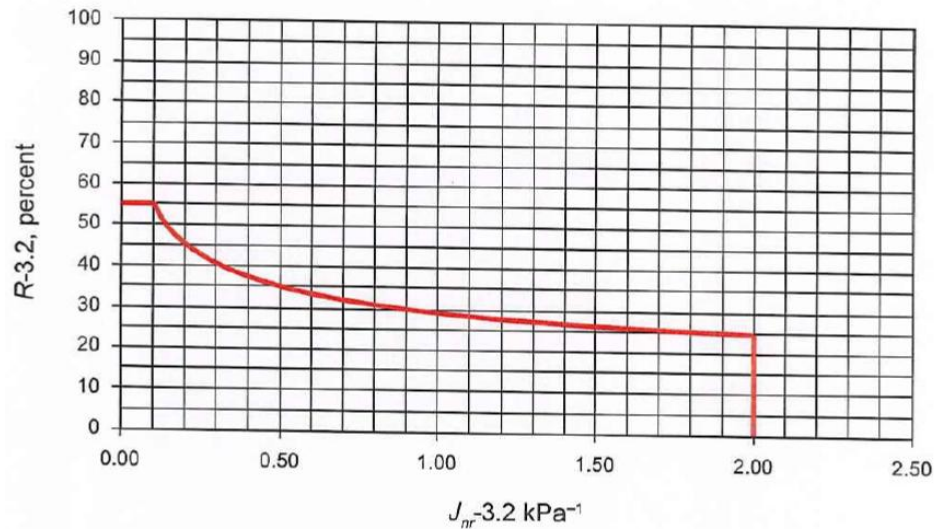


Figura 12. Gráfica de cumplimiento de recuperación elástica para asfaltos modificados
Fuente: AASHTO R92

Se considera que un asfalto con valor sobre o encima de la curva tiene una buena respuesta elástica, lo cual indica la presencia de un polímero elastomérico.

2.4 Método de Ensayo Estándar de la Rueda de Hamburgo para Mezclas Asfálticas Compactadas (AASHTO T324)

De acuerdo con el inciso 1.3 de la norma AASHTO T324, “El método de ensayo se usa para determinar la susceptibilidad a la falla prematura de la mezcla asfáltica a causa de debilidad en la estructura del agregado, rigidez inadecuada del ligante o por daño por humedad. Este método de prueba mide la profundidad de la huella y el número de pasadas hasta la falla.”

El resumen del método lo explica de esta manera: “Una muestra de mezcla asfáltica compactada en laboratorio, una muestra cortada con sierra de una plancha o un núcleo tomado de un pavimento compactado; el cual se carga repetidamente usando una rueda de acero recíproca. La muestra se sumerge en un baño de agua a temperatura controlada a una temperatura especificada por lo indicado en términos de referencia. Se mide la deformación de la muestra, causada por la carga de la rueda.”

El aparato fue desarrollado en los 1970's por Esso A.G. de Hamburgo, Alemania. Originalmente, el ensayo de Hamburgo fue utilizado por la ciudad de Hamburgo para medir la susceptibilidad al ahuellamiento. Era realizado por 9,540 pasadas de la rueda ya sea a 40°C

o 50°C. Se utilizaba agua en vez del aire para obtener la temperatura de ensayo requerida. Posteriormente en la ciudad de Hamburgo se incrementó el número de pasadas de la rueda a 19,200 y encontraron que algunas mezclas se empezaban a deteriorar debido al daño por la humedad. Generalmente, se necesitaban más de 10,000 pasadas para mostrar los efectos del daño por humedad (Fuente: <https://www.cooper.co.uk/shop/asphalt-testing/wheel-tracking/hamburg-immersion-wheel-tracker/>)

Los especímenes se compactan en compactador giratorio (4 especímenes, 2 por huella), a un contenido de vacíos del $7.0\% \pm 0.5\%$.

El compactador giratorio lleva a cabo la compactación a través del amasado. Cuenta con una tabla giratoria, haciendo que un pistón a presión “amase” la mezcla, efectivamente compactándola. Este tipo de compactación es mucho más real y representativa que la compactación de campo.

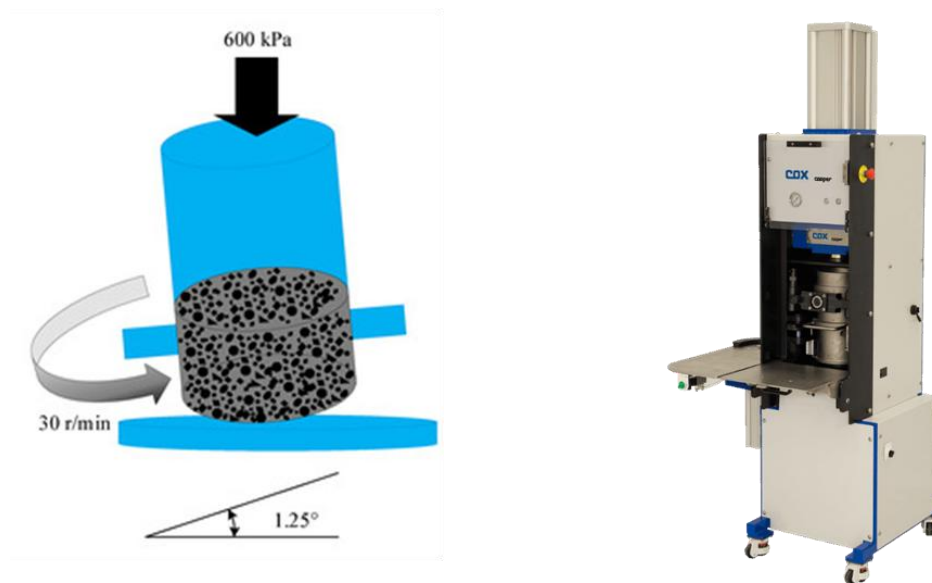


Figura 13. Compactador Giratorio de Mezclas Asfálticas

Este tipo de compactador es controlado por software, y ayuda a llevar a cabo la compactación con menos error humano.

Se introduce la Gravedad Teórica Máxima en el software, y se compacta una cantidad “x” de giros hasta llegar a la cantidad de vacíos deseada.

Es también muy conveniente, pues se puede programar para un espesor específico, que para este caso es muy importante pues el espécimen debe de tener una altura de entre 59 – 61 mm

Se necesitan 4 especímenes por ensayo, cortando una cara de cada uno de ellos para luego colocarlos “cara a cara” en ese corte, y que sobre ellos pase la huella de la rueda de la máquina. Se montan de la manera mostrada en la Figura 14.

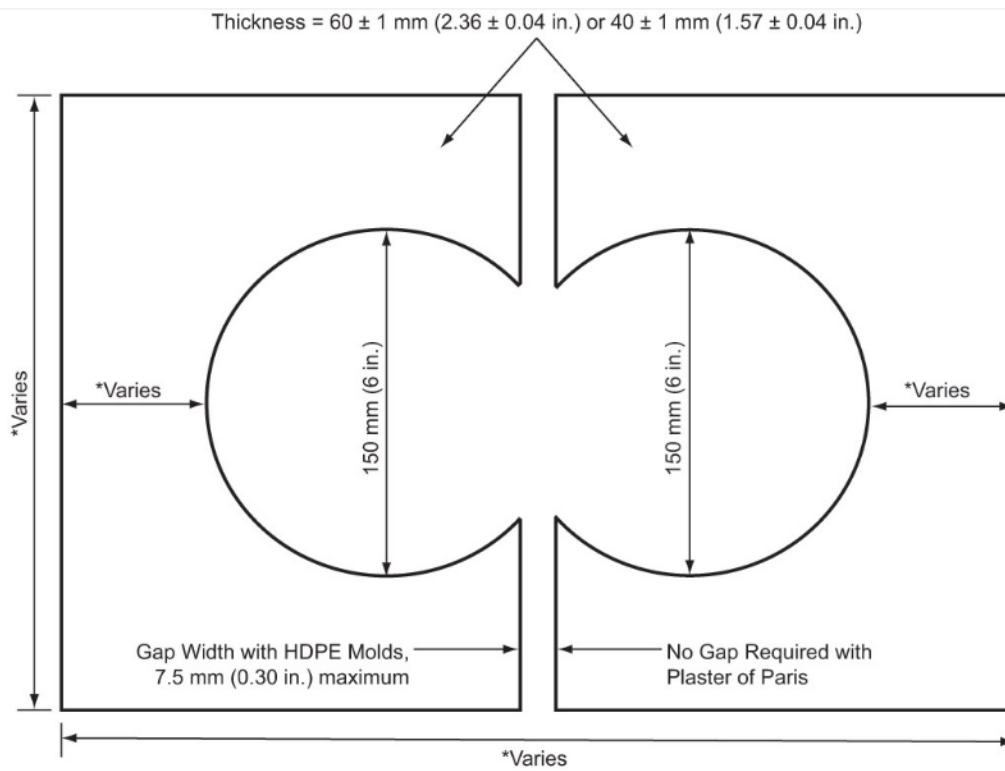


Figura 14. Esquema de montaje de especímenes para 1 huella en el equipo: Rueda de Hamburgo.

Fuente: AASHTO T324



Figura 15. Proceso de corte de especímenes para posterior montaje en equipo de Rueda de Hamburgo
Fuente: Asfalca, S.A. DE C.V.



Figura 16. Dos especímenes, luego de ser cortados, montados en moldes de teflón y colocados dentro de la armazón de ensayo.
Fuente: Asfalca, S.A. DE C.V.

El equipo en sí consta de una “tina” la cual se llena con agua, y en la cual se sumergen los especímenes ya montados en los moldes. Esta agua se acondiciona a la temperatura de ensayo requerida y tiene un control de temperatura con una precisión de $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ y un sistema de recirculación para mantener la temperatura estable en el tanque.

Cuenta con dos “brazos”, cada uno con una rueda metálica, que aplica una carga de $703 \pm 4.5 \text{ N}$ ($158.0 \pm 1.0 \text{ lb}$). Estas ruedas “reciprocán” sobre los especímenes, es decir, “van y vienen”, haciendo 52 ± 2 pasadas por minuto. La velocidad máxima de la rueda, la cual se alcanza en el punto medio del espécimen, es $0.305 \pm 0.02 \text{ m/s}$.

Se mide la profundidad de la huella a través de un transductor de desplazamiento lineal (LDT) capaz de medir la profundidad de la impresión de la rueda hasta un valor de 0.15 mm , desde un rango de 0 hasta 20 mm de profundidad.

El sistema debe de medir la profundidad de la huella como mínimo en las siguientes ubicaciones: -114, -91, -69, -46, -23, 0, 23, 46, 69, 91 y 114 mm, siendo el cero el punto medio de la huella.

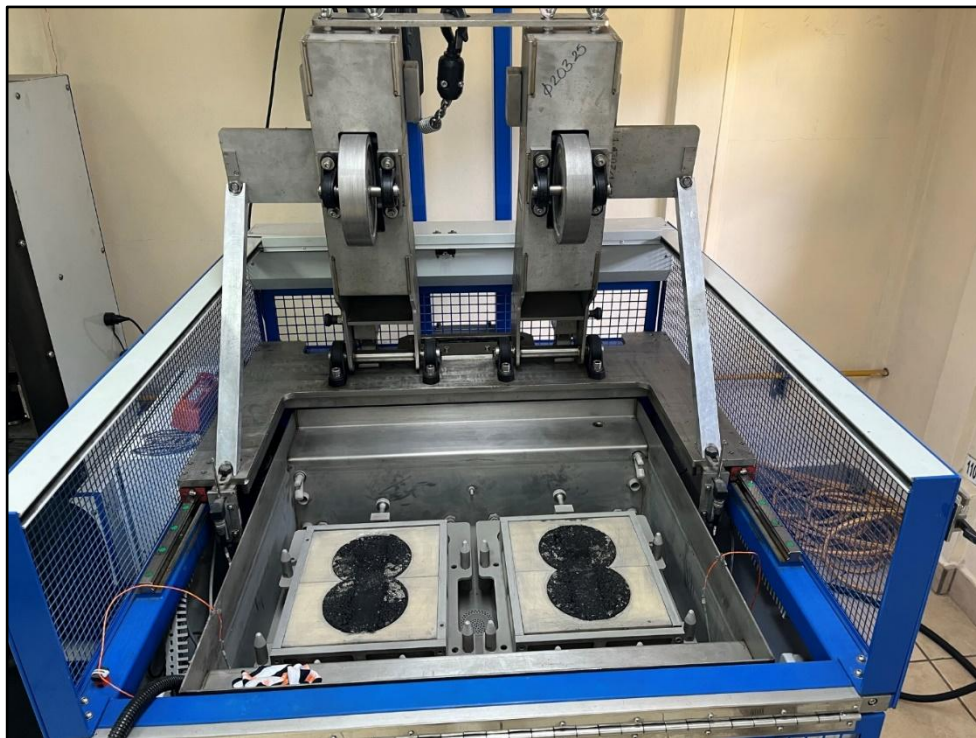


Figura 17. Equipo de la Rueda de Hamburgo
Fuente: Asfalca, S.A. DE C.V.

El equipo es controlado en una computadora por software, provisto usualmente por el fabricante del equipo. Una vez se han preparado los especímenes y se han colocado en el equipo, se debe de introducir información al software: Identificación de la muestra, altura de los especímenes, cantidad de pasadas, temperatura del agua, huella máxima, entre otros.

Luego de ejecutar el ensayo, las salidas son:

- Huella obtenida (profundidad en mm)
- Pendiente de deformación
- Punto de inflexión (si aplica)
- Pendiente de desnudamiento (si aplica)

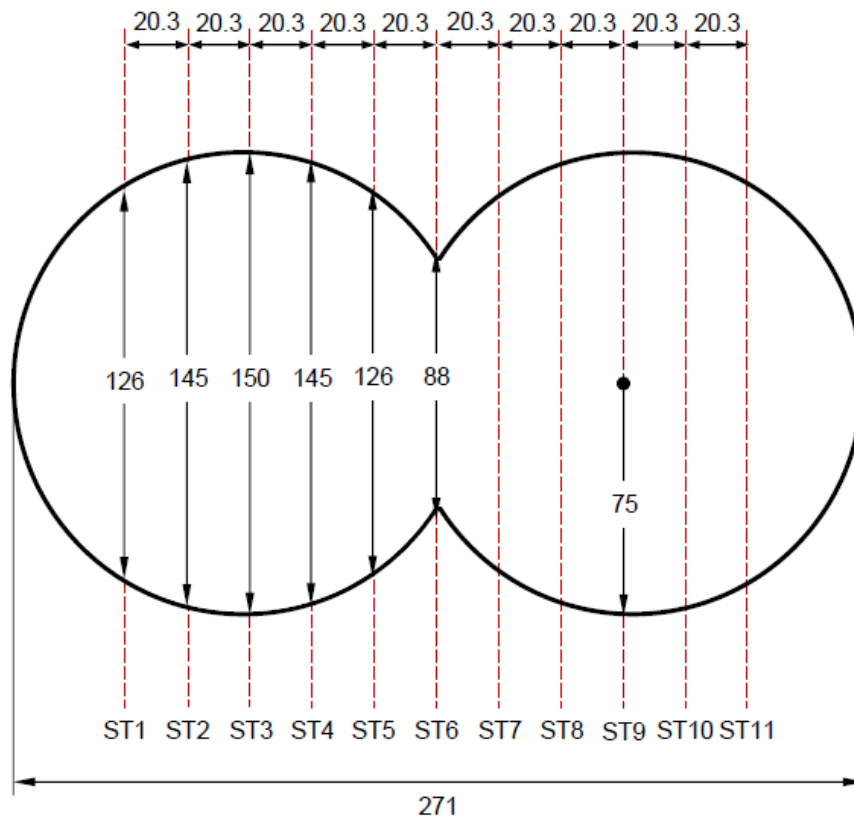


Figura 18. Esquema de puntos mínimos de medición de la huella
Fuente: Evaluation of AASHTO T324. Hamburg-Wheel Track Device Test

En la figura 18 vemos un esquema que muestra una gráfica de resultados de un ensayo de Rueda de Hamburgo. La pendiente de deformación (rutting slope) muestra la tasa a la cual se deforma el espécimen debido a la consolidación y al flujo plástico. Mientras menor sea la pendiente, más lenta es la deformación del espécimen y menos profunda la huella.

Si el espécimen muestra daño por humedad, se dará un cambio de pendiente en la gráfica, el llamado Punto de Inflexión de Desnudamiento (Stripping Inflexion Point). Este se reporta como la cantidad de pasadas de la rueda ejecutadas en el momento en el que se da la inflexión.

Seguido al punto de inflexión, se da una nueva pendiente llamada Pendiente de Desnudamiento (Stripping Slope). Cuando se da este caso, la deformación del espécimen es debido a la falta de adhesión del asfalto con el agregado.

FIGURE 10.5 Typical Submerged HWT Results

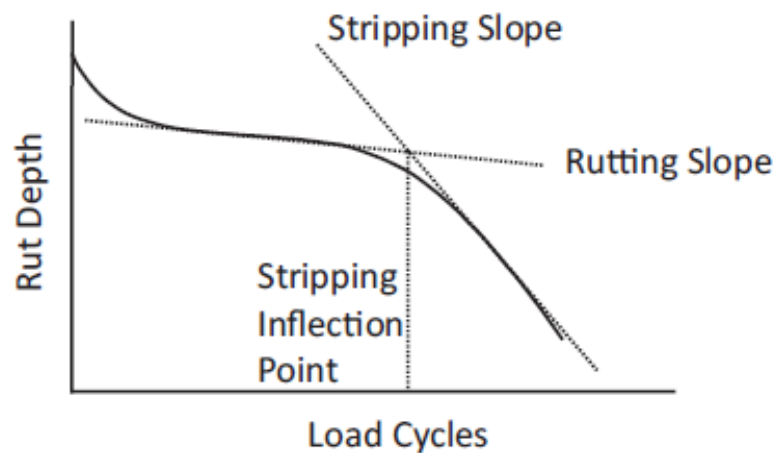


Figura 19. Esquema de Gráfica de Resultados de Ensayo de Rueda de Hamburgo
Fuente: MS-2, Asphalt Mix Design Methods, 7a Edición

Entender estas diferencias es importante, pues si bien en ambos casos se da un daño por deformación permanente, el mecanismo de falla detrás de la deformación es diferente; por lo que solventar el problema requerirá acciones diferentes.

3.0 CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

3.1. Resultados de Ensayo Rueda de Hamburgo de Asfaltos Convencionales y Modificados

3.1.1 Muestras de mezclas asfálticas año 2020 y 2021 con asfalto convencional AC30

Los parámetros de entrada para el ensayo deben desarrollarse de acuerdo con las necesidades de la agencia. Para desarrollar estos parámetros, se eligió en un inicio trabajar con los parámetros que tácitamente se consideran como el estándar:

- Temperatura de ensayo: 50°C
- Cantidad de pasadas: 20,000
- Huella máxima: 12.5 mm

Dichos parámetros se usaron durante los años 2020 y 2021. En este período de tiempo se ensayaron 36 muestras de mezclas convencionales (usando AC30 como ligante) y 27 muestras de mezclas modificadas (usando diversos grados de asfalto modificado).

Para el análisis de datos, se hicieron las siguientes subdivisiones:

- Mezclas convencionales: se separaron por tamaño máximo nominal (TNM) en ¾" y ½".
- Mezclas modificadas: se separaron por grado de asfalto modificado.

Se hicieron 3 gráficos por subdivisión:

- Deformación en milímetros (mm) al llegar a 20,000 pasadas
- Pendiente de deformación a 20,000 pasadas
- Deformación versus Pendiente de Deformación

A continuación, se presentan los resultados:

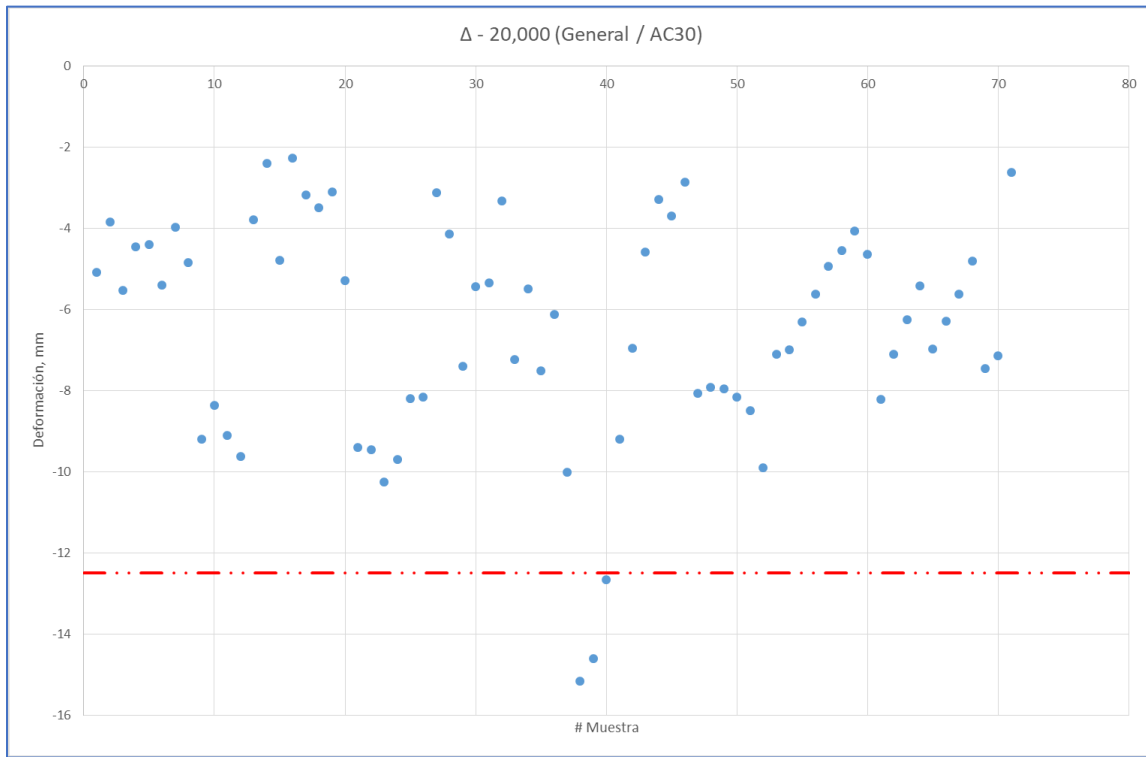


Figura 20. Deformación de mezclas convencionales (50°C, 20,000 pasadas)

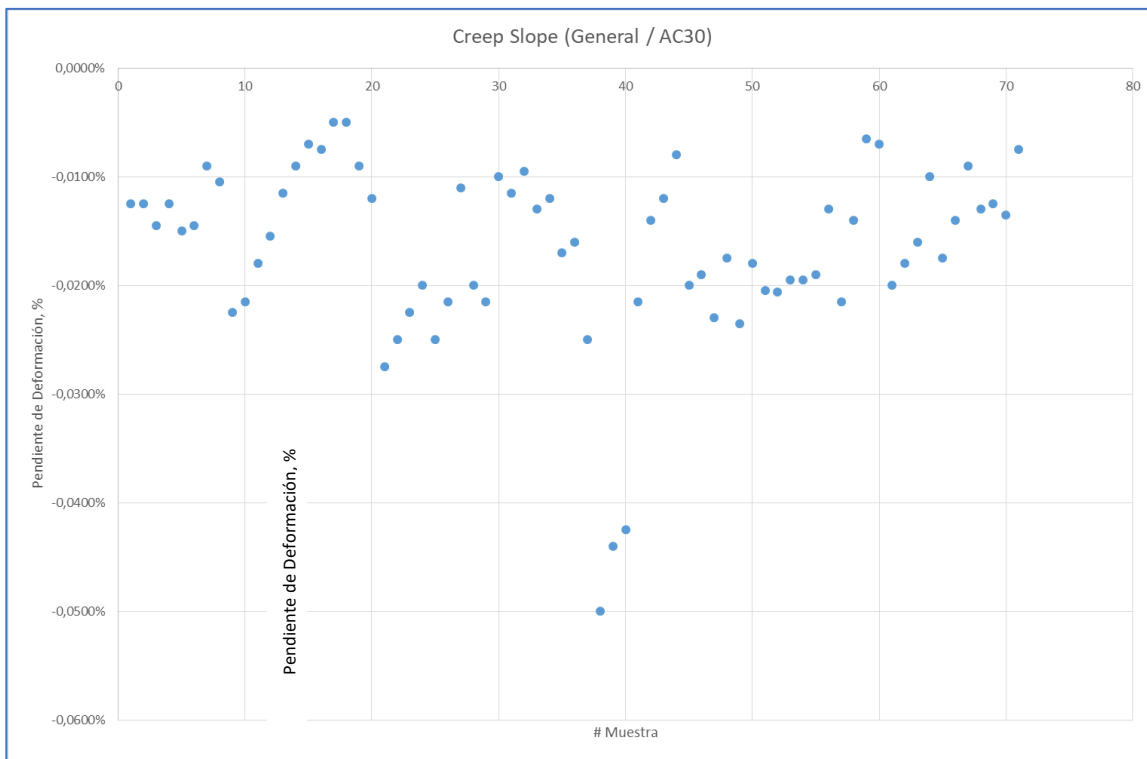


Figura 21. Deformación de mezclas convencionales (50°C, 20,000 pasadas)

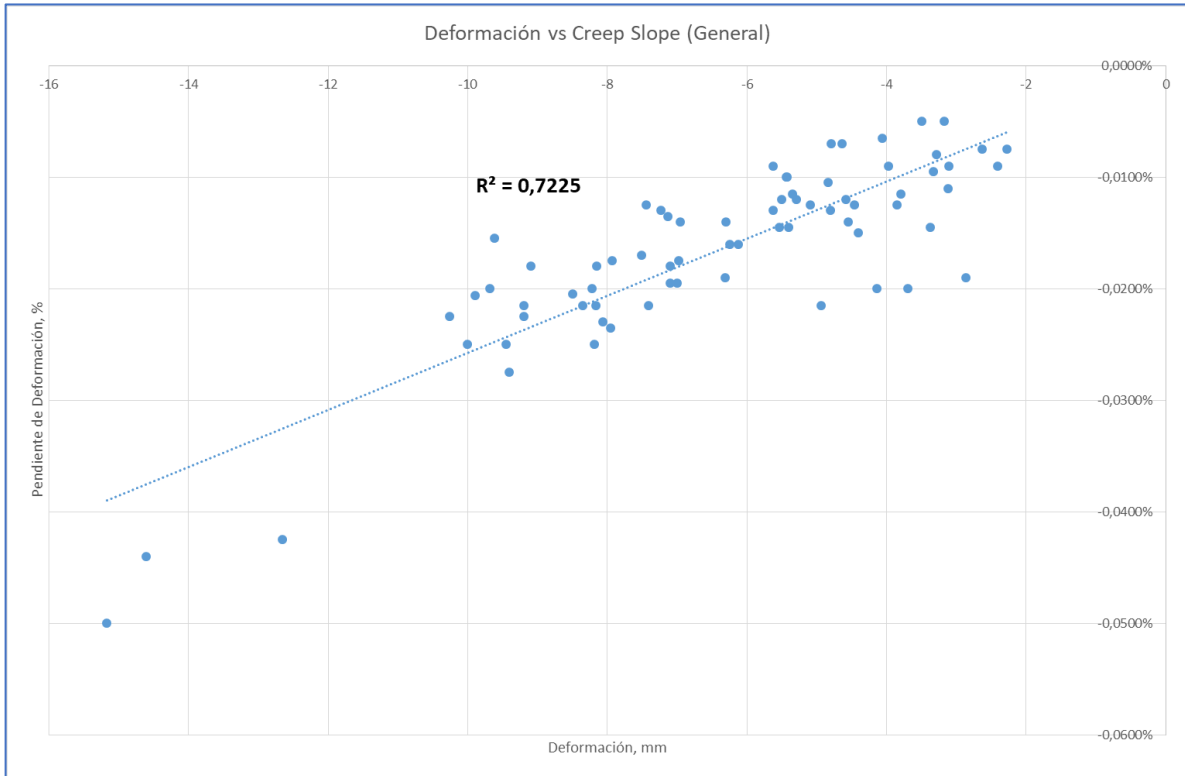


Figura 22. Pendiente de Deformación vrs Deformación, mm (mezclas convencionales; 50°C, 20,000 pasadas)

Todas estas mezclas usan asfalto AC30, cuyo comportamiento en la región es similar sin importar su proveedor o procedencia. Por eso no hacemos diferenciación entre las mezclas basadas en el asfalto. No obstante, sí podemos diferenciar con base al Tamaño Máximo Nominal (TMN) de la mezcla. De estos hay dos: $\frac{3}{4}$ " y $\frac{1}{2}$ ".

