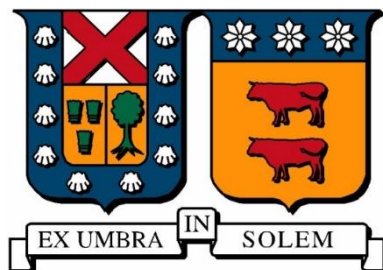


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO – CHILE



**CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA EL USO EN
RECAPADOS UTILIZANDO EL ENSAYO DE RUEDA DE CARGA DE
HAMBURGO**

**Memoria de Titulación Presentada por
IGNACIO SEBASTIÁN MARTÍNEZ TAPIA**

**Como requisito para optar al título de
INGENIERO CIVIL**

**Profesor Guía:
SR. CARLOS WAHR DANIEL**

Abril de 2018

Dedicatoria

Dedicada a mis Padres, Hermanos y a mi novia Ana.

Agradecimientos

Agradezco a los profesores del Departamento de Obras Civiles: Carlos Wahr, Rodrigo Delgadillo y Gabriel García por sus enseñanzas y la oportunidad que me dieron para participar en este proyecto de investigación. También agradezco al equipo de profesionales y trabajadores del Laboratorio de Ensaye y Materiales de Construcción (LEMCO-USM) y de la empresa AsfalChile por compartir sus conocimientos y experiencias, sin las cuales no hubiese sido posible la realización de esta memoria.

Resumen

En esta memoria de título se busca determinar cuál de las mezclas asfálticas propuestas en el proyecto FONDEF D09I1174 tiene mejor desempeño al ser sometida al ensayo de rueda de carga de Hamburgo, así como también demostrar experimentalmente cuáles son los factores que generan esas diferencias de comportamiento.

Dentro de los 10 diseños de mezclas estudiados existen mezclas asfálticas fabricadas con asfaltos tradicionales, asfaltos modificados, asfaltos de distintos proveedores y 4 tipos de granulometrías diferentes.

En esta investigación se siguieron las indicaciones del estándar AASHTO T 324-11 para la construcción y ensayo de las probetas cuyos resultados fueron validados mediante las indicaciones de la Norma ASTM E177-14, los que posteriormente fueron comparados mediante el software estadístico IBM SPSS Statistics.

Los resultados obtenidos permiten concluir que tanto las mezclas asfálticas fabricadas con asfaltos tradicionales como con modificados superan las recomendaciones del Departamento de Transporte de Texas (TxDOT, 2006) presentando ahuellamientos menores a 12,5mm a las 10.000 y 20.000 pasadas respectivamente. Así mismo, se comprobó que las mezclas SMA estudiadas presentan ahuellamiento menores a 4mm, lo que indica que éstas se pueden utilizar como pavimento de alto desempeño conforme a los criterios de la normativa alemana (Rahman & Hossain, 2014)

Finalmente se pudo concluir que no existen diferencias significativas entre el uso de asfaltos de distintos proveedores, que el uso de asfaltos modificados mejora considerablemente la resistencia al ahuellamiento y que las mezclas fabricadas con granulometrías SMA tienen desempeños muy superiores a las mezclas semidensa IV-A-12 y microaglomerados en caliente M10.

Abstract

This thesis seeks to identify which of the asphalt mixtures proposed in the “Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico” FONDEF D09I1174 Project shows better performance when submitted to the Hamburg Wheel tracking test, and experimentally demonstrates which are the factors that generate differences on its behavior.

A range of ten mixtures designs were studied including asphalt mixtures made with neat binders, modified binders, binders from different companies and four different types of aggregate gradations.

This research follows the indications provided by AASHTO T324-11 Standard for the construction and testing of the samples. The testing results were validated following the indications provided by ASTM E177-14 Standard, which were compared with the statistical software IBM SPSS Statistics.

The results obtained lead us to conclude that both the asphalt mixtures containing neat binders and asphalt mixtures containing modified binders exceed the recommendations of the Texas Department of Transportation (TxDOT, 2006). The asphalt mixtures show rutting less than 12.5 mm at 10,000 and 20,000 passes; respectively. In addition, it was verified that the Stone Matrix Asphalt SMA mixtures studied show rutting less than 4 mm, which indicates that these mixtures could be used as a high-performance pavement according to German Standards (Rahman & Hossain, 2014).

Finally, it is possible to conclude that (i) there are not significant differences between the uses of binders from different companies, (ii) the modified binders improve rutting resistance, and (iii) mixtures made using SMA gradations have better performance in comparison with semi-dense IV-A- 12 mixtures and M10 hot micro-agglomerates.

Glosario

- **AASHTO:** sigla en inglés de la American Association of State Highway and Transportation Officials, órgano que establece las normas, publica especificaciones y hace pruebas de protocolos y guías usadas en el diseño y construcción de autopistas en todo los Estados Unidos.
- **ANOVA:** sigla en inglés de Analysis Of Variance o análisis de varianza en español, colección de modelos estadísticos y sus procedimientos asociados, en el cual la varianza está particionada en ciertos componentes asociados a efectos de una variable o a errores aleatorios.
- **Acondicionamiento de mezcla:** procedimiento de laboratorio utilizado para simular los efectos del envejecimiento que se produce durante la fase de fabricación y compactación de una mezcla asfáltica caliente.
- **Ahuellamiento:** deterioro del pavimento asfáltico que corresponde a la deformación en forma de surco que se genera bajo la huella de circulación de los vehículos. A este efecto también se le conoce como roderas en España y como rutting en el mundo anglosajón.
- **Creep Slope:** la tasa de deformación plástica de una muestra de mezcla asfáltica sometida al HWTT.
- **Filler:** agregado mineral de una mezcla asfáltica también llamado polvo mineral y que corresponde a la fracción que pasa por el tamiz de 0,063 mm N°200 ASTM. Éste puede formar parte de los agregados pétreos o corresponder a una aportación suplementaria.
- **HMA:** sigla en inglés de Hot Mix Asphalt que en español significa Mezcla Asfáltica en Caliente (MAC). Una MAC es una mezcla de un ligante asfáltico y un agregado mineral, que se integran a altas temperaturas. Posteriormente, se compactada para formar una capa de pavimento.
- **HWTD:** sigla en inglés de Hamburg Wheel Tracking Device o Equipo de Rueda de Carga de Hamburgo, dispositivo electromecánico diseñado para simular los efectos que tiene el paso de una rueda sobre una muestra de mezcla asfáltica.

- **HWTT:** Hamburg Wheel Tracking Test o Ensayo de Rueda de Carga de Hamburgo, procedimiento de laboratorio donde se utiliza el HWTD para estudiar la resistencia al ahuellamiento y ocasionalmente para estudiar la susceptibilidad a la humedad de una mezcla asfáltica.
- **LEMCO:** sigla en español de Laboratorio de Ensayo de Materiales y Control de Obras, laboratorio dependiente del Departamento de Obras Civiles de la Universidad Técnica Federico Santa María, que ejerce labores de apoyo a la docencia, desarrolla investigación y presta servicios relacionados con la industria de la construcción.
- **LVDT:** sigla en inglés de Linear Variable Differential Transformer o en español transductor de desplazamiento lineal. Se trata de un sensor que mide indirectamente el desplazamiento de un objeto a partir de la inducción de corriente que ocurre dentro de los bobinados del sensor.
- **Ligante Asfáltico:** material viscoso, pegajoso y de color negro, proveniente del proceso de destilación del petróleo que mezclado con agregados minerales (gravas y arenas) sirve para la construcción de pavimentos entre otros usos.
- **NCHRP:** sigla en inglés de National Cooperative Highway Research Program o Programa Nacional Cooperativo de Investigación de Autopistas. Este organismo realiza investigaciones en áreas problemáticas que afectan la planificación, el diseño, la construcción, la operación y el mantenimiento de carreteras en los Estados Unidos. Encabezado por la Transportation Research Board TRB, cuenta con el apoyo conjunto de agencias federales, departamentos estatales de transporte y otras organizaciones sin fines de lucro.
- **SMA:** tipo de HMA desarrollada en Alemania con un alto contenido de agregado grueso que forma un esqueleto pétreo muy resistente a las deformaciones permanentes. Este esqueleto de piedra se rellena con una masilla de ligante, agregado fino y fibras que proporcionan la estabilidad de la mezcla y evitan el drenaje del ligante cuando la mezcla está siendo transportada o colocada. La composición típica de SMA consiste en 70-80% de agregado grueso, 8-12% de fino, 6,0-7,0% de ligante y 0,3% de fibras.
- **TRB:** sigla en inglés de *Transportation Research Board* o Comité de Investigación de Transportes, división del Consejo Nacional de Investigación de los Estados Unidos

que sirve como asesor independiente del Presidente de los Estados Unidos, el Congreso y las agencias federales en cuestiones científicas y técnicas de importancia nacional. Es administrado por la Academia Nacional Ingeniería, Ciencias y Medicina.

- **SGC:** sigla en inglés de *Superpave gyratory compactor*, en español compactador giratorio Superpave. Es un equipo de laboratorio diseñado a partir de las especificaciones del programa SHRP y de la Administración Federal de Carreteras (FHWA) que se utiliza para simular la compactación que tendría una mezcla asfáltica en terreno. Su principal característica es que compacta las muestras de mezcla asfáltica mediante un amasado circular que simula las pasadas de un rodillo sobre el pavimento.
- **Stripping slope:** es la tasa a la que se deforma una muestra de mezcla asfáltica sometida al HWTT a causa del efecto combinado de la plasticidad del material y de la susceptibilidad a la humedad del mismo.
- **SUPERPAVE:** sigla en inglés para *Superior Performance Pavements*. Se trata de un método de diseño de mezclas asfálticas derivado del programa de investigación estratégico de carreteras iniciado en 1987 por las autoridades estadounidenses (SHRP) que tenía por objetivo buscar un sistema de diseño de pavimentos asfálticos mejor que el tradicional método Marshall.
- **VA:** sigla en inglés de *Air Voids* en español vacíos llenos de aire. Es una propiedad volumétrica de las mezclas asfálticas y corresponde al volumen que utiliza el aire en una mezcla asfáltica una vez compactada.
- **VFA:** sigla en inglés para *Voids Filled with Asphalt*, en español vacíos del agregado mineral llenos de asfalto. Es una propiedad volumétrica de una mezcla asfáltica y corresponde al porcentaje de vacíos de los agregados minerales llenos de asfalto una vez compactada la mezcla.
- **VMA:** sigla en inglés para *Voids in the Mineral Aggregate*, en español vacíos en el agregado mineral. Es una propiedad volumétrica de una mezcla asfáltica y corresponde al porcentaje de volumen que ocupan los agregados minerales dentro de una mezcla asfáltica compactada

Índice

Dedicatoria	I
Agradecimientos	II
Resumen.....	III
Abstract	IV
Glosario.....	V
Índice.....	VIII
Índice de Figuras	X
Índice de Tablas	XII
1 Introducción.....	1
2 Objetivos.....	3
2.1 Objetivos Generales	3
2.2 Objetivos Específicos	3
3 Alcances	4
4 Marco Teórico	5
4.1 Recapado Asfáltico	5
4.2 Ahuellamiento	6
4.2.1 Factores que intervienen en la formación de ahuellamiento	8
4.2.2 Ensayos para la medición del ahuellamiento.	14
4.3 Ensayo de Rueda de Carga de Hamburgo.....	17
4.3.1 Historia del ensayo de rueda de carga de Hamburgo	17
4.3.2 El ensayo de rueda de carga de Hamburgo en la actualidad	20
4.3.3 El estándar AASHTO T324-11	21
4.3.4 Reproducibilidad y repetibilidad del ensayo	24
4.3.5 Limitaciones de la prueba AASHTO T 324-11.....	26
4.4 Proyecto FONDEF.	27
5 Trabajo Experimental	28

5.1	Hipótesis experimentales	28
5.2	Variables	29
5.2.1	Variables independientes.....	29
5.2.2	Variables dependientes.....	29
5.3	Sujetos de Estudio	30
5.4	Materiales.....	30
5.4.1	Áridos	31
5.4.2	Asfaltos.....	32
5.4.3	Diseños de mezclas	36
5.4.4	Equipos para la fabricación de probetas.....	48
5.4.5	Procedimientos fabricación de probetas.....	54
5.4.6	Equipo de Ensayo	66
5.4.7	Procedimientos del ensayo y análisis de resultados	68
6	Resultados.....	82
6.1	Resumen de Resultados.....	82
6.2	Análisis de repetitividad.....	84
6.3	Análisis Estadístico	93
7	Conclusiones.....	114
7.1	Conclusiones Generales	114
7.2	Conclusiones particulares.....	115
8	Referencias	117
Anexo A		120

Índice de Figuras

Figura 4-1: Recapado Asfáltico sobre asfalto, Fuente www.newbergoregon.gov/maintenance	6
Figura 4-2: Mecanismo de deformación de la capa asfáltica, Fuente (Padilla, 2004)	7
Figura 4-3: Mecanismo de deformación de la capa asfáltica, Fuente (AASHTO T 324-11, 2011)	22
Figura 5-1: Granulometría IV-A-12 (A). Fuente: Elaboración propia.	37
Figura 5-2: Granulometría IV-A-12 (B). Fuente: Elaboración propia.....	39
Figura 5-3: Granulometría SMA. Fuente: Elaboración propia.	44
Figura 5-4: Granulometría USM Fuente: Elaboración propia.	46
Figura 5-5: Tamices ASTM. Fuente: Elaboración propia.	49
Figura 5-6: Balanza digital. Fuente: Elaboración propia.	49
Figura 5-7: Horno Labtech propiedad de LEMCO USM Fuente: Elaboración propia.	50
Figura 5-8: Mezcladora 600 watt propiedad de LEMCO USM. Fuente: Elaboración propia.	51
Figura 5-9: Compactador giratorio SGC. Marca Troxler. Modelo 5850 propiedad de LEMCO-USM. Fuente: Elaboración propia.....	52
Figura 5-10: Sierra de corte para asfalto. Fuente: Elaboración propia.	53
Figura 5-11: probeta rueda de carga de Hamburgo después del ensayo.....	54
Figura 5-12: Flujo de tareas para la fabricación de probetas. Fuente: elaboración propia. ..	55
Figura 5-13: Dimensiones de la Probeta HWTT. Fuente: elaboración propia	57
Figura 5-14: Mezcla de Áridos para probetas del SGC. Fuente: elaboración propia	59
Figura 5-15: Equipo para medición de densidades de las probetas de mezcla asfáltica. Fuente: Elaboración propia.	63
Figura 5-16: Esquema de corte y disposición de las probetas para el ensayo de Rueda de Carga de Hamburgo. Fuente: Elaboración propia.	64
Figura 5-17: Embalaje de las probetas para traslado. Fuente: Elaboración propia.....	65
Figura 5-18: Rueda de Carga de Hamburgo. (HWTD) perteneciente a la empresa Asfalchile. Fuente: Elaboración propia.	67
Figura 5-19: Sistema de sujeción HWTD. Fuente: Elaboración propia.	67
Figura 5-20: diagrama de posiciones de los LVDT. Fuente: Elaboración propia.	70

Figura 5-21: Curvas de ahuellamiento para cada LVDT. Fuente: Elaboración propia	72
Figura 5-22: Perfil de ahuellamiento con distintos niveles de pasadas. Fuente: Elaboración propia.	72
Figura 5-23: Grafica de promedios móviles de periodo 20. Fuente: Elaboración propia.....	73
Figura 6-1: Diagrama de Caja y Bigote ahuellamiento a las 10.000 pasadas. Fuente: Elaboración propia.	94
Figura 6-2: Diagrama de Caja y Bigote ahuellamiento a las 20.000 pasadas. Fuente: Elaboración propia.	95
Figura 6-3: Diagrama de Caja y Bigote Creep Slope . Fuente: Elaboración propia.....	96
Figura 6-4: Diagrama de Caja y Bigote ahuellamiento a las 10.000 pasadas. Fuente: Elaboración propia.	107
Figura 6-5: Diagrama de Caja y Bigote ahuellamiento a las 20.000 pasadas. Fuente: Elaboración propia.	108
Figura 6-6: Diagrama de Caja y Bigote Creep pasadas. Fuente: Elaboración propia.....	109

Índice de Tablas

Tabla 4-1: Ensayos de Simulación. Fuente: (Padilla, 2004).....	16
Tabla 4-2: Especificaciones del HWTT en los Estados Unidos. Fuente: (Beecroft & Petho , 2015)	24
Tabla 4-3: Repetitividad y reproducibilidad HWTT. Fuente: (Azari, 2014).....	25
Tabla 4-4: Correlación campo-laboratorio . Fuente: (Azari, 2014).....	26
Tabla 5-1: Número de probetas en función del material utilizado . <i>Fuente: Elaboracion propia</i>	30
Tabla 5-2: Granulometrías de los acopios de áridos. <i>Fuente: LEMCO</i>	31
Tabla 5-3: Propiedades físicas de la fracción gruesa de los acopios de áridos. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	32
Tabla 5-4: Propiedades físicas de la fracción fina de los acopios de áridos. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	32
Tabla 5-5: Ensayos tradicionales ligante asfáltico CA-24. Empresa (1) después de HPDR. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	33
Tabla 5-6: Ensayos tradicionales ligante asfáltico CA-24. Empresa (2) después de HPDR. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	34
Tabla 5-7: Ensayos tradicionales ligante asfáltico 60-80. Empresa (1) después de HPDR. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	34
Tabla 5-8: Ensayos tradicionales ligantes asfálticos 60-80. Empresa (2) después de HPDR. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	35
Tabla 5-9: Clasificación PG de ligantes asfálticos utilizados en las mezclas ensayadas. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	35
Tabla 5-10: Dosificación de áridos para la mezcla IV-A-12 (A). <i>Fuente: Elaboración propia</i>	36
Tabla 5-11: Granulometría IV-A-12 (A). <i>Fuente: Elaboración propia</i>	37
Tabla 5-12: Parámetros de diseño de la mezcla IV-A-12 (A). <i>Fuente: Elaboración propia</i>	38
Tabla 5-13: Dosificación de áridos para la mezcla IV-A-12 (B). <i>Fuente: Elaboración propia</i>	38
Tabla 5-14: Granulometría IV-A-12 (B). <i>Fuente: Elaboración propia</i>	39

Tabla 5-15: Propiedades volumétricas de la mezcla IV-A-12 (B). <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	40
Tabla 5-16: Dosificación de áridos Microaglomerado M-10. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	40
Tabla 5-17: Granulometría Microaglomerado M-10. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	41
Tabla 5-18: Dosis de ligante Microaglomerado M-10. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	41
Tabla 5-19: Propiedades volumétricas de la mezcla Microaglomerado M-10. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	42
Tabla 5-20: Dosificación de áridos SMA <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	43
Tabla 5-21: Granulometría SMA <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	43
Tabla 5-22: Propiedades volumétricas de la mezcla SMA . <i>Fuente: Elaboración propia.</i> ..	44
Tabla 5-23: Dosificación de áridos USM. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	45
Tabla 5-24: Granulometría USM. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	45
Tabla 5-25: Propiedades volumétricas de la mezcla USM <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	46
Tabla 5-26: Resumen y propiedades del total de probetas analizadas equipo de Rueda de Carga de Hamburgo. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	47
Tabla 5-27: Serie de Tamices. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	48
Tabla 5-28: Configuración para el ensayo. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	69
Tabla 5-28: Configuración para el ensayo. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	70
Tabla 5-29: Factor para obtener el máximo rango aceptable en la medición [ASTM C670-10]. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	78
Tabla 6-1: Resumen de resultados del ensayo de Rueda de Carga de Hamburgo. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	83
Tabla 6-2: Coeficiente de variación para la deformación máxima antes de las 10.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	85
Tabla 6-3: Coeficiente de variación para la deformación máxima antes de las 20000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	85
Tabla 6-4: Factor para obtener el máximo rango aceptable en la medición [ASTM C670-10]. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	86
Tabla 6-5: Validación de mezclas asfálticas IV-A-12-Tradicional-E1. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 10.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	87

Tabla 6-6: Validación de mezclas asfálticas IV-A-12-Tradicional-E2. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 10.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	88
Tabla 6-7: Validación de mezclas asfálticas IV-A-12-Modificado-E1. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 10.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	88
Tabla 6-8: Validación de mezclas asfálticas IV-A-12-Modificado-E1. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 20.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	88
Tabla 6-9: Validación de mezclas asfálticas IV-A-12-Modificado-E2. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 10.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	88
Tabla 6-10: Validación de mezclas asfálticas IV-A-12-Modificado-E2. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 20.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	89
Tabla 6-11: Validación de mezclas asfálticas M10-Modificado-E1. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 10.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	89
Tabla 6-12: Validación de mezclas asfálticas M10-Modificado-E1. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 20.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	89
Tabla 6-13: Validación de mezclas asfálticas M10-Modificado-E2. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 10.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	89
Tabla 6-14: Validación de mezclas asfálticas M10-Modificado-E2. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 20.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	90
Tabla 6-15: Validación de mezclas asfálticas SMA-Modificado-E1. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 10.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	90
Tabla 6-16: Validación de mezclas asfálticas SMA-Modificado-E1. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 20.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	90
Tabla 6-17: Validación de mezclas asfálticas SMA-Modificado-E2. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 10.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	90
Tabla 6-18: Validación de mezclas asfálticas SMA-Modificado-E2. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 20.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	91
Tabla 6-19: Validación de mezclas asfálticas USM-Modificado-E1. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 10.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	91
Tabla 6-20: Validación de mezclas asfálticas USM-Modificado-E1. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 20.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	91

Tabla 6-21: Validación de mezclas asfálticas USM-Modificado-E2. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 10.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	91
Tabla 6-22: Validación de mezclas asfálticas USM-Modificado-E2. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 20.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	92
Tabla 6-23: Resumen validación de mezclas asfálticas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	92
Tabla 6-24: Estadística descriptiva Ahuellamiento a las 10.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	94
Tabla 6-25: Estadística descriptiva Ahuellamiento a las 20.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	95
Tabla 6-26: Estadística descriptiva del Creep Slope. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	96
Tabla 6-27: Estadístico de Levene para el Ahuellamiento a las 10.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	99
Tabla 6-28: Estadístico de Levene para el Ahuellamiento a las 20.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	99
Tabla 6-29: Prueba robusta de igualdad de medias para el Ahuellamiento a las 10.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	100
Tabla 6-30: Prueba robusta de igualdad de medias para el Ahuellamiento a las 20.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	100
Tabla 6-31: Prueba robusta de igualdad de medias para Creep Slope. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	100
Tabla 6-32: Prueba Games-Howell de igualdad de medias para el Ahuellamiento a las 10.00 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	100
Tabla 6-33: Prueba Games-Howell de igualdad de medias para el Ahuellamiento a las 20.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	102
Tabla 6-34: Prueba Games-Howell de igualdad de medias para el Creep Slope <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	102
Tabla 6-35: Reagrupación de Datos. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	103
Tabla 6-36: Validación de mezclas asfálticas IV-A-12 Tradicional. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 10.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	103
Tabla 6-37: Validación de mezclas asfálticas IV-A-12 Modificado. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 10.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	103

Tabla 6-38: Validación de mezclas asfálticas M10- Modificado. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 10.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	104
Tabla 6-39: Validación de mezclas asfálticas M10- Modificado. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 20.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	104
Tabla 6-40: Validación de mezclas asfálticas SMA- Modificado. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 10.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	104
Tabla 6-41: Validación de mezclas asfálticas SMA- Modificado. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 20.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	104
Tabla 6-42: Validación de mezclas asfálticas USM- Modificado. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 10.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	105
Tabla 6-43: Validación de mezclas asfálticas USM- Modificado. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 20.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	105
Tabla 6-44: Validación de mezclas asfálticas USM- Modificado. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 20.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	106
Tabla 6-45: Estadística descriptiva Ahuellamiento a las 10.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	107
Tabla 6-46: Estadística descriptiva Ahuellamiento a las 20.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	108
Tabla 6-47: Estadística descriptiva Creep Slope. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	109
Tabla 6-48: Estadístico de Levene para el Ahuellamiento a las 10.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	110
Tabla 6-49: Estadístico de Levene para el Ahuellamiento a las 20.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	110
Tabla 6-50: Prueba robusta de igualdad de medias para el Ahuellamiento a las 10.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	110
Tabla 6-51: Prueba robusta de igualdad de medias para el Ahuellamiento a las 20.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	110
Tabla 6-52: Prueba robusta de igualdad de medias para el Creep Slope. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	110
Tabla 6-53: Prueba Games-Howell de igualdad de medias para el Ahuellamiento a las 10.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	111

Tabla 6-54: Prueba Games-Howell de igualdad de medias para el Ahuellamiento a las 20.000 pasadas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	111
Tabla 6-55: Prueba Games-Howell de igualdad de medias para el Creep Slope. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	112
Tabla 6-56: Prueba Games-Howell de igualdad de medias entre el grupo A y los demás Grupos. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	112
Tabla 6-57: Prueba Games-Howell de igualdad de medias para los grupo B y C. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	113
Tabla 6-58: Prueba Games-Howell de igualdad de medias para los grupo D y E. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	113
Tabla 6-59: Prueba Games-Howell de igualdad de medias para los grupo B,C,D E. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	113

1 Introducción

Mantener en buenas condiciones los caminos y calles que componen la creciente red vial nacional, supone un aumento en los gastos asociados a la conservación y la reparación de pavimentos, gastos que, sin duda, podrían ser utilizados en mejores propósitos como la salud, la educación, pensiones u otras de las tantas necesidades sociales que tiene este país. Es por esto que la promoción del uso de nuevos materiales y tecnologías para la reparación de pavimentos es de gran relevancia para mejorar el nivel de vida de todos los chilenos.

En Chile, para la reparación de caminos, se suele utilizar la técnica de recapado asfáltico, que consiste en remplazar la capa superior de un pavimento deteriorado con un nuevo material asfáltico de igual o superior calidad. Usualmente y previo a la aplicación del nuevo material, se suele eliminar mediante el fresado la totalidad o una parte del material asfáltico existente para mejorar la condición de la capa soportante.

La durabilidad de un recapado asfáltico dependerá principalmente de dos factores: el estado del pavimento existente y la calidad del nuevo pavimento. El segundo factor está íntimamente asociado a las propiedades de los materiales que se utilizarán como recapado, pues éstas determinarán la resistencia del nuevo pavimento, foco principal de esta investigación.

Actualmente en Chile, los recapados son construidos mayoritariamente con ligantes asfálticos tradicionales y con granulometrías corrientes que tienen una baja durabilidad y fallan prematuramente. Este estudio explora las capacidades que tienen los materiales propuestos por el proyecto FONDEF D09I1174 “Desarrollo de Materiales para Recapados Asfálticos Utilizados en la Rehabilitación de Pavimentos Deteriorados”. (FONDEF D09I1174, 2010) para ser usados como recapados de alto desempeño.

Complementando otras investigaciones asociadas al proyecto (FONDEF D09I1174, 2010) esta memoria se ocupará de caracterizar, mediante mediciones de laboratorio, el desempeño que presentan las mezclas propuestas cuando éstas son sometidas al Ensayo de rueda de carga de Hamburgo.

Todos los procedimientos de fabricación de probetas y ensayos utilizados en esta investigación son extraídos de la Guía de Diseño AASHTO, la Norma ASTM y el Manual de Carreteras de la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas de Chile.

La metodología experimental aquí propuesta tiene dos objetivos: determinar cuál de las mezclas estudiadas es la mejor candidata para ser usada en recapados asfálticos de alto desempeño cuando estos son sometidos a condiciones de ahuellamiento y cuáles de los factores de diseño tiene una mayor preponderancia en el ahuellamiento de la mezcla. Adicionalmente, se espera que este estudio sirva como investigación exploratoria para posteriores estudios en los que se utilice el equipo de rueda de carga de Hamburgo.

2 Objetivos

2.1 Objetivos Generales

El principal objetivo de esta investigación es determinar mediante el Ensayo de rueda de carga de Hamburgo cuál de las mezclas asfálticas propuestas por el proyecto FONDEF D09I1174 es la más adecuada para ser utilizada como recapado asfáltico de alto desempeño.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar experimentalmente el comportamiento que presentan las mezclas en estudio cuando éstas son sometidas a condiciones de ahuellamiento.
- Clasificar, conforme a lo anterior, las mezclas de acuerdo a su capacidad para resistir las deformaciones permanentes.
- Corroborar en laboratorio los factores que, de acuerdo a la literatura especializada, afectan en mayor medida al desempeño de las mezclas en condiciones de ahuellamiento.
- Comprobar si el diseño de mezcla propuesto en el estudio FONDEF tiene una resistencia al ahuellamiento compatible con el uso como mezcla asfáltica de alto desempeño.
- Contribuir al entendimiento de las aplicaciones del Ensayo de rueda de carga de Hamburgo para su uso en posteriores investigaciones.

3 Alcances

Los diseños utilizados corresponden a las mezclas estudiadas en el proyecto FONDEF D09I1174 desarrollado por los investigadores del Departamento de Obras Civiles de la Universidad Técnica Federico Santa María de Valparaíso (Chile).

La caracterización de los materiales se realizó utilizando el equipo de Ensayo de rueda de carga de Hamburgo, disponible en el Laboratorio de Control de Materiales de la empresa AsfalChile S.A. ubicada en la comuna de Concón (Chile).

Los procedimientos utilizados para la fabricación de las probetas son los especificados en la norma AASHTO T324-11. En el caso de algunos puntos no detallados, se definieron procedimientos acordes a la literatura técnica disponible.

La fabricación de las probetas se realizó en las instalaciones del LEMCO de la Universidad Técnica Federico Santa María de Valparaíso (Chile).

Los ligantes asfálticos utilizados fueron provistos por las empresas AsfalChile S.A. y Química Latinoamericana S.A. Los áridos fueron facilitados por la constructora Asfalcura S.A.

Las dosificaciones de las mezclas utilizadas corresponden a diseños reales elaborados por la empresa Asfalcura S.A.; a excepción de la mezcla USM que fue desarrollada por investigadores del LEMCO.

Todas las mezclas cumplen con los estándares del Manual de carreteras, salvo las mezclas USM que corresponden a un diseño propio de la Universidad Técnica Federico Santa María.

La variabilidad de los resultados fue analizada de acuerdo a el estándar ASTM E177-14 y C670-10 y para evaluar la significancia de los resultados se realizó un análisis de varianza con la ayuda del software IBM SPSS Statistics.

4 Marco Teórico

4.1 Recapado Asfáltico

El recapado asfáltico es una de las técnicas de rehabilitación de pavimentos más comunes y extendidas en el mundo. Esta técnica consiste en el remplazo total o parcial de un pavimento deteriorado por una capa de mezcla asfáltica nueva para restituir o mejorar la capacidad estructural del pavimento existente. Los recapados asfálticos pueden ser aplicados sobre asfalto u hormigón sin mayores diferencias.

La técnica del recapado se podrá utilizar cuando el pavimento no presente graves daños estructurales ni existan deterioros en las capas subyacentes. En estas ocasiones sería más económico y recomendable realizar un remplazo completo del pavimento.

Cuando sea posible la utilización del recapado, se requerirá de la reparación previa de las fisuras y deformaciones existentes, las que comúnmente se repararan mediante el aserrado y sellado de grietas en el caso de las fisuras y con fresado y relleno en el caso de las deformaciones. En ocasiones, también será necesario aislar las nuevas capas mediante la utilización de grillas, geotextiles y/o capas bituminosas de graduación gruesas para retardar la reflexión de grietas. (Universidad Mayor de San Simón, 2004)

Sea cual sea la metodología que se utilice para diseñar el recapado asfáltico, ésta deberá ser capaz de equilibrar la resistencia a la fatiga y la resistencia a las deformaciones permanentes para evitar agrietamientos y ahuellamientos prematuros. Los nuevos métodos de diseño se hacen cargo de esta problemática mediante la utilización de pruebas como los ensayos de fatiga y el ensayo de rueda de carga de Hamburgo. (Fujie Zhou, 2006)

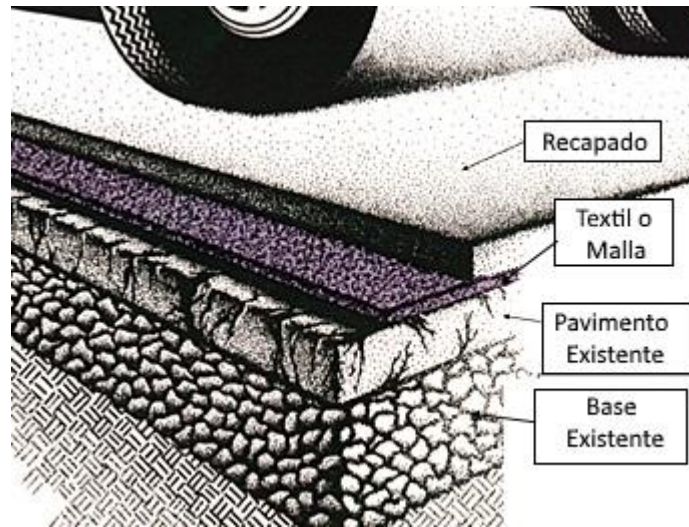


Figura 4-1: Recapado Asfáltico sobre asfalto, Fuente www.newbergoregon.gov/maintenance

4.2 Ahuellamiento

La deformación plástica llamada ahuellamiento, roderas o en inglés rutting corresponde a los canales que se forman a lo largo de la trayectoria longitudinal de circulación de los vehículos, exactamente en las huellas por donde ruedan los neumáticos sobre el pavimento. Este surco es provocado por la acumulación de pequeñas deformaciones permanentes producidas por aplicaciones repetida de carga provenientes de los vehículos que circulan sobre la superficie del pavimento siendo uno de los tipos de deterioro más importantes dentro del estudio del comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente.

Las deformaciones plásticas se caracterizan principalmente por una sección transversal de la superficie ondulada que no ocupa su posición original, la que se asocia a temperaturas altas en la superficie del pavimento.

Para evitar el deterioro es necesario que la mezcla esté fabricada con un cemento asfáltico que permanezca elástico a temperaturas relativamente altas. El comportamiento de las mezclas asfálticas frente a la formación de roderas está íntimamente relacionado con el tipo de ligante asfáltico, la composición granulométrica y calidad de los agregados pétreos y aditivos empleados en la fabricación dela mezcla.

La distribución lateral de la zona de rodadas está influenciada por la velocidad del tráfico, el ancho del carril y la profundidad del ahuellamiento. Las velocidades bajas de la circulación contribuyen directamente al desarrollo de roderas en las capas asfálticas aumentando el tiempo de carga de la rueda sobre el pavimento.

La acumulación de deformaciones plásticas en una capa de concreto asfáltico pueden ser causadas por una compactación del material que compone la mezcla asfáltica y por los flujos de material provocados por los esfuerzos cortantes que transmiten las cargas del tráfico.

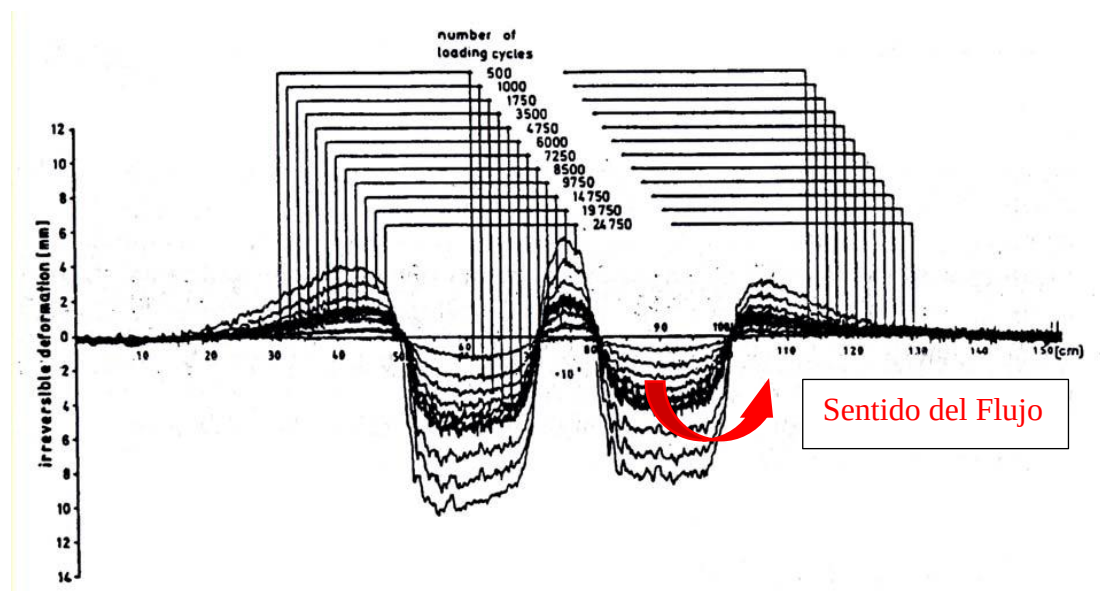


Figura 4-2: Mecanismo de deformación de la capa asfáltica, Fuente (Padilla, 2004)

El ahuellamiento se inicia con una compactación del asfalto justo debajo del área de contacto para, posteriormente, continuar con proceso de flujo lateral, que mueven la mezcla horizontalmente desde el centro de la huella hacia afuera como se puede ver en la figura anterior. (Padilla, 2004)

4.2.1 Factores que Intervienen en la Formación de Ahuellamiento

Existen una serie de factores que afectan o intervienen en la formación de las roderas o deformaciones plásticas permanentes de los pavimentos, los cuales se describirán a continuación. Estas variables deben ser consideradas al momento de realizar el proyecto de las mezclas asfálticas y la construcción de los pavimentos flexibles (Padilla, 2004)

4.2.1.1 . Granulometría de los Agregados Pétreos.

(Brown & Pell, 1964) concluyeron que las mezclas abiertas o de granulometría discontinua exhiben una mayor susceptibilidad a las deformaciones plásticas y son aún más vulnerables a las roderas a temperaturas altas, que las mezclas densas o elaboradas con granulometrías continuas.

(Robert P., Miller, Ford, Maher, & Fee tu, 1991) Demostró que las granulometrías gruesas son más propensas a sufrir de ahuellamiento que las granulometrías finas.

4.2.1.2 Forma, Tamaño y Textura de los Agregados Pétreos

(Uge & Van de Loo, 1974) concluyeron que las mezclas asfálticas elaboradas con agregados angulares son menos susceptibles a las deformaciones plásticas que las mezclas asfálticas elaboradas con materiales de canto rodado. Debido a la dificultad que entraña, este estudio no analiza el efecto aislado de la forma y la textura.

En el estudio de (Monishmith , 1994) se señala que el cambio de una forma redondeada a una angular, incrementa la resistencia al ahuellamiento de un pavimento. y que lo mismo sucede cuando se presenta un cambio de una textura suave a una rugosa, y cuando se incrementa el tamaño máximo de los agregados.

4.2.1.3 Contenido de Polvo Mineral (Filler) en la Mezcla.

Los polvos minerales junto con el ligante forman una pasta o mástico (mastic) cuya calidad tiene una importancia fundamental en el comportamiento reológico,

impermeabilidad, y durabilidad de la mezcla asfáltica. Los factores que intervienen para conseguir un buen mástico son diversos:

- La relación Polvo Mineral/Asfalto, cuanto más alta sea esta relación, más elevada serán la viscosidad y la rigidez de la mezcla.
- La afinidad por el agua del polvo mineral. Cuando el polvo mineral tiene afinidad por el agua puede producirse una degradación de la capacidad de la mezcla asfáltica para resistir el ahuellamiento.
- La finura del polvo mineral. Cuanto más fino sea el polvo, mejor adherencia tendrá éste con el ligante.

La utilización de polvo mineral o filler dentro de una mezcla incrementa el roce interno entre las partículas del agregado mineral, lo que a su vez aumenta la capacidad de ésta a resistir deformaciones, además de cumplir con las siguientes funciones:

- Rellena los vacíos del agregado mineral, lo que impermeabiliza y densifica el esqueleto. Sustituye parte del ligante que, de otra manera, sería necesario para conseguir un porcentaje de vacío en mezcla lo suficientemente bajo.
- Proporciona puntos de contacto entre los agregados de mayor tamaño, trabándolos y limitando sus movimientos, lo que aumenta la estabilidad del conjunto.
- Facilita la compactación, actuando a modo de rodamiento entre los áridos más gruesos.
- Hace la mezcla más trabajable al envolver los áridos gruesos y evitar su segregación.

4.2.1.4 Tipo de Ligante Asfáltico.

Cuando los ligantes asfálticos son poco viscosos, se obtienen mezclas asfálticas más susceptibles a sufrir deformaciones plásticas. Por este motivo, se recomienda utilizar cementos asfálticos duros (alta viscosidad) en climas cálidos. (Monishmith, Epps, & Finn, 1985)

El punto de ablandamiento permite valorar la aportación de los ligantes asfálticos convencionales a la resistencia a las deformaciones plásticas de las mezclas, pero no es válido cuando se estudian asfaltos modificados. Estos asfaltos presentan una menor susceptibilidad térmica que los ligantes convencionales, lo que favorece su buen comportamiento ante condiciones de ahuellamiento.

El empleo de asfaltos de baja penetración y asfaltos modificados disminuyen el riesgo de las deformaciones plásticas.

Las propiedades viscoelásticas del ligante asfáltico se traspasan al comportamiento mezcla (Padilla, 2004)

(Corté & et, 1994) realizaron una serie de pruebas en Francia, con el fin de determinar el efecto del tipo de asfalto en la formación de roderas. Los resultados mostraron que los asfaltos modificados con polímeros, multigrados y asfaltos duros mejoran la resistencia al ahuellamiento de un pavimento.

4.2.1.5 Contenido de Ligante Asfáltico.

(Monishmith & Taybali, 1988) recomendaron, para evitar problemas de estabilidad, usar contenidos de asfalto y vacíos similares y cercanos al 4%. También propusieron un mínimo absoluto de vacíos en mezcla del 3%.

(Mahboub & Little, 1988) determinaron que la reducción en el contenido de vacíos a partir del incremento en el contenido de asfalto perjudica la resistencia al ahuellamiento; afirmando que un contenido de asfalto excesivo es equivalente a introducir lubricante entre las partículas de agregado.

4.2.1.6 Contenido de Vacíos en el Agregado Mineral.

(Copper, Brown, & Poley, 1985) concluyeron que la buena resistencia a la deformación plástica requiere de un bajo contenido de vacíos en el agregado mineral (VMA) y que la granulometría deseada para contenidos mínimos de VMA puede ser determinada usando ensayos en los agregados secos. Sin embargo, se recomienda no

exceder el contenido mínimo de vacíos teórico del agregado mineral, lo que impediría aportar una cantidad de ligante adecuada.

(Kandhal & Mallick, 2001) observaron el efecto de los vacíos en el agregado mineral (VAM) utilizando el analizador de pavimentos asfálticos APA. Con este procedimiento, concluyeron que un incremento en los vacíos y en el espesor de una capa asfáltica aumentan las deformaciones permanentes cuando éstas son fabricadas con agregados de menor tamaño, mientras que causa una reducción del ahuellamiento cuando éstas están construidas con agregados de gran tamaño.

4.2.1.7 Contenido de Vacíos en la Mezcla Asfáltica

(Uge & Van de Loo, 1974) observaron que los desplazamientos relativos entre las partículas ocurren cuando las mezclas se trabajan a altas temperaturas (construcción) y ocurre de igual forma cuando se usan temperaturas moderadas y cargas prolongadas (condiciones de ahuellamiento). Debido a lo anterior, el estudio recomienda el uso de mezclas gruesas compactadas con rodillos pesados que generen un esqueleto mineral estable que incremente la fricción interna.

(Monishmith , 1994) observó que un incremento en el contenido de vacíos en la mezcla, provoca un decrecimiento en la resistencia al ahuellamiento de las mezclas.

(Linden & Van der Hiede, 1987) enfatizaron la importancia de la compactación y concluyeron que el grado de compactación es uno de los principales parámetros de calidad de las mezclas en sitio, especialmente cuando se trata de diseños con un bajo contenido de asfalto.

4.2.1.8 Cargas por Eje Equivalente de Los Vehículos y Presión de Contacto de Los Neumáticos con El Pavimento.

Las cargas de los vehículos se transmiten al pavimento por medio de los neumáticos. La presión de contacto depende de la presión de inflado de los neumáticos; *grosso modo* cuando la presión inflado de los neumáticos es alta, el área de contacto es pequeña y por tanto las presiones de contacto grandes; por lo contrario, cuando el neumático tiene presiones bajas la presión de contacto disminuye.

(Monishmith , 1994) realizó un proyecto con el *Strategic Highway Research Program* (SHRP) donde se determinó que un incremento en la presión de contacto entre los neumáticos y el pavimento produce una disminución en la resistencia de las mezclas asfálticas ante las deformaciones plásticas.

4.2.1.9 Número de Repeticiones de Carga.

(Monishmith , 1994) observó que un aumento en el número de repeticiones de carga establece una disminución en la resistencia de los pavimentos a la generación de deformaciones plásticas, es decir, cuando se incrementa el número de repeticiones de carga, el pavimento es más susceptible a sufrir este tipo de deterioro.

Cada paso de los neumáticos por un punto sobre el pavimento se puede considerar como un pulso de carga. Si la mezcla asfáltica está a una temperatura relativamente alta, esto provocará que se comporte de forma plástica ante las sollicitaciones del tráfico, acumulando las deformaciones permanentes que generan el ahuellamiento.

4.2.1.10 Empleo de Modificadores Asfálticos.

(Stuart, 1993) analizó el efecto que presenta la utilización de modificadores sobre las deformaciones permanentes en las mezclas asfálticas. Realizó una comparación entre las propiedades de una mezcla que contenía asfalto AC-20 y otros asfaltos que contenían diferentes tipos de modificadores. La información obtenida sobre viscosidad y penetración de los ligantes indican que los modificadores químicos pueden ser más rígidos para temperaturas altas en el pavimento y más suaves para temperaturas más bajas que para el caso de los pavimentos que no incluyen modificadores asfálticos. Las deformaciones permanentes fueron medidas mediante pruebas de fluencia utilizadas para evaluar la susceptibilidad al ahuellamiento. Los tres modificadores químicos presentaron resultados con una disminución en las deformaciones del 25% en promedio.

(Kamel & Miller, 1994) realizaron un estudio para observar el efecto de los modificadores sobre las deformaciones permanentes en mezclas asfálticas. Emplearon

tres tipos de asfaltos: uno convencional, uno modificado con polímeros y un asfalto modificado sin polímeros llamado Premium. En términos de comportamiento, los asfaltos modificados mostraron una mayor resistencia al ahuellamiento comparado con los valores obtenidos para un asfalto convencional. Al inicio de las pruebas, el comportamiento de los tres pavimentos fue excelente, empezando a observarse diferencias en el comportamiento entre las 10,000 y 20,000 pasadas, cuando el pavimento convencional empezó a mostrar deterioros de forma acelerada. A medida que se aplicaron más cargas, el comportamiento de las mezclas modificadas fue notoriamente superior; ambas tuvieron un comportamiento muy similar durante toda la prueba.

Debido a las deformaciones excesivas presentadas en el pavimento convencional, la prueba se terminó después de los 300,000 ciclos de carga. Las pruebas para los otros dos tipos de pavimentos (modificados) se extendieron hasta los 900,000 ciclos de carga. Comparado el número de ciclos necesarios para causar una deformación permanente de 26 mm. en cada uno de los tres pavimentos, resultó muy evidente que los pavimentos modificados incrementaron significativamente la capacidad de carga de las secciones analizadas.

(Monishmith , 1994) señaló que los modificadores pueden ser utilizados para incrementar la rigidez de las mezclas asfálticas a temperatura crítica, reduciendo la susceptibilidad ante la formación de roderas. Asimismo, investigó la influencia de los modificadores sobre las características de deformación plástica de mezclas definidas por la prueba de cortante simple con carga repetida.

4.2.1.11 Temperatura.

Es conocido el hecho de que la temperatura medioambiental elevada reblandece los pavimentos asfálticos, ocasionando una enorme susceptibilidad a sufrir ahuellamiento. La temperatura medioambiental es, por tanto, un factor de gran importancia en las deformaciones plásticas de los pavimentos debido a que determina directamente el comportamiento viscoelástico del ligante.

(Monishmith , 1994) observó que un incremento en la temperatura de prueba de las mezclas asfálticas, genera una baja en la resistencia al ahuellamiento.

4.2.1.12 Agua.

El agua puede aumentar la susceptibilidad de una mezcla asfáltica a las deformaciones plásticas permanentes. Los efectos del agua pueden ser considerados en la fase inicial de diseño de las mezclas o como parte del proceso de evaluación de las mezclas. Cuando existe una modificación de la estructura de pavimento de estado seco a húmedo, se presenta una disminución de la resistencia de la mezcla.

(Padilla, 2004) indicó que en un estudio de la Universidad del Estado de Oregón en Estados Unidos de Norteamérica., se demuestra que la propensión al ahuellamiento de las mezclas asfálticas se incrementa significativamente si está sujeta a saturación sostenida de agua. Los resultados fueron obtenidos a partir de ensayos de cortante simple en mezclas antes y después de ser sometidas a la acción del agua. El incremento del ahuellamiento que podría ocurrir *in situ* puede ser estimado utilizando el procedimiento presentado por el programa SHRP.

