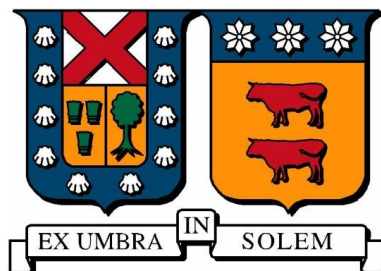


**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO – CHILE**



CALIBRACIÓN DE MODELOS PREDICTIVOS PARA MÓDULO DINÁMICO Y FATIGA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CHILENAS

Memoria de titulación presentada por
Sofía Margarita Monsalve Coria

Como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil

Profesor Guía
Rodrigo Delgadillo Sturla.

Julio de 2019

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi profesor guía por tener la confianza en mí para desarrollar este trabajo de investigación y actividades docentes donde tuve la suerte de acompañarlo como ayudante.

Agradecer a mi familia, pilar fundamental para llegar a donde estoy hoy. Mi madre, con su templanza y fuerza única que me acompañó durante toda la carrera, mi padre que sembró en mi la idea de lograr ser un ingeniero y hoy me acompaña espiritualmente, a mi hermana que siempre me ha entregado más de lo que he necesitado.

A mi novio, que ha estado siempre a mi lado, gracias por construir conmigo todo lo que somos hoy, estoy segura de que la vida nos tiene preparado mucho más! A su familia, que hoy es mi familia también gracias por hacerme sentir una más entre ustedes y alentarme con énfasis a terminar esta última parte.

A mis amigos, que son la mejor compañía que pude encontrar para recorrer esta etapa y compartir la vida, Sebastián, Felipe, Rodrigo, Luciano y Pedro, agradezco que la vida los pusiera cerca mío. A Pablo y Víctor por ser los tremendos amigos y estar siempre.

Especialmente quiero agradecer a mi amigo Ricardo Muñoz, por toda la paciencia que tuvo para ayudarme a concretar este proceso, ayudándome con su conocimiento para hacer que esta parte de la carrera fuera más fácil.

Finalmente, agradecer a Alejandra Zamora por la buena voluntad, cariño y dedicación con que recopiló todos los datos que necesité para llevar a cabo esta investigación.

DEDICATORIA

*A mi padre, arquitecto de sus sueños y
del camino que me trajo hasta donde estoy hoy.*

RESUMEN

El presente documento corresponde al trabajo de titulación desarrollado por Sofía Monsalve Coria, como requisito para optar al título de Ingeniero Civil de la Universidad Técnica Federico Santa María. Se presenta la recopilación de resultados de ensayos de mezclas asfálticas en caliente disponibles de los proyectos e investigaciones realizados en laboratorio LEMCO. Luego, con los resultados disponibles se realiza el análisis para la predicción del módulo dinámico y fatiga de mezclas asfálticas en caliente.

El desarrollo de análisis para fatiga presente en este documento corresponde al estudio y calibración de la ecuación entregada por la guía de diseño de pavimentos empírico mecanicista, se plantea una adaptación a dicha ecuación para mejorar la predicción de vida de fatiga incorporando la amplitud térmica. Posterior a la calibración se presenta la incorporación de las constantes de calibración local de fatiga en la guía de diseño de pavimentos empírico mecanicista.

En cuanto a módulo dinámico se presenta el análisis de las ecuaciones predictivas de Witczak (Original y Modificado) y de Hirsch. Para esta predicción se incorpora el módulo de corte dinámico del ligante en sus tres estados: original y envejecido con HPDR y PAV. El análisis termina con la calibración del modelo de Hirsch, que es el que presenta mejores correlaciones entre valor medido y estimado.

Finalmente, las calibraciones de módulo dinámico y fatiga se validan mediante el método estadístico Jack-Knife.

ABSTRACT

The following document presents the civil engineering undergraduate thesis of Sofía Monsalve Coria from the Federico Santa María University. This document provides a compilation of asphalt related laboratory tests from investigations and projects developed by LEMCO. Then, an extend analysis for the prediction of the dynamic modulus and fatigue is made with the available results.

The development of fatigue analysis present in this document corresponds to the study and calibration of the equation provided by the mechanistic-empirical pavement design guide, and an adaptation of this equation used to improve the prediction of the allowable number of axle-load application to fatigue failure adding the thermic amplitude as a new parameter. The field calibration constants for fatigue are then included in the mechanistic-empirical pavement design guide software.

As for the dynamic modulus the analysis of Witczak's (Original and modified) and Hirsch predictive equations is presented. For this prediction the dynamic shear modulus of the asphalt is incorporated in three states: Original and aged with HPDR and PAV. Then the Hirsch model is calibrated due to its higher correlation between the predicted and the obtained results.

Finally, the calibrations are validated by a Jack Knife statistic method.

GLOSARIO

| | | |
|--------------|---|---|
| AASHTO | : | American Association of State Highway and Transportation Officials. |
| ASTM | : | American Society for Testing and Materials. |
| BBR | : | Bending Beam Reometer. |
| CBR | : | California Bearing Ratio. |
| DDT | : | Direct Tensile Test. |
| $ E^* $ | : | Módulo dinámico. |
| ϵ_0 | : | Deformación inicial. |
| FONDEF | : | Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico. |
| $ G^* $ | : | Módulo de corte dinámico del asfalto. |
| HMA | : | Hot Mix Asphalt. |
| HPDR | : | Horno película delgada rotatoria. |
| LEMCO: | | Laboratorio de ensayos de materiales y control de obras. |
| LVDT | : | Linear variable differential transformer. |
| LNV | : | Laboratorio Nacional de Vialidad – Ministerio de Obras Públicas. |
| MEPDG: | | Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide. |

| | | |
|-----------|---|---|
| M-10 | : | Microaglomerado en caliente. |
| NCHRP | : | National Cooperative Highway Research Program |
| PAV | : | Pressure Aging Vessel. |
| PG | : | Superpave Performance Grading. |
| SUPERPAVE | : | Superior Performing Asphalt Pavements. |
| SMA | : | Stone Mastic Asphalt. |
| UNE-EN | : | Norma española con estándares europeos. |

| | |
|---------------|---|
| ÍNDICE | |
| 1 | INTRODUCCIÓN.....1 |
| 1.1 | ANTECEDENTES GENERALES.....1 |
| 1.2 | OBJETIVOS DE ESTUDIO2 |
| 1.2.1 | Objetivos Generales..... 2 |
| 1.2.2 | Objetivos Específicos 3 |
| 1.3 | ALCANCES DE ESTUDIO3 |
| 1.4 | METODOLOGÍA DE TRABAJO.....4 |
| 1.5 | ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.....6 |
| 1.5.1 | Capítulo 1: Introducción..... 6 |
| 1.5.2 | Capítulo 2: Revisión Bibliográfica 6 |
| 1.5.3 | Capítulo 3: Proceso experimental y resultados de laboratorio..... 6 |
| 1.5.4 | Capítulo 4: Modelos de predicción para fatiga..... 6 |
| 1.5.5 | Capítulo 5: Modelos de predicción para módulo dinámico 6 |
| 1.5.6 | Capítulo 6: Aplicación de la calibración en la Guía de Diseño MEPDG 6 |
| 1.5.7 | Capítulo 7: Conclusiones y Recomendaciones..... 6 |
| 2 | REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA7 |
| 2.1 | MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE7 |
| 2.1.1 | Ligantes Asfálticos 7 |
| 2.1.2 | Áridos..... 8 |
| 2.2 | GUÍA EMPÍRICO MECANICISTA9 |
| 2.2.1 | Metodologías de predicción 9 |
| 2.3 | CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS A PARTIR DEL MÓDULO DINÁMICO 10 |
| 2.3.1 | Definición de Módulo Dinámico 10 |
| 2.3.2 | Ecuaciones predictivas para el módulo dinámico..... 12 |
| 2.3.3 | Curvas maestras y factores de corrimiento 17 |
| 2.4 | FATIGA.....22 |
| 2.4.1 | Ecuación Predictiva MEPDG..... 24 |
| 2.5 | VALIDACIÓN ESTADÍSTICA SEGÚN MÉTODO JACK KNIFE27 |
| 2.5.1 | Descripción del método..... 28 |
| 3 | PROCESO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS DE LABORATORIO 31 |
| 3.1 | MEZCLAS ASFÁLTICAS31 |
| 3.1.1 | Mezclas fabricadas en laboratorio FONDEF D09I1174 31 |
| 3.1.2 | Mezclas en pistas de prueba FONDEF D09I1174 34 |
| 3.1.3 | Mezclas con RAP 37 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 3.1.4 | Mezcla para Aeropuerto | 39 |
| 3.2 | FATIGA..... | 40 |
| 3.2.1 | Mezclas fabricadas en laboratorio FONDEF D09I1174 | 40 |
| 3.2.2 | Mezclas en pistas de prueba FONDEF D09I1174 | 42 |
| 3.2.3 | Mezclas con RAP | 45 |
| 3.2.4 | Mezcla para aeropuerto | 47 |
| 3.3 | MÓDULO DINÁMICO | 49 |
| 3.3.1 | Mezclas fabricadas en laboratorio FONDEF D09I1174 | 49 |
| 3.3.2 | Mezclas en pistas de prueba FONDEF D09I1174 | 56 |
| 3.3.3 | Mezclas con RAP | 62 |
| 3.3.4 | Mezcla para aeropuerto | 66 |
| 4 | MODELOS DE PREDICCIÓN PARA EL ANÁLISIS DE FATIGA..... | 68 |
| 4.1 | ENFOQUE FENOMENOLÓGICO | 68 |
| 4.2 | MODELOS PREDICTIVOS MEDPG | 74 |
| 4.2.1 | Un set de constantes para cada mezcla | 77 |
| 4.2.2 | Un set de constante para el conjunto de mezclas..... | 79 |
| 4.2.3 | Amplitud Térmica como un criterio para agrupar mezclas..... | 82 |
| 4.2.4 | Amplitud Térmica como una nueva variable..... | 87 |
| 4.3 | VALIDACIÓN DE CALIBRACIÓN POR MEDIO DE JACK – KNIFE | 100 |
| 4.3.1 | Dentro del parámetro β_1 se incorpora la amplitud como una nueva variable para calibrar, de forma lineal a las variables explicativas originalmente incluidas. | 100 |
| 4.3.2 | Eliminando la variable explicativa E y el parámetro C..... | 103 |
| 5 | MODELOS DE PREDICCIÓN PARA EL MÓDULO DINÁMICO | 105 |
| 5.1 | MODELO DE WITCZAK ORIGINAL | 107 |
| 5.2 | MODELO DE WITCZAK MODIFICADO..... | 109 |
| 5.3 | MODELO DE HIRSCH..... | 113 |
| 5.4 | COMPARACIÓN DE MODELOS..... | 116 |
| 5.5 | CALIBRACIÓN DEL MODELO DE HIRSCH | 117 |
| 5.6 | VALIDACIÓN DE CALIBRACIÓN POR MEDIO DE JACK – KNIFE | 121 |
| 5.6.1 | Modelo de Hirsch con ligante en estado original, calibrado. | 121 |
| 5.6.2 | Modelo de Hirsch con ligante envejecido con HPDR, calibrado. | 123 |
| 5.6.3 | Modelo de Hirsch con ligante envejecido con PAV, calibrado. | 125 |
| 6 | APLICACIÓN DE LA CALIBRACIÓN EN LA GUÍA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS EMPÍRICO MECANICISTA | 128 |
| 7 | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 130 |

ÍNDICE DE GRÁFICOS

| | |
|--|-----|
| Gráfico 1 Resultados Ensayo Fatiga..... | 69 |
| Gráfico 2 Relación entre parámetros de ajuste k1 y k2..... | 71 |
| Gráfico 3 k2 estimado y obtenido a partir de ensayo para 500 μ strain | 72 |
| Gráfico 4 Evaluación modelo con un set de factores para cada mezcla asfáltica | 78 |
| Gráfico 5 Evaluación modelo con un solo set de factores de ajuste para todas las mezclas | 81 |
| Gráfico 6 Evaluación de mezclas agrupadas según amplitud térmica 1..... | 83 |
| Gráfico 7 Evaluación de mezclas agrupadas según amplitud térmica 2..... | 85 |
| Gráfico 8 Evaluación modelo incorporando amplitud térmica como una nueva variable 1..... | 88 |
| Gráfico 9 Evaluación modelo incorporando amplitud térmica como una nueva variable 2..... | 90 |
| Gráfico 10 Evaluación modelo incorporando amplitud térmica como una nueva variable 3..... | 92 |
| Gráfico 11 Evaluación modelo incorporando amplitud térmica como una nueva variable 4..... | 96 |
| Gráfico 12 Evaluación modelo incorporando amplitud térmica como una nueva variable 5..... | 98 |
| Gráfico 13 Modelo de Witzak Original | 108 |
| Gráfico 14 Modelo de Witzak Original sin sesgo | 108 |
| Gráfico 15 Modelo de Witzak Modificado, ligante en estado Original..... | 110 |
| Gráfico 16 Modelo de Witzak Modificado, ligante envejecido HPDR..... | 110 |
| Gráfico 17 Modelo de Witzak Modificado, ligante envejecido PAV | 111 |
| Gráfico 18 Modelo de Witzak ligante original sin sesgo..... | 112 |
| Gráfico 19 Modelo de Hirsch, ligante original | 114 |
| Gráfico 20 Modelo de Hirsch, ligante envejecido HPDR | 114 |
| Gráfico 21 Modelo de Hirsch, ligante envejecido PAV | 115 |
| Gráfico 22 Modelo de Hirsch corregido, ligante original..... | 118 |
| Gráfico 23 Modelo de Hirsch Corregido, ligante envejecido HPDR..... | 119 |
| Gráfico 24 Modelo de Hirsch Corregido, ligante envejecido PAV | 119 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1 Banda granulométrica IV-A-12 | 31 |
| Tabla 2 Banda granulométrica M-10..... | 32 |
| Tabla 3 Banda granulométrica SMA | 33 |
| Tabla 4 Banda granulométrica IV-A-12 A. del Maipo..... | 34 |
| Tabla 5 Banda granulométrica SMA Autopista Central..... | 35 |
| Tabla 6 Banda granulométrica MDC Autopista del Sol..... | 36 |
| Tabla 7 Banda Granulométrica IV-A-12 Sin RAP..... | 37 |
| Tabla 8 Banda granulométrica IV-A-12 con 8% RAP | 38 |
| Tabla 9 Banda granulométrica IV-A-12 con 18% RAP | 38 |
| Tabla 10 Banda Granulométrica Mezcla Aeropuerto..... | 39 |
| Tabla 11 Resultados ensayo de fatiga IV-A-12 Tradicional..... | 41 |
| Tabla 12 Resultados ensayo de fatiga IV-A-12 Modificado | 41 |
| Tabla 13 Resultados ensayo de fatiga M10 | 41 |
| Tabla 14 Resultados ensayo de fatiga SMA Pellet..... | 42 |
| Tabla 15 Resultados ensayo de fatiga SMA Fibra | 42 |
| Tabla 16 Resultados ensayo de fatiga IV-A-12 Autopista del Maipo (Pacheco, 2016)..... | 43 |
| Tabla 17 Resultados ensayo de fatiga SMA Autopista Central (Lobos, 2016) | 43 |
| Tabla 18 Resultados ensayo de fatiga SMA Autopista del Maipo (Lobos, 2016)..... | 44 |
| Tabla 19 Resultados ensayo de fatiga M10 Autopista del Sol (Fredes, 2015) | 44 |
| Tabla 20 Resultados ensayo de fatiga M10 Autopista del Maipo (Leiva, 2015)..... | 44 |
| Tabla 21 Resultado ensayos de Fatiga IV-A-12 Sin RAP (Ávila, 2017) | 46 |
| Tabla 22 Resultados ensayo de fatiga IV-A-12 con 8% RAP (Ávila, 2017)..... | 46 |
| Tabla 23 Resultados ensayo de fatiga IV-A-12 con 18% RAP (Montalva, 2016)..... | 46 |
| Tabla 24 Resultados ensayo de fatiga Aeropuerto mezcla Corto Plazo (Vásquez, 2017)..... | 48 |
| Tabla 25 Resultados ensayo de fatiga Aeropuerto mezcla Largo Plazo (Escobar, 2017)..... | 48 |
| Tabla 26 Frecuencia y número de ciclos asociado al ensayo (AASHTO, 2011)..... | 50 |
| Tabla 27 Carga aplicada durante el ensayo según temperatura (Toro, 2013)..... | 50 |
| Tabla 28 Resultados ensayo de Módulo Dinámico IV-A-12 Tradicional | 51 |
| Tabla 29 Resultados ensayo de Módulo Dinámico IV-A-12 Modificado | 52 |
| Tabla 30 Resultados ensayo de Módulo Dinámico M10..... | 53 |
| Tabla 31 Resultados ensayo de Módulo Dinámico SMA Pellet | 54 |
| Tabla 32 Resultados ensayo de Módulo Dinámico SMA Fibra..... | 55 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 33 Resultados ensayo de Módulo Dinámico IV-A-12 Autopista del Maipo | 57 |
| Tabla 34 Resultados ensayo de Módulo Dinámico SMA Autopista Central..... | 58 |
| Tabla 35 Resultados ensayo de Módulo Dinámico SMA Autopista del Maipo | 59 |
| Tabla 36 Resultados ensayo de Módulo Dinámico MDC Autopista del Sol..... | 60 |
| Tabla 37 Resultados ensayo de Módulo Dinámico Autopista del Maipo | 61 |
| Tabla 38 Resultados ensayo de Módulo Dinámico IV-A-12 Sin RAP | 63 |
| Tabla 39 Resultados ensayo de Módulo Dinámico IV-A-12 con 8% RAP..... | 64 |
| Tabla 40 Resultados ensayo de Módulo Dinámico IV-A-12 con 18% RAP..... | 65 |
| Tabla 41 Resultados ensayo de Módulo Dinámico Mezcla para Aeropuerto..... | 67 |
| Tabla 42 Resultados Enfoque Fenomenológico Fatiga | 70 |
| Tabla 43 Propiedades Volumétricas Probetas Fatiga FONDEF D09I1174 en laboratorio | 75 |
| Tabla 44 Propiedades Volumétricas Probetas Fatiga FONDEF D09I1174 en terreno | 76 |
| Tabla 45 Propiedades Volumétricas Probetas Fatiga Proyecto Mezclas con RAP | 76 |
| Tabla 46 Propiedades Volumétricas Probetas Fatiga Proyecto Aeropuerto | 77 |
| Tabla 47 Constantes de calibración local para fatiga: un factor por mezcla | 79 |
| Tabla 48 Grupos de mezclas según amplitud térmica | 82 |
| Tabla 49 Constantes de calibración local: mezclas agrupadas según amplitud térmica 1..... | 82 |
| Tabla 50 Grupos de mezclas según amplitud térmica 2 | 84 |
| Tabla 51 Constantes de calibración local: mezclas agrupadas según amplitud térmica 2..... | 84 |
| Tabla 52 Tabla de cálculo para Análisis ANOVA | 86 |
| Tabla 53 Análisis ANOVA para mezclas agrupadas según amplitud térmica 1 | 86 |
| Tabla 54 Análisis ANOVA para mezclas agrupadas según amplitud térmica 2 | 86 |
| Tabla 55 Análisis suma de cuadrados extra para agregar AT como nueva variable..... | 93 |
| Tabla 56 Calibración local para Fatiga (modelo incorporando amplitud térmica 3) | 100 |
| Tabla 57 Estimadores Parciales Método Jack-knife para Fatiga (modelo incorporando amplitud térmica 3)..... | 101 |
| Tabla 58 Pseudo Valores Método Jack-knife para Fatiga (modelo incorporando amplitud térmica 3)102 | |
| Tabla 59 Calibración local para Fatiga (modelo incorporando amplitud térmica 5) | 103 |
| Tabla 60 Estimadores Parciales Método Jack-knife para Fatiga (modelo incorporando amplitud térmica 5)..... | 103 |
| Tabla 61 Pseudo Valores Método Jack-knife para Fatiga (modelo incorporando amplitud térmica 5)104 | |
| Tabla 62 Propiedades Volumétricas de Probetas Módulo Dinámico | 105 |
| Tabla 63 Valores de Viscosidad según método VTS | 107 |
| Tabla 64 Propiedades volumétricas para Hirsch..... | 113 |
| Tabla 65 Resumen Modelos Predictivos Módulo Dinámico | 116 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 66 Constantes de Calibración Modelo de Hirsch | 118 |
| Tabla 67 Calibración local para Módulo Dinámico (Hirsch con ligante en estado Original) | 121 |
| Tabla 68 Estimadores Parciales Método Jack-knife para Módulo Dinámico (Hirsch con ligante en estado Original)..... | 122 |
| Tabla 69 Pseudo Valores Método Jack-knife para Módulo Dinámico (Hirsch con ligante en estado Original)..... | 122 |
| Tabla 70 Calibración local para Módulo Dinámico (Hirsch con ligante envejecido HPDR)..... | 123 |
| Tabla 71 Estimadores Parciales Método Jack-knife para Módulo Dinámico (Hirsch con ligante envejecido HPDR)..... | 124 |
| Tabla 72 Pseudo Valores Método Jack-knife para Módulo Dinámico (Hirsch con ligante envejecido HPDR) | 124 |
| Tabla 73 Calibración local para Módulo Dinámico (Hirsch con ligante envejecido PAV) | 126 |
| Tabla 74 Estimadores Parciales Método Jack-knife para Módulo Dinámico (Hirsch con ligante envejecido PAV) | 126 |
| Tabla 75 Pseudo Valores Método Jack-knife para Módulo Dinámico (Hirsch con ligante envejecido PAV)..... | 127 |
| Tabla 76 Nivel de Información para MEPDG | 128 |
| Tabla 77 Nivel de información asociado a mezclas en análisis | 129 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 Curva esfuerzo y deformación con carga dinámica (Toro, 2013)..... | 11 |
| Figura 2 Modelo de Hirsch | 15 |
| Figura 3 Ejemplo formación de curva maestra módulo dinámico | 18 |

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES GENERALES

En el campo de la ingeniería vial el desarrollo de estudios sobre mezclas asfálticas en caliente resulta importante debido a que más de la mitad de los caminos pavimentados en la red vial de nuestro país corresponde a caminos de asfalto.