La gran mayoría de las muestras son mezclas de $\frac{3}{4}$ ", son relativamente pocas las muestras de $\frac{1}{2}$ ". No obstante, hay suficientes para hacer una comparación.

(Espacio dejado intencionalmente)

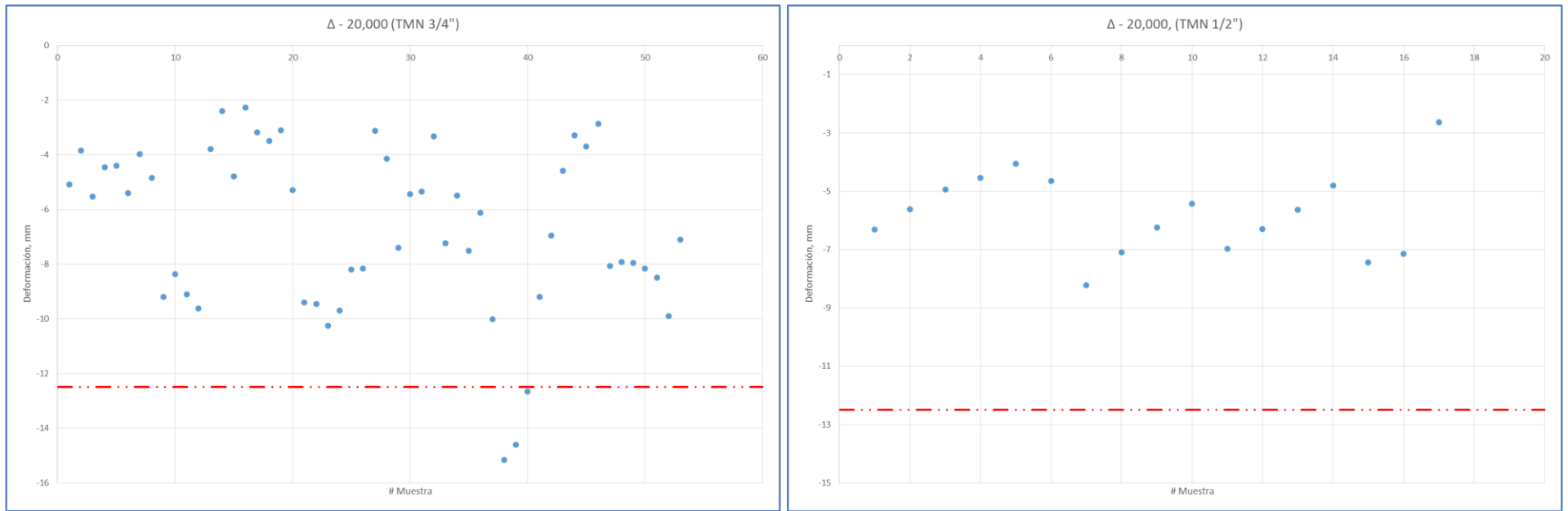


Figura 23. Comparación de Mezclas TMN 3/4" – TMN 1/2" (50°C, 20,000 pasadas)

(Espacio dejado intencionalmente)

3.1.2 Muestras de mezclas asfálticas año 2020 y 2021 con asfaltos Modificados

Se analizaron 28 muestras de asfalto modificado cuyos grados de desempeño estaban comprendidos entre: PG-64H y PG-76E, las cuales se componen de la siguiente manera:

- 4 muestras de mezcla con asfalto PG76
- 12 muestras de mezcla con asfalto PG70
- 9 muestras de mezcla con asfalto PG64
- 1 muestra con hule de caucho
- 2 muestras con asfalto modificado no identificado

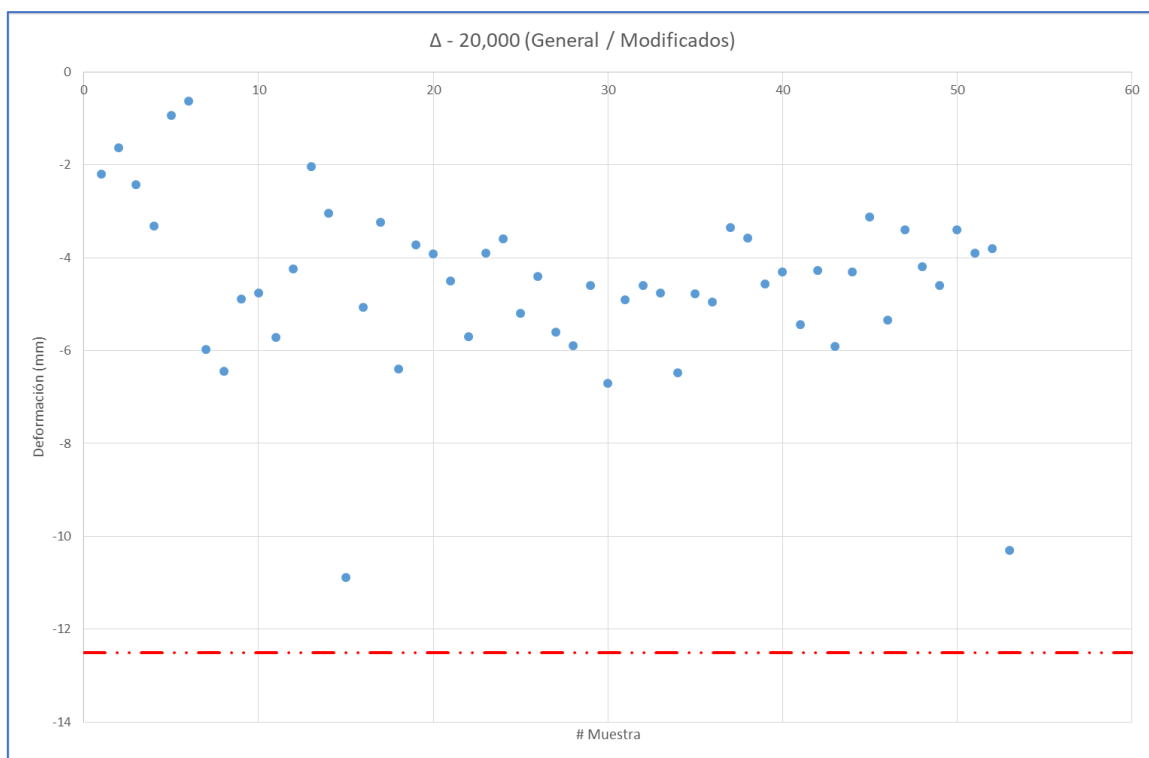


Figura 24. Deformación de mezclas modificadas (50°C, 20,000 pasadas)

(Espacio en blanco dejado intencionalmente).

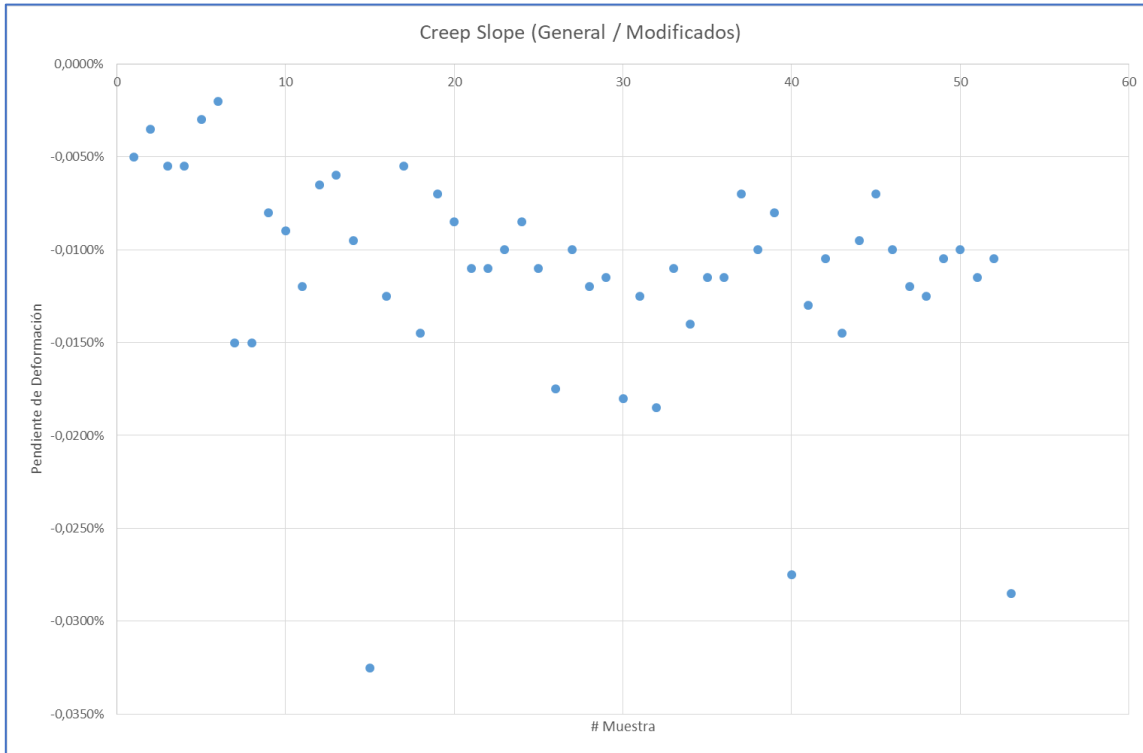


Figura 25. Pendiente de Deformación de Mezclas Modificadas (50°C, 20,000 pasadas)

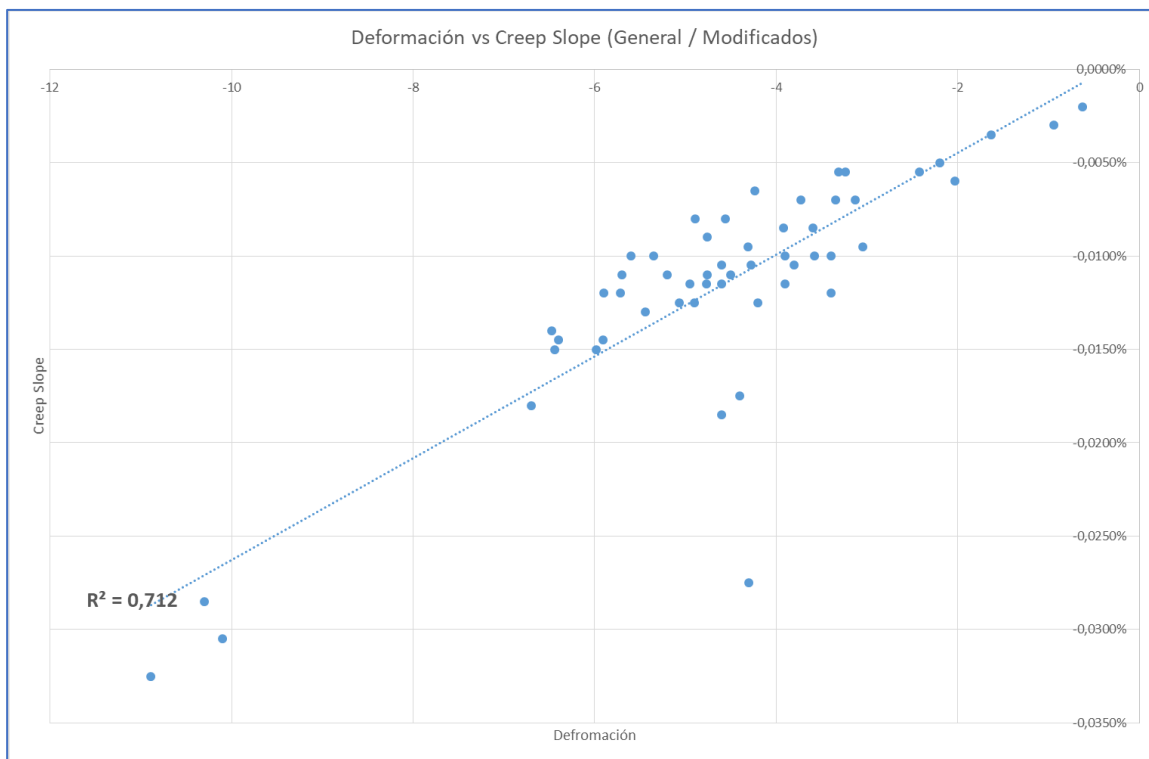


Figura 26. Pendiente de Deformación vrs Deformación de Mezclas Modificadas (50°C, 20,000 pasadas)

A continuación, se presenta la comparación de las gráficas de deformación de las mezclas con asfalto PG64, PG70 y PG76 dado que son los asfaltos modificados mayormente utilizados en los proyectos de infraestructura vial de El Salvador:

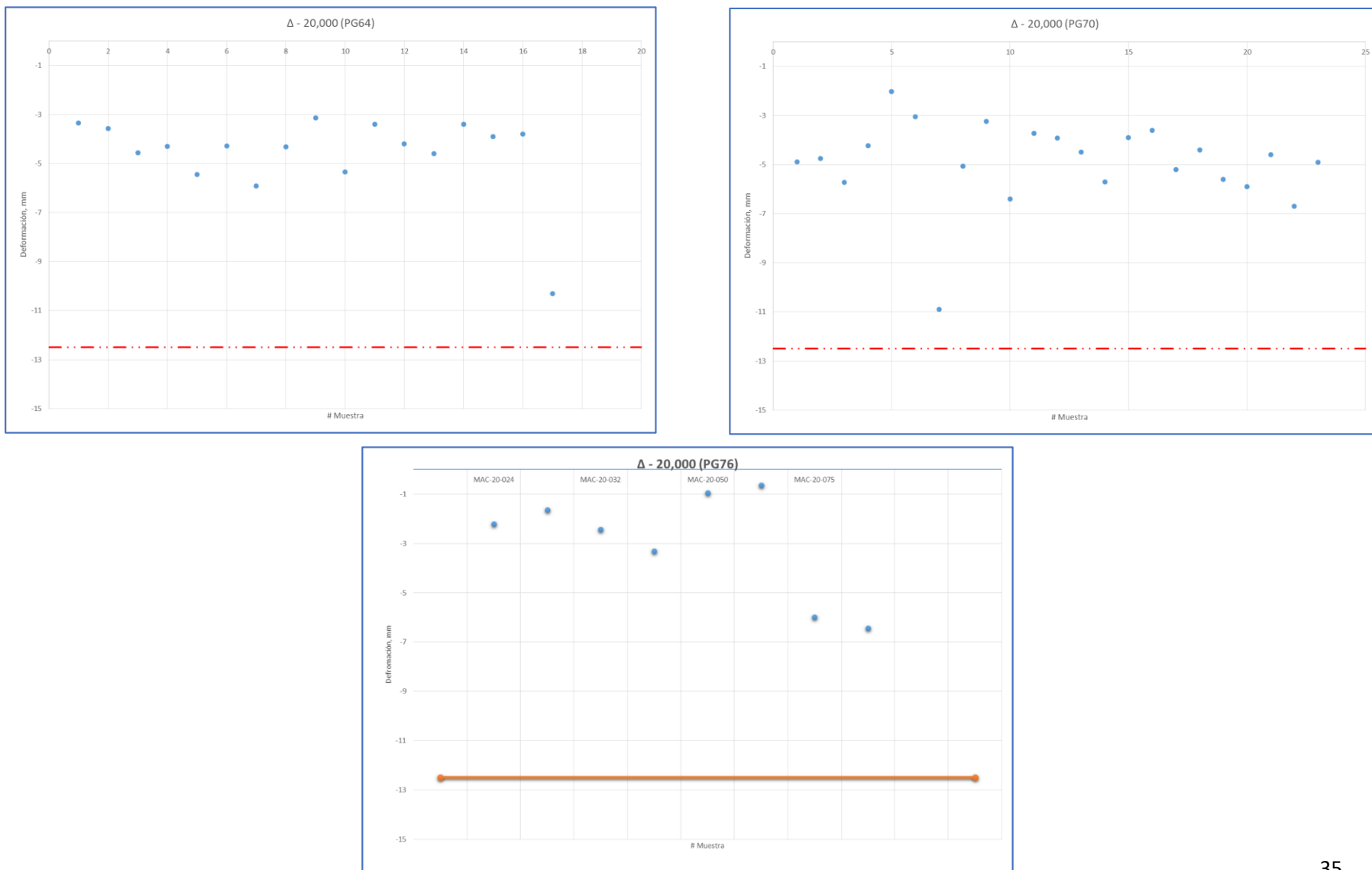


Figura 27. Comparación entre mezclas con asfalto PG64-PG70-PG76 (50°C, 20,000 pasadas)

3.2. Resultados de Ensayo MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery) de asfaltos convencionales y modificados, año 2020 y 2021.

Durante el año 2020, para diversos proyectos a nivel nacional, se utilizaron asfaltos convencionales y asfaltos modificados. El asfalto modificado se usó exclusivamente en mezclas para construcción de carpetas asfálticas, mientras que el asfalto convencional se utilizó tanto para carpetas asfálticas, así como para mantenimientos rutinarios menores como lo es el bacheo superficial. El asfalto convencional AC30 se clasifica por desempeño como un PG64H sin recuperación elástica, por lo que los gráficos obtenidos a temperatura de ensayo de 64°C, tendrán una buena representación de asfalto convencional.

Durante el 2021 se observó que hubo una notoria disminución de uso de asfalto convencional para la construcción de carpetas asfálticas, quedando el asfalto convencional, relegado para actividades de bacheo. Sin embargo, en la actualidad aún persisten proyectos de recarpeteo con asfaltos convencionales. A continuación, se presenta el gráfico de resultados obtenidos para asfaltos convencionales y modificados:

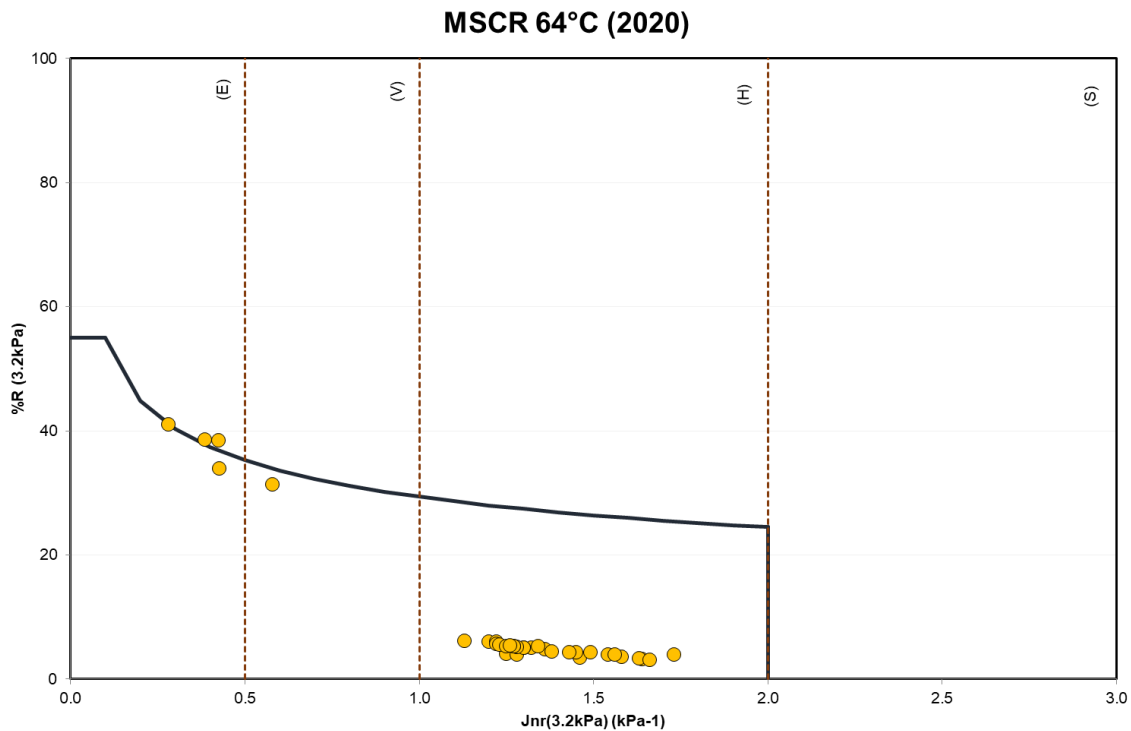


Figura 28. Resultados MSCR Asfalto Convencional ensayado a 64°C, 2020.

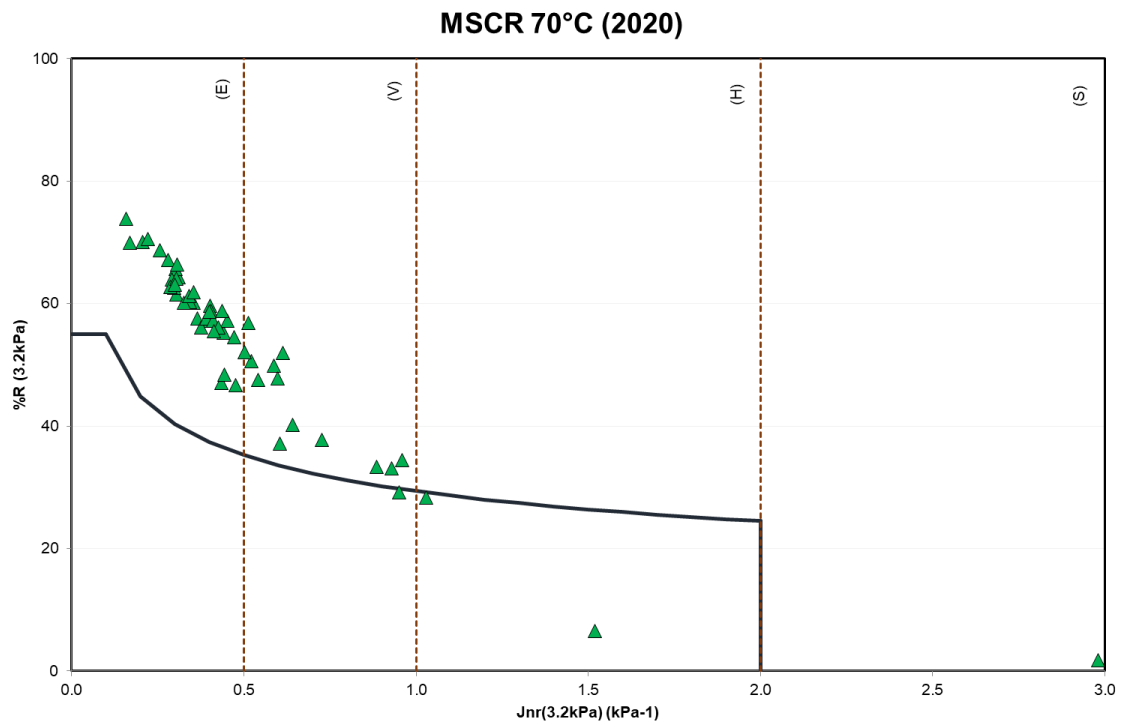


Figura 29. Resultados MSCR Asfalto Modificado PG70 ensayado a 70°C, 2020.

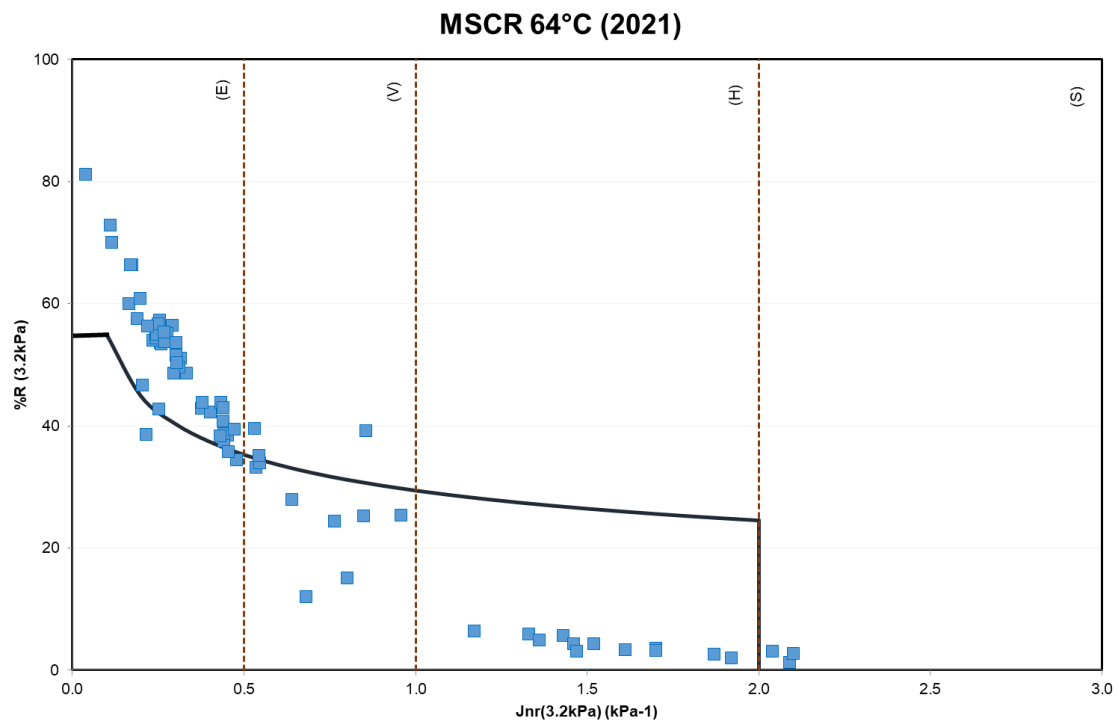


Figura 30. Resultados MSCR Asfalto Convencional ensayado a 64°C, 2021.