4.2.2 Ensayos para la Medición del Ahuellamiento.

Los ensayos de laboratorio que se han propuesto para evaluar las deformaciones plásticas o ahuellamiento, se pueden dividir en 6 tipologías principales.

4.2.2.1 Ensayos Diametrales

Este tipo de ensayos no son indicados para evaluar las deformaciones plásticas debido a que se trata de un ensayo de tracción indirecta, por lo no puede ser un buen predictor de las roderas.

4.2.2.2 Ensayos Uniaxiales

Este tipo de ensayos podría ser potencialmente usado para predecir el funcionamiento de pavimentos, pero su capacidad de predicción es cuestionable ya que no simula adecuadamente las condiciones reales del pavimento además de no mostrar la falla inmediata de las probetas.

4.2.2.3 Ensayos Triaxiales

La diferencia con los ensayos uniaxiales es que este tipo de ensayo proporciona una presión de confinamiento, lo que se aproxima más a las condiciones reales a las que estará sometido un pavimento, lo que proporciona una temperatura y presión similar a la del lugar, llevando a los especímenes a una falla a corto tiempo.

Estos ensayos requieren de equipos sofisticados y condiciones muy específicas, por lo que se tiene poca experiencia. No obstante, se han realizado algunos ensayos sobre deformaciones plásticas en triaxiales creep y triaxiales de carga repetida.

4.2.2.4 Ensayos de Corte

Este tipo de ensayos incluye el ensayo Superpave de corte SST que es muy complicado de llevar a cabo y costoso. Los modelos que utiliza para la predicción del comportamiento no tienen mucha aceptación para la medición del ahuellamiento por lo que no se recomienda su uso.

4.2.2.5 Ensayos Empíricos

Son ensayos basados en la experiencia (Marshall) y en la correlación de resultados de laboratorio y sus predicciones en cuanto a funcionamiento son muy limitadas. De ser empleados, en la mayoría de los casos requieren de otros ensayos de laboratorio adicionales.

4.2.2.6 Ensayos de Simulación

Son una alternativa razonable en la predicción de las deformaciones plásticas, con resultados muy cercanos al funcionamiento real del pavimento. Simulan muy bien lo que sucede en un pavimento sometido a las cargas del tráfico y existe suficiente información disponible para dar recomendaciones y adoptar criterios. Por este motivo, fueron rápidamente adoptados para realizar este tipo de análisis.

Tabla 4-1: Ensayos de Simulación. Fuente: (Padilla, 2004)

Método de Ensayo	Dimensión de la Probeta	Ventajas	Desventajas
Analizador de Pavimentos Asfálticos APA	Cilíndrico 6 in. X 3.5 ó 4.5 in. ó viga.	-Simula la acción del tráfico y las condiciones de temperatura. -Es una mejora del GLWT -Puede ensayar hasta 6 probetas -Es muy usado en USA -Permite uso del cilindros SGC	-Costoso
Rueda de Carga de Hamburgo	10.2 in. X 12.6 in. X 1.6 in.	-Simula la acción del tráfico y las condiciones de temperatura. -Es capaz de predecir daños por humedad -Puede ensayar hasta 2 probetas simultáneamente -Es muy usado Alemania -Permite uso del cilindros SGC	-Las deformaciones medidas en laboratorio no permiten predecir el ahuellamiento real.
Ensayo de Ahuellamiento Francés	7.1 in. X 19.7 in. X 0.8 a 3.9 in.	-Simula la acción del tráfico y las condiciones de temperatura. -Puede ensayar hasta 2 probetas simultáneamente -Es muy usado Francia	-No es tan utilizado en Estados Unidos
PURWheel.	11.4 in. X 12.2 in. X 1.3, 2, 3 in.	-Permite el uso de especímenes de terreno	-Requiere de compactador lineal -Existe poca experiencia disponible
Modelo Móvil de Simulación de Carga.	47 in. X 9.5 in. X espesor.	-Utiliza probetas a escala	-No existe estándar para la fabricación de los especímenes -Requiere utilización de materiales especiales
RLWT.	6 in. de diámetro y 4.5 in de altura.	-Correlaciones con el APA -Permite uso del cilindros SGC	-Poca Información Disponible
Dispositivo Wessex.	6 in. de diámetro y 4.5 in de altura.	-Puede ensayar hasta 2 probetas -Permite uso del cilindros SGC	-Poca Información Disponible

4.3 Ensayo de Rueda de Carga de Hamburgo

El ensayo de rueda de carga de Hamburgo conocido en inglés como: *Hamburg Wheel Tracking Test* (HWTT), es una prueba de simulación en laboratorio diseñada para predecir el desempeño que una mezcla asfáltica sometida a condiciones de ahuellamiento.

Este ensayo se vale principalmente de un dispositivo electromecánico llamado Rueda de Carga de Hamburgo, que hace rodar un cilindro de acero de peso conocido y a una velocidad constante sobre una muestra de mezcla asfáltica que se encuentra acondicionada a una temperatura y humedad específica.

A medida que la rueda circula sobre la probeta, el equipo registra mediante un transductor las deformaciones permanentes que la rueda deja a su paso.

4.3.1 Historia del Ensayo de Rueda de carga de Hamburgo

El HWTD fue desarrollado en la década del 70 por Esso A.G. en Hamburgo, Alemania. El diseño del equipo se basó en un dispositivo británico que utilizaba un neumático de goma en lugar de una rueda de acero. La máquina se conocía originalmente como *Esso Wheel-Tracking Device*.

En un comienzo, el equipo se utilizó para rechazar o aceptar mezclas asfálticas susceptibles a presentar ahuellamientos prematuros. La aceptabilidad de la probeta estaba dada por la deformación máxima que ésta registraba cuando el equipo alcanzaba las 9.540 pasadas sobre probetas sumergidas en un baño de agua caliente de alrededor de 50°C (Beecroft & Petho , 2015).

Aunque el método de prueba original no especifica un contenido de vacíos en mezcla, se sabía que este factor tenía un impacto sustancial en los resultados de la prueba. Por esto, desde un principio se recomendó que las muestras debían ser compactadas a la misma densidad que se espera que tenga el pavimento una vez instalado.

En Alemania debido a sus métodos de diseño, esta densidad se asociaba a los 50 golpes Marshall no considerando post-compactaciones en los pavimentos ya instalados (Beecroft & Petho , 2015).

En los países que siguen filosofías de diseño similares a las de Estados Unidos, se requiere que las probetas utilicen un nivel diferente de contenido de vacíos (Drüschner, Harders, & Ohmen, 1997)

El equipo original utiliza probetas cuadradas de aproximadamente 7,5 kg y que generalmente mide 260 mm de ancho, 320 mm de largo y 40 mm de espesor (aunque el dispositivo puede acomodar espesores de hasta 150 mm). El dispositivo trabaja en rangos de temperatura de entre 25°C y 70 °C. El método de prueba que utiliza la rueda de acero de 47 mm de ancho que imparte una carga fija de unos 700 N, aunque también permite usar ruedas de goma que disminuyen esta presión.

El equipo permite el uso de acondicionamiento en agua y en aire; sin embargo, se prefiere el baño de agua ya que los tiempos de acondicionamiento son mucho más cortos.

Las primeras experiencias alemanas con HWTD indicaron lo siguiente:

- Los ahuellamientos son más pequeños cuando el ensayo se realiza en condiciones secas.
- Las ruedas de acero tuvieron un impacto mucho mayor en la tasa de compactación en comparación con las ruedas recubiertas de caucho. Llegando a presentar ahuellamientos del doble de profundidad (Beecroft & Petho , 2015).
- Se descubrió que algunos agregados finos son sensibles al agua; las mezclas asfálticas preparadas con agregados de cuarcita mostraron una profundidad de rodadura dos veces mayor que las fabricadas con finos de diorita.

Desde 1997, las autoridades de carreteras alemanas han utilizado el método de prueba “*TP A-StB test method, Wheel-tracking test – Determining the rut depth in a water bath (forschungsgesellschaft für Strassen-und Verkehrswesen, 1997*”. Si bien

esta prueba se considera eficaz, sólo permite la identificación de mezclas "buenas" y "malas" y no es capaz de proporcionar una evaluación más detallada. La prueba utiliza una rueda de acero en un baño de agua a 50 °C.

La introducción de las normas europeas condujo al desarrollo de UNE-EN 12697-22:2003 Método de prueba para asfalto de mezcla en caliente parte 22: (Comité Europeo de Normalización 2003). Esta prueba utiliza ruedas de goma y realiza el acondicionamiento en aire a una temperatura de 40, 50 o 60 °C dependiendo de las especificaciones establecidas por cada país (Beecroft & Petho , 2015)

La diversificación de las pruebas en Europa originó el estudio (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2009) que revisa la aplicabilidad de los ensayos y establece las siguientes observaciones:

- El método de fijación de la muestra es importante. Se recomendó que las pruebas de ahuellamiento se realicen con placas incrustadas en el fondo y los lados.
- Para mezclas de asfalto de 60 mm de espesor, es decir, capas intermedias, se sugirió 2 mm como profundidad máxima de rodadura después de 20.000 pasadas.
- Las condiciones de término deben ajustarse para que la prueba finalice cuando la profundidad del ahuellamiento alcance el 20% del espesor original. Aquellas que sobrepasen ese límite, se clasificarán como mezclas con mal desempeño. (Beecroft & Petho , 2015)

En 1990, un grupo de organizaciones de investigación de los Estados Unidos participó en una gira por seis países europeos. El HWTT se eligió como prueba de desempeño debido a que se consideró que su uso podría mejorar la calidad de los pavimentos en EEUU. Particularmente, porque la presión de contacto de 0,73 MPa utilizada es similar a la presión que ejercen los neumáticos de un camión de doble eje. Las velocidades de 50 pasadas por minuto del equipo permitirían que el ensayo completo de 20.000 pasadas (requerido según las pautas AASHTO) tomara alrededor

de 6.5 horas. El equipo permite detener la prueba cuando se alcanza la profundidad de deformación predeterminada.

Debido a las diferencias en los criterios de diseño de las mezclas entre Alemania y Estados Unidos, las autoridades norteamericanas han agregado especificación para los vacíos llenos de aire, siendo el $7.0 \pm 1.0\%$ el requisito estándar para el asfalto de mezcla caliente en los Estados Unidos, aunque esto varía según los Estados (Beecroft & Petho , 2015)

Cuando se comenzó a utilizar el equipo en los Estados Unidos se observó que alrededor de las 10.000 pasadas las mezclas comenzaban a presentar debilidad asociada a la presencia de humedad, cosa que al parecer no ocurría con las mezclas utilizadas en Alemania.

Interesados en el tema varias agencias norteamericanas comenzaron a desarrollar sus propios equipos y procedimientos en los que está incluido el equipo *Asphalt Pavement Analyzer Junior* (APA jr.) que, entre otras cualidades, permite reproducir el ensayo AASHTO 324-11.

4.3.2 El Ensayo de Rueda de Carga de Hamburgo en la Actualidad

Se realizó una revisión de las especificaciones del HWTT y se encontró que en Europa sólo se utiliza como prueba de ahuellamiento bajo el estándar EN 12697-22, junto con el dispositivo de seguimiento de rueda francés y el dispositivo de seguimiento de rueda británico (Beecroft & Petho , 2015)

En algunos estados de Norteamérica se usa una prueba combinada de ahuellamiento con sensibilidad a la humedad, que se utiliza tanto para verificar la resistencia a la deformación permanente como la sensibilidad a la humedad de las mezclas.

En el año 2007, solo dos estados informaban el HWTD en las especificaciones, este número que aumentó a siete en el 2014. Los estados que parecen estar a la vanguardia de la implementación del HWTT son Texas, Colorado, California, Utah, Arkansas, Washington e Illinois. (Schram, Williams, & Buss, 2014)

4.3.3 El Estándar AASHTO T324-11

(AASHTO T 324-11, 2011) es el método de prueba designado para la prueba de rueda de carga de Hamburgo para HMA en los Estados Unidos. El método cubre tanto la medición del ahuellamiento como la de la sensibilidad a la humedad en HMA mediante el HWTD. La versión más reciente es la del 2011 y corresponde a una actualización de la versión original del 2004. (Ver Anexo B)

Esencialmente, el HWTT tiene un método similar al de otros dispositivos de rueda de carga, con la diferencia de que éste realiza la prueba sumergida en un baño de agua a temperatura controlada. La prueba registra la profundidad del ahuellamiento en función del número de pasadas de la rueda.

Para su ejecución se requieren dos probetas por ensayo. El HWTD se puede cargar con una muestra compactada en laboratorio (pueden ser muestras en placas o cilíndricas SGC), y muestras de terreno que pueden ser losa cortada a sierra o núcleos cilíndricos extraídos de un pavimento existente.

El HMA para pruebas de laboratorio debe producirse de conformidad con las especificaciones particulares de la mezcla que se esté estudiando, luego se debe compactar a un tamaño y densidad especificados en el mismo cuerpo normativo.

Antes de realizar la prueba, deben medirse la densidad específica, la densidad específica máxima y el contenido de vacío en mezcla. Los vacíos de aire objetivo deben ser de $7,0 \pm 1,0\%$, excepto en el caso de las muestras de campo, que pueden analizarse con el contenido de vacío de aire en el que se obtienen (Beecroft & Petho , 2015)

4.3.3.1 Procedimiento de Ensayo.

Las probetas se cargan en una bandeja de montaje y se fijan rígidamente a ella mediante las abrazaderas y los moldes de polietileno que incluye el equipo.

Después de encender el dispositivo de prueba, la computadora y el software correspondiente, se deben ingresar varias configuraciones de prueba, incluida la

información del proyecto, la temperatura de prueba y la profundidad de ahuellamiento permisible. Se requiere un tiempo de acondicionamiento de 30 minutos para aclimatar las muestras de prueba. En las versiones más recientes de HWTD, la prueba se ejecuta automáticamente, aunque aún se puede realizar manualmente si fuera necesario.

Después de bajar la rueda y alinear los transductores de desplazamiento LVDT, la prueba puede comenzar. El dispositivo se apagará después de alcanzar 20.000 pasadas o cuando se haya excedido la profundidad de ahuellamiento máxima permitida.

Todos los datos se almacenan automáticamente en la computadora. Cuando se completa la prueba, se pueden recoger los datos y desmontar el experimento.

El archivo de datos extraído del equipo se puede utilizar para trazar la curva de ahuellamiento en función del número de pasadas. A partir de este gráfico, se pueden obtener las pendientes de deformación y las intersecciones de los estados estacionarios de la curva. A continuación, se muestra la curva típica del ensayo. (AASHTO T 324-11, 2011)

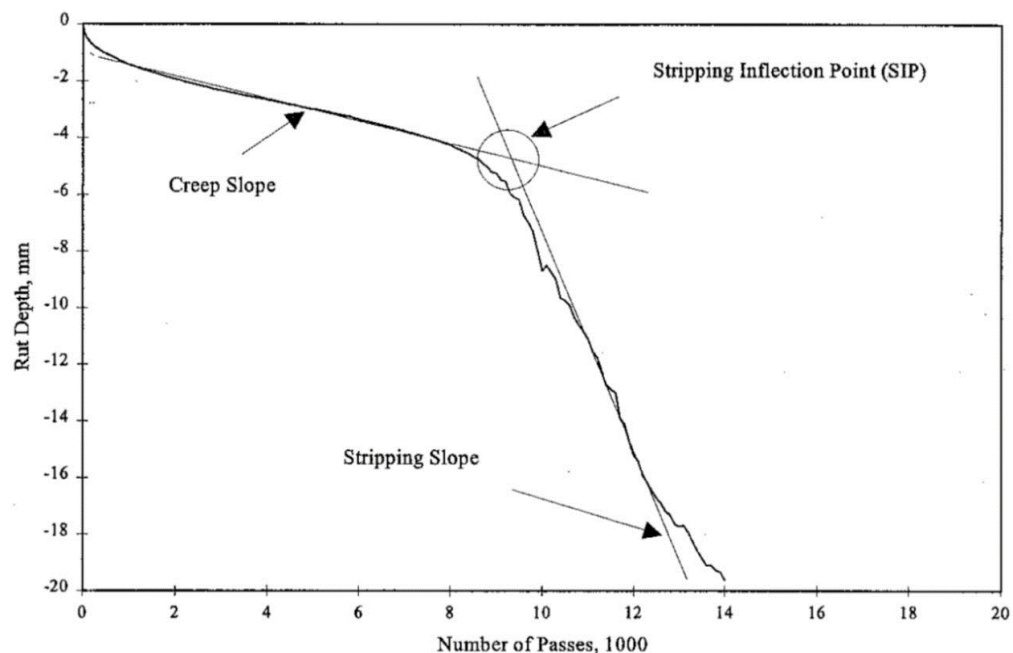


Figura 4-3: Mecanismo de deformación de la capa asfáltica, *Fuente* (AASHTO T 324-11, 2011)

La pendiente de los estados estacionarios (Creep Slope y Stripping Slope) se suele expresar como el inverso de la pendiente indicando la cantidad de pasadas que se requieren para crear 1 [mm] de ahuellamiento. El procedimiento para determinar estas rectas a partir de datos medidos no está completamente establecido en la normativa.

El punto de inflexión, también llamado stripping point, se determina como la intersección de las rectas asociadas a ambos estados estacionarios.

Cabe señalar que el método de prueba actualmente no tiene una declaración de precisión o repetitividad.

La especificación AASHTO T 324-11 sólo requiere el informe del punto de inflexión o stripping, lo que entraña cierta subjetividad en la determinación de los puntos de inicio y fin de las pendientes de Creep y Stripping. Esto puede ser problemático por tres razones:

1. Los puntos de inicio y fin de las pendientes pueden variar en varios cientos de pasadas.
2. La influencia del período de post-compactación en los primeros 1000 o 2000 ciclos puede dificultar la distinción entre las pendientes, especialmente con especímenes altamente sensibles a la humedad.
3. El mecanismo detrás de la formación de surcos puede necesitar ser determinado a partir del análisis visual y la experiencia, ya que los casos de desprendimientos de material pueden conducir a lecturas erráticas de la profundidad del ahuellamiento.

Como resultado de estas dificultades que conducen a mediciones imprecisas, los distintos departamentos de transportes en Estados Unidos han propuesto varios parámetros de informe alternativos (Beecroft & Petho , 2015)

La siguiente tabla detalla los diversos métodos de prueba en los Estados Unidos que usan el HWTD. Cada especificación tiene un contenido requerido de vacío de aire para las muestras, que generalmente está en el rango de 6-8%. Los huecos de aire de esta magnitud suelen ser más altos que el contenido de vacío de aire de diseño, lo que

requiere que los especímenes experimenten una menor compactación durante la preparación de la muestra.

Tabla 4-2: Especificaciones del HWTT en los Estados Unidos. Fuente: (Beecroft & Petho , 2015)

Jurisdiction	Test method	Test used for:		Required air voids (%)	Max passes	Failure limit (mm)
		Rutting	Moisture sensitivity			
USA (AASHTO)	AASHTO T 324	Yes	Yes	7.0 ± 1.0	20000	40
Colorado	CP – L 5112-14	Yes	Yes	6.0 ± 2.0	20	20
Utah	Section 990	Yes	Unclear	7.0 ± 0.5	20	20
Texas	Tex-242-F	Yes	Yes	7.0 ± 1.0	1000-20000	12.5
Illinois	IL mod AASHTO T 324	Yes	Unclear	7.0 ± 1.0	5000-20,000*	12.5
Washington	M 46-01.16	Yes	As for AASHTO	7.0 ± 1.0	20	40
Arkansas	Hall and Williams (1999)	Yes	Yes	7.0 ± 1.0	20	20
California	AASHTO T 324 (modified)	Yes	Yes	7.0 ± 1.0	Up to 25,000*	12.5

4.3.4 Reproducibilidad y repetibilidad del ensayo

A fines de 2014, el NCHRP publicó un informe en donde se presentaban los resultados de un estudio realizado para estimar medidas de precisión en el dispositivo de rueda de carga de Hamburgo (Azari, 2014) El estudio reconoció la falta de especificaciones sobre la precisión en el método de prueba AASHTO T 324-11 y la ausencia de una especificación sobre la diferencia permisible entre dos mediciones repetidas. El estudio también busca aclarar algunas ambigüedades en el método de prueba y el análisis de resultados, para asegurar la coherencia entre los resultados obtenidos en las distintas instituciones de los Estados Unidos que utilizan la prueba HWTT.

Veintiocho laboratorios en los Estados Unidos participaron del estudio, lo que condujo al desarrollo de indicadores de repetibilidad para las diversas propiedades y resultados de las pruebas de carga de Hamburgo.

La tabla siguiente incluye los coeficientes de variación permitidos y los rangos aceptables para las pruebas de un solo operador y para las pruebas realizadas en múltiples laboratorios. Como era de esperar, la variación permisible es mayor cuando se compara a través de múltiples laboratorios, debido a la diversidad equipos y diferencias metodológicas entre los laboratorios.

Tabla 4-3: Repetitividad y reproducibilidad HWTT. Fuente: (Azari, 2014)

Propiedades	Repetibilidad		Reproducibilidad	
	CV (%)	Rango aceptable para dos pruebas (como porcentaje de la media)	CV (%)	Rango aceptable para dos pruebas (como porcentaje de la media)
Deformacion (mm)	14.2	40.2	26.0	73.6
Numero de pasadas hasta el limite de ahuellamiento	16.6	47.0	24.2	68.5
Numero de pasadas hasta el punto de inflexion	23.9	67.6	32.1	90.9
Creep slope (mm/cycle)	16.6	47.0	28.3	80.1
Strip slope (mm/pass)	17.7	50.0	20.8	58.8

El informe también recomienda una variedad de cambios al método de prueba AASHTO T 324-11, entre los que se incluyen la especificación de la alineación de la prueba, la colocación de la rueda en la condición inicial, la adopción de tamaño de muestra más constante, una mejor condición de ajuste de las probetas y recomendaciones sobre mantenimiento y la calibración periódica del equipo.

Dos estudios han comparado el rendimiento de las pruebas de laboratorio con resultados reales, encontrando una correlación razonablemente alta entre el desempeño de mezcla de campo y laboratorio.

Tabla 4-4: Correlación campo-laboratorio . Fuente: (Azari, 2014)

Study/reference	Test method	Performance
Aschenbrener et al. (1994)	HWTD stripping inflection point	5 of 7 good mixes identified
		10 of 11 poor mixes identified
Solaimanian et al. (2007)	Stripping inflection point and deformation depth	5 of 8 mixes identified correctly

4.3.5 Limitaciones de la prueba AASHTO T 324-11

El método AASHTO ha recibido algunas críticas de las agencias de carreteras que han adoptado este método, lo que ha frenado el uso de este equipo en Estados Unidos. Algunas de las críticas son las siguientes (Cox, VanFrank, & Romero, 2013):

- Algunos investigadores han citado la falta de estandarización en la preparación de las probetas.
- La norma no menciona ninguna declaración de repetitividad.
- El método de prueba no recomienda repetir las pruebas en términos de reproducción o rechazo de resultados basados en las dos muestras que producen profundidades de roderas muy diferentes o que llegan a fallar en un número diferente de pases.
- Los requisitos de pre-acondicionamiento no son estrictos. Otros métodos de prueba prescriben un período de acondicionamiento con márgenes de temperatura y tiempo disímiles (por ejemplo, "agregue agua a la temperatura requerida y deje actuar 30 ± 2 minutos antes de comenzar la prueba").

4.4 Proyecto FONDEF.

Esta investigación es un complemento al proyecto FONDEF D09I117 llamado “Desarrollo de Materiales para Recapados Asfálticos Utilizados en la Rehabilitación de Pavimentos Deteriorados”. El proyecto propone a través del desarrollo de ensayos experimentales llevados a cabo en laboratorio y en terreno crear una plataforma tecnológica que permita la evaluación de materiales asfálticos de alto desempeño que cumplan con las exigencias que impone su uso como recapado asfáltico.

También como resultado de esta investigación se pretende encontrar un material asfáltico de alto desempeño para su uso en la reparación de caminos. Para lograr el desarrollo de este material, los investigadores variarán los principales componentes de una mezcla asfáltica como son el tipo y cantidad de ligante asfáltico utilizado y la estructura de agregados granulares utilizada para estudiar las respuestas de los materiales resultantes (FONDEF D09I1174, 2010)

5 Trabajo Experimental

En este capítulo explicara de forma detallada la actividad experimental que se llevó a cabo como parte de esta investigación.

5.1 Hipótesis Experimentales

Basados en el marco teórico descrito y buscando atender los objetivos de esta investigación, en este acápite se presentan las hipótesis experimentales que guiaron el desarrollo de los experimentos aquí descritos.

- **H_1** : El proveedor del ligante asfáltico con el que se construye una mezcla asfáltica influye en su capacidad para resistir el ahuellamiento.
- **H_2** : La incorporación de polímeros en los ligantes asfálticos aumenta la capacidad de resistir ahuellamiento de las mezclas asfálticas construidas con éstos.
- **H_3** : Las mezclas fabricadas con granulometrías del tipo SMA tienen una mayor capacidad de resistir el ahuellamiento que las mezclas construidas con granulometrías discontinuas del tipo microaglomerados en caliente.
- **H_4** : Las mezclas fabricadas con granulometrías discontinuas del tipo microaglomerados en caliente tienen una mayor capacidad de resistir el ahuellamiento que las mezclas semi-densas tradicionales de granulometría IV-A-12.
- **H_5** : Las mezclas con el diseño USM tienen una mayor capacidad de resistir el ahuellamiento que las mezclas fabricadas con granulometrías del tipo SMA.

5.2 Variables

5.2.1 Variables Independientes

Las variables que se manipularon en el trabajo experimental son las siguientes:

- **Proveedores de Asfalto:** para evaluar la relevancia del proveedor del ligante asfáltico, las probetas se fabricaron utilizando ligantes provenientes de 2 empresas distintas (E1, E2).
- **Tipo de Asfalto:** para estudiar la influencia del tipo de asfalto en la resistencia al ahuellamiento, se modificó el tipo de asfalto con el que se construyen las mezclas semidensas IV-A-12, utilizando un asfalto tradicional y un asfalto modificado con polímeros.
- **Granulometría:** para ver la influencia de este parámetro se fabricaron probetas con 4 diferentes granulometrías: semidensa IV-A-12, microaglomerado en caliente M10, mezclas SMA y una mezcla especialmente diseñada en la Universidad Técnica Federico Santa María (USM).

5.2.2 Variables Dependientes

Las variables que se midieron en el trabajo experimental son las siguientes:

- **Ahuellamiento a Las 10.000 Pasadas:** corresponde a la deformación máxima antes de las 10.000 pasadas que registra la curva de ahuellamiento máximo.
- **Ahuellamiento a Las 20.000 Pasadas:** corresponde a la deformación máxima antes de las 20.000 pasadas que registra la curva de ahuellamiento máximo.
- **Creep Slope:** corresponde a la tasa media de deformación calculada para la zona de comportamiento plástico de la curva de ahuellamiento máximo. Su magnitud se expresa como el número de pasadas que se requieren para deformar la probeta en 1 mm.
- **Stripping Slope:** corresponde a la tasa media de deformación calculada para la zona de comportamiento húmedo de la curva de ahuellamiento máximo. Su magnitud se expresa como el número de pasadas que se requieren para deformar la probeta en 1 mm.

- **Stripping Point:** corresponde al número de pasadas y la profundidad de ahuellamiento en que la curva de ahuellamiento comienza a ser afectada por la presencia de humedad. Se calcula como la intersección de las rectas que definen el Creep Slope y el Stripping Slope.

5.3 Sujetos de Estudio

En esta investigación se estudian 10 tipos de mezclas asfálticas diferenciadas por su granulometría, el tipo de asfalto y/o el proveedor del ligante. Debido a algunas peculiaridades del equipo de ensayo y a la falta de acuerdo entre los investigadores respecto a los límites de repetitividad, conservadoramente se decidió que todas las mezclas debían ensayarse en tres oportunidades, lo que obligo a la fabricación y ensayo de 30 probetas.

La tabla siguiente describe las relaciones entre los materiales utilizados y el número de probetas involucradas en el estudio.

Tabla 5-1: Número de probetas en función del material utilizado . *Fuente: Elaboracion propia*

Granulometrías	Asfaltos Modificados		Asfaltos Tradicionales		Total probetas por Granulometría
	Empresa 1	Empresa 2	Empresa 1	Empresa 2	
Microaglomerado M10	3	3			6
Semidensa IV-A-12	3	3	3	3	12
Stone Mastic Asphalt SMA	3	3			6
Stone Mastic Asphalt USM	3	3			6
Total probetas por tipo de Asfalto	12	12	3	3	30

5.4 Materiales

A pesar de que, sin duda, las mezclas asfálticas son sistemas complejos que tienen propiedades más allá de la suma de sus componentes, su comportamiento puede explicarse, en gran medida, por las propiedades individuales de cada uno de ellos. Por

lo anterior, en las próximas secciones de este documento se revisarán algunas de las propiedades físicas de los materiales usados para la fabricación de las probetas y los diseños de mezclas con los que éstas fueron construidas.

Los materiales y los diseños de mezclas utilizados en esta investigación son los mismos materiales utilizados en el proyecto FONDEF D09I117, lo que permitirá que las conclusiones de este estudio sean totalmente complementarias con los otros estudios involucrados en el proyecto.

5.4.1 Áridos

Los áridos utilizados en esta investigación fueron entregados por la empresa Constructora Asfalcura S.A. y fueron sacados de 6 distintos acopios: 1 de gravas de 3/4" (M1), 1 de gravas de 1/2" (M2); 2 de polvo de roca (M3 y M4), 1 de filler (M5) y otro de cal (M6) que constaban de las siguientes granulometrías.

Tabla 5-2: Granulometrías de los acopios de áridos. *Fuente: LEMCO.*

Agregados Pétreos							
Áridos N° Material Tipo	M1 Grava 3/4"	M2 Grava 1/2"	M3 Polvo Roca 3/8"	M4 Polvo Roca 3/8"	M5 Cal	M6 Filler planta	
Granulometría							
Tamiz ASTM mm	% que pasa						
3/4" 20	100						
5/8" 16							
1/2" 12,5	55	100					
7/16" 11,2							
3/8" 9,5	11	78	100				
5/16" 8				100			
#3 1/2 5,6				98			
#4 4,75	2	12	88	95			
#8 2,36	1	3	56	68			
#10 2				62			
#16 1,25	1	2	39				
#30 0,6	1	2	27	34			100
#50 0,3	1	2	19	24			99
#100 0,16	1	2	13	18	100		86
#200 0,075	1	2	9	13	96		58
R R	1	2	9	13	96		55
+200	0	0	0	0	0		0

Nótese que las granulometrías presentadas involucran las series de tamices del acápite 8.202.3 del Manual de Carreteras y los tamices exigidos por la normativa alemana (Dirección de Vialidad, 2013).

Además de revisar las granulometrías, a continuación, se presentan algunas propiedades físicas de las fracciones gruesas y finas de los áridos utilizados. Las propiedades aquí descritas siguen las recomendaciones del volumen 8 del Manual de Carreteras

Tabla 5-3: Propiedades físicas de la fracción gruesa de los acopios de áridos. *Fuente: Elaboración propia.*

Característica de los Áridos							
Fracción Gruesa							
Áridos N°		M1	M2	M3	M4	M5	M6
Densidad real seca	[Kg/m3]	2689	2685				
Densidad aparente suelta	[Kg/m3]	1506	1509				
Densidad real neta	[Kg/m3]	2775	2785				
Partículas chancadas	[%]	98	97				
Partículas lajadas	[%]	0,1	0,3				
Desgaste de los ángeles							
Absorción de agua	[%]	1,2	1,4				

Tabla 5-4: Propiedades físicas de la fracción fina de los acopios de áridos. *Fuente: Elaboración propia.*

Característica de los áridos							
Fracción Fina							
Áridos N°		M1	M2	M3	M4	M5	M6
Densidad real seca	[Kg/m3]			2666			
Densidad aparente suelta	[Kg/m3]			1740			
Densidad real neta	[Kg/m3]			2780			
Partículas chancadas	[%]			99			
Partículas lajadas	[%]			0,3			
Desgaste de los ángeles							
Absorción de agua	[%]			1,6			

5.4.2 Asfaltos

El ligante asfáltico es un derivado del petróleo usado como aglutinante para mantener unidos los áridos que componen una mezcla asfáltica. A pesar de que este

material representa solamente el 5% de un recapado, sus propiedades determinan en gran medida la resistencia, durabilidad y serviciabilidad de los pavimentos reparados. Dada la relevancia de este material, esta sección se ocupará de presentar las propiedades de los asfaltos usados en esta investigación.

Para la actividad experimental se utilizaron 4 ligantes asfálticos distintos proporcionados por las empresas Asfalchile S.A. y Química Latinoamericana S.A, donde cada una aportó un asfalto tradicional (CA-24 según su especificación por penetración) y un asfalto modificado (60-80 según su especificación por viscosidad).

Como parte del proyecto FONDEF D09I1174, los investigadores del LEMCO (Castillo, 2012) (Flores, 2012) (Gonzalez, 2012) estudiaron en detalle las propiedades de los ligantes asfálticos que se utilizaron durante todo el proyecto. Durante estas investigaciones, caracterizaron los ligantes en tres estados diferentes: estado natural, estado de envejecimiento primario y estado de envejecimiento secundario.

En las siguientes tablas se presentarán las propiedades de los asfaltos obtenidas a partir de los ligantes con un envejecimiento primario, ya que son estos los que mejor representan las propiedades de las mezclas ensayadas en la Rueda de Carga de Hamburgo.

Tabla 5-5: Ensayos tradicionales ligante asfáltico CA-24. Empresa (1) después de HPDR. Fuente: *Elaboración propia.*

N°	Ensayo	Unidad	Dato Fabricación	Dato Lemco	Limite		Normativa
	Descripción				Min	Max	
1	Penetración a 25°C; 100g; 5 seg; 0,1 mm	dmm	42	36	-	-	MC 8.302.3
2	Ductilidad a 25°C; 5 cm/min	cm	>150	>150	100	-	MC 8.302.8
3	Ductilidad a 15°C; 5 cm/min	cm	-	24	-	-	MC 8.302.8
4	Ductilidad a 5°C; 5 cm/min	cm	-	1	-	-	MC 8.302.8
5	Punto de Ablandamiento	°C	-	53,4	-	-	MC 8.302.16
6	Variación punto Ablandamiento	°C	-	4,8	-	-	-
7	Punto de Fragilidad de Frass	°C	-	-11	-	-	MC 8.302.17
8	Perdida por Calentamiento, Variación de Masa	%	0,4	0,02	-	0,8	MC 8.302.33
9	Viscosidad Absoluta a 60°C, 300mm Hg	Poise	7126	6521	-	-	MC 8.302.24
10	Índice de Durabilidad	-	2,5	2,4	-	3,5	-
11	Penetración en porcentaje del original	%	61	54,5	-	-	-

Tabla 5-6: Ensayos tradicionales ligante asfáltico CA-24. Empresa (2) después de HPDR. *Fuente: Elaboración propia.*

Ensayo		Unidad	Dato Fabricación	Dato Lemco	Limite		Normativa
Nº	Descripción				Min	Max	
1	Penetración a 25°C; 100g; 5 seg; 0,1 mm	dmm	42	37	-	-	MC 8.302.3
2	Ductilidad a 25°C; 5 cm/min	cm	>150	103	100	-	MC 8.302.8
3	Ductilidad a 15°C; 5 cm/min	cm	-	11	-	-	MC 8.302.8
4	Ductilidad a 5°C; 5 cm/min	cm	-	0	-	-	MC 8.302.8
5	Punto de Ablandamiento	°C	-	55,6	-	-	MC 8.302.16
6	Variación punto Ablandamiento	°C	-	5,8	-	-	-
7	Punto de Fragilidad de Frass	°C	-	-10	-	-	MC 8.302.17
8	Perdida por Calentamiento, Variación de Masa	%	0,4	0,08	-	0,8	MC 8.302.33
9	Viscosidad Absoluta a 60°C, 300mm Hg	Poise	7126	8938	-	-	MC 8.302.24
10	Índice de Durabilidad	-	2,5	3	-	3,5	-
11	Penetración en porcentaje del original	%	61	56,6	-	-	-

Tabla 5-7: Ensayos tradicionales ligante asfáltico 60-80. Empresa (1) después de HPDR. *Fuente: Elaboración propia.*

Ensayo		Unidad	Dato Fabricación	Dato Lemco	Limite		Normativa
Nº	Descripción				Min	Max	
1	Variación de la Masa	%	-	0,03	-	-	
2	Penetración a 25°C; 100g; 5 seg; 0,1 mm	dmm	-	44	-	-	MC 8.302.3
3	Variación de la Penetración	%	-	71	-	-	
4	Ductilidad a 25°C; 5 cm/min	cm	-	108	-	-	MC 8.302.8
5	Ductilidad a 15°C; 5 cm/min	cm	-	105	-	-	MC 8.302.8
6	Ductilidad a 5°C; 5 cm/min	cm	-	23	-	-	MC 8.302.8
7	Punto de Ablandamiento	°C	-	65,6	-	-	MC 8.302.16
8	Variación punto Ablandamiento	°C	-	56	-	-	-
9	Recuperación Elástica 13°C	%	-	-3,4	-	-	MC 8.302.19
10	Recuperación Elástica Torsión 25°C	%	-	83	-	-	
11	Recuperación Elástica Torsión 40°C	%	-	64	-	-	
12	Punto de Fragilidad de Frass	°C	-	-13	-	-	MC 8.302.17

Tabla 5-8: Ensayos tradicionales ligantes asfálticos 60-80. Empresa (2) después de HPDR. *Fuente: Elaboración propia.*

Ensayo		Unidad	Dato Fabricación	Dato Lemco	Limite		Normativa
Nº	Descripción				Min	Max	
1	Variación de la Masa	%	-	0,04	-	-	
2	Penetración a 25°C; 100g; 5 seg; 0,1 mm	dmm	-	61	-	-	MC 8.302.3
3	Variación de la Penetración	%	-	79	-	-	
4	Ductilidad a 25°C; 5 cm/min	cm	-	95	-	-	MC 8.302.8
5	Ductilidad a 15°C; 5 cm/min	cm	-	65	-	-	MC 8.302.8
6	Ductilidad a 5°C; 5 cm/min	cm	-	30	-	-	MC 8.302.8
7	Punto de Ablandamiento	°C	-	63,8	-	-	MC 8.302.16
8	Variación punto Ablandamiento	°C	-	57	-	-	-
9	Recuperación Elástica 13°C	%	-	-4,4	-	-	MC 8.302.19
10	Recuperación Elástica Torsión 25°C	%	-	83	-	-	
11	Recuperación Elástica Torsión 40°C	%	-	72	-	-	
12	Punto de Fragilidad de Frass	°C	-	-20	-	-	MC 8.302.17

Además de las caracterizaciones tradicionales, el proyecto FONDEF también se preocupó de caracterizar los ligantes de acuerdo a su nivel de desempeño (Grado PG), según los criterios del manual de diseño Superpave, lo que arrojó los siguientes resultados:

Tabla 5-9: Clasificación PG de ligantes asfálticos utilizados en las mezclas ensayadas. *Fuente: Elaboración propia.*

Ligante Asfáltico		Clasificación Superpave				Temperatura Cumplimiento parámetro de Fatiga
Tipo	Proveedor	Exacta		MC 8.301.8		
		PG-XX	PG-YY	PG-XX	PG-YY	
Ca-24 Tradicional	Empresa 1	67	-23	64	-22	23
Ca-24 Tradicional	Empresa 2	69	-26	64	-22	23
60-80 Modificado	Empresa 1	74	-27	70	-22	21
60-80 Modificado	Empresa 2	74	-29	70	-28	16

5.4.3 Diseños de Mezclas

Las mezclas asfálticas en caliente constituyen un material compuesto cuyo comportamiento depende, además de las propiedades de los elementos que lo constituyen, de las proporciones y las relaciones físico-químicas que se generan entre ellos. Por este motivo, en este acápite se describirán las dosificaciones de los áridos y asfaltos con los que se fabrican los sujetos de prueba de esta investigación.

En este estudio se analizaron 5 diseños de mezclas distintos: 2 mezclas semidensas IV-A-12, 1 mezcla discontinua del tipo Microaglomerado M10, 1 mezcla SMA y 1 mezcla desarrollada en la Universidad Técnica Federico Santa María (USM). A continuación, se revisarán los parámetros de diseño con los que fueron construidos los especímenes de ensayo.

5.4.3.1 Diseño Mezcla asfáltica IV-A-12 (A)

La mezcla IV-A-12 (A) es una mezcla semidensa fabricada con asfaltos tradicionales cuya granulometría debe calzar con las bandas granulométricas especificadas en el Manual de Carreteras. Para cumplir con la especificación, se propuso la siguiente dosificación:

Tabla 5-10: Dosificación de áridos para la mezcla IV-A-12 (A). *Fuente: Elaboración propia.*

Dosis de Áridos			
IV-A-12 (A)			
M1	Grava 3/4"	%	19
M2	Grava 1/2"	%	24
M3	Polvo Roca 3/8"	%	57
M4	Polvo Roca 3/8"	%	0
M5	Cal	%	0
M6	Filler planta	%	0

la dosificación de áridos anterior resulta en una mezcla de tamaño máximo 12,5 mm con la siguiente granulometría.

Tabla 5-11: Granulometría IV-A-12 (A). Fuente: Elaboración propia.

Granulometría de mezcla de áridos				
IV-A-12 (A)				
Tamiz		Porcentaje que pasa [%]	Especificación	
ASTM	[mm]		IV-A-12 (MC)	
3/4"	20	100	100	100
5/8"	16			
1/2"	12,5	89,17	80	95
7/16"	11,2			
3/8"	9,5	76,95	70	85
5/16"	8			
#3 1/2	5,6			
#4	4,75	50,41	43	58
#8	2,36	34,06	28	42
#10	2			
#16	1,25	24,845		
#30	0,6	15,63	13	24
#50	0,3	11,4	8	17
#100	0,16	8,55	6	12
#200	0,075	5,7	4	8
+200				

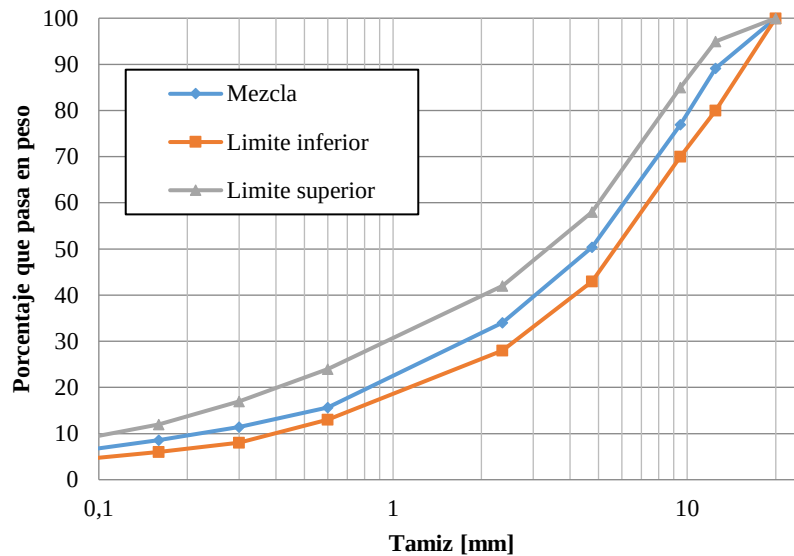


Figura 5-1: Granulometría IV-A-12 (A). Fuente: Elaboración propia.

Las mezclas IV-A-12 (A) fueron dosificadas para alcanzar los parámetros de diseños propuestos por el proyecto FONDEF, a excepción del porcentaje de vacíos que se dejó en un 7%, siguiendo las recomendaciones de la Guía de Diseño AASHTO T324-11, que recomienda utilizar este porcentaje cuando se estudian mezclas densas. La

consideración de este valor, distinto del óptimo, responde a la necesidad de simular las densidades que alcanzan los pavimentos recién construidos.

Tabla 5-12: Parámetros de diseño de la mezcla IV-A-12 (A). *Fuente: Elaboración propia.*

Propiedades de la Mezcla			
IV-A-12 (A)			
Tipo asfalto		Tradicional CA-24	Tradicional CA-24
Empresa	-	E1	E2
Grado PG	°C	64-22	64-22
Porcentaje de ligante Asfáltico	%	5,1	
DMM	[kg/m³]	2474	
Porcentaje de Vacíos de diseño	[%]	5	
Densidad de diseño	[kg/m³]	2350	
Porcentaje de Vacíos HWTT	[%]	7	
Densidad HWTT	[kg/m³]	2301	

5.4.3.2 Mezcla Asfáltica IV-A-12 (B)

De igual manera que las mezclas IV-A-12 (A), las mezclas IV-A-12 (B) son mezclas semidensas fabricadas con asfaltos tradicionales y con granulometrías que respetan las bandas del Manual de Carreteras. Los pequeños cambios entre los parámetros de diseño de ambas mezclas se deben a que los diseños fueron extraídos de diseño reales diferentes que responden a las propiedades de los distintos ligantes.

La dosificación de áridos utilizada en este tipo de mezcla fue la siguiente:

Tabla 5-13: Dosificación de áridos para la mezcla IV-A-12 (B). *Fuente: Elaboración propia.*

Dosis de Áridos			
IV-A-12 (B)			
M1	Grava 3/4"	%	21
M2	Grava 1/2"	%	25
M3	Polvo Roca 3/8"	%	54
M4	Polvo Roca 3/8"	%	-
M5	Cal	%	-
M6	Filler Planta	%	-

La granulometría resultante de la dosificación es la siguiente:

Tabla 5-14: Granulometría IV-A-12 (B). Fuente: Elaboración propia.

Granulometría de mezcla de áridos				
IV-A-12 (B)				
Tamiz		Porcentaje que pasa [%]	Especificación	
ASTM	[mm]		IV-A-12 (MC)	
3/4"	20	100	100	100
5/8"	16			
1/2"	12,5	90,13	80	95
7/16"	11,2			
3/8"	9,5	73,56	70	85
5/16"	8			
#3 1/2	5,6			
#4	4,75	47,11	43	58
#8	2,36	33,11	28	42
#10	2			
#16	1,25	22,06		
#30	0,6	15,04	13	24
#50	0,3	11,26	8	17
#100	0,16	8,02	6	12
#200	0,075	6,96	4	8
+200				

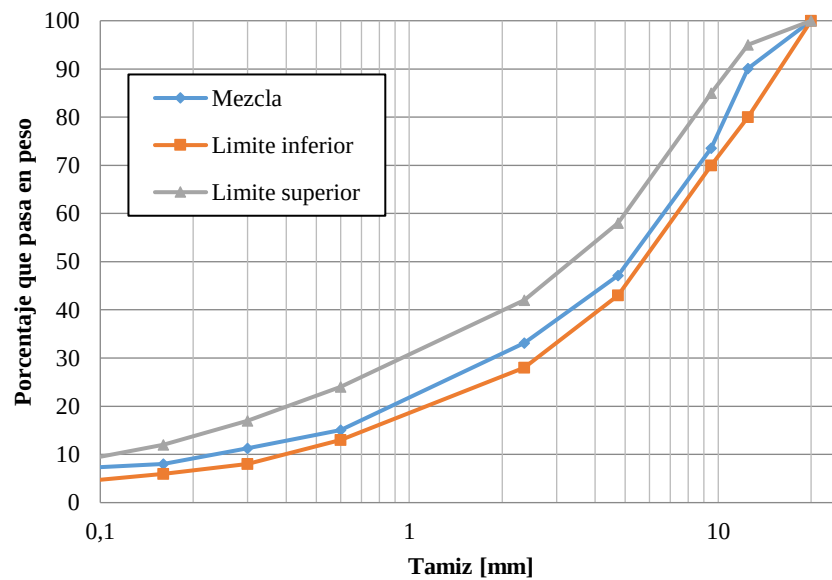


Figura 5-2: Granulometría IV-A-12 (B). Fuente: Elaboración propia.

En este segundo tipo de mezcla se utilizaron asfaltos modificados que se usaron para entender cuáles son los efectos que tiene el uso de ligantes mejorados. Los parámetros de diseño se presentan a continuación:

Tabla 5-15: Propiedades volumétricas de la mezcla IV-A-12 (B). *Fuente: Elaboración propia.*

Propiedades de la Mezcla			
IV-A-12 (B)			
Tipo asfalto		Modificado 60-80	Modificado 60-80
Empresa	-	E1	E2
Grado PG	°C	70-22	70-28
Porcentaje de ligante Asfáltico	%	5,2	
DMM	[kg/m ³]	2498	
Porcentaje de Vacíos de diseño	[%]	5	
Densidad de diseño	[kg/m ³]	2373	
Porcentaje de Vacíos HWTT	[%]	7	
Densidad HWTT	[kg/m ³]	2323	

De igual manera que para la mezcla asfáltica IV-A-12 (A), la densidad de la probeta fue reducida, dejando los vacíos llenos de aire en un 7%.

5.4.3.3 Mezcla Asfáltica Microaglomerado discontinuo en caliente M-10

Se consideró construir probetas con microaglomerados por el gran uso que tiene este tipo de mezcla en reparación de pavimentos y por las buenas prestaciones funcionales y mecánicas que se vinculan a su granulometría abierta y discontinua, que permite generar capas drenantes con estructuras minerales fuertes.