Una adecuada caracterización de mezclas asfálticas permite generar modelos que predicen el comportamiento en terreno a lo largo de su vida útil. Esto permite identificar el tipo de mezcla asfáltica más apropiado según su aplicación.

La guía de diseño de pavimentos empírico mecanicista (AASHTO, 2008) es una herramienta para el diseño y análisis de estructuras de pavimentos nuevos y rehabilitados, en base a principios empíricos mecanicistas (M-E). Esto significa que el procedimiento de diseño y análisis calcula las respuestas del pavimento (esfuerzos, deformaciones y deflexiones) y utiliza esas respuestas para calcular el incremento de daño a través del tiempo.

Actualmente existen numerosas memorias y proyectos realizados dentro del laboratorio LEMCO de la Universidad Técnica Federico Santa María referidos al desempeño de mezclas asfálticas en caliente, como por ejemplo los trabajos relacionados al proyecto FONDEF D09I1174 (Marín, 2013; Toro 2013; Pacheco 2016; Lobos 2016; Fredes 2015; Leiva 2015), el Estudio del Comportamiento de Mezclas Asfálticas con RAP (Avila 2017; Montalva, 2016; Valenzuela, 2017) y el proyecto de Conservación rutinaria Aeropuerto Arturo Merino Benítez año 2016 Etapa I (Escobar, 2017; Corona, 2017). Los resultados de dichos proyectos se utilizarán en esta memoria para predecir fatiga y módulo dinámico.

Para predecir la vida de fatiga de las mezclas asfálticas chilenas se determinan las constantes de calibración local propuestas por el modelo de fatiga dispuesto en la guía de diseño de pavimentos empírico mecanicista. Se analizará además la incorporación de la amplitud térmica del ligante asfáltico como nueva variable predictiva en los modelos fenomenológicos de fatiga.

Se utilizan los modelos predictivos de Witczak y Hirsch para determinar la rigidez de las mezclas asfálticas (módulo dinámico) y se selecciona el modelo que mejor ajusta los datos para calcular las constantes de calibración asociadas a las mezclas en análisis.

Esta investigación complementará trabajos realizados previamente dentro del departamento de obras civiles en calibración de modelos predictivos, incorporando una mayor cantidad de mezclas al análisis, recalibrando los modelos con estas nuevas mezclas e incluyendo una variable significativa adicional en la predicción de la fatiga, como lo es el grado de modificación del ligante asfáltico.

1.2 OBJETIVOS DE ESTUDIO

1.2.1 Objetivos Generales

Determinar las constantes de calibración para predecir el número de ciclos a la falla por fatiga de mezclas asfálticas chilenas utilizando modelos fenomenológicos convencionales basados en la deformación de tracción y la rigidez de las mezclas asfálticas. Como parte de este análisis se propone la incorporación de la amplitud térmica del ligante asfáltico como nueva variable predictiva, para mejorar la estimación de la vida de fatiga.

Comparar la rigidez de las mezclas predicha según los modelos de Hirsch y de Witczak (incorporando la información del ligante asfáltico según la viscosidad y según el módulo de corte) de módulo dinámico de mezclas asfálticas chilenas. Utilizar el modelo que mejor prediga los resultados para determinar las constantes de calibración local de las mezclas en análisis.

1.2.2 Objetivos Específicos

Establecer el modelo predictivo que mejor ajusta el módulo dinámico de las mezclas asfálticas en caliente en estudio.

Determinar las constantes de calibración que mejor modela el módulo dinámico para las mezclas asfálticas chilenas.

Determinar las constantes de calibración local según la guía de diseño empírico mecanicista para la ecuación predictiva de número de repeticiones a la falla de fatiga.

Evaluar la incorporación de la amplitud térmica del ligante asfáltico como variable explicativa al modelo propuesto por la guía de diseño de pavimentos empírico mecanicista.

Plantear la ecuación de número de ciclos a la falla por fatiga como el comienzo de la calibración para en un estudio posterior poder determinar el daño por fatiga a través de la utilización del software de la guía de diseño de pavimentos empírico mecanicista.

1.3 ALCANCES DE ESTUDIO

En el presente documento se presenta la recopilación de datos asociada a fatiga y módulo dinámico de diversos proyectos y estudios realizados en el laboratorio LEMCO de la Universidad Técnica Federico Santa María. Las mezclas utilizadas para realizar esta memoria corresponden a las utilizadas en los ensayos que se enmarcan en los proyectos FONDEF D09I1174 (Marín, 2013; Toro 2013; Pacheco 2016; Lobos 2016; Fredes 2015; Leiva 2015), Estudio del Comportamiento de Mezclas Asfálticas con RAP (Avila 2017; Montalva, 2016; Valenzuela, 2017) y Conservación rutinaria Aeropuerto Arturo Merino Benítez año 2016 Etapa I (Escobar, 2017; Corona, 2017).

Se entregan los diseños de las mezclas en estudio, junto a los resultados obtenidos en los ensayos realizados. Dichos resultados se utilizan posteriormente para el análisis de modelos predictivos y la calibración de sus constantes.

Como resultado se entregan las ecuaciones de número de ciclos a la falla por fatiga y módulo dinámico calibradas con las constantes determinadas en base a los resultados disponibles de los ensayos realizados en laboratorio LEMCO.

1.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología para realizar el desarrollo de esta memoria se describe brevemente a través de las siguientes etapas:

1.- Estudio Bibliográfico

Corresponde al estudio de la normativa utilizada para realizar los ensayos a analizar, los diferentes documentos y publicaciones asociadas a las ecuaciones predictivas que se utilizan para calibrar módulo dinámico y fatiga junto al estudio de las aplicaciones de la guía de diseño de pavimentos empírico mecanicista (AASHTO, 2008).

2.- Recopilación de datos

A partir de los resultados de ensayos disponibles en LEMCO y generadas en memorias anteriores se seleccionan y ordenan los datos a utilizar para la calibración de los modelos predictivos.

3.- Análisis de datos

Se realiza el proceso de calibración de las constantes asociadas a los modelos predictivos propuestos mediante distintos enfoques. Específicamente, se determinan las constantes de calibración para el Modelo de Hirsch en módulo Dinámico y para fatiga se utiliza el modelo disponible en la MEPDG. Junto con determinar las constantes de calibración en este último modelo se analiza la incorporación del tipo de ligante asfáltico como nueva variables predictiva y la eliminación del módulo dinámico y las propiedades volumétricas de la mezcla.

4.- *Resultados*

Se presentan las constantes de calibración obtenidas y el resultado obtenido mediante la calibración de las ecuaciones predictivas.

5.- *Software MEPDG*

Se presentan las aplicaciones de la calibración a la guía de diseño de pavimentos empírico mecanicista y el análisis posterior a realizar

1.5 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

La memoria se divide en seis capítulos que se describen a continuación. Junto con estos capítulos se encuentran las referencias bibliográficas y anexos.

1.5.1 Capítulo 1: Introducción

Presenta de forma general el análisis que se va a desarrollar en la memoria, los objetivos que se buscan cumplir y la forma en que se va a analizar.

1.5.2 Capítulo 2: Revisión Bibliográfica

Este capítulo aborda la revisión bibliográfica requerida para realizar el análisis de la presente memoria. Se presentan una revisión sobre las mezclas asfálticas, las ecuaciones predictivas a utilizar para módulo dinámico y fatiga, junto con una breve descripción de la guía de diseño de pavimentos empírico mecanicista

1.5.3 Capítulo 3: Proceso experimental y resultados de laboratorio

Se entregan las directrices bajo las cuales se desarrollaron los ensayos de laboratorio y los resultados obtenidos que se utilizarán para desarrollar los modelos predictivos.

1.5.4 Capítulo 4: Modelos de predicción para fatiga

Se presenta el desarrollo que se realizó para determinar las constantes de calibración del modelo predictivo para fatiga.

1.5.5 Capítulo 5: Modelos de predicción para módulo dinámico

Se presentan los modelos predictivos de módulo dinámico, se comparan los resultados obtenidos con cada modelo y se elige el óptimo para su calibración.

1.5.6 Capítulo 6: Aplicación de la calibración en la Guía de Diseño MEPDG

En este capítulo se explica la aplicación de resultados obtenidos en la guía de diseño y los trabajos posteriores para concretar la calibración final del deterioro.

1.5.7 Capítulo 7: Conclusiones y Recomendaciones

Se comentan los resultados obtenidos y las recomendaciones para continuar el estudio en posteriores investigaciones.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE

Las mezclas asfálticas en caliente corresponden a mezclas de áridos y ligante asfáltico, en distintas proporciones según las propiedades físicas que se esperan obtener de la mezcla. La cantidad de ligante debe asegurar la durabilidad del pavimento y proporcionar suficiente resistencia a fatiga, la cantidad de vacíos de la mezcla debe ser el suficiente para prevenir daños por el medioambiente y permitir la expansión del asfalto a altas temperaturas.

2.1.1 Ligantes Asfálticos

Para describir los asfaltos a utilizar se utilizará la especificación Superpave por Grado de Desempeño (PG por sus siglas en inglés Performance Grade). Esta especificación representa las condiciones del pavimento mediante una doble numeración PGXX-YY, el número XX corresponde a la temperatura promedio más alta registrada durante 7 días consecutivos y el número YY corresponde a la temperatura mínima registrada en el pavimento durante un periodo mínimo de 20 años.

Para la especificación Superpave, las propiedades físicas son medidas utilizando ligantes en su estado original y envejecidos en laboratorio, que buscan simular las condiciones de envejecimiento reales de un pavimento. El envejecimiento primario, realizado mediante HPDR simula el envejecimiento que sufre el ligante durante su traslado y colocación. El envejecimiento secundario se realiza a través de PAV y simula el envejecimiento que sufre el ligante luego de puesto en marcha el pavimento aproximadamente después de 7 a 10 años.

Para definir el PG-XX las propiedades físicas del ligante se miden sin envejecer, con envejecimiento primario (HPDR) y con envejecimiento secundario (PAV). Para definir el PG-YY se utiliza el ligante con envejecimiento secundario (PAV).

La amplitud térmica de un ligante se define como la diferencia entre el grado más alto (XX) y más bajo (YY). Dependiendo de la amplitud térmica que se obtiene se definen asfaltos tradicionales y modificados según se describe de forma aproximada a continuación.

2.1.1.1 Asfaltos tradicionales

Corresponden a asfaltos provenientes principalmente de la refinación del petróleo, las características de estos asfaltos dependen principalmente del origen del petróleo, su composición química y el proceso de refinación que se utilice. Según la clasificación por grado de desempeño, usualmente los asfaltos tradicionales se denominan como aquellos que poseen una amplitud térmica (diferencia entre la temperatura más alta y más baja) menor a 92°C.

2.1.1.2 Asfaltos modificados

Asfaltos modificados, corresponden a la mezcla entre asfaltos tradicionales y un modificador, que pueden ser: polímeros, fibras, modificadores químicos, entre otros. Estos modificadores se utilizan para aumentar la resistencia del asfalto ante deterioros, mejorando la resistencia al ahuellamiento, agrietamiento térmico y fatiga, principalmente.

Para el caso particular de esta memoria, los modificadores utilizados corresponden a polímeros y fibras.

2.1.2 Áridos

Los áridos representan la mayor parte de la mezcla asfáltica aportando entre el 90-95% del peso de esta. Los agregados minerales que se incorporan en la mezcla comprenden un conjunto de grava, arena y polvo mineral (filler) y provienen de distintas fuentes, como, por ejemplo: canteras, de pozo o rivera de río.

Los áridos se incorporan a la mezcla asfáltica según cierta granulometría, que corresponde a una distribución porcentual en masa de los tamaños de partículas de un agregado pétreo. Es deseable que los áridos cumplan con un adecuado tamaño de partículas, resistencia, tenacidad, angularidad y baja porosidad.

2.2 GUÍA EMPÍRICO MECANICISTA

La MEPDG es un procedimiento de diseño y análisis empírico mecanicista para estructuras de pavimentos. El enfoque mecanicista consiste en determinar las respuestas del pavimento (esfuerzos, deformaciones y deflexiones) para calcular el daño a través del tiempo. Por otra parte, el enfoque empírico relaciona el daño acumulado a los deterioros o fallas observadas en el pavimento.

A través del enfoque empírico mecanicista es posible optimizar el diseño para limitar los deterioros a valores inferiores a los criterios de falla. Esto se logra mediante un proceso de diseño iterativo que se resume en 5 pasos:

- 1.- *Seleccionar un diseño de estructura de pavimento inicial:* se ingresa detalladamente la cantidad de capas, espesores, características y propiedades de cada una de ellas.
- 2.- *Seleccionar criterios de desempeño y nivel de confiabilidad para el diseño:* se selecciona la magnitud máxima de los principales deterioros a evaluar. Luego este valor se compara con el obtenido a la confiabilidad seleccionada.
- 3.- *Obtener los datos de entrada para el diseño estructural del pavimento:* se debe contar con los datos de clima, tránsito, propiedades de los materiales de cada capa y la estructura del pavimento.
- 4.- *Ejecutar el software y realizar una revisión de los resultados:* se debe revisar que los datos de entrada sean correctos y los resultados cumplan con los criterios de desempeño definidos previamente.

2.2.1 Metodologías de predicción

El análisis de un diseño de prueba se basa en la acumulación de daño en el tiempo, el software MEPDG realiza este análisis basándose en el enfoque de daño incremental. El daño se calcula para cada intervalo de análisis y se va sumando a medida que se incrementa el tiempo a analizar.

El programa permite ajustar los factores de calibración según las constantes específicas determinadas por alguna calibración local existente o realizada por el usuario. En el caso particular de esta memoria se utilizarán las constantes de calibración determinadas para determinar el daño por fatiga específicamente para mezclas chilenas.

2.3 CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS A PARTIR DEL MÓDULO DINÁMICO

2.3.1 Definición de Módulo Dinámico

El módulo dinámico representa la relación esfuerzo – deformación de una mezcla asfáltica en caliente, siendo una de las propiedades más características de la mezcla. Para diseño estructural se utiliza la caracterización de la mezcla mediante el módulo dinámico en función de la frecuencia de carga y temperatura.

A través del módulo dinámico se determinan las propiedades viscoelásticas de la mezcla asfáltica, de este modo se determina la rigidez de la mezcla bajo una carga del tipo haversine.

Matemáticamente, el módulo dinámico corresponde al valor absoluto del módulo complejo, siendo el módulo complejo el parámetro que representa la rigidez de un material para una frecuencia de carga específica.

El módulo dinámico se determina en función del esfuerzo aplicado y la máxima deformación axial recuperable, en el rango viscoelástico lineal. El módulo dinámico se puede definir, según la norma AASHTO T342 (AASHTO, 2011). como la magnitud del módulo complejo calculado a partir de la división entre el esfuerzo máximo y la deformación recuperable de un material sometido a una carga sinusoidal. Gráficamente, esto se puede apreciar según la Figura 1

Según García (García et al., 2007), el módulo dinámico queda definido como la razón entre la amplitud del esfuerzo aplicado a un cierto tiempo y frecuencia de carga y su

respectiva deformación como respuesta al mismo tiempo y deformación, según la Ecuación 1.

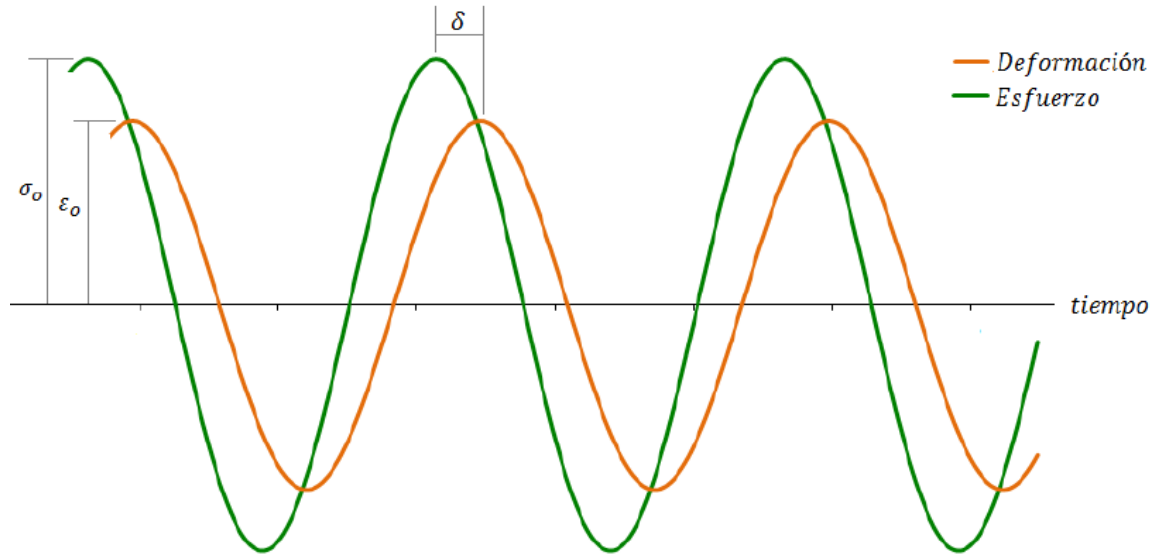


Figura 1 Curva esfuerzo y deformación con carga dinámica (Toro, 2013)

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma_0 \cdot e^{i\omega t}}{\varepsilon_0 \cdot e^{i(\omega t - \delta)}} = \frac{\sigma_0 \cdot \text{sen}(\omega t)}{\varepsilon_0 \cdot \sin(\omega t - \delta)}$$

Ecuación 1

Donde:

E^* = módulo complejo

σ_0 = Máximo esfuerzo

ε_0 = Máxima deformación

δ = Ángulo de fase, grados

ω = Velocidad angular

t = Tiempo, segundos

A partir de la Figura 1 se incorpora el concepto de ángulo de fase (δ) que corresponde a la diferencia de tiempo entre la aplicación del esfuerzo y la deformación que se produce como respuesta de este. Este ángulo es un buen indicador para predecir qué tan elástico o

viscoso es el material, si es elástico el ángulo es 0° , en cambio si el material es viscoso el ángulo de desfase es 90° .