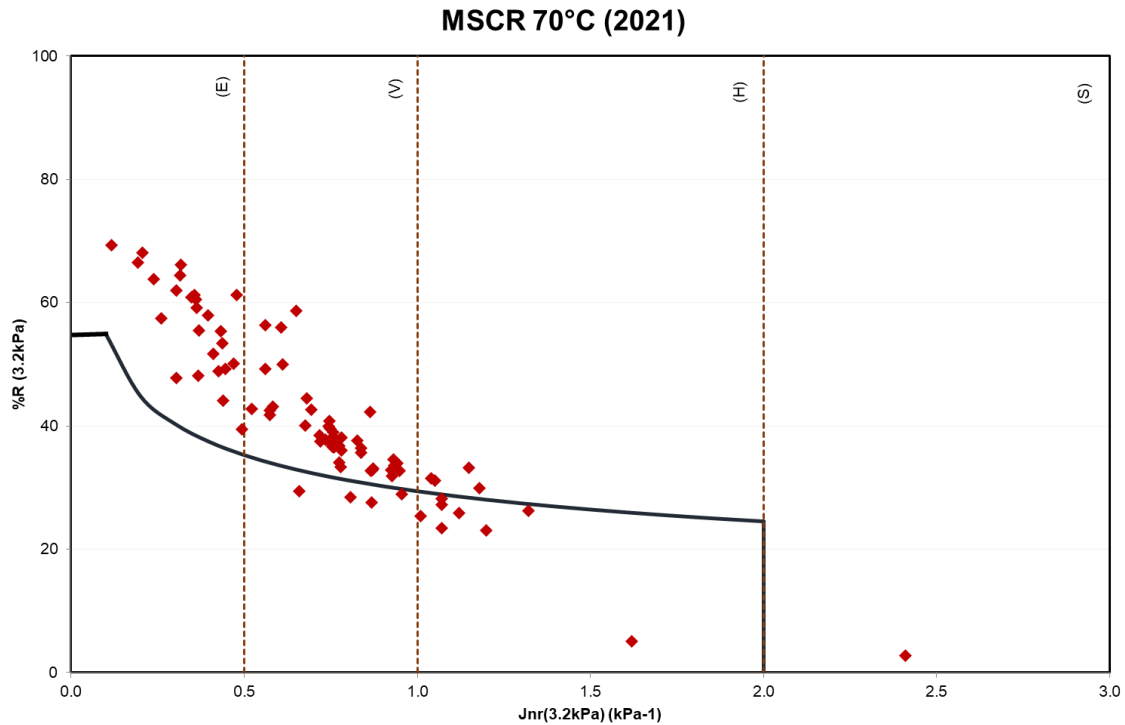


Figura 31. Resultados MSCR Asfalto Modificado PG70 ensayado a 70°C, 2021.

A continuación, se presenta una comparativa de ensayos MSCR para PG64 y PG70, entre los años 2020 y 2021. Cabe resaltar, que en las gráficas del MSCR para el PG64, se observa de forma más evidente para el año 2021, un grupo de muestras considerable, que posee recuperación elástica. Esto debido a que algunas plantas asfálticas, iniciaron con la producción de asfaltos modificados PG-64H, para la construcción de carpetas asfálticas, dejando los asfaltos convencionales, exclusivamente para actividades de bacheo superficial.

(Espacio en blanco dejado intencionalmente)

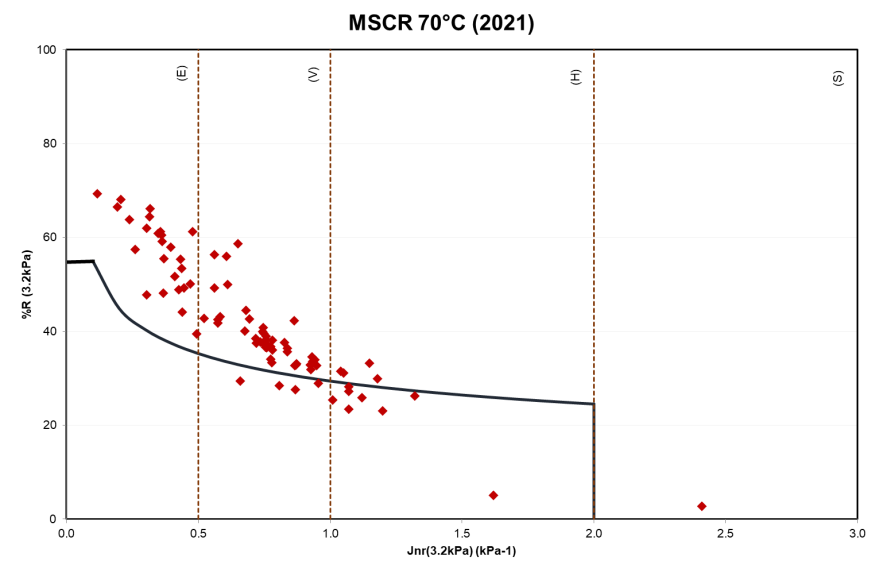
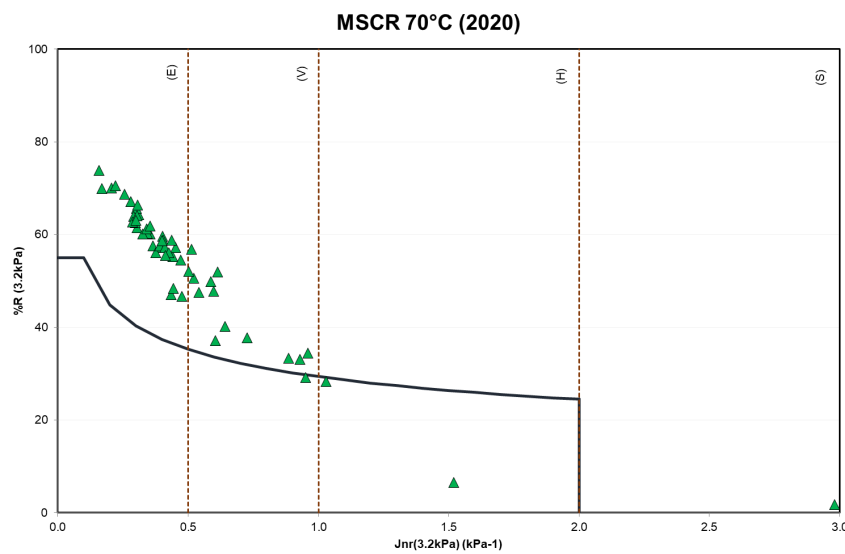
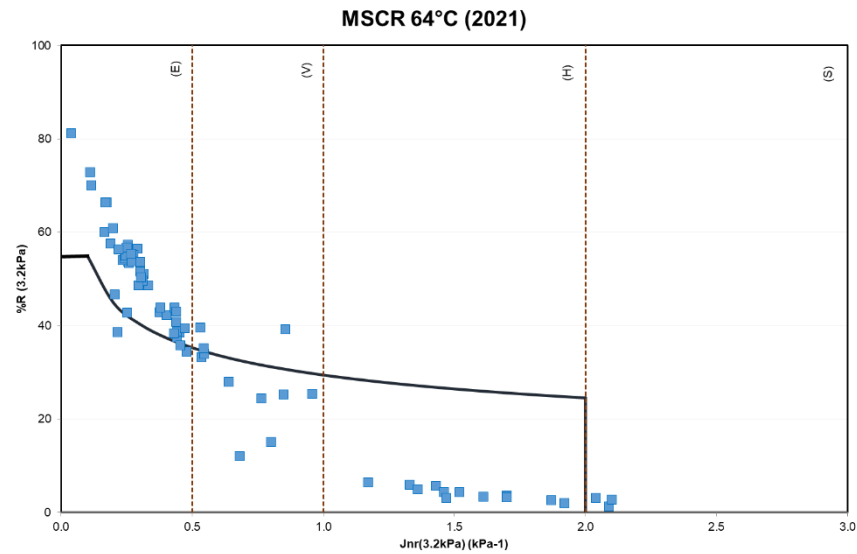
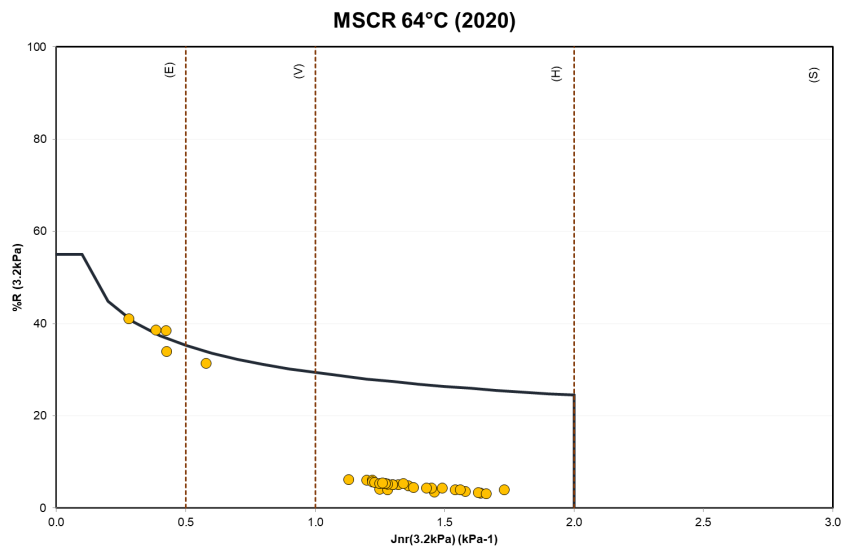


Figura 32. Comparación entre resultados MSCR PG64 – PG70 (2020/2021)

3.3 Resultados de Ensayos de Rueda de Hamburgo de asfaltos convencionales y modificados, año 2022 y 2023.

El año 2022 y 2023, continuó con un aumento de producciones de asfaltos modificados, ya que la mayoría de los proyectos viales que se ejecutaron para ese período contemplaba la utilización de asfaltos cuyo grado de desempeño rondaba entre PG64H a PG76E.

Para el presente trabajo de investigación, se tomó la decisión de ajustar parámetros de ensayo para los años 2022-2023, dado que los resultados de los años 2020-2021 no arrojaron una diferencia marcada entre asfaltos modificados y asfaltos convencionales. Esto sucede, debido a que las muestras fueron ensayadas a temperaturas de 50°C, la cual es una temperatura en la que los asfaltos convencionales, presentan buen desempeño, ya que está por debajo de su punto de ablandamiento que generalmente para un asfalto AC30, ronda entre 52°C – 55°C.

Los nuevos parámetros de ensayo evaluados para el ensayo de la Rueda de Hamburgo, fueron los siguientes:

- Temperatura de ensayo: 55 °C
- Cantidad de pasadas: 30,000
- Huella Máxima: 12.5 mm

Durante el 2022 hubo una explosión en el uso del asfalto modificado, empujado principalmente por la aparición de la Dirección de Obras Municipales (DOM). Esto introdujo nuevos proveedores en el mercado y con su aparición vinieron mayores resultados por debajo de la curva de elasticidad.

Para el año 2022 se ensayaron 47 muestras de las cuales solo 1 se identificó como mezcla convencional, por lo que se descarta para el análisis y se toman solamente las mezclas modificadas. Se hizo diferenciación únicamente en los TMN de las mezclas.

Se mantuvieron los 3 gráficos:

- Deformación en mm al llegar a 30,000 pasadas
- Pendiente de deformación a 30,000 pasadas
- Deformación versus Pendiente de Deformación

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el año 2022:

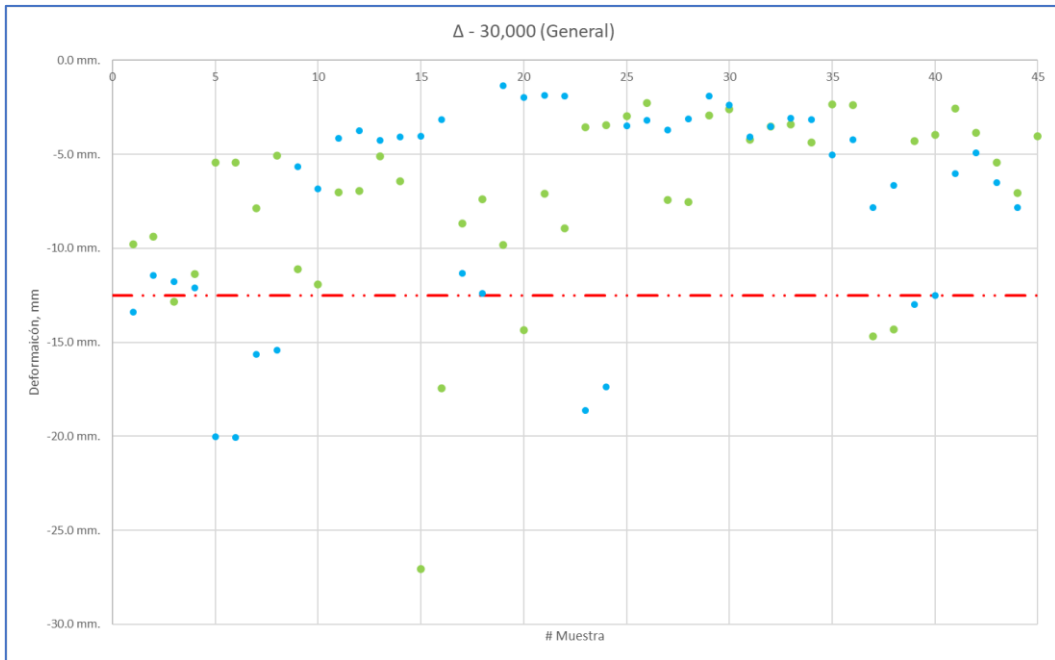


Figura 33. Deformación de Mezclas Modificadas (55°C, 30,000 pasadas) – color verde: TMN ¾” y color azul: TMN ½” (año 2022)

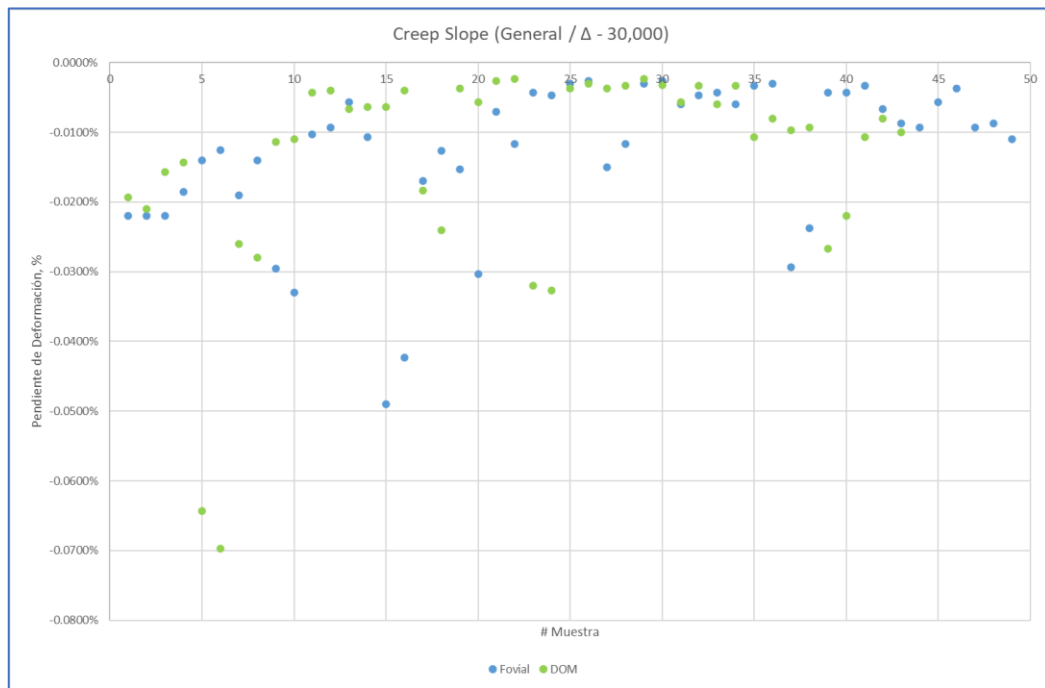


Figura 34. Pendiente de deformación de mezclas modificadas (55°C, 30,000 pasadas) – Verde TMN ¾” y Azul TMN ½” (año 2022)

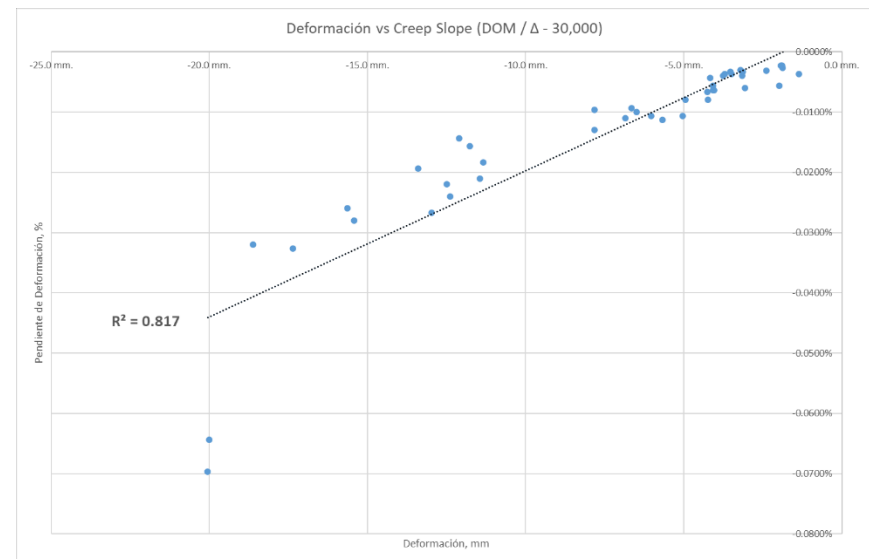
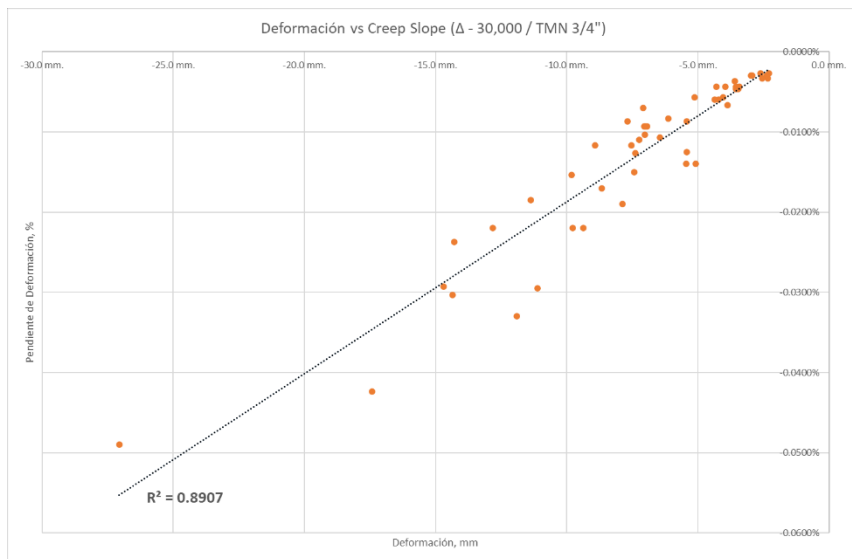
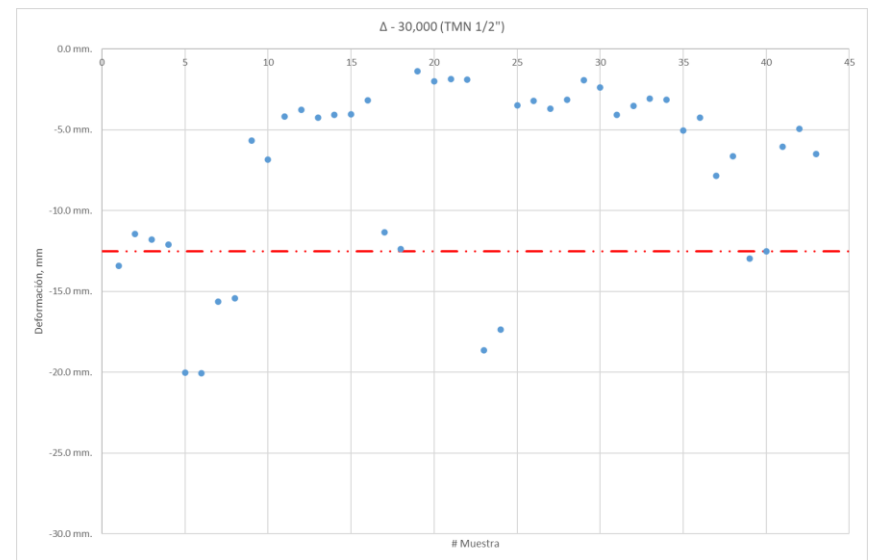
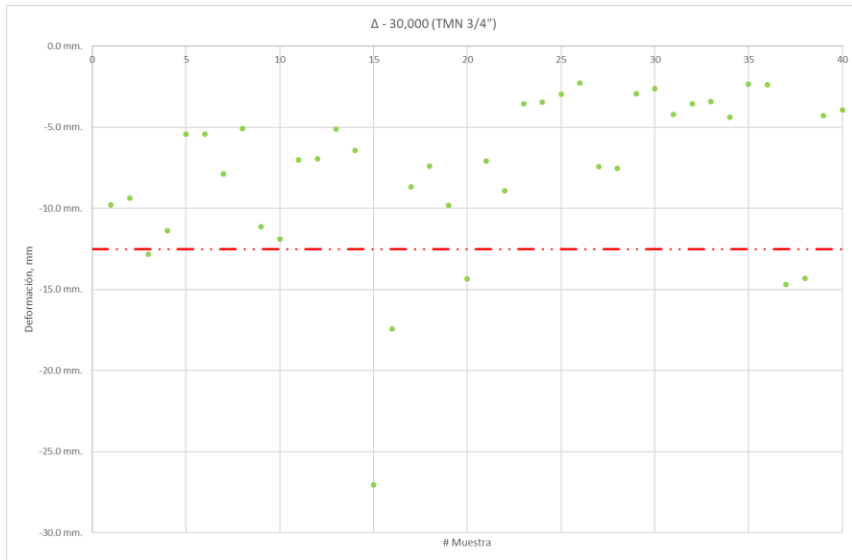


Figura 35. Comparación entre mezclas de TMN 3/4" y TMN 1/2" (55°C, 30,000 pasadas) (año 2022)

Al haber realizado los ajustes de parámetros para el ensayo de la Rueda de Hamburgo, se observa que, en los resultados obtenidos, se muestra una mayor dispersión de puntos por arriba del límite de 12.5mm. Para el año 2022, se tuvo la particularidad de poder contar con un buen número de muestras de mezclas asfálticas TMN ½”, por lo que fue posible hacer un comparativo de resultados entre mezclas: TMN ½” y TMN ¾”.

El año 2023 fue un año con un comportamiento peculiar. Por un lado, hubo una disminución drástica en la elaboración de ensayos a muestras de ½” dado que la DOM dejó de requerir la prueba. Esto provocó contar solamente con 4 muestras durante el inicio del año. Sin embargo, se ensayaron 41 muestras, de las cuales 4 muestras fueron con asfalto convencional. A continuación, se muestran los resultados obtenidos para el año 2023:

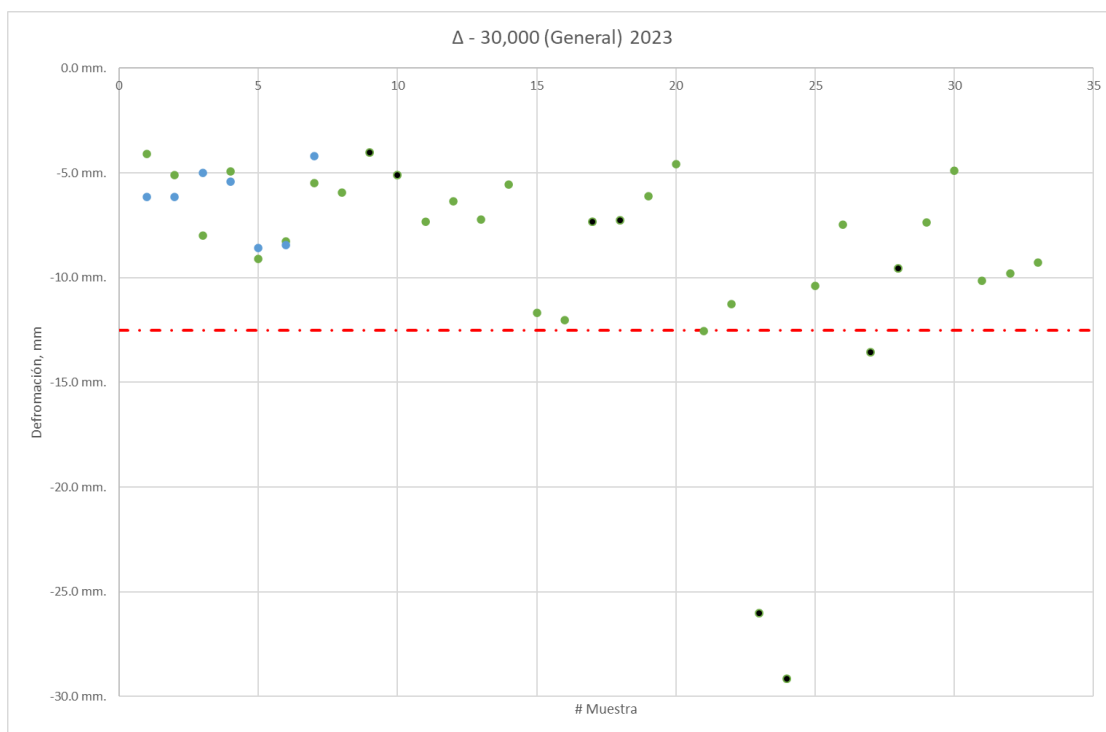


Figura 36. Deformación de mezclas asfálticas modificadas 2023 (55°C, 30,000 pasadas) – Verde TMN ¾”, Azul TMN ½”, Negro mezcla con asfalto convencional.

(Espacio en blanco dejado intencionalmente).