La dosificación usada para construir los microaglomerados es la siguiente:

Tabla 5-16: Dosificación de áridos Microaglomerado M-10. *Fuente: Elaboración propia.*

Dosis de Áridos			
M-10			
M1	Grava 3/4"	%	
M2	Grava 1/2"	%	78
M3	Polvo Roca 3/8"	%	17
M4	Polvo Roca 3/8"	%	
M5	Cal	%	1
M6	Filler planta	%	4

En la dosificación no se pudo encontrar una combinación de los áridos que se ajustara a la banda granulométrica del Manual de Carreteras en el Tamiz N° 30 quedando una pequeña diferencia en este punto, la granulometría resultante fue la siguiente:

Tabla 5-17: Granulometría Microaglomerado M-10. Fuente: Elaboración propia.

Granulometría de mezcla de áridos				
M-10				
Tamiz		Porcentaje que pasa [%]	Especificación	
ASTM	mm		M-10 (MC)	
3/4"	20	100	100	100
5/8"	16			
1/2"	12,5	100	100	100
7/16"	11,2			
3/8"	9,5	81,28	75	97
5/16"	8			
#3 1/2	5,6			
#4	4,75	23,52	15	28
#8	2,36	15,81	12	25
#10	2			
#16	1,25	10,37		
#30	0,6	8,39	9	18
#50	0,3	7,5		
#100	0,16	6,44		
#200	0,075	6	5	8
+200				

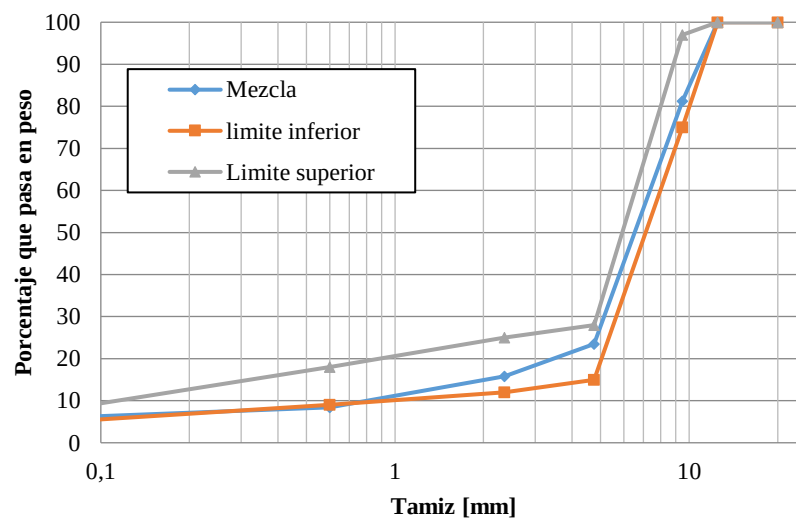


Tabla 5-18: Dosis de ligante Microaglomerado M-10. Fuente: Elaboración propia.

Las mezclas asfálticas M10 fueron fabricadas exclusivamente con asfaltos modificados ya que en este tipo de mezclas no se suelen utilizar asfaltos tradicionales al tratarse de una mezcla de alto desempeño.

Debido a que la especificación de un 7% de vacíos de la norma AASHTO 324-11 es menor a los vacíos recomendados para los microaglomerados y a que no fue posible encontrar una recomendación específica para mezclas abiertas, se decidió fabricar las probetas con unos vacíos similares a los vacíos del diseño original de un 10%.

Las demás propiedades de la mezcla se especifican a continuación:

Tabla 5-19: Propiedades volumétricas de la mezcla Microaglomerado M-10. *Fuente: Elaboración propia.*

Propiedades de la Mezcla			
M10			
Tipo asfalto		Modificado 60-80	Modificado 60-80
Empresa Proveedor	-	E1	E2
Grado PG	°C	70-22	70-28
Porcentaje de ligante Asfáltico	%	5,3	
DMM	[kg/m ³]	2256	
Porcentaje de Vacíos de diseño	[%]	10	
Densidad de diseño	[kg/m ³]	2022	
Porcentaje de Vacíos HWTT	[%]	10	
Densidad HWTT	[kg/m ³]	2022	

5.4.3.4 Mezcla Asfáltica Stone Mastic Asphalt SMA

El cuarto tipo de mezcla asfáltica considerada, corresponde a una mezcla de tipo SMA, elegida por su reconocida resistencia al ahuellamiento e innumerables demostraciones prácticas de su buen desempeño en países como Alemania y Estados Unidos.

Para este diseño de mezcla se eligió una granulometría SMA que cumple con las exigencias del Manual de Carreteras. Para lograr la discontinuidad que exige la mezcla, se utilizó un segundo acopio de polvo de roca que permitió combinar los áridos

de una mejor forma. Además, para este tipo de mezcla se requiere la aportación de fibras del 0,3% de la masa total. La dosificación se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 5-20: Dosificación de áridos SMA Fuente: *Elaboración propia*.

Dosis de Áridos			
SMA			
M1	Grava 3/4"	%	
M2	Grava 1/2"	%	69
M3	Polvo Roca 3/8"	%	
M4	Polvo Roca 3/8"	%	25
M5	Cal	%	3
M6	Filler planta	%	3

Debido a las granulometrías particulares de cada acopio de áridos, no se pudo encontrar una combinación tal que permitiera ajustar la mezcla a las bandas del estándar nacional, quedando levemente fuera de rango en el tamiz 3/8" ASTM.

Tabla 5-21: Granulometría SMA Fuente: *Elaboración propia*.

Granulometría de mezcla de áridos				
SMA				
Tamiz		Porcentaje que pasa [%]	Especificación	
ASTM	mm		MC	
3/4"	20	100		
5/8"	16	100		
1/2"	12,5	100	100	100
7/16"	11,2	98,62		
3/8"	9,5	82,75	90	100
5/16"	8	62,74		
#3 1/2	5,6	38,09		
#4	4,75	33,89	26	60
#8	2,36	23,69	20	28
#10	2	22,19		
#16	1,25			
#30	0,6	15,19		
#50	0,3	12,66		
#100	0,16	11,04		
#200	0,075	9,64	9	13
+200				

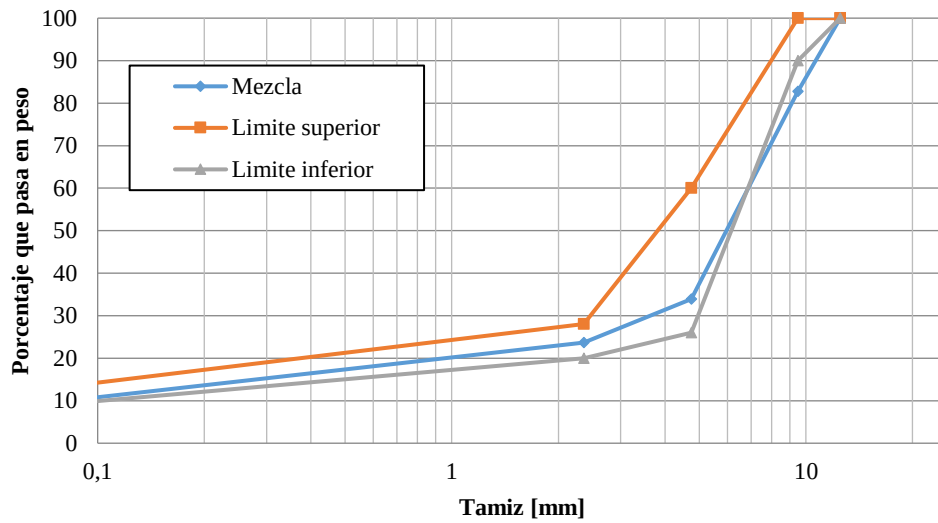


Figura 5-3: Granulometría SMA. Fuente: Elaboración propia.

Para el primer tipo de mezcla asfáltica SMA se decidió utilizar un porcentaje de ligante asfáltico modificado del 6% y un porcentaje de fibras acrílicas Kaltex de 0,3% del peso total.

De acuerdo a recomendaciones de (Partl, y otros, 2013) para simular la condición de una mezcla recién instalada en mezclas SMA se debe utilizar un vacío del 5,5%.

Tabla 5-22: Propiedades volumétricas de la mezcla SMA . Fuente: Elaboración propia.

Propiedades de la Mezcla			
SMA			
Tipo asfalto		Modificado 60-80	Modificado 60-80
Empresa proveedora		E1	E1
Grado PG		70-22	70-22
Porcentaje de ligante asfáltico	[%]	6,0	
DMM	[kg/m³]	2450	
Porcentaje de Vacíos de diseño	[%]	4,9	
Densidad de diseño	[kg/m³]	2330	
Porcentaje de Vacíos HWTT	[%]	5,5	
Densidad HWTT	[kg/m³]	2315	

5.4.3.5 Mezcla Asfáltica USM

Para la fabricación de las mezclas USM se utilizó una granulometría discontinua diseñada para entrar en las bandas de norma alemana *TL Asphalt-StB, 2007*. La dosificación en este caso es la siguiente:

Tabla 5-23: Dosificación de áridos USM. *Fuente: Elaboración propia.*

Dosis de Áridos			
USM			
M1	Grava 3/4"	%	
M2	Grava 1/2"	%	69
M3	Polvo Roca 3/8"	%	
M4	Polvo Roca 3/8"	%	25
M5	Cal	%	3
M6	Filler planta	%	3

En la siguiente tabla se puede apreciar la gran discontinuidad y la estrechez de la banda granulométrica utilizada.

Tabla 5-24: Granulometría USM. *Fuente: Elaboración propia.*

Granulometría de mezcla de áridos				
USM				
Tamiz		Porcentaje que pasa [%]	Especificación	
ASTM	mm		(TL Asphalt-StB 07)	
3/4"	20	100	100	100
5/8"	16	100	100	100
1/2"	12,5	100	93,08	100
7/16"	11,2	98,62	90	100
3/8"	9,5	82,75	70,42	82,88
5/16"	8	62,74	50	65
#3 1/2	5,6	38,09	35	45
#4	4,75	33,89	32,6	42,6
#8	2,36	23,69	22,41	32,41
#10	2	22,19	20	30
#16	1,25			
#30	0,6	15,19	15,82	23,73
#50	0,3	12,66	13,42	20,12
#100	0,16	11,04	11,23	16,85
#200	0,075	9,64	8,605	12,91
+200				

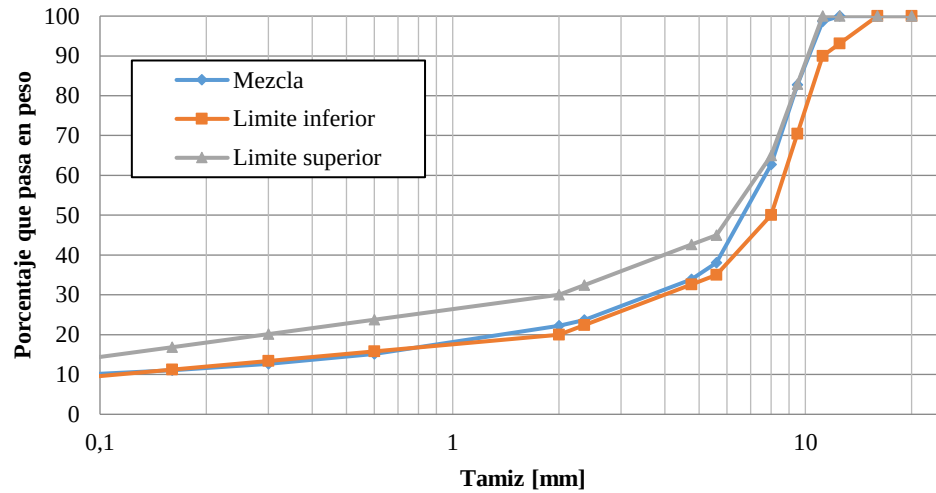


Figura 5-4: Granulometría USM Fuente: *Elaboración propia*.

En las probetas de mezcla asfáltica se utilizó una mayor cantidad de ligante asfáltico, 6,8%, y un tipo diferente de fibra en el mismo 0,3%. Se utilizó la fibra celulósica Viatop.

De igual manera que en la mezcla SMA para simular la condición de una mezcla recién instalada, se utiliza un vacío para el ensayo de un 5,5%.

Tabla 5-25: Propiedades volumétricas de la mezcla USM Fuente: *Elaboración propia*.

Propiedades de la Mezcla			
USM			
Tipo		Modificado 60-80	Modificado 60-80
Empresa		E1	E2
Grado PG		70-22	70-28
Porcentaje de ligante asfáltico	[%]	6,8	
DMM	[kg/m³]	2444	
Porcentaje de Vacíos de diseño	[%]	2,9	
Densidad de diseño	[kg/m³]	2373	
Porcentaje de Vacíos HWTT	[%]	5,5	
Densidad HWTT	[kg/m³]	2309	

A continuación, se presenta un resumen de los principales parámetros de diseño de las probetas y los porcentajes de vacíos obtenidos finalmente para cada una de las probetas.

Tabla 5-26: Resumen y propiedades del total de probetas analizadas equipo de Rueda de Carga de Hamburgo. Fuente: *Elaboración propia.*

°	Mezcla	Tipo Ligante	Empresa Proveedorora	PG	% Ligante	% Vacíos Diseño	% Vacíos Hamburgo	% Vacíos Medido
1	IV-A-12(A)	Tradicional	1	64-22	5,1	5	7±1	7,62
2	IV-A-12(A)	Tradicional						7,4
3	IV-A-12(A)	Tradicional						7,75
4	IV-A-12(A)	Tradicional	2					7,68
5	IV-A-12(A)	Tradicional						7,55
6	IV-A-12(A)	Tradicional						7,52
7	IV-A-12(B)	Modificado	1	70-22	5,2	5	7±1	7,62
8	IV-A-12(B)	Modificado						7,53
9	IV-A-12(B)	Modificado						7,67
10	IV-A-12(B)	Modificado	2	70-28				7,32
11	IV-A-12(B)	Modificado						7,41
12	IV-A-12(B)	Modificado						7,54
13	M-10	Modificado	1	70-22	5,3	10	10±1	9,84
14	M-10	Modificado						10,4
15	M-10	Modificado						9,9
16	M-10	Modificado	2	70-28				9,54
17	M-10	Modificado						9,88
18	M-10	Modificado						10,48
19	SMA	Modificado	1	70-22	6,0	4,9	5,5±1	5,71
20	SMA	Modificado						5,76
21	SMA	Modificado						5,69
22	SMA	Modificado	2	70-28				5,65
23	SMA	Modificado						5,66
24	SMA	Modificado						5,79
25	USM	Modificado	1	70-22	6,8	2,9	5,5±1	4,98
26	USM	Modificado						4,69
27	USM	Modificado						5,08
28	USM	Modificado	2	70-28				4,82
29	USM	Modificado						4,78
30	USM	Modificado						4,66

5.4.4 Equipos para la Fabricación de Probetas

5.4.4.1 Tamices

Los tamices son instrumentos que sirven para separar las partículas de distintos tamaños que componen un material granular. Estos dispositivos están formados por una malla metálica de tamaño estandarizado que está sujeta a un bastidor circular o cuadrado que mantiene la forma del conjunto. Los tamices funcionan de manera similar a la de un colador que retiene las partículas más grandes que la abertura de su malla y deja pasar las partículas de menor tamaño.

Los tamices son instrumentos estandarizados y particularmente en esta investigación se usaron los tamices ASTM descritos en la sección 8.202.3 del Manual de Carreteras y algunos tamices de la Norma DIN, que en conjunto conformaron la siguiente serie de tamices.

Tabla 5-27: Serie de Tamices. *Fuente: Elaboración propia.*

Tamiz	mm
3/4"	20
*5/8"	16
1/2"	12,5
*7/16"	11,2
3/8"	9,5
*5/16"	8
*#3 1/2	5,6
#4	4,75

* corresponde a tamices DIN.

A continuación, se presenta una fotografía con algunos tamices utilizados:



Figura 5-5: Tamices ASTM. Fuente: Elaboración propia.

5.4.4.2 Balanzas.

Las balanzas son instrumentos de laboratorio que sirven para medir la masa de un objeto. En el caso de las balanzas digitales que se utilizaron en este estudio, están constituidas por una celda de carga y una serie de circuitos electrónicos que procesan y presentan al usuario las deformaciones de la celda. En este estudio se utilizaron balanzas de 30 Kg de capacidad y una precisión de 0.1 g, todas calibradas de acuerdo a los estándares de calidad del laboratorio LEMCO-USM.

A continuación, una foto de una de las balanzas utilizada en este estudio.



Figura 5-6: Balanza digital. Fuente: Elaboración propia.

5.4.4.3 Hornos de convección

Los hornos de convección son equipos de laboratorio utilizados para secar, calentar o envejecer materiales e instrumental utilizados en la fabricación de mezclas asfálticas.

Los hornos de convección son equipos eléctricos que consisten en una cámara térmicamente aislada equipada en su interior con una o varias resistencias eléctricas, un sensor de temperaturas y algunos ventiladores que en conjunto con un sistema de control permiten mantener una temperatura controlada y homogénea.

El horno más utilizado en la fabricación de las probetas fue el Horno LabTech Modelo L00-150F cuya foto se presenta a continuación:



Figura 5-7: Horno Labtech propiedad de LEMCO USM Fuente: Elaboración propia.

5.4.4.4 Mezcladora de asfalto

La mezcladora de asfalto es un equipo electromecánico que, como su nombre indica, sirve para mezclar los ligantes y agregados de una mezcla asfáltica. Su funcionamiento es muy similar al de una amasadora de repostería, pero fabricada con motores de mayor potencia y mecanismos más robustos capaces de soportar el elevado peso y viscosidad de las mezclas asfálticas. En ocasiones, este equipo también incorpora un sistema de control de temperatura que mantiene los materiales calientes durante el mezclado.

A continuación, se presenta una fotografía de la mezcladora utilizada en esta investigación:



Figura 5-8: Mezcladora 600 watt propiedad de LEMCO USM. Fuente: Elaboración propia.

5.4.4.5 Compactador Giratorio (SGC)

Derivado del programa SHRP el compactador giratorio también llamado en inglés “Superpave Giratory Compactor” (SGC) es un equipo que tiene por finalidad compactar las probetas de mezclas asfálticas mediante el principio de amasado, rotando las probetas bajo un cierto ángulo de inclinación y una presión de confinamiento que permiten simular lo que ocurre en terreno cuando se efectúa la compactación mediante rodillos.

En esta investigación se utilizó un compactador SGC de la marca Troxler, modelo 5850 que fue utilizado de acuerdo a los manuales del equipo y las especificaciones del estándar ASSHTO 312-11.

A continuación, una foto del equipo y el molde con el cual se fabricaron las probetas.



Figura 5-9: Compactador giratorio SGC. Marca Troxler. Modelo 5850 propiedad de LEMCO-USM.
Fuente: Elaboración propia.

5.4.4.6 Sierra para asfalto

La sierra de asfalto es un equipo de laboratorio que sirve para cortar las muestras de pavimento de forma precisa y sin alterar sus propiedades. Esta herramienta eléctrica está conformada por un banco que sostiene todo el sistema, una bandeja que se desliza sobre este y que permite fijar la muestra que se desea cortar, un brazo móvil equipado con una sierra circular capaz de cortar piedras y un sistema de bombeo de agua que mantiene la zona de corte fría, todo incorporado como se puede ver en la siguiente imagen.



Figura 5-10: Sierra de corte para asfalto. Fuente: Elaboración propia.

5.4.5 Procedimientos fabricación de probetas

La fabricación de las probetas es uno de los factores más determinantes en la calidad de los resultados del Ensayo de Rueda de Hamburgo. Para evitar errores, en este proceso se revisaron cuidadosamente las normativas y recomendaciones necesarias para la fabricación de los especímenes de ensayo.

Los procedimientos aquí presentados fueron descritos para la fabricación de probetas de mezclas asfálticas calientes, cilíndricas y compactadas con el compactador giratorio SGC.

Las dimensiones de la probeta están indicadas en la norma ASSHTO T324-11 en la sección dedicada a las muestras fabricadas en laboratorio y compactados con el compactador giratorio SGC.

Las propiedades granulométricas, el porcentaje de asfalto y la densidad de diseño son datos extraídos de los diseños de mezclas propuestos por el proyecto FONDEF y presentados en los puntos anteriores.

En la figura siguiente se muestra una foto del modelo de probeta que este procedimiento busca fabricar.

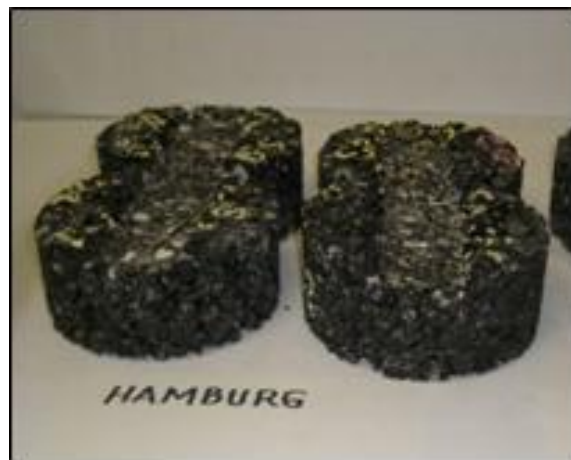


Figura 5-11: probeta rueda de carga de Hamburgo después del ensayo.

A continuación, se presenta un diagrama de flujo en donde se esquematiza la sucesión de tareas necesarias para construir una probeta para el Ensayo de Rueda de Carga de Hamburgo.

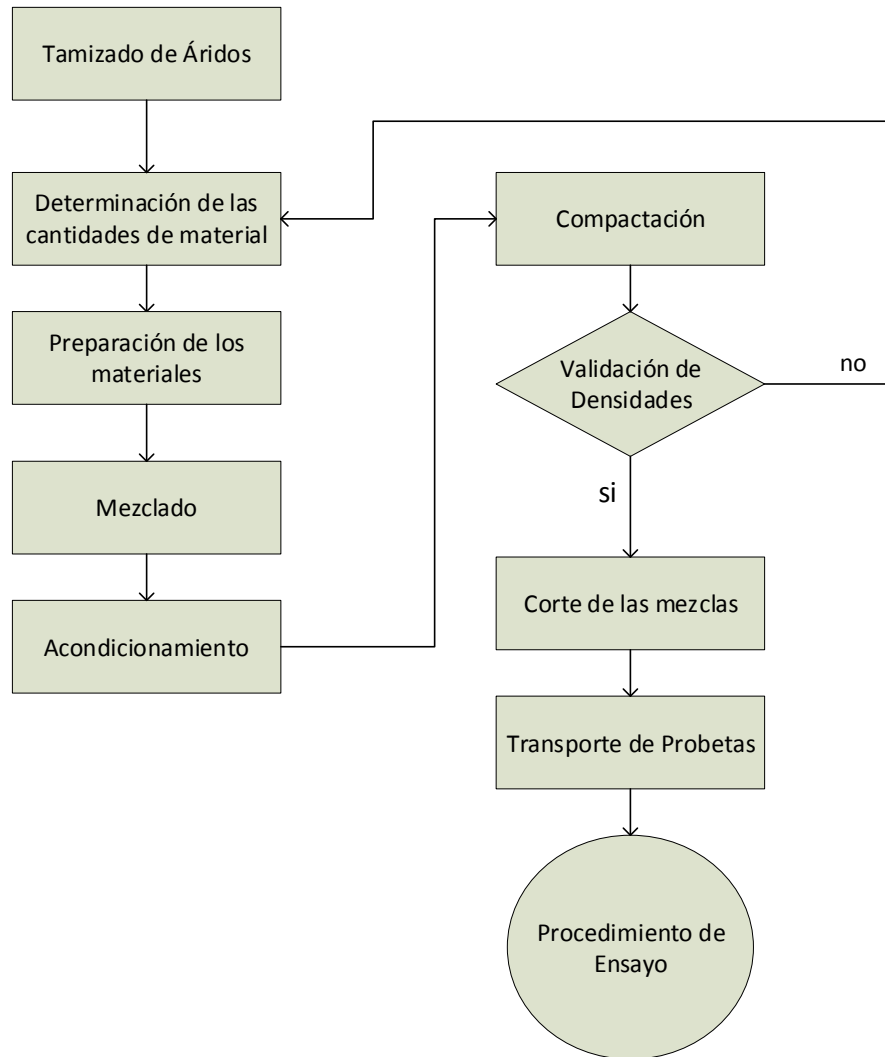


Figura 5-12: Flujo de tareas para la fabricación de probetas. Fuente: elaboración propia.

En los siguientes puntos se explicarán una a una las tareas del diagrama de flujo, describiendo los procedimientos, las normativas y las ecuaciones involucradas en el proceso.

5.4.5.1 Tamizado de Áridos

El tamizado es un proceso previo a la fabricación de las probetas y es la actividad en la cual se separan los agregados según su tamaño, mediante la utilización de tamices

Esta investigación tuvo a cargo el tamizado de alrededor de 300 kg de áridos provenientes de los acopios facilitados por la Constructora Asfalcura S.A.

El tamizado se realizó respetando el procedimiento 8.202.3.del Manual de Carreteras.

Para tamizar los áridos se deben seguir los siguientes pasos.

1. Cuartee desde los acopios una porción de áridos tal, que una vez secos se correspondan con la totalidad de áridos que necesite para los ensayos, recuerde considerar un porcentaje de pérdidas.
2. Con la ayuda de un horno de convección a 110°C, seque los áridos hasta la condición de masa constante. Dependiendo de la humedad de los áridos este proceso puede tardar entre 24 y 48 horas.
3. Cuartee el material seco hasta obtener la masa que necesitará para el proyecto. Considere un exceso de material que cubra las posibles pérdidas de material y la fabricación de probetas defectuosas.
4. Ingrese una masa de áridos conocida al tamiz más grande de la serie elegida y agite 150 veces.
5. Retire y pese el material que pasa.
6. Repita desde el paso 4 hasta que el material que pasa no sea más del 1% del material retenido.
7. Guarde y etiquete el material retenido.
8. Con el material que pasa vuelva al paso 4 y repita la operación con el tamiz siguiente.
9. El proceso terminará cuando haya pasado todo el material por el tamiz más pequeño de la serie elegida.

5.4.5.2 Determinación de la cantidad de material que requiere una probeta

Para poder fabricar una probeta para el ensayo de HWTT es necesario determinar de forma precisa las cantidades de áridos y asfaltos que ésta debe tener para que cumpla con las propiedades físicas y volumétricas del diseño.

Para la realización del cálculo se precisa conocer las dimensiones de la probeta a utilizar y las propiedades que se quiere que ésta reproduzca.

En este estudio se decidió construir las probetas del HWTT a partir de 2 probetas compactadas en el compactador giratorio SGG que tienen un diámetro de 150 mm y una altura de 62 mm y que se disponen mediante un corte como se muestra en la figura siguiente:

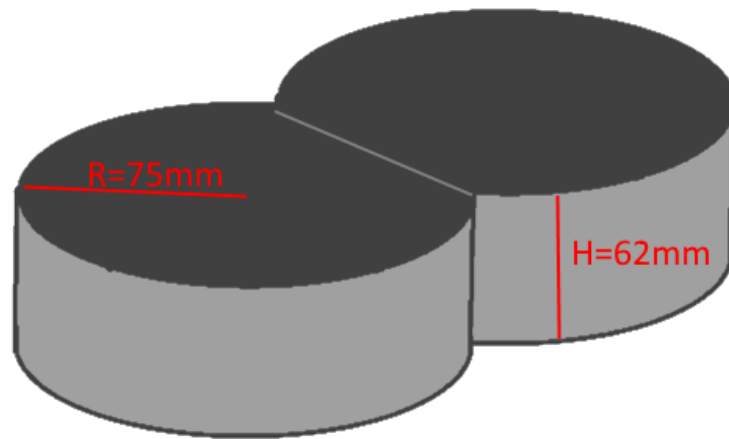


Figura 5-13: Dimensiones de la Probeta HWTT. Fuente: elaboración propia

A continuación, se presentan paso a paso los cálculos que se deben realizar para determinar los volúmenes de material necesarios para la construcción de una probeta del HWTT.

1. Determinación del volumen de la probeta del HWTT

$$V = \frac{H * \pi * r^2}{10^9} \quad 5-1$$

Donde:

V : es el volumen de 1 probeta del SGC [m³]

H : es la altura de la probeta [mm]

r : es el radio de la probeta del SGC [mm]

2. Determinación de la masa de áridos de una probeta del HWTT

$$M = \frac{V * D_{diseño} * \left(\frac{Va_{diseño}}{Va_{HWTT}} \right) * \left(1 - \frac{\%f}{100\%} \right)}{(1 + \%As)} \quad 5-2$$

Donde:

M : masa de áridos necesaria para fabricar una probeta de HWTT [Kg]

V : volumen de la probeta [m³]

$D_{marchal}$: densidad de diseño de la probeta en [Kg/m³]

$Va_{marshall}$: porcentaje de vacíos de diseño HWTT [%]

Va_{HWTT} : porcentaje de vacíos de aire requeridos para HWTT [%]

$\%As$: porcentaje de asfalto en relación a la masa de áridos [%]

$\%f$: porcentaje de fibra en relación a la masa total [%]

3. Determinación de la masa de cada fracción de áridos que se necesita

$$M_{ij} = M * A_i * T_{ij} \quad 5-3$$

Donde:

M_{ij} : masa de la fracción de áridos perteneciente al acopio i y al porcentaje retenido del tamiz j necesaria para la fabricación de la probeta HWTT

A_i : porcentaje de dosificación del acopio i [%]

T_{ij} : porcentaje de áridos del acopio i que es retenido en el tamiz j [%]

4. Determinación de la masa de asfalto.

$$M_{as} = M * \%As \quad 5-4$$

Donde:

M_{as} : masa de asfalto necesaria para fabricar una probeta de HWTT [Kg]

5. Determinación de la masa de fibras

$$M_f = V * D_{diseño} * \left(\frac{Va_{diseño}}{Va_{HWTT}} \right) * \%f \quad 5-5$$

Donde:

M_f : masa de fibra necesaria para fabricar una probeta de HWTT [Kg]

5.4.5.3 Preparación de los áridos para el mezclado

Una vez determinada la cantidad de árido que debe tener cada probeta, con la ayuda de una balanza y un par de recipientes se deben recombinar los áridos ya tamizados para reproducir la granulometría del diseño en cada probeta.

En la siguiente foto se pueden ver los equipos y herramientas usados para dosificar los áridos: en el extremo inferior izquierdo se observa una bolsa que contiene la grava retenida en el tamiz N°4 perteneciente al acopio del polvo de roca, en el centro se muestra una balanza y a la derecha de ésta una hoja con los cálculos correspondientes a las masas de áridos que debe contener una probeta de mezclas IV-A-12. En el extremo superior se muestran los recipientes que contienen los áridos ya pesados de 6 probetas del SGC.



Figura 5-14: Mezcla de Áridos para probetas del SGC. Fuente: elaboración propia

5.4.5.4 Mezclado

Éste es el proceso en el que manualmente o con ayuda de una maquina se incorporan los áridos, el ligante y las fibras que componen una mezcla asfáltica en caliente.

Para este estudio la temperatura óptima de mezclado se fijó en 155°C para los asfaltos tradicionales y 160°C para aquellas mezclas que usan asfaltos modificados.

En caso de no contar con las temperaturas de mezclado, se deben seguir las indicaciones de las normas AASHTO T316.

Los pasos a seguir para realizar la mezcla son los siguientes:

1. Ponga a secar los agregados ya dosificados en un horno de convección a una temperatura de 110°C por al menos 24 horas.
2. Una vez secos los áridos, suba la temperatura del horno hasta la temperatura óptima de mezclado.
3. Coloque en un horno el ligante asfáltico a la temperatura de mezclado y deje calentar por 2 horas. Se recomienda calentar una cantidad de asfalto un poco superior al valor calculado para poder cubrir las posibles pérdidas. No se exceda en la cantidad ya que el asfalto recalentado pierde propiedades y puede alterar los resultados de los ensayos.
4. 30 minutos antes de que deba sacar los materiales del horno, preocúpese de temperar el instrumental que se utilizará para mezclar (recipientes, mezcladores, poruñas).
5. Una vez cumplido el tiempo de calentamiento agregue los áridos y las fibras en el recipiente de mezcla.
6. Coloque el recipiente en la balanza y tárelo.
7. Vierta el asfalto hasta completar el porcentaje de asfalto de diseño.
8. Comience a mezclar enérgicamente hasta obtener una mezcla homogénea controlando mediante un termómetro laser que la temperatura de la mezcla no descienda más de 5° de la temperatura óptima.

5.4.5.5 Acondicionamiento de la mezcla

Este proceso se realiza inmediatamente después del mezclado y consiste en introducir en un horno la mezcla asfáltica por 4 horas a una temperatura de 135° como indica el procedimiento de acondicionamiento de corto plazo de la norma AASHTO R30.

El objetivo de este procedimiento es simular el envejecimiento que una mezcla asfáltica real experimenta durante la fabricación, el transporte, el extendido y la compactación.

Para que el envejecimiento ocurra de forma homogénea tienda la mezcla en un recipiente extendido y revuelva al menos una vez cada 60 minutos.

5.4.5.6 Compactación

La compactación es el procedimiento en que por acción mecánica una mezcla asfáltica suelta se densifica transformándose en una probeta con geometría y densidad determinada.

Las probetas utilizadas para el ensayo de Rueda de Carga de Hamburgo fueron compactadas con el compactador giratorio (SGC), de la marca Troxler, modelo 5850 existente en el LEMCO-USM.

El procedimiento de compactación se realiza de acuerdo a las exigencias del estándar AASHTO T312.

Para este estudio la temperatura óptima de compactación se fijó en 147°C para los asfaltos tradicionales y 152°C para aquellas mezclas que usan asfaltos modificados.

Pasos para la compactación de la mezcla:

1. Coloque la mezcla ya acondicionada en un horno a la temperatura de compactación por 2 horas.
2. A la hora 1.5 caliente los moldes y los instrumentos introduciéndolos en el horno.

3. Mientras espera que se caliente el instrumental configure el compactador giratorio para compactar hasta una altura de 6,2mm y habilite la opción de estabilización de la mezcla.
4. Cumplido el tiempo de calentamiento saque los moldes del SGC del horno, ármelos y tárelos en una balanza protegida contra el calor.
5. Saque la mezcla del horno y viértala al interior del compactador verificando que la masa ingresada sea la que asegura la densidad que se desea lograr en la probeta.
6. Tape el molde y métalo en el compactador giratorio.
7. Cierre la puerta y de inicio al equipo.
8. El equipo debería compactar la mezcla con menos de 100 giros, de no ser así revise que la dosificación de la mezcla sea la correcta.
9. Una vez terminada la compactación, retire el molde y déjelo enfriar por 10 minutos. Para acelerar el enfriamiento puede ayudarse de un ventilador.
10. Desmolde la probeta y pésela.
11. Mida la altura de la probeta en 5 puntos diferentes, ninguna de las mediciones debe diferir en más de 1 mm de la altura configurada. Descarte las probetas defectuosas y revise la calibración del equipo.
12. Etiquete y guarde las probetas de forma que siempre se encuentren sobre una superficie plana y nivelada.

5.4.5.7 Validación de Densidades

Debido a la gran influencia que tienen las propiedades volumétricas en los resultados de la prueba de Rueda de Carga de Hamburgo, es necesario controlar que todas las probetas que se deseen ensayar cumplan con los valores de diseño requeridos.

Para verificar la correcta compactación de la probeta se medirá la densidad de las muestras y se comparará con el valor diseño. Las probetas que no cumplan con los valores esperados con un 1% de tolerancia serán rechazadas. Cuando esto ocurra, se debe modificar la masa total de la probeta de modo que la probeta final cumpla con las especificaciones.

La medición de la densidad real se ejecutará de acuerdo a lo estipulado en el Manual de Carreteras M. C. 8.302.38, según el método B.

Pasos para la medición de las densidades:

1. Mida el peso de la probeta seca sobre una balanza y registre este dato como A.
2. Mida el peso de la probeta sumergida en agua con una balanza equipada con un dispositivo similar al de la fotografía siguiente y llame a este peso C.



Figura 5-15: Equipo para medición de densidades de las probetas de mezcla asfáltica. Fuente: Elaboración propia.

3. Seque con un paño la probeta hasta que se vea superficialmente seca y vuelva a medir su peso. Llame a este peso B.
4. Determine la densidad real de la probeta con la siguiente expresión:

$$G = \frac{A}{\frac{B - C}{p_w}} * 1.000 \left[\frac{Kg}{m^3} \right] \quad 5-6$$

Donde:

A: Masa de la probeta en aire [g].

B: Masa de la probeta en aire con superficie seca [g].

C: Masa de la probeta en agua [g].

p_w : Densidad del agua, correspondiente a $1[\text{g}/\text{cm}^3]$.

5.4.5.8 Corte de las Probetas

Las probetas del ensayo de rueda de carga de Hamburgo están compuestas por dos cilindros SGC cortados en un extremo, los cuales al unirse para forman un “8”.

La manera en que las probetas deben ser cortadas y ensambladas está dispuesta en la normativa del ensayo AASHTO T-324.

Dada las dimensiones de los moldes del HWTD de la empresa Asfalchiles Las dimensiones del corte de la probeta quedan determinados por el siguiente esquema:

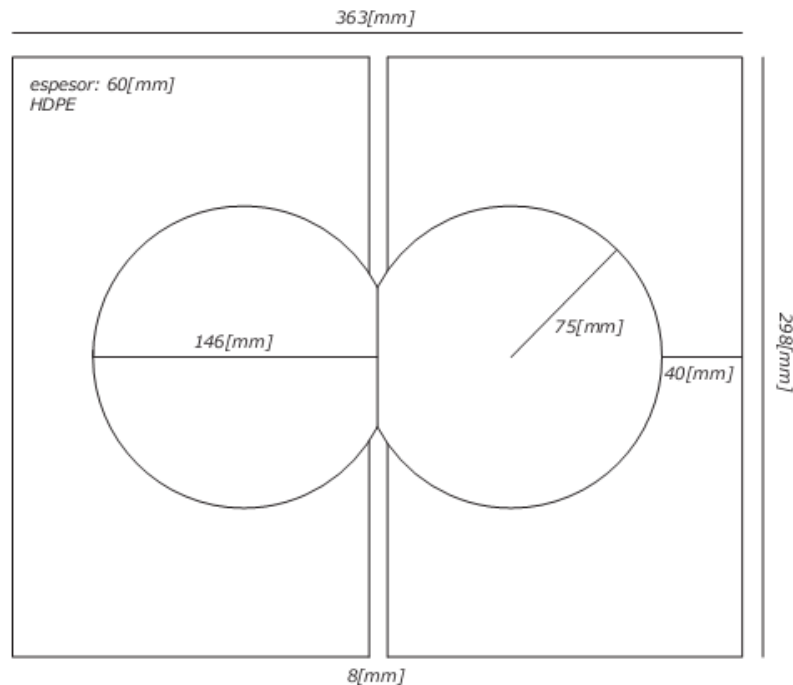


Figura 5-16: Esquema de corte y disposición de las probetas para el ensayo de Rueda de Carga de Hamburgo. Fuente: Elaboración propia.

Pasos para la realización del corte

1. Conecte la sierra al suministro eléctrico y de agua.
2. Ajuste la regla de la base móvil de la sierra a una distancia de 146 mm.
3. Encienda la sierra, sujete firmemente la probeta y corte. La superficie cortada debe quedar recta y lisa.

4. Deje secar la probeta al aire libre, etiquete y guarde.

5.4.5.9 Transporte de Probetas

Debido a la importancia de que las probetas mantengan sus propiedades geométricas y volumétricas sin alteraciones desde la fabricación hasta el ensayo, se debe tener especial cuidado en la manipulación y traslado de las probetas.

Para este estudio, las probetas del HWTT fueron fabricadas en el Laboratorio LEMCO-USM en Valparaíso y trasladadas hasta la planta de la Empresa AsfalChile en la ciudad de Concón para su ensayo.

Para su traslado, las probetas fueron embaladas en bolsas herméticas e introducidas en una caja plástica equipada una base rígida de MDF y un acolchado de poliestireno expandido que impida que las probetas se golpeen durante el traslado.

Se debe tener presente que algunos autores recomiendan que el ensayo se lleve a cabo en no más de 4 días después de la fecha de fabricación de las probetas.

En la siguiente figura se puede ver un set de probetas embaladas y listas para ser transportadas.



Figura 5-17: Embalaje de las probetas para traslado. Fuente: Elaboración propia.

5.4.6 Equipo de Ensayo

5.4.6.1 Rueda de Carga de Hamburgo

Como se explicó en el marco teórico, este equipo fue inventado en Alemania en la década del 70 para probar la capacidad de resistir ahuellamiento que tiene una mezcla asfáltica.

El HWTD es una máquina que valiéndose de un motor eléctrico y dispositivos mecánicos hace circular repetidas veces una rueda de acero sobre una probeta de mezcla asfáltica, la que a su vez se encuentra sumergida en un baño de agua a una temperatura de 50°C. El equipo cuenta con un LVDT que con la ayuda de un ordenador mide y registra la profundidad de ahuellamiento que se va generando en la probeta con las sucesivas pasadas de la rueda.

El HWTD debe cumplir con las indicaciones de la norma ASSHTO T324-11, de las cuales destacan las siguientes:

- El dispositivo de ensayo tiene que ser capaz de mover una rueda de acero de 47mm de ancho y 203mm de diámetro sobre una probeta de mezcla asfáltica aplicando una carga de 705N.
- El aparato debe ser capaz de mover la rueda de forma que ésta varíe su posición de forma sinusoidal, con una frecuencia de 52 pasadas por minuto.
- También el equipo debe contar con un sistema de calentadores y bombas que permitan controlar la temperatura del baño de agua. Esta temperatura del agua debe ser homogénea en el contenedor. Se recomienda que el rango de temperatura que pueda manejar el equipo sea entre 25 y 70°C con una precisión de 2°C.
- El sistema de medición de ahuellamiento debe poder medir entre un rango de 0,01 y 20mm; con una frecuencia mínima de 100 pasadas.
- El sistema debe contar con un sistema que registre la deformación y el número de pasadas en 11 posiciones a lo largo de la probeta.
- El sistema de sujeción debe ser capaz de montar probetas de mezcla asfáltica fabricadas en el compactador giratorio.

Para esta investigación se utilizó el equipo de la empresa Asfalchile S.A que se encuentra ubicado en el laboratorio de control de materiales de la planta de Concón, como se puede ver en la siguiente figura este equipo tiene la particularidad de contar con una sola bandeja de ensayo lo que implico algunas adaptaciones de los procedimientos de ensayo y análisis de resultados establecidos en la norma AASHTO T324-11

Para la ejecución del ensayo se utilizó el equipo: PMW Single Wheel tracking del fabricante Troxler S.A. controlado por el software PMW Wheel Tracker 5.0. Una fotografía del equipo se puede ver a continuación:



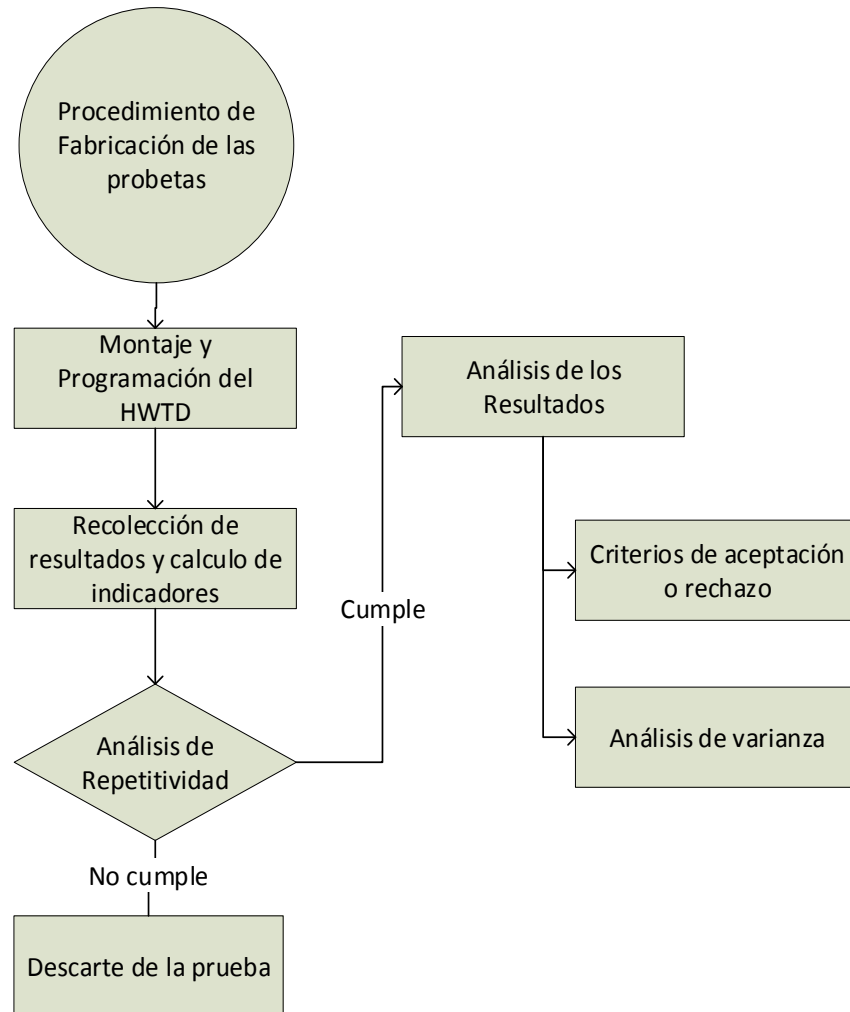
Figura 5-18: Rueda de Carga de Hamburgo. (HWTD) perteneciente a la empresa Asfalchile. *Fuente: Elaboración propia.*



Figura 5-19: Sistema de sujeción HWTD. *Fuente: Elaboración propia.*

5.4.7 Procedimientos del ensayo y análisis de resultados

En esta sección se estudiarán los procedimientos utilizados para la realización del ensayo y el posterior análisis de resultados. En la siguiente figura se esquematiza la sucesión de tareas involucradas en estos procesos.



5.4.7.1 Montaje y Programación del Equipo de Rueda de Carga de Hamburgo.

Una vez fabricadas las probetas y transportadas hasta el lugar donde se realizará el ensayo, se debe proceder de la siguiente manera:

1. Desembale la probeta que se desea ensayar.
2. Encaje las probetas dentro de los moldes plásticos del equipo.
3. Coloque los moldes dentro de la bandeja, preocupándose de que las partes cortadas de la probeta queden totalmente en contacto entre sí.
4. Coloque la tapa de la bandeja apretando hasta que la probeta quede firmemente sujeta. No apriete demasiado ya que esto, en conjunto con la temperatura del ensayo, puede generar deformaciones indeseadas en la zona central de la probeta.
5. Fije firmemente la bandeja al equipo.
6. Encienda el equipo y configure el software con los siguientes datos:

Tabla 5-28: Configuración para el ensayo. Fuente: Elaboración propia.

Identificación del ensayo	Tipo de mezcla - ligante
Número de ensayo	#
Altura de la probeta	62 [mm]
Diámetro de la probeta	150 [mm]
Porcentaje de vacíos	Según la muestra [%]
Temperatura	50 [°C]
Medio de ensayo	Agua
Carga de ensayo	705 [N]
Velocidad de ensayo	0,305 [m/s]
Tiempo de acondicionamiento	30 [min]
Frecuencia de medición	100 [pasadas]

7. Inicie el periodo de acondicionamiento. El equipo comenzara a llenarse de agua, encenderá los calefactores y activara las bombas de recirculación. Una vez que el agua alcance la temperatura de ensayo, el equipo comenzara a cronometrar los 30 minutos correspondientes al periodo de acondicionamiento.
8. Un minuto antes de terminar el periodo de acondicionamiento, saque los seguros y baje la rueda cargada posándola suavemente sobre la probeta.

9. Cuando termine el periodo de acondicionamiento el equipo automáticamente comenzará con el ensayo. El programa tomara como deformación cero la que presente la probeta luego de las primeras 5 pasadas.
10. Aproximadamente a las 7.5 horas de iniciado el ensayo el equipo habrá terminado las 20.000 pasadas finalizando la prueba.
11. Guarde los datos registrados en el equipo.
12. Retire las probetas, apague y limpie el equipo.

5.4.7.2 Recolección y cálculo de indicadores

Durante el ensayo, el equipo de rueda de carga de Hamburgo registra alrededor de 2.200 datos, correspondientes a las profundidades registradas cada 100 pasadas en los 11 puntos de control dispuestos bajo el surco formado por la circulación de la rueda como se grafica en la siguiente figura:

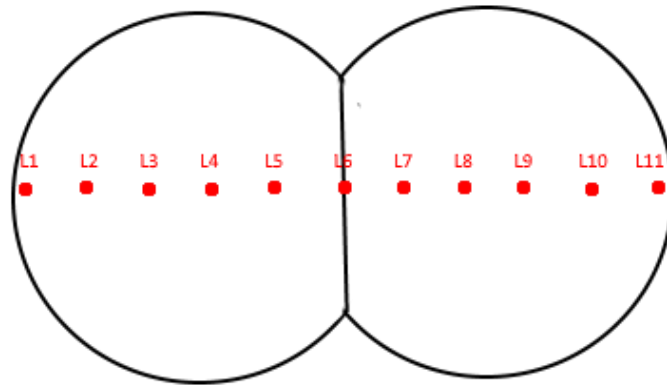


Figura 5-20: diagrama de posiciones de los LVDT. Fuente: Elaboración propia.