Para determinar el módulo dinámico, actualmente se lleva a cabo el ensayo de compresión uni-axial según la norma AASHTO T342 (AASHTO, 2011), sin embargo, debido a que este ensayo es significativamente largo y costoso se busca determinar métodos alternativos al ensayo para poder determinar de forma rápida y confiable el módulo dinámico de una mezcla. En función de esto se busca analizar las ecuaciones predictivas de Hirsch y Witczak.

2.3.2 Ecuaciones predictivas para el módulo dinámico

Existen distintos modelos para predecir el módulo dinámico en función de las propiedades volumétricas de la mezcla y las características físicas del asfalto, la mayoría de los métodos son empíricos o semi-empíricos. Se presentan para este análisis tres modelos predictivos: el modelo de Witczak original propuesto en la nueva AASHTO 2002 Guía de diseño (2002 Design Guide, 2004a), el modelo de Witczak modificado (Bari, 2005) y el modelo de Hirsch (Christensen et al., 2003)

El modelo de Witczak consta de una ecuación original donde se ingresa el valor de la viscosidad para caracterizar el ligante y una ecuación modificada donde se caracteriza el ligante a partir de valores del módulo de corte dinámico y ángulo de fase.

Se evalúa también el Modelo de Hirsch, que corresponde a un modelo semi-empírico basado en una versión de la ley de mezclas, combinando los elementos (volumen de agregados, asfalto y vacío) en serie y en paralelo.

Para la ecuación de Witczak modificada (Bari, 2005) es necesario conocer ocho parámetros correspondientes a especificaciones físicas y volumétricas de la mezcla. La ecuación del modelo de Hirsch (Christensen et al., 2003) solo requiere 3 parámetros para predecir el valor del módulo dinámico, estos corresponden a dos propiedades volumétricas y el módulo de corte dinámico del ligante.

En cuanto al uso de los modelos predictivos en la guía empírico mecanicista, esta utiliza los dos modelos de Witczak (original y modificada) y se explica con detalle en el capítulo 6 “Aplicación de la Calibración en la Guía de Diseño de Pavimentos Empírico Mecanicista”.

2.3.2.1 Modelo de Witczak

El modelo predictivo para el módulo dinámico de Witczak utilizado en la Guía de Diseño Empírico Mecanicista posee dos niveles de información, dependiendo de la información disponible sobre el ligante asfáltico.

Según información recopilada por García (García, 2007) del proyecto NCHRP 1-37-A, el primer modelo de Witczak, se realizó utilizando una base de datos que contiene 2750 datos de 205 mezclas asfálticas con ligantes modificados y tradicionales.

Para incorporar las propiedades del ligante asfáltico, este modelo utiliza la viscosidad estimada con el método VTS (Viscosity Temperature Susceptibility), según los valores entregados por defecto en la nueva AASHTO 2002 Guía de diseño (2002 Design Guide, 2004a).

Las variables que utiliza la ecuación para predecir los resultados corresponden a: la viscosidad del ligante asfáltico, el diseño volumétrico y la granulometría de la mezcla. La ecuación predictiva para este modelo corresponde al de la nueva guía de diseño empírico mecanicista (2002 Design Guide, 2004a) y se presenta en la Ecuación 2.

$$\begin{aligned} \log|E^*| = & 3.750063 + 0.02932\rho_{200} - 0.001767(\rho_{200})^2 - 0.002841\rho_4 - 0.058097V_a \\ & - 0.802208 \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \\ & + \frac{3.871977 - 0.0021\rho_4 + 0.003958\rho_{38} - 0.000017(\rho_{38})^2 + 0.005470\rho_{34}}{1 + e^{-0.603313 - 0.313351\log(f) - 0.393532\log(\eta)}} \end{aligned}$$

Ecuación 2

Donde:

$|E^*|$: Módulo dinámico de mezclas asfálticas, en psi.

η : Viscosidad del betún, en 10^6 poise.

f : Frecuencia de carga, en Hz.

V_a : Vacíos de aire en la mezcla, respecto al volumen, en %.

V_{beff} : Porcentaje de asfalto efectivo por volumen, en %.

ρ_{34} : Porcentaje retenido en malla $\frac{3}{4}$ " (19mm), en peso total acumulado.

ρ_{38} : Porcentaje retenido en malla $\frac{3}{8}$ " (9mm), en peso total acumulado.

ρ_4 : Porcentaje retenido en malla #4 (4.75mm), en peso total acumulado.

ρ_{200} : Porcentaje pasante en malla #200 (0.075mm), en peso total.

2.3.2.2 Nuevo Modelo de Witczak

El nuevo modelo de Witczak para predecir el módulo dinámico Bari (Bari, 2005) incorporó el módulo de corte dinámico del asfalto ($|G_b^*|$) y el ángulo de fase (δ) en reemplazo de la viscosidad del betún, siendo este parámetro una medición que entrega las propiedades reales del ligante asfáltico.

Para el desarrollo de este modelo se utilizaron 7.400 datos correspondientes a 346 mezclas que incluyen ligantes modificados y tradicionales. En la Ecuación 3 se muestra la ecuación predictiva del módulo dinámico para este nuevo modelo desarrollada por Bari (Bari, 2005).

$$\begin{aligned} \log|E^*| = & -0.349 + 0.754(|G_b^*|^{-0.0052}) \left(6.65 - 0.032\rho_{200} + 0.0027(\rho_{200})^2 + 0.011\rho_4 - 0.0001(\rho_4)^2 \right. \\ & \left. + 0.006\rho_{38} - 0.00014(\rho_{38})^2 - 0.08V_a - 1.06 \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right) \\ & + \frac{2.56 + 0.03V_a + 0.71 \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} + 0.012\rho_{38} - 0.0001(\rho_{38})^2 - 0.01\rho_{34}}{1 + e^{-0.7814 - 0.5785 \log|G_b^*| + 0.8834 \log(\delta_b)}} \end{aligned}$$

Ecuación 3

Donde:

$|E^*|$: Módulo dinámico de mezclas asfálticas, en psi.

$|G_b^*|$: Módulo de corte dinámico del asfalto, en psi.

δ_b : Ángulo de fase del asfalto asociado a $|G_b^*|$, en grados.

V_a : Vacíos de aire en la mezcla, respecto al volumen, en %.

V_{beff} : Porcentaje de asfalto efectivo por volumen, en %.

ρ_{34} : Porcentaje retenido en malla $\frac{3}{4}$ " (19mm), en peso total acumulado.

ρ_{38} : Porcentaje retenido en malla $\frac{3}{8}$ " (9mm), en peso total acumulado.

ρ_4 : Porcentaje retenido en malla #4 (4.75mm), en peso total acumulado.

ρ_{200} : Porcentaje pasante en malla #200 (0.075mm), en peso total.

2.3.2.3 Modelo de Hirsch

El modelo de Hirsch (Christensen et al., 2003) corresponde a un modelo racional, semi empírico para predecir el módulo de mezclas asfálticas. Se basa en la ley de mezclas que combina elementos en serie (que se muestran en la imagen con subíndice s) y en paralelo (que se muestran en la imagen con subíndice p) mostrado en la Figura 2.

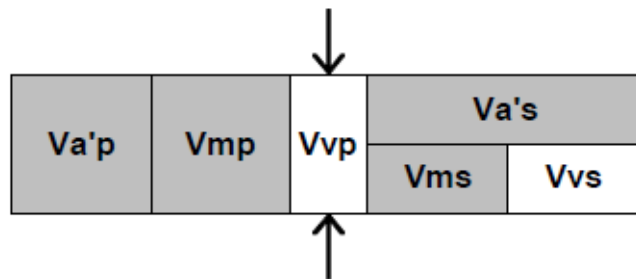


Figura 2 Modelo de Hirsch

Se utiliza un modelo que combina elementos en serie y en paralelo, para simular de mejor manera el comportamiento de las mezclas asfálticas. Se ha demostrado que a altas temperaturas la mezcla asfáltica posee un comportamiento en serie y a bajas temperaturas en paralelo.

Se evaluaron distintos modelos antes de llegar al que se utiliza actualmente (Christensen et al., 2003), concluyendo que el modelo más simple era el que mejor relacionaba el módulo dinámico con las variables incluidas en la ecuación. En esta ecuación, el módulo dinámico es estimado a partir del módulo de corte dinámico del ligante, vacíos en el agregado mineral y vacíos llenos con asfalto según se muestra en la Ecuación 4 y Ecuación 5.

$$|E^*| = P_c \left[4200000 \left(1 - \frac{VMA}{100} \right) + 3|G^*|_{binder} \left(\frac{VFA \cdot VMA}{10000} \right) \right] + (1 - P_c) \left[\frac{1 - \frac{VMA}{100}}{4200000} + \frac{VMA}{VFA \cdot 3|G^*|_{binder}} \right]^{-1} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$P_c = \frac{\left(20 + \frac{VFA \cdot 3|G^*|_{binder}}{VMA} \right)^{0.58}}{650 + \left(\frac{VFA \cdot 3|G^*|_{binder}}{VMA} \right)^{0.58}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

$|E^*|$ = Módulo dinámico, psi

$|G^*|$ = Módulo de corte dinámico del ligante, psi

VMA = Vacíos en el agregado mineral, %

VFA = Vacíos llenos con asfalto, %

P_c = Volumen de contacto entre los agregados

El valor utilizado para el módulo de corte dinámico del ligante se obtiene de forma experimental a través del ensayo de corte dinámico medido mediante el reómetro de corte dinámico (DSR) o es estimado a través de algún método indirecto como modelos matemáticos. Es importante que el valor que se utilice siempre esté relacionado con la misma temperatura y frecuencia de carga del módulo dinámico. Para el caso de esta memoria los valores a utilizar para el módulo de corte dinámico ($|G^*|$) corresponden a los medidos en laboratorio.

2.3.3 Curvas maestras y factores de corrimiento

La curva maestra de una mezcla asfáltica representa el módulo dinámico a una cierta temperatura de referencia sobre un amplio rango de frecuencia o tiempo. La ventaja de utilizar las curvas maestras para representar el módulo radica en poder comparar curvas de distintos materiales en la misma temperatura o frecuencia de carga.

Para la construcción de una curva maestra se utiliza el principio de superposición tiempo – temperatura, que describe el comportamiento viscoelástico de ligantes asfálticos y mezclas. A través de este principio se representan en una sola curva los datos de distintas temperaturas y frecuencias, esto se logra desplazando horizontalmente los resultados mediante un factor de corrimiento a cierta temperatura de referencia generando una única curva.

El factor de corrimiento (Ecuación 6), como se menciona en el párrafo anterior, corresponde a un factor que se utiliza para desplazar horizontalmente resultados que están originalmente a distinta temperatura hasta una temperatura de referencia. Por consiguiente, la frecuencia real de los resultados se reduce por dicho factor hasta obtener una frecuencia reducida (f_r) para la confección de las curvas maestras.

$$f_r = \frac{f}{a(T)} \Rightarrow \log(f_r) = \log(f) - \log(a(T)) \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

f_r = frecuencia reducida (frecuencia de carga a la temperatura de referencia)

f = frecuencia de carga

$a(T)$ = factor de corrimiento

A la temperatura de referencia, el factor de corrimiento $a(T_R)$ es igual a 1. La temperatura de referencia a la que se van a desplazar los datos se selecciona de forma arbitraria, para mezclas asfálticas es común utilizar 21°C, que corresponde a la temperatura seleccionada para el análisis en esta memoria.

La Figura 3 muestra el ejemplo de la confección de una curva maestra. Se muestran los valores medidos junto con los valores desplazados por el factor de corrimiento hasta formar la curva maestra.

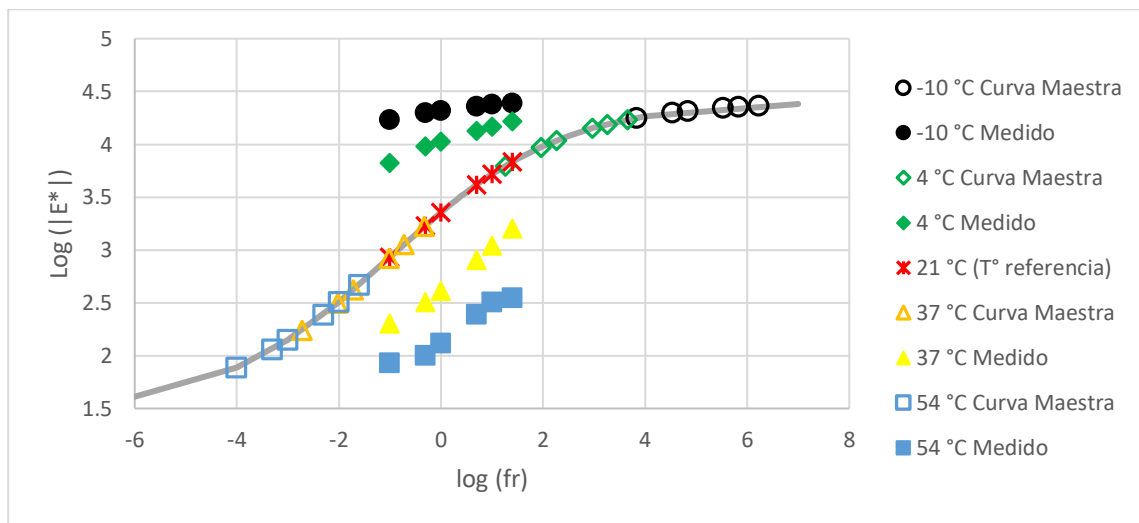


Figura 3 Ejemplo formación de curva maestra módulo dinámico

Dentro de los modelos que existen para representar la superposición tiempo temperatura los más utilizados para obtener el factor de corrimiento en materiales viscoelásticos corresponden al método de Arrhenius y William-Landel-Ferry (WLF) para ligantes asfálticos y el método de Arrhenius y Log-lineal para mezclas asfálticas.

Según García (García, 2007), para representar la dependencia de tiempo y frecuencia de las curvas maestras, se ha determinado, mediante la investigación NCHRP 1-37A de la Universidad de Maryland, que las curvas maestras para el Módulo Dinámico de mezclas asfálticas se pueden representar mediante una ecuación sigmoideal (Ecuación 7).

$$\log(|E^*|) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \log(t_r)}}$$

Ecuación 7

Donde:

$|E^*|$: Módulo dinámico

t_r : Tiempo de carga a la temperatura de referencia (tiempo reducido)

δ : Valor mínimo del módulo

$\delta + \alpha$: Valor máximo del módulo

β, γ : Parámetros para describir la función sigmoïdal

En esta ecuación, el parámetro γ representa la inclinación de la función (tasa de cambio entre el máximo y el mínimo) y β representa la posición horizontal del punto de inflexión.

En cuanto a las propiedades de las mezclas, los parámetros δ y α dependen de la granulometría, el contenido de asfalto y los vacíos de aire en la mezcla. Por otra parte, los parámetros β y γ depende de las características del ligante asfáltico y de la magnitud de δ y α .

La justificación para utilizar la función sigmoïdal en la creación de curvas maestras al ajustar los datos de módulo dinámico está basada meramente en observaciones del comportamiento de mezclas asfálticas dadas por Pellinen y Witczak (Pellinen y Witczak, 2002). El máximo valor de la curva se aproxima asintóticamente al valor máximo de la rigidez de la mezcla, a su vez este valor depende de la rigidez máxima del ligante asfáltico a bajas temperaturas. A temperaturas altas es más dominante la influencia del agregado que del ligante asfáltico. El valor del módulo dinámico comienza a acercarse a un equilibrio límite dependiendo principalmente de la granulometría. En resumen, la función sigmoïdal representa el comportamiento físico de las mezclas asfálticas sometidas a ensayos de cargas cíclicas de compresión en todo el rango de temperaturas.

Los factores de corrimiento de las curvas maestras se pueden obtener de forma experimental en función de la viscosidad del ligante según se muestra en la Ecuación 8.

$$\log(a(T)) = c(\log(\eta) - \log(\eta_{Tr})) \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

η : viscosidad a la temperatura de interés

η_{Tr} : viscosidad a la temperatura de referencia

c : parámetro de ajuste

Como una ecuación alternativa se puede incluir directamente en la Ecuación 7 la Ecuación 8, de este modo se presenta dentro de la curva maestra la relación con la viscosidad del ligante según se muestra en la Ecuación 9. Mediante un análisis no lineal a la Ecuación 9, se pueden obtener los parámetros $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ y c .

$$\log(|E^*|) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma [\log(t) - c(\log(\eta) - \log(\eta_{Tr}))]}} \quad \text{Ecuación 9}$$

Por otro lado, Bonaquist y Christensen (Bonaquist y Christensen, 2005) han propuesto una modificación basándose en el comportamiento del ligante a bajas temperaturas. La modificación se fundamenta en dos hechos:

- 1) Los ligantes asfálticos alcanzan el mismo módulo vítreo a temperaturas muy bajas (145 000 psi o 1 GPa)
- 2) Es posible aproximar el valor máximo del módulo de la mezcla asfáltica si se conocen las propiedades volumétricas de la mezcla, utilizando el modelo de Hirsch (explicado en el capítulo “2.3.2.3 Modelo de Hirsch”).

A partir de esto, se puede acotar el valor máximo del módulo de la mezcla y se puede modificar la Ecuación 9 reduciendo la expresión a la Ecuación 10

$$\log(|E^*|) = \delta + \frac{Max - \delta}{1 + e^{\beta + \gamma [\log(t) - c(\log(\eta) - \log(\eta_{Tr}))]}} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

- $|E^*|$: Módulo dinámico
- t : tiempo de carga
- η : viscosidad a la temperatura de interés
- η_{Tr} : viscosidad a la temperatura de referencia
- Max : valor máximo del módulo
- δ, β, γ, c : parámetros para describir la función sigmoideal

2.3.3.1 Curvas isócronas

Las curvas isócronas son representaciones de una función viscoelástica versus la temperatura a una misma frecuencia de carga. Esta representación es útil al momento de evaluar el comportamiento de una mezcla asfáltica a distintas temperaturas, ya que este gráfico muestra de mejor forma el desempeño en un cierto rango de temperaturas.

2.4 FATIGA

El fenómeno de la fatiga corresponde a uno de los deterioros más comúnmente vistos en los pavimentos asfálticos (2002 Design Guide, 2004b). Existen dos formas en que se manifiesta el deterioro de fatiga:

- El agrietamiento de arriba hacia abajo: se produce por la distribución no uniforme de las presiones de contacto (que pueden ser horizontales o verticales).
- El agrietamiento de abajo hacia arriba: está asociado a las deformaciones de tracción al fondo de la capa asfáltica.

El deterioro predominante en las mezclas asfálticas en Chile corresponde al agrietamiento por fatiga de abajo hacia arriba (García et al., 2014).

Técnicamente, el agrietamiento por fatiga se define como el agrietamiento que se produce bajo el área de contacto entre la rueda del vehículo y el pavimento, producto de la aplicación reiterada de esfuerzos de tracción en la parte inferior de la capa asfáltica, debilitándola y llevándola progresivamente a la falla (Elizondo y Jimenez, 2013)

El deterioro producido por fatiga inicia las grietas en los puntos donde se producen los esfuerzos de tracción críticos. La ubicación del esfuerzo de tracción crítico depende de varios factores, entre los factores más importantes se encuentra la rigidez de la capa y la configuración de la carga. Además, debe tenerse en cuenta que el esfuerzo máximo de tracción desarrollado dentro del sistema de pavimento puede no ser el valor más crítico o dañino. Esto se debe a que la tracción crítica es una función de la rigidez de la mezcla. Como la rigidez de una mezcla de asfalto en un sistema de pavimento multicapa varía con la profundidad, estos cambios eventualmente afectarán la ubicación de la tracción crítica que causa el daño por fatiga. Una vez que el daño se inicia en la ubicación crítica, la acción continua del tránsito eventualmente hace que estas grietas se propaguen a través de todas las capas.