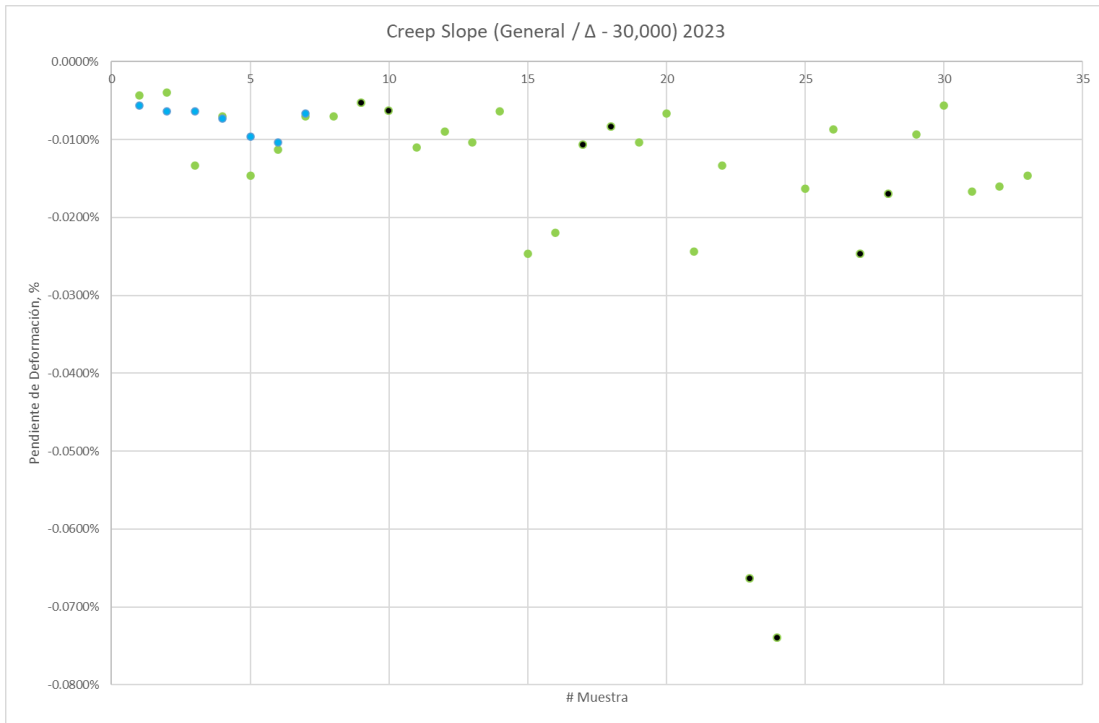


Figura 37. Pendiente de Deformación de Mezclas Modificadas 2023 (55°C, 30,000 pasadas) – Verde TMN ¾”, Azul TMN ½”, Negro mezclas asfálticas convencionales

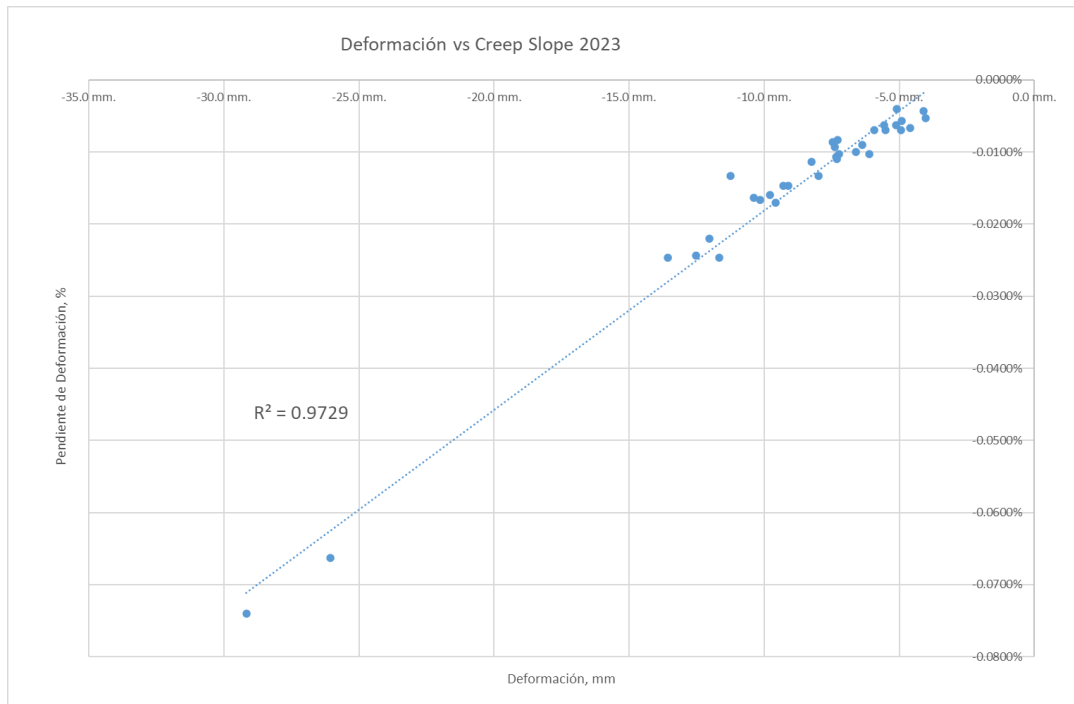
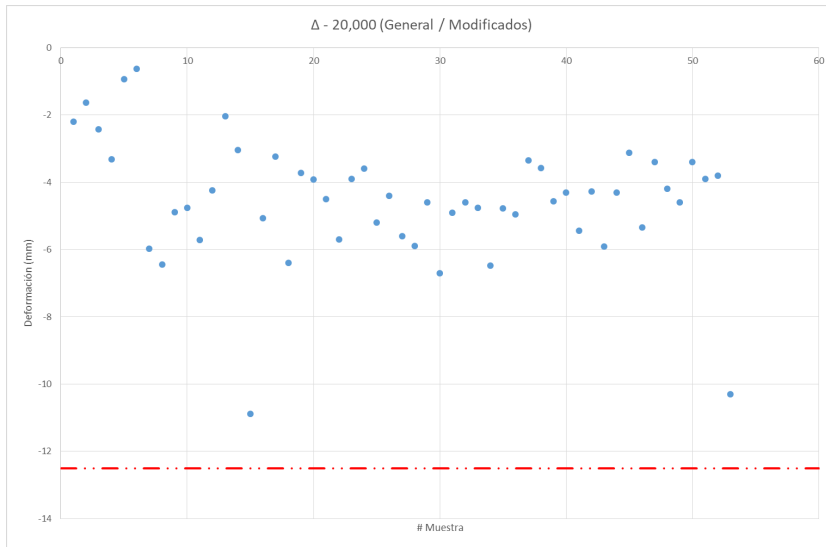
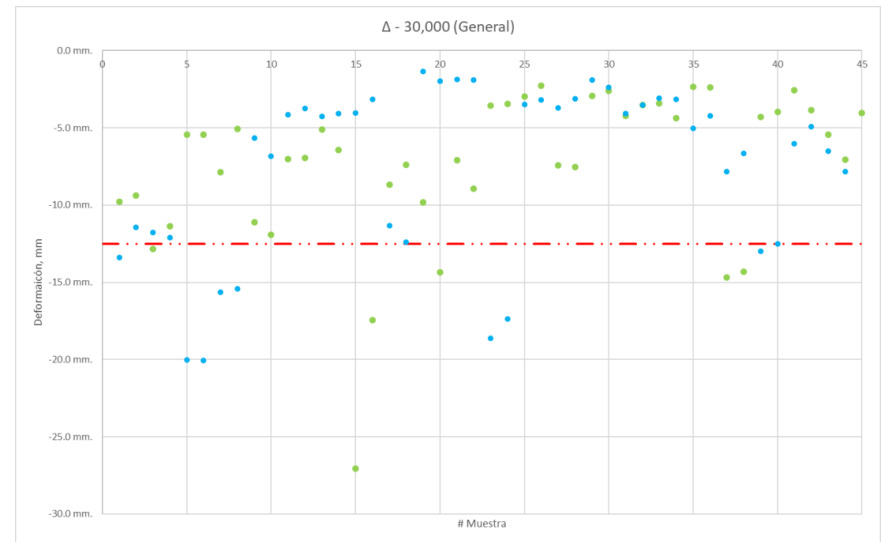


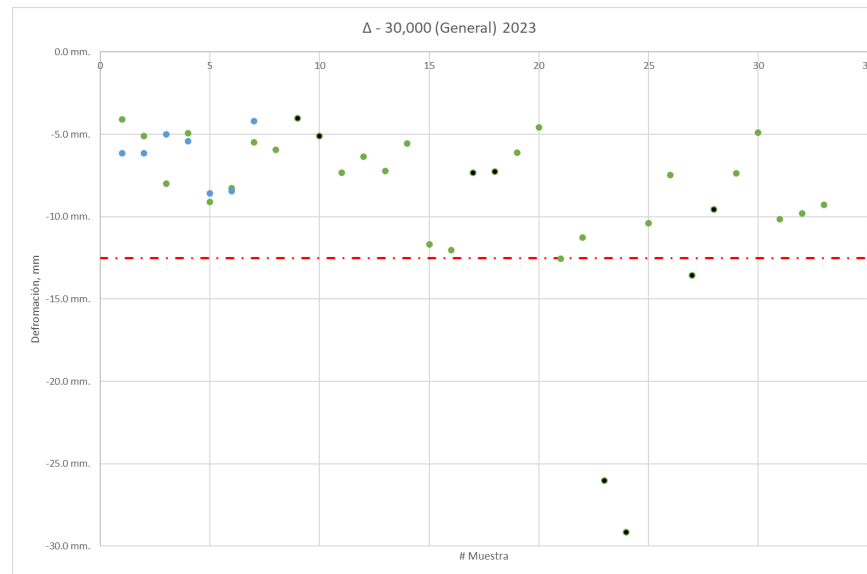
Figura 38. Pendiente de Deformación vrs Deformación de Mezclas Modificadas 2023 (55°C, 30,000 pasadas)



2020/2021
50°C – 20,000



2022
55°C – 30,000



2023
55°C – 30,000

Figura 39. Comparación de resultados de ensayo de Rueda de Hamburgo, entre mezclas: 2020/2021 – 2022/2023

3.4. Resultados de Ensayo MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery) de asfaltos convencionales y modificados, año 2022 y 2023.

Al igual que lo mencionado con respecto a las muestras de ensayo de la Rueda de Hamburgo para el año 2022; se aprovechó el incremento de asfaltos modificados, empujado principalmente por la aparición de la Dirección Nacional de Obras Municipales (DOM). Esto introdujo nuevos proveedores en el mercado y con su aparición vinieron mayores resultados por debajo de la curva de elasticidad.

A continuación, se presentan los resultados de MSCR, obtenidos para el año 2022:

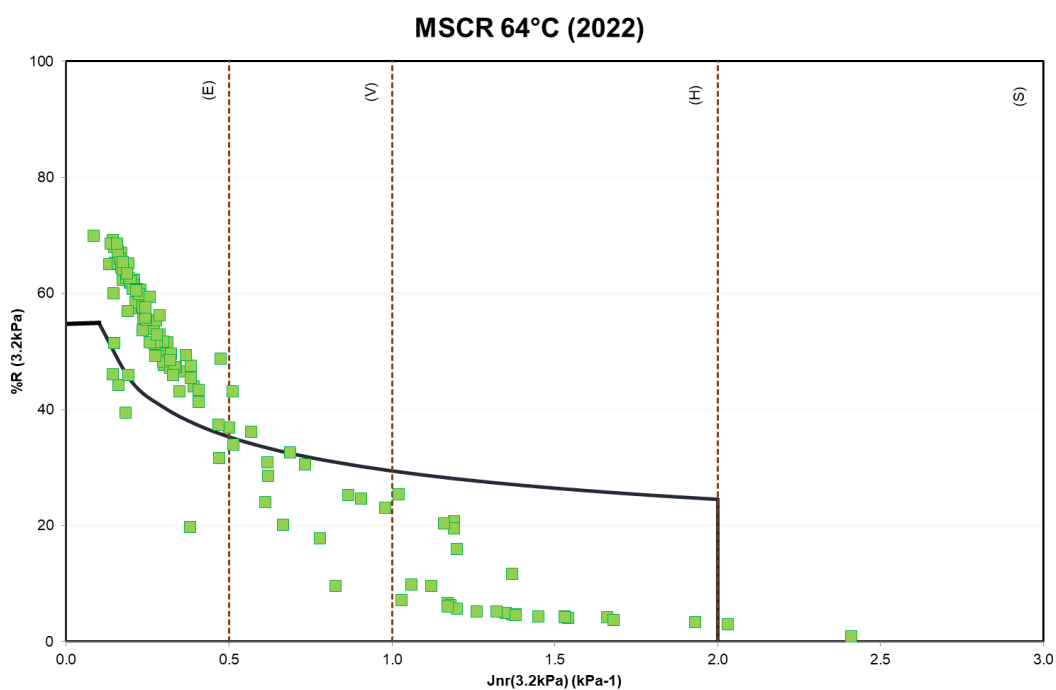


Figura 40. Resultados MSCR a 64°C – 2022

(Espacio en blanco dejado intencionalmente)

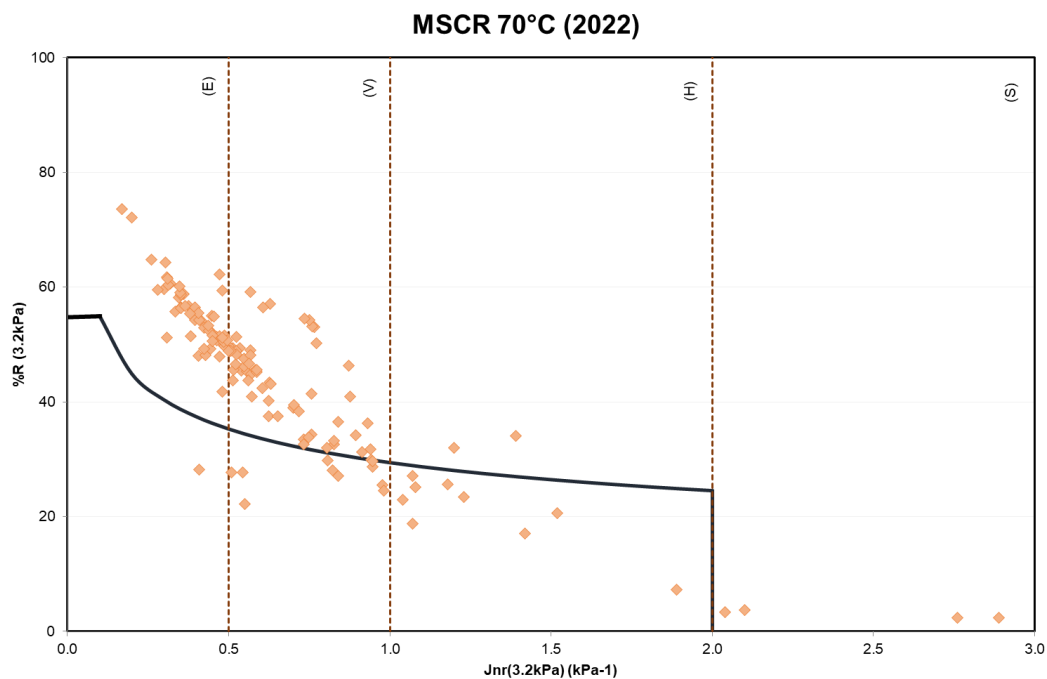


Figura 41. Resultados MSCR a 70°C – 2022

Como se puede apreciar, particularmente para el caso del PG64, la dispersión de los datos aumentó con una gran cantidad de datos por debajo de la línea de elasticidad. Los datos en la franja H y pegados al eje horizontal son de asfaltos convencionales.

Para el caso del PG70, la dispersión fue menor que para el PG64. No obstante, si se observan mayor cantidad de datos por debajo de la línea de elasticidad, aunque la tendencia se mantiene.

Durante el 2023 hubo un gran cambio en el comportamiento del consumo de los asfaltos modificados. El uso de PG64 cayó drásticamente, dado que las agencias favorecieron el asfalto PG70. El PG64 solo registró 15 muestras, versus las más de 100 de PG70. De nuevo, las muestras de PG64 en el rango de H o menor pegadas al eje horizontal, son muestras de asfalto convencional.

A continuación, se presentan los resultados de ensayo MSCR obtenidos para el año 2023:

(Espacio en blanco dejado intencionalmente).

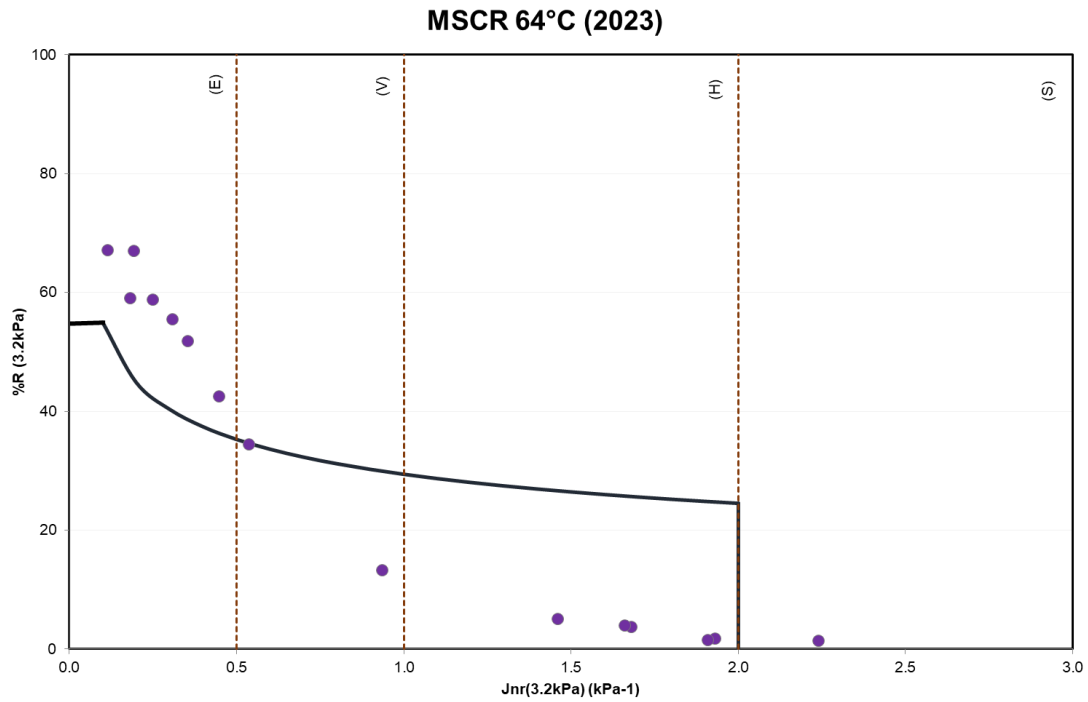


Figura 42. Resultados MSCR a 64°C - 2023

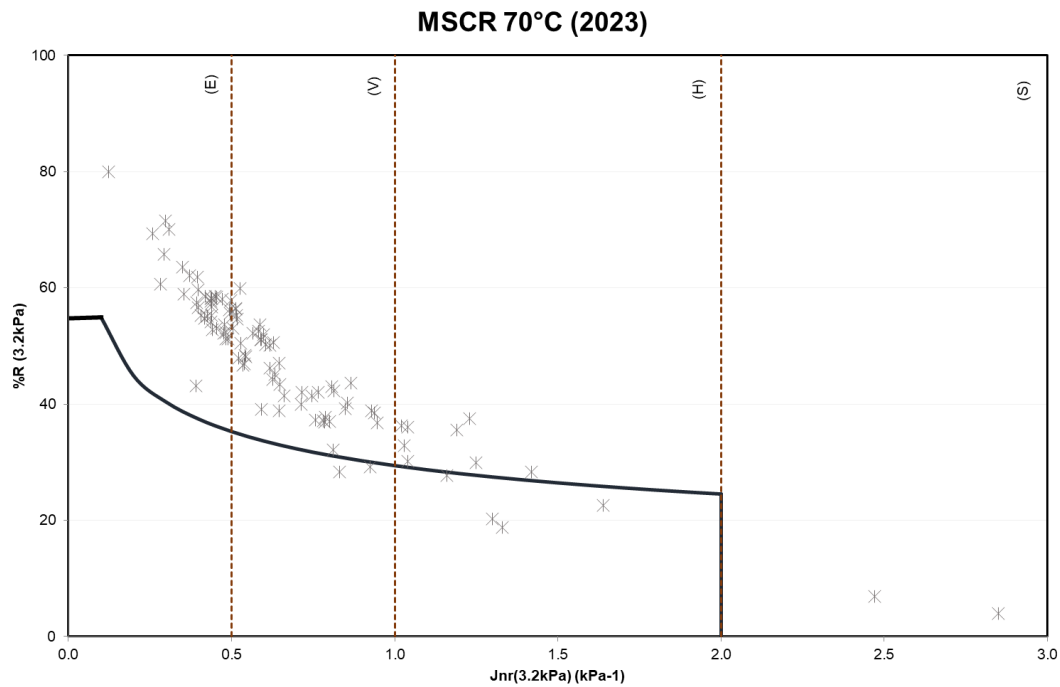


Figura 43. Resultados MSCR a 70°C - 2023

La mayor dispersión en el comportamiento del PG70 se mantiene. Se aprecia un poco menos dado que este año se contó con menor cantidad de muestras, pero la tendencia es congruente con los resultados 2020/2021.

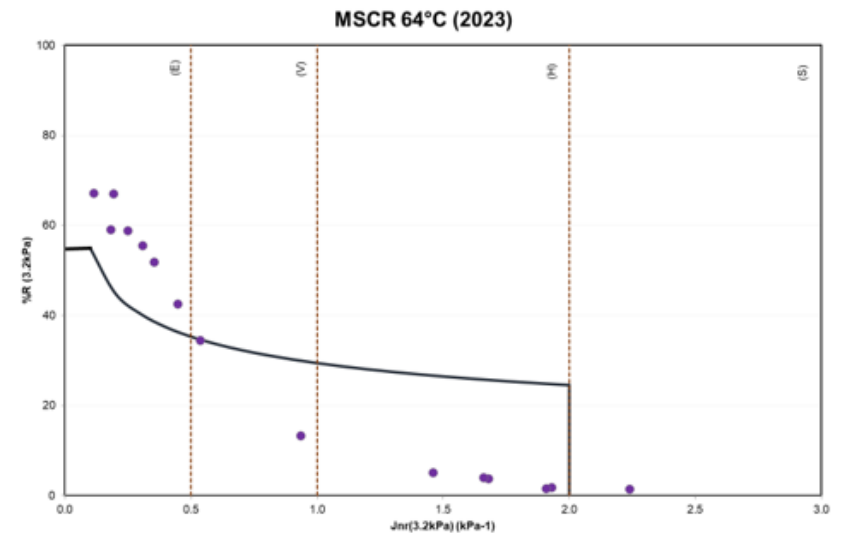
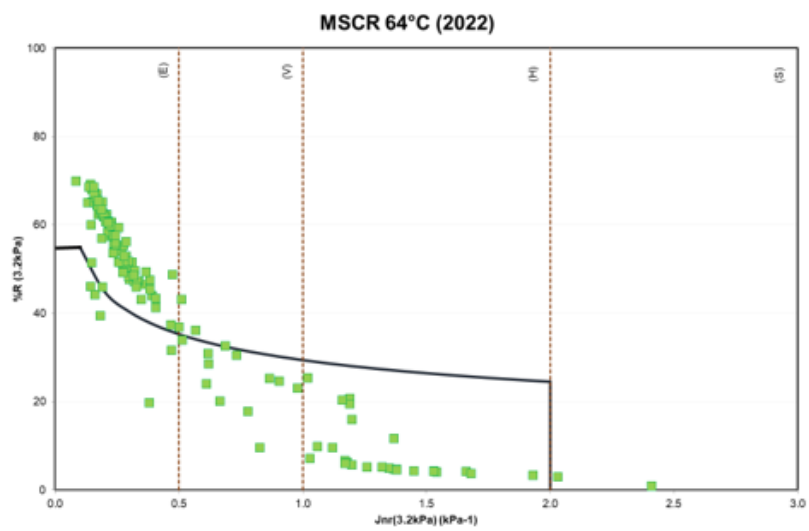
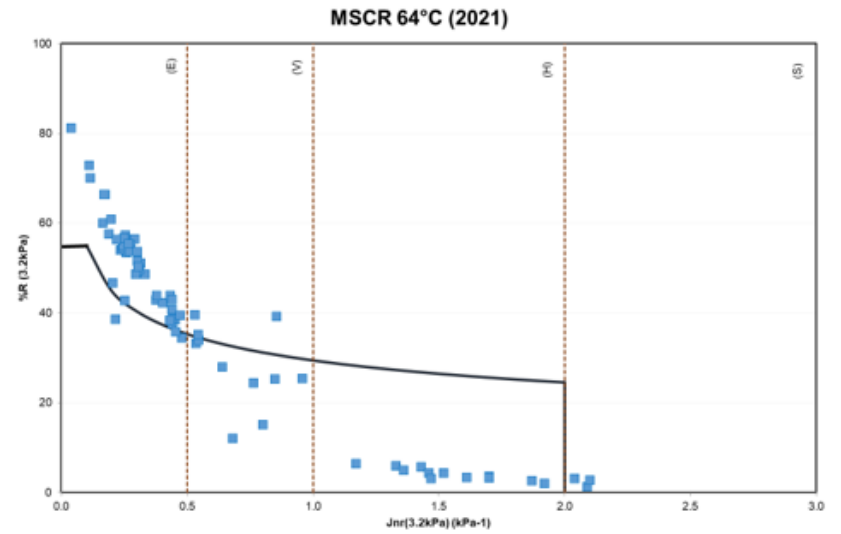
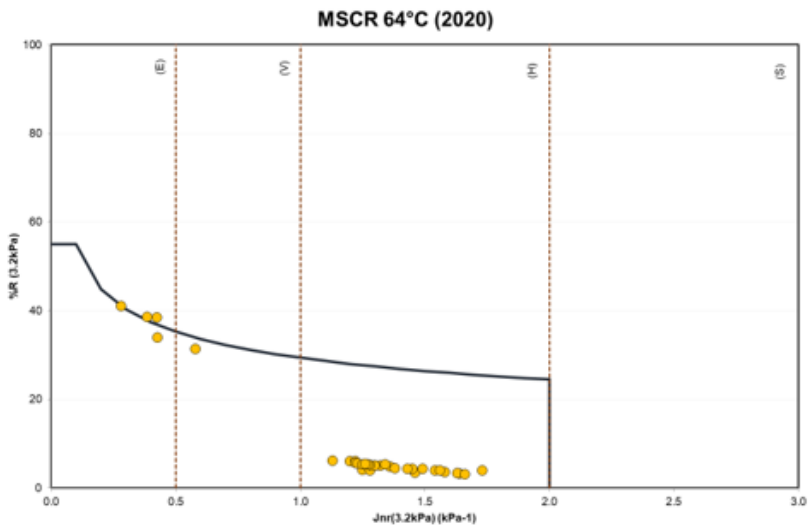


Figura 44. Comparación MSCR 64°C (2020/2021/2022/2023)