El software que controla el ensayo entrega los registros de profundidad en una tabla de datos que tiene la siguiente forma:

Tabla 5-29: Ejemplo salida de datos Equipo. Fuente: Elaboración propia.

Ensayo	Numero de Pasadas	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11
1	5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	100	-1,53	-1,16	-1,17	-1,18	-1,19	-1,20	-1,20	-1,23	-1,24	-1,25	-1,23
1	200	-1,52	-1,57	-1,59	-1,60	-1,62	-1,63	-1,01	-2,03	-2,02	-2,01	-1,96
1	300	-1,83	-1,94	-1,95	-1,96	-1,96	-1,97	-1,13	-2,08	-2,09	-2,08	-2,04
1	400	-2,11	-2,40	-2,39	-2,39	-2,39	-2,40	-1,30	-2,56	-2,55	-2,51	-1,84
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

A partir de la tabla de las mediciones se deben calcular los siguientes indicadores de comportamiento.

- Ahuellamiento de la probeta a las 10.000 pasadas.
- Ahuellamiento de la probeta a las 20.000 pasadas.
- Pendiente de ahuellamiento (Creep Slope).
- Pendiente de ahuellamiento influenciada por la humedad (Stripping Slope). Sólo se calcula en caso de existir influencias de la humedad dentro rango de estudio.
- Punto de inflexión de la curva de ahuellamiento (Striping Point.). En caso de existir influencias de la humedad dentro del rango de estudio.

Dado a que la normativa vigente (AASHTO 324-11) no es explícita en indicar como obtener los indicadores antes mencionado, a continuación, se detalla la metodología propuesta por esta investigación.

Dado que para obtener los indicadores de desempeño se requiere escoger una única curva de ahuellamiento a partir de las 11 curvas que entrega el equipo (1 curva para cada posición de medición de los LVDTs) se debe determinar cuál de estas es la que mejor representa el comportamiento de la probeta. en este ensayo de forma conservadora se escogió como la curva característica la que implicara los mayores ahuellamientos.

Cuando el ensayo se realiza sobre una placa de mezcla asfáltica resulta intuitivo pensar que la medición realizada por los medidores centrales es la más representativa ya que en esta posición existen menos efectos de borde impuestos por el sistema de sujeción. Sin embargo, cuando el ensayo se realiza sobre la probeta en forma de 8 obtenida a partir de dos cilindros fabricados en el compactador giratorio los medidores centrales también están afectados por la unión entre los dos cilindros que forman la probeta.

1. En esta investigación para poder determinar el medidor que mejor representaba a la probeta, se realizaron gráficos de dispersión entre la profundidad y el

número de pasadas para cada uno de ellos (ver la Figura 5-21: Curvas de ahuellamiento para cada LVDT. *Fuente: Elaboración propia*

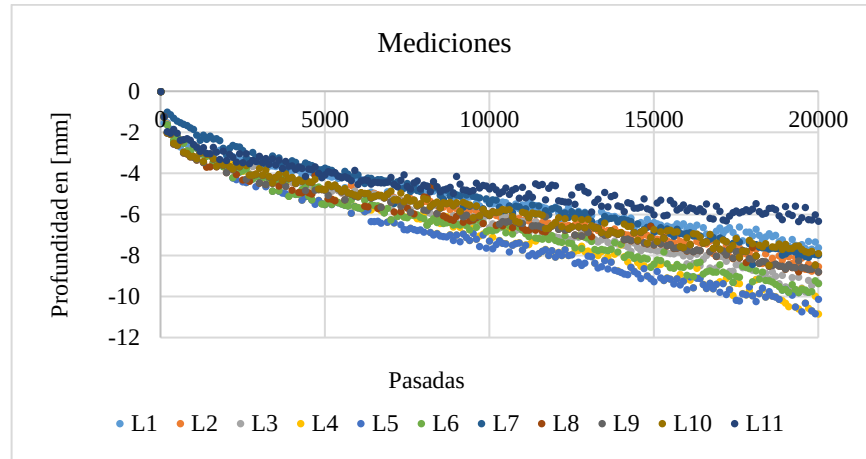


Figura 5-21: Curvas de ahuellamiento para cada LVDT. *Fuente: Elaboración propia*

En el gráfico de dispersión del ejemplo se puede observar que las mayores profundidades se presentan en los medidores L4, L5 los que no están exactamente en el centro de la probeta.

2. En segundo lugar, se graficó el perfil de deformaciones de la probeta contra el numero de pasadas, con esto se puede tener una idea de la propagación de la deformación y además permite estimar en qué posición se generaron las máximas profundidades de ahuellamiento,

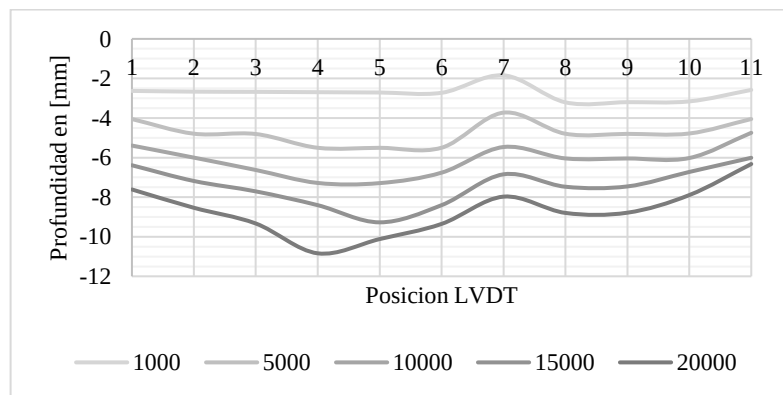


Figura 5-22: Perfil de ahuellamiento con distintos niveles de pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

Nótese en el gráfico de perfil que la profundidad máxima del surco no ocurre siempre en el medidor central de hecho en la gráfica se muestra que la máxima profundidad de ahuellamiento se fue moviendo desde el L6 a L4.

3. En los casos en que desde el gráfico de dispersión y el de perfil no se pudiese reconocer cuál de las curvas es la con mayor ahuellamiento, como en el caso del ejemplo, se recurrió a una suavización de las curvas para determinar cuál de ellas representa el mayor ahuellamiento. En este estudio se suavizaron las curvas mediante promedios móviles para ayudar a reconocer la curva característica.

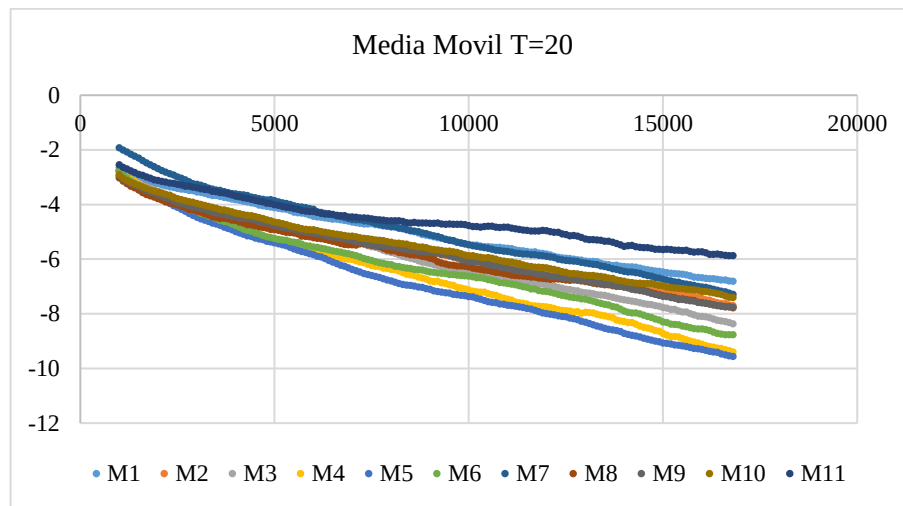


Figura 5-23: Gráfica de promedios móviles de periodo 20. Fuente: *Elaboración propia*.

En el caso del ejemplo si existía duda entre la curva 4 y 5 la gráfica de los promedios móviles permite concluir que la curva característica es la curva L5 correspondiente a la curva de promedios móviles M5 de la siguiente gráfica.

4. A partir de la curva característica (L5 ejemplo) Se calculó la deformación a las 10.000 pasadas como la máxima deformación registrada en la curva característica antes de las 10.000 pasadas
5. De la misma forma se calculó la deformación a las 20.000 pasadas como la máxima deformación registrada en la curva característica antes de las 20.000 pasadas.
6. Para la determinación de las pendientes de las rectas que determina la zona de deformaciones (Creep Slope) y la zona de deformaciones asociada a la presencia de humedad (Stripping Slope), en este estudio, se estimó que las rectas que mejor representan la curva de ahuellamiento, son aquellas que

minimizan el error cuadrático conjunto. Las ecuaciones utilizadas para determinar las ecuaciones de las rectas fueron las siguientes:

Recta bilineal:

$$y(x) = \begin{cases} m_{Creep}x + y_{0Creep}, & x < b : \text{Recta zona Creep} \\ m_{Stripping}x + y_{0Stripping}, & x \geq b : \text{Recta zona Stripping} \end{cases} \quad 5-7$$

Donde:

$y(x)$: recta bilineal de ajuste a la curva de ahuellamiento [mm]

b : numero de pasadas del primer dato de la pendiente de stripping [mm]

y_{0Creep} : intersección al eje de la recta ajustada a la zona creep [mm]

m_{Creep} : pendiente de la recta ajustada a la zona creep [mm/pasadas]

$m_{Stripping}$: pendiente de la recta ajustada a la zona stripping [mm/pasadas]

$y_{0Stripping}$: intersección al eje de la recta ajustada a la zona stripping [mm]

Pendiente de la recta de ajuste en la zona creep

$$m_{Creep} = \frac{N \sum_a^b x_i y_i - \sum_a^b x_i \sum_a^b y_i}{N \sum_a^b x_i^2 - (\sum_a^b x_i)^2} \quad 5-8$$

Donde:

x_i : número de pasadas del registro i

y_i : ahuellamiento asociado al número de pasadas x_i

a : número de pasadas del primer dato registrado ubicado después la zona de post compactación [mm] (usualmente 1000 pasadas)

N : número de datos entre a y b

Intersección con el eje de la recta de ajuste en la zona creep

$$y_{0Creep} = \frac{N \sum_a^b x_i^2 \sum_a^b y_i - \sum_a^b x_i \sum_a^b x_i y_i}{N \sum_a^b x_i^2 - (\sum_a^b x_i)^2} \quad 5-9$$

Pendiente de la recta de ajuste en la zona stripping

$$m_{stripping} = \frac{N \sum_b^c x_i y_i - \sum_b^c x_i \sum_b^c x_i}{N \sum_b^c x_i^2 - (\sum_b^c x_i)^2} \quad 5-10$$

Donde:

x_i : número de pasadas del registro i

y_i : ahuellamiento asociado al número de pasadas x_i

c : número de pasadas del último dato de la pendiente de stripping [mm]

N : número de datos entre b y c

Intersección con el eje de la recta de ajuste en la zona stripping

$$y_{0stripping} = \frac{N \sum_b^c x_i^2 \sum_b^c y_i - \sum_b^c x_i \sum_b^c x_i y_i}{N \sum_b^c x_i^2 - (\sum_b^c x_i)^2} \quad 5-11$$

Error cuadrático conjunto.

$$e^2 = \sum_a^b (y(x_i) - m_{creep} x_i - y_{0creep})^2 + \sum_b^c (y(x_i) - m_{stripping} x_i - y_{0stripping})^2 \quad 5-12$$

7. Calcule el *stripping point* como la intersección entre las rectas de ajuste de las zonas de *creep* y *stripping* mediante las siguientes ecuaciones:

$$x = \frac{y_{0creep} - y_{0stripping}}{-m_{creep} + m_{stripping}} \quad 5-13$$

$$y = \frac{m_{creep} * y_{0stripping} + m_{stripping} * y_{0creep}}{-m_{creep} + m_{stripping}} \quad 5-14$$

Donde:

$y_{stripping point}$: ahuellamiento en el punto de Stripping [mm]

$x_{stripping point}$: N de pasada en el punto de Stripping

y_{0creep} : intersección al eje de la recta ajustada a la zona creep [mm]

m_{creep} : pendiente de la recta ajustada a la zona creep [mm/pasadas]

$m_{stripping}$: pendiente de la recta ajustada a la zona stripping [mm/pasadas]

$y_{0stripping}$: intersección al eje de la recta de ajustada a la zona stripping [mm]

5.4.7.3 Análisis de Repetitividad

Una vez calculados los indicadores que caracterizan el ahuellamiento, deben ser validados mediante algún procedimiento que asegure la precisión con la que estos fueron medidos. En este estudio, al procedimiento por el cual revisamos la precisión del ensayo le llamaremos análisis de repetitividad.

La norma AASHTO T324-11 no contiene restricciones sobre la repetitividad por lo que en esta investigación se utilizaron las definiciones y los procedimientos contenidos en las normas ASTM E177 y ASTM C 670 para para fijar los criterios de aceptabilidad de las pruebas.

Cabe recordar que para esta investigación se repitieron tres veces los ensayos para un cada tipo de mezcla y en base a la variación de éstos se estudiaron los criterios de aceptación y rechazo de las pruebas.

En este estudio se escogió el límite de una sigma (1s%) como medida de variabilidad de los ensayos y se utilizaron los multiplicadores de la norma ASTM C670-10 para fijar los rangos máximos de aceptación para las pruebas.

Debido a que no todas las pruebas presentan susceptibilidad a la humedad, la repetitividad se estudia para los siguientes indicadores: ahuellamiento a las 10.000 pasadas, ahuellamiento a las 20.000 pasadas y la pendiente de *creep* (*Creep Slope*).

A continuación, se señalan los pasos necesarios para determinar los rangos de aceptación de los indicadores:

1. Tabule los indicadores y agrupe los resultados provenientes de mezclas similares.
2. Para cada grupo de mezclas calcule el promedio de cada uno de los indicadores mediante la siguiente expresión:

$$\bar{x}_{ij} = \frac{\sum_k x_{ijk}}{n_{ij}} \quad 5-15$$

Donde:

$\bar{x}_{ij}$: es el promedio del indicador i del grupo j.

x_{ijk} : es el el k-esimo valor del indicador i en el grupo j.

n_{ij} : numero de datos del indicador i en el grupo j.

3. Para cada grupo de mezclas calcule la desviación estándar de cada uno de los indicadores

$$s_{ij\%} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_i (x_{ijk} - \bar{x}_{ij})^2}{n_{ij} - 1}}}{\bar{x}_{ij}} * 100\% \quad 5-16$$

Donde:

$s_{ij\%}$: es la desviación estándar del indicador i del grupo j expresado como porcentaje del promedio.

4. Calcule el rango de aceptabilidad para cada uno de los grupos e indicadores de acuerdo a la siguiente formula.

$$L_{max_{ij}} = \bar{x}_{ij} + \bar{x}_{ij} * 1s\% * f(n_{ij}) \quad 5-17$$

$$L_{min_{ij}} = \bar{x}_{ij} - \bar{x}_{ij} * 1s\% * f(n_{ij}) \quad 5-18$$

Donde:

$L_{max_{ij}}$: límite superior de aceptación para el indicador i del grupo j

$L_{min_{ij}}$: límite inferior de aceptación para el indicador i del grupo j

1s%: límite de una sigma (5%)

$f(n_{ij})$: factor multiplicador en función de n_{ij} (ver tabla 5-30)

n_{ij} : cantidad de datos del grupo j

$f(n_{ij})$: dado por la siguiente tabla:

Tabla 5-30: Factor para obtener el máximo rango aceptable en la medición [ASTM C670-10]. *Fuente: Elaboración propia.*

Número de Ensayos	Multiplicador de 1s% para obtener el máximo rango aceptable
n	f(n)
2	2.8
3	3.3
4	3.6
5	3.9
6	4.0
7	4.2
8	4.3
9	4.4
10	4.5

5. Elimine del estudio las pruebas cuyos indicadores no estén dentro del rango de aceptación.
6. Vuelva a calcular los rangos de aceptación y verifique para las pruebas restantes.

De acuerdo al análisis de los resultados que se expone en el capítulo de resultados, se estimó que un valor para el límite 1s% debiese ser de un 5%. Las revisiones de la literatura indican que este valor es algo conservador, pero atendiendo al elevado estándar de precisión que se le quiere dar a este estudio se considerará adecuado.

5.4.7.4 Análisis de resultados

5.4.7.4.1 Criterios de aceptación y rechazo de una mezcla

El ensayo de rueda de carga de Hamburgo es utilizado primordialmente como un criterio de aceptación o rechazo de una mezcla de acuerdo a una especificación normativa asociada a la capacidad de resistir las deformaciones permanentes.

En esta investigación se tomó el criterio de aceptación el criterio usados por el departamento de transporte de Texas de acuerdo a lo que indica en diversa publicaciones. (Fujie Zhou, 2006). Los criterios dependen del grado PG del asfalto que se utilizado en la mezcla a continuación se presentan los criterios de aceptación.

1. Las mezclas fabricadas con asfaltos tradicionales deben tener un promedio de ahuellamiento menor a 12,5mm antes de las 10.000 pasadas.
2. Las mezclas fabricadas con asfaltos modificados deben tener un promedio de ahuellamiento menores a 12,5mm antes de las 20.000 pasadas.
3. En el caso de las mezclas fabricadas con asfaltos modificados y diseñadas como mezclas de alto desempeño se debe revisar que el promedio de ahuellamiento a las 20.000 pasadas sea menor a 4 mm.

En el caso de que una mezcla no cumpla con estos criterios se entiende que esta es susceptible a ahuellarse prematuramente o no corresponde a la clasificación de mezcla de alto desempeño.

5.4.7.4.2 Análisis estadístico

En este estudio se desea comparar varios tipos de mezcla para lo que se propone realizar un análisis estadístico que consta de un análisis descriptivo y un análisis inferencial, que en conjunto permitirán determinar cuál de las mezclas presenta un mejor rendimiento y que parámetros influyen más en éste.

Para realizar los análisis estadísticos se sugiere seguir los siguientes pasos.

1. Tabule los indicadores del desempeño de las mezclas (Ahuellamiento 10.000, Ahuellamiento 20.000, *Creep Slope*, *Stripping Slope* y *Striping Point*) y agrúpelos de acuerdo a sus similitudes (granulometría, tipo asfalto, empresa proveedora, etc.).
2. Confeccione gráficos de dispersión, box plot y otros que le permitan descubrir algún patrón en el comportamiento.
3. A partir de los gráficos proponga algunas hipótesis para posteriormente comprobarlas mediante las pruebas inferenciales. Por ejemplo: las mezclas 1 y 2 tienen la misma pendiente de ahuellamiento, las modificaciones de asfalto disminuyen el ahuellamiento a las 10.000 pasadas, etc.
4. Para la realización del análisis inferencial deberá identificar las variables aleatorias asociada a cada hipótesis. En este caso, las variables serán los indicadores de desempeño elegidos.

5. Para la utilización de la mayoría de las pruebas de inferencia como ANOVA se debe comprobar que las variables aleatorias elegidas se distribuyan de forma normal. Esto se comprueba a través de la prueba de Kolmogórov-Smirnov cuando se disponga de más de 50 datos o el test de Shapiro–Wilk cuando se tengan menos de 50 datos.

En el análisis realizado en este estudio el número de datos por grupo era muy pequeño ($n=3$) por lo que las pruebas antes mencionadas no son efectivas debiéndose asumir que las variables se distribuyen de forma normal.

En el caso de que se cuente con más de 10 datos se podrá verificar la normalidad con los test antes mencionados.

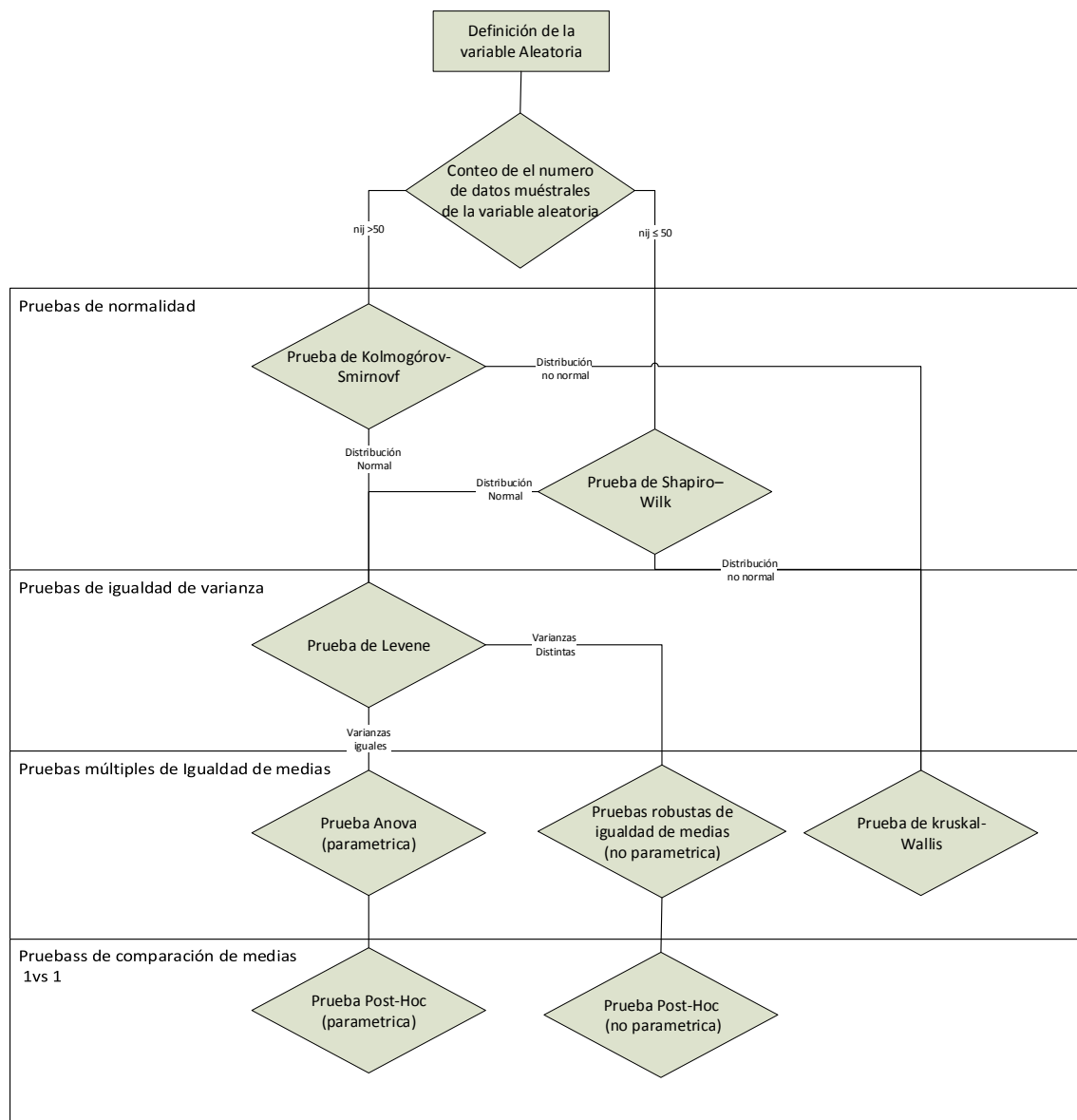
1. Si los datos son normales se debe realizar la prueba de Levene para comprobar si las varianzas de los grupos que se van a comparar son similares (variables homocedásticas).
2. En el caso comprobarse la igualdad de varianzas o la también llamada homocedasticidad, se puede aplicar la prueba de igualdad de medias ANOVA que indicará si es que alguna de las mezclas en estudio presenta un desempeño diferente a las demás.
3. En el caso de no comprobarse la normalidad de las variables, se usará la prueba de igualdad de medianas de Kruskal-Wallis; alternativamente también se podrán normalizar las variables por medio de cambios de variables.
4. Si la prueba de Levene arroja que las varianzas de los grupos analizados no son iguales, no se podrá realizar el análisis ANOVA, debiéndose utilizar alguna prueba de igualdad de medias no paramétricas como el test de Brown-Forsythe o la prueba robusta de Welch, que tienen interpretaciones análogas al test ANOVA.
5. Luego de la aplicación de las pruebas múltiples (ANOVA o Robustas) se requerirá de la aplicación de alguna prueba Post-Hoc, las que serán paramétricas o no paramétricas dependiendo de los resultados que se hayan obtenido en la prueba de Levene. Estos test sirven para conocer si existen

diferencias entre las medias de dos grupos y al aplicarlo a todas las combinaciones posibles nos permitirá ordenar los resultados de mejor a peor.

6. Concluya respecto a las hipótesis que se hayan planteado a partir de la observación de los gráficos y los resultados de las pruebas de inferencia.

En este estudio y para todas las pruebas se utilizó una confiabilidad del 95%, que es el valor más utilizado para este tipo de estudios.

En la siguiente figura a modo de ayuda se esquematiza el árbol de decisión asociado a las pruebas estadísticas antes mencionadas.



6 Resultados

En este capítulo se puede encontrar el resumen de los resultados de la actividad experimental, la determinación del límite de aceptabilidad de los ensayos, el análisis de varianza y la discusión sobre los resultados.

6.1 Resumen de Resultados

A continuación, se presentan los valores característicos para el ahuellamiento obtenidos a partir de los ensayos de rueda de carga de Hamburgo. En este estudio y como es usual, las curvas de ahuellamiento serán caracterizadas por las deformaciones máximas medidas antes de las 10.000 y 20.000 pasadas, las pendientes de deformación de la mezcla (*creep slope* y *stripping slope*), y el punto de *stripping*.

En la tabla de resultados no se registran deformaciones a las 20.000 pasadas para los ensayos asociados a los asfaltos tradicionales, debido a que usualmente los límites de aceptación para el ahuellamiento para este tipo de mezclas se establecen a las 10.000 pasadas, además se decidió detener las mediciones antes de las 20.000 pasadas ya que la rugosidad superficial de las probetas, cuando están muy deformadas, genera vibraciones que pueden alterar la medición e incluso descalibrar el equipo.

También se puede observar que en la mayoría de los ensayos no se registraron pendientes de *Stripping* ni tampoco Puntos de *Stripping*, lo que se debió a que las curvas no presentaron puntos de inflexión que indicaran susceptibilidades a la humedad, probablemente debido a una buena afinidad entre el árido y el asfalto.

Las curvas de ahuellamiento asociadas a los resultados se pueden encontrar en el Anexo A. La metodología para el cálculo de los resultados se encuentra en el acápite anterior, donde se menciona la metodología del ensayo. Adicionalmente, en los respaldos digitales de la memoria se encuentran las planillas utilizadas para el cálculo de los ahuellamientos, las pendientes y los puntos de *Stripping*.

Tabla 6-1: Resumen de resultados del ensayo de Rueda de Carga de Hamburgo. Fuente: Elaboración propia.

N° Ensayo	Mezcla	Ligante	PG	Proveedor de Asfalto	Ahuellamiento 10.000 Pasadas	Ahuellamiento 20.000 Pasadas	Límite Ahuellamiento TxDOT		Creep slope [Pasadas/mm]	Stripping slope [Pasadas/mm]	Stripping point		
					[mm]	[mm]	[Pasadas]	[mm]			[Pasadas]	[mm]	
1	IVA12	Tradicional	PG64-22	E1	11,32	N.O	10.000	12,5	1.435	883	-9.536		
2					9,58	N.O	10.000	12,5	1.823	822	-10.543		
3					8,66	N.O	10.000	12,5	2.159	1.473	-12.947		
4				E2	9,18	N.O	10.000	12,5	2.045	1.083	-15.871		
5					7,63	N.O	10.000	12,5	2.735	N.O	N.O		
6					9,54	N.O	10.000	12,5	2.401	N.O	N.O		
7		Modificado	PG70-22	E1	5,41	9,28	20.000	12,5	3.570	N.O	N.O		
8					4,26	5,15	20.000	12,5	9.723	N.O	N.O		
9					3,76	5,17	20.000	12,5	7.040	N.O	N.O		
10			PG70-28	E2	4,92	5,85	20.000	12,5	7.234	N.O	N.O		
11					4,38	5,16	20.000	12,5	8.841	N.O	N.O		
12					3,61	4,06	20.000	12,5	12.078	N.O	N.O		
13	M10	Modificado	PG70-22	E1	4,95	5,56	20.000	12,5	6.171	N.O	N.O		
14					4,36	5,47	20.000	12,5	5.839	N.O	N.O		
15					4,98	6,38	20.000	12,5	6.582	N.O	N.O		
16			PG70-28	E2	3,95	5,40	20.000	12,5	5.147	N.O	N.O		
17					5,87	7,70	20.000	12,5	4.097	N.O	N.O		
18					5,04	6,19	20.000	12,5	5.878	N.O	N.O		
19			SMA	PG70-22	E1	2,61	2,85	20.000	12,5	19.269	N.O	N.O	
20						2,39	2,74	20.000	12,5	17.553	N.O	N.O	
21						2,36	2,65	20.000	12,5	15.329	N.O	N.O	
22				PG70-28	E2	3,16	3,64	20.000	12,5	11.906	N.O	N.O	
23	1,06					1,26	20.000	12,5	43.331	N.O	N.O		
24	2,42					2,80	20.000	12,5	15.335	N.O	N.O		
25	USM		PG70-22	E1	2,77	3,18	20.000	12,5	15.356	N.O	N.O		
26					2,20	2,36	20.000	12,5	29.474	N.O	N.O		
27					2,52	2,80	20.000	12,5	18.501	N.O	N.O		
28			PG70-28	E2	2,84	3,14	20.000	12,5	19.840	N.O	N.O		
29					2,64	2,96	20.000	12,5	15.185	N.O	N.O		
30		2,78			2,98	20.000	12,5	21.044	N.O	N.O			

6.2 Análisis de repetitividad.

En esta sección y debido a la inexistencia de especificaciones sobre la repetitividad en la metodología (AASHTO T 324-11, 2011), se analizará la precisión de los resultados mediante el cálculo de los coeficientes de variación de los grupos de mezclas analizados y las recomendaciones propuestas en el estándar [ASTM C670-10], en lo referido a la precisión de un operador bajo condiciones de repetitividad.

Según la norma [ASTM E177-10], las condiciones apropiadas para asegurar la repetitividad de un ensayo son aquellas en que los resultados son obtenidos bajo el mismo método de ensayo, en el mismo laboratorio, con un mismo operario, con los mismos equipos y dentro de un corto periodo de tiempo, tal que ni los equipos ni las condiciones ambientales hayan sufrido alteraciones y donde, además, se hayan utilizado probetas de los mismos tamaños, homogéneas y provenientes de las mismas partidas.

En la actividad experimental y de acuerdo a los estándares de repetitividad anteriormente mencionados, se ensayaron 10 tipos de mezclas asfálticas, sobre los cuales se repitieron las pruebas en 3 oportunidades, lo que permitió calcular las variaciones de las deformaciones máximas medidas en la probeta después de 10.000 pasadas y las deformaciones máximas medidas luego de 20.000 pasadas para el caso de las mezclas elaboradas con asfaltos modificados.

Las variaciones en los resultados se deben principalmente a pequeñas alteraciones en la ejecución de los ensayos, asociadas a: diferencias en la calibración de equipos, cambios en las condiciones ambientales, cambios en el procedimiento y heterogeneidad de los materiales.

Para analizar la variación de los resultados se eligió usar el estadístico 1s% o también llamado coeficiente de variación C_v que corresponde al cociente entre la variación estándar y el valor absoluto de la media, expresado en términos porcentuales.

Obtenidos los coeficientes de variación C_v para los distintos sujetos de estudio, se busca definir un único valor apropiado para el estadístico que permita realizar la posterior

validación de los resultados. En la Tabla 5-1y Tabla 5-2 se presentan los cálculos de los coeficientes de variación para las distintas mediciones y para los distintos grupos analizados.

Tabla 6-2: Coeficiente de variación para la deformación máxima antes de las 10.000 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

Mezcla	IV-A-12(A)		IV-A-12(B)		M-10		SMA		USM	
Tipo Asfalto	Tradicional		Modificado		Modificado		Modificado		Modificado	
Empresa	E1	E2	E1	E2	E1	E2	E1	E2	E1	E2
Deformaciones 10.000 Pasadas [mm]	-11,32	-9,18	-5,41	-4,92	-4,95	-3,95	-2,61	-3,16	-2,77	-2,84
	-9,58	-7,63	-4,26	-4,38	-4,36	-5,87	-2,39	-1,06	-2,20	-2,64
	-8,66	-9,54	-3,76	-3,61	-4,98	-5,04	-2,36	-2,42	-2,52	-2,78
Promedio [mm]	-9,85	-8,78	-4,48	-4,30	-4,76	-4,95	-2,45	-2,21	-2,50	-2,75
Dev. Est.	1,35	1,02	0,84	0,66	0,35	0,96	0,13	1,06	0,29	0,11
Cv [%]	13,7%	11,6%	18,9%	15,3%	7,3%	19,4%	5,5%	48,0%	11,6%	3,8%

Tabla 6-3: Coeficiente de variación para la deformación máxima antes de las 20000 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

Mezcla	IV-A-12(B)		M-10		SMA		USM	
Tipo Asfalto	Modificado		Modificado		Modificado		Modificado	
Empresa	E1	E2	E1	E2	E1	E2	E1	E2
Deformaciones 20.000 Pasadas [mm]	-9,28	-5,85	-5,56	-5,40	-2,85	-3,64	-3,18	-3,14
	-5,15	-5,16	-5,47	-7,70	-2,74	-1,26	-2,36	-2,96
	-5,17	-4,06	-6,38	-6,19	-2,65	-2,80	-2,80	-2,98
Promedio [mm]	-6,53	-5,02	-5,80	-6,43	-2,75	-2,57	-2,78	-3,03
Dev. Est.	2,38	0,90	0,50	1,17	0,10	1,21	0,41	0,10
Cv [%]	36,4%	18,0%	8,6%	18,2%	3,7%	47,1%	14,9%	3,3%

De los coeficientes calculados para la deformación a las 10.000 pasadas se puede apreciar que salvo el coeficiente de variación de las mezclas SMA –E2 todos los valores están por debajo del 20 %, de igual manera ocurre en las deformaciones máximas medidas después de las 20.000 pasadas, donde al descartar los 2 valores mayores se puede observar que los 8 valores restantes rondan el 18%.

Para poder estimar un estadístico 1s% adecuado, supondremos que los valores limites calculados para los coeficientes de variación, corresponden con el límite del rango de aceptabilidad, el que, como indica la norma [ASTM 670-10], se puede calcular como el

producto entre el estadístico 1s% adecuado y un factor multiplicador dependiente del número de resultados analizados. Los valores del factor para el cálculo del máximo rango de aceptación se presentan a continuación:

Tabla 6-4: Factor para obtener el máximo rango aceptable en la medición [ASTM C670-10]. *Fuente: Elaboración propia.*

Número de Ensayos	Multiplicador de 1s% para obtener el máximo rango aceptable
n	f(n)
2	2.8
3	3.3
4	3.6
5	3.9
6	4.0
7	4.2
8	4.3
9	4.4
10	4.5

Debido a que todos los ensayos fueron repetidos en tres ocasiones, el estadístico del límite de un sigma se calculará dividiendo el coeficiente C.V. más conservador, 18%, por el factor 3,3; resultando en el límite de un sigma 1s%=5,45% lo que se aproximará a un 5% para la validación de los datos.

Antes de realizar un análisis de varianza sobre los resultados del ensayo de rueda de carga de Hamburgo, es necesario comprobar la validez de los mismos. Para efectos de esta investigación, se considerarán validos los ensayos cuyos resultados se encuentren dentro del rango de aceptabilidad definido por el estadístico "límite de una sigma" 1s% [ASTM C670-10].

Para revisar la aceptación de los ensayos se utilizarán las mediciones de deformación a las 10.000 y 20.000 pasadas en conjunto con el estadístico 1s%. Con estos datos se calcularán límites de aceptabilidad máximos y mínimos para cada grupo de mezcla asfáltica en estudio.

$$L_{maxij} = \bar{x}_{ij} + \bar{x}_{ij} * 1s\% * f(n_{ij})$$

6-1

$$L_{min_{ij}} = \bar{x}_{ij} - \bar{x}_{ij} * 1s\% * f(n_{ij})$$

6-2

Donde:

$L_{max_{ij}}$: Limite superior de aceptación para el grupo j

$L_{min_{ij}}$: Límite inferior de aceptación para el grupo j

$\bar{x}_{ij}$: Media del grupo j

1s%: estadístico una sigma propuesto en este estudio igual a un 5%

$f(n_{ij})$: factor multiplicador

n_{ij} : cantidad de datos del grupo j

Dado que no se sabe a priori si el proveedor de asfalto influye en los resultados del ensayo de rueda de Hamburgo, se estudiará primero la validez de los ensayos para las 10 mezclas originales.

En el caso que algún resultado esté fuera del rango, se eliminará, se recalcularan los límites y se volverá a revisar la aceptabilidad de los datos restantes, procediendo de esta manera iterativamente hasta que los datos restantes cumplan con los límites de aceptabilidad.

En las siguientes tablas se presentan los resultados de la validación de los 10 grupos de mezclas.

Tabla 6-5: Validación de mezclas asfálticas IV-A-12-Tradicional-E1. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 10.000 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

Nº Ensayo	1	2	3
Deformación 10.000 Pasadas [mm]	-11,32	-9,58	-8,66
Promedio [mm]	-9,85		
Estadístico 1s%	5%		
N	3		
Multiplicador	3,3		
Límite Inferior [mm]	-8,23		
Límite Superior [mm]	-11,48		
Validación	Aceptado	Aceptado	Aceptado

Tabla 6-6: Validación de mezclas asfálticas IV-A-12-Tradicional-E2. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 10.000 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

Nº Ensayo	4	5	6
Deformación 10.000 Pasadas [mm]	-9,18	-7,63	-9,54
Promedio [mm]	-8,78		
Estadístico 1s%	5%		
N	3		
Multiplicador	3,3		
Límite Inferior [mm]	-7,33		
Límite Superior [mm]	-10,23		
Validación	Aceptado	Aceptado	Aceptado

Tabla 6-7: Validación de mezclas asfálticas IV-A-12-Modificado-E1. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 10.000 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

Nº Ensayo	7	8	9
Deformación 10.000 Pasadas [mm]	-5,41	-4,26	-3,76
Promedio [mm]	-4,01		
Estadístico 1s%	5%		
N	2		
Multiplicador	2,8		
Límite Inferior [mm]	-3,45		
Límite Superior [mm]	-4,57		
Validación	Rechazado	Aceptado	Aceptado

Tabla 6-8: Validación de mezclas asfálticas IV-A-12-Modificado-E1. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 20.000 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

Nº Ensayo	7	8	9
Deformación 20.000 Pasadas [mm]	-9,28	-5,15	-5,17
Promedio [mm]	-5,16		
Estadístico 1s%	5%		
N	2		
Multiplicador	2,8		
Límite Inferior [mm]	-4,44		
Límite Superior [mm]	-5,88		
Validación	Rechazado	Aceptado	Aceptado

Tabla 6-9: Validación de mezclas asfálticas IV-A-12-Modificado-E2. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 10.000 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

Nº Ensayo	10	11	12
Deformación 10.000 Pasadas [mm]	-4,92	-4,38	-3,61
Promedio [mm]	-4,30		
Estadístico 1s%	5%		
N	3		
Multiplicador	3,3		
Límite Inferior [mm]	-3,59		
Límite Superior [mm]	-5,01		
Validación	Aceptado	Aceptado	Aceptado

Tabla 6-10: Validación de mezclas asfálticas IV-A-12-Modificado-E2. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 20.000 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

Nº Ensayo	10	11	12
Deformación 20.000 Pasadas [mm]	-5,85	-5,16	-4,06
Promedio [mm]	-5,51		
Estadístico 1s%	5%		
N	2		
Multiplicador	2,8		
Límite Inferior [mm]	-4,74		
Límite Superior [mm]	-6,28		
Validación	Aceptado	Aceptado	Rechazado

Tabla 6-11: Validación de mezclas asfálticas M10-Modificado-E1. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 10.000 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

Nº Ensayo	13	14	15
Deformación 10.000 Pasadas [mm]	-4,95	-4,36	-4,98
Promedio [mm]	-4,76		
Estadístico 1s%	5%		
N	3		
Multiplicador	3,3		
Límite Inferior [mm]	-3,98		
Límite Superior [mm]	-5,55		
Validación	Aceptado	Aceptado	Aceptado

Tabla 6-12: Validación de mezclas asfálticas M10-Modificado-E1. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 20.000 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

Nº Ensayo	13	14	15
Deformación 20.000 Pasadas [mm]	-5,56	-5,47	-6,38
Promedio [mm]	-5,80		
Estadístico 1s%	5%		
N	3		
Multiplicador	3,3		
Límite Inferior [mm]	-4,84		
Límite Superior [mm]	-6,76		
Validación	Aceptado	Aceptado	Aceptado

Tabla 6-13: Validación de mezclas asfálticas M10-Modificado-E2. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 10.000 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

Nº Ensayo	16	17	18
Deformación 10.000 Pasadas [mm]	-3,95	-5,87	-5,04
Promedio [mm]	-4,50		
Estadístico 1s%	5%		
N	2		
Multiplicador	2,8		
Límite Inferior [mm]	-3,87		
Límite Superior [mm]	-5,13		
Validación	Aceptado	Rechazado	Aceptado

Tabla 6-14: Validación de mezclas asfálticas M10-Modificado-E2. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 20.000 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

Nº Ensayo	16	17	18
Deformación 20.000 Pasadas [mm]	-5,40	-7,70	-6,19
Promedio [mm]	-5,80		
Estadístico 1s%	5%		
N	2		
Multiplicador	2,8		
Límite Inferior [mm]	-4,99		
Límite Superior [mm]	-6,61		
Validación	Aceptado	Rechazado	Aceptado

Tabla 6-15: Validación de mezclas asfálticas SMA-Modificado-E1. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 10.000 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

Nº Ensayo	19	20	21
Deformación 10.000 Pasadas [mm]	-2,61	-2,39	-2,36
Promedio [mm]	-2,45		
Estadístico 1s%	5%		
N	3		
Multiplicador	3,3		
Límite Inferior [mm]	-2,05		
Límite Superior [mm]	-2,86		
Validación	Aceptado	Aceptado	Aceptado

Tabla 6-16: Validación de mezclas asfálticas SMA-Modificado-E1. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 20.000 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

Nº Ensayo	19	20	21
Deformación 20.000 Pasadas [mm]	-2,85	-2,74	-2,65
Promedio [mm]	-2,75		
Estadístico 1s%	5%		
N	3		
Multiplicador	3,3		
Límite Inferior [mm]	-2,29		
Límite Superior [mm]	-3,20		
Validación	Aceptado	Aceptado	Aceptado

Tabla 6-17: Validación de mezclas asfálticas SMA-Modificado-E2. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 10.000 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

Nº Ensayo	22	23	24
Deformación 10.000 Pasadas [mm]	-3,16	-1,06	-2,42
Promedio [mm]	-2,79		
Estadístico 1s%	5%		
N	2		
Multiplicador	2,8		
Límite Inferior [mm]	-2,40		
Límite Superior [mm]	-3,18		
Validación	Aceptado	Rechazado	Aceptado

Tabla 6-18: Validación de mezclas asfálticas SMA-Modificado-E2. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 20.000 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

Nº Ensayo	22	23	24
Deformación 20.000 Pasadas [mm]	-3,64	-1,26	-2,80
Promedio [mm]	-3,22		
Estadístico 1s%	5%		
N	2		
Multiplicador	2,8		
Límite Inferior [mm]	-2,77		
Límite Superior [mm]	-3,67		
Validación	Aceptado	Rechazado	Aceptado

Tabla 6-19: Validación de mezclas asfálticas USM-Modificado-E1. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 10.000 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

Nº Ensayo	25	26	27
Deformación 10.000 Pasadas [mm]	-2,77	-2,20	-2,52
Promedio [mm]	-2,50		
Estadístico 1s%	5%		
N	3		
Multiplicador	3,3		
Límite Inferior [mm]	-2,09		
Límite Superior [mm]	-2,91		
Validación	Aceptado	Aceptado	Aceptado

Tabla 6-20: Validación de mezclas asfálticas USM-Modificado-E1. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 20.000 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

Nº Ensayo	25	26	27
Deformación 20.000 Pasadas [mm]	-3,18	-2,36	-2,80
Promedio [mm]	-2,78		
Estadístico 1s%	5%		
N	3		
Multiplicador	3,3		
Límite Inferior [mm]	-2,32		
Límite Superior [mm]	-3,24		
Validación	Aceptado	Aceptado	Aceptado

Tabla 6-21: Validación de mezclas asfálticas USM-Modificado-E2. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 10.000 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

Nº Ensayo	28	29	30
Deformación 10.000 Pasadas [mm]	-2,84	-2,64	-2,78
Promedio [mm]	-2,75		
Estadístico 1s%	5%		
N	3		
Multiplicador	3,3		
Límite Inferior [mm]	-2,30		
Límite Superior [mm]	-3,21		
Validación	Aceptado	Aceptado	Aceptado

Tabla 6-22: Validación de mezclas asfálticas USM-Modificado-E2. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 20.000 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

N° Ensayo	28	29	30
Deformación 20.000 Pasadas [mm]	-3,14	-2,96	-2,98
Promedio [mm]	-3,03		
Estadístico 1s%	5%		
N	3		
Multiplicador	3,3		
Límite Inferior [mm]	-2,53		
Límite Superior [mm]	-3,53		
Validación	Aceptado	Aceptado	Aceptado

En la siguiente tabla se resumen los resultados de la validación:

Tabla 6-23: Resumen validación de mezclas asfálticas. *Fuente: Elaboración propia.*

Nº Ensayo	Grupo	Mezcla	Asfalto	Proveedor	Deformación 10.000 Pasadas	Deformación 20.000 Pasadas
1	1	IV-A-12	Tradicional	E1	Aceptada	-
2					Aceptada	-
3					Aceptada	-
4	2			E2	Aceptada	-
5					Aceptada	-
6					Aceptada	-
7	3	IV-A-12	Modificad	E1	Rechazada	Rechazada
8					Aceptada	Aceptada
9					Aceptada	Aceptada
10	4			E2	Aceptada	Aceptada
11					Aceptada	Aceptada
12					Aceptada	Rechazada
13	5	M10		E1	Aceptada	Aceptada
14					Aceptada	Aceptada
15					Aceptada	Aceptada
16	6			E2	Aceptada	Aceptada
17					Rechazada	Rechazada
18					Aceptada	Aceptada
19	7	SMA		E1	Aceptada	Aceptada
20					Aceptada	Aceptada
21					Aceptada	Aceptada
22	8			E2	Aceptada	Aceptada
23					Rechazada	Rechazada
24					Aceptada	Aceptada
25	9	USM		E1	Aceptada	Aceptada
26					Aceptada	Aceptada
27					Aceptada	Aceptada
28	10			E2	Aceptada	Aceptada
29					Aceptada	Aceptada
30					Aceptada	Aceptada

En conclusión, para los posteriores análisis se deben descartar los resultados provenientes de los ensayos 7,12,17 y 23.

En la validación, no se analizaron las pendientes de *Stripping* ni el punto de *Stripping* debido a que casi ninguna muestra presenta un incremento en la velocidad de deformación que haga pensar que existen zonas de *Stripping*.

6.3 Análisis Estadístico

A partir de los resultados válidos y con la ayuda de técnicas estadísticas, se pretende determinar cuál de las 10 mezclas en estudio es la más adecuada para su uso como recapado y cuál de los factores de diseño tiene mayor influencia en la resistencia al ahuellamiento.

En la exploración se utilizará la estadística descriptiva para analizar los resultados y plantear las hipótesis respecto a las igualdades y diferencias que se puedan observar entre los sujetos de prueba. Posteriormente se utilizarán técnicas de la estadística inferencial para determinar si esas hipótesis son realmente significativas. Para la realización de los cálculos estadísticos se utilizó el software "IBM SPSS Statistics" en su versión 23.0.

El estudio estadístico se focaliza en las mediciones del ahuellamiento a las 10.000 pasadas, 20.000 pasadas y pendiente de *creep*, no considerándose las pendientes de *stripping* ni el punto de *stripping* conforme a lo señalado anteriormente.

A continuación, se presentan algunos valores de la estadística descriptiva aplicada a los resultados del ensayo agrupados en 10 grupos. También se presenta un diagrama de cajas y bigotes que sirven para representar gráficamente la diferencia entre los promedios y la dispersión existente entre los grupos.