La propagación de las grietas en el total del espesor de la capa permite que el agua se filtre hacia las capas inferiores, lo que debilita la estructura del pavimento y reduce el rendimiento general. El fenómeno de inicio de grietas y luego de propagación a través de toda la capa ocurre no solo en la capa superficial sino también en todas las capas estabilizadas debajo. El agrietamiento en la capa subyacente reduce la capacidad estructural general y puede inducir grietas reflectivas en las capas superiores.

Según la guía de diseño de pavimentos empírico mecanicista (2002 Design Guide, 2004b), en las últimas 3 a 4 décadas de tecnología de pavimentación, ha sido común suponer que el agrietamiento por fatiga normalmente se inicia en la parte inferior de la capa de asfalto y se propaga a la superficie (agrietamiento de abajo hacia arriba). Esto se debe a la flexión de la capa de pavimento que produce esfuerzos de tracción que se desarrollan en la parte inferior. Sin embargo, numerosos estudios recientes a nivel mundial han demostrado claramente que el agrietamiento por fatiga también puede iniciarse desde la parte superior y propagarse hacia abajo (agrietamiento de arriba hacia abajo). Este tipo de fatiga no está tan bien definido desde un punto de vista mecanicista como la fatiga "ascendente" más clásica. En general, es probable que se deba a tensiones críticas de tracción y/o corte desarrolladas en la superficie y causadas por presiones de contacto extremadamente grandes en la interfaz entre los bordes del neumático y el pavimento, junto con una capa superficial delgada muy envejecida (rígida) que se ha oxidado.

A partir de ensayos de laboratorio se puede identificar claramente la relación entre la deformación unitaria a tracción en la fibra inferior de una viga ensayada a flexión y la susceptibilidad a la fatiga. La relación observada se ha estudiado mediante un enfoque fenomenológico que presenta la relación entre la deformación unitaria a tracción en la parte inferior de la carpeta asfáltica (ϵ_0) y el número de ciclos de carga a la falla (N_f).

La relación corresponde a la Ecuación 11, desarrollada por Pell (Pell, 1967), quien introdujo el enfoque que relaciona la deformación inicial con los ciclos de carga, tanto para

ensayos realizados con deformación controlada como para aquellos realizados con esfuerzo controlado.

$$N_f = k_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{k_2} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

N_f : Ciclos de carga a la falla

ε_t : Deformación por tracción en la fibra inferior de la probeta

k_1, k_2 : Coeficientes determinados experimentalmente

2.4.1 Ecuación Predictiva MEPDG

Actualmente el diseño de pavimentos flexibles en Chile se realiza por medio del método AASHTO 93, sin embargo, hoy existen métodos empírico – mecanicistas que resultan más precisos pues implementan métodos basados en leyes mecánicas y ajustes empíricos locales que permiten predecir de forma más exacta la vida útil del pavimento.

La guía de diseño (2002 Design Guide, 2004c) utiliza un enfoque que modela el agrietamiento de arriba hacia abajo y de abajo hacia arriba por separado mediante factores de corrección. El enfoque se basa en el cálculo del daño por fatiga en la superficie para el agrietamiento de arriba hacia abajo y en la parte inferior de cada capa de asfalto para el agrietamiento de abajo hacia arriba.

La estimación del daño acumulado por fatiga se basa en la Ley de Miner, que establece que el daño viene dado por la acumulación del mismo, según se muestra en la Ecuación 12

$$D = \sum_{i=1}^T \frac{n_i}{N_i} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

D : Daño acumulado.

T : Número de periodos.

n_i : trafico actual para el periodo i .

N_i : trafico permitido bajo las condiciones del periodo i .

Para caracterizar el daño por fatiga en la carpeta asfáltica se pueden encontrar diversos modelos. Como se menciona anteriormente, el modelo más básico es aquel que relaciona el número de ciclos a la falla y la deformación unitaria. La guía empírico mecanicista utiliza la relación establecida por el Asphalt Institute de EE.UU., donde se incorpora la rigidez de la mezcla como un parámetro más y factores de calibración. Esta relación se muestra en las ecuaciones Ecuación 13, 14 y 15.

$$N_f = C \beta_1 k_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{\beta_2 k_2} \left(\frac{1}{E} \right)^{\beta_3 k_3} \quad \text{Ecuación 13}$$

$$C = 10^M \quad \text{Ecuación 14}$$

$$M = 4.84 \left(\frac{V_{be}}{V_a + V_{be}} - 0.69 \right) \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde:

N_f : Ciclos de carga a la falla.

ε_t : Deformación por tracción en la fibra inferior de la probeta.

E : Rigidez de la mezcla asfáltica.

k_1, k_2, k_3 : Coeficientes de regresión de laboratorio.

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$: Parámetros de calibración.

C : Factor de ajuste de laboratorio a campo.

V_{be} : Contenido de asfalto efectivo, %.

V_a : Vacíos de aire, %.

A la Ecuación 13 se le agrega el factor C_h para incorporar la corrección debido al agrietamiento de abajo hacia arriba (Ecuación 17) y de arriba hacia abajo (Ecuación 18) según se indica a continuación.

$$N_f = (C)(C_H)\beta_1 k_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{\beta_2 k_2} \left(\frac{1}{E}\right)^{\beta_3 k_3} \quad \text{Ecuación 16}$$

$$C_H = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{11.02 - 3.49 H_{HMA}}}} \quad \text{Ecuación 17}$$

$$C_H = \frac{1}{0.01 + \frac{12.00}{1 + e^{15.676 - 2.8186 H_{HMA}}}} \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde:

H_{HMA} : espesor total de la mezcla asfáltica, en pulgadas.

Luego de calculado el número de ciclo a la falla, se completa la calibración del daño definiendo las funciones de transferencias según las siguientes expresiones:

- Para agrietamiento de abajo hacia arriba (% del área de la pista agrietada)

$$FC_{bottom} = \left(\frac{6000}{1 + e^{c_1 * c'_1 + c_2 * c'_2 * \log_{10}(D * 100)}} \right) * \left(\frac{1}{60} \right) \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde:

FC_{bottom} : Agrietamiento por fatiga de abajo hacia arriba, % del área.

D : Daño por fatiga de abajo hacia arriba

$$C_1 = 1.0$$

$$C'_1 = -2 * C_2$$

$$C_2 = 1.0$$

$$C'_2 = -2.40874 - 39.748 * (1 + h_{ac})^{-2.856}$$

- Para agrietamiento de arriba hacia abajo (pies/milla)

$$FC_{top} = \left(\frac{1000}{1 + e^{7.0 - 3.5 \cdot \log_{10}(D \cdot 100)}} \right) * 10.56 \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde:

FC_{top} : Agrietamiento por fatiga de arriba hacia abajo, pies/milla.

D : Daño por fatiga de arriba hacia abajo (Ecuación 12)

Con estas ecuaciones (Ecuación 19 y Ecuación 20) se obtiene el agrietamiento predicho para el pavimento de diseño según se quiera calcular de forma independiente.

2.5 VALIDACIÓN ESTADÍSTICA SEGÚN MÉTODO JACK KNIFE

En base al artículo publicado por Abdi y Williams (Abdi y Williams, 2010), el objetivo de Jack-knife es estimar un parámetro de una población de interés a través de una muestra aleatoria de esta población. La estimación Jack-knife de un parámetro es un proceso iterativo. Primero el parámetro es estimado en toda la muestra. Luego, cada elemento es, por turnos, sacado desde la muestra y el parámetro de interés es calculado sobre dicha muestra. Esta estimación es denominada estimación parcial (o réplica Jack-knife). Luego se obtiene un pseudovalor a través de la diferencia entre el estimador de toda la muestra y la estimación parcial. Estos pseudovalores reducen el sesgo de la estimación parcial. Posteriormente, los pseudovalores son utilizados en lugar de los valores originales para obtener el parámetro de interés y su respectiva desviación estándar.

Un método relacionado, también llamado Jack-knife, es usado para evaluar la calidad de la predicción de modelos computacionales. Dichos modelos pueden utilizar, por ejemplo, redes neuronales, algoritmos genéticos, modelos estadísticos, o cualquier otra técnica de análisis multivariable. Usualmente, estos modelos utilizan una gran cantidad de parámetros y pocas observaciones y son en general demasiado complejos para ser analizados a través de técnicas analíticas, por lo tanto, el efecto de sobreajuste (over-fitting, es decir predice perfectamente el registro de datos, pero no es capaz de predecir nuevas observaciones) es

difícil de evaluar directamente. El método Jack-knife puede ser usado para obtener una predicción insesgada y para minimizar el efecto del sobreajuste.

2.5.1 Descripción del método

A partir del estudio de Hervé Abdi (Abdi y Williams, 2010) se explica a continuación el detalle del procedimiento de análisis mediante el método Jack-knife utilizado en este estudio.

El objetivo del método Jack-knife es estimar un parámetro de la población de interés de una muestra organizada aleatoriamente de los datos que componen la población. El parámetro en este caso se denota como θ , el estimador de la muestra es T , y el estimador parcial o jackknife se denota como T^* . La muestra de N observaciones (la cual puede ser univariada o multivariada) es un conjunto de valores $\{X_1, \dots, X_n, \dots, X_N\}$. El estimador del parámetro obtenido de la muestra es una función de este conjunto de valores. Que formalmente se escribe como:

$$T = f(X_1, \dots, X_n, \dots, X_N) \quad \text{Ecuación 21}$$

Una estimación del parámetro de la población obtenido sin la observación i -ésima, se denominada predicción parcial, y se denota formalmente como T_{-n} , que formalmente se escribe como:

$$T_{-n} = f(X_1, \dots, X_{n-1}, X_{n+1}, \dots, X_N) \quad \text{Ecuación 22}$$

Una estimación de pseudo valor, tal como se describió anteriormente, se denota T_n^* , y se calcula como la diferencia entre la estimación obtenida de toda la muestra y la muestra sin el conjunto de observaciones i -ésimo. Formalmente:

$$T_n^* = N * T - (N - 1) * T_{-n} \quad \text{Ecuación 23}$$

Por lo tanto, el estimador Jack-knife de θ , denotado como T^* , es obtenido como el promedio de los pseudo valores. Formalmente:

$$T^* = \bar{T}_n^* = \frac{1}{N} \sum T_n^* \quad \text{Ecuación 24}$$

Donde \bar{T}_n^* es el promedio de los pseudo-valores. La varianza de los pseudo-valores se denota como $\hat{\sigma}_{T_n^*}^2$ y se calcula según la siguiente fórmula:

$$\hat{\sigma}_{T_n^*}^2 = \frac{\sum (T_n^* - \bar{T}_n^*)^2}{N - 1} \quad \text{Ecuación 25}$$

Según Abdi (Abdi y Williams, 2010), Tukey concluyó de esta manera que los valores de T_n^* podrían ser considerados como variables aleatorias independientes. Por lo tanto, el error estándar de los parámetros estimados, denotada como $\hat{\sigma}_{T_n^*}$, podría ser obtenida de la varianza de los pseudo-valores de la formula conocida para la media del error estándar:

$$\sqrt{\hat{\sigma}_{T_n^*}^2} = \sqrt{\frac{\sum (T_n^* - \bar{T}_n^*)^2}{N - 1}} \quad \text{Ecuación 26}$$

El método Jack-knife fue originalmente desarrollado por Quenouille como una forma no paramétrica de estimar y reducir el sesgo de un estimador de un parámetro de alguna población. El sesgo de un estimador se define como la diferencia entre el valor esperado del estimador y el valor verdadero obtenido de la población. Por lo tanto, el sesgo, denotado por B , de una estimación T de un parámetro θ se define como:

$$B = E\{T\} - \theta \quad \text{Ecuación 27}$$

Siendo $E\{T\}$ el valor esperado de T .

El estimador Jack-knife del sesgo se calcula reemplazando el valor esperado del estimador ($E\{T\}$) por el estimador sesgado (T) y reemplazando el parámetro θ , por el estimador jack-knife no sesgado (T^*). Específicamente, el estimador jack-knife del sesgo, denotado como B_{jack} se calcula como:

$$B_{jack} = T - T^* \qquad \text{Ecuación 28}$$

En términos técnicos, el objetivo de aplicar el método de Jack-knife es estimar el comportamiento del modelo predictivo como un modelo de efecto aleatorio para determinar su validez.

3 PROCESO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS DE LABORATORIO

Para el desarrollo de esta memoria se trabajó con resultados de ensayos realizados en las dependencias del laboratorio LEMCO. Los procesos para realizar dichos ensayos y sus resultados se describen a continuación.

3.1 MEZCLAS ASFÁLTICAS

3.1.1 Mezclas fabricadas en laboratorio FONDEF D09I1174

Este proyecto contempla cinco mezclas cuyas probetas fueron confeccionadas en el laboratorio de ensaye LEMCO. La granulometría y ligante de cada mezcla se describe a continuación:

3.1.1.1 IV-A-12 Tradicional

La banda granulométrica utilizada para esta mezcla es la IV-A-12 diseñada por el método Marshall según se muestra en la Tabla 1. El ligante utilizado es tradicional y corresponde a un PG64-22. Las especificaciones de diseño de esta mezcla indican 5% de vacíos de aire y 11.61% de contenido de asfalto efectivo (correspondiente a un 5.2% y 4.9% de asfalto respecto a los agregados y el total de la mezcla, respectivamente).

Tabla 1 Banda granulométrica IV-A-12
Porcentaje que pasa en peso

| Tamiz | | Mezcla | Banda Especificada | |
|-------|-------|--------|--------------------|-----|
| mm | ASTM | | IV-A-12 | |
| 25 | 1" | 100 | 100 | 100 |
| 20 | ¾" | 100 | 100 | 100 |
| 12.5 | ½" | 89 | 80 | 95 |
| 10 | 3/8" | 77 | 70 | 85 |
| 5 | N°4 | 50 | 43 | 58 |
| 2.5 | N°8 | 34 | 28 | 42 |
| 0.63 | N°30 | 16 | 13 | 24 |
| 0.315 | N°50 | 11 | 8 | 17 |
| 0.16 | N°100 | 9 | 6 | 12 |
| 0.08 | N°200 | 5.7 | 4 | 8 |

3.1.1.2 IV-A-12 Modificado

Para la confección de esta mezcla se utiliza la banda granulométrica IV-A-12 establecida en la Tabla 1. El ligante utilizado es modificado correspondiente a un PG70-28. Las especificaciones de diseño de esta mezcla indican 5% de vacíos de aire y 11.69% de contenido de asfalto efectivo (correspondiente a un 5.2% y 4.9% de asfalto respecto a los agregados y el total de la mezcla, respectivamente).

3.1.1.3 M10

La banda granulométrica utilizada para esta mezcla es la M-10 según se muestra en la Tabla 2. El ligante utilizado es modificado correspondiente a un PG70-22. Las especificaciones de diseño de esta mezcla indican 10.4% de vacíos de aire y 10.15% de contenido de asfalto efectivo (correspondiente a un 5.3% y 5.0% de asfalto respecto a los agregados y el total de la mezcla, respectivamente).

Tabla 2 Banda granulométrica M-10

| Porcentaje que pasa en peso | | | | |
|-----------------------------|-------|--------|--------------------|-----|
| Tamiz | | Mezcla | Banda Especificada | |
| mm | ASTM | | M-10 | |
| 20 | ¾" | 100 | 100 | 100 |
| 12.5 | ½" | 100 | 100 | 100 |
| 10 | 3/8" | 81 | 75 | 97 |
| 5 | N°4 | 24 | 15 | 28 |
| 2.5 | N°8 | 16 | 12 | 25 |
| 0.63 | N°30 | 10 | 9 | 18 |
| 0.08 | N°200 | 6 | 5 | 8 |

3.1.1.4 SMA Pellet

La banda granulométrica utilizada para esta mezcla es del tipo SMA, que se muestra en la Tabla 3. La banda de trabajo se realizó en base a la especificación Alemana ZTV Asphalt-StB 07. Además de la banda especificada a esta mezcla se le incorpora fibra tipo Pellet Viatop. El ligante utilizado, es modificado correspondiente a un PG70-22. Las especificaciones de diseño de esta mezcla indican 2.9% de vacíos de aire y 15.06% de contenido de asfalto efectivo (correspondiente a un 6.8% y 6.4% de asfalto respecto a los agregados y el total de la mezcla, respectivamente).

Tabla 3 Banda granulométrica SMA
Porcentaje que pasa en peso

| Tamiz | | Mezcla | Banda Especificada | |
|-------|-------|--------|--------------------|-----|
| mm | ASTM | | SMA | |
| 25 | 1" | 100 | 100 | 100 |
| 20 | ¾" | 100 | 100 | 100 |
| 16 | 5/8" | 100 | 100 | 100 |
| 12.5 | ½" | 100 | 100 | 93 |
| 11.2 | 7/16" | 99 | 100 | 90 |
| 9.5 | 3/8" | 83 | 83 | 70 |
| 8 | 5/16" | 63 | 65 | 50 |
| 5.6 | #3 ½ | 39 | 45 | 35 |
| 4.75 | #4 | 34 | 43 | 33 |
| 2.36 | #8 | 24 | 32 | 22 |
| 2 | #10 | 23 | 30 | 20 |
| 0.6 | #30 | 16 | 24 | 16 |
| 0.3 | #50 | 13 | 20 | 13 |
| 0.16 | #100 | 12 | 17 | 11 |
| 0.075 | #200 | 10 | 13 | 9 |
| 0.063 | #300 | 10 | 12 | 8 |

3.1.1.5 SMA Fibra

Esta mezcla posee la misma banda granulométrica SMA descrita en la Tabla 3, además, a la mezcla se le incorpora fibra tipo Celulosa Kaltex. El ligante utilizado, es modificado

correspondiente a un PG70-22. Las especificaciones de diseño de esta mezcla indican 4.9% de vacíos de aire y 13.15% de contenido de asfalto efectivo (correspondiente a un 6.0% y 5.7% de asfalto respecto a los agregados y el total de la mezcla, respectivamente).

3.1.2 Mezclas en pistas de prueba FONDEF D09I1174

Las mezclas de este proyecto no fueron preparadas en laboratorio, sino que fueron obtenidas directamente de muestras en terreno. El proyecto contempla cinco mezclas asfálticas descritas a continuación.

3.1.2.1 IV-A-12 Autopista del Maipo

La banda granulométrica utilizada para esta mezcla es la IV-A-12 según se muestra en la Tabla 4. El ligante utilizado es modificado con polímeros SBS (Cauchos sintéticos con 25% de estireno y 75% de butadieno) y posee un PG76-28. Las especificaciones de diseño de esta mezcla indican 4.7% de vacíos de aire y 13.58% de contenido de asfalto efectivo (correspondiente a un 5.9% y 5.6% de asfalto respecto a los agregados y el total de la mezcla, respectivamente).

Tabla 4 Banda granulométrica IV-A-12 A. del Maipo
Porcentaje que pasa en peso

| Tamiz | | Mezcla | Banda Especificada | |
|-------|-------|--------|--------------------|-----|
| mm | ASTM | | IV-A-12 | |
| 20 | ¾" | 100 | 100 | 100 |
| 12.5 | ½" | 85 | 80 | 95 |
| 10 | 3/8" | 70 | 70 | 85 |
| 5 | Nº4 | 51 | 43 | 58 |
| 2.5 | Nº8 | 33 | 28 | 42 |
| 1.35 | Nº16 | 22 | - | - |
| 0.6 | Nº30 | 16 | 13 | 24 |
| 0.3 | Nº50 | 11 | 8 | 17 |
| 0.16 | Nº100 | 8 | 6 | 12 |
| 0.08 | Nº200 | 6.2 | 4 | 8 |

3.1.2.2 SMA Autopista Central

La banda granulométrica utilizada para esta mezcla es la SMA según se muestra en la Tabla 5. El ligante utilizado es modificado con un PG76-28. Las especificaciones de diseño de esta mezcla indican 3% de vacíos de aire y 15.34% de contenido de asfalto efectivo (correspondiente a un 6.8% y 6.4% de asfalto respecto a los agregados y el total de la mezcla, respectivamente).