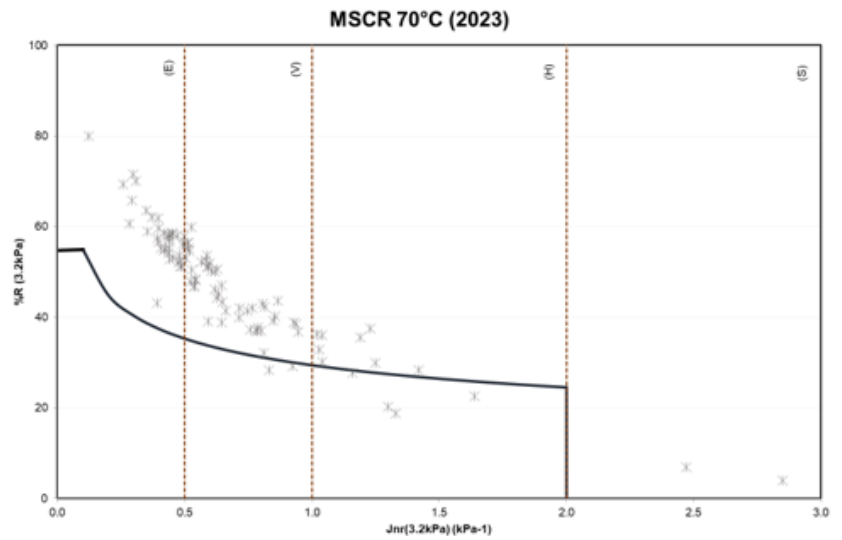
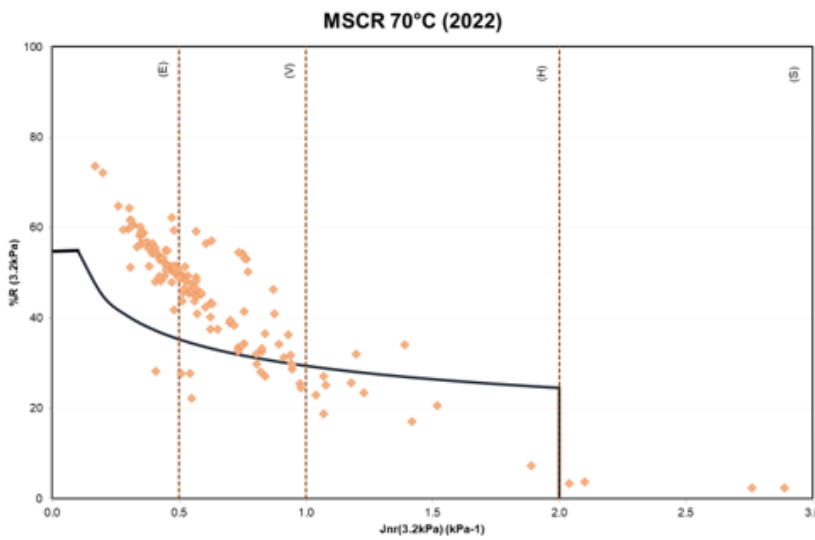
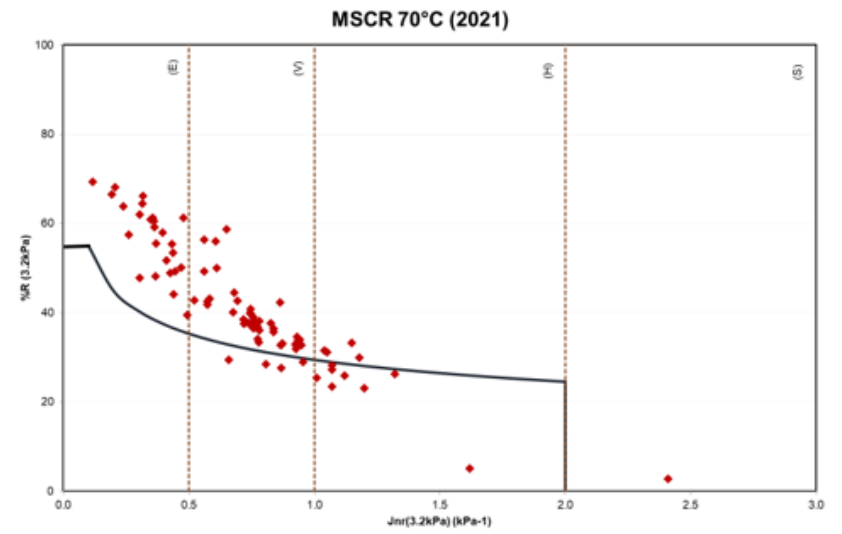
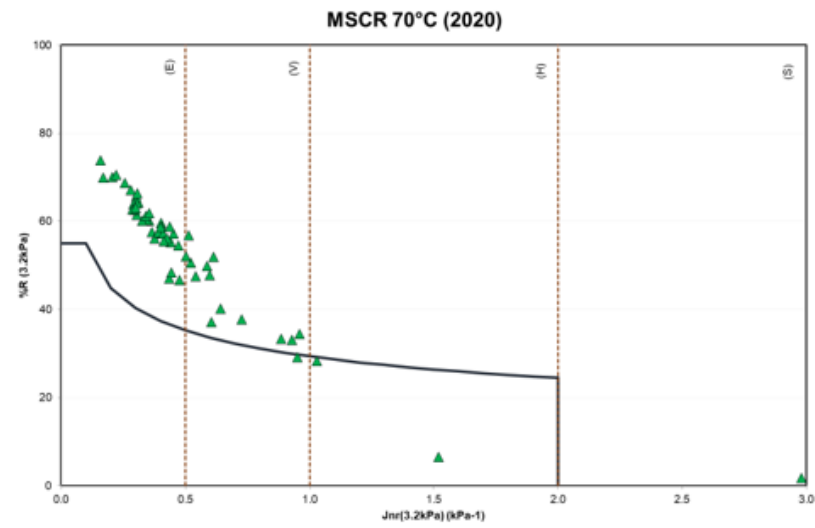


Figura 45. Comparación MSCR 70°C (2020/2021/2022/2023)

4.0 CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS

4.1. Análisis de resultados de ensayo de Rueda de Hamburgo, para mezclas convencionales 2020

Dado que los parámetros de análisis establecidos para el ensayo de Rueda de Hamburgo, para las muestras 2020/2021 de asfaltos convencionales, fueron los clasificados como estándar, únicamente 3 muestras fueron las que presentaron deformaciones mayores a 12.5 mm (ver figura 20 en página 30). A continuación se muestra la tabla de resultados obtenidos, sombreando únicamente las muestras que no cumplieron con el requisito de deformación máxima de 12.5mm:

Resumen Ensayos Rueda de Hamburgo 2020										
Asfalto Convencional										
N°	Identificación	TNM	Ligante	Temperatura	Δ - 20,000	Ciclos - Δ max	Creep Slope	Δ - SPI	Ciclos - SPI	Strip Slope
1	MAC-20-001	3/4	Convencional	51.3	-5.09	20,000	-0.0125%	-3	12,000	-0.0250%
				51.3	-3.85	20,000	-0.0125%	N/A	N/A	N/A
2	ID20-MAC-005	3/4	Convencional	53.2	-5.6	20,000	-0.0155%	N/A	N/A	N/A
				53.2	-5.655	20,000	-0.0160%	N/A	N/A	N/A
3	MAC-20-018	1/2	Modificado	50.2	-6.31	20,000	-0.0190%	N/A	N/A	N/A
				50.2	-5.625	20,000	-0.0130%	N/A	N/A	N/A
4	MAC-20-019	1/2	PG64	50.0	-4.94	20,000	-0.0215%	N/A	N/A	N/A
				50.0	-4.55	20,000	-0.0140%	N/A	N/A	N/A
5	MAC-20-020	3/4	PG64	50.2	-5.54	20,000	-0.0145%	N/A	N/A	N/A
				50.2	-4.46	20,000	-0.0125%	N/A	N/A	N/A
6	MAC-20-021	3/4	Convencional	49.6	-4.41	20,000	-0.0150%	N/A	N/A	N/A
				49.6	-5.4	20,000	-0.0145%	N/A	N/A	N/A
7	MAC-20-027	3/4	Convencional	50.2	-3.97	20,000	-0.0090%	N/A	N/A	N/A
				50.2	-4.84	20,000	-0.0105%	N/A	N/A	N/A
8	MAC-20-028	3/4	Convencional	50.2	-9.196	20,000	-0.0225%	-7.21	14,286	-0.0365%
				50.2	-8.36	20,000	-0.0215%	-6.55	14167	-0.0335%
9	MAC-20-036	1/2	Convencional	50.2	-4.06	20,000	-0.0065%	N/A	N/A	N/A
				50.2	-4.64	20,000	-0.0070%	N/A	N/A	N/A
10	MAC-20-038	3/4	Convencional	50.0	-9.1	20,000	-0.0180%	N/A	N/A	N/A
				50.0	-9.62	20,000	-0.0155%	N/A	N/A	N/A
11	MAC-20-039	3/4	Convencional	50.0	-3.8	20,000	-0.0115%	N/A	N/A	N/A
				50.0	-2.41	20,000	-0.0090%	N/A	N/A	N/A
12	MAC-20-041	3/4	Convencional	51.9	-4.8	20,000	-0.0070%	N/A	N/A	N/A
				51.9	-2.28	20,000	-0.0075%	N/A	N/A	N/A
13	MAC-20-042	3/4	Convencional	49.9	-3.18	20,000	-0.0050%	N/A	N/A	N/A
				49.9	-3.5	20,000	-0.0050%	N/A	N/A	N/A
14	MAC-20-044	3/4	Convencional	49.7	-3.11	20,000	-0.0090%	N/A	N/A	N/A
				49.7	-5.29	20,000	-0.0120%	N/A	N/A	N/A
15	MAC-20-045	3/4	PG64	49.9	-9.41	20,000	-0.0275%	N/A	N/A	N/A
				49.9	-9.45	20,000	-0.0250%	N/A	N/A	N/A
16	MAC-20-048	1/2	Convencional	50.0	-8.22	20,000	-0.0200%	N/A	N/A	N/A
				50.0	-7.1	20,000	-0.0180%	N/A	N/A	N/A
17	MAC-20-049	3/4	Convencional	49.9	-10.26	20,000	-0.0225%	-7.69	12,857	-0.0365%
				49.9	-9.69	20,000	-0.0200%	N/A	N/A	N/A

Continúa tabla en siguiente hoja.

Resumen Ensayos Rueda de Hamburgo 2020										
Asfalto Convencional										
N°	Identificación	TNM	Ligante	Temperatura	Δ - 20,000	Ciclos - Δ max	Creep Slope	Δ - SPI	Ciclos - SPI	Strip Slope
18	MAC-20-052	3/4	Convencional	49.9	-8.19	20,000	-0.0250%	N/A	N/A	N/A
				49.9	-8.1675	20,000	-0.0215%	N/A	N/A	N/A
19	MAC-20-053	3/4	Convencional	49.9	-3.12	20,000	-0.0110%	N/A	N/A	N/A
				49.9	-4.14	20,000	-0.0200%	N/A	N/A	N/A
20	MAC-20-054	3/4	Convencional	49.9	-7.41	20,000	-0.0215%	N/A	N/A	N/A
				49.9	-5.44	20,000	-0.0100%	N/A	N/A	N/A
21	MAC-20-056	3/4	PG64	50.0	-5.35	20,000	-0.0115%	N/A	N/A	N/A
				50.0	-3.33	20,000	-0.0095%	N/A	N/A	N/A
22	MAC-20-063	1/2	Convencional	49.8	-6.25	20,000	-0.0160%	-5.20	18,723	-0.0865%
				49.8	-5.43	20,000	-0.0100%	N/A	N/A	N/A
23	MAC-20-064	3/4	PG64	49.9	-7.23	20,000	-0.0130%	N/A	N/A	N/A
				49.9	-5.5	20,000	-0.0120%	N/A	N/A	N/A
24	MAC-20-065	3/4	PG64	50.0	-7.51	20,000	-0.0170%	N/A	N/A	N/A
				50.0	-6.13	20,000	-0.0160%	N/A	N/A	N/A
25	MAC-20-069	1/2	Convencional	50.0	-6.98	20,000	-0.0175%	N/A	N/A	N/A
				50.0	-6.3	20,000	-0.0140%	N/A	N/A	N/A
26	MAC-20-070	3/4	Convencional	49.9	-10.01	20,000	-0.0250%	N/A	N/A	N/A
				49.9	-15.17	20,000	-0.0500%	N/A	N/A	N/A
27	MAC-20-071	3/4	Convencional	49.4	-14.61	20,000	-0.0440%	-9.22	17,549	-0.2235%
				49.4	-12.66	20,000	-0.0425%	-9.05	17306	-0.1390%
28	MAC-20-073	3/4	Convencional	51.9	-18.44	20,000	-0.0275%	-6.59	14,872	-0.1250%
				51.9	-21.14	20,000	-0.0485%	-6.97	9637	-0.1450%
29	MAC-20-074	3/4	PG64	52.0	-9.2	20,000	-0.0215%	N/A	N/A	N/A
				52.0	-6.96	20,000	-0.0140%	N/A	N/A	N/A
30	MAC-20-078	1/2	Convencional	50.0	-5.63	20,000	-0.0090%	N/A	N/A	N/A
				50.0	-4.81	20,000	-0.0130%	N/A	N/A	N/A
31	MAC-20-079	1/2	PG64	49.9	-7.45	20,000	-0.0125%	N/A	N/A	N/A
				49.9	-7.14	20,000	-0.0135%	N/A	N/A	N/A
32	MAC-20-082	3/4	Convencional	50.0	-4.58	20,000	-0.0120%	N/A	N/A	N/A
				50.0	-3.29	20,000	-0.0080%	N/A	N/A	N/A

Tabla 4. Resultados obtenidos en Rueda de Hamburgo, Mezclas con Asfalto Convencional, año 2020.

Como puede observarse en la Tabla #4, de 32 ensayos realizados, solo 3 muestras sufrieron deformaciones por arriba de 12.50 mm. luego de las 20,000 pasadas de la rueda, lo cual corresponde a un porcentaje de 9.4% de muestras que no cumplieron. Este buen desempeño mostrado, se atribuye a la buena calidad de agregados que usan la mayoría de mezclas asfálticas en el país (agregados de origen basáltico) y a la temperatura de ensayo de muestras (50°C), ya que todas las mezclas de asfalto convencional que se fabrican en el país, corresponden a mezclas clasificadas como AC30, con puntos de ablandamiento por arriba de 52°C generalmente. Por lo tanto, la temperatura a la cual se ensayaron las muestras no incidió significativamente en el comportamiento del asfalto. Es importante aclarar que en muchas de las zonas del país, las temperaturas de los pavimentos en horas cálidas, superan los 50°C, lo cual provoca que el asfalto reblandezca y experimente deformaciones.

Al examinar la figura 22 (página 31), se observa que las muestras que tienen pendientes de deformación bajas tienen mejor comportamiento a la deformación que las muestras que tienen pendientes de deformación altas. Luego del período de post compactación, las muestras pueden mostrar pendientes muy pequeñas, casi asintóticas. En el otro extremo, pueden mostrar pendientes pronunciadas que indican un deterioro rápido.

El gráfico general Deformación vs Pendiente de Deformación muestra una correlación lineal de 0.7225, la cual es muy buena e indica una relación lineal entre las dos variables.

En la Tabla 4 (página 52) podemos notas que las deformaciones de mezclas asfálticas TMN ½” no sobrepasan o rondan los 7 mm. Esta diferencia tan marcada en las deformaciones con respecto a las mezclas con TMN ¾”, puede deberse al empaquetamiento mucho más “apretado” de las mezclas de ½”.

4.2 Análisis de resultados de ensayo de Rueda de Hamburgo, para mezclas modificadas año 2020/2021

A continuación, se presenta la tabla de resultados de asfaltos modificados ensayados durante el período 2020:

Resumen Ensayos Rueda de Hamburgo 2020										
Asfalto Modificado										
N°	Identificación	TNM	Ligante	Temperatura	Δ - 20,000	Ciclos - Δmax	Creep Slope	Δ - SPI	Ciclos - SPI	Strip Slope
1	MAC-20-024	3/4	PG76H	50.2	-2.2	20,000	-0.0050%	N/A	N/A	N/A
				50.2	-1.63	20,000	-0.0035%	N/A	N/A	N/A
2	MAC-20-029	3/4	PG70H	52.9	-4.89	20,000	-0.0080%	N/A	N/A	N/A
				52.9	-4.76	20,000	-0.0090%	N/A	N/A	N/A
3	MAC-20-031	3/4	PG70H	52.9	-5.72	20,000	-0.0120%	N/A	N/A	N/A
				52.9	-4.24	20,000	-0.0065%	N/A	N/A	N/A
4	MAC-20-032	3/4	PG76H	50.2	-2.42	20,000	-0.0055%	N/A	N/A	N/A
				50.2	-3.31	20,000	-0.0055%	N/A	N/A	N/A
5	MAC-20-046	3/4	PG70H	49.5	-2.03	20,000	-0.0060%	N/A	N/A	N/A
				49.5	-3.05	20,000	-0.0095%	N/A	N/A	N/A
6	MAC-20-050	3/4	PG76E	49.9	-0.94	20,000	-0.0030%	N/A	N/A	N/A
				49.9	-0.63	20,000	-0.0020%	N/A	N/A	N/A
7	MAC-20-059	3/4	Modificado	50.0	-4.76	20,000	-0.0110%	N/A	N/A	N/A
				50.0	-6.47	20,000	-0.0140%	N/A	N/A	N/A
8	MAC-20-061 (1)	3/4	Modificado	61.4	-15.9	60,000	-0.0133%	-2.2	16,364	-0.0317%
				61.4	-6.1	60,000	-0.0140%	N/A	N/A	N/A
9	MAC-20-061 (2)	3/4	Modificado	49.7	-10.05	50,000	-0.0124%	-7.3	35,897	-0.0202%
				49.7	-5.13	50,000	-0.0130%	N/A	N/A	N/A
10	MAC-20-072	3/4	Polvo de Caucho	50.0	-18.69	20,000	-0.0375%	-8.24	15,306	-0.2825%
				50.0	-20.65	20,000	-0.0250%	-5.62	14,462	-0.3500%
11	MAC-20-075	3/4	PG76H	49.9	-5.98	20,000	-0.0150%	N/A	N/A	N/A
				49.9	-6.44	20,000	-0.0150%	N/A	N/A	N/A
12	MAC-20-077	3/4	PG70E	49.9	-10.89	20,000	-0.0325%	-7.63	13,617	-0.0560%
				49.9	-5.07	20,000	-0.0125%	N/A	N/A	N/A
13	MAC-20-080	3/4	PG70E	49.9	-3.24	20,000	-0.0055%	N/A	N/A	N/A
				49.9	-6.4	20,000	-0.0145%	N/A	N/A	N/A
14	MAC-20-083	3/4	Modificado	50.0	-4.77	20,000	-0.0115%	N/A	N/A	N/A
				50.0	-4.95	20,000	-0.0115%	N/A	N/A	N/A

Tabla 5. Resultados obtenidos en Rueda de Hamburgo, Mezclas con Asfalto Modificado, año 2020.

A continuación, se presenta la tabla de resultados de asfaltos modificados ensayados durante el período 2021:

Resumen Ensayos Rueda de Hamburgo 2021										
Asfalto Modificado										
N°	Identificación	TNM	Ligante	Temperatura	Δ - 20,000	Ciclos - Δ max	Creep Slope	Δ - SPI	Ciclos - SPI	Strip Slope
1	MAC-21-015	3/4	PG64H	49.9	-3.35	20,000	-0.0070%	N/A	N/A	N/A
				49.9	-3.58	20,000	-0.0100%	N/A	N/A	N/A
2	MAC-21-016	3/4	Convencional	50.0	-8.064	20,000	-0.0230%	N/A	N/A	N/A
				50.0	-7.93	20,000	-0.0175%	N/A	N/A	N/A
3	MAC-21-017	3/4	PG64H	50.0	-4.56	20,000	-0.0080%	N/A	N/A	N/A
				50.0	-4.3	20,000	-0.0275%	N/A	N/A	N/A
4	MAC-21-021	1/2	PG64H	50.1	-5.44	20,000	-0.0130%	N/A	N/A	N/A
				50.1	-4.28	20,000	-0.0105%	N/A	N/A	N/A
5	MAC-21-022	3/4	PG64H	50.0	-5.91	20,000	-0.0145%	N/A	N/A	N/A
				50.0	-4.31	20,000	-0.0095%	N/A	N/A	N/A
6	MAC-21-031	3/4	PG64H	50.0	-3.13	20,000	-0.0070%	N/A	N/A	N/A
				50.0	-5.35	20,000	-0.0100%	N/A	N/A	N/A
7	MAC-21-032	3/4	PG64	50.0	-7.96	20,000	-0.0235%	N/A	N/A	N/A
				50.0	-8.16	20,000	-0.0180%	N/A	N/A	N/A
8	MAC-21-033	3/4	PG70V	49.8	-3.73	20,000	-0.0070%	N/A	N/A	N/A
				49.8	-3.92	20,000	-0.0085%	N/A	N/A	N/A
9	MAC-21-034	3/4	PG70V	50.0	-4.5	20,000	-0.0110%	N/A	N/A	N/A
				50.0	-5.7	20,000	-0.0110%	N/A	N/A	N/A
10	MAC-21-035	3/4	PG64H	5.0	-3.4	20,000	-0.0120%	N/A	N/A	N/A
				50.0	-4.2	20,000	-0.0125%	N/A	N/A	N/A
11	MAC-21-037	3/4	PG64	49.2	-8.5	20,000	-0.0205%	N/A	N/A	N/A
				49.2	-9.9	20,000	-0.0206%	N/A	N/A	N/A
12	MAC-21-039	3/4	PG70V	50.9	-3.9	20,000	-0.0100%	N/A	N/A	N/A
				50.9	-3.6	20,000	-0.0085%	N/A	N/A	N/A
13	MAC-21-040	3/4	PG64H	50.1	-4.6	20,000	-0.0105%	N/A	N/A	N/A
				50.1	-3.4	20,000	-0.0100%	N/A	N/A	N/A
14	MAC-21-041	3/4	PG64H	50.0	-3.9	20,000	-0.0115%	N/A	N/A	N/A
				50.0	-3.8	20,000	-0.0105%	N/A	N/A	N/A
15	MAC-21-043	3/4	PG70V	50.4	-5.2	20,000	-0.0110%	N/A	N/A	N/A
				50.4	-4.4	20,000	-0.0175%	N/A	N/A	N/A
16	MAC-21-044	3/4	PG64H	50.6	-10.3	20,000	-0.0285%	N/A	N/A	N/A
				50.6	-10.1	20,000	-0.0305%	N/A	N/A	N/A
17	MAC-21-045	3/4	PG70V	49.8	-5.6	20,000	-0.0100%	N/A	N/A	N/A
				49.8	-5.9	20,000	-0.0120%	N/A	N/A	N/A
18	MAC-21-048	3/4	PG70V	49.9	-4.6	20,000	-0.0115%	N/A	N/A	N/A
				49.9	-6.7	20,000	-0.0180%	N/A	N/A	N/A
19	MAC-21-135	3/4	PG70H	50.0	-4.9	20,000	-0.0125%	N/A	N/A	N/A
				50.0	-4.6	20,000	-0.0185%	N/A	N/A	N/A

Tabla 6. Resultados obtenidos en Rueda de Hamburgo, Mezclas con Asfalto Modificado, año 2021.

Al observar las tablas 5 y 6 (páginas 53 y 54), puede observarse que todas las muestras de mezcla modificada cumplen el requisito de estar por debajo de 12.5 mm de deformación. Dado que se usan asfaltos más rígidos / flexibles, la mayoría de los resultados se encuentra entre 3 y 7 mm de deformación. Esto evidencia un amplio margen en diferencia de deformaciones entre asfaltos convencionales y asfaltos modificados.

Si procedemos a separar las muestras por grado de asfalto modificado, para buscar tendencias. En el gráfico de las mezclas con PG76 (ver figura 37, página 35) vemos que, con excepción de una, la tendencia es a experimentar deformaciones por debajo de 4 mm. En el caso de las mezclas con PG70 (ver figura 37, página 35), la mayoría de las mezclas se encuentran con deformaciones entre 3 y 7 mm. Y al revisar las muestras de mezcla con PG64 vemos que mantienen el comportamiento de las que usan PG70 (ver figura 37, página 35), con deformaciones entre 3 y 7 mm. Esto último llama la atención, pues se esperaría que al ser asfalto más blando presentara mayor deformación, sin embargo, las deformaciones se mantienen.

Sin embargo, con este primer lote de muestras de asfaltos modificados ensayados, se muestra una clara tendencia en que “a mayor grado de desempeño, menor deformación en resultados de ensayo de Rueda de Hamburgo”.

4.3 Análisis de resultados de ensayo de Rueda de Hamburgo, para mezclas modificadas año 2022/2023.

Con la decisión tomada de cambiar los parámetros de ensayo de la Rueda de Hamburgo, en los cuales se subió la temperatura de ensayo de 50°C a 55°C y se aumentó la cantidad de pasadas de 20,000 a 30,000; se obtuvieron valores más dispersos, los cuales se muestran en la siguiente tabla:

Resumen Ensayos Rueda de Hamburgo 2022										
General										
N°	Identificación	TNM	Ligante	Temperatura	Δ - 30,000	Ciclos - Δmax	Creep Slope	Δ - SPI	Ciclos - SPI	Strip Slope
1	MAC-22-003	3/4 "	64H	55.0°C	-9.8 mm.	30,000	-0.0220%	N/A	N/A	N/A
				55.0°C	-9.4 mm.	30,000	-0.0220%	N/A	N/A	N/A
2	MAC-22-013	3/4 "	PG70H	55.0°C	-12.8 mm.	30,000	-0.0220%	N/A	N/A	N/A
				55.0°C	-11.4 mm.	30,000	-0.0185%	N/A	N/A	N/A
3	MAC-22-015	3/4 "	64H	55.0°C	-5.4 mm.	30,000	-0.0140%	N/A	N/A	N/A
				55.0°C	-5.4 mm.	30,000	-0.0125%	N/A	N/A	N/A
4	MAC-22-019	1/2 "	PG70H	55.0°C	-7.9 mm.	30,000	-0.0190%	N/A	N/A	N/A
				55.0°C	-5.1 mm.	30,000	-0.0140%	N/A	N/A	N/A
5	MAC-22-023	3/4 "	64H	55.0°C	-11.1 mm.	30,000	-0.0295%	N/A	N/A	N/A
				55.0°C	-11.9 mm.	30,000	-0.0330%	N/A	N/A	N/A

Continúa tabla en siguiente hoja.