Tabla 6-24: Estadística descriptiva Ahuellamiento a las 10.000 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

Grupo	Mezcla	N	Media	Desviación estándar	Error estándar	95% del intervalo de confianza para la media		Mínimo	Máximo
						Límite Superior	Límite Inferior		
1	IV-A-12-Tradicional-E1	3	-9,85	1,35	0,78	-13,20	-6,50	-11,32	-8,66
2	IV-A-12-Tradicional-E2	3	-8,78	1,02	0,59	-11,31	-6,26	-9,54	-7,63
3	IV-A-12-Modificado-E1	2	-4,01	0,35	0,25	-7,15	-0,87	-4,26	-3,76
4	IV-A-12-Modificado-E2	2	-4,65	0,38	0,27	-8,04	-1,26	-4,92	-4,38
5	M10-Modificado-E1	3	-4,76	0,35	0,20	-5,63	-3,90	-4,98	-4,36
6	M10-Modificado-E2	2	-4,50	0,77	0,54	-11,41	2,41	-5,04	-3,95
7	SMA-Modificado-E1	3	-2,45	0,13	0,08	-2,79	-2,12	-2,61	-2,36
8	SMA-Modificado-E2	2	-2,79	0,52	0,37	-7,47	1,89	-3,16	-2,42
9	USM-Modificado-E1	3	-2,50	0,29	0,17	-3,21	-1,78	-2,77	-2,20
10	USM-Modificado-E2	3	-2,75	0,11	0,06	-3,01	-2,49	-2,84	-2,64
Total		26	-4,82	2,73	0,53	-5,92	-3,71	-11,32	-2,20

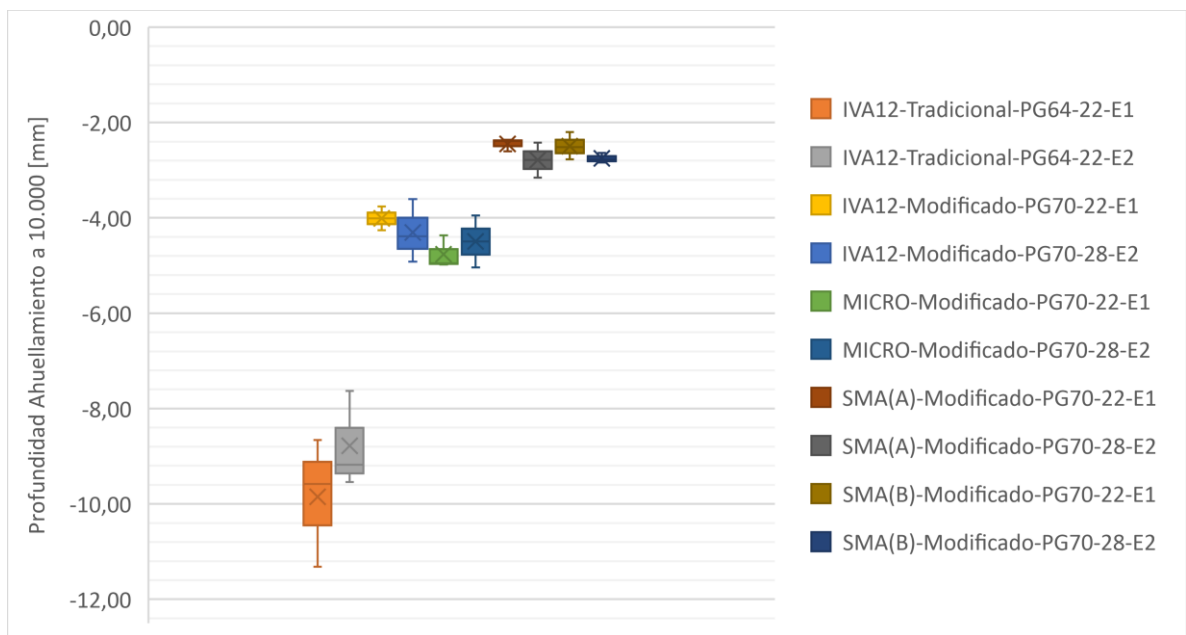


Figura 6-1: Diagrama de Caja y Bigote ahuellamiento a las 10.000 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 6-25: Estadística descriptiva Ahuellamiento a las 20.000 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

Grupo	Mezcla	N	Media	Desviación estándar	Error estándar	95% del intervalo de confianza para la media		Mínimo	Máximo
						Límite Superior	Límite Inferior		
3	IV-A-12-Modificado-E1	2	-5,16	0,01	0,01	-5,28	-5,04	-5,17	-5,15
4	IV-A-12-Modificado-E2	2	-5,51	0,49	0,34	-9,87	-1,14	-5,85	-5,16
5	M10-Modificado-E1	3	-5,80	0,50	0,29	-7,04	-4,56	-6,38	-5,47
6	M10-Modificado-E2	2	-5,80	0,56	0,39	-10,80	-0,80	-6,19	-5,40
7	SMA-Modificado-E1	3	-2,75	0,10	0,06	-2,99	-2,50	-2,85	-2,65
8	SMA-Modificado-E2	2	-3,22	0,60	0,42	-8,59	2,14	-3,64	-2,80
9	USM-Modificado-E1	3	-2,78	0,41	0,24	-3,80	-1,75	-3,18	-2,36
10	USM-Modificado-E2	3	-3,03	0,10	0,06	-3,27	-2,78	-3,14	-2,96
Total		20	-4,12	1,42	0,32	-4,78	-3,46	-6,38	-2,36

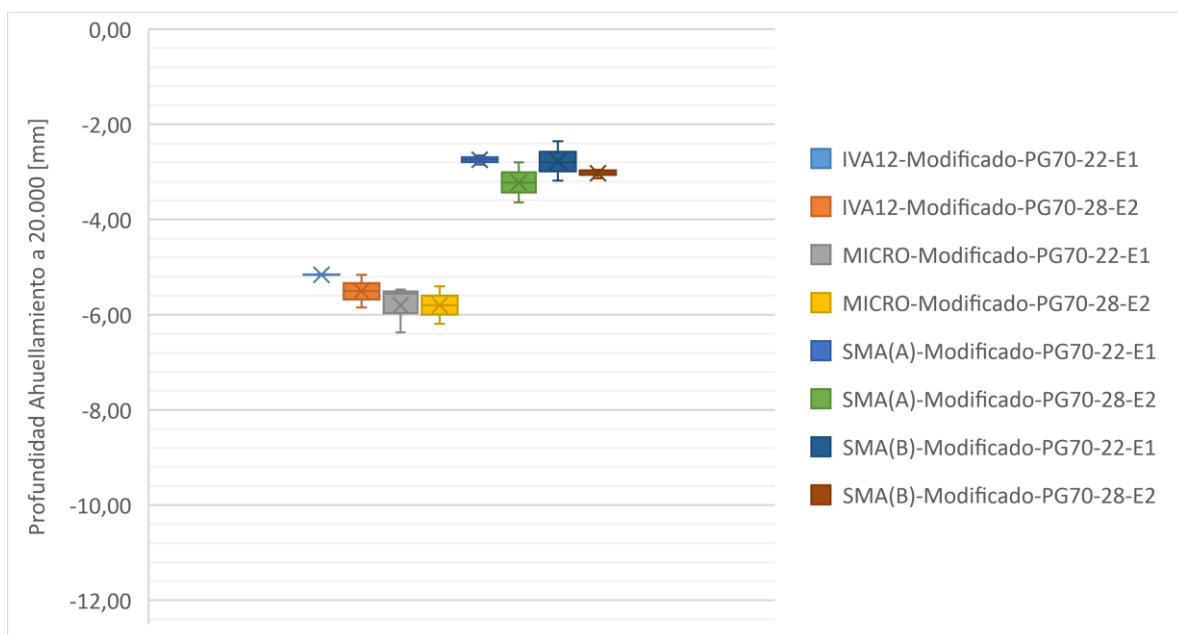


Figura 6-2: Diagrama de Caja y Bigote ahuellamiento a las 20.000 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 6-26: Estadística descriptiva del Creep Slope. *Fuente: Elaboración propia.*

	Mezcla	N	Media	Desviación estándar	Error estándar	95% del intervalo de confianza para la media		Mínimo	Máximo
						Límite Superior	Límite Inferior		
1	IV-A-12-Tradicional-E1	3	1806	362	209	906	2705	1435	2159
2	IV-A-12-Tradicional-E2	3	2393	345	199	1537	3250	2045	2735
3	IV-A-12-Modificado-E1	2	8381	1897	1341	-8663	25426	7040	9723
4	IV-A-12-Modificado-E2	2	8038	1137	804	-2175	18250	7234	8841
5	M10-Modificado-E1	3	6197	372	215	5273	7122	5839	6582
6	M10-Modificado-E2	2	5513	516	365	874	10151	5147	5878
7	SMA-Modificado-E1	3	17383	1976	1141	12476	22291	15329	19269
8	SMA-Modificado-E2	2	13621	2424	1714	-8161	35402	11906	15335
9	USM-Modificado-E1	3	21110	7412	4279	2698	39522	15356	29474
10	USM-Modificado-E2	3	18689	3094	1787	11003	26376	15185	21044
Total		26	10532	7482	1467	7510	13554	1435	29474

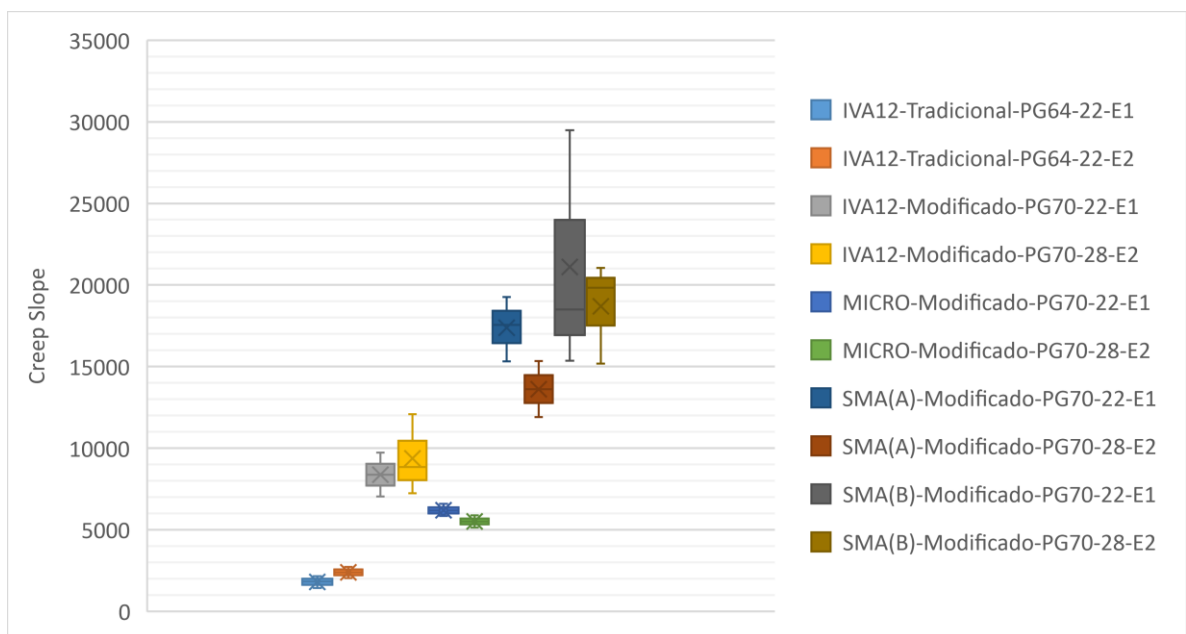


Figura 6-3: Diagrama de Caja y Bigote Creep Slope . *Fuente: Elaboración propia.*

De la observación de los resultados podemos plantear las siguientes hipótesis.

1. Si se comparan los ahuellamientos de las probetas fabricadas con el asfalto del proveedor 1 (E1) y del proveedor 2 (E2), no se logra apreciar una incidencia del proveedor de asfalto en el desempeño de las probetas.
2. Al comparar las medias de las deformaciones entre los distintos grupos para ambas mediciones, se puede observar que los resultados pareciesen agruparse en 3 zonas: una primera zona de bajo desempeño asociada a las mezclas asfálticas fabricadas con asfaltos tradicionales, una segunda zona de desempeño medio en donde se encuentran las mezclas Semidensa IV-A-12 y Microaglomerado M10 elaboradas con asfaltos modificados, y finalmente una zona de alto desempeño donde se encuentran las mezclas SMA.
3. Si comparamos las medias de las deformaciones de las mezclas IV-A-12 elaboradas con asfalto modificado y con asfalto tradicional, se puede afirmar que las modificaciones de los asfaltos tienen gran influencia en el desempeño de las mezclas.
4. Comparando los resultados de las mezclas elaboradas con asfaltos modificados se puede observar que el uso de granulometrías SMA incrementa considerablemente la resistencia al ahuellamiento y que el uso de los microaglomerados en caliente no genera un efecto significativo respecto a la Mezcla IV-A-12.
5. Las explicaciones de estas diferencias podrían estar dadas por los vacíos de la mezcla, si se observa los vacíos de las mezclas SMA de un 5,5 % en comparación con el 10 % de los microaglomerados, es válido pensar que el mayor espacio disponible entre las partículas del Microaglomerado favorece la postcompactación. Proceso que se disminuiría en las mezclas SMA dado que el mastico que llena el espacio entre las partículas impediría los movimientos de las partículas mayores.
6. Por otro lado, si se compara el Microaglomerado y con la mezcla de IV-A-12(B) se puede ver resultados son similares a pesar de que el Microaglomerado fue ensayado con 3% más de vacíos que la mezcla Semidensa, esto puede indicar que el ahuellamiento fue controlado por la mayor trabazón mecánica que se genera en la granulometría discontinua del Microaglomerado.

7. Cabe destacar que todas las mezclas cumplen con el límite de ahuellamiento sugeridos por el TxDOT de 12,5 mm antes de las 10.000 o 20.000 pasadas de acuerdo al tipo de ligante utilizado y que sólo las mezclas SMA cumplen con las deformaciones máximas admisibles para mezclas de alto desempeño exigidas por la normativa alemana de 4.0 [mm].

Para validar estadísticamente las observaciones antes mencionadas, se realizarán algunas pruebas de inferencia para analizar la significancia de las variaciones entre los grupos de mezcla.

La primera hipótesis que intentaremos demostrar corresponde a la observación número 1, en la que se propone que el proveedor de asfalto con el que fueron construidas las probetas no tiene efecto sobre los resultados del ensayo. En el caso que esta hipótesis se compruebe podremos reagrupar los datos sin hacer distinción por el proveedor de asfalto, lo que permitirá facilitar y robustecer el análisis de las demás hipótesis.

Para realizar la estadística de inferencia, se supondrá que el *Creep Slope*, la deformación a las 10.000 y a las 20.000 pasadas son variables aleatorias con distribución normal.

También es necesario reafirmar la independencia de los resultados indicando que todos los valores utilizados provienen de ensayos efectuados con probetas distintas ensayadas en fechas diferentes.

Para saber qué tipos de pruebas estadísticas se tienen que utilizar para la comparación de medias, se realizara la prueba de homocedasticidad u homogeneidad de varianza llamada prueba de Levene.

La prueba estadística de Levene plantea como hipótesis nula que las varianzas de todos los grupos son iguales y por consiguiente propone como hipótesis alternativa que no todos los grupos tienen varianzas iguales.

$$H_0: \sigma_1 = \sigma_2 = \dots = \sigma_{10}$$

$$H_1: \text{al menos una de las varianzas es diferente}$$

Aplicando la prueba de Levene para las deformaciones a las 10.000, 20.000 pasadas y al *creep slope* para los 10 tipos de mezclas se obtienen los siguientes valores estadísticos:

Tabla 6-27: Estadístico de Levene para el Ahuellamiento a las 10.000 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

Estadístico de Levene	gl1	gl2	P-Valor
3,50	9	16	,014

Tabla 6-28: Estadístico de Levene para el Ahuellamiento a las 20.000 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

Estadístico de Levene	gl1	gl2	P-Valor
4,80	7	12	,009

Tabla 6-26: Estadístico de Levene para Creep Slope. *Fuente: Elaboración*

Estadístico de Levene	gl1	gl2	P-Valor
5,698	9	16	,001

Considerando un nivel de confiabilidad del 95%, se deben rechazar las hipótesis nulas para ambas mediciones, es decir, que las varianzas de las deformaciones de los grupos no son iguales por lo que el análisis de medias se deberá realizar mediante métodos no paramétricos.

Debido a que no se cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas no es recomendable la utilización del test de comparación de medias ANOVA; sin embargo, en su remplazo es posible aplicar los test robustos de igualdad de media Welch o Brown-Forsythe, cuyas significancias asociadas se interpretan de igual manera que en el test ANOVA.

Al igual que en la prueba ANOVA, los test robustos de igualdad de medias tienen como hipótesis nula la igualdad de las medias y como hipótesis alternativa que al menos alguno de los grupos, tiene una media diferente al resto.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_n$$

H1: al menos una de las medias es distinta a las demas

Los resultados de la aplicación de los test robustos de igualdad de medias a ambas mediciones simultáneamente son los siguientes:

Tabla 6-29: Prueba robusta de igualdad de medias para el Ahuellamiento a las 10.000 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

	Estadístico ^a	gl1	gl2	P-Valor.
Welch	21,48	9	5,41	,001
Brown-Forsythe	47,39	9	6,72	,000

Tabla 6-30: Prueba robusta de igualdad de medias para el Ahuellamiento a las 20.000 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

	Estadístico ^a	gl1	gl2	P-Valor
Welch	228,20	7	4,246	,000
Brown-Forsythe	30,65	7	5,435	,001

Tabla 6-31: Prueba robusta de igualdad de medias para Creep Slope. *Fuente: Elaboración propia.*

	Estadístico ^a	gl1	gl2	P-Valor
Welch	32,999	9	5,490	,000
Brown-Forsythe	17,605	9	3,992	,007

Los P-valores asociado a los estadísticos de Welch y Brown-Forsythe indican que con una confiabilidad del 95% se puede afirmar que en cada medición al menos algún grupo de mezcla tiene una media diferente a las demás.

Una vez verificada la diferencia entre las medias con la prueba de varianza múltiple, se hace de interés realizar una comparación en pares de grupos para verificar el efecto que tiene el proveedor de asfalto en la desigualdad.

Debido a que los resultados no cumplen con la homogeneidad de varianza, se utiliza la prueba (Post Hoc) no paramétrica de Games-Howell, en donde la aceptación de sus hipótesis nulas implicará que el par de grupos analizado tiene medias iguales y su rechazo implicará que las medias son distintas.

$$H_0: \mu_i = \mu_j$$

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j$$

Los resultados de la aplicación de la prueba son los siguientes:

Tabla 6-32: Prueba Games-Howell de igualdad de medias para el Ahuellamiento a las 10.00 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

Grupos		Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	P-Valor	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
1	2	-1,07	0,98	0,96	-6,71	4,57
3	4	0,64	0,36	0,74	-2,98	4,26
5	6	-0,27	0,58	1,00	-11,77	11,23
7	8	0,34	0,38	0,97	-10,22	10,89
9	10	0,26	0,18	0,86	-1,12	1,63

Tabla 6-33: Prueba Games-Howell de igualdad de medias para el Ahuellamiento a las 20.000 pasadas.
Fuente: *Elaboración propia.*

Grupos		Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	P-Valor	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
3	4	0,35	0,34	0,92	-10,65	11,34
5	6	0,00	0,49	1,00	-4,34	4,33
7	8	0,48	0,43	0,89	-11,97	12,93
9	10	0,25	0,25	0,94	-1,76	2,25

Tabla 6-34: Prueba Games-Howell de igualdad de medias para el Creep Slope Fuente: *Elaboración propia.*

Grupos		Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	P-Valor	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
1,0	2,0	587,82	288,70	0,62	-1011,94	2187,58
3,0	4,0	-343,78	1563,81	1,00	-20596,07	19908,51
5,0	6,0	-684,63	423,62	0,79	-5826,16	4456,90
7,0	8,0	-3762,87	2059,05	0,72	-25518,99	17993,25
9,0	10,0	-2420,96	4637,20	1,00	-36471,91	31630,00

Todas las pruebas de contraste indican P-Valores mayores a 0,05, lo que implica la aceptación de la hipótesis nula que equivale a decir que las medias de la deformación son iguales para mezclas similares fabricadas con asfaltos de distinto proveedor. De esta manera, se puede concluir que la observación N°1 planteada anteriormente es cierta.

Dado que el proveedor de asfalto no es de influencia en los resultados, para facilitar los posteriores análisis es conveniente reagrupar los ensayos, ahora, sin diferenciar las mezclas por el proveedor de asfalto.

Al reagrupar los resultados se deberá volver a revisar la validación de los ensayos ya que los límites de aceptación son función de: la media de los grupos y la cantidad de ensayos por grupo; factores que cambiarán con la reagrupación.

La siguiente tabla muestra las nuevas agrupaciones para las mezclas.

Tabla 6-35: Reagrupación de Datos. Fuente: Elaboración propia.

Ensayos	Mezcla	1° Agrupación	2° Agrupación	Ensayos	Mezcla	1° Agrupación	2° Agrupación
1	IV-A-12-Trad-E1	1	A	19	SMA-Mod-E1	7	D
2				20			
3				21			
4	IV-A-12-Trad-E1	2	A	22	SMA-Mod-E2	8	D
5				23			
6				24			
7	IV-A-12-Mod-E1	3	B	25	USM-Mod-E1	9	E
8				26			
9				27			
10	IV-A-12-Mod-E2	4	B	28	USM-Mod-E2	10	E
11				29			
12				30			
13	M10-Mod-E1	5	C				
14							
15							
16	M10-Mod-E2	6	C				
17							
18							

A continuación, se presentan los resultados de la nueva validación de los ensayos.

Tabla 6-36: Validación de mezclas asfálticas IV-A-12 Tradicional. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 10.000 pasadas. Fuente: Elaboración propia.

N° Ensayo	1	2	3	4	5	6
Deformación 10.000 Pasadas [mm]	-11,32	-9,58	-8,66	-9,18	-7,63	-9,54
Promedio [mm]	-8,92					
Estadístico 1s%	5%					
N	5					
Multiplicador	3,9					
Límite Inferior [mm]	-7,18					
Límite Superior [mm]	-10,66					
Validación	Rechazado	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado

Tabla 6-37: Validación de mezclas asfálticas IV-A-12 Modificado. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 10.000 pasadas. Fuente: Elaboración propia.

N° Ensayo	7	8	9	10	11	12
Deformación 10.000 Pasadas [mm]	-5,41	-4,26	-3,76	-4,92	-4,38	-3,61
Promedio [mm]	-4,19					
Estadístico 1s%	5%					
N	5					
Multiplicador	3,9					
Límite Inferior [mm]	-3,37					
Límite Superior [mm]	-5,00					
Validación	Rechazado	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado

Tabla 6-38: Validación de mezclas asfálticas M10- Modificado. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 10.000 pasadas. Fuente: *Elaboración propia*.

Nº Ensayo	13	14	15	16	17	18
Deformación 10.000 Pasadas [mm]	-4,95	-4,36	-4,98	-3,95	-5,87	-5,04
Promedio [mm]	-4,66					
Estadístico 1s%	5%					
N	5					
Multiplicador	3,9					
Límite Inferior [mm]	-3,75					
Límite Superior [mm]	-5,57					
Validación	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Rechazado	Aceptado

Tabla 6-39: Validación de mezclas asfálticas M10- Modificado. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 20.000 pasadas. Fuente: *Elaboración propia*.

Nº Ensayo	13	14	15	16	17	18
Deformación 20.000 Pasadas [mm]	-5,56	-5,47	-6,38	-5,40	-7,70	-6,19
Promedio [mm]	-5,80					
Estadístico 1s%	5%					
N	5					
Multiplicador	3,9					
Límite Inferior [mm]	-4,67					
Límite Superior [mm]	-6,93					
Validación	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Rechazado	Aceptado

Tabla 6-40: Validación de mezclas asfálticas SMA- Modificado. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 10.000 pasadas. Fuente: *Elaboración propia*.

Nº Ensayo	19	20	21	22	23	24
Deformación 10.000 Pasadas [mm]	-2,61	-2,39	-2,36	-3,16	-1,06	-2,42
Promedio [mm]	-2,44					
Estadístico 1s%	5%					
N	4					
Multiplicador	3,6					
Límite Inferior [mm]	-2,00					
Límite Superior [mm]	-2,88					
Validación	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Rechazado	Rechazado	Aceptado

Tabla 6-41: Validación de mezclas asfálticas SMA- Modificado. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 20.000 pasadas. Fuente: *Elaboración propia*.

Nº Ensayo	19	20	21	22	23	24
Deformación 20.000 Pasadas [mm]	-2,85	-2,74	-2,65	-3,64	-1,26	-2,80
Promedio [mm]	-2,76					
Estadístico 1s%	5%					
N	4					
Multiplicador	3,6					
Límite Inferior [mm]	-2,26					
Límite Superior [mm]	-3,26					
Validación	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Rechazado	Rechazado	Aceptado

Tabla 6-42: Validación de mezclas asfálticas USM- Modificado. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 10.000 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

Nº Ensayo	25	26	27	28	29	30
Deformación 10.000 Pasadas [mm]	-2,77	-2,20	-2,52	-2,84	-2,64	-2,78
Promedio [mm]	-2,63					
Estadístico 1s%	5%					
N	6					
Multiplicador	4,0					
Límite Inferior [mm]	-2,10					
Límite Superior [mm]	-3,15					
Validación	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado

Tabla 6-43: Validación de mezclas asfálticas USM- Modificado. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 20.000 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

Nº Ensayo	25	26	27	28	29	30
Deformación 20.000 Pasadas [mm]	-3,18	-2,36	-2,80	-3,14	-2,96	-2,98
Promedio [mm]	-2,90					
Estadístico 1s%	5%					
N	6					
Multiplicador	4,0					
Límite Inferior [mm]	-2,32					
Límite Superior [mm]	-3,48					
Validación	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado

Tabla 6-44: Validación de mezclas asfálticas USM- Modificado. Rango aceptable de deformación máximas antes de las 20.000 pasadas. Fuente: *Elaboración propia*.

Numero de Ensayo	Grupo	Mezcla	Asfalto	Proveedor	Deformación 10.000 Pasadas	Deformación 20.000 Pasadas
1	A	IV-A-12	Tradicional	E1	Rechazada	-
2					Aceptada	-
3					Aceptada	-
4				E2	Aceptada	
5					Aceptada	
6					Aceptada	
7	B	IV-A-12	Modificad	E1	Rechazada	Rechazada
8					Aceptada	Aceptada
9					Aceptada	Aceptada
10				E2	Aceptada	Aceptada
11					Aceptada	Aceptada
12					Aceptada	Rechazada
13	C	M10		E1	Aceptada	Aceptada
14					Aceptada	Aceptada
15					Aceptada	Aceptada
16				E2	Aceptada	Aceptada
17					Rechazada	Rechazada
18					Aceptada	Aceptada
19	D	SMA		E1	Aceptada	Aceptada
20					Aceptada	Aceptada
21					Aceptada	Aceptada
22				E2	Rechazada	Rechazada
23					Rechazada	Rechazada
24					Aceptada	Aceptada
25	E	USM		E1	Aceptada	Aceptada
26					Aceptada	Aceptada
27					Aceptada	Aceptada
28				E2	Aceptada	Aceptada
29					Aceptada	Aceptada
30					Aceptada	Aceptada

Dada la nueva agrupación de los datos, se deberán descartar los resultados provenientes de los ensayos 1, 7, 12, 17, 22 y 23, donde los ensayos 1 y 22 no fueron descartados anteriormente.

Con la nueva agrupación de resultados y la nueva validación de los mismos, se vuelve a calcular la estadística asociada a los resultados, obteniéndose la siguiente tabla resumen.

Tabla 6-45: Estadística descriptiva Ahuellamiento a las 10.000 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

Grupo	Mezcla	N	Media	Desviación estándar	Error estándar	95% del intervalo de confianza para la media		Mínimo	Máximo
						Límite Superior	Límite Inferior		
A	IV-A-12-Tradicional	5	-8,92	0,81	0,36	-9,92	-7,91	-9,58	-7,63
B	IV-A-12-Modificado	4	-4,33	0,47	0,24	-5,09	-3,58	-4,92	-3,76
C	M10-Modificado	5	-4,66	0,48	0,21	-5,25	-4,06	-5,04	-3,95
D	SMA-Modificado	4	-2,44	0,11	0,06	-2,62	-2,27	-2,61	-2,36
E	USM-Modificado	6	-2,63	0,24	0,10	-2,88	-2,37	-2,84	-2,20
Total		24	-4,61	2,47	0,50	-5,66	-3,57	-9,58	-2,20

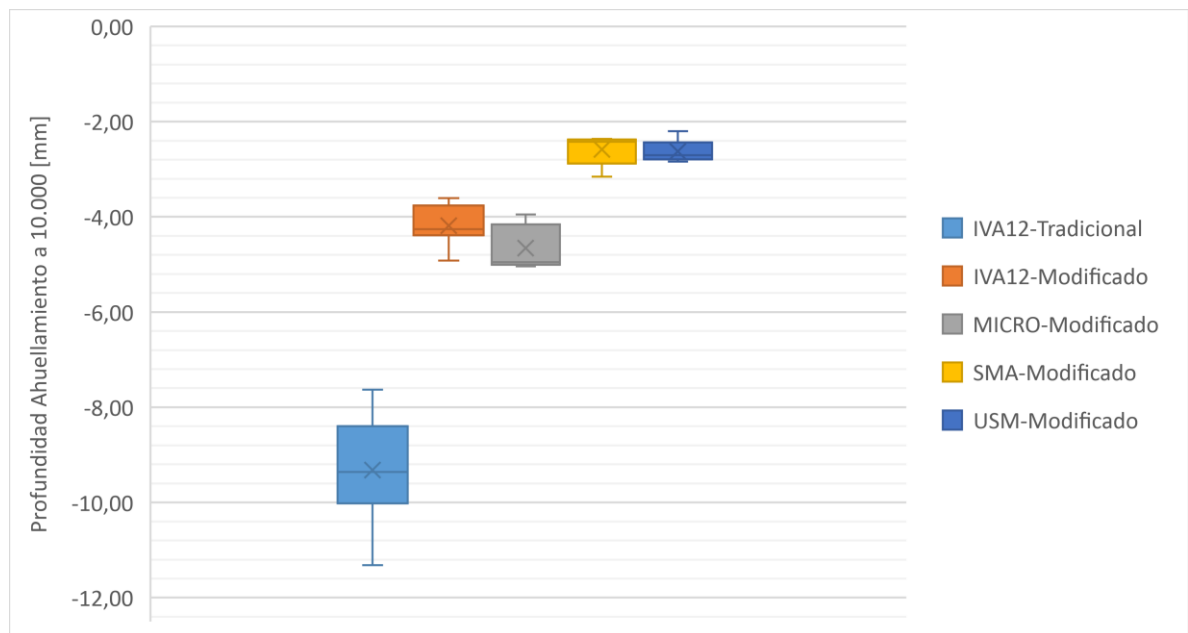


Figura 6-4: Diagrama de Caja y Bigote ahuellamiento a las 10.000 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 6-46: Estadística descriptiva Ahuellamiento a las 20.000 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

Grupo	Mezcla	N	Media	Desviación estándar	Error estándar	95% del intervalo de confianza para la media		Mínimo	Máximo
						Límite Superior	Límite Inferior		
B	IV-A-12-Modificado	4	-5,33	0,34	0,17	-5,88	-4,78	-5,85	-5,15
C	M10-Modificado	5	-5,80	0,45	0,20	-6,36	-5,24	-6,38	-5,40
D	SMA-Modificado	4	-2,76	0,09	0,04	-2,90	-2,62	-2,85	-2,65
E	USM-Modificado	6	-2,90	0,30	0,12	-3,22	-2,59	-3,18	-2,36
Total		19	-4,15	1,45	0,33	-4,85	-3,45	-6,38	-2,36

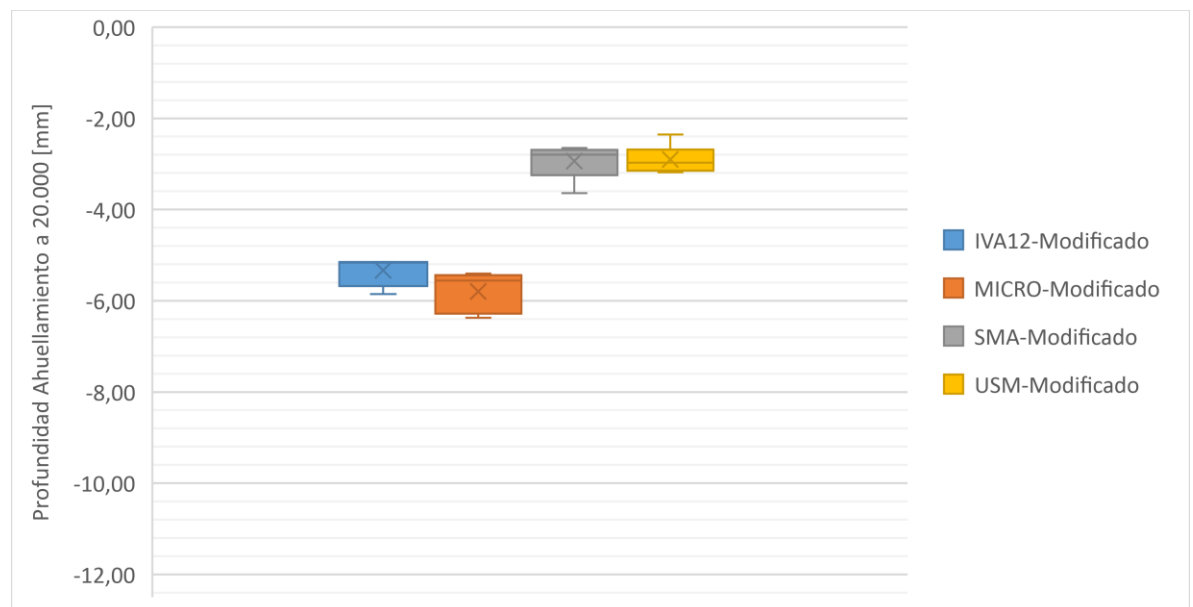


Figura 6-5: Diagrama de Caja y Bigote ahuellamiento a las 20.000 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 6-47: Estadística descriptiva Creep Slope. *Fuente: Elaboración propia.*

	Mezcla	N	Media	Desviación estándar	Error estándar	95% del intervalo de confianza para la media		Mínimo	Máximo
						Límite Superior	Límite Inferior		
A	IV-A-12-Tradisional	5	2232	350	156	1798	2666	1823	2735
B	IV-A-12-Modificado	4	8210	1292	646	6153	10266	7040	9723
C	M10-Modificado	5	5923	526	235	5270	6576	5147	6582
D	SMA-Modificado	4	16871	1911	955	13831	19912	15329	19269
E	USM-Modificado	6	19900	5250	2143	14390	25409	15185	29474
	Total	24	10854	7554	1542	7665	14044	1823	29474

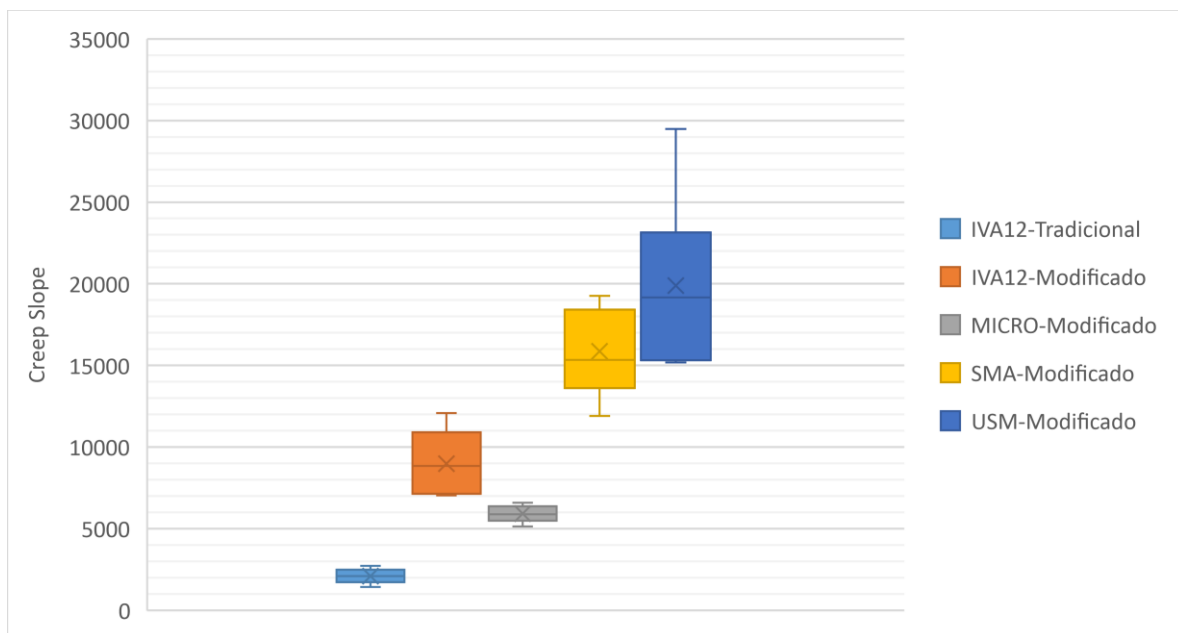


Figura 6-6: Diagrama de Caja y Bigote Creep pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

Tras la revisión de la estadística descriptiva asociada a la reagrupación de los resultados, se puede afirmar que las observaciones realizadas anteriormente siguen teniendo validez, por lo que se continuará con la revisión estadística de las mismas.

Como ya se dijo con anterioridad, para saber que pruebas de inferencia se deben utilizar es necesario revisar la homogeneidad de las varianzas, lo que se realizará, para las tres mediciones mediante la prueba de Levene, cuyos resultados se presentan a continuación.

Tabla 6-48: Estadístico de Levene para el Ahuellamiento a las 10.000 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

Estadístico de Levene	gl1	gl2	P-Value.
3,289	4	19	,033

Tabla 6-49: Estadístico de Levene para el Ahuellamiento a las 20.000 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

Estadístico de Levene	gl1	gl2	P-Value.
3,602	3	15	,039

Tabla 6-26: Estadístico de Levene para Creep Slope. *Fuente: Elaboración propia.*

Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
3,023	4	19	,044

Dados que para las tres mediciones los P-Valores son menores que el 0,05, el análisis de varianza se deberá realizar mediante los métodos no paramétricos de Welch y Brown-Frosythe.

Los resultados de la aplicación de los métodos de comparación de medias no paramétricos son los siguientes:

Tabla 6-50: Prueba robusta de igualdad de medias para el Ahuellamiento a las 10.000 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

	Estadístico ^a	gl1	gl2	P-Value
Welch	90,213	4	8,561	,000
Brown-Forsythe	143,757	4	10,091	,000

Tabla 6-51: Prueba robusta de igualdad de medias para el Ahuellamiento a las 20.000 pasadas. *Fuente: Elaboración propia.*

	Estadístico ^a	gl1	gl2	P-Value.
Welch	114,594	3	7,083	,000
Brown-Forsythe	116,752	3	10,412	,000

Tabla 6-52: Prueba robusta de igualdad de medias para el Creep Slope. *Fuente: Elaboración propia.*

	Estadístico ^a	gl1	gl2	Sig.
Welch	94,701	4	8,117	,000
Brown-Forsythe	45,511	4	7,244	,000

Las pruebas robustas indican P- Valores mayores a las significancias del 0,5% lo que implica que al menos una media es distinta en cada grupo de mediciones, dado esto, solo queda verificar que las hipótesis que se desprenden de las observaciones de la estadística descriptivas sean ciertas.

Para verificar las hipótesis se realizará un análisis Post- Hoc mediante el estadístico de Games-Howell, en donde se analizarán las significancias de los resultados para verificar las diferencias entre los distintos tipos de mezclas propuestas por este estudio.

Los resultados del test de Games-Howell se presentan a continuación:

Tabla 6-53: Prueba Games-Howell de igualdad de medias para el Ahuellamiento a las 10.000 pasadas.
Fuente: Elaboración propia.

Comparaciones		Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	P-Value.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite Superior	Límite Inferior
A	B	-4,59	0,43	0,00	-6,17	-3,01
A	C	-4,26	0,42	0,00	-5,80	-2,72
A	D	-6,47	0,37	0,00	-8,07	-4,88
A	E	-6,29	0,38	0,00	-7,86	-4,73
B	C	0,33	0,32	0,84	-0,84	1,49
B	D	-1,89	0,24	0,01	-3,09	-0,68
B	E	-1,71	0,26	0,01	-2,84	-0,57
C	D	-2,21	0,22	0,00	-3,14	-1,29
C	E	-2,03	0,24	0,00	-2,93	-1,13
D	E	0,18	0,11	0,53	-0,21	0,58

Tabla 6-54: Prueba Games-Howell de igualdad de medias para el Ahuellamiento a las 20.000 pasadas.
Fuente: Elaboración propia.

Comparaciones		Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	P-Value.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite Superior	Límite Inferior
B	C	0,47	0,26	0,36	-0,41	1,34
B	D	-2,57	0,18	0,00	-3,37	-1,78
B	E	-2,43	0,21	0,00	-3,17	-1,69
C	D	-3,04	0,21	0,00	-3,84	-2,24
C	E	-2,90	0,24	0,00	-3,68	-2,11
D	E	0,14	0,13	0,70	-0,30	0,59

Tabla 6-55: Prueba Games-Howell de igualdad de medias para el Creep Slope. *Fuente: Elaboración propia.*

Comparaciones		Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	P-Value.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite Superior	Límite Inferior
A	B	-5977	665	0,01	-9248	-2706
A	C	-3691	282	0,00	-4703	-2679
A	D	-14639	968	0,00	-19590	-9688
A	E	-17667	2149	0,00	-26251	-9083
B	C	2286	688	0,13	-857	5429
B	D	-8662	1153	0,00	-13194	-4130
B	E	-11690	2239	0,01	-20150	-3231
C	D	-10948	984	0,00	-15778	-6118
C	E	-13977	2156	0,01	-22544	-5409
D	E	-3029	2347	0,71	-11516	5459

Con los siguientes resultados se puede confirmar que todas las observaciones derivadas de la estadística descriptiva son ciertas. En primer lugar, se puede observar que los P-Valores asociados a las comparaciones de las mezclas A con todas las demás mezclas, son todos cercanos a cero, por lo que se rechaza la hipótesis nula de igualdad de medias y se acepta que la media del ahuellamiento máximo antes de las 10.000 pasadas para mezclas construidas con asfaltos tradicionales es significativamente mayor a las deformaciones obtenidas en los demás tipos de mezclas (ver tabla siguiente).

Tabla 6-56: Prueba Games-Howell de igualdad de medias entre el grupo A y los demás Grupos. *Fuente: Elaboración propia.*

Comparaciones		Diferencia de medias (I-J)	P-Value
A	B	-4,59	0,00
A	C	-4,26	0,00
A	D	-6,47	0,00
A	E	-6,29	0,00

El P-valor mayor que 0,05 calculado para las comparaciones de las medias del grupo B y C tanto para la medición de deformaciones a las 10.000, 20.000 pasadas como para el *Creep Slope*, indican que los ahuellamientos obtenidos para las mezclas IV-A-12 fabricadas con asfaltos modificados y las mezclas M10 son estadísticamente iguales (ver tabla siguiente).

Tabla 6-57: Prueba Games-Howell de igualdad de medias para los grupo B y C. *Fuente: Elaboración propia.*

Comparaciones		Medición	Diferencia de medias (I-J)	P-Value.
B	C	10.000 Pasadas	0,33	0,84
B	C	20.000 Pasadas	0,47	0,36
B	C	Creep Slope	2286	0,13

Los P-valores mayores que 0,05 calculados a partir de las comparaciones de las medias del grupo D y E para la medición de deformaciones a las 10.000, 20.000 pasadas y *Creep Slope*, indica que los ahuellamiento obtenidos para las mezclas SMA y (B) son iguales. Por consiguiente, los cambios en las curvas granulométricas de ambas mezclas no alteran significativamente el desempeño de las probetas en el ensayo de rueda de carga de Hamburgo.

Tabla 6-58: Prueba Games-Howell de igualdad de medias para los grupo D y E. *Fuente: Elaboración propia.*

Comparaciones		Medición	Diferencia de medias (I-J)	P-Value.
D	E	10.000 Pasadas	0,18	0,53
D	E	20.000 Pasadas	0,14	0,70
D	E	Creep Slope	-3029	0,71

Por último, se puede observar que los P-Valores asociados a las comparaciones de las mezclas B, C, D y E, son todas cercanas a cero, por lo que se rechaza la hipótesis nula aceptando que la media del ahuellamiento para todas las mediciones es estadísticamente distinta.

Tabla 6-59: Prueba Games-Howell de igualdad de medias para los grupo B,C,D E. *Fuente: Elaboración propia.*

Comparaciones		Medición	Diferencia de medias (I-J)	P-Value.
B	D	10.000 Pasadas	-1,89	0,01
B	E	10.000 Pasadas	-1,71	0,01
C	D	10.000 Pasadas	-2,21	0,00
C	E	10.000 Pasadas	-2,03	0,00
B	D	20.000 Pasadas	-2,57	0,00
B	E	20.000 Pasadas	-2,43	0,00
C	D	20.000 Pasadas	-3,04	0,00
C	E	20.000 Pasadas	-2,90	0,00
B	D	Creep Slope	-8662	0,00
B	E	Creep Slope	-11690	0,01
C	D	Creep Slope	-10948	0,00
C	E	Creep Slope	-13977	0,01

7 Conclusiones

7.1 Conclusiones Generales

Las revisiones bibliográficas de esta investigación indican que el Ensayo de rueda de carga de Hamburgo es un procedimiento efectivo para reconocer mezclas susceptibles a presentar ahuellamientos prematuros.

El ensayo se utiliza ampliamente países como Alemania y Estados Unidos.

La normativa AASHTO T324-11 es una normativa que se encuentra aún en desarrollo, debido a lo cual tiene algunos puntos indefinidos respecto a la fabricación de la probeta, la repetitividad del ensayo y los procedimientos de cálculo de los indicadores derivados del ensayo.

Respecto a la fabricación, se requiere de una investigación que determine si es mejor la utilización de probetas construidas a partir de dos cilindros individualmente compactados tal como se propone en esta investigación o si, por el contrario, es más adecuado el uso de probetas construidas a partir de un solo cilindro cortado por la mitad como proponen algunos especialistas.

Resulta indispensable para la homologación de los estudios de las distintas agencias investigadoras chilenas algún estudio que determine los parámetros para la repetitividad del ensayo. La precisión que se propone en este estudio de un $1s\%=5\%$ puede utilizarse como punto de partida, pero, según la bibliografía técnica, este límite podría resultar demasiado restrictivo para su uso en construcción.

En cuanto a los procedimientos de cálculo, ni la normativa ni los ensayos revisados detallan cómo se debe realizarse la elección o el cálculo de la curva característica del material (medidor más desfavorable, medidor central, promedio de los medidores centrales u otra). El criterio utilizado en esta investigación es el más conservador, pero pudiese presentar algún problema de validez cuando la curva elegida sea muy cercana al borde del molde.

También es necesario un acuerdo sobre cómo se debe ajustar el modelo bilineal a los datos medidos por el equipo, pues no existe especificación al respecto y las variaciones en la

metodología impedirán comparaciones de estudios entre los distintos laboratorios y centros de investigación.

En este caso, se propone ajustar las rectas mediante un modelo de mínimos cuadrados aplicados sobre una recta bilineal o trilineal si se desea considerar la zona de post compactación. Debido a la complejidad del modelo matemático que este problema supone, este estudio realizó el procedimiento mediante un modelo de optimización básico implementado en hojas de cálculo y no de una forma analítica, ya que esto implicaría herramientas de matemáticas discretas, lo que queda fuera del alcance de esta investigación. En cualquier caso, las ecuaciones básicas para la realización del modelo están contenidas en los procedimientos presentados en capítulos anteriores.

A la fecha de entrega de esta memoria se encuentra vigente la nueva norma AASHTO 324-17 ha avanzado en precisar algunos procedimientos de construcción de la probeta y de ejecución del ensayo, pero los puntos abarcados aun no consideran los aspectos antes mencionados ni en la validez de los resultados aquí expuestos. Se incorpora en el anexo B una evaluación de los puntos actualizados de la norma.

7.2 Conclusiones particulares

Se pudo realizar la caracterización de las mezclas en estudio y comparar el desempeño ante el ahuellamiento que tuvieron todas las mezclas, identificando aquellas que presentan un mejor desempeño. Todos los indicadores de desempeño quedan explícitos en el capítulo de resultados y las curvas de ahuellamiento graficadas en el Anexo A.

Respecto a los resultados de los análisis se puede mencionar lo siguiente:

Todas las mezclas analizadas cumplen con las especificaciones de ahuellamiento utilizadas en Estados Unidos registrando ahuellamientos menores a los 12,5 mm. antes de las 10.000 o 20.000 pasadas según corresponda.

Las mezclas asfálticas fabricadas con asfaltos modificados no presentan evidencias de susceptibilidad a la humedad.

Sólo las mezclas SMA y USM cumplen la especificación para mezclas de alto desempeño de la normativa alemana habiendo presentado ahuellamientos menores a los 4 mm a las 20.000 pasadas

El cambio de proveedor de asfalto no influyó en la capacidad de resistir ahuellamiento de las mezclas. Cabe destacar que en las pruebas realizadas a ligantes de ambos proveedores se obtuvieron resultados similares, lo que refuerza esta conclusión.

Las mezclas semidensas IV-A-12 fabricadas con asfaltos modificadas presentan alrededor de un 50 % menos de ahuellamiento que las fabricadas con asfaltos tradicionales.