Tabla 5 Banda granulométrica SMA Autopista Central
Porcentaje que pasa en peso

| Tamiz | | Mezcla | Banda Especificada | |
|-------|-------|--------|------------------------------|-----|
| mm | ASTM | | TL Asphalt-StB 07 Modificada | |
| 20 | ¾" | 100 | 100 | 100 |
| 12.5 | ½" | 100 | 100 | 93 |
| 10 | 3/8" | 83 | 83 | 70 |
| 5 | N°4 | 34 | 43 | 33 |
| 2.5 | N°8 | 24 | 32 | 22 |
| 0.6 | N°30 | 16 | 24 | 16 |
| 0.3 | N°50 | 13 | 20 | 13 |
| 0.16 | N°100 | 12 | 17 | 11 |
| 0.08 | N°200 | 10 | 13 | 9 |

3.1.2.3 SMA Autopista del Maipo

La banda granulométrica utilizada para esta mezcla es la SMA según se muestra en la Tabla 5. El ligante utilizado es modificado con un PG82-28. Las especificaciones de diseño de esta mezcla indican 3% de vacíos de aire y 13.50% de contenido de asfalto efectivo (correspondiente a un 5.9% y 5.6% de asfalto respecto a los agregados y el total de la mezcla, respectivamente).

3.1.2.4 MDC Autopista del Sol

La banda granulométrica utilizada para esta mezcla es la M10 según se muestra en la Tabla 6. El ligante utilizado es modificado con un PG76-28. Las especificaciones de diseño de esta mezcla indican 10% de vacíos de aire y 11.19% de contenido de asfalto efectivo (correspondiente a un 5.1% y 4.8% de asfalto respecto a los agregados y el total de la mezcla, respectivamente).

Tabla 6 Banda granulométrica MDC Autopista del Sol
Porcentaje que pasa en peso

| Tamiz | | Mezcla | Banda Especificada | |
|-------|-------|--------|--------------------|----|
| mm | ASTM | | M10 | |
| 12.5 | ½" | 100 | 100 | 93 |
| 9.5 | 3/8" | 81 | 97 | 75 |
| 4.75 | N°4 | 24 | 28 | 15 |
| 2.36 | N°8 | 16 | 25 | 12 |
| 0.6 | N°30 | 10 | 18 | 9 |
| 0.3 | N°50 | 8 | - | - |
| 0.16 | N°100 | 7 | - | - |
| 0.075 | N°200 | 6 | 8 | 5 |

3.1.2.5 MDC Autopista del Maipo

La banda granulométrica utilizada para esta mezcla es la M10 según se muestra en la Tabla 6. El ligante utilizado es modificado con un PG82-28. Las especificaciones de diseño de esta mezcla indican 10% de vacíos de aire y 11.19% de contenido de asfalto efectivo (correspondiente a un 4.8% y 4.6% de asfalto respecto a los agregados y el total de la mezcla, respectivamente).

3.1.3 Mezclas con RAP

En este proyecto se estudian 3 mezclas asfálticas, la primera sin RAP, la segunda con 8% de RAP y la última con 18% de RAP.

3.1.3.1 IV-A-12 Sin RAP

La banda granulométrica utilizada para esta mezcla es la IV-A-12 según se muestra en la Tabla 7. El ligante utilizado es tradicional con un PG64-22. Las especificaciones de diseño de esta mezcla indican 5% de vacíos de aire y 10.98% de contenido de asfalto efectivo (correspondiente a un 5.0% y 4.8% de asfalto respecto a los agregados y el total de la mezcla, respectivamente).

Tabla 7 Banda Granulométrica IV-A-12 Sin RAP

| Porcentaje que pasa en peso | | | | |
|-----------------------------|-------|--------|--------------------|-----|
| Tamiz | | Mezcla | Banda Especificada | |
| mm | ASTM | | IV-A-12 | |
| 20 | ¾" | 100 | 100 | 100 |
| 12.5 | ½" | 88 | 80 | 95 |
| 10 | 3/8" | 76 | 70 | 85 |
| 5 | N°4 | 53 | 43 | 58 |
| 2.5 | N°8 | 34 | 28 | 42 |
| 0.6 | N°30 | 17 | 13 | 24 |
| 0.3 | N°50 | 13 | 8 | 17 |
| 0.16 | N°100 | 9 | 6 | 12 |
| 0.08 | N°200 | 6 | 4 | 8 |

3.1.3.2 IV-A-12 con 8% RAP

La banda granulométrica utilizada para esta mezcla es la IV-A-12 según se muestra en la Tabla 8. Tal como indica su nombre, esta mezcla posee un 8% de RAP El ligante utilizado es tradicional con un PG64-22. Las especificaciones de diseño de esta mezcla indican 5% de vacíos de aire y 10.64% de contenido de asfalto efectivo (correspondiente a un 4.75% y 4.53% de asfalto respecto a los agregados y el total de la mezcla, respectivamente).

Tabla 8 Banda granulométrica IV-A-12 con 8% RAP

| Porcentaje que pasa en peso | | | | |
|-----------------------------|-------|--------|--------------------|-----|
| Tamiz | | Mezcla | Banda Especificada | |
| mm | ASTM | | IV-A-12 | |
| 20 | ¾" | 100 | 100 | 100 |
| 12.5 | ½" | 88 | 80 | 95 |
| 10 | 3/8" | 76 | 70 | 85 |
| 5 | N°4 | 52 | 43 | 58 |
| 2.5 | N°8 | 34 | 28 | 42 |
| 0.6 | N°30 | 16 | 13 | 24 |
| 0.3 | N°50 | 12 | 8 | 17 |
| 0.16 | N°100 | 9 | 6 | 12 |
| 0.08 | N°200 | 6 | 4 | 8 |

3.1.3.3 IV-A-12 con 18% RAP

La banda granulométrica utilizada para esta mezcla es la IV-A-12 según se muestra en la Tabla 9. Tal como indica su nombre, esta mezcla posee un 18% de RAP. El ligante utilizado es tradicional con un PG64-22, sin embargo, al añadir el RAP a la mezcla el ligante resultante aumenta en un grado dando como resultado un PG70-16. Las especificaciones de diseño de esta mezcla indican 5% de vacíos de aire y 9.6% de contenido de asfalto efectivo (correspondiente a un 4.25% y 4.08% de asfalto respecto a los agregados y el total de la mezcla, respectivamente).

Tabla 9 Banda granulométrica IV-A-12 con 18% RAP

| Porcentaje que pasa en peso | | | | |
|-----------------------------|-------|--------|--------------------|-----|
| Tamiz | | Mezcla | Banda Especificada | |
| mm | ASTM | | IV-A-12 | |
| 20 | ¾" | 100 | 100 | 100 |
| 12.5 | ½" | 88 | 80 | 95 |
| 10 | 3/8" | 76 | 70 | 85 |
| 5 | N°4 | 55 | 43 | 58 |
| 2.5 | N°8 | 35 | 28 | 42 |
| 0.6 | N°30 | 16 | 13 | 24 |
| 0.3 | N°50 | 12 | 8 | 17 |
| 0.16 | N°100 | 9 | 6 | 12 |
| 0.08 | N°200 | 6 | 4 | 8 |

3.1.4 Mezcla para Aeropuerto

La banda granulométrica utilizada responde a las solicitudes indicadas por las especificaciones técnicas del proyecto (Dirección de Aeropuertos, 2015), la banda utilizada y la especificada se muestran en la Tabla 10. El ligante utilizado es modificado correspondiente a un PG82-22. Las especificaciones de diseño de esta mezcla indican 3.5% de vacíos de aire y 12.08% de contenido de asfalto efectivo (correspondiente a un 5.37% y 5.09% de asfalto respecto a los agregados y el total de la mezcla, respectivamente).

Tabla 10 Banda Granulométrica Mezcla Aeropuerto
Porcentaje que pasa en peso

| Tamiz | | Mezcla | Banda Especificada | |
|-------|-------|--------|--------------------------------------|-----|
| mm | ASTM | | Granulometría Grad. 2: 3/4" máx 19mm | |
| 25 | 1" | 100 | 100 | 100 |
| 19 | 3/4" | 100 | 100 | 100 |
| 12.5 | 1/2" | 89.4 | 79 | 99 |
| 9.5 | 3/8" | 74.8 | 68 | 88 |
| 4.75 | N°4 | 53.1 | 48 | 68 |
| 2.36 | N°8 | 36.3 | 33 | 53 |
| 1.18 | N°16 | 23.1 | 20 | 40 |
| 0.63 | N°30 | 16 | 14 | 30 |
| 0.315 | N°50 | 11.6 | 9 | 21 |
| 0.15 | N°100 | 8.3 | 6 | 16 |
| 0.075 | N°200 | 4.95 | 3 | 6 |

3.2 FATIGA

3.2.1 Mezclas fabricadas en laboratorio FONDEF D09I1174

La información de estas mezclas corresponde a la memoria “Caracterización del desempeño a fatiga mediante el enfoque fenomenológico y de disipación de energía de mezclas asfálticas Chilenas” (Marín, 2013), en ella se profundiza con mayor detalle el proceso de ensaye.

3.2.1.1 Preparación de probetas

La preparación de las probetas se realiza bajo lo establecido en la norma AASHTO PP3 (AASHTO, 1996) y se describe brevemente a continuación. Los áridos se secan a masa constante y luego son tamizados según los tamaños especificados en la malla de diseño, siguiente a esto se mezclan con el ligante asfáltico a temperatura de mezclado indicado según el manual de carreteras. Luego del proceso de mezclado, la mezcla se acondiciona en el horno a la temperatura de compactación $\pm 3^{\circ}\text{C}$. Finalmente la mezcla se compacta mediante el compactador de rodillo y se deja enfriar a temperatura ambiente durante 15-16 horas para luego cortarlas según indica la norma AASHTO T321 (AASHTO, 2007) para ensayar.

3.2.1.2 Condiciones de ensayo

El ensayo se realiza bajo deformación controlada con pulsos sinusoidales, a una temperatura de 20°C y una frecuencia de carga de 10Hz, el criterio de falla establecido corresponde a la reducción de un 50% de la rigidez inicial de la probeta.

3.2.1.3 Resultados de ensayo

En los resultados a continuación, se presentan los valores de N_{f50} promedios por nivel de deformación asociados al criterio de falla establecido en el ensaye. Los promedios antes indicados corresponden a tres probetas ensayadas, excepto para aquellos resultados señalados con asterisco (*), donde el memorista a cargo del ensayo (Marín, 2013) eliminó una medición

por inducir un elevado coeficiente de variación en los resultados, para dichos casos se promediaron solo dos resultados.

3.2.1.3.1 IV-A-12 Tradicional

Tabla 11 Resultados ensayo de fatiga IV-A-12 Tradicional

| Nivel de deformación $\mu\text{strain} [\text{mm/mm} \times 10^{-6}]$ | N_{f50} |
|--|-----------|
| 500 | 2635 |
| 400 | 4202 |
| 350 | 12171 |
| 300 | 19014 |
| 100* | 1124644 |

3.2.1.3.2 IV-A-12 Modificado

Tabla 12 Resultados ensayo de fatiga IV-A-12 Modificado

| Nivel de deformación $\mu\text{strain} [\text{mm/mm} \times 10^{-6}]$ | N_{f50} |
|--|-----------|
| 750* | 9167 |
| 500 | 49431 |
| 400 | 309616 |
| 300* | 1230788 |

3.2.1.3.3 M10

Tabla 13 Resultados ensayo de fatiga M10

| Nivel de deformación $\mu\text{strain} [\text{mm/mm} \times 10^{-6}]$ | N_{f50} |
|--|-----------|
| 750 | 6005 |
| 500 | 13755 |
| 300 | 158564 |
| 170 | 1187248 |

3.2.1.3.4 SMA Pellet

Tabla 14 Resultados ensayo de fatiga SMA Pellet

| Nivel de deformación μstrain [mm/mm x 10 ⁻⁶] | Nf ₅₀ |
|--|------------------|
| 750 | 10658 |
| 500* | 63583 |
| 400* | 103972 |
| 300 | 671102 |
| 250 | 1575660 |

3.2.1.3.5 SMA Fibra

Tabla 15 Resultados ensayo de fatiga SMA Fibra

| Nivel de deformación μstrain [mm/mm x 10 ⁻⁶] | Nf ₅₀ |
|--|------------------|
| 750 | 6686 |
| 500 | 20922 |
| 300* | 213673 |
| 200 | 988009 |

3.2.2 Mezclas en pistas de prueba FONDEF D09I1174

La información de estas mezclas y los ensayos realizados se encuentra disponibles en distintas memorias realizadas en el departamento de obras civiles de la Universidad Técnica Federico Santa María y se enmarcan en el proyecto FONDEF D09I1174.

3.2.2.1 Preparación de probetas

Las mezclas para la fabricación de estas probetas se obtienen en terreno, proporcionadas por la empresa que entrega la mezcla a la autopista. Una vez recibidas estas mezclas en laboratorio LEMCO se almacenan hasta realizar el ensayo. En primera instancia se lleva la mezcla al horno hasta alcanzar la temperatura de compactación (160°C) y luego se compacta mediante el compactador de rodillo, siguiente a esto la mezcla se deja enfriar durante toda la noche a temperatura ambiente para luego secarlas a masa constante (en horno

sellado a 50°C). Finalmente, las probetas se cortan y ensayan según lo indicado en la norma AASHTO T321 (AASHTO, 2007).

3.2.2.2 Condiciones de ensayo

El ensayo se realiza bajo deformación controlada con pulsos sinusoidales, a una temperatura de 20°C y una frecuencia de carga de 10Hz, el criterio de falla establecido corresponde a la reducción de un 50% de la rigidez inicial de la probeta.

3.2.2.3 Resultados de ensayo

En los resultados a continuación, se presentan los valores de Nf_{50} promedios por nivel de deformación asociados al criterio de falla establecido en el ensaye. Los promedios antes indicados corresponden a tres probetas ensayadas.

3.2.2.3.1 IV-A-12 Autopista del Maipo

Tabla 16 Resultados ensayo de fatiga IV-A-12 Autopista del Maipo (Pacheco, 2016)

| Nivel de deformación μstrain [mm/mm x 10 ⁻⁶] | Nf_{50} |
|--|-----------|
| 750 | 9870 |
| 500 | 53928 |
| 350 | 644998 |
| 300 | 1856875 |

3.2.2.3.2 SMA Autopista Central

Tabla 17 Resultados ensayo de fatiga SMA Autopista Central (Lobos, 2016)

| Nivel de deformación μstrain [mm/mm x 10 ⁻⁶] | Nf_{50} |
|--|-----------|
| 750 | 50905 |
| 500 | 226827 |
| 450 | 455552 |
| 350 | 3937530 |

3.2.2.3.3 SMA Autopista del Maipo

Tabla 18 Resultados ensayo de fatiga SMA Autopista del Maipo (Lobos, 2016)

| Nivel de deformación μstrain [mm/mm x 10 ⁻⁶] | Nf ₅₀ |
|--|------------------|
| 750 | 1061 |
| 500 | 16252 |
| 350 | 38928 |
| 250 | 176993 |

Se presentan los resultados de esta mezcla en el marco del proyecto en que está desarrollada, sin embargo, para esta memoria no se utilizarán dichos resultados debido a que las probetas de fatiga fueron sobre compactadas al momento de su confección. A raíz de esto, los agregados se ven fracturados y los resultados no corresponden a los esperados para el tipo de mezcla.

3.2.2.3.4 MDC Autopista del Sol

Tabla 19 Resultados ensayo de fatiga M10 Autopista del Sol (Fredes, 2015)

| Nivel de deformación μstrain [mm/mm x 10 ⁻⁶] | Nf ₅₀ |
|--|------------------|
| 750 | 5650 |
| 500 | 95317 |
| 350 | 240918 |
| 250 | 1936680 |

3.2.2.3.5 MDC Autopista del Maipo

Tabla 20 Resultados ensayo de fatiga M10 Autopista del Maipo (Leiva, 2015)

| Nivel de deformación μstrain [mm/mm x 10 ⁻⁶] | Nf ₅₀ |
|--|------------------|
| 750 | 13067 |
| 500 | 34219 |
| 375 | 294777 |
| 250 | 1651579 |

3.2.3 Mezclas con RAP

Las mezclas con RAP corresponden a un conjunto de memorias que analizan el desempeño de mezclas a las que se le incorpora pavimento asfáltico reciclado (llamado RAP por sus siglas en inglés, Reclaimed Asphalt Pavement).

3.2.3.1 Preparación de probetas

Se realiza la mezcla del agregado con el asfalto en caliente a temperatura de mezclado y luego se acondiciona a una temperatura de 135°C para simular el envejecimiento a corto plazo (asociado al transporte y colocación en terreno). Luego del proceso de mezclado, la mezcla se lleva a 145°C, que corresponde a la temperatura de compactación, para compactarla con el Compactador de Rodillo Cooper (Roller Compactor Multi Purpose CRT-RCMP-1111-01). Se retira la mezcla del compactador y se deja enfriar 24hrs antes de desmoldar. Luego de desmoldar las probetas, estas se cortan según las dimensiones requeridas para el ensayo según la norma AASHTO T321 (AASHTO, 2007) y se vuelven a ingresar al horno por 12 horas a 50°C hasta alcanzar masa contante para finalmente ensayar.

3.2.3.2 Condiciones de ensayo

El ensayo se realiza bajo deformación controlada con pulsos sinusoidales, a una temperatura de 20°C y una frecuencia de carga de 10Hz, el criterio de falla establecido corresponde a la reducción de un 50% de la rigidez inicial de la probeta.

3.2.3.3 Resultados de ensayo

En los resultados a continuación, se presentan los valores de Nf_{50} promedios por nivel de deformación asociados al criterio de falla establecido en el ensayo. Los promedios antes indicados corresponden a tres probetas ensayadas.

3.2.3.3.1 IV-A-12 Sin RAP**Tabla 21 Resultado ensayos de Fatiga IV-A-12 Sin RAP (Ávila, 2017)**

| Nivel de deformación $\mu\text{strain} [\text{mm/mm} \times 10^{-6}]$ | N_{f50} |
|--|-----------|
| 600 | 297 |
| 500 | 850 |
| 350 | 1969 |
| 250 | 11122 |

3.2.3.3.2 IV-A-12 con 8% RAP**Tabla 22 Resultados ensayo de fatiga IV-A-12 con 8% RAP (Ávila, 2017)**

| Nivel de deformación $\mu\text{strain} [\text{mm/mm} \times 10^{-6}]$ | N_{f50} |
|--|-----------|
| 500 | 431 |
| 500 | 749 |
| 500 | 690 |

Es importante destacar que los resultados de esta mezcla no serán considerados para análisis debido a que el nivel de información solo permite calcular el parámetro N_{500} de la mezcla asfáltica, que no está dentro del análisis propuesto dentro de esta memoria.

3.2.3.3.3 IV-A-12 con 18% RAP**Tabla 23 Resultados ensayo de fatiga IV-A-12 con 18% RAP (Montalva, 2016)**

| Nivel de deformación $\mu\text{strain} [\text{mm/mm} \times 10^{-6}]$ | N_{f50} |
|--|-----------|
| 600 | 396 |
| 500 | 847 |
| 350 | 1345 |
| 250 | 8858 |

3.2.4 Mezcla para aeropuerto

Las mezclas correspondientes a esta sección se analizan bajo el marco del proyecto “Conservación rutinaria Aeropuerto Arturo Merino Benítez año 2016 Etapa I”.