Resumen Ensayos Rueda de Hamburgo 2022										
General										
N°	Identificación	TNM	Ligante	Temperatura	Δ - 30,000	Ciclos - Δmax	Creep Slope	Δ - SPI	Ciclos - SPI	Strip Slope
6	MAC-22-028	1/2 "	PG70H	55.0°C	-13.4 mm.	30,000	-0.0193%	-4.7 mm.	16,380	-0.0737%
				55.0°C	-11.5 mm.	30,000	-0.0210%	-8.5 mm.	18,000	-0.0260%
7	MAC-22-035	3/4 "	64H	54.9°C	-7.0 mm.	30,000	-0.0103%	N/A	N/A	N/A
				54.9°C	-6.9 mm.	30,000	-0.0093%	N/A	N/A	N/A
8	MAC-22-036	3/4 "	64H	55.0°C	-5.1 mm.	30,000	-0.0057%	N/A	N/A	N/A
				55.0°C	-6.4 mm.	30,000	-0.0107%	N/A	N/A	N/A
9	MAC-22-037	3/4 "	64H	55.0°C	-27.1 mm.	30,000	-0.0490%	-10.5 mm.	14,010	-0.1818%
				55.0°C	-17.4 mm.	30,000	-0.0423%	-14.0 mm.	21,667	-0.0783%
10	MAC-22-037 (Replica)	3/4 "	64H	55.0°C	-8.7 mm.	30,000	-0.0170%	N/A	N/A	N/A
				55.0°C	-7.4 mm.	30,000	-0.0127%	N/A	N/A	N/A
11	MAC-22-039	1/2 "	PG70H	55.0°C	-11.8 mm.	30,000	-0.0157%	-4.7 mm.	17,879	-0.0487%
				55.0°C	-12.1 mm.	30,000	-0.0143%	-4.0 mm.	17,802	-0.0447%
12	MAC-22-040	3/4 "		55.0°C	-9.8 mm.	30,000	-0.0153%	N/A	N/A	N/A
				55.0°C	-14.4 mm.	30,000	-0.0303%	N/A	N/A	N/A
13	MAC-22-043	3/4 "	PG70V	55.0°C	-7.1 mm.	30,000	-0.0070%	N/A	N/A	N/A
				55.0°C	-8.9 mm.	30,000	-0.0117%	N/A	N/A	N/A
14	MAC-22-046	1/2 "		55.0°C	-20.0 mm.	30,000	-0.0643%	-10.5 mm.	8,780	-0.0917%
				55.0°C	-20.1 mm.	30,000	-0.0697%	-12.4 mm.	10,099	-0.1033%
15	MAC-22-047	1/2 "	PG70H	55.1°C	-15.6 mm.	30,000	-0.0260%	-7.6 mm.	18,550	-0.0697%
				55.1°C	-15.4 mm.	30,000	-0.0280%	N/A	N/A	N/A
16	MAC-22-048	1/2 "	PG70V	55.1°C	-5.7 mm.	30,000	-0.0113%	N/A	N/A	N/A
				55.1°C	-6.8 mm.	30,000	-0.0110%	N/A	N/A	N/A
17	MAC-22-049	1/2 "		55.1°C	-4.2 mm.	30,000	-0.0043%	N/A	N/A	N/A
				55.1°C	-3.8 mm.	30,000	-0.0040%	N/A	N/A	N/A
18	MAC-22-050	1/2 "	PG70H	55.0°C	-4.3 mm.	30,000	-0.0067%	N/A	N/A	N/A
				55.0°C	-4.1 mm.	30,000	-0.0063%	N/A	N/A	N/A
19	MAC-22-052	1/2 "		53.3°C	-4.1 mm.	30,000	-0.0063%	N/A	N/A	N/A
				53.3°C	-3.2 mm.	30,000	-0.0040%	N/A	N/A	N/A
20	MAC-22-054	1/2 "	PG70H	54.9°C	-11.3 mm.	30,000	-0.0183%	N/A	N/A	N/A
				54.9°C	-12.4 mm.	30,000	-0.0240%	N/A	N/A	N/A
21	MAC-22-057	1/2 "	PG70V	55.0°C	-1.4 mm.	30,000	-0.0037%	N/A	N/A	N/A
				55.0°C	-2.0 mm.	30,000	-0.0057%	N/A	N/A	N/A
22	MAC-22-062	3/4 "	PG64H	54.9°C	-3.6 mm.	30,000	-0.0043%	N/A	N/A	N/A
				54.9°C	-3.5 mm.	30,000	-0.0047%	N/A	N/A	N/A
23	MAC-22-063	3/4 "		55.0°C	-3.0 mm.	30,000	-0.0030%	N/A	N/A	N/A
				55.0°C	-2.3 mm.	30,000	-0.0027%	N/A	N/A	N/A
24	MAC-22-065	1/2 "	PG70V	55.1°C	-1.9 mm.	30,000	-0.0027%	N/A	N/A	N/A
				55.1°C	-1.9 mm.	30,000	-0.0023%	N/A	N/A	N/A
25	MAC-22-066	3/4 "		54.9°C	-7.4 mm.	30,000	-0.0150%	-6.0 mm.	21,176	-0.0207%
				54.9°C	-7.5 mm.	30,000	-0.0117%	-5.7 mm.	21,176	-0.0173%
26	MAC-22-067	1/2 "	PG70H	54.9°C	-18.6 mm.	30,000	-0.0320%	-10.0 mm.	15,584	-0.0577%
				54.9°C	-17.4 mm.	30,000	-0.0327%	-9.7 mm.	17,400	-0.0493%
27	MAC-22-069	3/4 "	PG64H	55.0°C	-2.9 mm.	30,000	-0.0030%	N/A	N/A	N/A
				55.0°C	-2.6 mm.	30,000	-0.0027%	N/A	N/A	N/A
28	MAC-22-070	1/2 "	PG70V	54.9°C	-3.5 mm.	30,000	-0.0037%	N/A	N/A	N/A
				54.9°C	-3.2 mm.	30,000	-0.0030%	N/A	N/A	N/A
29	MAC-22-072	3/4 "	PG70V	55.0°C	-4.2 mm.	30,000	-0.0060%	N/A	N/A	N/A
				55.0°C	-3.5 mm.	30,000	-0.0047%	N/A	N/A	N/A
30	MAC-22-074	1/2 "	PG70H	55.0°C	-3.7 mm.	30,000	-0.0037%	N/A	N/A	N/A
				55.0°C	-3.1 mm.	30,000	-0.0033%	N/A	N/A	N/A
31	MAC-22-075	1/2 "	PG70V	54.9°C	-1.9 mm.	30,000	-0.0023%	N/A	N/A	N/A
				54.9°C	-2.4 mm.	30,000	-0.0032%	N/A	N/A	N/A
32	MAC-22-076	3/4 "	PG64H	54.9°C	-3.4 mm.	30,000	-0.0043%	N/A	N/A	N/A
				54.9°C	-4.4 mm.	30,000	-0.0060%	N/A	N/A	N/A
33	MAC-22-079	1/2 "	PG70V	55.0°C	-4.1 mm.	30,000	-0.0057%	N/A	N/A	N/A
				55.0°C	-3.5 mm.	30,000	-0.0033%	N/A	N/A	N/A
34	MAC-22-080	1/2 "	PG70V	55.0°C	-3.1 mm.	30,000	-0.0060%	N/A	N/A	N/A
				55.0°C	-3.2 mm.	30,000	-0.0033%	N/A	N/A	N/A
35	MAC-22-081	1/2 "	PG70V	54.9°C	-5.0 mm.	30,000	-0.0107%	N/A	N/A	N/A
				54.9°C	-4.2 mm.	30,000	-0.0080%	N/A	N/A	N/A
36	MAC-22-082	1/2 "	PG70V	54.9°C	-7.8 mm.	30,000	-0.0097%	-6.1 mm.	20,000	-0.0177%
				54.9°C	-6.7 mm.	30,000	-0.0093%	N/A	N/A	N/A
37	MAC-22-083	1/2 "	PG64H	55.0°C	-13.0 mm.	30,000	-0.0267%	-7.3 mm.	20,571	-0.0617%
				55.0°C	-12.5 mm.	30,000	-0.0220%	-8.9 mm.	24,000	-0.0620%
38	MAC-22-084	1/2 "	PG70H	55.0°C	-2.3 mm.	30,000	-0.0033%	N/A	N/A	N/A
				55.0°C	-2.4 mm.	30,000	-0.0030%	N/A	N/A	N/A
39	MAC-22-088	3/4 "		54.9°C	-14.7 mm.	30,000	-0.0293%	10.6 mm.	22,609	-0.0523%
				54.9°C	-14.3 mm.	30,000	-0.0237%	7.8 mm.	18,641	-0.0580%
40	MAC-22-089	3/4 "	PG70V	55.0°C	-4.3 mm.	30,000	-0.0043%	N/A	N/A	N/A
				55.0°C	-4.0 mm.	30,000	-0.0043%	N/A	N/A	N/A
41	MAC-22-092	3/4 "	AC30	55.0°C	-2.6 mm.	30,000	-0.0033%	N/A	N/A	N/A
				55.0°C	-3.9 mm.	30,000	-0.0067%	-2.6 mm.	19,500	-0.0133%
42	MAC-22-093	1/2 "	PG70V	55.0°C	-6.0 mm.	30,000	-0.0107%	N/A	N/A	N/A
				55.0°C	-4.9 mm.	30,000	-0.0080%	N/A	N/A	N/A
43	MAC-22-094	3/4 "		55.0°C	-5.4 mm.	30,000	-0.0087%	-4.6 mm.	26,512	-0.0230%
				55.0°C	-7.1 mm.	30,000	-0.0093%	-5.7 mm.	25,500	-0.0293%
44	MAC-22-095	1/2 "	PG70V	55.0°C	-6.5 mm.	30,000	-0.0100%	N/A	N/A	N/A
				55.0°C	-7.8 mm.	30,000	-0.0130%	-6.9 mm.	25,263	-0.0193%
45	MAC-22-097	3/4 "	PG70V	55.0°C	-4.1 mm.	30,000	-0.0057%	N/A	N/A	N/A
				55.0°C	-3.6 mm.	30,000	-0.0037%	N/A	N/A	N/A
46	MAC-22-121	3/4 "	PG70V	55.0°C	-7.0 mm.	30,000	-0.0093%	N/A	N/A	N/A
				55.0°C	-7.7 mm.	30,000	-0.0087%	N/A	N/A	N/A
47	MAC-22-136	3/4 "	PG70V	55.0°C	-7.2 mm.	30,000	-0.0110%	N/A	N/A	N/A
				55.0°C	-6.1 mm.	30,000	-0.0083%	N/A	N/A	N/A

Tabla 7. Resultados obtenidos en Rueda de Hamburgo, Mezclas con Asfalto Modificado, año 2022.

Si bien en las mezclas de TMN $\frac{3}{4}$ " se mostró una mayor dispersión con el cambio de parámetros, para el caso de las mezclas de TMN $\frac{1}{2}$ " se pueden ver dos claros grupos: uno por encima de aproximadamente 8 mm de deformación, y otro sobre los 12.5 mm o más de deformación (ver figura 33, página 41).

Los gráficos Deformación vs Pendiente de Deformación muestran nuevamente fuertes correlaciones, mucho mayor a las mostradas para las muestras de los años 2020-2021. Podemos atribuir esto a que todas las muestras usaron asfalto modificado, o a que tienen granulometrías similares. Casi todas usan la misma fuente de agregado.

Llama la atención que, si bien el R^2 de las mezclas de $\frac{3}{4}$ " es mejor que el de las muestras de $\frac{1}{2}$ ", la línea de las mezclas de media es más tendida (o con menor pendiente).

Es de hacer notar que si bien siempre se mantienen bajas las cantidades de muestras que presentan tendencia al daño por humedad, estas aumentaron al aumentar la cantidad de pasadas. La mayoría de las fallas por humedad se presentan después de las 20,000 pasadas.

El comportamiento de las mezclas de $\frac{1}{2}$ " es sumamente llamativo, dado que una parte de ellas se deforman poco y otra parte casi se desarman. Todas estas mezclas usaron asfaltos modificados.

Localmente, la práctica es la de usar el agregado del TMN solamente lo suficiente como para que la mezcla clasifique como tal. El agregado grueso es uno de los elementos más caros de la mezcla, por lo que los productores usan la menor cantidad posible y luego "rellenan" con agregado más fino el resto de la granulometría. Es por esto por lo que, si bien los TMN son de $\frac{3}{4}$ " y $\frac{1}{2}$ ", las mezclas son bastante finas y no cuentan con el esqueleto pétreo robusto que se esperaría.

Siguiendo esta línea de argumentación, las mezclas de $\frac{1}{2}$ " son especialmente finas y ricas en asfalto.



Figura 46. Muestra de TMN $\frac{1}{2}$ " luego de terminar prueba

Esto quiere decir que todo el trabajo en efecto lo hace el mastic, pues es una mezcla densa, cerrada, apretada – a base de la cohesión entre el agregado fino y el asfalto. Esto funciona hasta cierto punto, siendo tan denso y apretado como para soportar la prueba, hasta que de repente ya no lo hace. Algunas muestras soportan toda la prueba, otras no. Al terminar el ensayo, las que lo pasan tienen en el surco de la rueda una superficie lisa y sellada a base de puro asfalto.

Pueda ser que algunas muestras pasen la prueba, pero es de esperar que su desempeño en campo sea dudoso. Esto dependerá grandemente del proyecto en el que se use la mezcla, siendo los grandes factores por considerar: la cantidad y tipo de tráfico que soportará y la velocidad con la que se conducirá dicho tráfico.

Para el año 2023, además de las 4 muestras de TMN ½”, se ensayaron 4 muestras de TMN ¾” con asfalto convencional. No se observaron grupos de muestras en la gráfica, mostrando los datos mayor dispersión que en los años anteriores (ver figura 49, página 45).

La mayoría de las muestras se mantienen por encima de los 10 mm de deformación, pero si se muestran aproximadamente 9 puntos por debajo de esa línea y entre ellos hay muestras de asfalto modificado como de asfalto convencional.

Nuevamente, las muestras que presentaron desnudamiento no fueron la mayoría, pero siempre se presentan cercanas a las 20,000 pasadas y cuando se presentan, lo hacen de manera estrepitosa. El R^2 de correlación para este año es el mejor, pero también muestra la pendiente más inclinada.



Figura 47. Muestra luego de fallar por desnudamiento (55°C – 30,000)

4.4 Análisis de resultados de ensayo Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) para muestras ensayadas en los años 2020/2021.

Las mezclas asfálticas analizadas con el ensayo MSCR, durante el período 2020/2021, presentaron resultados esperados de acuerdo con si se clasificaban como asfaltos convencionales o asfaltos modificados, evidenciando de forma clara, la recuperación elástica que le proveen los polímeros a las mezclas asfálticas modificadas. A continuación, se muestran la tabla de resultados obtenidos durante el año 2021:

ENSAYOS MSCR (MULTIPLE STRESS CREEP RECOVERY), AÑO 2020									
ID	Temp. (°C)	RE 0.1 (%)	RE 3.2 (%)	RE diff (%)	Jnr 0.1	Jnr 3.2	Jnr diff	Grado	Observación
ASF-20-151	64	10.03	5.02	49.99	1.16	1.32	13.89	H	Convencional
ASF-20-191	64	12.37	5.99	51.59	1.05	1.2	14.49	H	Convencional
ASF-20-208	64	13.75	5.99	56.42	1.04	1.22	17.58	H	Convencional
ASF-20-298	64	7.28	3.48	52.23	1.35	1.46	8.48	H	Convencional
ASF-20-304	64	10.93	4.34	60.3	1.26	1.45	15.16	H	Convencional
ASF-20-305	64	11.15	4.77	57.25	1.18	1.36	14.65	H	Convencional
ASF-20-314	64	7.65	4.11	46.24	1.17	1.25	7.48	H	Convencional
ASF-20-320	64	10.3	5.03	51.33	1.15	1.3	13.29	H	Convencional
ASF-20-321	64	9.62	4.49	53.33	1.22	1.38	13.47	H	Convencional
ASF-20-343	64	12.88	6.19	51.95	0.985	1.13	14.75	H	Convencional
ASF-20-352	64	12.83	5.71	55.53	1.05	1.22	16.12	H	Convencional
ASF-20-354	64	7.8	3.91	49.86	1.18	1.28	8.1	H	Convencional
ASF-20-374	64	11.67	5.08	56.48	1.13	1.3	15.37	H	Convencional
ASF-20-413	64	12.27	5.53	54.9	1.07	1.23	15.26	H	Convencional
ASF-20-420	64	9.57	3.55	62.95	1.39	1.58	13.49	H	Convencional
ASF-20-422	64	12.13	5.36	55.78	1.09	1.25	15.25	H	Convencional
ASF-20-428	64	10.71	4.29	59.98	1.25	1.43	14.06	H	Convencional
ASF-20-437	64	9.97	3.98	60.07	1.34	1.54	14.74	H	Convencional
ASF-20-469	64	8.96	3.21	64.16	1.44	1.64	13.28	H	Convencional
ASF-20-482	64	12.66	5.2	58.92	1.1	1.28	16.18	H	Convencional
ASF-20-496	64	11.87	5.27	55.61	1.1	1.27	15.59	H	Convencional
ASF-20-509	64	11.05	3.38	69.45	1.39	1.63	16.55	H	Convencional
ASF-20-510	64	11.98	5.28	55.91	1.1	1.27	15.51	H	Convencional
ASF-20-201	64	9.38	3.12	66.74	1.47	1.66	13.49	H	Convencional
ASF-20-415	64	10.09	3.92	61.11	1.52	1.73	14.07	H	Convencional
ASF-20-416	64	12.26	5.49	55.21	1.1	1.26	15.24	H	Convencional
ASF-20-520	64	13.02	5.27	59.53	1.14	1.34	18.01	H	Convencional
ASF-20-523	64	11.43	4.33	62.13	1.28	1.49	16.35	H	Convencional
ASF-20-524	64	10.49	4	61.87	1.35	1.56	15.5	H	Convencional
ID20-PMB-045	64	49.9	41.1	17.63	0.233	0.28	20.07	E	Modificado
ID20-PMB-048	64	47.84	38.59	19.34	0.319	0.384	20.26	E	Modificado
ID20-PMB-049	64	42.57	34	20.14	0.36	0.426	18.27	E	Modificado
ID20-PMB-050	64	41.87	31.36	25.1	0.473	0.578	22.14	V	Modificado
ID20-PMB-051	64	48.96	38.48	21.41	0.347	0.423	22.21	E	Modificado
ASF-20-009	70	63.16	51.9	17.82	0.465	0.614	32.03	V	Modificado
ASF-20-036	70	50.21	37.09	26.12	0.446	0.605	35.76	V	Modificado
ASF-20-053	70	65.23	55.2	15.38	0.337	0.442	31.04	E	Modificado
ASF-20-066	70	66.25	57.58	13.09	0.287	0.365	27.15	E	Convencional
ASF-20-067	70	58.1	46.63	19.75	0.356	0.477	33.8	E	Modificado
ASF-20-115	70	71.75	64.27	10.43	0.249	0.31	24.48	E	Modificado
ASF-20-119	70	69.29	61.43	11.35	0.242	0.304	25.98	E	Modificado
ASF-20-123	70	72.89	65.64	9.95	0.24	0.301	25.2	E	Modificado
ASF-20-131	70	66.13	57.21	13.49	0.31	0.393	26.91	E	Modificado

Tabla continúa en siguiente hoja.

ENSAYOS MSCR (MULTIPLE STRESS CREEP RECOVERY), AÑO 2020									
ID	Temp. (°C)	RE 0.1 (%)	RE 3.2 (%)	RE diff (%)	Jnr 0.1	Jnr 3.2	Jnr diff	Grado	Observación
ID20-PMB-20	70	67.82	60.14	11.32	0.291	0.355	22.05	E	Modificado
ASF-20-149	70	69.12	59.67	13.67	0.308	0.403	30.74	E	Modificado
ASF-20-127	70	6.17	1.8	70.78	2.55	2.98	16.92	H	Modificado
ID20-PMB-024	70	19.38	6.57	66.09	1.15	1.52	32.6	H	Modificado
ID20-PMB-025	70	60.91	49.85	18.16	0.462	0.588	27.39	V	Modificado
ASF-20-163	70	76.18	70.02	8.08	0.167	0.205	22.78	E	Modificado
ASF-20-174	70	71.26	63.94	10.27	0.232	0.291	25.3	E	Modificado
ASF-20-173	70	68.66	60.21	12.3	0.272	0.344	26.23	E	Modificado
ASF-20-184	70	66.64	56.83	14.72	0.396	0.512	29.29	V	Convencional
ID20-PMB-028	70	48.4	34.44	28.85	0.731	0.959	31.2	V	Modificado
ASF-20-194	70	67.14	60.17	10.39	0.286	0.326	21.68	E	Convencional
ASF-20-195	70	64.38	56.07	12.91	0.301	0.375	24.42	E	Modificado
ASF-20-197	70	69.7	62.63	10.14	0.242	0.298	23.18	E	Modificado
ASF-20-209	70	75.91	70.58	7.02	0.198	0.222	17.41	E	Modificado
ASF-20-215	70	67.01	57.24	14.58	0.349	0.453	29.95	E	Modificado
ASF-20-220	70	73.54	67.07	8.8	0.231	0.28	21.42	E	Modificado
ASF-20-108	70	59.89	47.81	20.17	0.447	0.598	33.7	V	Modificado
ASF-20-109	70	63.83	57.58	13.84	0.304	0.39	28.37	E	Modificado
ASF-20-110	70	66.48	57.23	13.91	0.321	0.41	27.66	E	Modificado
ASF-20-224	70	71.39	61.27	14.18	0.249	0.34	36.4	E	Modificado
ASF-20-227	70	5.54	1.42	74.32	2.87	3.34	16.26	E	Modificado
ASF-20-238	70	73.29	66.44	9.35	0.252	0.307	21.92	E	Modificado
ASF-20-245	70	3.51	0.6	82.98	3.7	4.12	11.47	S	Modificado
ASF-20-248	70	74.8	68.69	8.18	0.21	0.255	21.38	E	Modificado
ASF-20-253	70	65.15	56.06	13.95	0.335	0.425	26.83	E	Modificado
ASF-20-267	70	67	58.81	12.23	0.324	0.404	24.8	E	Modificado
ASF-20-278	70	69.85	62.73	10.19	0.231	0.286	23.61	E	Modificado
ASF-20-301	70	62.02	50.54	18.51	0.396	0.522	31.71	E	Modificado
ASF-20-325	70	58.16	47.5	18.32	0.42	0.542	29.07	V	Modificado
ASF-20-318	70	57.01	47.1	17.38	0.339	0.434	27.93	E	Modificado
ASF-20-338	70	62.09	48.42	22.02	0.309	0.443	43.15	E	Modificado
ASF-20-355	70	61.95	52.04	16	0.385	0.502	30.17	V	Modificado
ASF-20-373	70	71.15	64.04	9.99	0.247	0.304	23.37	E	Modificado
ASF-20-376	70	70.12	61.87	11.76	0.279	0.354	27.23	E	Modificado
ASF-20-393	70	75.71	69.9	7.69	0.136	0.169	23.7	E	Modificado
ASF-20-403	70	79.04	73.84	6.58	0.128	0.158	23.04	E	Modificado
ASF-20-432	70	66.79	58.7	12.12	0.323	0.4	23.86	E	Modificado
ASF-20-434	70	52.14	40.23	22.84	0.486	0.642	32.08	V	Modificado
ASF-20-458	70	70.65	63.13	10.64	0.24	0.3	24.97	E	Modificado
ASF-20-445	70	64.74	54.52	15.78	0.361	0.471	30.56	E	Modificado
ASF-20-472	70	68.22	58.76	13.86	0.335	0.436	30.11	E	Modificado
ASF-20-489	70	64.69	55.47	14.25	0.321	0.413	28.43	E	Modificado
ASF-20-516	70	51.57	37.7	26.91	0.54	0.726	34.35	V	Modificado
ASF-20-518	70	47.66	33.06	30.63	0.69	0.928	34.43	V	Modificado
ASF-20-522	70	42.73	28.36	33.64	0.768	1.03	33.49	H	Modificado
ASF-20-521	70	43.16	29.19	32.38	0.716	0.95	32.57	V	Modificado
ASF-20-527	70	47.63	33.28	30.13	0.665	0.886	33.23	V	Modificado

Tabla 8. Resultados obtenidos en ensayo MSCR, Mezclas Asfálticas, año 2020.

Al observar los resultados y compararlos con la figura 28 (página 36), puede identificarse que los asfaltos convencionales ensayados, poseen una clasificación: PG64H, sin embargo, no poseen recuperación elástica, al ubicarse la gran mayoría bajo la curva del gráfico de cumplimiento de recuperación elástica. Caso contrario para los asfaltos modificados que fueron ensayados (ver figura 29, página 37), los cuales presentaron excelente respuesta elástica, lo cual se los provee los polímeros incorporados al asfalto.

A continuación se muestran los resultados de ensayos MSCR 2021:

ENSAYOS MSCR (MULTIPLE STRESS CREEP RECOVERY), AÑO 2021									
ID	Temp. (°C)	RE 0.1 (%)	RE 3.2 (%)	RE diff (%)	Jnr 0.1	Jnr 3.2	Jnr diff	Grado	Observación
ASF-21-002	64	7.66	2.64	65.61	1.66	1.87	12.52	H	Modificado
ASF-21-063	64	49.9	38.47	22.91	0.357	0.452	26.56	E	Modificado
ASF-21-072	64	48.06	37.44	22.1	0.356	0.442	24.19	E	Modificado
ASF-21-083	64	44.7	34.47	22.89	0.388	0.479	23.42	E	Modificado
ASF-21-064	64	8.44	3.34	60.43	1.44	1.61	11.63	H	Modificado
ASF-21-113	64	73.97	66.33	10.33	0.129	0.174	35.08	E	Convencional
ASF-21-117	64	69.71	59.98	13.95	0.119	0.165	38.03	E	Modificado
ASF-21-083	64	38.08	25.22	33.76	0.663	0.849	28.07	V	Modificado
ASF-21-136	64	46.24	35.76	22.66	0.369	0.455	23.27	E	Modificado
ASF-21-139	64	68.16	60.84	10.74	0.166	0.198	19.37	E	Convencional
ASF-21-139	64	36.06	24.41	32.26	0.617	0.764	23.94	V	Modificado
ASF-21-140	64	19.76	11.99	39.32	0.596	0.681	14.26	V	Convencional
ASF-21-138	64	53.34	42.88	19.61	0.298	0.376	25.94	E	Modificado
ASF-21-148	64	49.79	38.75	22.16	0.352	0.442	25.49	E	Convencional
ASF-21-153	64	63.56	53.68	15.55	0.192	0.257	33.89	E	Modificado
ASF-21-165	64	10.93	4.28	60.86	1.32	1.52	15.14	H	Modificado
ASF-21-166	64	52.19	39.27	24.74	0.653	0.854	30.79	V	Modificado
ASF-21-172	64	49.1	38.33	21.94	0.345	0.43	24.55	E	Modificado
ASF-21-174	64	50.24	42.82	14.78	0.21	0.252	20.11	E	Modificado
ASF-21-185	64	13.62	5.9	56.69	1.14	1.33	15.93	H	Modificado
ASF-21-186	64	65.98	56.41	14.5	0.218	0.29	33.3	E	Modificado
ASF-21-195	64	9.76	3.66	62.53	1.48	1.7	14.83	H	Modificado
ASF-21-176	64	12.94	5.71	55.89	1.24	1.43	15.77	H	Modificado
ASF-21-210	64	51.4	40.78	20.66	0.349	0.44	26.09	E	Modificado
ASF-21-199	64	51.69	39.4	23.77	0.366	0.471	28.74	E	Modificado
ASF-21-213	64	12.02	4.92	59.08	1.18	1.36	15.48	H	Modificado
ASF-21-227	64	64.57	55.16	14.58	0.217	0.276	27.17	E	Modificado
ASF-21-221	64	8.93	3.28	63.21	1.5	1.7	13.38	H	Modificado
ASF-21-232	64	44.75	33.24	25.72	0.427	0.535	25.48	V	Modificado
ASF-21-258	64	61.22	51.07	16.58	0.245	0.314	28.43	E	Modificado
ASF-21-259	64	78.06	72.87	6.65	0.0917	0.111	21	E	Modificado
ASF-21-275	64	53.27	25.43	52.26	0.549	0.958	74.57	V	Modificado
ASF-21-279	64	72.94	66.42	8.94	0.139	0.169	21.78	E	Convencional
ASF-21-299	64	62.22	53.41	14.15	0.206	0.258	25.12	E	Convencional
ASF-21-327	64	63.19	53.5	15.33	0.237	0.302	27.4	E	Modificado
ASF-21-358	64	52.53	42.27	19.53	0.322	0.401	24.72	E	Modificado
ASF-21-379	64	65.22	57.51	11.82	0.153	0.189	23.69	E	Modificado
ASF-21-402	64	58.93	48.64	17.46	0.26	0.332	27.5	E	Convencional
ASF-21-418	64	62.47	54.05	13.47	0.19	0.235	23.83	E	Modificado
ASF-21-437	64	10.14	4.31	57.45	1.28	1.46	14	H	Modificado
ASF-21-442	64	62.93	54.34	13.65	0.196	0.244	24.44	E	Convencional
ASF-21-443	64	60.11	50.3	16.31	0.24	0.303	26.26	E	Modificado
ASF-21-463	64	66.15	57.28	13.41	0.201	0.254	26.67	E	Modificado
ASF-21-471	64	9.54	3.06	67.93	1.7	2.04	19.67	S	Modificado
ASF-21-466	64	4.26	1.25	70.8	1.95	2.09	7.52	S	Convencional
ASF-21-487	64	53.61	46.63	13.03	0.173	0.203	17.1	E	Convencional
ASF-21-502	64	59.28	49.59	16.34	0.247	0.311	26	E	Modificado
ASF-21-506	64	63.83	54.99	13.86	0.195	0.245	25.45	E	Modificado
ASF-21-502	64	59.28	49.59	16.34	0.247	0.311	26	E	Modificado
ASF-21-506	64	63.83	54.99	13.86	0.195	0.245	25.45	E	Modificado
ASF-21-482	64	45.11	33.97	24.7	0.437	0.546	25.05	V	Modificado
ASF-21-519	64	8.39	2.73	67.48	1.81	2.1	15.76	S	Modificado
ASF-21-482	64	85.76	81.22	5.29	0.0283	0.038	34.36	E	Modificado
ASF-21-441	64	63.14	53.8	14.8	0.213	0.27	26.8	E	Modificado
ASF-21-559	64	65.44	56.72	13.33	0.199	0.25	25.52	E	Modificado

Tabla continúa en siguiente hoja.