Los microaglomerados M10 tienen desempeños similares a las mezclas IV-A-12 fabricadas con asfaltos modificados, indicando que la granulometría abierta por sí sola no genera detrimentos en ahuellamiento respecto de la mezcla tradicional.

Por su parte, las mezclas SMA y la mezcla USM presentan desempeños similares y muy superiores a las demás mezclas, siendo estas dosificaciones las más recomendables para su uso en pavimentos de alto desempeño.

Las similitudes de los resultados de ambas mezclas implican que el refinamiento de las bandas granulométricas y el cambio en los tipos de fibras de la mezcla USM no generan mayores cambios de la capacidad de ahuellamiento de la mezcla.

8 Referencias

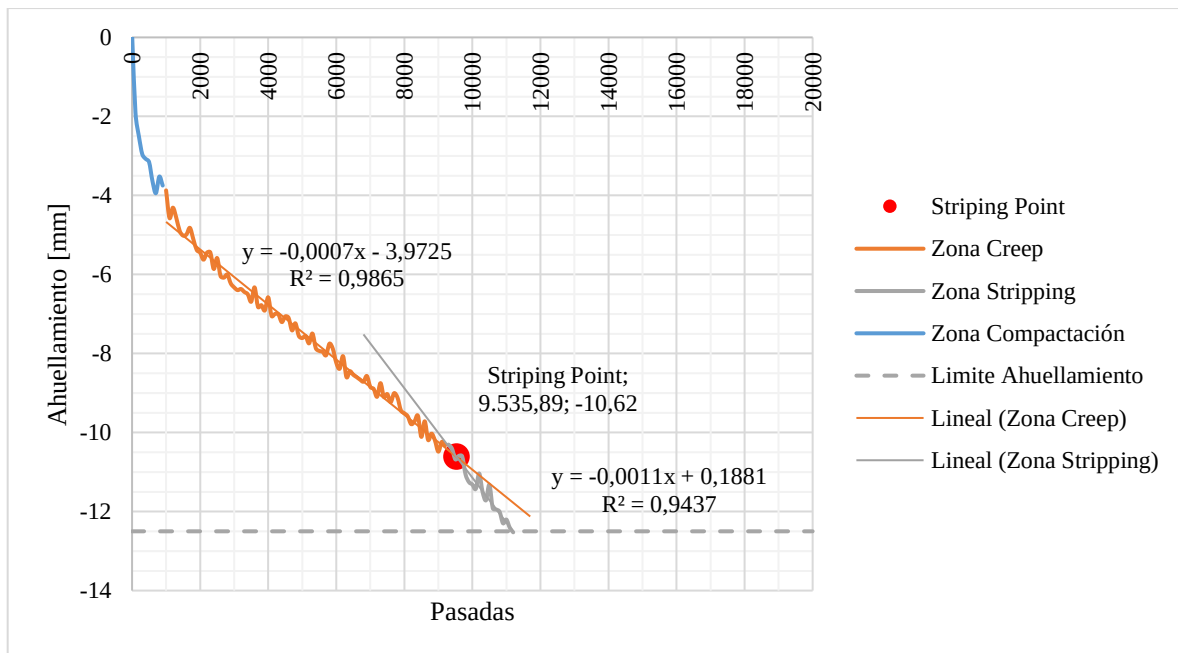
- AASHTO R30-02. (2002). Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt (HMA).
- AASHTO T 324-11. (2011). Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA).
- ASTM E177-14. (2014). Standard Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods. West Conshohocken, Pensilvania, E.E.U.U.
- Azari, H. (2014). Precision Estimates of AASHTO T 324, Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA). Whashington, DC, U.S.A.: merican Association of State Highway and Transportation Officials.
- Beecroft , A., & Petho , L. (2015). Commissioning of Hamburg Wheel Tracking Device (HWDT) Project No: 007180. Queensland.
- Brown, S. F., & Pell, P. S. (1964). Repeated Loading of Bituminous Materials.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. (2009). Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, BMVBS, Bonn. Alemania.
- Castillo, M. P. (2012). Ensayos tradicionales para tres cementos asfálticos Fondef D09I1174 parte II. Valparaíso, Region de Valparaíso, Chile: UTFSM, DOOCC.
- Copper, K. E., Brown, S. F., & Poley, G. R. (1985). The Design of Aggregate Gradings for Asphalt Basecourses. The Association of Asphalt Paving Technologists.
- Corté, J. F., & et, a. (1994). investigation of Rutting of Asphalt Surface Layers: Influence of Binder an Axle Loading Configuration.
- Cox, J. A., VanFrank, K. M., & Romero, P. (2013). On the variability of results from the Hamburg wheel tracker device. Proceedings of the 49th ASC annual international conference, (pág. 11). San Luis.
- Dirección de Vialidad. (2013). Manual de Carreteras Volumen N°8. Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control. Ministerio de Obras Públicas de Chile.
- Drüschner, L., Harders, O., & Ohmen, M. (1997). Voraussage des Widerstandes gegen Spurverformung durch ein modifiziertes Spurbildungsgerät', Bitumen, 3/97, pp. 125-6.

- Flores, F. (2012). Ensayos tradicionales para tres cementos asfálticos Fondef DO9I1174 Parte I. Valparaiso, Region de Valparaiso, Chile: UTFSM, DOOCC.
- FONDEF DO9I1174. (2010). Desarrollo de Materiales Para Recapados Asfálticos Utilizados en la Rehabilitación de Pavimentos Deteriorados. Valparaiso.
- forschungsgesellschaft für Strassen-und Verkehrswesen. (1997). Technische Prüfvorschriften für Asphalt im Strassenbau, TP A-StB, FGSV. Colonia, Alemania.
- Fujie Zhou, S. H. (2006). Integrated Asphalt (Overlay) Mixture Design, Balancing Rutting And Cracking Requirements.
- Gonzalez, A. (2012). Determinación de las propiedades viscoelásticas de betunes asfálticos tradicionales y modificados mediante la utilización del reómetro de corte dinámico (DSR). Valparaiso, Region de Valparaiso, Chile: UTFSM, DOOCC.
- Kamel, L. I., & Miller, L. J. (1994). Comparative Performance of Pavement Mixes Containing Conventional and Engineered Asphalts. Transportation Research Record No.1454.
- Kandhal, P. S., & Mallick, R. B. (2001). Effect of Mix Gradation on Rutting Potential of Dense – Graded Asphalt Mixtures. Transportation Research Record .
- Linden, F., & Van der Hiede, J. (1987). Some Aspects of the Compaction of Asphalt Mixes and its Influence on Mix Properties . The Association of Asphalt Paving Technologist.
- Mahboub, K., & Little, D. (1988). Improved Asphalt Concrete Design Procedure . Texas, U.S.A.: Texas Transportation Institute.
- Monishmith, C. L. (1994). Permanent Deformation Response of Asphalt Aggregate Mixes. Washington, D.C., E.E.U.U: National Research Council.
- Monishmith, C. L., & Taybali, A. A. (1988). Permanent Deformation (Rutting) Considerations in Asphalt Concrete Pavements Sections. Williamsburg, Virginia, U.S.A: The Association of Asphalt Paving Technologists.
- Monishmith, C. L., Epps, J., & Finn, F. N. (1985). Improved Asphalt Mix Design. Williamsburg, Virginia, USA: The Association of Asphalt Paving Technologists.
- Padilla, A. (2004). Análisis de la resistencia a la deformación plástica de mezclas bituminosas. Barcelona, Cataluña, España.

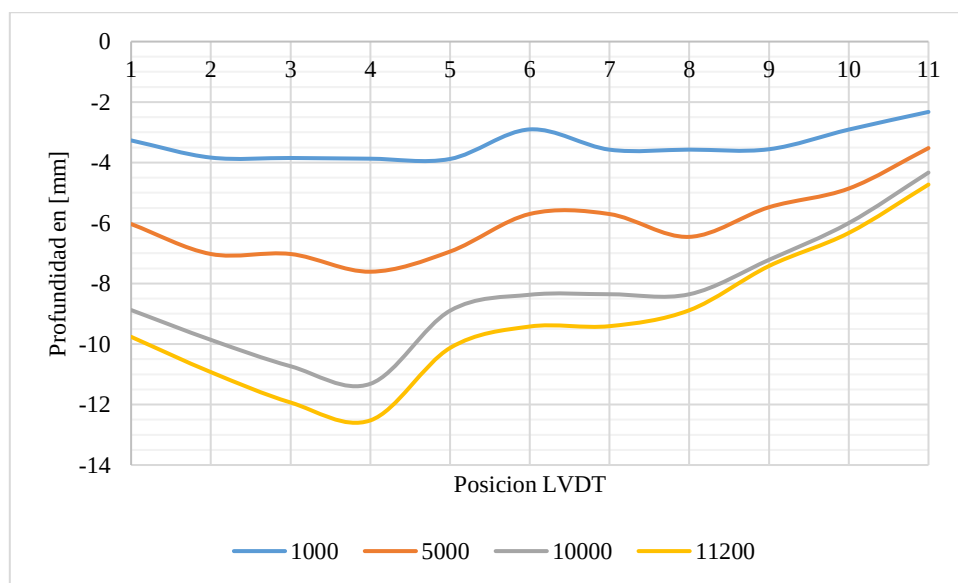
- Partl, M. N., Bahia, H. U., Canestrari, F., de la Roche, C., Di Benedetto, H., Piber, H., & Sybilski, D. (2013). Advances in interlaboratory testing and evaluation of bituminous materials. USA: RILEM Technical Committee 206-ATB.
- Rahman, F., & Hossain, M. (2014). Review and Analysis of Hamburg Wheel Tracking Device Test Data. Obtenido de <http://idmweb.ksdot.org/PublicLib/publicDoc.asp?ID=003832122>
- Robert P., E., Miller, C., Ford, J., Maher, G., & Fee tu, Y. (1991). Effect of Agregate Gradation Variation on Asphalt Concrete Mix Properties.
- Schram, S., Williams, R., & Buss. (2014). Reporting Results from the Hamburg Wheel Tracking Device, Transportation Research Record, No. 2446, Transportation Research Board. Washington, Distrito de Columbia, Estados unidos.
- Stuart, K. D. (1993). Asphalt Mixtures Containing Chemically Modified Binders. Transportation Research Record. No. 1417.
- TxDOT. (Agosto de 2006). Thechnical Advisory Hamburg Wheel Test. Obtenido de <https://ftp.dot.state.tx.us/pub/txdot-info/cmd/tech/hamburg.pdf>
- Uge, P., & Van de Loo, P. (1974). Permanent Deformation of Asphalt Mixes.
- Uge, P., & Van de Loo, P. J. (Noviembre de 1974). Permanent Deformation of Asphalt Mixes. Ámsterdam, Holanda: Koninklijke/Shell-Laboratorium.
- Universidad Mayor de San Simón. (2004). Pavimentos. Cochabamba.
-

Anexo A

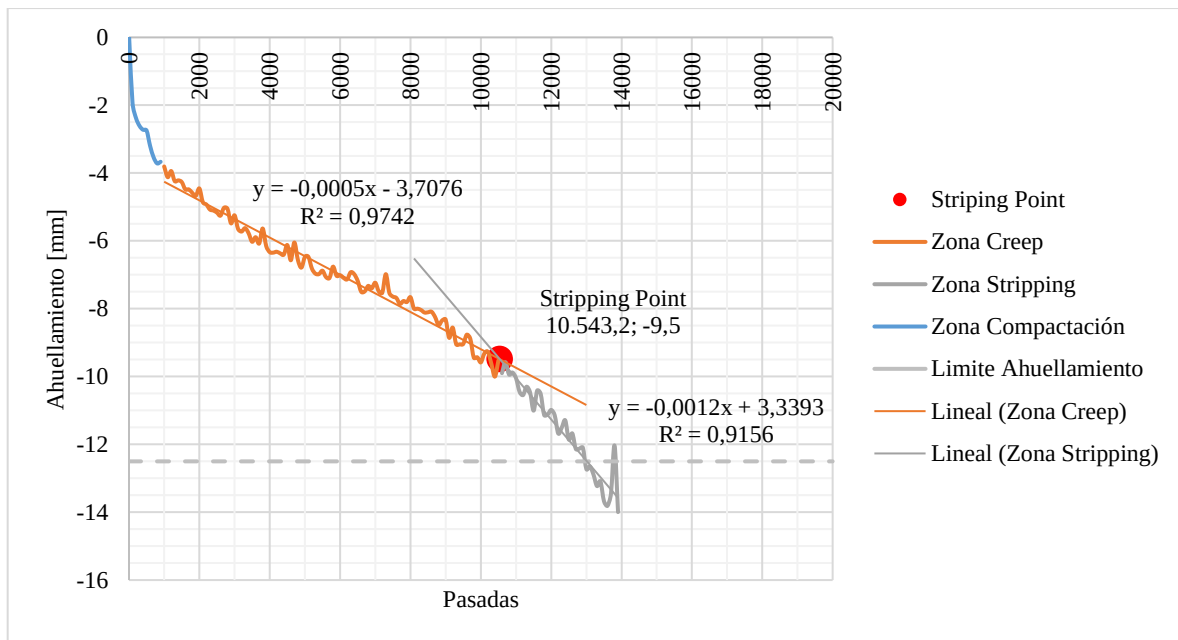
Curvas Ensayos



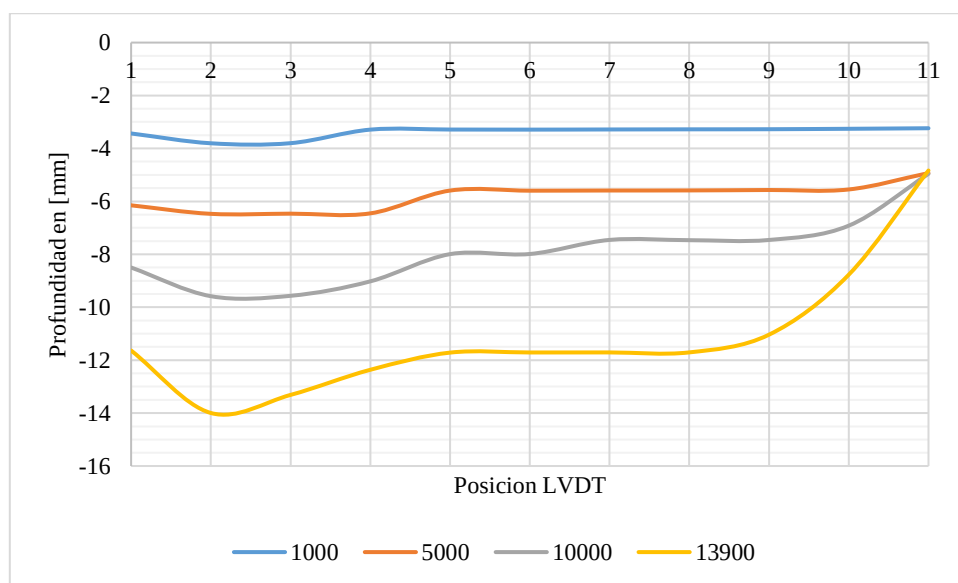
Curva ahuellamiento para el ensayo N°1: Mezcla IV-A-12 –Asfalto tradicional-Proveedor E1-Probeta 1.
Fuente: Elaboración propia.



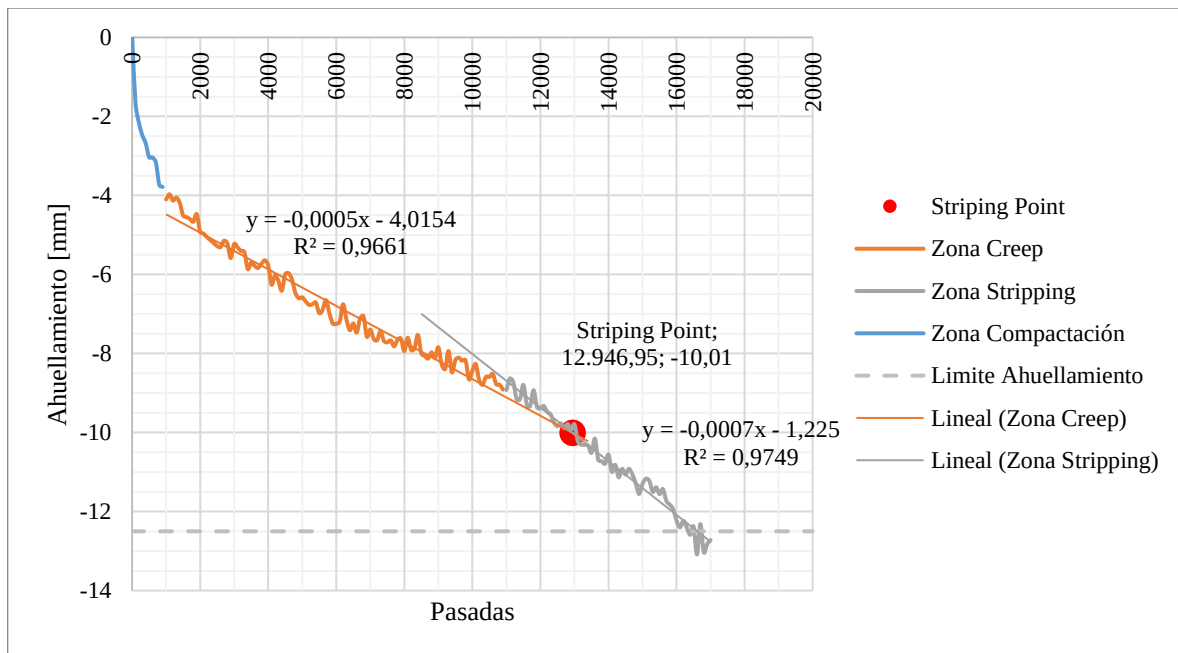
Perfiles de ahuellamiento para distinto número de pasadas para el ensayo N°1: Mezcla IV-A-12 –Asfalto tradicional-Proveedor E1-Probeta 1. Fuente: Elaboración propia.



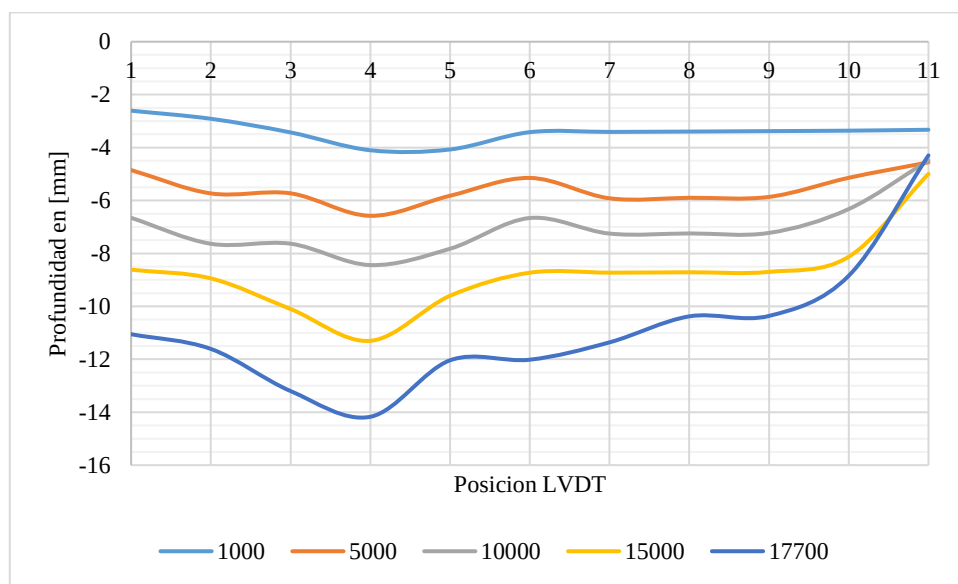
Curva ahuellamiento para el ensayo N°2: Mezcla IV-A-12 –Asfalto tradicional-Proveedor E1-Probeta 2.
Fuente: Elaboración propia.



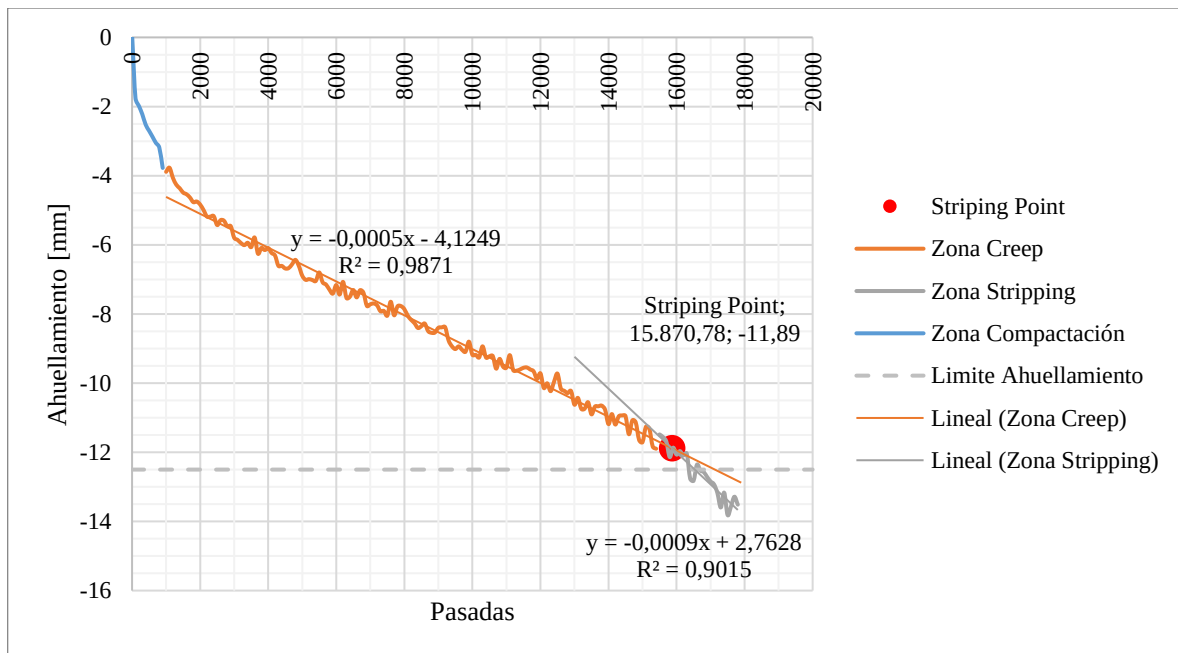
Perfiles de ahuellamiento para distinto número de pasadas para el ensayo N°2: Mezcla IV-A-12 –Asfalto tradicional-Proveedor E1-Probeta 2. Fuente: Elaboración propia



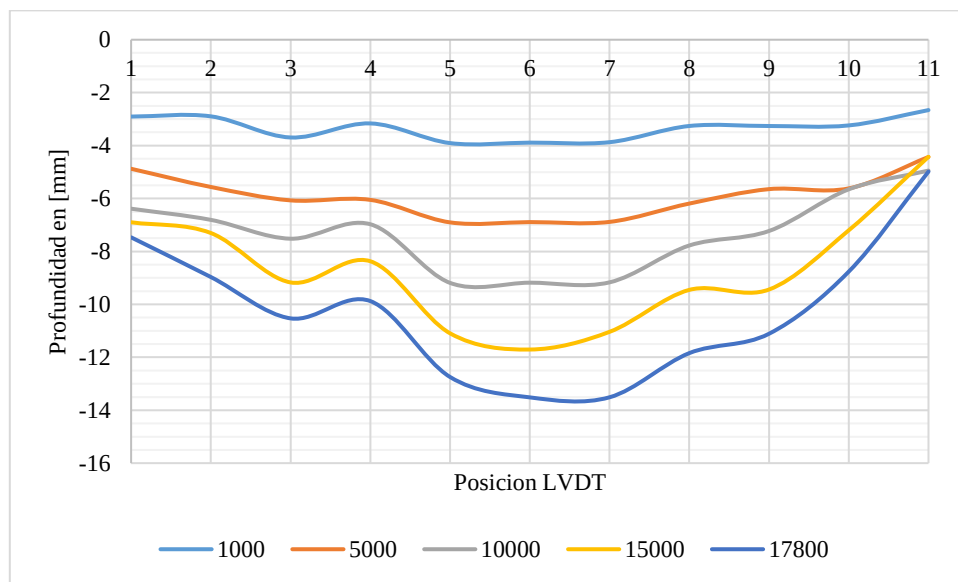
Curva ahuellamiento para el ensayo N°3: Mezcla IV-A-12 –Asfalto tradicional-Proveedor E1-Probeta 3.
Fuente: Elaboración propia.



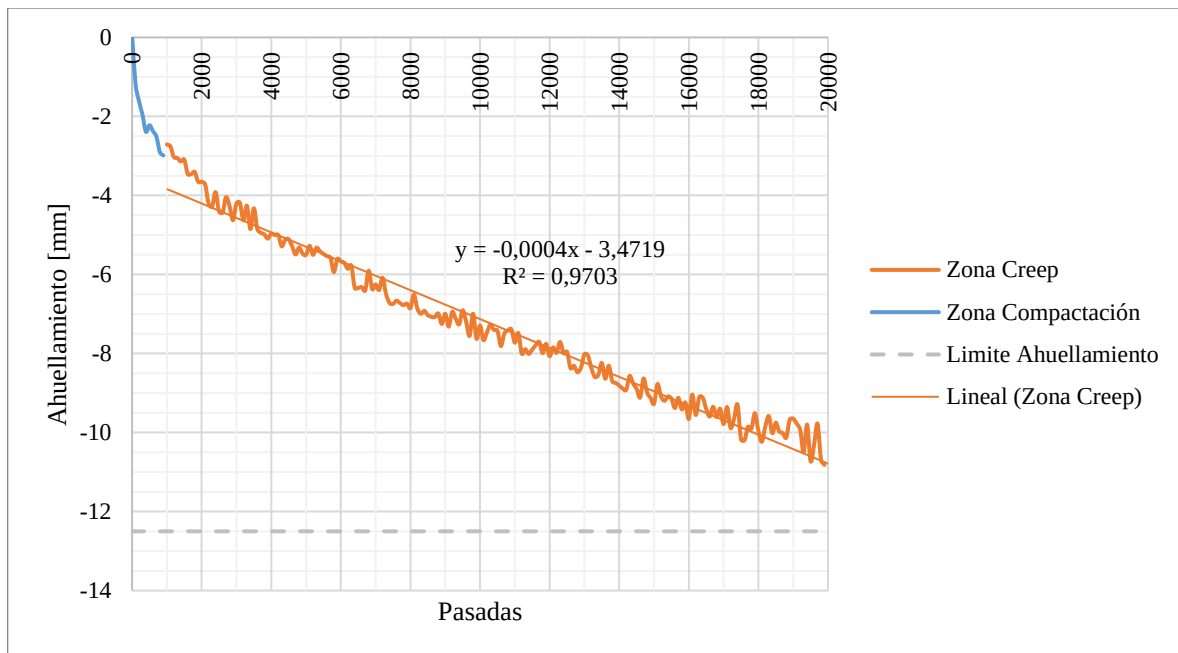
Perfiles de ahuellamiento para distinto número de pasadas para el ensayo N°3: Mezcla IV-A-12 –Asfalto tradicional-Proveedor E1-Probeta 3. Fuente: Elaboración propia



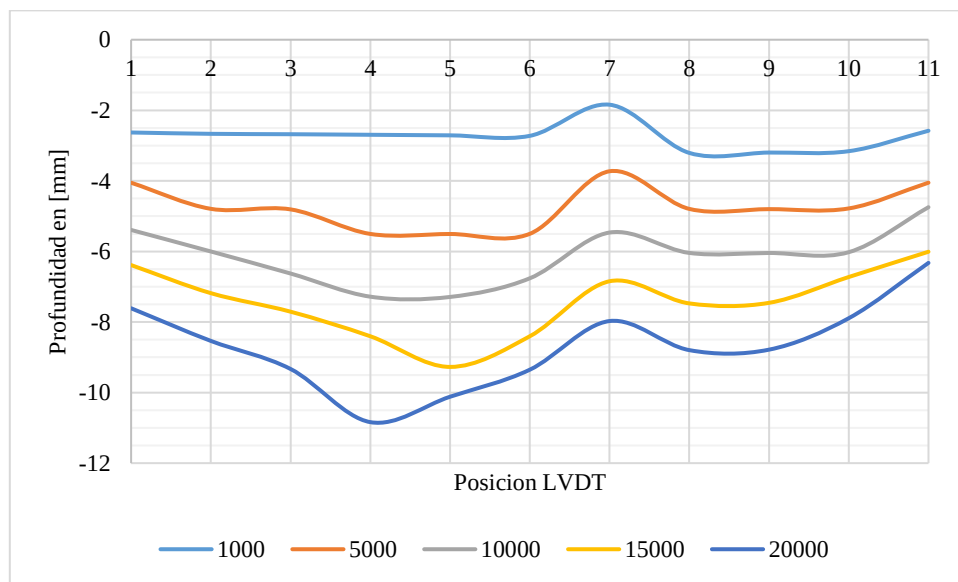
Curva ahuellamiento para el ensayo N°4: Mezcla IV-A-12 –Asfalto tradicional-Proveedor E2-Probeta 1.
Fuente: Elaboración propia.



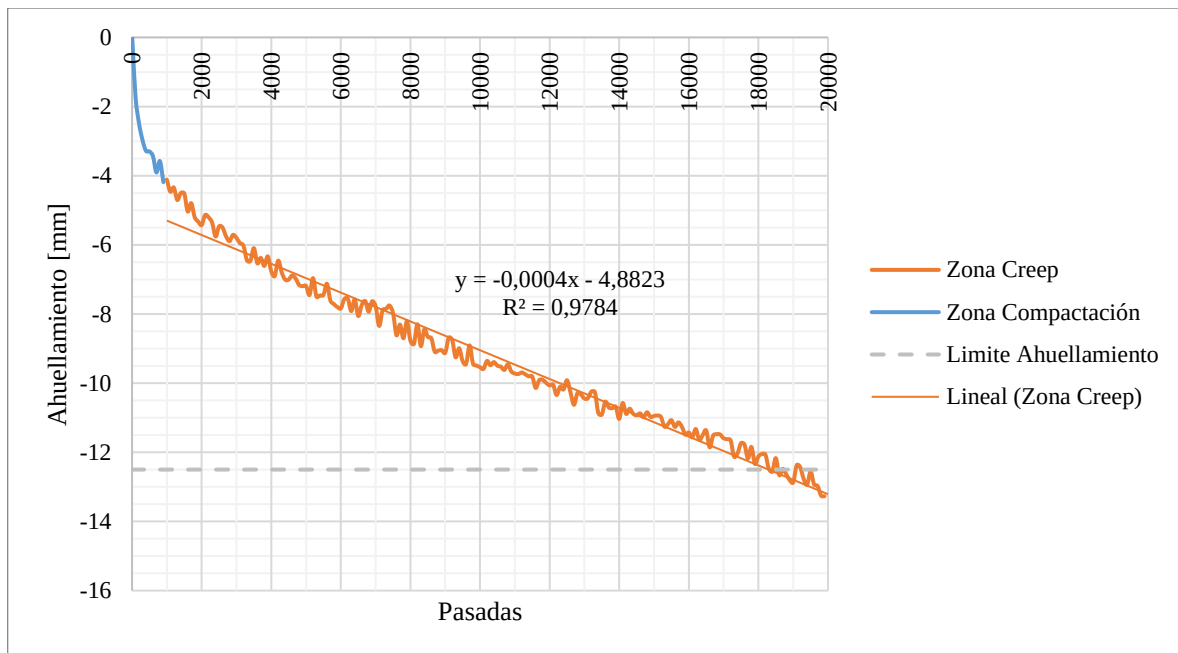
Perfiles de ahuellamiento para distinto número de pasadas para el ensayo N°4: Mezcla IV-A-12 –Asfalto tradicional-Proveedor E2-Probeta 1. Fuente: Elaboración propia



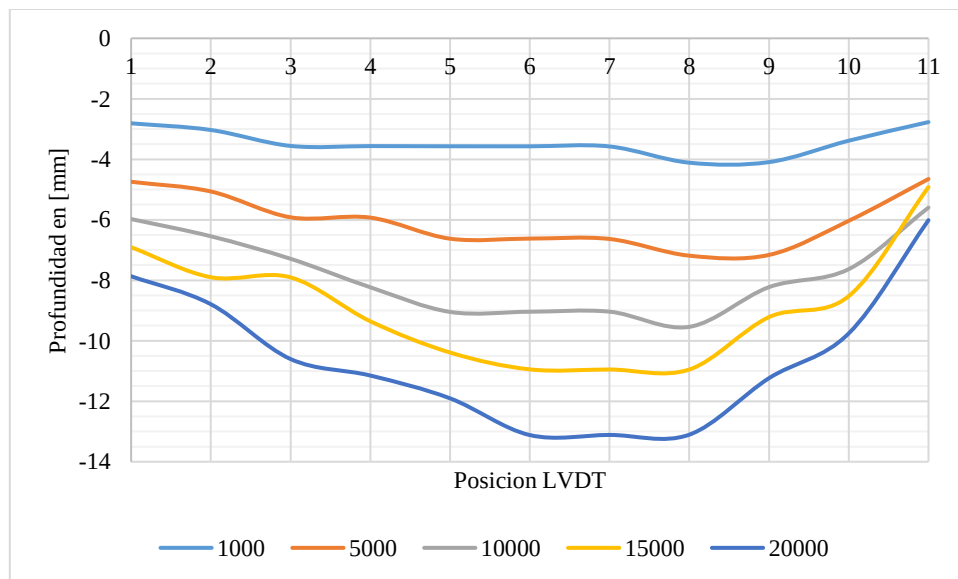
Curva ahuellamiento para el ensayo N°5: Mezcla IV-A-12 –Asfalto tradicional-Proveedor E2-Probeta 2.
Fuente: Elaboración propia.



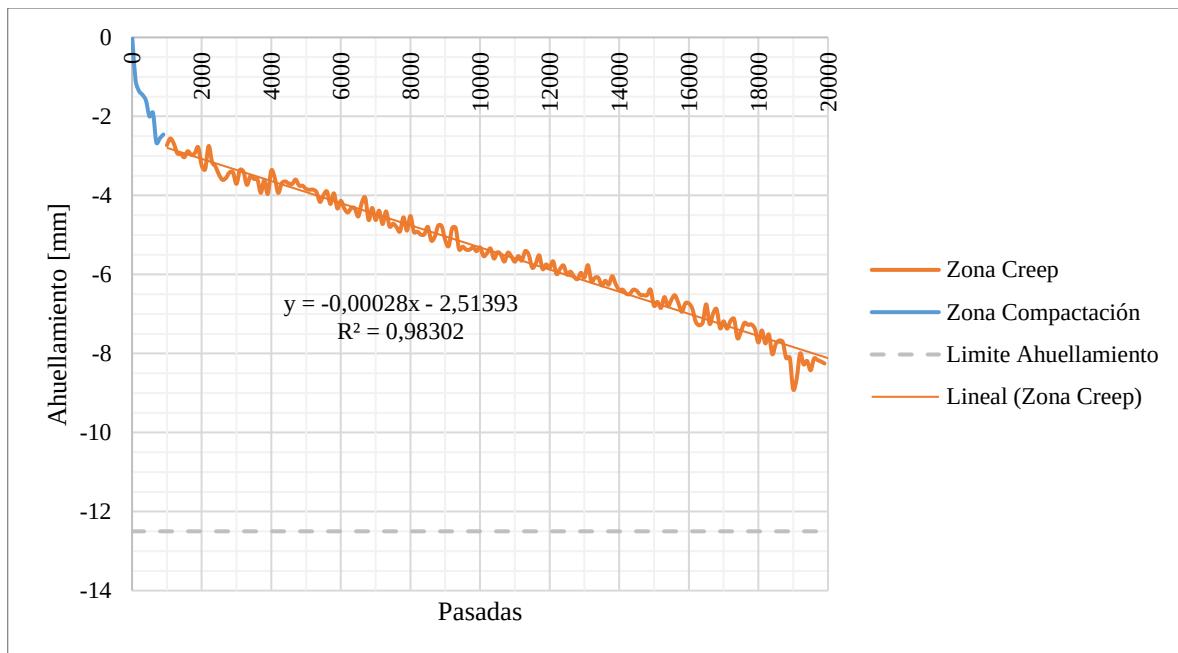
Perfiles de ahuellamiento para distinto número de pasadas para el ensayo N°5: Mezcla IV-A-12 –Asfalto tradicional-Proveedor E2-Probeta 2. Fuente: Elaboración propia



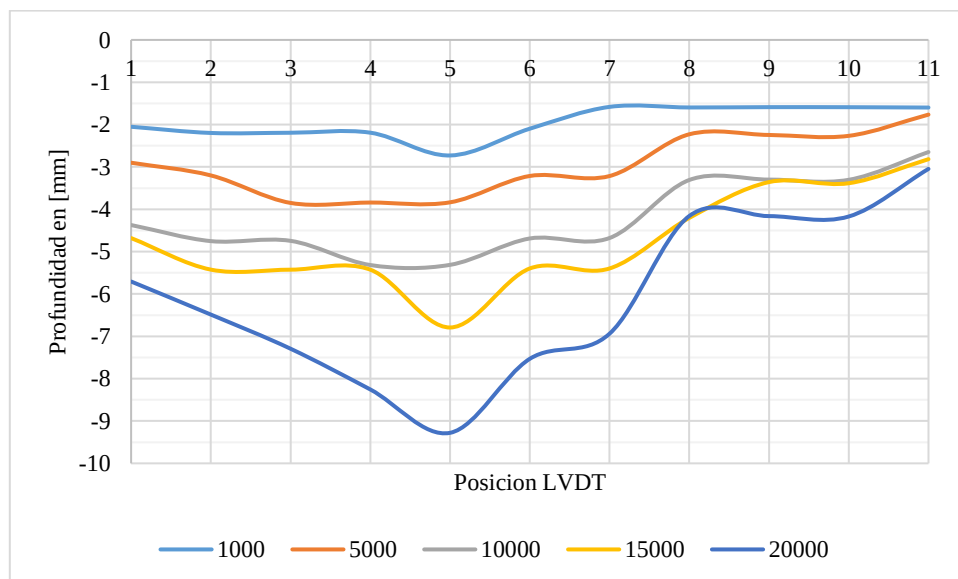
Curva ahuellamiento para el ensayo N°6: Mezcla IV-A-12 –Asfalto tradicional-Proveedor E2-Probeta 3.
Fuente: Elaboración propia.



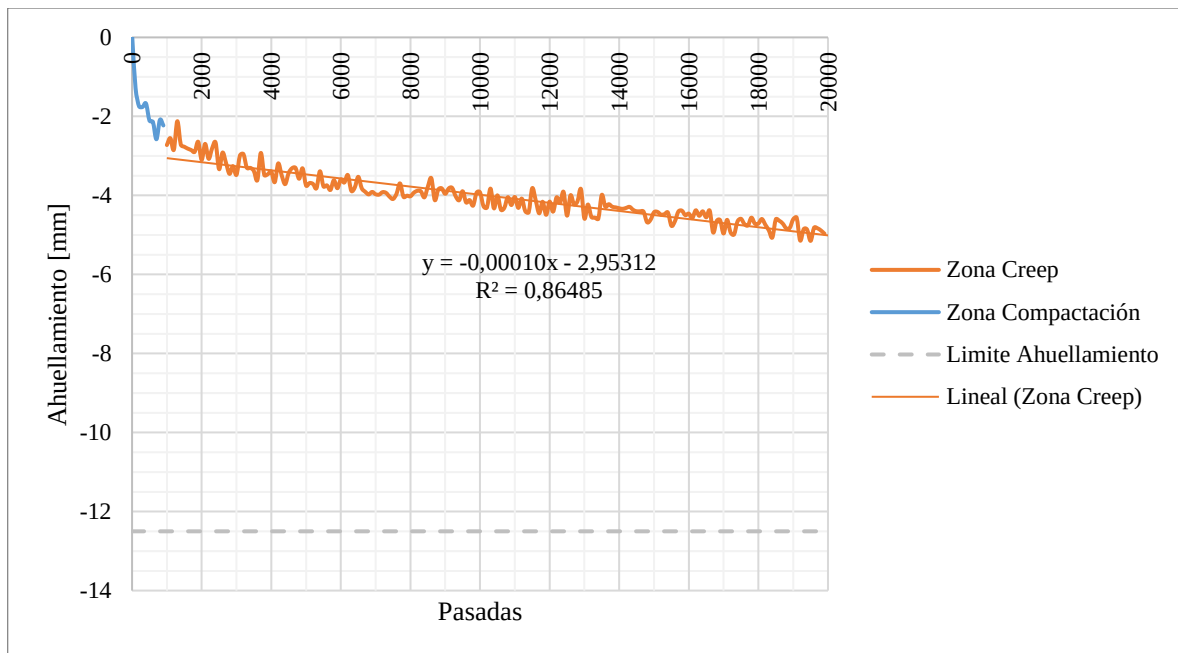
Perfiles de ahuellamiento para distinto número de pasadas para el ensayo N°6: Mezcla IV-A-12 –Asfalto tradicional-Proveedor E2-Probeta 3. Fuente: Elaboración propia



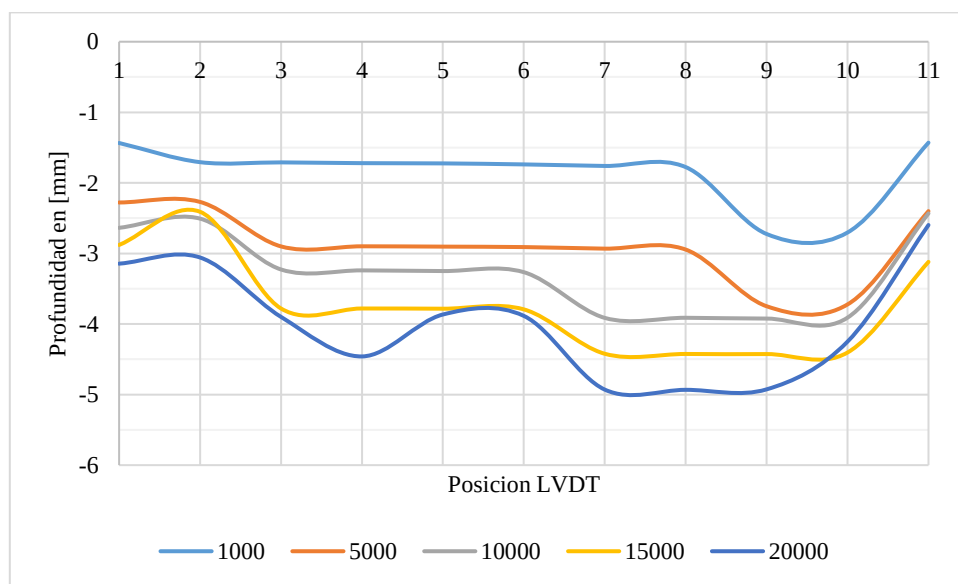
Curva ahuellamiento para el ensayo N°7: Mezcla IV-A-12 –Asfalto modificado-Proveedor E1-Probeta 1.
Fuente: *Elaboración propia*.