3.2.4.1 Preparación de probetas

La mezcla se acondiciona durante 2 horas en el horno a temperatura de compactación (157°C) para simular el envejecimiento a corto plazo. Se realiza la mezcla a una temperatura mayor a 15°C de la temperatura de de mezclado (174°C) y luego se lleva al horno a temperatura de compactación y se compacta con el compactador de rodillo hasta alcanzar los vacíos de aire requeridos.

El grupo de probetas acondicionadas a corto plazo se ensaya luego de compactar según la norma AASHTO T321 (AASHTO, 2007).

Posterior a la compactación y previo al ensayo las probetas acondicionadas a largo plazo se llevan al horno a una temperatura de 85°C durante 5 días, según la norma AASHTO R30-02 (AASHTO, 2015) y posteriormente se ensayan según la norma AASHTO T321 (AASHTO, 2007).

3.2.4.2 Condiciones de ensayo

El ensayo se realiza bajo deformación controlada con pulsos sinusoidales, a una temperatura de 20°C y una frecuencia de carga de 10Hz, el criterio de falla establecido corresponde a la reducción de un 50% de la rigidez inicial de la probeta.

3.2.4.3 Resultados de ensayo

En los resultados a continuación, se presentan los valores de Nf_{50} promedios por nivel de deformación asociados al criterio de falla establecido en el ensaye. Los promedios antes indicados corresponden a tres probetas ensayadas.

Tabla 24 Resultados ensayo de fatiga Aeropuerto mezcla Corto Plazo (Vásquez, 2017)

| Nivel de deformación μstrain [mm/mm x 10⁻⁶] | Nf₅₀ |
|---|------------------------|
| 750 | 1296 |
| 500 | 23195 |
| 375 | 37617 |
| 250 | 5849892 |

Tabla 25 Resultados ensayo de fatiga Aeropuerto mezcla Largo Plazo (Escobar, 2017)

| Nivel de deformación μstrain [mm/mm x 10⁻⁶] | Nf₅₀ |
|---|------------------------|
| 750 | 1513 |
| 500 | 15957 |
| 375 | 26144 |
| 250 | 396013 |

3.3 MÓDULO DINÁMICO

3.3.1 Mezclas fabricadas en laboratorio FONDEF D09I1174

El desarrollo en detalle de la confección de probetas y ensayo se encuentra disponible en la memoria “Caracterización del Módulo Dinámico de mezclas asfálticas chilenas y caracterización de la Rigidez a bajas temperaturas de betunes con BBR” (Toro, 2013).

3.3.1.1 Preparación de probetas

Los áridos y el ligante asfáltico se acondicionan en el horno a temperatura de mezclado durante aproximadamente 2 horas. Una vez acondicionados los materiales se mezclan mediante una maquina mezcladora sin perder la temperatura de mezclado. Luego de que la mezcla es acondicionada se deja dos horas en el horno a temperatura de compactación para simular el envejecimiento primario.

La compactación de la mezcla se realiza utilizando un compactador giratorio, que simula mejor la compactación que el método Marshall, ya que simula de mejor forma la compresión que sufre la mezcla en terreno. Finalmente, la probeta se corta según las dimensiones necesarias para realizar el ensayo.

3.3.1.2 Procedimiento de ensayo

El ensayo se lleva a cabo según la norma AASHTO T342 (AASHTO, 2011). Se realiza a una temperatura de -10°C, 4°C, 21°C, 37°C y 54°C, bajo las frecuencias de carga indicadas en la Tabla 26 con sus números de ciclos asociados.

Tabla 26 Frecuencia y número de ciclos asociado al ensayo (AASHTO, 2011)

| Frecuencia [Hz] | Número de ciclos |
|-----------------|------------------|
| 25 | 200 |
| 10 | 200 |
| 5 | 100 |
| 1 | 20 |
| 0.5 | 15 |
| 0.1 | 15 |

Para el ensayo se deben colocar las probetas en la cámara térmica hasta que se estabiliza la temperatura de ensayo especificada en la norma AASHTO T342 (AASHTO, 2011). Los especímenes están instrumentalizados con LVDT y se ensayan 2 probetas para todas las combinaciones posibles de frecuencias de carga y temperatura (30 combinaciones), se parte de la temperatura más baja hasta la más alta y desde la mayor frecuencia de carga hasta la más baja.

Según Toro (Toro, 2013), la norma presenta una recomendación de rangos de carga para cada temperatura, sin embargo, estas no coinciden con las que se deben aplicar a las probetas utilizadas en este ensayo por lo que recomienda ensayar desde cargas menores para no sacar la probeta del rango de deformación elástico. Las cargas aplicadas a las probetas son del tipo Haversine y el rango de carga se indica en la Tabla 27

Tabla 27 Carga aplicada durante el ensayo según temperatura (Toro, 2013)

| Temperatura [°C] | Rango de carga [KPa] |
|------------------|----------------------|
| -10 | 1800 a 2000 |
| 4 | 800 a 1200 |
| 21 | 100 a 350 |
| 37 | 50 a 140 |
| 54 | 50 |

3.3.1.3 Resultados del ensayo

3.3.1.3.1 IV-A-12 Tradicional

Tabla 28 Resultados ensayo de Módulo Dinámico IV-A-12 Tradicional

| Temperatura °C | Frecuencia Hz | Módulo Dinámico MPa | Temperatura °C | Frecuencia Hz | Módulo Dinámico MPa |
|-------------------|------------------|---------------------------|-------------------|------------------|---------------------------|
| -10 | 25 | 24579 | 37 | 25 | 1600 |
| -10 | 10 | 23945 | 37 | 10 | 1105 |
| -10 | 5 | 22866 | 37 | 5 | 808 |
| -10 | 1 | 20884 | 37 | 1 | 409 |
| -10 | 0.5 | 19876 | 37 | 0.5 | 322 |
| -10 | 0.1 | 17270 | 37 | 0.1 | 202 |
| 4 | 25 | 16517 | 54 | 25 | 355 |
| 4 | 10 | 14771 | 54 | 10 | 321 |
| 4 | 5 | 13413 | 54 | 5 | 246 |
| 4 | 1 | 10701 | 54 | 1 | 131 |
| 4 | 0.5 | 9558 | 54 | 0.5 | 101 |
| 4 | 0.1 | 6662 | 54 | 0.1 | 86 |
| 21 | 25 | 6300 | | | |
| 21 | 10 | 5037 | | | |
| 21 | 5 | 4173 | | | |
| 21 | 1 | 2480 | | | |
| 21 | 0.5 | 1931 | | | |
| 21 | 0.1 | 1064 | | | |

3.3.1.3.2 IV-A-12 Modificado**Tabla 29 Resultados ensayo de Módulo Dinámico IV-A-12 Modificado**

| Temperatur a °C | Frecuencia Hz | Módulo Dinámico MPa | Temperatura °C | Frecuencia Hz | Módulo Dinámico MPa |
|-----------------------|------------------|---------------------------|-------------------|------------------|---------------------------|
| -10 | 25 | 26481 | 37 | 25 | 1465 |
| -10 | 10 | 25100 | 37 | 10 | 1021 |
| -10 | 5 | 23900 | 37 | 5 | 762 |
| -10 | 1 | 21359 | 37 | 1 | 396 |
| -10 | 0.5 | 20329 | 37 | 0.5 | 315 |
| -10 | 0.1 | 17090 | 37 | 0.1 | 195 |
| 4 | 25 | 16354 | 54 | 25 | 430 |
| 4 | 10 | 14496 | 54 | 10 | 288 |
| 4 | 5 | 13052 | 54 | 5 | 227 |
| 4 | 1 | 10086 | 54 | 1 | 145 |
| 4 | 0.5 | 8831 | 54 | 0.5 | 127 |
| 4 | 0.1 | 6146 | 54 | 0.1 | 97 |
| 21 | 25 | 5770 | | | |
| 21 | 10 | 4589 | | | |
| 21 | 5 | 3756 | | | |
| 21 | 1 | 2234 | | | |
| 21 | 0.5 | 1780 | | | |
| 21 | 0.1 | 1024 | | | |

3.3.1.3.3 M10**Tabla 30 Resultados ensayo de Módulo Dinámico M10**

| Temperatura | Frecuencia | Módulo Dinámico | Temperatura | Frecuencia | Módulo Dinámico |
|-------------|------------|-----------------|-------------|------------|-----------------|
| °C | Hz | MPa | °C | Hz | MPa |
| -10 | 25 | 20974 | 37 | 25 | 1296 |
| -10 | 10 | 20296 | 37 | 10 | 873 |
| -10 | 5 | 19711 | 37 | 5 | 673 |
| -10 | 1 | 17581 | 37 | 1 | 379 |
| -10 | 0.5 | 16733 | 37 | 0.5 | 310 |
| -10 | 0.1 | 14101 | 37 | 0.1 | 207 |
| 4 | 25 | 13659 | 54 | 25 | 434 |
| 4 | 10 | 11978 | 54 | 10 | 314 |
| 4 | 5 | 10888 | 54 | 5 | 263 |
| 4 | 1 | 8499 | 54 | 1 | 162 |
| 4 | 0.5 | 7540 | 54 | 0.5 | 157 |
| 4 | 0.1 | 5411 | 54 | 0.1 | 116 |
| 21 | 25 | 5052 | | | |
| 21 | 10 | 3953 | | | |
| 21 | 5 | 3211 | | | |
| 21 | 1 | 1981 | | | |
| 21 | 0.5 | 1572 | | | |
| 21 | 0.1 | 960 | | | |

3.3.1.3.4 SMA Pellet**Tabla 31 Resultados ensayo de Módulo Dinámico SMA Pellet**

| Temperatura | Frecuencia | Módulo Dinámico | Temperatura | Frecuencia | Módulo Dinámico |
|-------------|------------|-----------------|-------------|------------|-----------------|
| °C | Hz | MPa | °C | Hz | MPa |
| -10 | 25 | 29927 | 37 | 25 | 1599 |
| -10 | 10 | 28893 | 37 | 10 | 1116 |
| -10 | 5 | 28023 | 37 | 5 | 870 |
| -10 | 1 | 25181 | 37 | 1 | 512 |
| -10 | 0.5 | 24279 | 37 | 0.5 | 422 |
| -10 | 0.1 | 20358 | 37 | 0.1 | 294 |
| 4 | 25 | 18869 | 54 | 25 | 618 |
| 4 | 10 | 16966 | 54 | 10 | 446 |
| 4 | 5 | 15618 | 54 | 5 | 372 |
| 4 | 1 | 12104 | 54 | 1 | 264 |
| 4 | 0.5 | 10566 | 54 | 0.5 | 247 |
| 4 | 0.1 | 7504 | 54 | 0.1 | 205 |
| 21 | 25 | 6793 | | | |
| 21 | 10 | 5253 | | | |
| 21 | 5 | 4345 | | | |
| 21 | 1 | 2664 | | | |
| 21 | 0.5 | 2115 | | | |
| 21 | 0.1 | 1256 | | | |

3.3.1.3.5 SMA Fibra**Tabla 32 Resultados ensayo de Módulo Dinámico SMA Fibra**

| Temperatura | Frecuencia | Módulo Dinámico | Temperatura | Frecuencia | Módulo Dinámico |
|-------------|------------|-----------------|-------------|------------|-----------------|
| °C | Hz | MPa | °C | Hz | MPa |
| -10 | 25 | 27475 | 37 | 25 | 1606 |
| -10 | 10 | 26144 | 37 | 10 | 1252 |
| -10 | 5 | 25360 | 37 | 5 | 983 |
| -10 | 1 | 22773 | 37 | 1 | 580 |
| -10 | 0.5 | 21349 | 37 | 0.5 | 478 |
| -10 | 0.1 | 18165 | 37 | 0.1 | 324 |
| 4 | 25 | 17420 | 54 | 25 | 683 |
| 4 | 10 | 15898 | 54 | 10 | 492 |
| 4 | 5 | 14606 | 54 | 5 | 400 |
| 4 | 1 | 11397 | 54 | 1 | 264 |
| 4 | 0.5 | 10128 | 54 | 0.5 | 236 |
| 4 | 0.1 | 7272 | 54 | 0.1 | 180 |
| 21 | 25 | 6492 | | | |
| 21 | 10 | 5327 | | | |
| 21 | 5 | 4395 | | | |
| 21 | 1 | 2787 | | | |
| 21 | 0.5 | 2252 | | | |
| 21 | 0.1 | 1321 | | | |

3.3.2 Mezclas en pistas de prueba FONDEF D09I1174

La información de los ensayos asociados a este conjunto de mezclas corresponde a resultados proporcionados por LEMCO, actualmente no existe algún documento que especifique en detalle el procedimiento que se siguió para realizar estos ensayos.

3.3.2.1 Preparación de probetas

La preparación de probetas se realizó con mezclas obtenidas in situ directo desde el camión que proporciona la mezcla para la autopista y luego se almacena en las dependencias del laboratorio hasta su ensayo. La mezcla se acondiciona y se lleva a temperatura de compactación para luego compactar mediante el compactador giratorio y finalmente cortar las probetas según las dimensiones definidas en la norma que rige el ensayo, AASHTO T342 (AASHTO, 2011).

3.3.2.2 Procedimiento de ensayo

Los ensayos se realizan bajo los estándares definidos en la norma AASHTO T342 (AASHTO, 2011).

3.3.2.3 Resultados del ensayo

3.3.2.3.1 IV-A-12 Autopista del Maipo

Tabla 33 Resultados ensayo de Módulo Dinámico IV-A-12 Autopista del Maipo

| Temperatura °C | Frecuencia Hz | Módulo Dinámico MPa | Temperatura °C | Frecuencia Hz | Módulo Dinámico MPa |
|-------------------|------------------|---------------------------|-------------------|------------------|---------------------------|
| -10 | 25 | 12900 | 37 | 25 | 862 |
| -10 | 10 | 12307 | 37 | 10 | 626 |
| -10 | 5 | 11766 | 37 | 5 | 502 |
| -10 | 1 | 10357 | 37 | 1 | 310 |
| -10 | 0.5 | 9698 | 37 | 0.5 | 265 |
| -10 | 0.1 | 8179 | 37 | 0.1 | 196 |
| 4 | 25 | 7760 | 54 | 25 | 373 |
| 4 | 10 | 6990 | 54 | 10 | 283 |
| 4 | 5 | 6316 | 54 | 5 | 241 |
| 4 | 1 | 4856 | 54 | 1 | 178 |
| 4 | 0.5 | 4305 | 54 | 0.5 | 159 |
| 4 | 0.1 | 3049 | 54 | 0.1 | 126 |
| 21 | 25 | 3128 | | | |
| 21 | 10 | 2455 | | | |
| 21 | 5 | 2021 | | | |
| 21 | 1 | 1280 | | | |
| 21 | 0.5 | 1056 | | | |
| 21 | 0.1 | 702 | | | |

3.3.2.3.2 SMA Autopista Central**Tabla 34 Resultados ensayo de Módulo Dinámico SMA Autopista Central**

| Temperatura | Frecuencia | Módulo Dinámico | Temperatura | Frecuencia | Módulo Dinámico |
|-------------|------------|-----------------|-------------|------------|-----------------|
| °C | Hz | MPa | °C | Hz | MPa |
| -10 | 25 | 19572 | 37 | 25 | 1579 |
| -10 | 10 | 18655 | 37 | 10 | 1194 |
| -10 | 5 | 17998 | 37 | 5 | 983 |
| -10 | 1 | 15761 | 37 | 1 | 652 |
| -10 | 0.5 | 15107 | 37 | 0.5 | 560 |
| -10 | 0.1 | 12651 | 37 | 0.1 | 417 |
| 4 | 25 | 12074 | 54 | 25 | 561 |
| 4 | 10 | 10732 | 54 | 10 | 435 |
| 4 | 5 | 9681 | 54 | 5 | 364 |
| 4 | 1 | 7609 | 54 | 1 | 259 |
| 4 | 0.5 | 6878 | 54 | 0.5 | 237 |
| 4 | 0.1 | 5102 | 54 | 0.1 | 191 |
| 21 | 25 | 4825 | | | |
| 21 | 10 | 3912 | | | |
| 21 | 5 | 3374 | | | |
| 21 | 1 | 2295 | | | |
| 21 | 0.5 | 1938 | | | |
| 21 | 0.1 | 1329 | | | |

3.3.2.3.3 SMA Autopista del Maipo**Tabla 35 Resultados ensayo de Módulo Dinámico SMA Autopista del Maipo**

| Temperatura | Frecuencia | Módulo Dinámico | Temperatura | Frecuencia | Módulo Dinámico |
|-------------|------------|-----------------|-------------|------------|-----------------|
| °C | Hz | MPa | °C | Hz | MPa |
| -10 | 25 | 28181 | 37 | 25 | 1631 |
| -10 | 10 | 25004 | 37 | 10 | 1237 |
| -10 | 5 | 23257 | 37 | 5 | 1030 |
| -10 | 1 | 20072 | 37 | 1 | 664 |
| -10 | 0.5 | 18320 | 37 | 0.5 | 558 |
| -10 | 0.1 | 14265 | 37 | 0.1 | 380 |
| 4 | 25 | 10525 | 54 | 25 | 653 |
| 4 | 10 | 9454 | 54 | 10 | 491 |
| 4 | 5 | 8727 | 54 | 5 | 411 |
| 4 | 1 | 6902 | 54 | 1 | 278 |
| 4 | 0.5 | 6245 | 54 | 0.5 | 238 |
| 4 | 0.1 | 4692 | 54 | 0.1 | 178 |
| 21 | 25 | 4554 | | | |
| 21 | 10 | 3676 | | | |
| 21 | 5 | 3193 | | | |
| 21 | 1 | 2211 | | | |
| 21 | 0.5 | 1865 | | | |
| 21 | 0.1 | 1254 | | | |

3.3.2.3.4 MDC Autopista del Sol**Tabla 36 Resultados ensayo de Módulo Dinámico MDC Autopista del Sol**

| Temperatura | Frecuencia | Módulo Dinámico | Temperatura | Frecuencia | Módulo Dinámico |
|-------------|------------|-----------------|-------------|------------|-----------------|
| °C | Hz | MPa | °C | Hz | MPa |
| -10 | 25 | 8116 | 37 | 25 | 575 |
| -10 | 10 | 7652 | 37 | 10 | 416 |
| -10 | 5 | 7242 | 37 | 5 | 349 |
| -10 | 1 | 6350 | 37 | 1 | 225 |
| -10 | 0.5 | 5923 | 37 | 0.5 | 190 |
| -10 | 0.1 | 4763 | 37 | 0.1 | 123 |
| 4 | 25 | 4732 | 54 | 25 | 292 |
| 4 | 10 | 4101 | 54 | 10 | 234 |
| 4 | 5 | 3683 | 54 | 5 | 192 |
| 4 | 1 | 2855 | 54 | 1 | 132 |
| 4 | 0.5 | 2527 | 54 | 0.5 | 117 |
| 4 | 0.1 | 1809 | 54 | 0.1 | 90 |
| 21 | 25 | 1798 | | | |
| 21 | 10 | 1445 | | | |
| 21 | 5 | 1177 | | | |
| 21 | 1 | 757 | | | |
| 21 | 0.5 | 629 | | | |
| 21 | 0.1 | 412 | | | |

3.3.2.3.5 MDC Autopista del Maipo

Tabla 37 Resultados ensayo de Módulo Dinámico Autopista del Maipo

| Temperatura | Frecuencia | Módulo Dinámico | Temperatura | Frecuencia | Módulo Dinámico |
|-------------|------------|-----------------|-------------|------------|-----------------|
| °C | Hz | MPa | °C | Hz | MPa |
| -10 | 25 | 11294 | 37 | 25 | 917 |
| -10 | 10 | 10755 | 37 | 10 | 694 |
| -10 | 5 | 10293 | 37 | 5 | 569 |
| -10 | 1 | 9223 | 37 | 1 | 360 |
| -10 | 0.5 | 8707 | 37 | 0.5 | 300 |
| -10 | 0.1 | 7584 | 37 | 0.1 | 214 |
| 4 | 25 | 7086 | 54 | 25 | 415 |
| 4 | 10 | 6537 | 54 | 10 | 327 |
| 4 | 5 | 5926 | 54 | 5 | 275 |
| 4 | 1 | 4727 | 54 | 1 | 190 |
| 4 | 0.5 | 4233 | 54 | 0.5 | 173 |
| 4 | 0.1 | 3115 | 54 | 0.1 | 137 |
| 21 | 25 | 2898 | | | |
| 21 | 10 | 2414 | | | |
| 21 | 5 | 2037 | | | |
| 21 | 1 | 1341 | | | |
| 21 | 0.5 | 1116 | | | |
| 21 | 0.1 | 733 | | | |

3.3.3 Mezclas con RAP

Las mezclas con RAP corresponden a un conjunto de memorias que analizan el desempeño de mezclas a las que se le incorpora pavimento asfáltico reciclado (llamado RAP por sus siglas en inglés, Reclaimed Asphalt Pavement). En particular, Valenzuela (Valenzuela, 2017) aborda en detalle lo relativo a los ensayos de módulo dinámico.