ENSAYOS MSCR (MULTIPLE STRESS CREEP RECOVERY), AÑO 2021									
ID	Temp. (°C)	RE 0.1 (%)	RE 3.2 (%)	RE diff (%)	Jnr 0.1	Jnr 3.2	Jnr diff	Grado	Observación
ASF-21-600	64	6.11	2.04	66.6	1.76	1.92	9.09	H	Modificado
ASF-21-603	64	58.14	48.69	16.25	0.237	0.296	24.9	E	Modificado
ASF-21-637	64	8.63	3.07	64.43	1.33	1.47	10.52	H	Modificado
ASF-21-638	64	55.18	43.86	20.5	0.337	0.433	28.68	E	Modificado
ASF-21-647	64	51.75	39.57	23.54	0.412	0.53	28.68	V	Modificado
ASF-21-654	64	54.44	42.95	21.11	0.342	0.439	28.62	E	Modificado
ASF-21-651	64	48.41	35.14	27.42	0.413	0.544	31.93	V	Modificado
ASF-21-658	64	13.17	6.45	50.99	1.03	1.17	14.28	H	Modificado
ASF-21-666	64	64.62	56.4	12.72	0.176	0.219	24.14	E	Convencional
ASF-21-665	64	63.05	53.62	14.96	0.239	0.302	26	E	Modificado
ASF-21-687	64	2.43	0.29	88.02	4.53	5.01	10.48	S	Modificado
ASF-21-708	64	23.37	15.16	35.16	0.69	0.801	16.22	V	Modificado
ASF-21-707	64	64.52	55.32	14.25	0.209	0.267	27.64	E	Modificado
ASF-21-696	64	61.39	51.58	15.98	0.235	0.301	27.78	E	Modificado
ASF-21-706	64	59.74	50.31	15.78	0.242	0.303	25.11	E	Modificado
ASF-21-729	64	78.24	70.09	10.41	0.0788	0.114	44.97	E	Modificado
ASF-21-733	64	47.73	38.6	19.14	0.172	0.215	25.24	E	Modificado
ASF-21-696	64	61.39	51.58	15.98	0.235	0.301	27.78	E	Modificado
ASF-21-706	64	59.74	50.31	15.78	0.242	0.303	25.11	E	Convencional
ASF-21-729	64	78.24	70.09	10.41	0.0788	0.114	44.97	E	Convencional
ASF-21-733	64	47.73	38.6	19.14	0.172	0.215	25.24	E	Modificado
ASF-21-717	64	38.89	27.9	28.25	0.52	0.64	23.11	V	Modificado
ASF-21-718	64	54.11	43.89	18.88	0.303	0.379	25.02	E	Convencional
ASF-21-120	70	68.64	57.49	16.25	0.184	0.26	41.52	E	Modificado
ASF-21-004	70	46.18	29.94	35.16	0.859	1.18	37.69	H	Modificado
ASF-21-020	70	41.23	27.54	33.2	0.651	0.869	33.43	V	Modificado
ASF-21-046	70	60.41	49.29	18.4	0.339	0.446	31.84	E	Modificado
ASF-21-045	70	62.89	49.94	20.59	0.453	0.611	34.82	V	Modificado
ASF-21-069	70	65.12	53.37	18.04	0.318	0.436	37.24	E	Modificado
ASF-21-049	70	69.9	62.03	11.26	0.245	0.305	24.44	E	Modificado
ASF-21-061	70	49.78	34.61	30.48	0.705	0.932	32.35	V	Modificado
ASF-21-062	70	57.66	44.52	22.79	0.527	0.68	28.87	V	Modificado
ASF-21-071	70	56.45	44.09	21.9	0.325	0.44	35.58	E	Modificado
ASF-21-073	70	74.05	66.09	10.76	0.25	0.318	26.89	E	Modificado
ASF-21-092	70	61.03	50.15	17.83	0.358	0.47	31.47	E	Modificado
ASF-21-102	70	62.64	51.72	17.43	0.307	0.411	33.75	E	Modificado
ASF-21-105	70	52.67	42.47	19.36	0.459	0.573	24.75	V	Modificado
ASF-21-109	70	55.42	42.62	23.09	0.535	0.694	29.61	V	Modificado
ASF-21-119	70	51.01	36.79	27.88	0.584	0.774	32.56	V	Modificado
ASF-21-134	70	47.65	29.41	38.28	0.429	0.659	53.54	V	Modificado
ASF-21-142	70	57.4	39.45	31.26	0.316	0.494	56.28	E	Modificado
ASF-21-144	70	40.03	26.19	34.58	1.01	1.32	31.1	H	Modificado
ASF-21-150	70	65.72	55.37	15.76	0.335	0.432	29.1	E	Modificado
ASF-21-154	70	54.09	42.28	21.83	0.676	0.863	27.6	V	Modificado
ASF-21-157	70	46.87	33.16	29.26	0.883	1.15	30.32	H	Modificado
ASF-21-159	70	52.07	38.18	26.68	0.57	0.757	32.79	V	Modificado
ASF-21-173	70	76.25	69.36	9.04	0.0853	0.116	36.57	E	Modificado
ASF-21-184	70	60.78	49.21	19.03	0.444	0.562	26.68	V	Modificado
ASF-21-185	70	69.35	61.27	11.65	0.383	0.478	24.9	E	Modificado
ASF-21-186	70	54.41	40.1	26.31	0.497	0.677	36.02	V	Modificado
ASF-21-192	70	65.58	56	14.61	0.478	0.607	26.99	V	Modificado
ASF-21-175	70	51.06	37.44	26.67	0.552	0.72	30.45	V	Modificado
ASF-21-198	70	65.89	56.38	14.43	0.442	0.562	27.3	V	Modificado
ASF-21-211	70	55.49	40.77	26.52	0.548	0.746	36.18	V	Modificado
ASF-21-212	70	40.07	25.37	36.69	0.747	1.01	34.88	H	Modificado
ASF-21-217	70	54.28	39.57	27.11	0.559	0.748	33.82	V	Modificado

Tabla continúa en siguiente hoja.

ENSAYOS MSCR (MULTIPLE STRESS CREEP RECOVERY), AÑO 2021									
ID	Temp. (°C)	RE 0.1 (%)	RE 3.2 (%)	RE diff (%)	Jnr 0.1	Jnr 3.2	Jnr diff	Grado	Observación
ASF-21-220	70	39.81	25.89	34.96	0.854	1.12	31.54	H	Modificado
ASF-21-237	70	46.66	31.55	32.39	0.772	1.04	34.25	H	Modificado
ASF-21-241	70	47.39	32.91	30.55	0.653	0.871	33.26	V	Modificado
ASF-21-244	70	52.46	38.1	27.37	0.584	0.782	33.87	V	Modificado
ASF-21-254	70	43.1	28.22	34.51	0.806	1.07	33.25	H	Modificado
ASF-21-256	70	70.01	60.51	13.57	0.281	0.36	27.99	E	Modificado
ASF-21-262	70	48.41	32.67	32.51	0.697	0.949	36.15	V	Modificado
ASF-21-263	70	54.99	39.98	27.31	0.542	0.744	37.29	V	Modificado
ASF-21-264	70	50.97	35.72	29.91	0.616	0.838	35.99	V	Modificado
ASF-21-283	70	46.7	31.87	31.75	0.686	0.927	35.03	V	Modificado
ASF-21-289	70	47.21	31.17	33.97	0.766	1.05	37.28	H	Modificado
ASF-21-278	70	52.14	38.44	26.27	0.541	0.717	32.59	V	Modificado
ASF-21-284	70	52.83	38.91	26.34	0.575	0.756	31.57	V	Modificado
ASF-21-300	70	47.59	32.81	31.06	0.691	0.925	33.8	V	Modificado
ASF-21-302	70	36.96	23.07	37.58	0.917	1.2	31.29	H	Modificado
ASF-21-064	70	68.99	59.18	14.22	0.285	0.362	26.88	E	Modificado
ASF-21-308	70	58.17	48.2	17.14	0.29	0.368	26.88	E	Modificado
ASF-21-322	70	46.66	32.75	29.81	0.656	0.865	31.89	V	Convencional
ASF-21-325	70	66.86	58.64	12.29	0.563	0.651	15.5	V	Modificado
ASF-21-341	70	48.54	33.54	30.9	0.694	0.934	34.61	V	Modificado
ASF-21-359	70	50.99	37.45	26.55	0.575	0.755	31.3	V	Modificado
ASF-21-366	70	68.84	61.23	11.06	0.294	0.357	21.48	E	Modificado
ASF-21-379	70	55.07	41.74	24.19	0.429	0.574	33.91	V	Modificado
ASF-21-387	70	64.4	55.49	13.83	0.292	0.37	26.91	E	Modificado
ASF-21-388	70	49.13	23.44	52.29	0.626	1.07	71.13	H	Modificado
ASF-21-389	70	51.03	36.66	28.17	0.561	0.755	34.56	V	Modificado
ASF-21-400	70	52.66	37.61	28.58	0.611	0.826	35.09	V	Modificado
ASF-21-414	70	55.95	43.09	22.99	0.444	0.583	31.52	V	Modificado
ASF-21-435	70	51.11	37.13	27.36	0.565	0.752	33.07	V	Modificado
ASF-21-438	70	47.73	34.1	28.56	0.591	0.775	31.18	V	Modificado
ASF-21-439	70	58.43	42.81	26.74	0.362	0.522	44.07	V	Modificado
ASF-21-444	70	68.95	60.92	11.64	0.279	0.348	24.65	E	Modificado
ASF-21-446	70	51.58	36.34	29.54	0.616	0.838	36.13	V	Modificado
ASF-21-455	70	66.51	57.97	12.84	0.319	0.396	24.23	E	Modificado
ASF-21-459	70	42.53	28.97	31.87	0.731	0.955	30.54	V	Modificado
ASF-21-462	70	51.93	37.7	27.4	0.549	0.736	34.01	V	Modificado
ASF-21-473	70	19.22	2.31	87.97	1.71	3.01	76.34	S	Modificado
ASF-21-480	70	48.4	33.91	29.94	0.707	0.943	33.31	V	Modificado
ASF-21-490	70	56.97	47.82	16.07	0.243	0.303	24.86	E	Modificado
ASF-21-507	70	15.84	2.78	84.42	1.56	2.41	54.48	S	Modificado
ASF-21-513	70	61.21	28.41	53.58	0.381	0.806	111.57	V	Modificado
ASF-21-515	70	47.75	33.08	30.72	0.655	0.873	33.21	V	Modificado
ASF-21-521	70	74.66	68.07	8.83	0.168	0.206	22.61	E	Modificado
ASF-21-548	70	72.26	64.45	10.81	0.251	0.314	25.06	E	Modificado
ASF-21-553	70	49.96	36.05	27.83	0.593	0.782	31.92	V	Modificado
ASF-21-581	70	50.52	36.54	27.67	0.574	0.76	32.4	V	Modificado
ASF-21-594	70	14.89	1.98	86.71	1.89	3.01	59.83	S	Modificado
ASF-21-636	70	18.22	5.03	72.41	1.13	1.62	43.96	H	Modificado
ASF-21-652	70	41.79	27.25	34.79	0.791	1.07	35.08	H	Modificado
ASF-21-674	70	73.09	66.45	9.09	0.161	0.193	20.14	E	Modificado
ASF-21-676	70	47.72	33.38	30.05	0.585	0.778	32.97	V	Modificado
ASF-21-680	70	60.06	48.88	18.62	0.329	0.426	29.32	E	Modificado
ASF-21-729	70	73.79	63.76	13.6	0.157	0.238	51.44	E	Modificado
ASF-21-369	70	52.25	37.58	28.07	0.549	0.745	35.78	V	Modificado

Tabla 9. Resultados obtenidos en ensayo MSCR, Mezclas Asfálticas, año 2021.

A diferencia del año 2020, las mezclas que habían sido clasificadas como asfaltos convencionales, cuyo grado de desempeño corresponde a PG64H; para el año 2021, los

resultados de esta clasificación presentan en su mayoría recuperación elástica. Esto no se debe a que la reología del asfalto convencional haya mejorado, sino a que los asfaltos fueron modificados con polímeros para presentar recuperación elástica a una temperatura de ensayo de 64°C. Instituciones como el Fondo de Conservación Vial (Fovial), iniciaron a solicitar asfaltos modificados, clasificados como PG64H, para actividades de colocación de carpetas asfálticas; lo que obligó a productores de asfaltos modificados, a cumplir con los parámetros de recuperación elástica exigidos en la curva de la AASHTO R92 (gráfica de cumplimiento de recuperación elástica). Para el caso de los asfaltos clasificados como PG70 o mayores, presentan resultados similares que el año 2020.

4.5 Análisis de resultados de ensayo Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) para muestras ensayadas en los años 2022/2023.

Para el período 2022/2023, creció el consumo de asfalto tipo PG70V para construcción de carpetas asfálticas, dejando relegado el asfalto modificado PG64H. Algo que es congruente con las temperaturas ambientes que se experimentan en las diferentes zonas del país. A continuación, se presenta tabla de resultados 2022 de asfaltos ensayados bajo normativa MSCR.

ENSAYOS MSCR (MULTIPLE STRESS CREEP RECOVERY), AÑO 2022									
ID	Temp. (°C)	RE 0.1 (%)	RE 3.2 (%)	RE diff (%)	Jnr 0.1	Jnr 3.2	Jnr diff	Grado	Observación
ASF-22-001	64	76.86	69.98	8.95	0.0627	0.0847	35.1	E	Modificado
ASF-22-004	64	51.79	44.26	14.54	0.132	0.16	21.26	E	Modificado
ASF-22-005	64	1062	4.66	56.17	1.2	1.37	13.68	H	Convencional
ASF-22-008	64	52.69	46.03	12.64	0.121	0.143	18.73	E	Modificado
ASF-22-022	64	47.52	39.42	17.05	0.151	0.183	21.78	E	Modificado
ASF-22-030	64	72.91	51.44	29.46	0.0746	0.147	92.2	E	Modificado
ASF-22-041	64	53.8	45.97	14.57	0.157	0.191	21.71	E	Modificado
ASF-22-059	64	20.4	9.64	52.73	0.656	0.827	25.98	V	Modificado
ASF-22-071	64	18.11	7.18	60.35	0.79	1.03	30.78	H	Modificado
ASF-22-092	64	23.09	6.7	70.97	0.765	1.17	52.37	H	Modificado
ASF-22-098	64	62.36	52.95	15.08	0.226	0.287	26.62	E	Modificado
ASF-22-131	64	62.77	54.95	12.46	0.198	0.241	21.61	E	Modificado
ASF-22-174	64	54.38	44.02	19.04	0.313	0.391	25	E	Modificado
ASF-22-179	64	26.18	15.93	39.16	1.02	1.2	16.96	H	Modificado
ASF-22-182	64	21.1	11.73	44.38	1.19	1.37	15.62	H	Modificado
ASF-22-196	64	56.99	48.36	15.14	0.249	0.304	21.91	E	Modificado
ASF-22-198	64	40.35	28.52	29.32	0.497	0.619	24.46	V	Modificado
ASF-22-218	64	33.11	23.05	30.38	0.833	0.98	17.55	V	Modificado
ASF-22-219	64	62.39	54.1	13.29	0.211	0.259	22.89	E	Modificado
ASF-22-220	64	10.96	4.68	57.27	1.19	1.37	14.4	H	Modificado
ASF-22-230	64	17.14	9.79	42.86	0.92	1.06	15.76	H	Modificado
ASF-22-243	64	32.68	20.76	36.49	0.98	1.19	21.14	H	Modificado
ASF-22-418	64	56.28	47.66	15.32	0.245	0.299	21.95	E	Modificado
ASF-22-260	64	59.39	50.39	15.15	0.243	0.302	24.26	E	Convencional

Tabla continúa en siguiente hoja.

ENSAYOS MSCR (MULTIPLE STRESS CREEP RECOVERY), AÑO 2022									
ID	Temp. (°C)	RE 0.1 (%)	RE 3.2 (%)	RE diff (%)	Jnr 0.1	Jnr 3.2	Jnr diff	Grado	Observación
ASF-22-271	64	9.53	3.31	65.23	1.73	1.93	11.73	H	Modificado
ASF-22-294	64	39.15	25.27	30.4	0.713	0.866	21.4	V	Modificado
ASF-22-193	64	28.82	17.75	38.42	0.637	0.778	22.21	V	Modificado
ASF-22-194	64	47.55	36.94	22.3	0.4	0.499	24.6	E	Convencional
ASF-22-195	64	46.83	37.43	20.06	0.385	0.467	21.38	E	Modificado
ASF-22-197	64	56.04	46.55	16.93	0.285	0.354	24.29	E	Modificado
ASF-22-281	64	30.53	19.56	35.92	0.992	1.19	19.55	H	Modificado
ASF-22-292	64	56.27	47.15	16.21	0.258	0.319	23.64	E	Modificado
ASF-22-306	64	35.86	24.61	31.37	0.746	0.905	21.32	V	Modificado
ASF-22-286	64	41.28	30.89	25.18	0.501	0.618	23.35	V	Modificado
ASF-22-297	64	46.85	36.1	22.94	0.459	0.568	23.98	V	Modificado
ASF-22-300	64	17.06	9.59	43.8	0.965	1.12	16.03	H	Modificado
ASF-22-325	64	42.6	20.4	52.1	0.791	1.16	46.78	H	Modificado
ASF-22-332	64	41.71	30.5	26.88	0.599	0.734	22.67	V	Modificado
ASF-22-333	64	59.82	51.1	14.56	0.245	0.301	22.85	E	Modificado
ASF-22-346	64	60.84	51.6	15.19	0.249	0.31	24.64	E	Modificado
ASF-22-347	64	62.42	53.94	13.59	0.219	0.27	23.18	E	Modificado
ASF-22-343	64	58.27	49.13	15.69	0.248	0.309	24.37	E	Modificado
ASF-22-355	64	57.16	48.58	15.01	0.259	0.314	21.37	E	Modificado
ASF-22-368	64	56.65	47.33	16.44	0.275	0.337	22.78	E	Modificado
ASF-22-389	64	63.68	55.74	12.48	0.192	0.236	22.87	E	Modificado
ASF-22-402	64	60.85	51.74	14.98	0.24	0.297	24.11	E	Modificado
ASF-22-429	64	65.29	60.02	8.07	0.124	0.145	16.99	E	Modificado
ASF-22-432	64	56.19	47.25	15.91	0.272	0.332	22.01	E	Modificado
ASF-22-443	64	58.83	49.61	15.68	0.258	0.322	24.82	E	Modificado
ASF-22-454	64	57.46	47.5	17.32	0.307	0.383	24.85	E	Modificado
ASF-22-466	64	43.67	33.99	22.17	0.424	0.513	21.06	V	Modificado
ASF-22-469	64	33.26	24	27.83	0.513	0.61	18.81	V	Modificado
ASF-22-472	64	59.69	51.39	13.9	0.224	0.272	21.54	E	Modificado
ASF-22-484	64	60.37	48.7	19.33	0.362	0.474	30.93	E	Modificado
ASF-22-486	64	56.72	48.28	14.87	0.246	0.297	20.75	E	Modificado
ASF-22-500	64	51.05	41.28	19.13	0.331	0.407	22.99	E	Modificado
ASF-22-505	64	40.6	31.6	22.17	0.394	0.47	19.44	E	Modificado
ASF-22-519	64	55.45	45.42	18.09	0.306	0.383	25.13	E	Modificado
ASF-22-533	64	69.63	62.4	10.38	0.139	0.173	24.48	E	Modificado
ASF-22-543	64	53.26	43.39	18.52	0.327	0.406	23.98	E	Modificado
ASF-22-544	64	10.55	4.14	60.77	1.34	1.54	14.93	H	Convencional
ASF-22-566	64	70.11	62.4	10.99	0.166	0.208	25.46	E	Modificado
ASF-22-590	64	38.11	25.4	33.34	0.822	1.02	24.53	H	Convencional
ASF-22-591	64	44.6	32.61	26.89	0.547	0.688	25.65	V	Modificado
ASF-22-593	64	12.81	6.26	51.11	1.04	1.18	14.19	H	Modificado
ASF-22-578	64	11.12	4.96	55.43	1.18	1.35	13.93	H	Modificado
ASF-22-585	64	57.71	49.21	14.72	0.225	0.274	21.94	E	Convencional
ASF-22-616	64	60.47	52.17	13.72	0.228	0.278	22.12	E	Modificado
ASF-22-637	64	12.22	5.66	53.69	1.05	1.2	14.22	H	Convencional
ASF-22-658	64	65.03	57.53	11.53	0.188	0.229	22.13	E	Modificado
ASF-22-645	64	60.11	51.73	13.95	0.227	0.277	22.25	E	Modificado
ASF-22-677	64	69.47	62.75	9.67	0.151	0.184	21.77	E	Modificado
ASF-22-689	64	65.54	58.58	10.63	0.186	0.224	20.42	E	Modificado
ASF-22-701	64	69.28	61.88	10.67	0.157	0.196	24.63	E	Modificado
ASF-22-710	64	63.18	55.33	12.42	0.223	0.275	23.28	E	Modificado
ASF-22-721	64	55.01	45.95	16.47	0.265	0.327	23.32	E	Modificado
ASF-22-728	64	66.07	58.52	11.43	0.187	0.229	22.86	E	Modificado
ASF-22-741	64	61.43	53.65	12.67	0.193	0.234	21.65	E	Modificado
ASF-22-748	64	11.02	4.19	62.01	1.43	1.66	16.74	H	Modificado
ASF-22-746	64	57.51	48.5	15.67	0.257	0.32	24.82	E	Convencional

Tabla continúa en siguiente hoja.

ENSAYOS MSCR (MULTIPLE STRESS CREEP RECOVERY), AÑO 2022									
ID	Temp. (°C)	RE 0.1 (%)	RE 3.2 (%)	RE diff (%)	Jnr 0.1	Jnr 3.2	Jnr diff	Grado	Observación
ASF-22-758	64	68.17	60.79	10.82	0.176	0.217	23.67	E	Modificado
ASF-22-774	64	63.1	55.49	12.05	0.203	0.246	21.51	E	Modificado
ASF-22-789	64	63.57	55.8	12.23	0.198	0.242	22.56	E	Modificado
ASF-22-798	64	64.95	57.5	11.47	0.173	0.213	22.74	E	Modificado
ASF-22-800	64	13.46	5.2	61.38	1.12	1.32	17.36	H	Convencional
ASF-22-814	64	53.84	43.13	19.9	0.415	0.511	23.09	V	Modificado
ASF-22-806	64	25.74	19.78	23.16	0.339	0.38	11.83	H	Modificado
ASF-22-843	64	65.37	57.7	11.72	0.19	0.233	22.51	E	Modificado
ASF-22-852	64	59.74	51.6	13.63	0.208	0.255	22.98	E	Modificado
ASF-22-857	64	65.95	58.38	11.47	0.172	0.212	23.16	E	Modificado
ASF-22-863	64	58.62	49.39	15.75	0.302	0.367	21.79	E	Modificado
ASF-22-872	64	65.11	56.26	13.6	0.226	0.287	26.94	E	Modificado
ASF-22-885	64	64.77	56.9	12.15	0.148	0.189	27.85	E	Modificado
ASF-22-896	64	3.56	0.92	74.09	2.25	2.41	6.98	S	Modificado
ASF-22-886	64	31.04	20.18	35	0.55	0.665	20.92	V	Modificado
ASF-22-890	64	66.79	58.72	12.09	0.187	0.235	25.37	E	Convencional
ASF-22-910	64	68.98	62.2	9.83	0.171	0.208	21.41	E	Modificado
ASF-22-958	64	11.01	4.36	60.41	1.32	1.53	16.16	H	Modificado
ASF-22-929	64	71.11	65.23	8.27	0.123	0.149	20.8	E	Modificado
ASF-22-941	64	65.37	57.65	11.67	0.191	0.235	22.86	E	Modificado
ASF-22-939	64	71.03	64.99	8.5	0.107	0.133	24.09	E	Convencional
ASF-22-961	64	69.02	62.07	10.07	0.16	0.197	23.01	E	Modificado
ASF-22-980	64	11.54	4.74	58.95	1.2	1.38	15.22	H	Modificado
ASF-22-985	64	69.24	62.71	9.42	0.159	0.193	21.19	E	Convencional
ASF-22-973	64	73.95	67.98	8.07	0.121	0.148	22.06	E	Modificado
ASF-22-1000	64	68.48	61.22	10.61	0.167	0.206	23.55	E	Modificado
ASF-22-1021	64	71.55	65.18	8.9	0.13	0.159	21.96	E	Modificado
ASF-22-1033	64	73.45	66.96	8.84	0.138	0.17	23.12	E	Modificado
ASF-22-1049	64	68.1	60.63	10.97	0.184	0.228	23.43	E	Modificado
ASF-22-1054	64	10.64	4.39	58.72	1.27	1.45	14.31	H	Convencional
ASF-22-1059	64	72.34	65.96	8.82	0.133	0.164	22.74	E	Modificado
ASF-22-1073	64	75.03	69.15	7.83	0.117	0.143	22.09	E	Modificado
ASF-22-1076	64	12.03	5.25	56.38	1.1	1.26	15.02	H	Convencional
ASF-22-1081	64	11.14	4.57	58.93	1.2	1.38	14.5	H	Convencional
ASF-22-1085	64	68.49	61.5	10.21	0.169	0.206	22.17	E	Modificado
ASF-22-1095	64	74.48	68.63	7.59	0.112	0.136	21.38	E	Convencional
ASF-22-1105	64	66.96	59.89	10.57	0.185	0.224	21.02	E	Modificado
ASF-22-1123	64	72.91	67.26	7.75	0.132	0.158	19.67	E	Modificado
ASF-22-1086	64	12.82	6	53.16	1.02	1.17	14.24	H	Modificado
ASF-22-1133	64	70.92	64.4	9.19	0.14	0.17	21.93	E	Modificado
ASF-22-1138	64	67.5	59.41	11.99	0.205	0.257	25.37	E	Modificado
ASF-22-1149	64	74.48	68.59	7.9	0.128	0.156	21.79	E	Modificado
ASF-22-1150	64	61.09	52.88	13.43	0.225	0.277	22.88	E	Modificado
ASF-22-1160	64	71.93	65.1	9.49	0.154	0.191	23.55	E	Modificado
ASF-22-1170	64	65.26	57.59	11.75	0.198	0.244	22.91	E	Modificado
ASF-22-1180	64	70.31	64.16	8.75	0.144	0.174	20.54	E	Modificado
ASF-22-1194	64	69.07	62.11	10.08	0.161	0.198	22.55	E	Modificado
ASF-22-1206	64	67.87	60.72	10.53	0.166	0.204	22.91	E	Modificado
ASF-22-1219	64	10.52	4.64	55.84	1.21	1.38	13.72	H	Convencional
ASF-22-1220	64	51.86	43.18	16.75	0.287	0.347	20.79	E	Modificado
ASF-22-1221	64	67.69	60.65	10.4	0.175	0.214	22.15	E	Modificado
ASF-22-1236	64	67.57	60.48	10.49	0.175	0.214	22.24	E	Modificado
ASF-22-1247	64	71.85	65.41	8.98	0.142	0.173	22.06	E	Modificado
ASF-22-1257	64	70.25	63.48	9.64	0.152	0.187	22.53	E	Modificado

Tabla continúa en siguiente hoja.