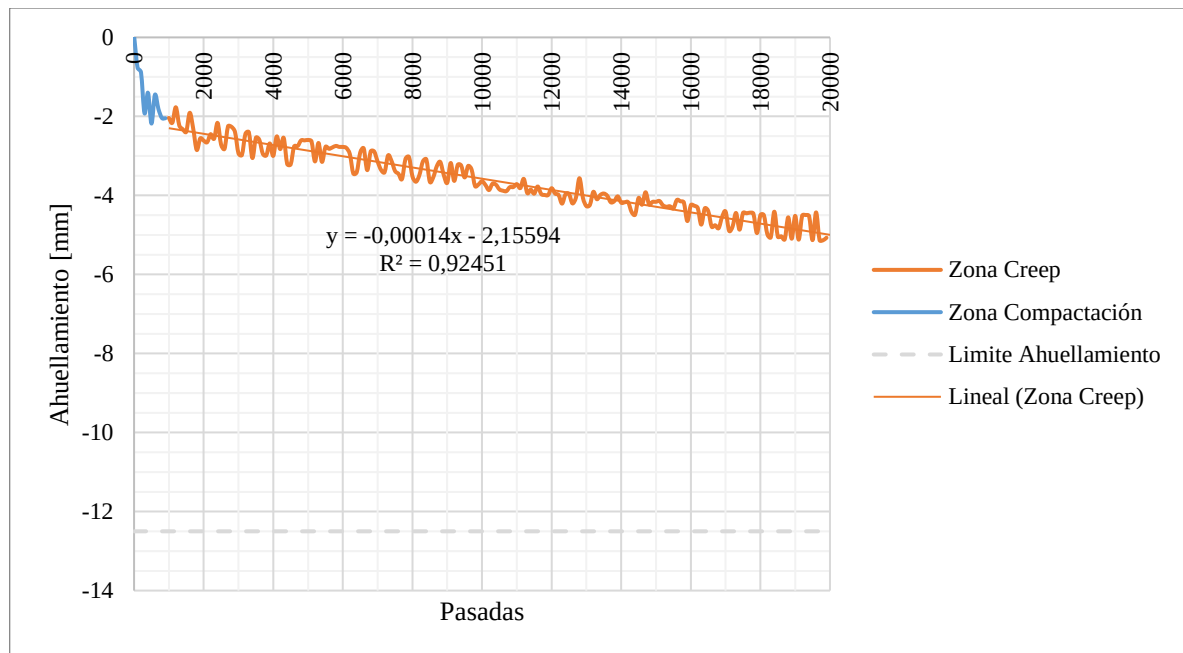
Perfiles de ahuellamiento para distinto número de pasadas para el ensayo N°7: Mezcla IV-A-12 –Asfalto modificado-Proveedor E1-Probeta 1. Fuente: *Elaboración propia*



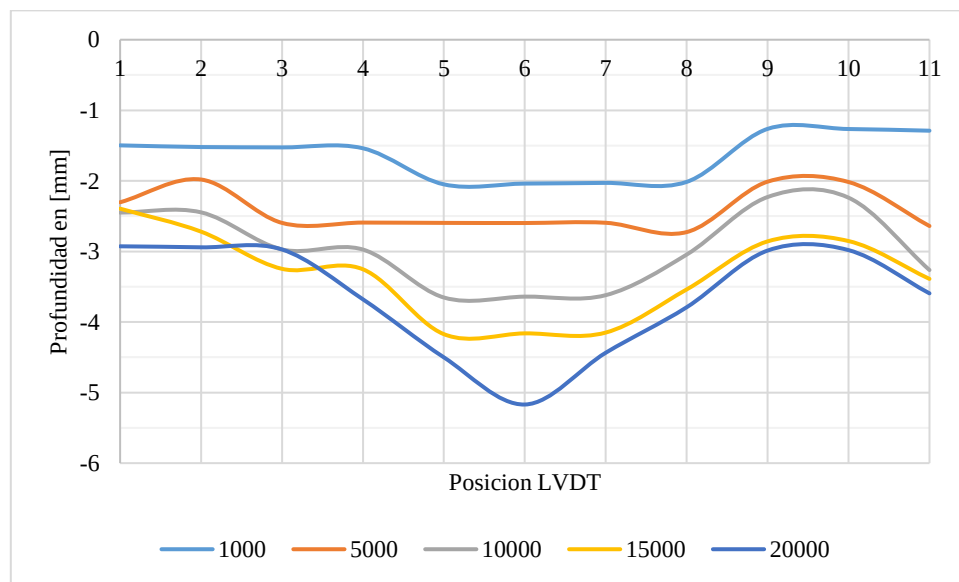
Curva ahuellamiento para el ensayo N°8: Mezcla IV-A-12 –Asfalto modificado-Proveedor E1-Probeta 2.
Fuente: *Elaboración propia.*



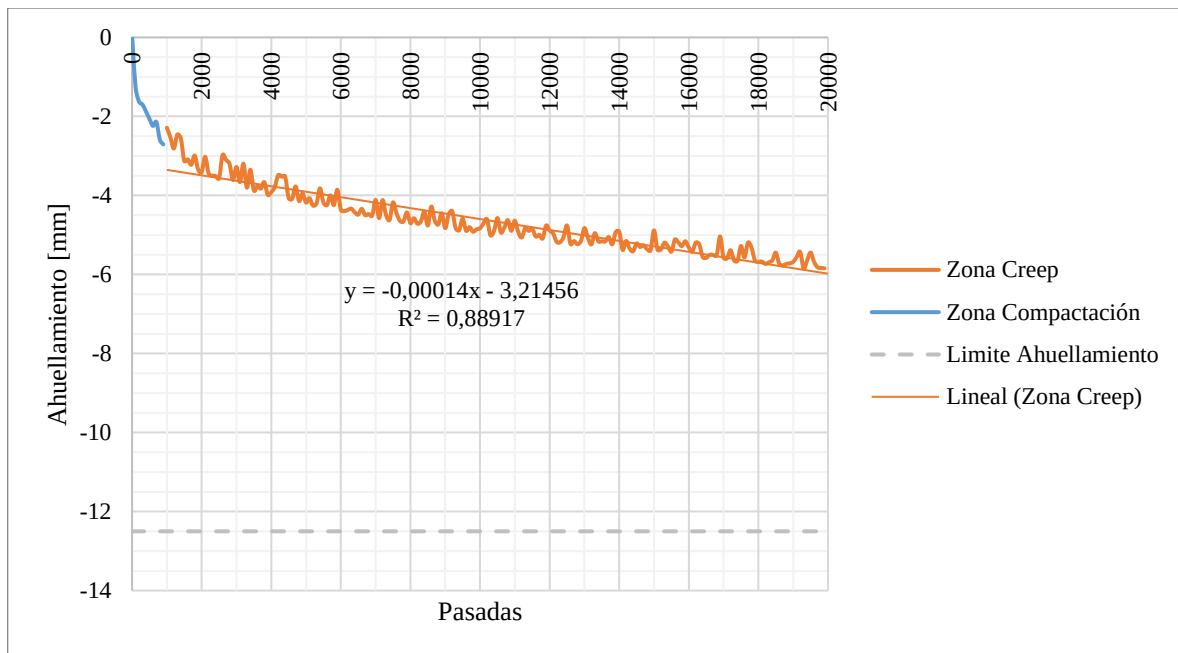
Perfiles de ahuellamiento para distinto número de pasadas para el ensayo N°8: Mezcla IV-A-12 –Asfalto modificado-Proveedor E1-Probeta 2. Fuente: *Elaboración propia*



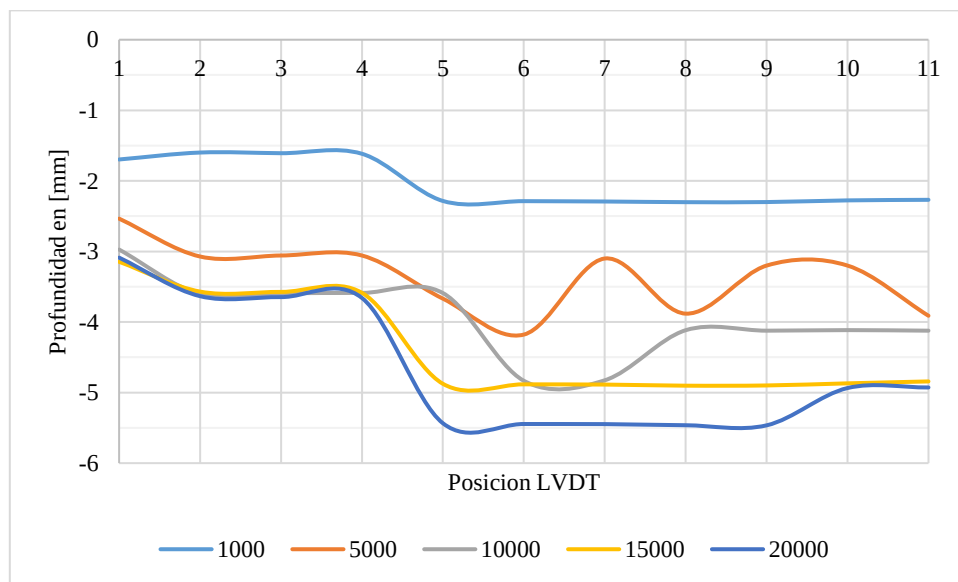
Curva ahuellamiento para el ensayo N°9: Mezcla IV-A-12 –Asfalto modificado-Proveedor E1-Probeta 3.
Fuente: *Elaboración propia.*



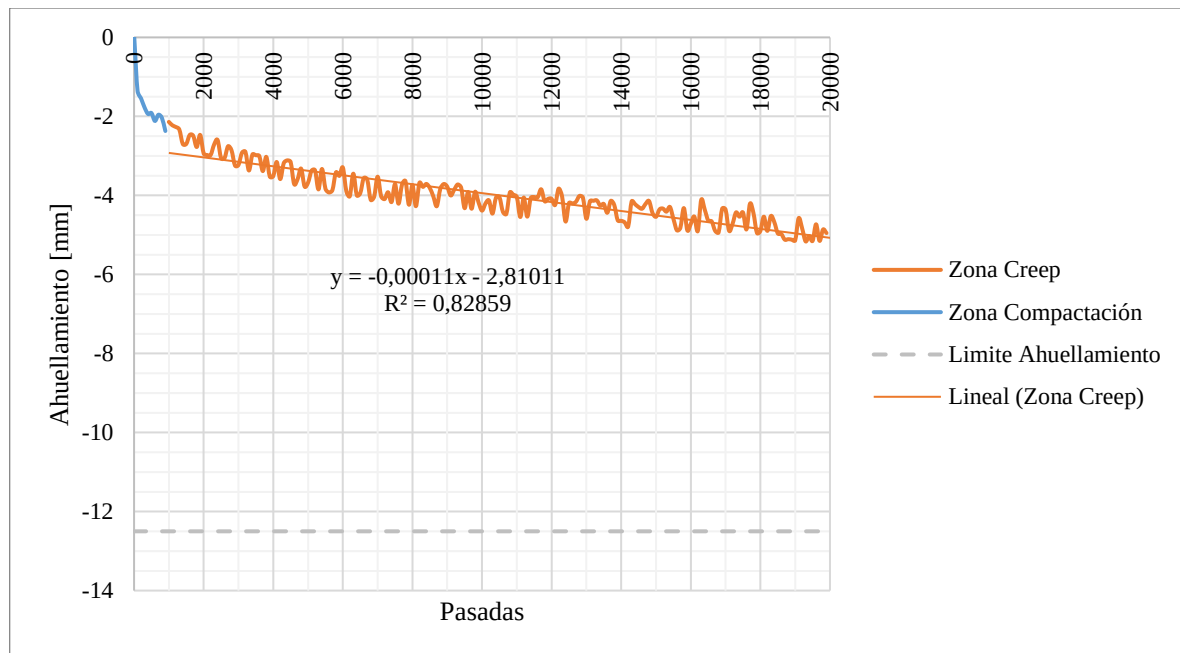
Perfiles de ahuellamiento para distinto número de pasadas para el ensayo N°9: Mezcla IV-A-12 –Asfalto modificado-Proveedor E1-Probeta 3. Fuente: *Elaboración propia*



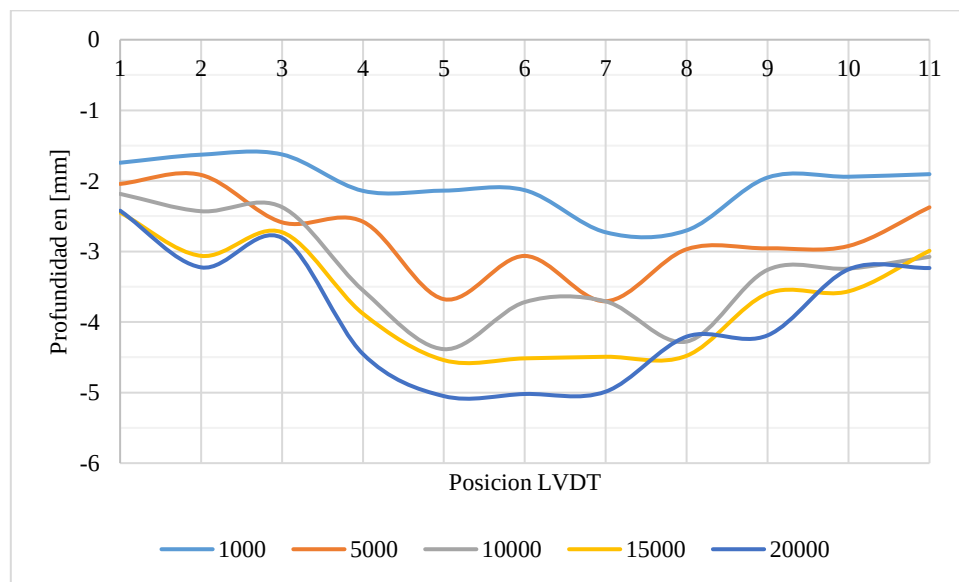
Curva ahuellamiento para el ensayo N°10: Mezcla IV-A-12 –Asfalto modificado-Proveedor E2-Probeta 1.
Fuente: Elaboración propia.



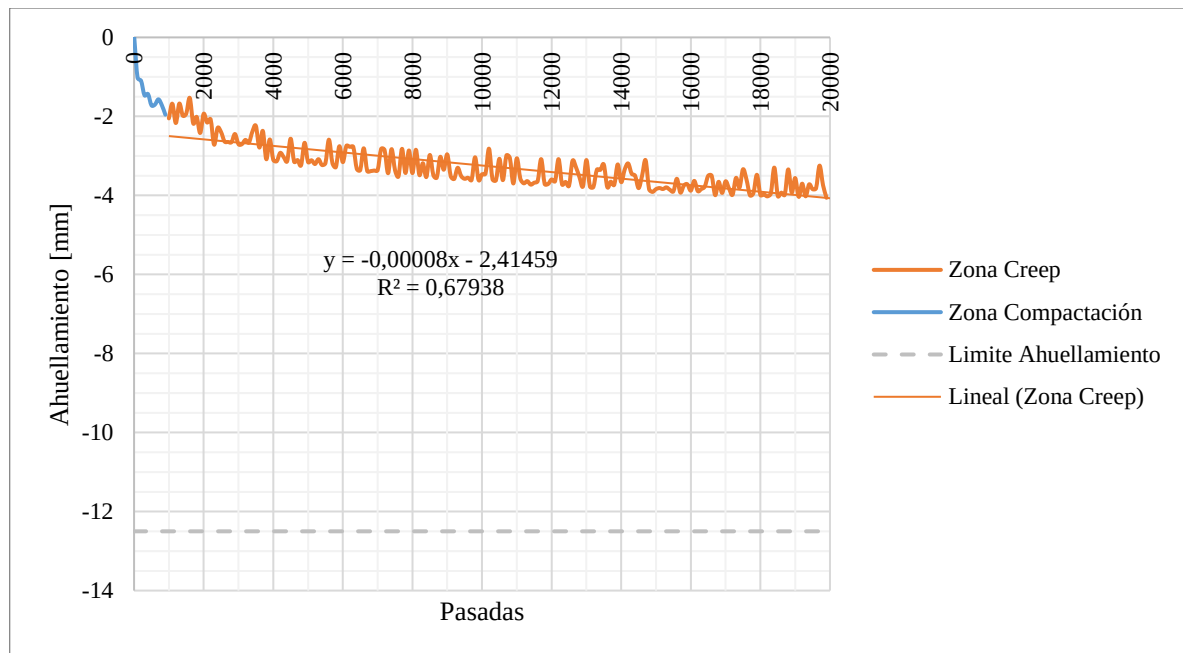
Perfiles de ahuellamiento para distinto número de pasadas para el ensayo N°10: Mezcla IV-A-12 –Asfalto modificado-Proveedor E2-Probeta 1. Fuente: Elaboración propia



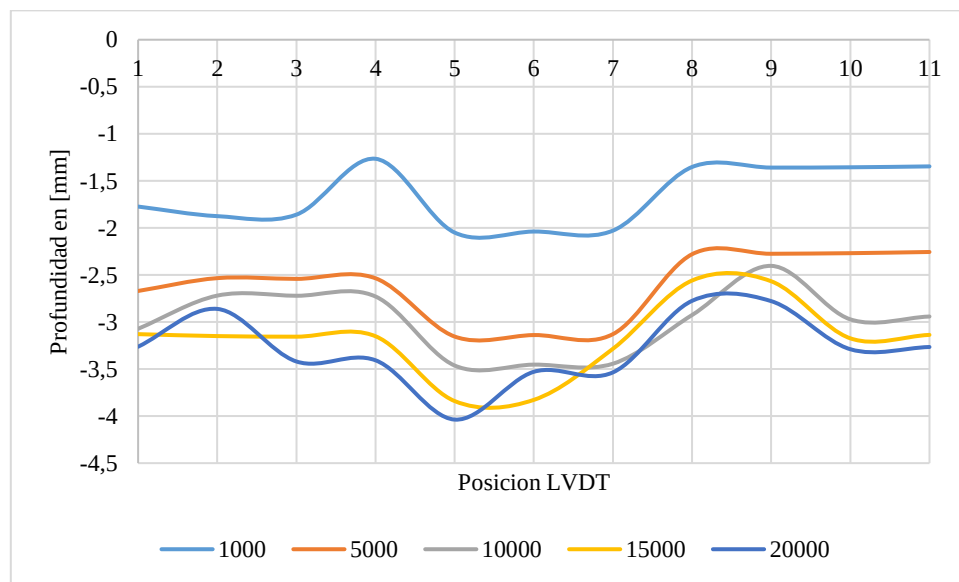
Curva ahuellamiento para el ensayo N°11: Mezcla IV-A-12 –Asfalto modificado-Proveedor E2-Probeta 2.
Fuente: Elaboración propia.



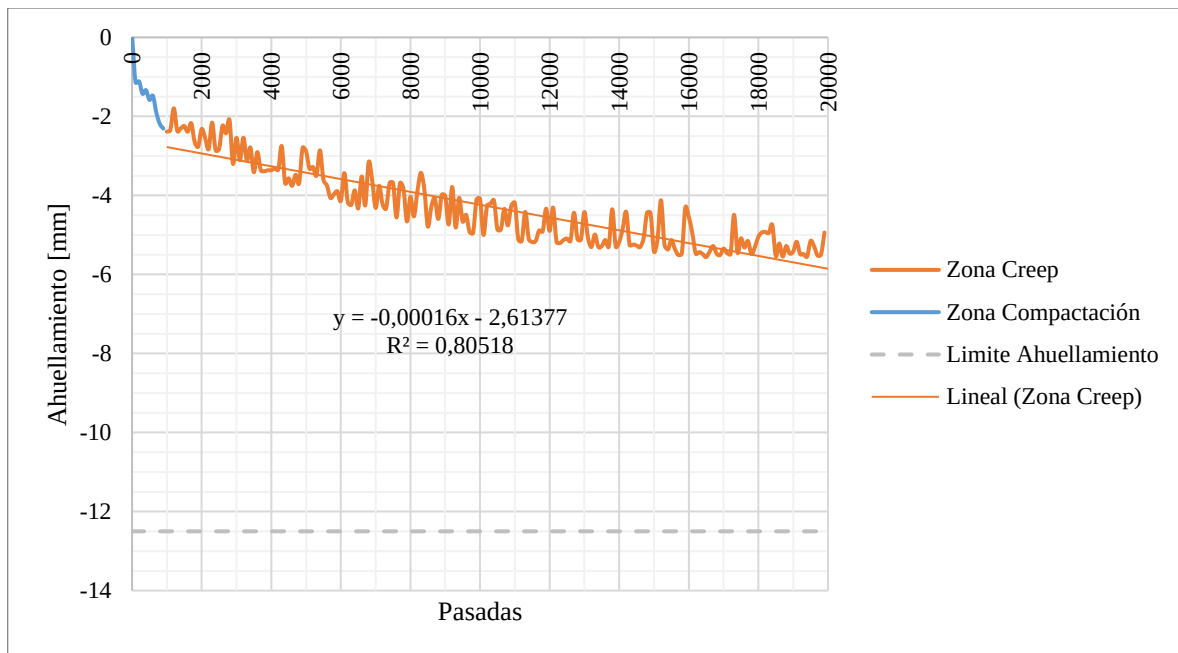
Perfiles de ahuellamiento para distinto número de pasadas para el ensayo N°11: Mezcla IV-A-12 –Asfalto modificado-Proveedor E2-Probeta 2. Fuente: Elaboración propia



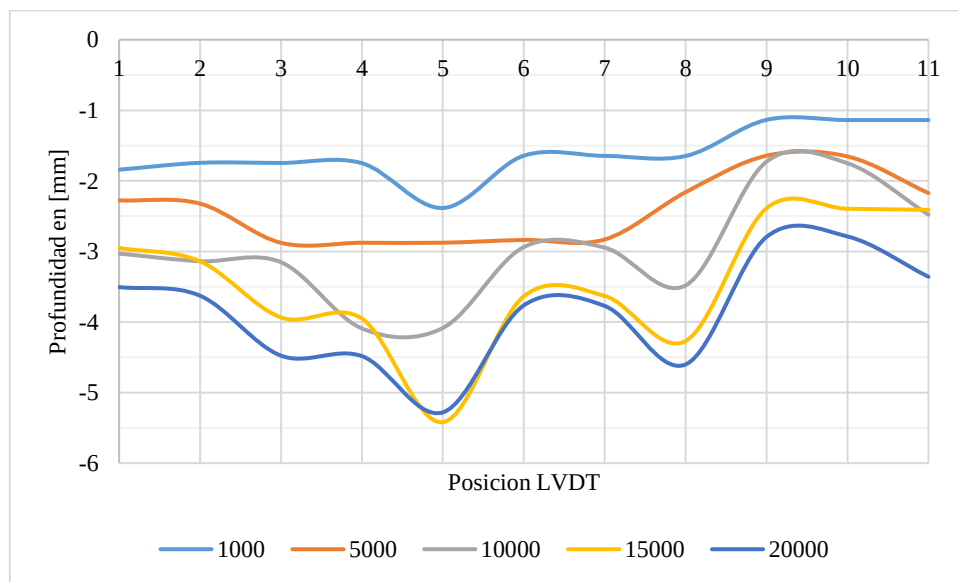
Curva ahuellamiento para el ensayo N°12: Mezcla IV-A-12 –Asfalto modificado-Proveedor E2-Probeta 3.
Fuente: Elaboración propia.



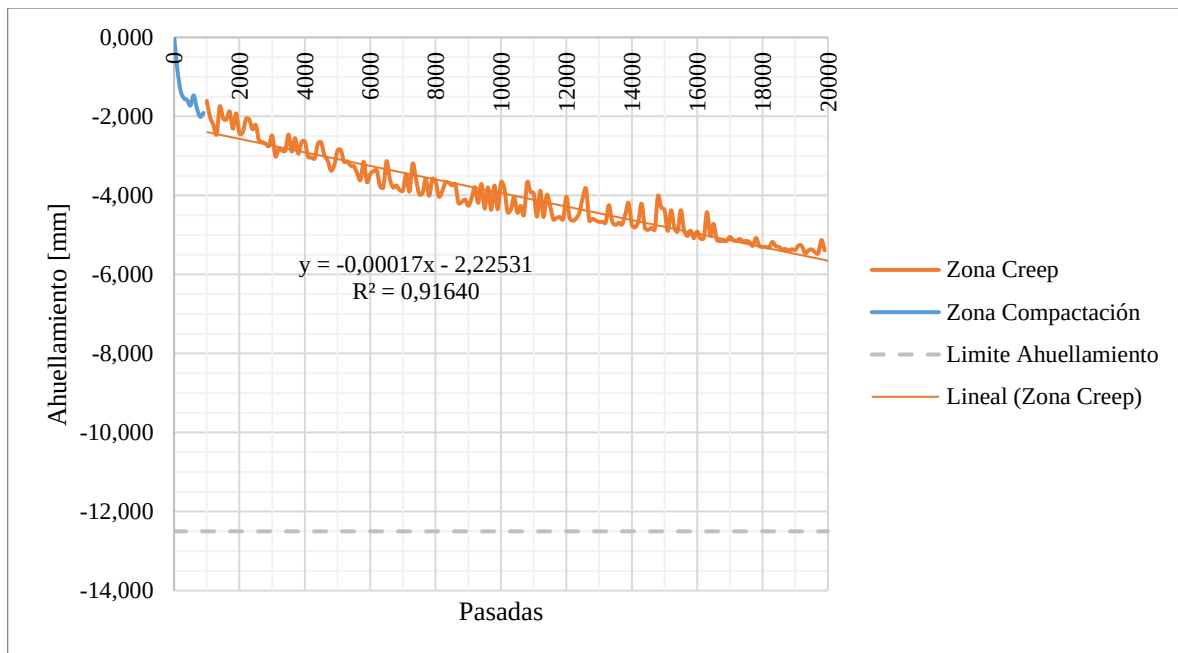
Perfiles de ahuellamiento para distinto número de pasadas para el ensayo N°12: Mezcla IV-A-12 –Asfalto modificado-Proveedor E2-Probeta 3. Fuente: Elaboración propia



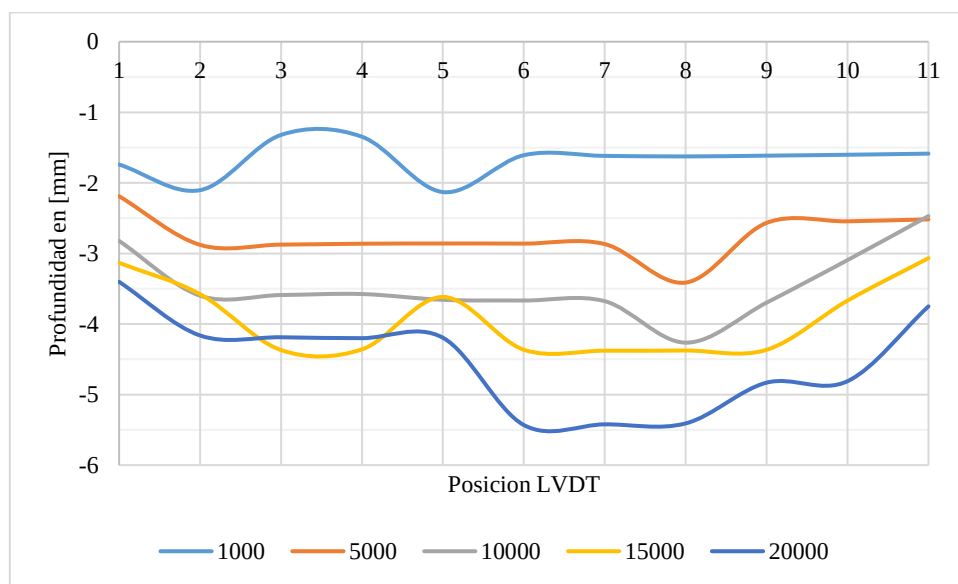
Curva ahuellamiento para el ensayo N°13: Mezcla M-10 –Asfalto modificado-Proveedor E1-Probeta 1.
Fuente: Elaboración propia.



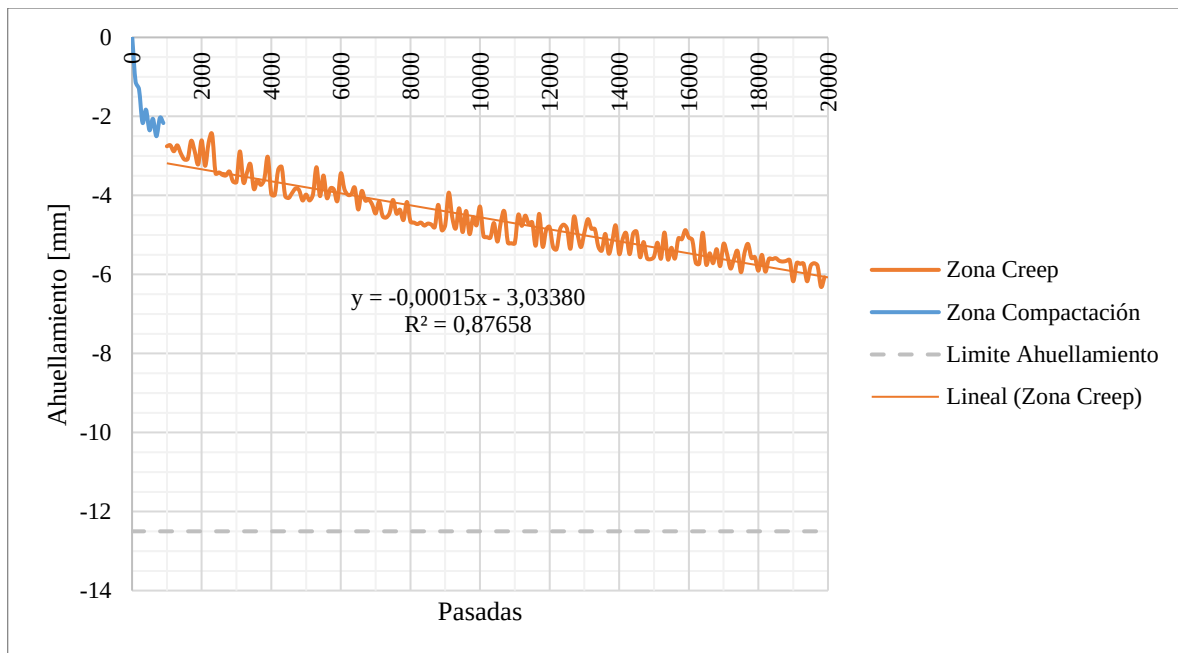
Perfiles de ahuellamiento para distinto número de pasadas para el ensayo N°13: Mezcla M-10 –Asfalto modificado-Proveedor E1-Probeta 1. Fuente: Elaboración propia



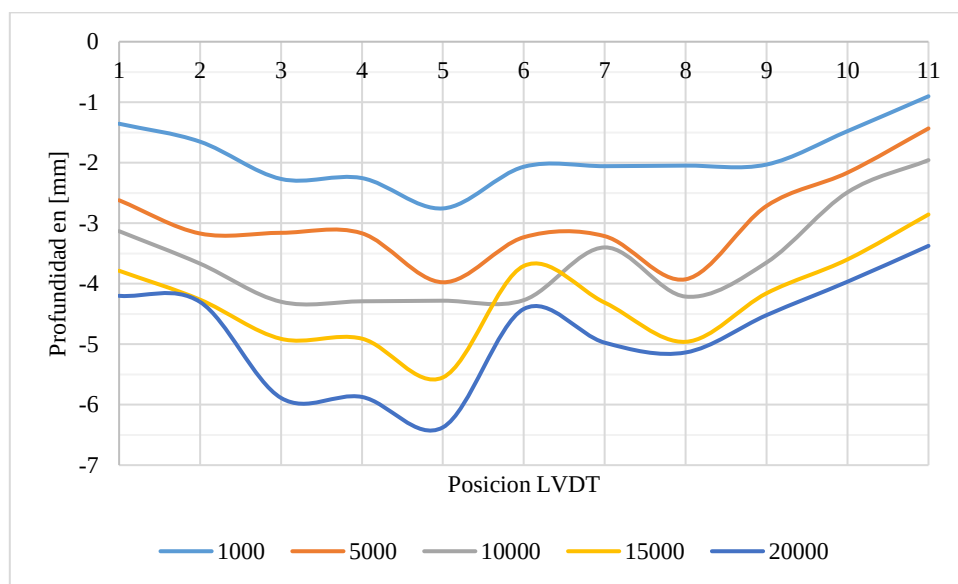
Curva ahuellamiento para el ensayo N°14: Mezcla M-10 –Asfalto modificado-Proveedor E1-Probeta 2.
Fuente: Elaboración propia.



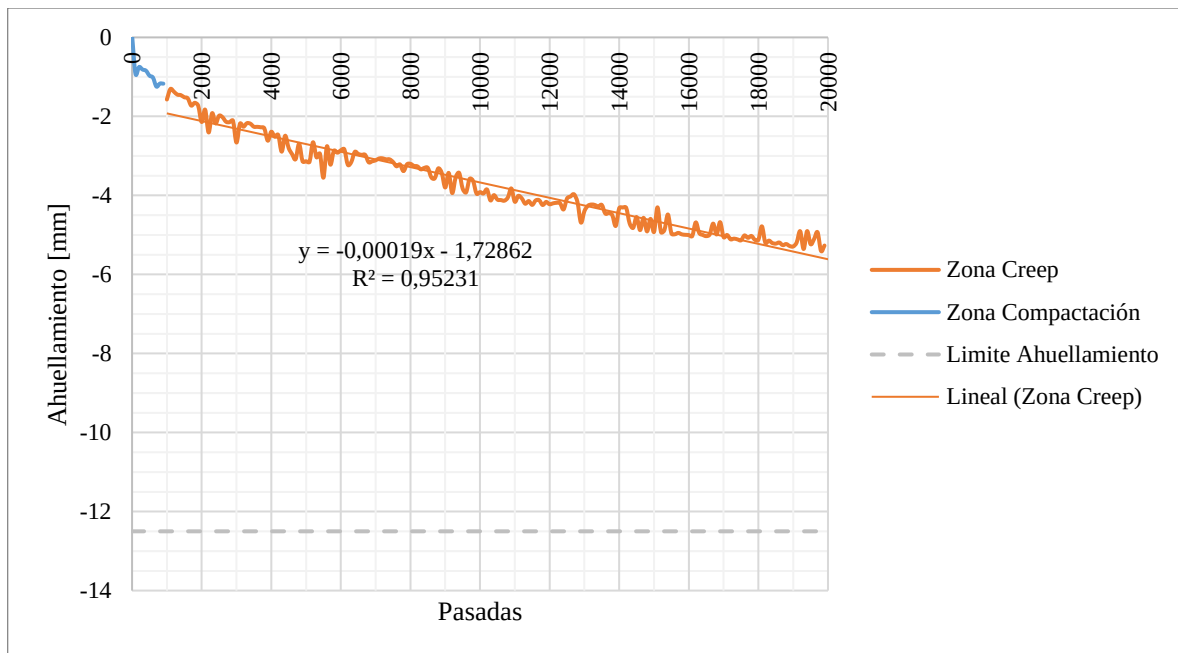
Perfiles de ahuellamiento para distinto número de pasadas para el ensayo N°14: Mezcla M-10 –Asfalto modificado-Proveedor E1-Probeta 2. Fuente: Elaboración propia



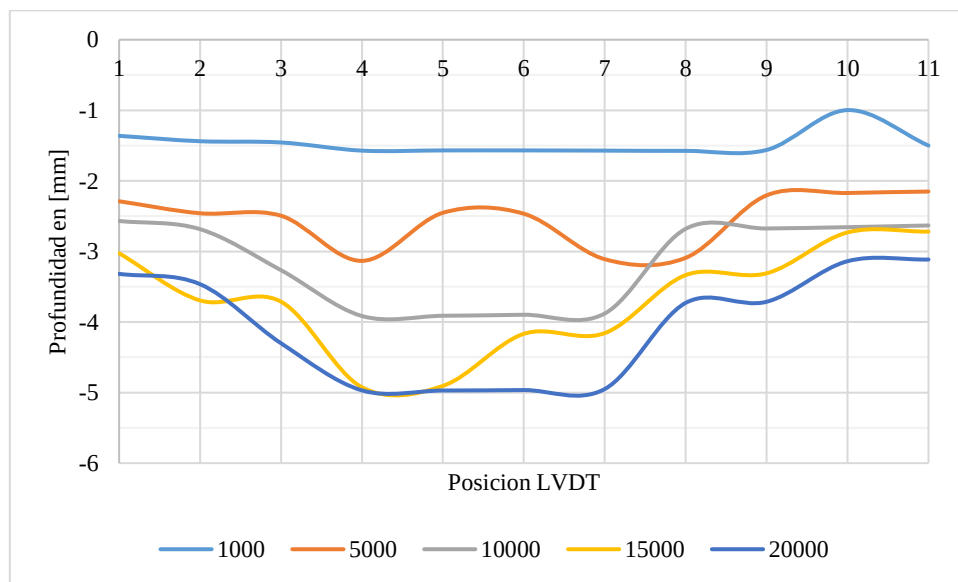
Curva ahuellamiento para el ensayo N°15: Mezcla M-10 –Asfalto modificado-Proveedor E1-Probeta 3.
Fuente: Elaboración propia.



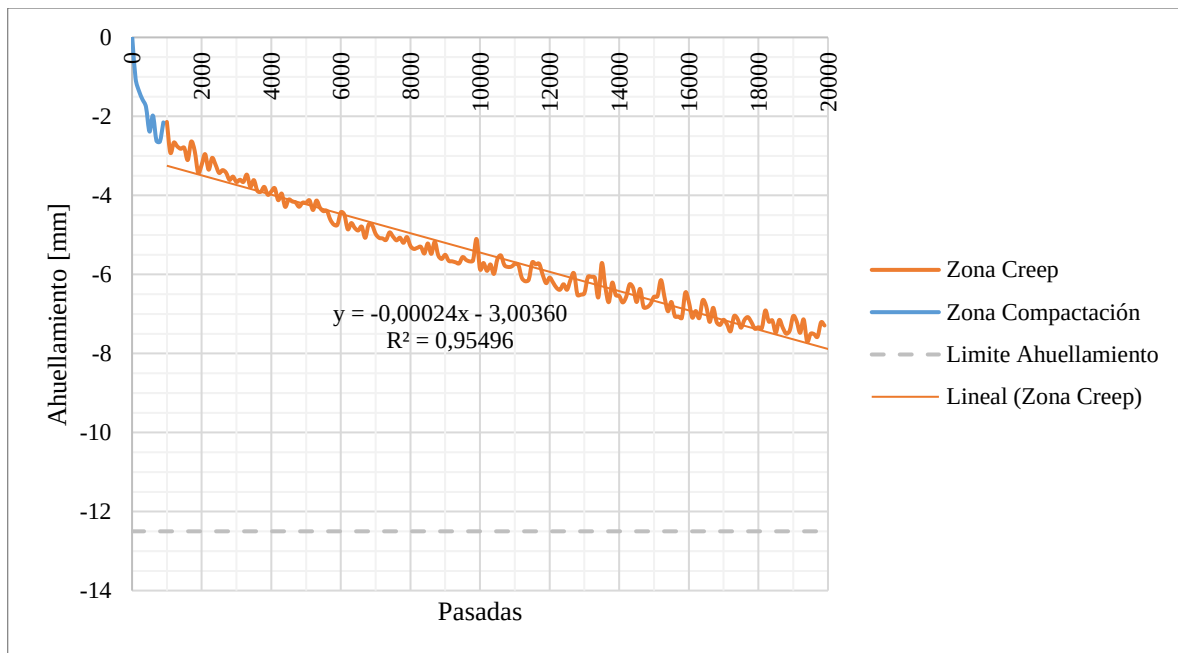
Perfiles de ahuellamiento para distinto número de pasadas para el ensayo N°15: Mezcla M-10 –Asfalto modificado-Proveedor E1-Probeta 3. Fuente: Elaboración propia



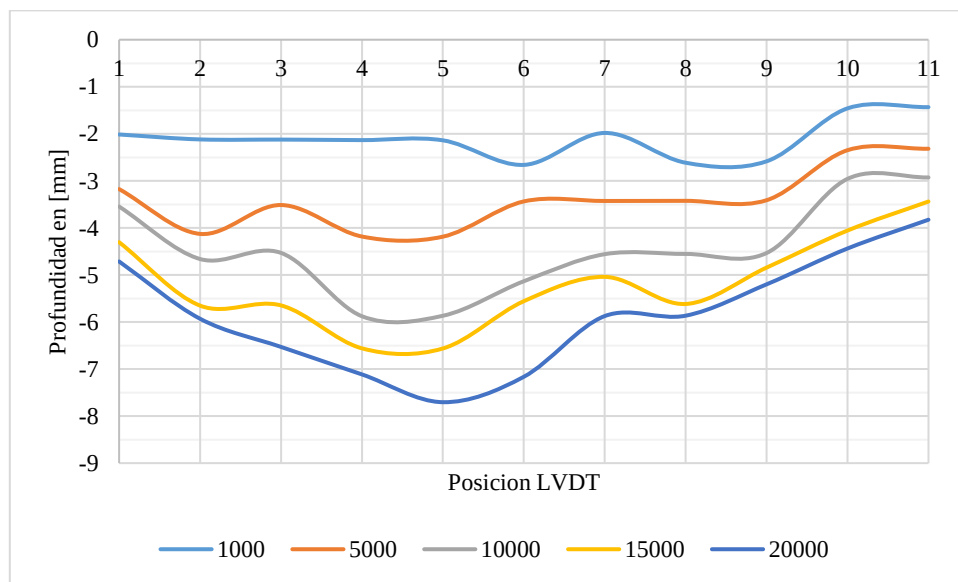
Curva ahuellamiento para el ensayo N°16: Mezcla M-10 –Asfalto modificado-Proveedor E2-Probeta 1.
Fuente: *Elaboración propia.*



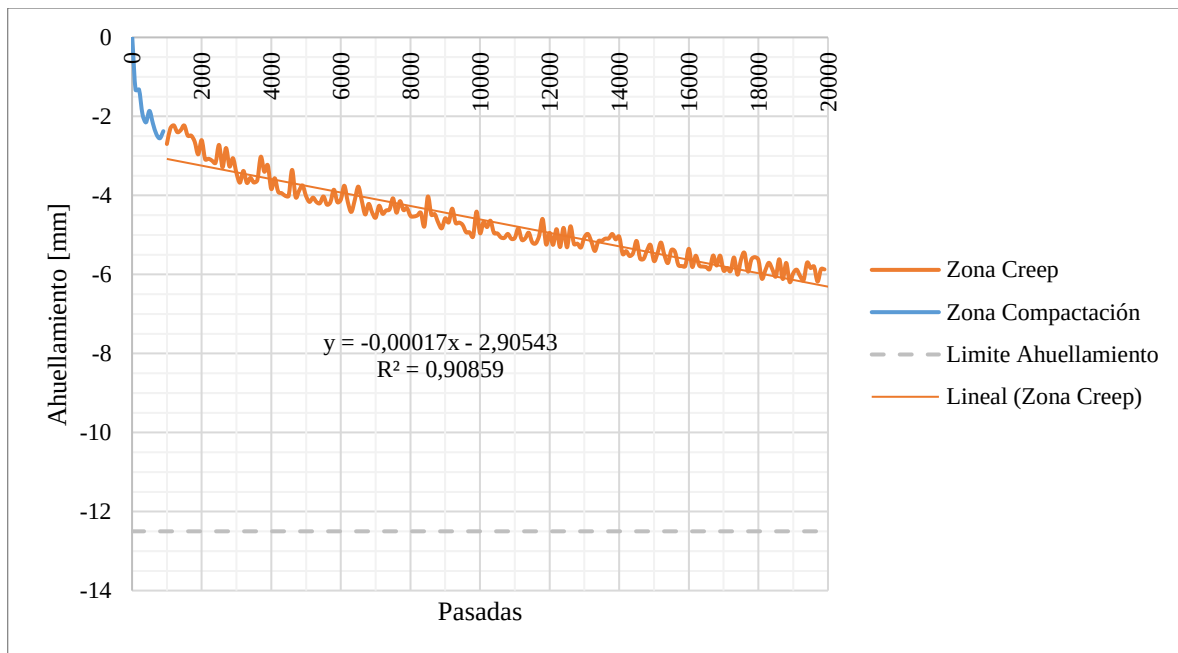
Perfiles de ahuellamiento para distinto número de pasadas para el ensayo N°16: Mezcla M-10 –Asfalto modificado-Proveedor E2-Probeta 1. Fuente: *Elaboración propia*



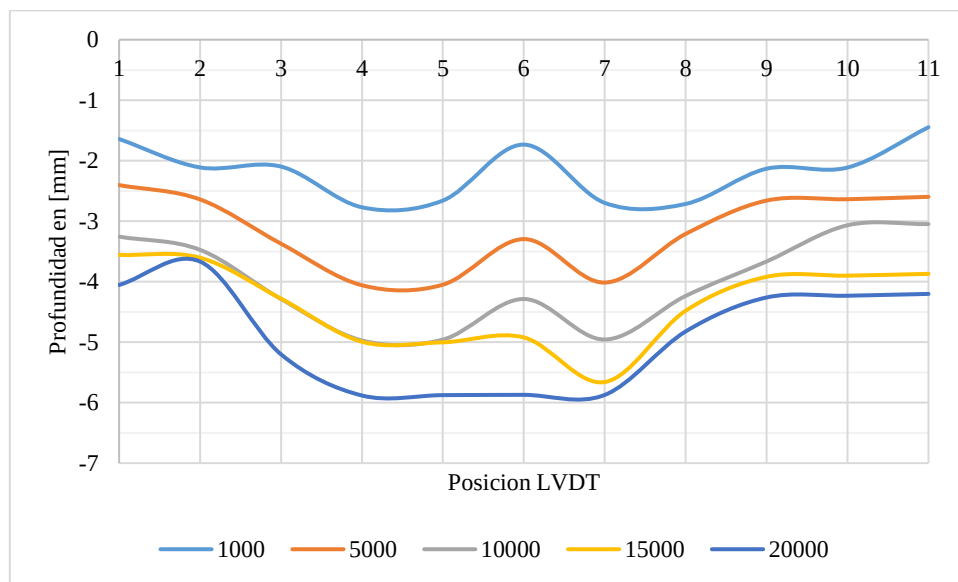
Curva ahuellamiento para el ensayo N°17: Mezcla M-10 –Asfalto modificado-Proveedor E2-Probeta 2.
Fuente: Elaboración propia.



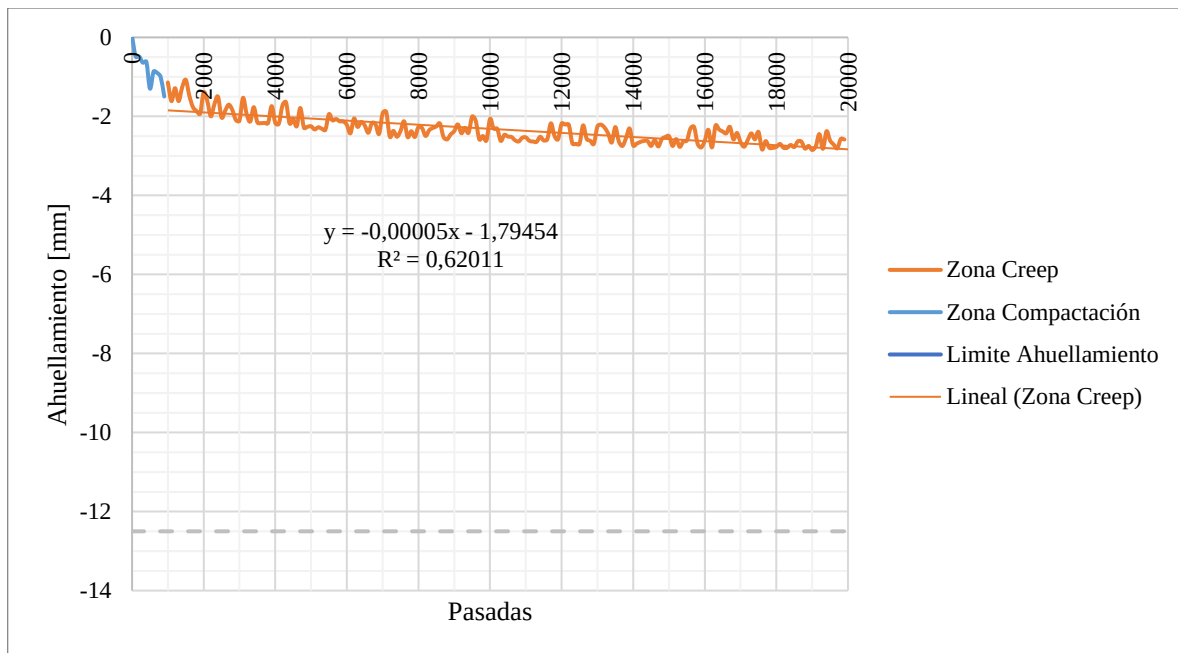
Perfiles de ahuellamiento para distinto número de pasadas para el ensayo N°17: Mezcla M-10 –Asfalto modificado-Proveedor E2-Probeta 2. Fuente: Elaboración propia



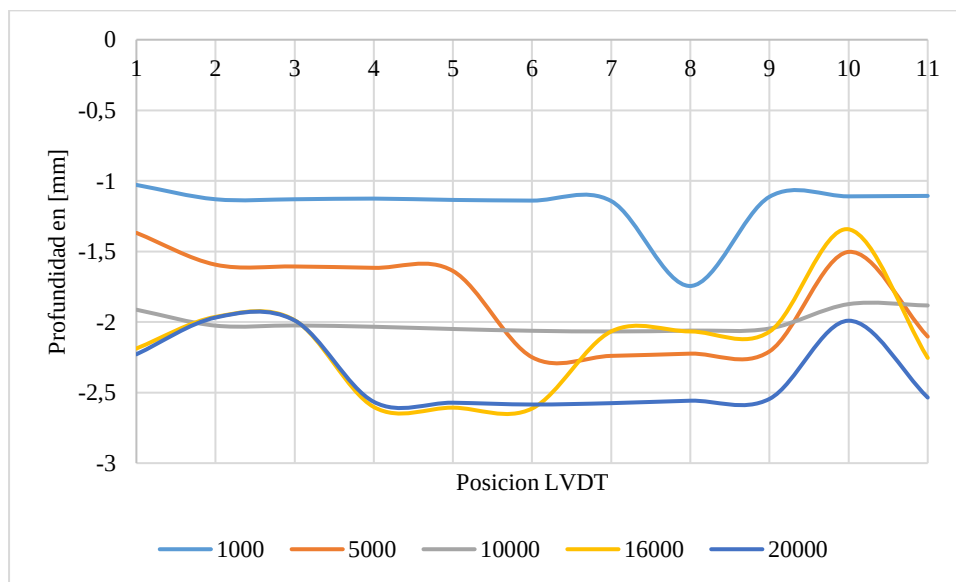
Curva ahuellamiento para el ensayo N°18: Mezcla M-10 –Asfalto modificado-Proveedor E2-Probeta 3.
Fuente: Elaboración propia.