3.3.3.1 Preparación de probetas

Inicialmente se acondicionan los materiales previo al mezclado llevándolos al horno a $155\pm 5^{\circ}\text{C}$, que corresponde a la temperatura de mezclado, durante 12 horas para los áridos y el RAP; y 2 horas para el ligante, ya que este último aumenta su temperatura más rápido que los áridos.

Una vez que los materiales se encuentran a temperatura de mezclado, se mezclan de forma manual los áridos, el RAP y el ligante asfáltico. Luego, se acondiciona la mezcla con el fin de simular el envejecimiento primario llevándolo a horno a una temperatura de $135\pm 3^{\circ}\text{C}$ durante 4 horas. La temperatura se eleva hasta llevarla a 145°C , correspondiente a la temperatura de compactación y se compacta mediante el compactador giratorio. Finalmente, las probetas se cortan según lo que indica la norma relativa al ensayo AASHTO T342 (AASHTO, 2011).

3.3.3.2 Procedimiento de ensayo

El procedimiento de este ensayo se rige por la norma AASHTO T342 (AASHTO, 2011). Se posiciona la probeta dentro del equipo y se ubican los LVDT a cada lado de la probeta. El ensayo en sí consiste en aplicar una carga tipo haversine de compresión axial a distintas frecuencias de carga y temperatura. Las temperaturas de ensayo corresponden a: -10°C , 4°C , 21°C , 37°C y 54°C y las frecuencias de carga: 0.1Hz, 0.5Hz, 1Hz, 5Hz, 10Hz y 25Hz. Se ensayan tres probetas, sin embargo, por la precisión de los resultados se descarta una de las probetas y se promedia el resultado de dos de ellas (Valenzuela, 2017). Cada espécimen debe ser ensayado para cada una de las 30 combinaciones de temperatura y

frecuencia de carga, partiendo de la temperatura más baja y aumentando hasta la más alta. Las pruebas a cada temperatura deben comenzar con la mayor frecuencia de carga y proceder a la más baja. La cantidad de ciclos que son cargadas las probetas se presentan en la Tabla 26.

3.3.3.3 Resultados del ensayo

3.3.3.3.1 IV-A-12 Sin RAP

Tabla 38 Resultados ensayo de Módulo Dinámico IV-A-12 Sin RAP

| Temperatura °C | Frecuencia Hz | Módulo Dinámico MPa | Temperatura °C | Frecuencia Hz | Módulo Dinámico MPa |
|-------------------|------------------|---------------------------|-------------------|------------------|---------------------------|
| -10 | 25 | 17880 | 37 | 25 | 2231 |
| -10 | 10 | 17453 | 37 | 10 | 1838 |
| -10 | 5 | 17119 | 37 | 5 | 1547 |
| -10 | 1 | 16001 | 37 | 1 | 924 |
| -10 | 0.5 | 15294 | 37 | 0.5 | 742 |
| -10 | 0.1 | 14086 | 37 | 0.1 | 447 |
| 4 | 25 | 12272 | 54 | 25 | 800 |
| 4 | 10 | 11545 | 54 | 10 | 628 |
| 4 | 5 | 11008 | 54 | 5 | 507 |
| 4 | 1 | 9476 | 54 | 1 | 308 |
| 4 | 0.5 | 8839 | 54 | 0.5 | 252 |
| 4 | 0.1 | 7208 | 54 | 0.1 | 180 |
| 21 | 25 | 6446 | | | |
| 21 | 10 | 5888 | | | |
| 21 | 5 | 5142 | | | |
| 21 | 1 | 3729 | | | |
| 21 | 0.5 | 3147 | | | |
| 21 | 0.1 | 2049 | | | |

3.3.3.3.2 IV-A-12 con 8% RAP**Tabla 39 Resultados ensayo de Módulo Dinámico IV-A-12 con 8% RAP**

| Temperatura | Frecuencia | Módulo Dinámico | Temperatura | Frecuencia | Módulo Dinámico |
|-------------|------------|-----------------|-------------|------------|-----------------|
| °C | Hz | MPa | °C | Hz | MPa |
| -10 | 25 | 12734 | 37 | 25 | 1499 |
| -10 | 10 | 12677 | 37 | 10 | 1196 |
| -10 | 5 | 12423 | 37 | 5 | 695 |
| -10 | 1 | 11682 | 37 | 1 | 550 |
| -10 | 0.5 | 11339 | 37 | 0.5 | 335 |
| -10 | 0.1 | 10461 | 37 | 0.1 | 724 |
| 4 | 25 | 9334 | 54 | 25 | 515 |
| 4 | 10 | 9078 | 54 | 10 | 407 |
| 4 | 5 | 8698 | 54 | 5 | 240 |
| 4 | 1 | 7528 | 54 | 1 | 204 |
| 4 | 0.5 | 7081 | 54 | 0.5 | 138 |
| 4 | 0.1 | 5910 | 54 | 0.1 | 161 |
| 21 | 25 | 5100 | | | |
| 21 | 10 | 4608 | | | |
| 21 | 5 | 4133 | | | |
| 21 | 1 | 2929 | | | |
| 21 | 0.5 | 2495 | | | |
| 21 | 0.1 | 1610 | | | |

3.3.3.3.3 IV-A-12 con 18% RAP**Tabla 40 Resultados ensayo de Módulo Dinámico IV-A-12 con 18% RAP**

| Temperatura | Frecuencia | Módulo Dinámico | Temperatura | Frecuencia | Módulo Dinámico |
|-------------|------------|-----------------|-------------|------------|-----------------|
| °C | Hz | MPa | °C | Hz | MPa |
| -10 | 25 | 12249 | 37 | 25 | 2174 |
| -10 | 10 | 12143 | 37 | 10 | 1836 |
| -10 | 5 | 12026 | 37 | 5 | 1551 |
| -10 | 1 | 11254 | 37 | 1 | 917 |
| -10 | 0.5 | 10948 | 37 | 0.5 | 729 |
| -10 | 0.1 | 10138 | 37 | 0.1 | 442 |
| 4 | 25 | 8984 | 54 | 25 | 833 |
| 4 | 10 | 8740 | 54 | 10 | 627 |
| 4 | 5 | 8315 | 54 | 5 | 484 |
| 4 | 1 | 7297 | 54 | 1 | 281 |
| 4 | 0.5 | 6901 | 54 | 0.5 | 231 |
| 4 | 0.1 | 5840 | 54 | 0.1 | 157 |
| 21 | 25 | 5162 | | | |
| 21 | 10 | 4719 | | | |
| 21 | 5 | 4336 | | | |
| 21 | 1 | 3209 | | | |
| 21 | 0.5 | 2800 | | | |
| 21 | 0.1 | 1921 | | | |

3.3.4 Mezcla para aeropuerto

Las mezclas correspondientes a esta sección se analizan bajo el marco del proyecto “Conservación Rutinaria Aeropuerto Arturo Merino Benítez año 2016 Etapa I”. Corona (Corona, 2017) presenta en detalle todo lo referido al ensayo de módulo dinámico.

3.3.4.1 Preparación de probetas

La preparación de los materiales para realizar la mezcla consiste en acondicionarlos en horno hasta llegar a la temperatura de mezclado ($174\pm 5^{\circ}\text{C}$) y luego mezclarlos de forma manual. Siguiendo a esto se lleva al horno a temperatura de compactación ($157\pm 10^{\circ}\text{C}$) durante 2 horas para simular el envejecimiento a corto plazo. Finalmente, la mezcla se compacta mediante el compactador giratorio con 75 giros y luego se cortan las probetas según lo indicado en la norma AASHTO T342 (AASHTO, 2011).

3.3.4.2 Procedimiento de ensayo

El procedimiento de ensayo se realiza según la norma AASHTO T342 (AASHTO, 2011). Se posiciona la probeta dentro del equipo y se ubican los LVDT a cada lado de la probeta, luego de esto se aplica una carga tipo haversine de compresión axial a distintas frecuencias de carga y temperatura. Las temperaturas de ensayo corresponden a: -10°C , 4°C , 21°C , 37°C y 54°C y las frecuencias de carga: 0.1Hz, 0.5Hz, 1Hz, 5Hz, 10Hz y 25Hz. Cada espécimen debe ser ensayado para cada una de las 30 combinaciones de temperatura y frecuencia de carga, partiendo de la temperatura más baja y aumentando hasta la más alta. Las pruebas a cada temperatura deben comenzar con la mayor frecuencia de carga hasta llegar a la más baja. La cantidad de ciclos que son cargadas las probetas se presentan en la Tabla 26 y los rangos de carga dinámica aplicado corresponden a los indicados en la Tabla 27.

3.3.4.3 Resultados del ensayo

Tabla 41 Resultados ensayo de Módulo Dinámico Mezcla para Aeropuerto

| Temperatura °C | Frecuencia Hz | IE*I MPa | Temperatura °C | Frecuencia Hz | IE*I MPa |
|-------------------|------------------|-------------|-------------------|------------------|-------------|
| -10 | 25 | 12039 | 37 | 25 | 1199 |
| -10 | 10 | 12058 | 37 | 10 | 1056 |
| -10 | 5 | 11832 | 37 | 5 | 891 |
| -10 | 1 | 10734 | 37 | 1 | 575 |
| -10 | 0.5 | 10279 | 37 | 0.5 | 466 |
| -10 | 0.1 | 9176 | 37 | 0.1 | 321 |
| 4 | 25 | 8038 | 54 | 25 | 553 |
| 4 | 10 | 7663 | 54 | 10 | 449 |
| 4 | 5 | 7266 | 54 | 5 | 381 |
| 4 | 1 | 6106 | 54 | 1 | 260 |
| 4 | 0.5 | 5633 | 54 | 0.5 | 227 |
| 4 | 0.1 | 4538 | 54 | 0.1 | 161 |
| 21 | 25 | 3572 | | | |
| 21 | 10 | 3246 | | | |
| 21 | 5 | 2877 | | | |
| 21 | 1 | 2095 | | | |
| 21 | 0.5 | 1822 | | | |
| 21 | 0.1 | 1262 | | | |

4 MODELOS DE PREDICCIÓN PARA EL ANÁLISIS DE FATIGA

4.1 ENFOQUE FENOMENOLÓGICO

El primer enfoque que se analiza es el fenomenológico que permite, como una primera aproximación, determinar la relación entre el número de ciclos a la falla con el nivel de deformación aplicado a las probetas durante el ensayo realizado bajo la norma AASHTO T321 (AASHTO, 2007).

Inicialmente, se analiza cada mezcla por separado, con el fin de conocer su comportamiento. Para esto, se presenta las curvas de fatiga de cada mezcla dentro de un mismo gráfico junto a sus parámetros de ajuste (k_1 y k_2) definidos según la Ecuación 11. Además de esto se presentan parámetros relevantes para caracterizar el comportamiento de la mezcla tales como:

ε_6 : Nivel de deformación asociada a un millón de repeticiones de carga (10^6 ciclos).

N_{500} : Cantidad de ciclos de cargas que causan la falla para un nivel de deformación (ε_f) igual a $500 \mu\text{strain}$ ($\text{mm/mm} \times 10^{-6}$). Este valor resulta relevante ya que es un nivel de deformación relativamente grande, el cual puede ser reproducido en recapados asfálticos, específicamente cuando es construido sobre pavimentos de hormigón.

A través de estos parámetros, es posible identificar el desempeño de las mezclas asfálticas en análisis.

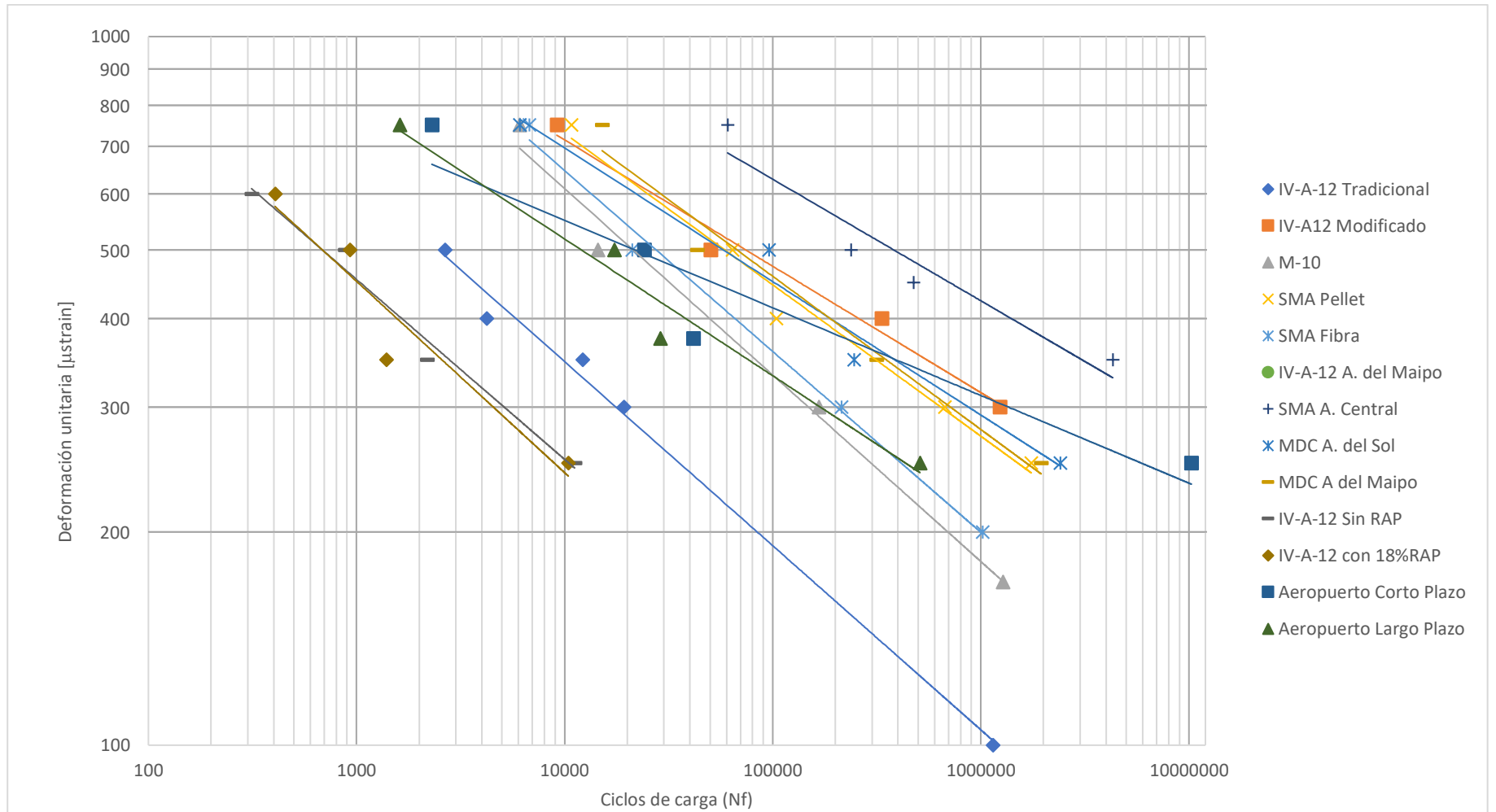


Gráfico 1 Resultados Ensayo Fatiga

Tabla 42 Resultados Enfoque Fenomenológico Fatiga

| Proyecto | Identificador Mezcla | Parámetros de Ajuste | | R^2 | | |
|---|------------------------|----------------------|-------|-------|-----------|---------------------------|
| | | k_1 | k_2 | | N_{500} | ϵ_6 μ strain |
| Mezclas fabricadas en laboratorio FONDEF D09I1174 | IV-A-12 Tradicional | 4.950E+13 | 3.814 | 0.993 | 2523 | 104 |
| | IV-A-12 Modificado | 4.673E+19 | 5.486 | 0.984 | 73054 | 310 |
| | M-10 | 2.167E+14 | 3.711 | 0.985 | 20934 | 176 |
| | SMA Pellet | 1.052E+17 | 4.539 | 0.984 | 59110 | 268 |
| | SMA Fibra | 8.091E+14 | 3.880 | 0.993 | 27367 | 198 |
| Mezclas en pistas de prueba FONDEF D09I1174 | IV-A-12 A. del Maipo | 3.123E+20 | 5.774 | 0.985 | 81561 | 324 |
| | M10 A. del Maipo | 1.004E+17 | 4.533 | 0.969 | 58524 | 267 |
| | M10 A. del Sol | 2.599E+18 | 5.065 | 0.974 | 55683 | 283 |
| | SMA A. Central | 2.871E+20 | 5.525 | 0.939 | 350846 | 414 |
| Mezclas con RAP | IV-A-12 sin RAP | 2.098E+13 | 3.891 | 0.975 | 659 | 76 |
| | IV-A-12 con 18%RAP | 5.014E+11 | 3.282 | 0.929 | 694 | 55 |
| Proyecto Aeropuerto | Aeropuerto Corto Plazo | 7.728E+23 | 7.276 | 0.930 | 17808 | 287 |
| | Aeropuerto Largo Plazo | 1.391E+17 | 4.853 | 0.970 | 11126 | 198 |

Como es sabido, a mayor número de ciclos (N_{500}) mejor es el desempeño de la mezcla, por ende, se desprende que el mejor comportamiento lo presenta la mezcla SMA Autopista Central. Una de las razones por la que se obtiene este resultado es el diseño de la mezcla pues posee un ligante modificado con PG76-28 y una granulometría discontinua que permite maximizar el contenido de ligante ayudando a prevenir el agrietamiento por fatiga.