ENSAYOS MSCR (MULTIPLE STRESS CREEP RECOVERY), AÑO 2022									
ID	Temp. (°C)	RE 0.1 (%)	RE 3.2 (%)	RE diff (%)	Jnr 0.1	Jnr 3.2	Jnr diff	Grado	Observación
ASF-22-1320	64	10.41	3.77	63.82	1.44	1.68	16.6	H	Convencional
ASF-22-1345	64	10.58	4.17	60.55	1.32	1.53	16.27	H	Convencional
ASF-22-1380	64	8.81	3.01	65.82	1.74	2.03	16.73	H	Convencional
ASF-22-1407	64	9.74	3.75	61.54	1.45	1.68	15.68	H	Convencional
ASF-22-014	70	55.97	45.45	18.8	0.423	0.54	27.71	V	Modificado
ASF-22-008	70	40.54	28.14	30.58	0.302	0.409	35.54	E	Modificado
ASF-22-022	70	38.32	22.21	42.03	0.369	0.549	48.9	V	Modificado
ASF-22-030	70	47.13	27.68	41.26	0.321	0.508	58.32	V	Modificado
ASF-22-041	70	42.62	27.69	35.03	0.395	0.544	37.66	V	Modificado
ASF-22-059	70	16.78	3.69	78	1.43	2.1	47.42	S	Modificado
ASF-22-071	70	15.34	3.39	77.9	1.39	2.04	46.15	S	Modificado
ASF-22-080	70	57.42	46.31	19.34	0.691	0.873	26.29	V	Modificado
ASF-22-084	70	19.45	2.41	87.63	1.55	2.76	77.85	S	Modificado
ASF-22-092	70	22.73	2.36	89.61	1.5	2.89	92.27	S	Modificado
ASF-22-103	70	51.31	37.5	26.91	0.455	0.624	37.17	V	Modificado
ASF-22-118	70	67.88	58.78	13.4	0.282	0.36	27.69	E	Modificado
ASF-22-131	70	54.58	42.35	22.42	0.469	0.604	29	V	Modificado
ASF-22-176	70	58.45	45.3	22.5	0.415	0.556	33.87	V	Modificado
ASF-22-242	70	71.58	64.35	10.09	0.246	0.303	23.18	E	Modificado
ASF-22-251	70	77.26	64.74	16.21	0.169	0.26	53.33	E	Modificado
ASF-22-252	70	66.37	54.2	18.33	0.315	0.415	31.75	E	Modificado
ASF-22-274	70	31.91	18.72	41.33	0.816	1.07	30.72	H	Modificado
ASF-22-380	70	61.45	49.37	19.66	0.406	0.534	31.31	V	Modificado
ASF-22-396	70	65.56	55.24	15.74	0.31	0.399	28.94	E	Modificado
ASF-22-426	70	59.31	49.21	17.04	0.348	0.443	27.09	E	Modificado
ASF-22-468	70	60.21	48.96	18.69	0.439	0.568	29.33	H	Modificado
ASF-22-487	70	35.5	22.97	34.3	0.812	1.04	27.46	H	Modificado
ASF-22-510	70	62.29	50.11	19.55	0.365	0.48	31.54	E	Modificado
ASF-22-511	70	68.36	59.19	13.41	0.443	0.568	28.08	V	Modificado
ASF-22-502	70	37.67	23.42	37.81	0.934	1.23	31.55	H	Modificado
ASF-22-520	70	61.03	49.35	19.14	0.393	0.513	30.37	V	Modificado
ASF-22-531	70	60.16	48.89	18.72	0.405	0.524	29.22	V	Modificado
ASF-22-541	70	62.73	53.1	15.35	0.62	0.765	23.42	V	Modificado
ASF-22-522	70	19.57	7.25	62.97	1.43	1.89	32.78	H	Modificado
ASF-22-542	70	63.03	53.18	15.62	0.612	0.76	24.09	V	Modificado
ASF-22-549	70	60.39	51.22	15.18	0.249	0.309	24.06	E	Modificado
ASF-22-547	70	67.09	58.21	13.23	0.278	0.345	24.06	E	Modificado
ASF-22-561	70	49.49	34.23	30.83	0.658	0.894	35.84	V	Modificado
ASF-22-588	70	57.78	48.01	16.91	0.324	0.407	25.71	E	Modificado
ASF-22-591	70	35.4	20.62	41.76	1.17	1.52	29.72	H	Modificado
ASF-22-592	70	60.32	38.96	35.41	0.413	0.7	69.73	V	Modificado
ASF-22-587	70	63.14	52.98	16.1	0.333	0.423	27.06	E	Modificado
ASF-22-594	70	66.1	57.05	13.69	0.501	0.629	25.39	V	Modificado
ASF-22-599	70	64.05	54.32	15.18	0.602	0.751	24.83	V	Modificado
ASF-22-604	70	42.21	28.66	32.11	0.728	0.946	29.88	V	Modificado
ASF-22-605	70	61.72	48.13	22.03	0.317	0.428	35.27	E	Modificado
ASF-22-606	70	37.56	25.51	32.08	0.773	0.976	26.22	V	Modificado
ASF-22-632	70	40.1	27.04	32.58	0.643	0.839	30.61	V	Modificado
ASF-22-636	70	68.62	60.65	11.61	0.26	0.32	23.33	E	Modificado
ASF-22-638	70	35.11	24.53	30.13	0.792	0.982	23.89	V	Modificado
ASF-22-649	70	47.43	34.12	28.07	1.08	1.39	28.96	H	Modificado
ASF-22-658	70	56.16	44.84	20.15	0.444	0.569	27.99	V	Modificado
ASF-22-713	70	63.22	51.47	18.58	0.273	0.382	39.79	E	Modificado

Tabla continúa en siguiente hoja.

ENSAYOS MSCR (MULTIPLE STRESS CREEP RECOVERY), AÑO 2022									
ID	Temp. (°C)	RE 0.1 (%)	RE 3.2 (%)	RE diff (%)	Jnr 0.1	Jnr 3.2	Jnr diff	Grado	Observación
ASF-22-677	70	61.79	51.31	16.95	0.363	0.462	27.23	E	Modificado
ASF-22-685	70	54.21	40.92	24.51	0.662	0.876	32.37	V	Modificado
ASF-22-689	70	60.42	49.59	17.93	0.39	0.496	27.29	E	Modificado
ASF-22-690	70	61.22	50.02	18.29	0.381	0.495	15	E	Modificado
ASF-22-711	70	55.02	41.75	24.12	0.347	0.48	38.22	E	Modificado
ASF-22-712	70	70.61	59.63	15.56	0.21	0.3	42.45	E	Modificado
ASF-22-710	70	54.83	43.39	20.87	0.496	0.626	26.29	V	Modificado
ASF-22-728	70	57.72	45.52	21.12	0.446	0.582	30.5	V	Modificado
ASF-22-732	70	45.7	32.66	28.54	0.628	0.826	31.65	V	Modificado
ASF-22-741	70	52.95	40.94	22.68	0.445	0.572	28.5	H	Modificado
ASF-22-758	70	61.67	50.66	17.85	0.356	0.462	29.84	E	Modificado
ASF-22-774	70	56.66	45.56	19.59	0.402	0.515	27.98	V	Modificado
ASF-22-767	70	65.69	56.46	14.05	0.281	0.352	25.41	E	Modificado
ASF-22-789	70	59.29	47.92	19.19	0.362	0.472	30.48	E	Modificado
ASF-22-798	70	55.66	43.77	21.36	0.428	0.561	30.97	V	Modificado
ASF-22-814	70	47.24	32	32.25	0.923	1.2	30.01	H	Modificado
ASF-22-816	70	44.96	31.72	29.46	0.716	0.941	31.36	V	Modificado
ASF-22-827	70	80.4	73.56	8.51	0.123	0.17	37.9	E	Modificado
ASF-22-843	70	58.43	46.25	20.84	0.416	0.547	31.46	V	Modificado
ASF-22-845	70	67.45	59.43	11.9	0.392	0.481	22.88	E	Modificado
ASF-22-857	70	58.56	46.54	20.52	0.393	0.522	32.71	V	Modificado
ASF-22-862	70	44.8	29.81	33.47	0.583	0.806	38.41	V	Modificado
ASF-22-863	70	49.66	36.32	26.87	0.734	0.932	26.92	V	Modificado
ASF-22-873	70	32.76	17.01	48.08	1.06	1.42	34.08	H	Modificado
ASF-22-828	70	41.16	27.16	34.02	0.799	1.07	33.38	H	Modificado
ASF-22-872	70	55.2	41.37	25.06	0.562	0.757	34.61	V	Modificado
ASF-22-876	70	46.4	33.19	28.47	0.629	0.826	31.19	V	Modificado
ASF-22-887	70	52.54	40.15	23.58	0.478	0.625	30.74	V	Modificado
ASF-22-890	70	59.87	47.53	20.61	0.41	0.548	33.54	V	Modificado
ASF-22-891	70	66.18	56.42	14.75	0.473	0.606	28.28	V	Modificado
ASF-22-910	70	62.43	51.55	17.44	0.377	0.488	29.53	E	Modificado
ASF-22-933	70	61.84	50.33	18.62	0.371	0.487	31.22	E	Modificado
ASF-22-929	70	64.38	55.74	13.41	0.268	0.334	24.51	E	Modificado
ASF-22-941	70	56.91	45.24	20.5	0.456	0.588	28.95	V	Modificado
ASF-22-954	70	60.16	50.18	16.58	0.616	0.772	25.25	V	Modificado
ASF-22-961	70	60.11	48.88	18.67	0.387	0.503	29.84	V	Modificado
ASF-22-966	70	79.81	72.19	9.54	0.141	0.199	41.67	E	Modificado
ASF-22-985	70	65.43	55.37	15.38	0.311	0.399	28.59	E	Modificado
ASF-22-973	70	67.66	58.7	13.24	0.279	0.352	26.04	E	Modificado
ASF-22-977	70	46.22	33.51	27.49	0.563	0.732	30.01	V	Modificado
ASF-22-1000	70	60.85	49.73	18.26	0.385	0.5	29.66	E	Modificado
ASF-22-1018	70	50.16	37.44	25.36	0.494	0.653	32.17	V	Modificado
ASF-22-1021	70	65.46	56.3	14	0.28	0.351	25.54	E	Modificado
ASF-22-1033	70	65.65	55.05	16.14	0.346	0.447	29.08	E	Modificado
ASF-22-1049	70	60.52	48.11	20.51	0.429	0.567	32.14	V	Modificado
ASF-22-1059	70	66.3	56.68	14.51	0.295	0.375	27.11	E	Modificado
ASF-22-1064	70	68.27	59.02	13.56	0.274	0.349	27.33	E	Modificado
ASF-22-1073	70	70.72	61.73	12.72	0.24	0.308	28.13	E	Modificado
ASF-22-1081	70	62.15	51.39	17.32	0.415	0.523	23.19	V	Modificado
ASF-22-1085	70	63.36	52.29	17.47	0.34	0.443	30.45	E	Modificado
ASF-22-1087	70	47.33	34.32	27.49	0.578	0.758	31.22	V	Modificado
ASF-22-1095	70	68.86	60.33	12.38	0.248	0.312	26.12	E	Modificado
ASF-22-1105	70	59.2	48.25	18.49	0.413	0.525	27.34	V	Modificado
ASF-22-1111	70	75.23	56.5	24.9	0.21	0.395	87.64	E	Modificado
ASF-22-1123	70	69.69	61.48	11.77	0.252	0.311	23.63	E	Modificado
ASF-22-1133	70	64.27	54.29	15.53	0.311	0.396	27.22	E	Modificado
ASF-22-1135	70	55.35	43.76	20.95	0.396	0.514	29.89	V	Modificado

Tabla continúa en siguiente hoja.

ENSAYOS MSCR (MULTIPLE STRESS CREEP RECOVERY), AÑO 2022									
ID	Temp. (°C)	RE 0.1 (%)	RE 3.2 (%)	RE diff (%)	Jnr 0.1	Jnr 3.2	Jnr diff	Grado	Observación
ASF-22-1140	70	63.31	49.71	21.48	0.332	0.488	47.2	E	Modificado
ASF-22-1149	70	69.06	60.09	12.98	0.275	0.348	26.42	E	Modificado
ASF-22-1160	70	65.61	54.86	16.39	0.35	0.455	29.95	E	Modificado
ASF-22-1170	70	58.61	46.63	20.44	0.429	0.563	31.35	V	Modificado
ASF-22-1180	70	62.63	52.49	16.19	0.347	0.44	26.86	E	Modificado
ASF-22-1191	70	44.83	32.56	27.37	0.569	0.733	28.78	V	Modificado
ASF-22-1196	70	40.92	28.08	31.38	0.632	0.823	30.19	V	Modificado
ASF-22-1206	70	57.29	45.57	20.47	0.455	0.588	29.17	V	Modificado
ASF-22-1213	70	46.01	33.82	26.49	0.582	0.749	28.7	V	Modificado
ASF-22-1221	70	62.02	51.51	16.95	0.367	0.471	28.3	E	Modificado
ASF-22-1236	70	62.25	51.58	17.14	0.349	0.45	28.82	E	Modificado
ASF-22-1247	70	66.31	56.74	14.42	0.288	0.366	27.38	E	Modificado
ASF-22-1257	70	63.83	53.33	16.44	0.339	0.436	28.51	E	Modificado
ASF-22-1266	70	39.47	25.15	36.29	0.801	1.08	34.62	H	Modificado
ASF-22-1277	70	64.62	54.31	15.95	0.318	0.409	28.63	E	Modificado
ASF-22-1262	70	43.84	29.97	31.62	0.705	0.942	33.53	V	Modificado
ASF-22-1263	70	45.3	31.28	30.95	0.681	0.914	34.28	V	Modificado
ASF-22-1291	70	60.76	48.9	19.51	0.384	0.507	32.03	V	Modificado
ASF-22-1305	70	55.06	43.11	21.71	0.486	0.63	29.71	V	Modificado
ASF-22-1310	70	59.77	48.84	18.28	0.383	0.499	30.22	E	Modificado
ASF-22-1304	70	52.09	39.48	24.21	0.537	0.703	30.84	V	Modificado
ASF-22-1307	70	65.71	55.52	15.5	0.316	0.406	28.49	E	Modificado
ASF-22-1322	70	62.04	50.53	18.55	0.37	0.484	30.67	E	Modificado
ASF-22-1323	70	50.05	36.53	27	0.634	0.839	32.29	V	Modificado
ASF-22-1336	70	65.29	55.34	15.24	0.298	0.381	27.78	E	Modificado
ASF-22-1408	70	70.59	62.27	11.79	0.372	0.472	26.86	E	Modificado
ASF-22-1347	70	61.84	50.68	18.05	0.383	0.496	29.57	E	Modificado
ASF-22-1369	70	63.94	54.56	14.66	0.587	0.735	25.2	V	Modificado
ASF-22-1355	70	52.09	38.36	26.36	0.532	0.717	34.73	V	Modificado
ASF-22-1360	70	45.12	32.05	28.96	0.611	0.805	31.65	V	Modificado
ASF-22-1366	70	61.24	50.56	17.45	0.348	0.449	29.11	E	Modificado
ASF-22-1374	70	39.56	25.62	35.24	0.89	1.18	32.54	H	Modificado
ASF-22-1378	70	61.78	51.22	17.09	0.376	0.48	27.66	E	Modificado
ASF-22-1403	70	43	29.61	31.14	0.719	0.947	31.78	V	Modificado
ASF-22-1401	70	67.66	59.49	12.08	0.224	0.281	25.33	E	Modificado
ASF-22-1404	70	57.99	49.29	15	0.344	0.424	22.98	E	Modificado

Tabla 10. Resultados obtenidos en ensayo MSCR, Mezclas Asfálticas, año 2022.

Los resultados para los asfaltos modificados con PG70 o nivel superior, no muestran mayores cambios respecto a los años 2020 y 2021. Algunos asfaltos experimentan mejores comportamientos en cuanto a recuperación elástica al haber ingresado al país nuevos proveedores de asfaltos modificados. Para el año 2023, los comportamientos no experimentan mayores cambios en cuanto a resultados.

5.0 CAPÍTULO CINCO: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones:

Durante 4 años se han rastreado los resultados de los ensayos de la Rueda de Hamburgo (AASHTO T324) y MSCR (AASHTO T350). Se han tratado de establecer tendencias y correlaciones en cuanto a comportamientos entre ambos ensayos. Si bien si existe una clara concatenación entre el asfalto modificado, sus resultados coherentes en el MSCR y el comportamiento a la deformación permanente evaluado a través de la Rueda de Hamburgo, no podemos discernir una correlación directa y clara.

A través de los resultados podemos ver que los asfaltos modificados tienen un comportamiento altamente consistente, y que su rango normal está en clasificaciones “E” y “V” por encima de la curva de elasticidad. Esto significa que son aptos para usarse en proyectos viales con:

- Muy Alto, “V” > 30 millones de ESAL σ < 70 km/h
- Extremadamente Alto, “E” > 30 millones de ESAL γ < 70 km/h

Esto es suficiente para cubrir la gran mayoría de las necesidades de los proyectos viales del país. Podemos concluir que los asfaltos, en su gran mayoría y suponiendo su uso adecuado según su designación, son más que aptos para contrarrestar las deformaciones permanentes.

Esto nos deja con el otro posible sospechoso, y el que tiene la mayor incidencia en resistir la deformación permanente: el agregado. La calidad del agregado local en cuanto a resistencia a la abrasión es muy buena. El país es en su gran mayoría de origen volcánico, por lo que nuestro agregado es a base de basaltos y andesitas duras. Los valores de desgaste suelen rondar entre 18-20%.

Es necesario evaluar entonces las granulometrías. A simple vista, puede verse que las granulometrías en el país son densas finas, y bien finas. Dosificaciones comunes en mezclas de TMN $\frac{3}{4}$ ” son:

- Alrededor del 30 – 35 % de agregado $\frac{3}{4}$ ”
- Alrededor del 10 – 15% de agregado $\frac{1}{2}$ ”
- Alrededor de 50% o más de arena triturada

Para el caso de las mezclas de TMN ½” el panorama es peor todavía, pues la tendencia es hacerla a base de dos agregados: agregado de ½” y arena triturada.

Sin un esqueleto pétreo robusto y bien empaquetado es muy limitado lo que se puede hacer ante la deformación permanente. Es además de considerar que las mezclas finas locales son ricas en asfalto.

Inevitablemente esto nos lleva a la siguiente consideración: el Método Bailey. Este método es parte de las especificaciones locales desde aproximadamente 2013, por lo que su uso es rutinario en los diseños de mezclas locales y el cumplimiento de sus parámetros obligatorio.

Si todas las mezclas deben pasar por el Método Bailey y cumplir sus parámetros para ser aceptadas para su uso en los proyectos viales del país, ¿por qué estamos teniendo problemas con las granulometrías?

Primero debemos de recordar que el Método Bailey tiene parámetros de entrada que el diseñador escoge, siendo el más incidente el % de CA LUW (Coarse Aggregate Loose Unit Weight – Peso Suelto Unitario del Agregado Grueso). Esto es lo que el método llama “Peso Unitario Escogido del Agregado”.

El siguiente extracto es una traducción libre tomada de la Circular EC-044 “Bailey Method for Gradation Selection in Hot-Mix Asphalt Mixture Design” publicada por el TRB (Transportation Research Board) en Octubre de 2002.

Peso Unitario Escogido del Agregado

El diseñador debe de escoger la trabazón del agregado grueso que desea para su diseño de mezcla. Por lo tanto, escogen un peso unitario del agregado grueso, el cual establece el volumen de agregado grueso en la mezcla de agregados y el grado de trabazón de los agregados.

En el Método Bailey, granulometría gruesa se define como mezclas que tienen un esqueleto pétreo grueso. Mezclas de granulometría fina no tienen suficientes partículas de agregado grueso (es decir, más grande que la PCS) para formar un esqueleto, y por lo tanto la carga es soportada predominantemente por el agregado fino. Para seleccionar el

peso unitario escogido el diseñador debe de decidir si la mezcla será de granulometría gruesa o fina. Las consideraciones para seleccionar el peso unitario escogido se muestran en la [Figura 48](#).

El peso unitario suelto es el límite inferior de la trabazón del agregado grueso. Teóricamente, es la línea divisoria entre mezclas de granulometría gruesa y fina. Si el diseñador de la mezcla escoge un peso unitario del agregado grueso menor que el peso unitario suelto, las partículas del agregado grueso están diseminadas y no están en una condición uniforme de contacto partícula con partícula. Por lo tanto, se desarrolla un esqueleto pétreo fino y las propiedades para estas mezclas se relacionan principalmente a las características del agregado fino.

El peso unitario varillado se considera generalmente como el límite superior de la trabazón de los agregados gruesos para mezclas de granulometría densa. Este valor típicamente está cerca del 110% del peso unitario suelto. Cuando el peso unitario escogido se acerca al peso unitario varillado, la cantidad de esfuerzo de compactación requerido para la densificación se incrementa significativamente, lo cual puede hacer que una mezcla sea difícil de construir en el campo.

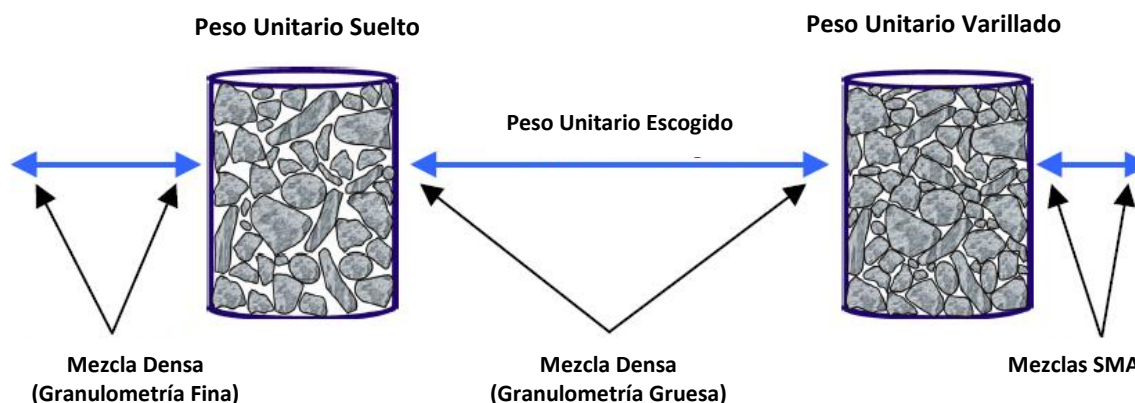


FIGURA 48. Selección del peso unitario escogido de los agregados

El método no da un mínimo de peso unitario escogido, es decisión del diseñador que peso unitario va a ocupar. Las especificaciones locales tienen un mínimo de 70%, pero esto siempre nos ponen en la clasificación de mezclas densas finas. Como se puede leer en el

extracto anterior, el mismo método le está diciendo a su usuario que al utilizar mezclas densas finas no se logra un esqueleto con trabazón y que toda la carga es soportada por el agregado fino.

El Método Bailey es una buena herramienta, pero no es infalible. Es un error colocar métodos/tecnologías en un pedestal y considerarlas inerrantes y perfectas. Debemos de considerar que no estamos utilizando mezclas gruesas, entonces no podemos esperar que tengamos una buena capacidad portante en nuestros proyectos. También debemos de considerar que el Método Bailey puede hacer evolucionado y que no estamos al día en ello.

Todo esto nos lleva a concluir que las mezclas asfálticas en El Salvador han estado haciéndole frente a la deformación permanente a base de la fortaleza de los asfaltos modificados y del masticaje formado entre ellos y la arena triturada.

Estamos llegando a una época en la que la cantidad y composición del tráfico, las solicitudes crecientes y el cambio climático hacen inviable seguir sosteniendo este tipo de mezclas.

Históricamente siempre se le ha achacado la deformación permanente de la mezcla a los asfaltos, asumiendo que no tenían la capacidad para poder mantener unido el agregado al frente a las altas temperaturas locales. Esto es cierto cuando hablamos de asfaltos convencionales.

No obstante, el advenimiento de los asfaltos modificados cambió eso. En la región Centroamericana y del Caribe, El Salvador es punta de lanza en materia de asfaltos modificados. Los datos soportan esta declaración. Es un error claro pensar en la actualidad que son los asfaltos modificados los responsables de la presencia de deformación permanente en la mezcla. Si continuamos pensando de esta manera, seguiremos sin atender la causa raíz del problema y el mismo persistirá.

Con respecto a los ensayos realizados en el presente trabajo de graduación, podemos concluir que los asfaltos modificados son los materiales que presentan un adecuado desempeño ante patologías como lo es la deformación permanente, de igual manera, genera una mejor adherencia entre asfalto y agregado.

Asfaltos convencionales, ya no debieran ser utilizados para ningún tipo de actividad de carpetas asfálticas, ya que son asfaltos susceptibles a la deformación producto de temperaturas que se experimentan en el país.

5.2 Recomendaciones

Dados los datos y las conclusiones recomendamos:

- Seguir evaluando las mezclas asfálticas con la Rueda de Hamburgo, para seguir construyendo la base de datos existente.
- Concatenar de mejor manera los datos de las mezclas evaluadas con la siguiente información:
 - o TMN de la mezcla
 - o Designación del asfalto utilizado
 - o Resultados de reología del asfalto
 - o Resultados de granulometrías de las mezclas
- Dar seguimiento en campo a las mezclas que fallen la prueba de la Rueda de Hamburgo.
- Reevaluar la forma en la que se está utilizando el Método Bailey en el diseño de las mezclas asfálticas en el país. Se debería de iniciar un camino hacia mezclas densas gruesas para los proyectos carreteros de cierta categoría y dejar las mezclas densas finas para caminos de bajo tráfico.

6.0 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO T324 HAMBURG-WHEEL TRACK DEVICE TEST
- MS-2 ASPHALT MIX DESIGN METHODS, 7a EDICIÓN
- MS-26 ASPHALT BINDER HANDBOOK. ASPHALT INSTITUTE
- <https://www.cooper.co.uk/shop/asphalt-testing/wheel-tracking/hamburg-immersion-wheel-tracker/>)
- AASHTO M332 PERFORMANCE-GRADED ASPHALT BINDER USING MULTIPLE STRESS CREEP RECOVERY (MSCR) TEST.
- AASHTO R92 STANDARD PRACTICE FOR EVALUATING THE ELASTIC BEHAVIOR OF ASPHALT BINDERS USING THE MULTIPLE STRESS CREEP RECOVERY (MSCR) TEST.
- CIRCULAR E-C044 BAILEY METHOD FOR GRADATION SELECTION IN HOT-MIX ASPHALT MIXTURE DESIGN
- CONDICIONES TÉCNICAS DE PROYECTOS RUTINARIOS FOVIAL, AÑO 2023