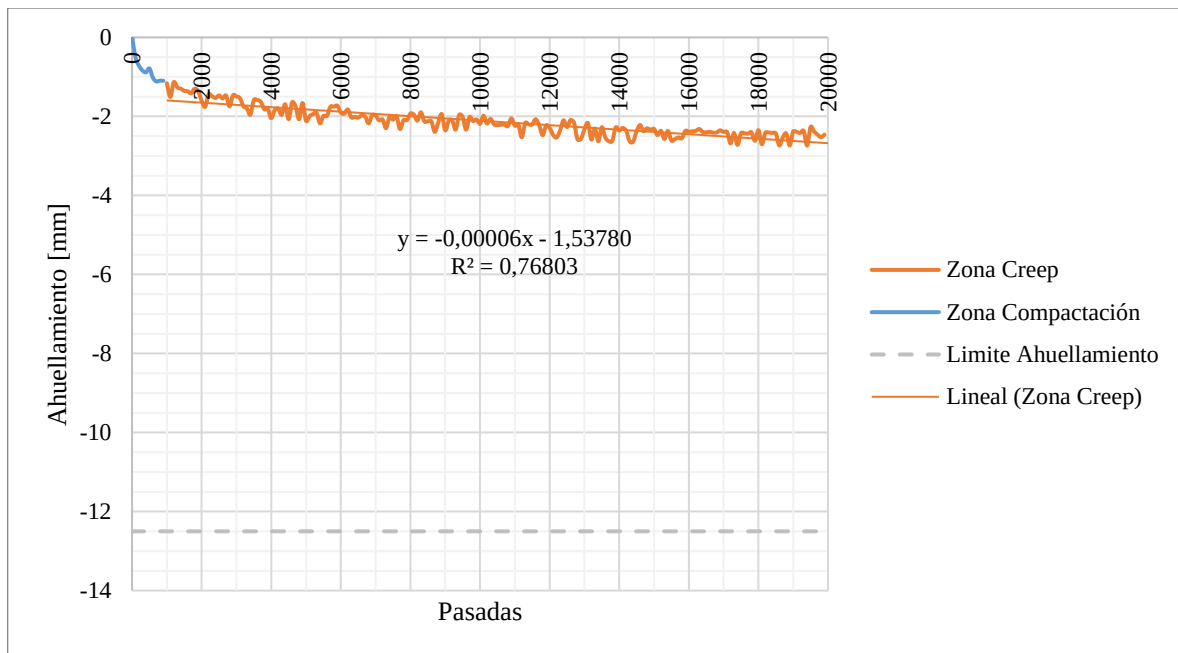
Perfiles de ahuellamiento para distinto número de pasadas para el ensayo N°18: Mezcla M-10 –Asfalto modificado-Proveedor E2-Probeta 3. Fuente: Elaboración propia



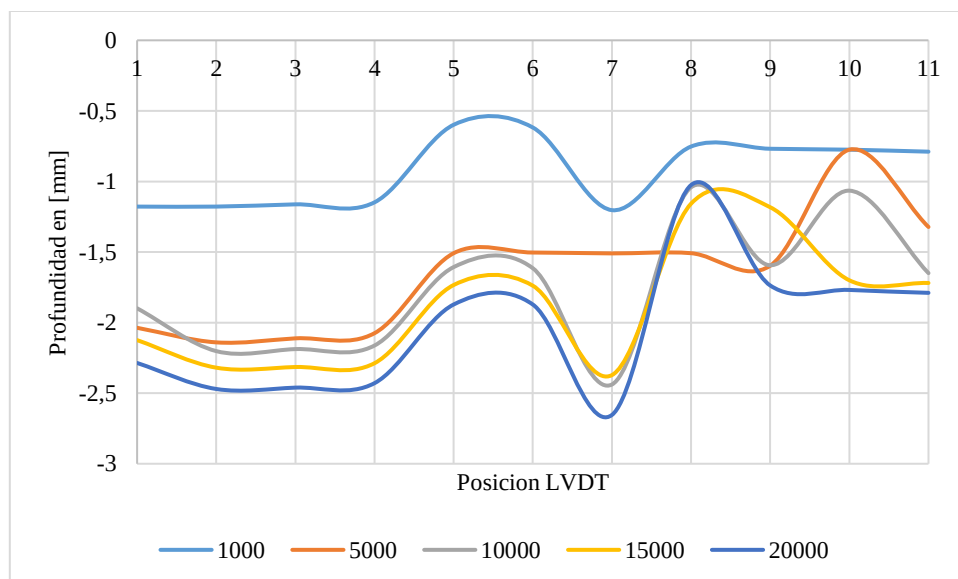
Curva ahuellamiento para el ensayo N°19: Mezcla SMA –Asfalto modificado-Proveedor E1-Probeta 1.
Fuente: *Elaboración propia.*



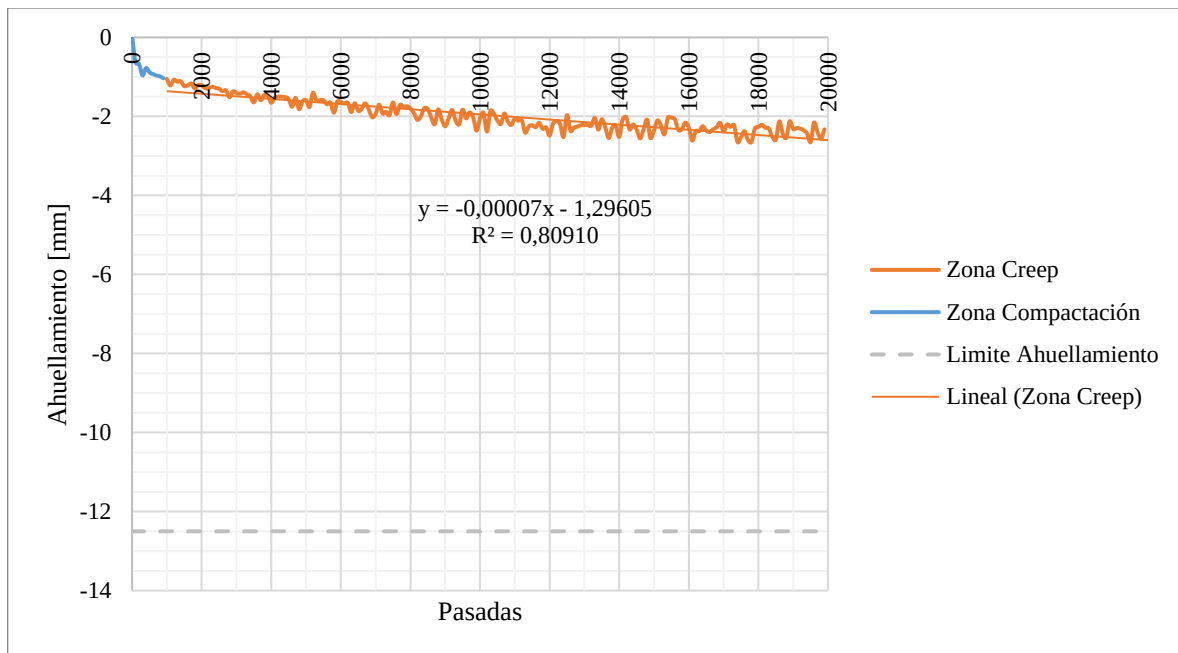
Perfiles de ahuellamiento para distinto número de pasadas para el ensayo N°19: Mezcla SMA –Asfalto modificado-Proveedor E1-Probeta 1. Fuente: *Elaboración propia*



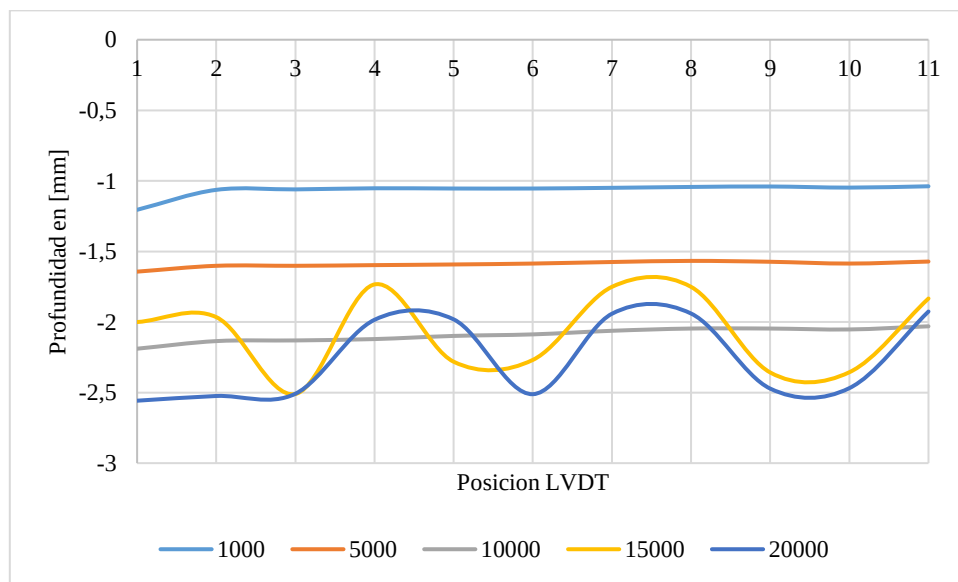
Curva ahuellamiento para el ensayo N°20: Mezcla SMA –Asfalto modificado-Proveedor E1-Probeta 2.
Fuente: Elaboración propia.



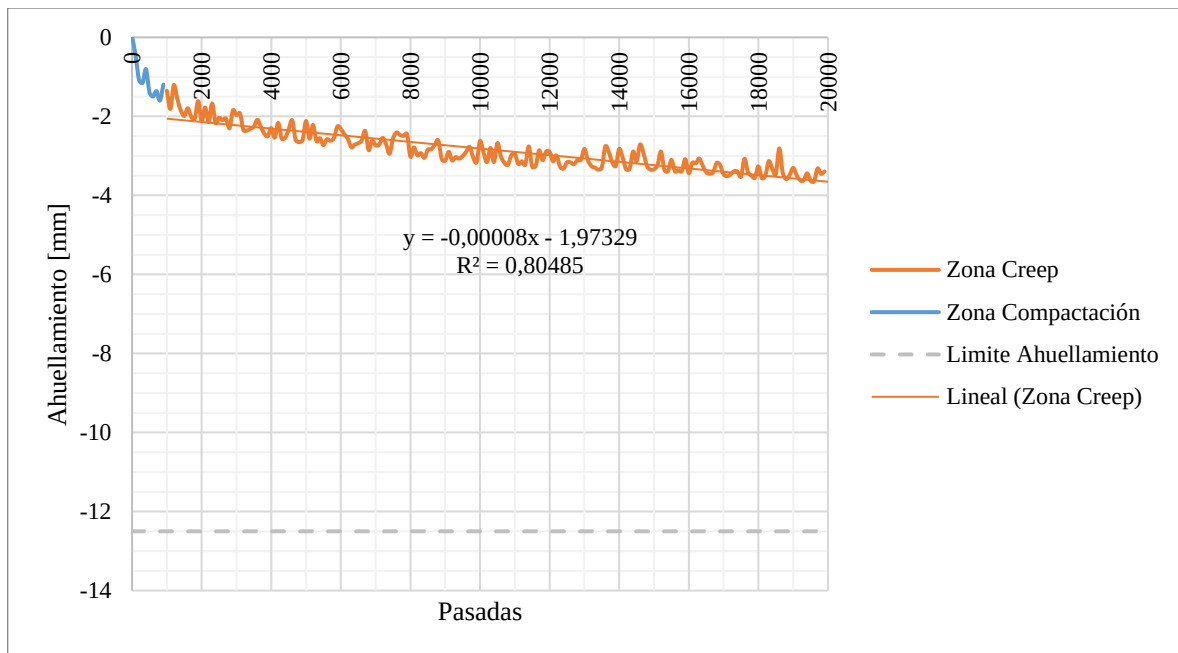
Perfiles de ahuellamiento para distinto número de pasadas para el ensayo N°20: Mezcla SMA –Asfalto modificado-Proveedor E1-Probeta 2. Fuente: Elaboración propia



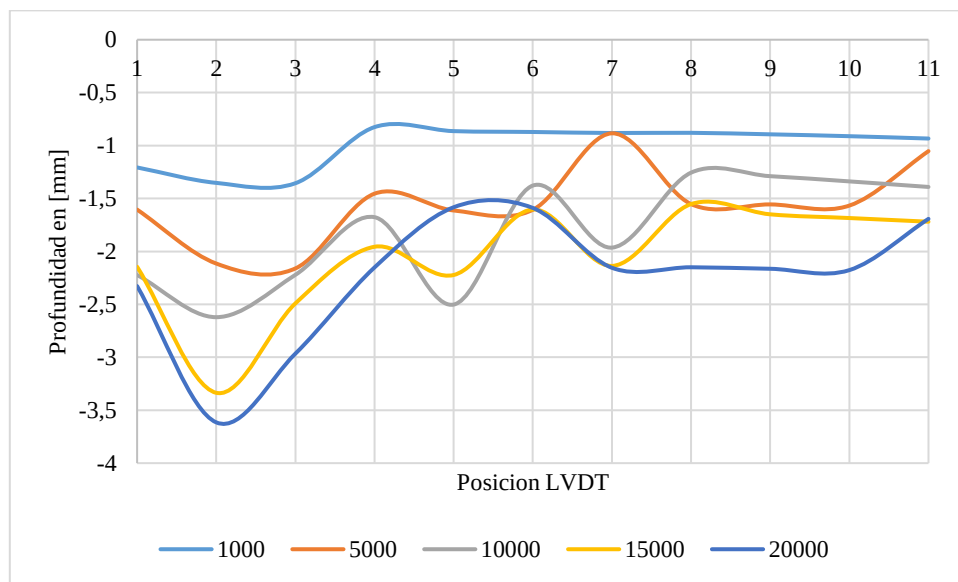
Curva ahuellamiento para el ensayo N°21: Mezcla SMA –Asfalto modificado-Proveedor E1-Probeta 3.
Fuente: *Elaboración propia.*



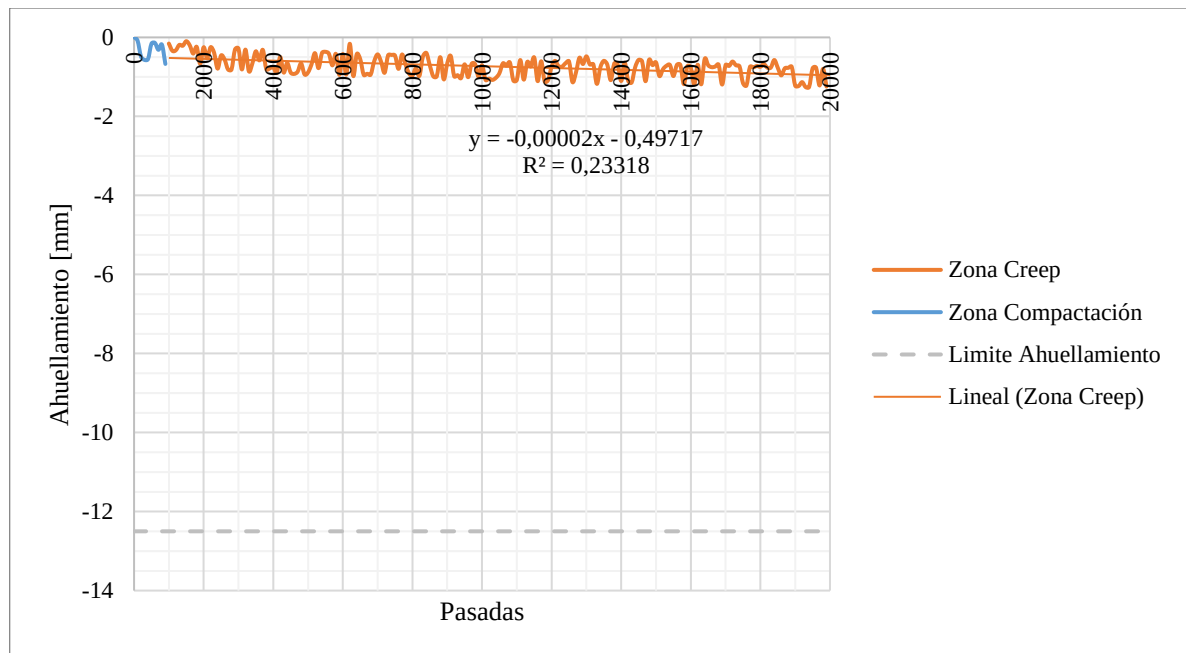
Perfiles de ahuellamiento para distinto número de pasadas para el ensayo N°21: Mezcla SMA –Asfalto modificado-Proveedor E1-Probeta 3. Fuente: *Elaboración propia*



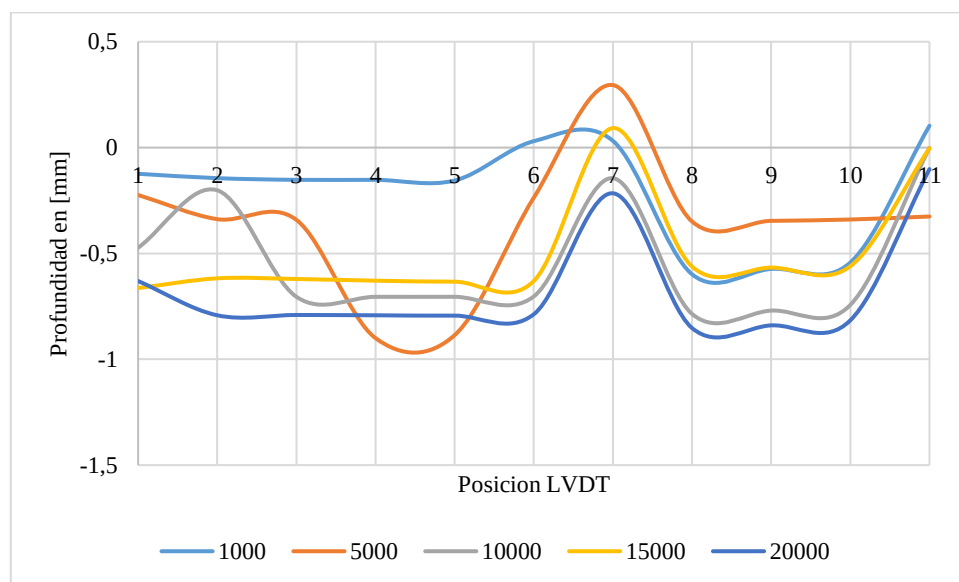
Curva ahuellamiento para el ensayo N°22: Mezcla SMA –Asfalto modificado-Proveedor E2-Probeta 1.
Fuente: Elaboración propia.



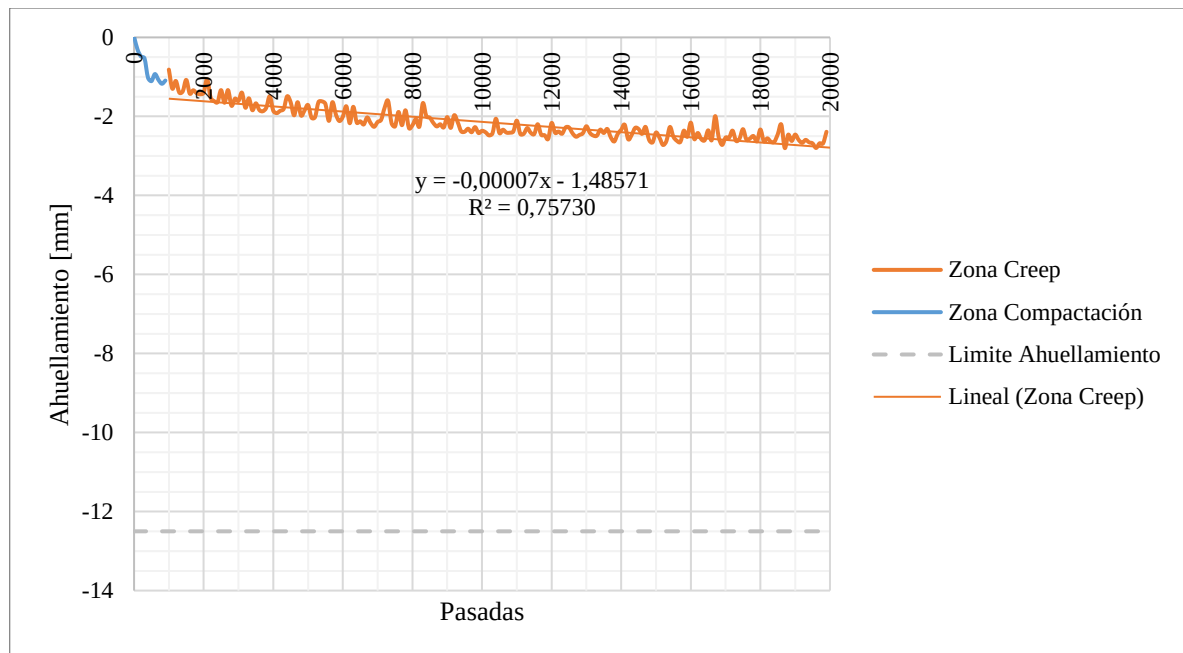
Curva ahuellamiento para el ensayo N°22: Mezcla SMA –Asfalto modificado-Proveedor E2-Probeta 1.
Fuente: Elaboración propia.



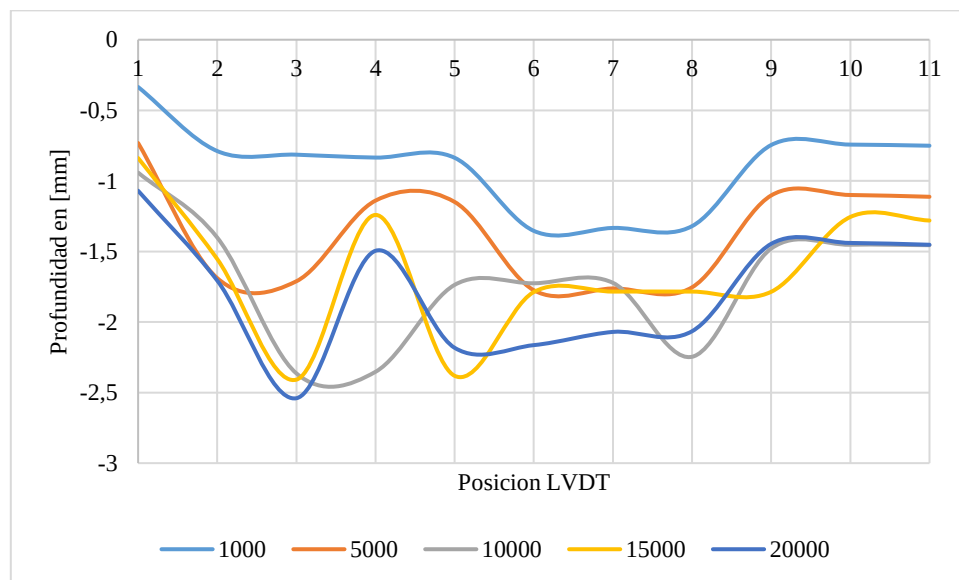
Curva ahuellamiento para el ensayo N°23: Mezcla SMA –Asfalto modificado-Proveedor E2-Probeta 2.
Fuente: *Elaboración propia.* (ensayo descartado)



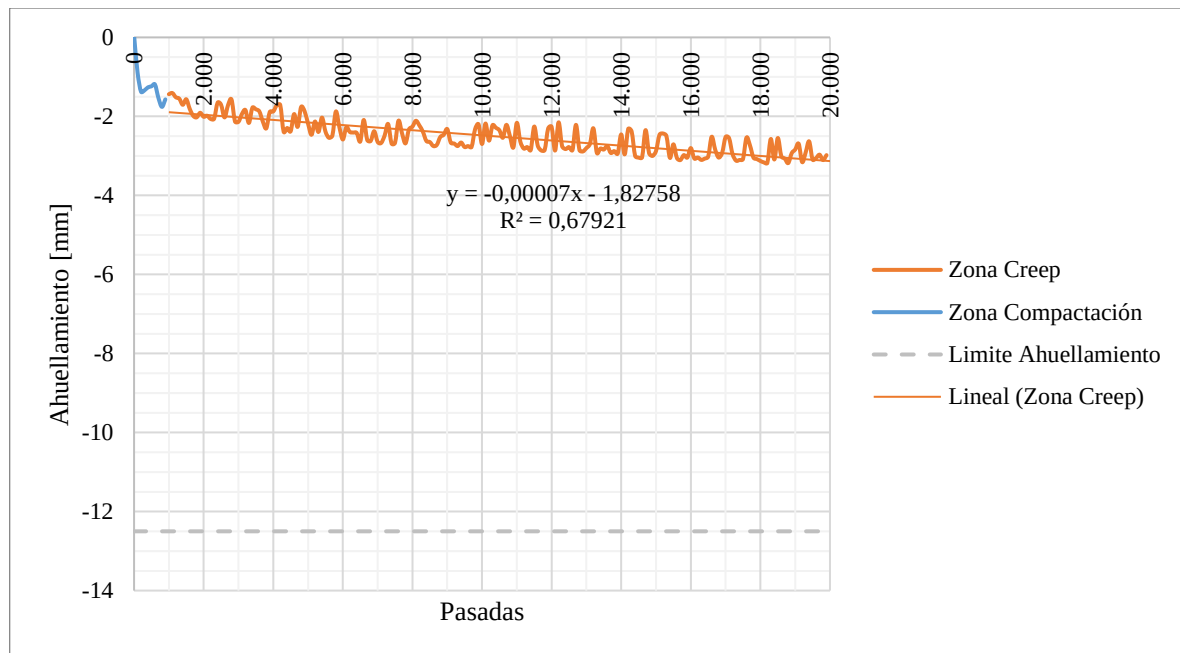
Curva ahuellamiento para el ensayo N°23: Mezcla SMA –Asfalto modificado-Proveedor E2-Probeta 2.
Fuente: *Elaboración propia.* (ensayo descartado)



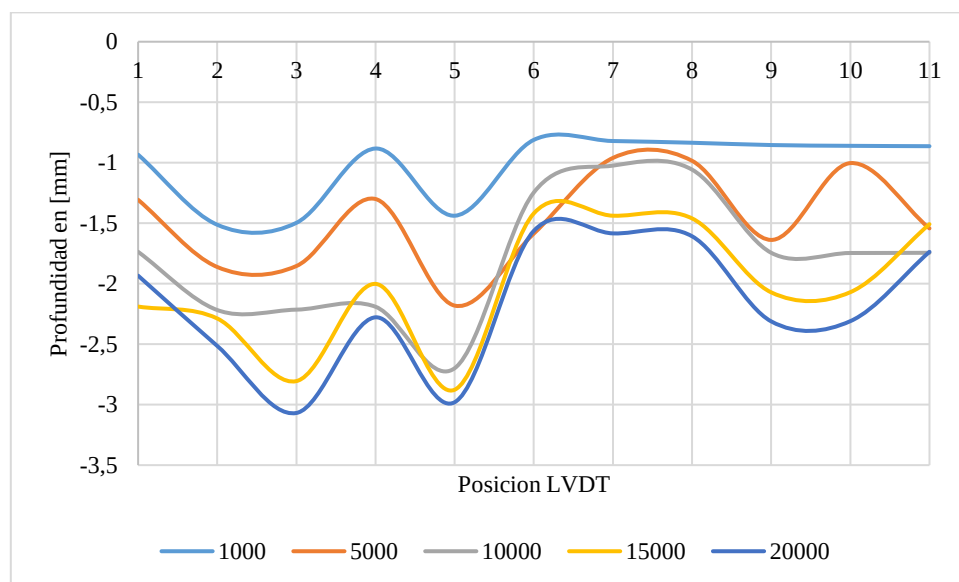
Curva ahuellamiento para el ensayo N°24: Mezcla SMA –Asfalto modificado-Proveedor E2-Probeta 3.
Fuente: Elaboración propia.



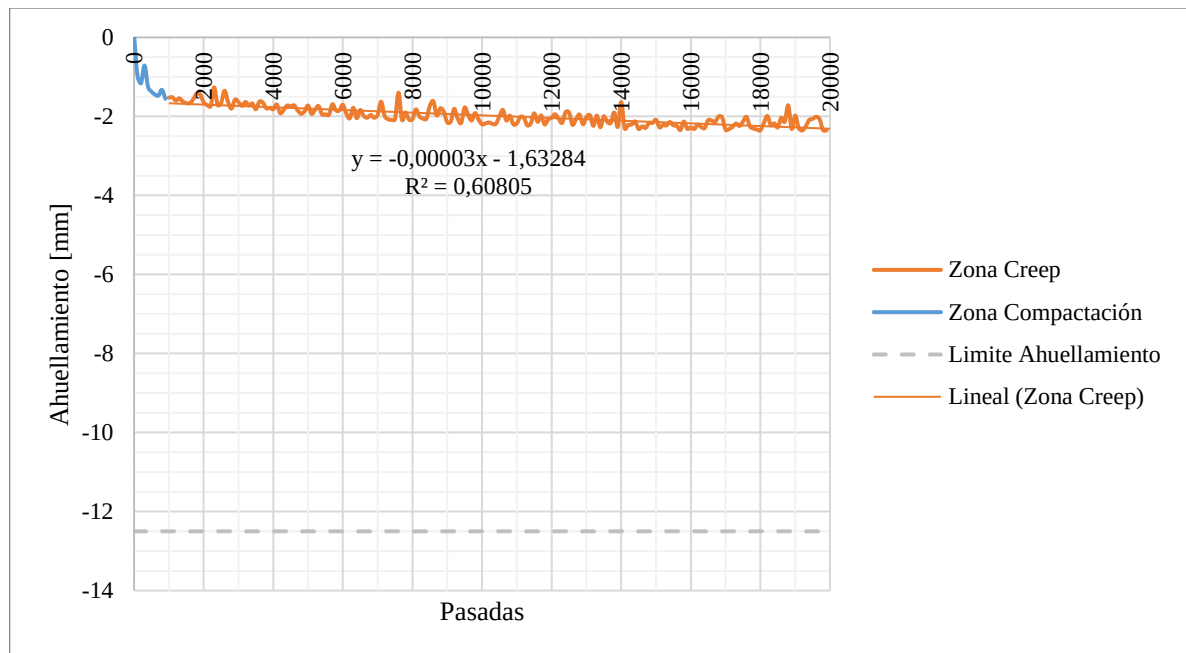
Curva ahuellamiento para el ensayo N°24: Mezcla SMA –Asfalto modificado-Proveedor E2-Probeta 3.
Fuente: Elaboración propia.



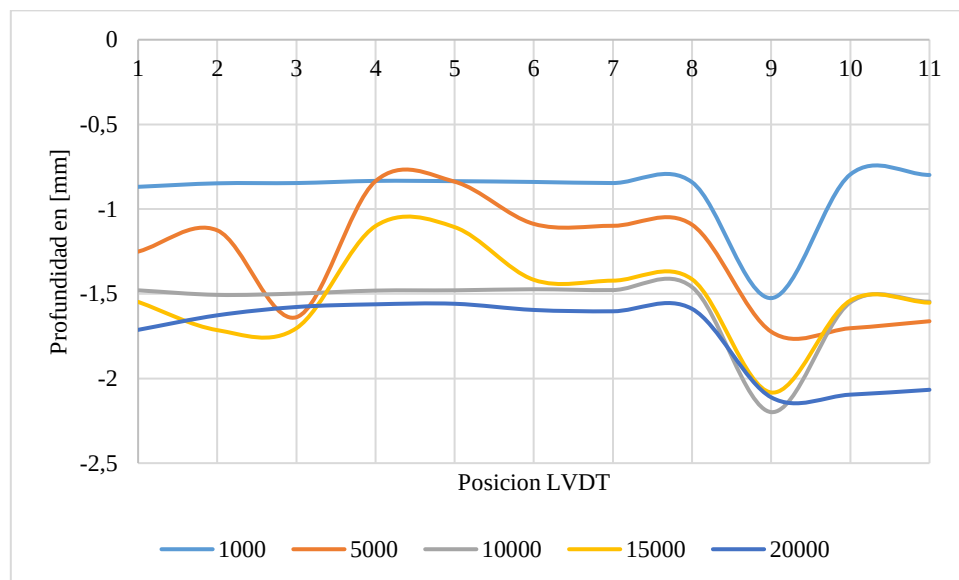
Curva ahuellamiento para el ensayo N°25: Mezcla USM –Asfalto modificado-Proveedor E1-Probeta 1.
Fuente: Elaboración propia.



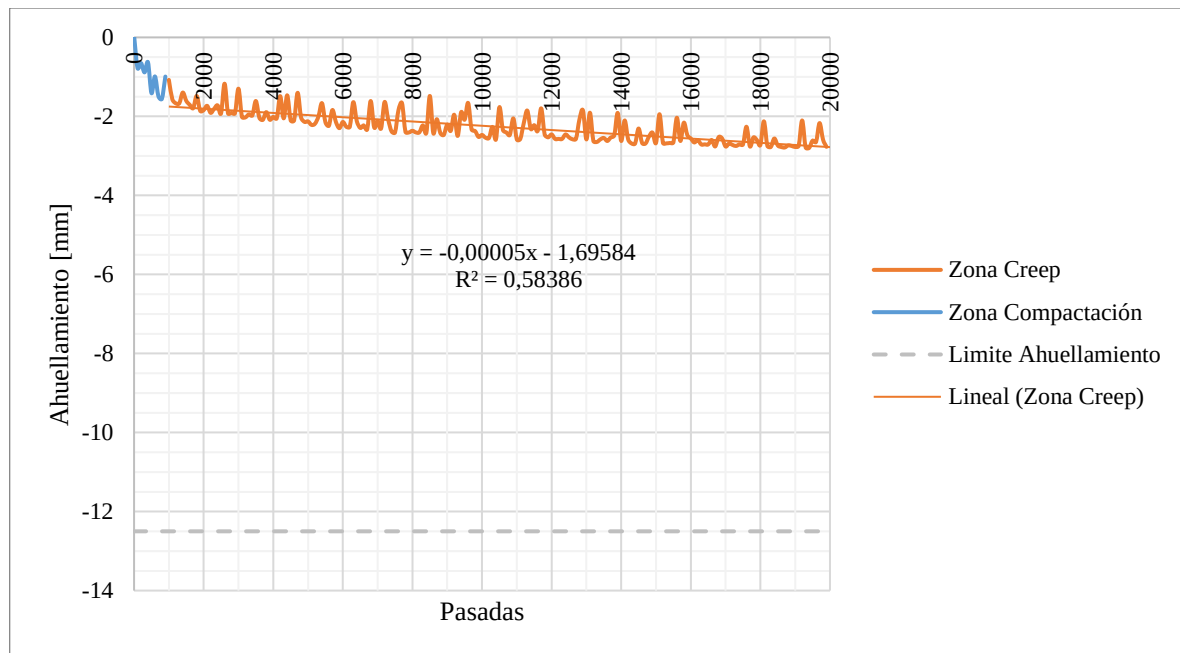
Curva ahuellamiento para el ensayo N°25: Mezcla USM –Asfalto modificado-Proveedor E1-Probeta 1.
Fuente: Elaboración propia.



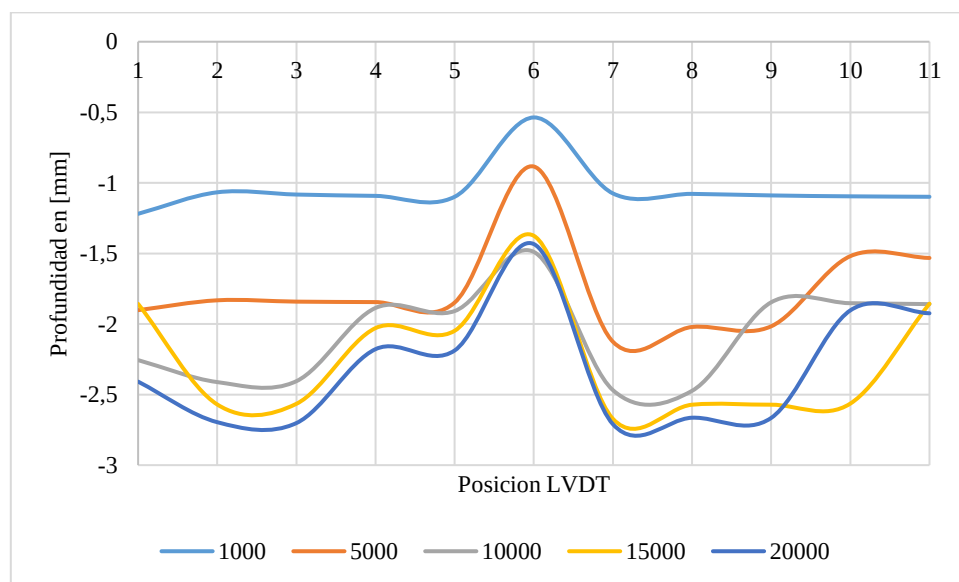
Curva ahuellamiento para el ensayo N°26: Mezcla USM –Asfalto modificado-Proveedor E1-Probeta 2.
Fuente: Elaboración propia.



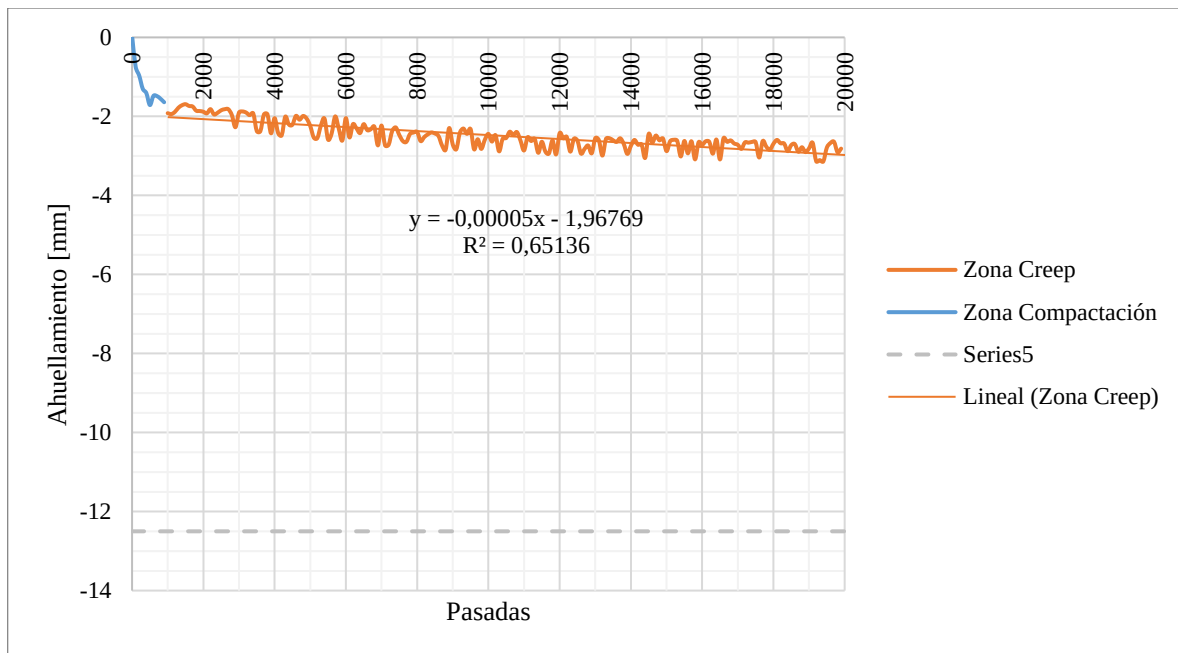
Curva ahuellamiento para el ensayo N°26: Mezcla USM –Asfalto modificado-Proveedor E1-Probeta 2.
Fuente: Elaboración propia.



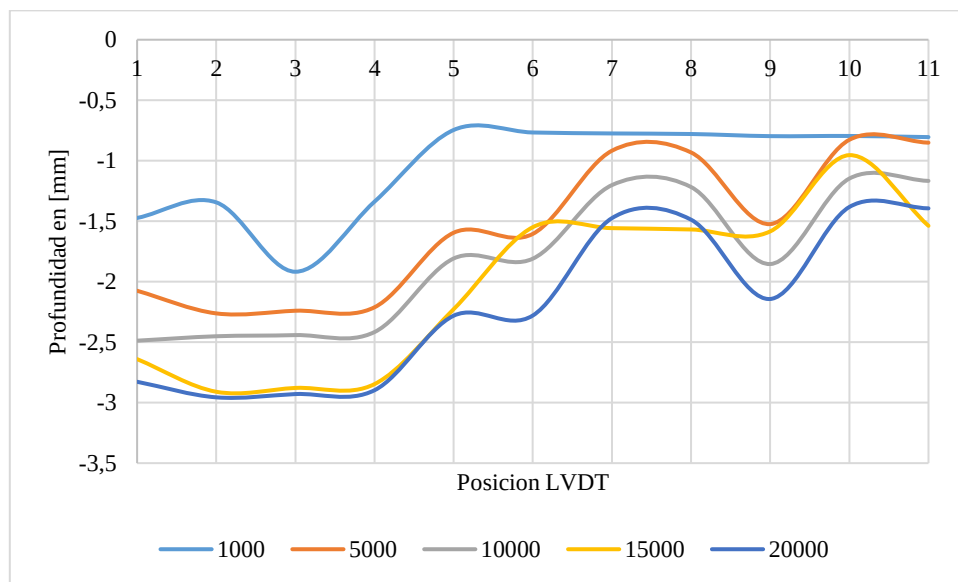
Curva ahuellamiento para el ensayo N°27: Mezcla USM –Asfalto modificado-Proveedor E1-Probeta 3.
Fuente: Elaboración propia.



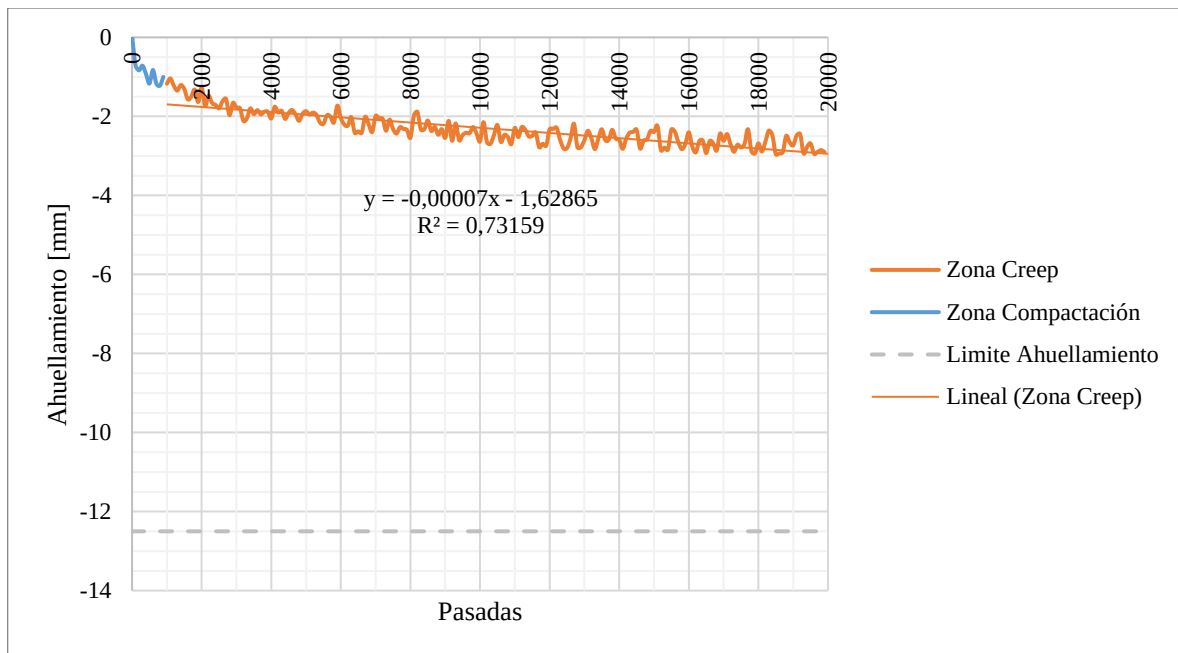
Curva ahuellamiento para el ensayo N°27: Mezcla USM –Asfalto modificado-Proveedor E1-Probeta 3.
Fuente: Elaboración propia.



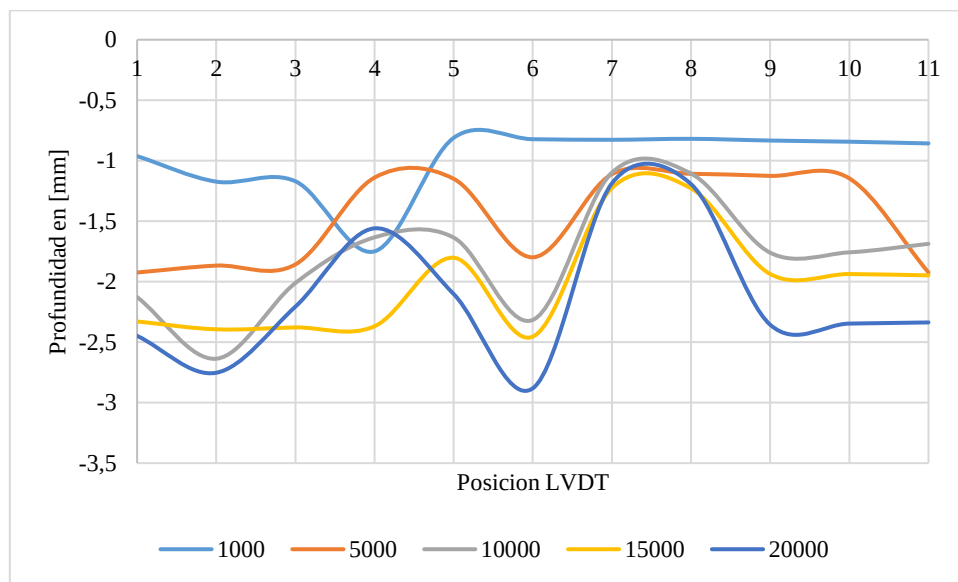
Curva ahuellamiento para el ensayo N°28: Mezcla USM –Asfalto modificado-Proveedor E2-Probeta 1.
Fuente: Elaboración propia.



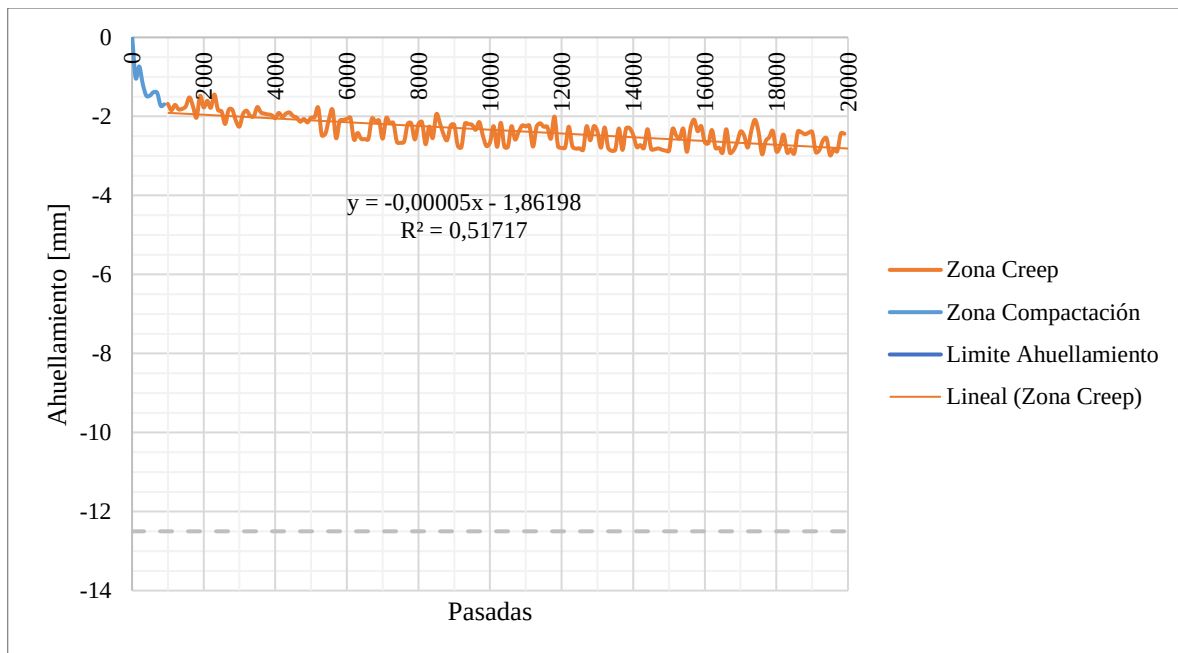
Curva ahuellamiento para el ensayo N°28: Mezcla USM –Asfalto modificado-Proveedor E2-Probeta 1.
Fuente: Elaboración propia.



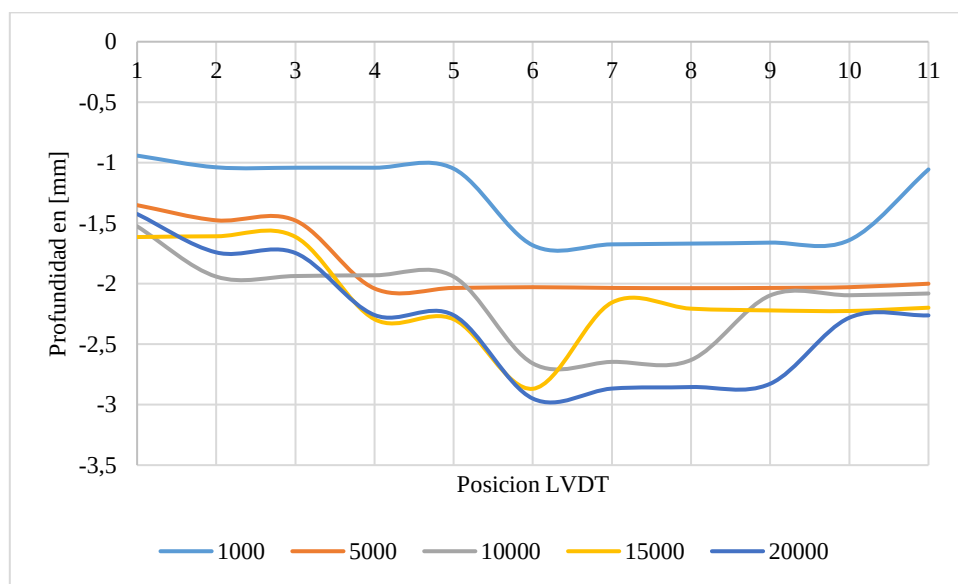
Curva ahuellamiento para el ensayo N°29: Mezcla USM –Asfalto modificado-Proveedor E2-Probeta 2.
Fuente: Elaboración propia.



Curva ahuellamiento para el ensayo N°29: Mezcla USM –Asfalto modificado-Proveedor E2-Probeta 2.
Fuente: Elaboración propia



Curva ahuellamiento para el ensayo N°30: Mezcla USM –Asfalto modificado-Proveedor E2-Probeta 3.
Fuente: Elaboración propia.



Curva ahuellamiento para el ensayo N°30: Mezcla USM –Asfalto modificado-Proveedor E2-Probeta 3.
Fuente: Elaboración propia

Anexo B

Evolución Norma AASHTO 324

A continuación, se especifican los puntos en los que se generan cambios significativos entre las normas T-324 publicadas los años 2011, 2014 y 2017. los numerales indicados en este anexo se refieren al numeral del año 2011 y las notas explican las incorporaciones o cambios realizados en las normas posteriores.

Revisión:

1. Scope

AASHTO T324-14: Cambia el término “hot mix Asphalt” por “Asphalt mixture” ampliando el alcance del método de ensayo

2.2. ASTM Standards

AASHTO T324-14: Incorpora el estándar ASTM D 6027, Standard Test Method for Calibrating Linear Displacement Transducers for Geotechnical Purposes (withdrawn 2013)

4.1 Summary of Method

AASHTO T324-14: Saca la restricción de las temperaturas y lo deja al criterio de la agencia.

5.1 Hamburg Wheel Tracking Device

AASHTO T324-14: Incorpora una tolerancia en el tamaño de la rueda de 2mm

5.3 Impression Measurement System

AASHTO T324-14: Especifica que el dispositivo de medición debe ser capaz de medir cerca del punto medio de circulación de la rueda con una tolerancia de 0,5 pulgadas.

5.6 Cylindrical Specimen Mounting System

AASHTO T324-14: Especifica que la máxima separación entre los moldes de HDPE debe ser 7,5 mm.

6.3 Field-Produced HMA—Loose Mix:

AASHTO T324-17: Se eliminan los puntos 6.3.1 6.3.2 y se referencia las dimensiones de la probeta al numeral 6.2.6

6.4 Field-Produced HMA—Field Compacted (Core/Slab Specimen):

AASHTO T324-17: Se sugiere el uso de una plantilla para cortar los especímenes de forma consistente.

7.3 Determine the air void content

AASHTO T324-17: Se restringe la tolerancia en el vacío de aire objetivo a 0,5% para las probetas fabricadas con el SGC y 1,0% para probetas con forma de placa.

8.2 SGC Cylindrical and Field Core Specimen Mounting

AASHTO T324-17: Da la opción de fijar las probetas SGC al sistema de montaje con yeso.

8.6 Enter the pertinent project information and testing configuration requirements.

AASHTO T324-17: Aumenta el tiempo de acondicionamiento a 45 min.

8.8 . Performing the Test in Auto Mod

AASHTO T324-14: Limita el tiempo máximo de acondicionamiento de la probeta a 60 minutos y se especifica que la rueda debe bajarse antes de 5 minutos antes de comenzar la prueba

9.1 . Resultados

AASHTO T324-14: Se indica que los resultados del ensayo se deben ser expresados como el promedio de las dos probetas ensayadas.