A través de este enfoque es posible agrupar los resultados a partir de una sola constante común para todas las mezclas. Esto se realiza encontrando una correlación entre los parámetros de ajuste, de este modo se obtiene una función del tipo $k_1 = f(k_2)$

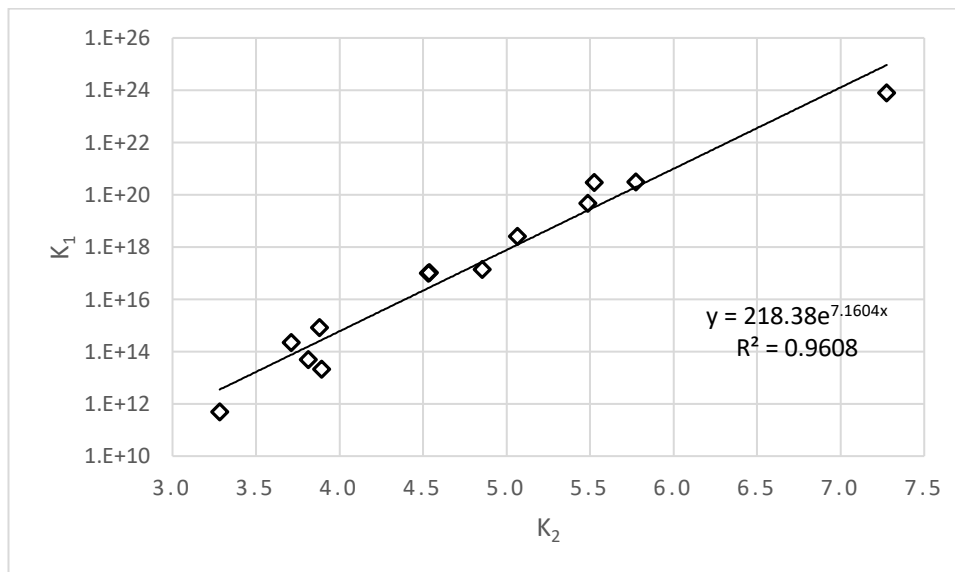


Gráfico 2 Relación entre parámetros de ajuste k1 y k2

A partir de esto, la relación entre el número de ciclos a la falla y el nivel de deformación se puede reescribir utilizando las siguientes relaciones.

$$N_f = k_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{k_2}$$

$$k_1 = 218.38e^{7.1604k_2}$$

Finalmente, la ecuación para estas mezclas utilizando el enfoque fenomenológico queda definido según:

$$N_f = 218.38e^{7.1604k_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{k_2} \quad \text{Ecuación 29}$$

La finalidad de este enfoque es disminuir el tiempo que requiere el ensayo determinando el factor k_2 a través de un solo nivel de deformación. Es decir, a partir del número de ciclos a la falla de fatiga de un solo nivel de deformación se podría obtener el parámetro k_2 y a partir de este k_1 . Con estos dos parámetros se podría construir la curva de fatiga de la mezcla sin realizar más que un ensayo.

Con el fin de demostrar esto, se calcula el factor k_2 de las mezclas en análisis para un mismo nivel de deformación. En este caso particular, es posible utilizar un nivel de deformación de 500 μ strain que es el único nivel de deformación utilizado para todas las mezclas.

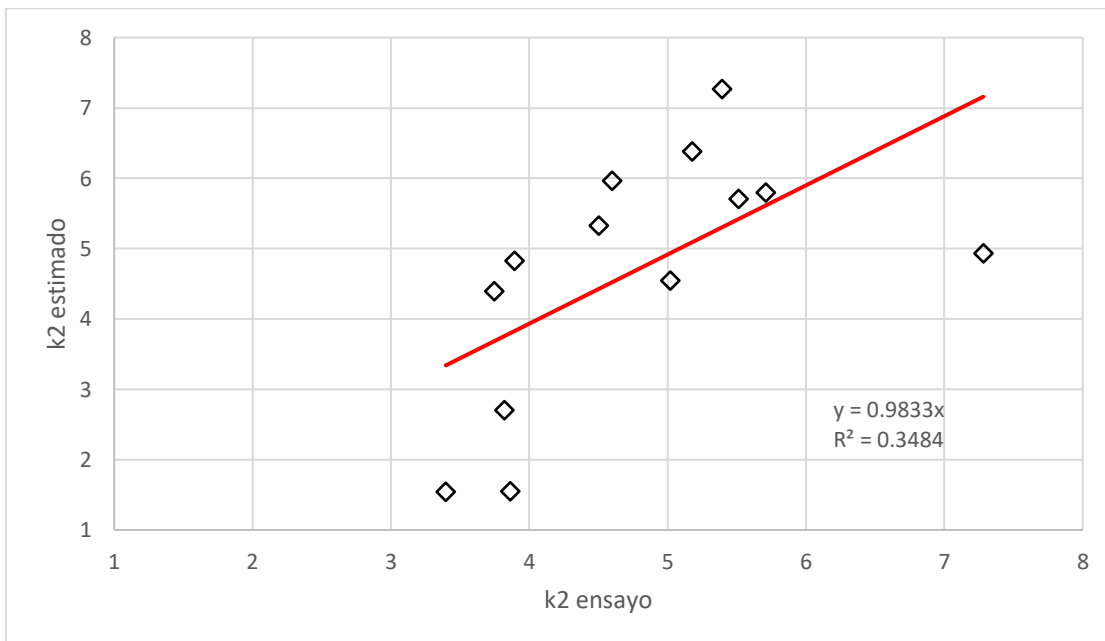


Gráfico 3 k2 estimado y obtenido a partir de ensayo para 500 μ strain

A partir del Gráfico 3 se puede apreciar una correlación muy baja igual a 0.3484, lo que implica una dispersión muy grande entre los datos, a pesar de ello, el sesgo obtenido es bajo. Dado que es el único nivel de deformación que se repite en todas las mezclas se hace imposible comparar en esta investigación si esta tendencia se mantiene para otro nivel de deformación.

Según Marín (Marín, 2013) al realizar este análisis para un nivel de deformación más bajo la correlación aumenta y el sesgo disminuye, sin embargo, es importante considerar que un bajo nivel de deformación implica un mayor tiempo de ensayo que es lo que se busca evitar en este enfoque.

4.2 MODELOS PREDICTIVOS MEDPG

Para predecir el daño a fatiga utilizando el método de la Guía de Diseño de Pavimentos Empírico Mecanicista se utilizan las propiedades volumétricas de la mezcla como se señala en la Ecuación 13. La Ecuación 30, contiene los parámetros de calibración global de campo que indica la Guía de Diseño de Pavimentos Empírico Mecanicista: $k_{f1} = 0.007566$, $k_{f2} = -3.9492$, $k_{f3} = -1.28$. El factor de corrección de espesor C_H depende del tipo de agrietamiento, que en este caso corresponde al agrietamiento de abajo hacia arriba. Se define este tipo de agrietamiento ya que el ensayo de fatiga induce a la probeta a flexión en la base, los apoyos de los extremos sostienen a la probeta que es sometida a cargas en sus dos tercios centrales provocando el agrietamiento en el fondo de ella.

Es importante destacar que los valores de módulo dinámico utilizados para desarrollar este análisis son los obtenidos en el capítulo 3.3 Módulo Dinámico, calculados mediante curvas maestras a la temperatura y frecuencia del ensayo de fatiga. Para el caso de la mezcla del proyecto Aeropuerto acondicionada a largo plazo se utilizan los únicos valores disponibles de módulo dinámico que, si bien corresponden a un acondicionamiento a corto plazo, corresponden a la misma mezcla asfáltica por lo que se toman como referencia para poder utilizar los resultados del ensayo.

$$N_f = 0.007566(C)(C_H)(\beta_1) \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3.9492*\beta_2} \left(\frac{1}{E}\right)^{1.281*\beta_3} \quad \text{Ecuación 30}$$

$$C_H = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{11.02-3.49*2}}} = 2172.54$$

El valor de C se calcula en función de los parámetros volumétricos de la mezcla antes descritos. Se presentan a continuación una tabla con los valores obtenidos a partir de la Ecuación 31.

$$C = 10^M$$

$$M = 4.84 \left(\frac{V_{be}}{V_a + V_{be}} - 0.69 \right)$$

Ecuación 31

Tabla 43 Propiedades Volumétricas Probetas Fatiga FONDEF D09I1174 en laboratorio

| Identificador Mezclas | Nivel de deformación μstrain [mm/mm x 10^{-6}] | % Va | M | C |
|---|--|-------|---------|--------|
| IV-A-12 Tradicional % $V_{be} = 11.61$ | 500 | 4.35 | 0.1809 | 1.5166 |
| | 400 | 4.83 | 0.0781 | 1.1969 |
| | 350 | 4.65 | 0.1159 | 1.3059 |
| | 300 | 4.48 | 0.1524 | 1.4205 |
| | 100 | 5.09 | 0.0248 | 1.0589 |
| IV-A-12 Modificado % $V_{be} = 11.69$ | 750 | 4.48 | 0.1594 | 1.4435 |
| | 500 | 4.53 | 0.1486 | 1.4081 |
| | 400 | 4.61 | 0.1315 | 1.3537 |
| | 300 | 4.46 | 0.1638 | 1.4580 |
| M10 % $V_{be} = 10.15$ | 750 | 9.23 | -0.8051 | 0.1180 |
| | 500 | 9.66 | -0.8601 | 0.1516 |
| | 300 | 9.34 | -0.8194 | 0.1380 |
| | 170 | 10.22 | -0.9283 | 0.1180 |
| SMA Pellet % $V_{be} = 15.06$ | 750 | 2.76 | 0.7509 | 5.6355 |
| | 500 | 2.80 | 0.7418 | 5.5179 |
| | 400 | 2.53 | 0.8044 | 6.3739 |
| | 300 | 2.82 | 0.7372 | 5.4602 |
| | 250 | 2.94 | 0.7100 | 5.1290 |
| SMA Fibra % $V_{be} = 13.15$ | 750 | 5.51 | 0.0712 | 1.1781 |
| | 500 | 5.54 | 0.0657 | 1.1633 |
| | 300 | 5.84 | 0.0119 | 1.0278 |
| | 200 | 5.63 | 0.0494 | 1.1204 |

Tabla 44 Propiedades Volumétricas Probetas Fatiga FONDEF D09I1174 en terreno

| Identificador Mezclas | Nivel de deformación μstrain [mm/mm x 10 ⁻⁶] | % Va | M | C |
|---|---|------|---------|--------|
| IV-A-12 Autopista del Maipo % V _{be} = 13.58 | 750 | 4.93 | 0.2116 | 1.6278 |
| | 500 | 4.66 | 0.2641 | 1.8371 |
| | 350 | 4.63 | 0.2701 | 1.8624 |
| | 300 | 4.57 | 0.2820 | 1.9134 |
| SMA Autopista Central % V _{be} = 15.34 | 750 | 3.74 | 0.5518 | 3.5632 |
| | 500 | 2.48 | 0.8269 | 6.7134 |
| | 450 | 3.68 | 0.5641 | 3.6654 |
| | 350 | 3.99 | 0.5015 | 3.1734 |
| MDC Autopista del Sol % V _{be} = 11.19 | 750 | 9.86 | -0.7667 | 0.1711 |
| | 500 | 8.85 | -0.6370 | 0.2307 |
| | 350 | 9.58 | -0.7320 | 0.1853 |
| | 250 | 8.61 | -0.6043 | 0.2487 |
| MDC Autopista del Maipo % V _{be} = 11.96 | 750 | 10 | -0.7031 | 0.1981 |
| | 500 | 10 | -0.7031 | 0.1981 |
| | 350 | 10 | -0.7031 | 0.1981 |
| | 250 | 10 | -0.7031 | 0.1981 |

En la recopilación bibliográfica correspondiente a la mezcla MDC Autopista del Maipo no se encontró información del porcentaje de vacíos de cada probeta ensayada, por lo que se utiliza el valor de diseño indicado en la sección 3.1.2.5.

Tabla 45 Propiedades Volumétricas Probetas Fatiga Proyecto Mezclas con RAP

| Identificador Mezclas | Nivel de deformación μstrain [mm/mm x 10 ⁻⁶] | % Va | M | C |
|--|---|------|---------|--------|
| IV-A-12 Sin RAP % V _{be} = 10.98 | 600 | 4.08 | 0.1892 | 1.5460 |
| | 500 | 4.23 | 0.1551 | 1.4292 |
| | 350 | 4.06 | 0.1946 | 1.5653 |
| | 250 | 4.26 | 0.1482 | 1.4067 |
| IV-A-12 Con 8% RAP % V _{be} = 10.64 | 500 | 4.09 | 0.1564 | 1.4334 |
| | 500 | 4.65 | 0.0283 | 1.0674 |
| | 500 | 4.65 | 0.0283 | 1.0674 |
| IV-A-12 Con 18% RAP % V _{be} = 9.60 | 600 | 4.49 | -0.1706 | 0.6752 |
| | 500 | 4.66 | -0.0794 | 0.8330 |
| | 350 | 4.65 | -0.0817 | 0.8286 |
| | 250 | 5.06 | -0.0423 | 0.9071 |

Tabla 46 Propiedades Volumétricas Probetas Fatiga Proyecto Aeropuerto

| Identificador Mezclas | Nivel de deformación μstrain [mm/mm x 10 ⁻⁶] | % Va | M | C |
|---|--|------|--------|--------|
| Mezcla para Aeropuerto (Acondicionamiento Largo Plazo) $V_{be} = 12.08\%$ | 750 | 3.33 | 0.4442 | 2.7811 |
| | 500 | 2.83 | 0.5742 | 3.7359 |
| | 375 | 4.10 | 0.2625 | 1.8301 |
| | 250 | 2.97 | 0.5356 | 3.4328 |
| Mezcla para Aeropuerto (Acondicionamiento Corto Plazo) $V_{be} = 12.08\%$ | 750 | 4.20 | 0.2401 | 1.7383 |
| | 500 | 3.57 | 0.3856 | 2.4301 |
| | 375 | 4.10 | 0.2625 | 1.8301 |
| | 250 | 4.20 | 0.2401 | 1.7383 |

El proceso de calibración consiste en encontrar las constantes de calibración local definidas por la MEPDG para las mezclas hechas en dependencias del laboratorio LEMCO. En un primer acercamiento se buscan constantes para cada mezcla, luego se intenta identificar propiedades en común, siguiendo por distintos grupos definidos por la amplitud térmica del ligante, terminando por agrupar todas las mezclas en una misma ecuación y finalmente incorporar una nueva variable. El desarrollo en detalle de este proceso se define en los siguientes subcapítulos.

4.2.1 Un set de constantes para cada mezcla

La forma más precisa de encontrar las constantes de calibración local es determinando un set para cada mezcla asfáltica en análisis. Esto se realiza mediante una regresión lineal simple resuelta a través de la herramienta buscar objetivo de Excel, donde el algoritmo utilizado consiste en minimizar la diferencia absoluta entre el valor del ensayo y el número de ciclos a la falla de fatiga calculado con las constantes de calibración local para cada mezcla. Las constantes de calibración locales obtenidas para cada mezcla se entregan en la Tabla 47 y se observan en el Gráfico 4.

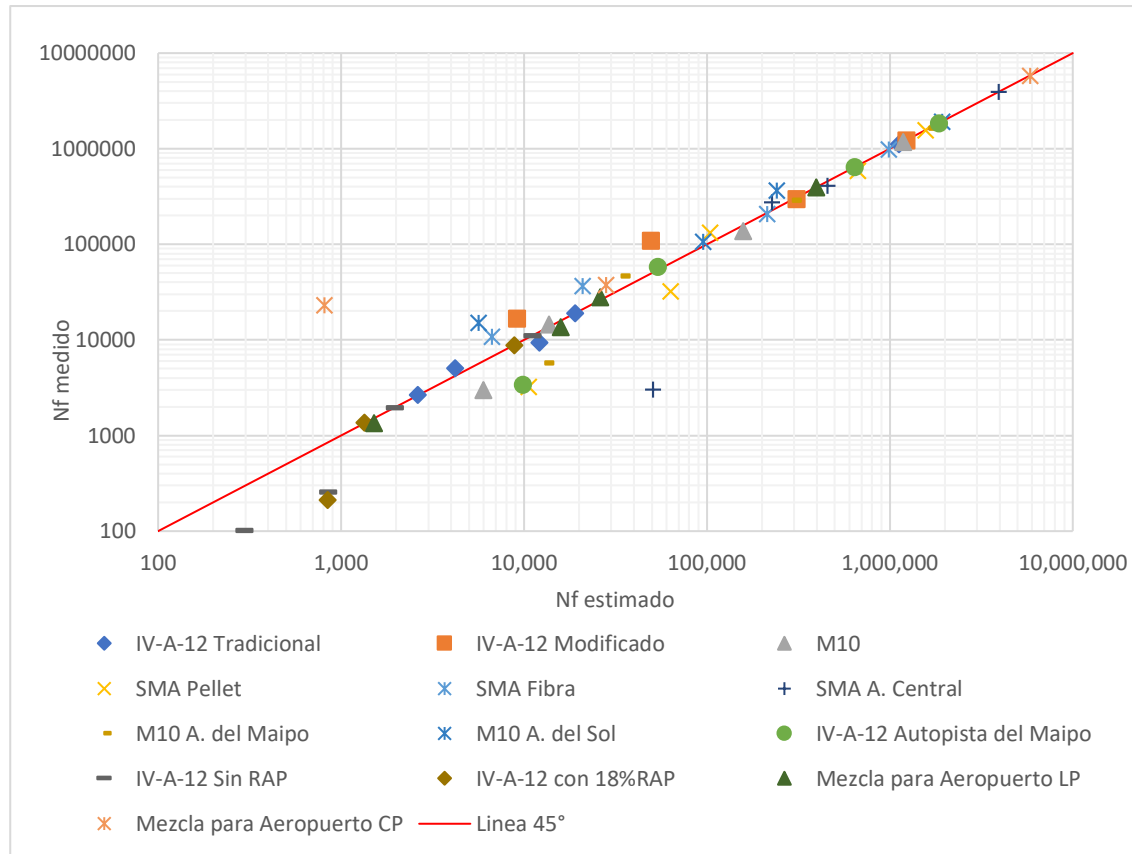


Tabla 47 Constantes de calibración local para fatiga: un factor por mezcla

| Proyecto | Identificador Mezcla | β_1 | β_2 | β_3 |
|---|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| Mezclas fabricadas en laboratorio FONDEF D09I1174 | IV-A-12 Tradicional | 0.0708 | 1.0077 | 1.3165 |
| | IV-A-12 Modificado | 0.0704 | 1.1830 | 1.4123 |
| | M-10 | 0.0702 | 1.0679 | 1.2086 |
| | SMA Pellet | 0.0673 | 1.4473 | 2.0006 |
| | SMA Modificado Cel | 0.0690 | 0.9214 | 1.0002 |
| Mezclas en pistas de prueba FONDEF D09I1174 | SMA A. Central | 0.0597 | 2.4209 | 3.6154 |
| | M10 A. del Maipo | 0.0571 | 1.3028 | 1.6299 |
| | M10 A. del Sol | 0.0667 | 1.0315 | 1.1505 |
| | IV-A-12 A. del Maipo | 0.0668 | 1.6944 | 2.4851 |
| Mezclas con RAP | IV-A-12 | 0.0623 | 1.3818 | 2.0691 |
| | IV-A-12 18%RAP | 0.0632 | 1.3327 | 1.9923 |
| Aeropuerto | Largo Plazo | 0.0671 | 1.2615 | 1.7703 |
| | Corto Plazo | 0.0699 | 3.3660 | 5.6698 |

A partir del Gráfico 4 se puede observar que la gran mayoría de los datos se mantienen cercanos a una recta a 45°, indicando la igualdad entre el valor predicho y el entregado por el ensayo. Este análisis, si bien entrega resultados con una buena correlación es muy acotado ya que limita a utilizar las constantes de calibración determinadas para mezclas que se confeccionen del mismo modo que las descritas.

4.2.2 Un set de constante para el conjunto de mezclas

Como una nueva aproximación, se establece agrupar las mezclas y determinar un solo set de constantes de calibración que ajuste todos los resultados. Para esto, se realiza un análisis de regresión lineal a través del software de programación R Studio, linealizando la Ecuación 30 y trabajar con ella de la siguiente forma:

$$\log(N_f) = \log(C * C_h) + \log(C_1) + C_2 * \log(\varepsilon_t) + C_3 * \log(E)$$

Ecuación 32

Donde:

$$C_1 = 0.007566 * \beta_1$$

$$C_2 = -3.9492 * \beta_2$$

$$C_3 = -1.281 * \beta_3$$

De esta forma, se agrupan las constantes en los términos C_1 , C_2 y C_3 para despejar los distintos factores de calibración analizándolo como un espacio en 3 dimensiones, donde el factor de calibración β_1 corresponde a la pendiente, β_2 es el intercepto con el eje de la deformación unitaria y finalmente β_3 corresponde al intercepto con el eje del módulo dinámico de cada dato a analizar.

A partir del análisis realizado a través del software se obtienen las siguientes constantes de calibración:

$$\beta_1 = 8.9461 * 10^7$$

$$\beta_2 = 1.1057$$

$$\beta_3 = 2.6255$$

La ecuación que describe la relación entre las variables y el número de ciclos a la falla queda de la forma:

$$N_f = 10^{5.8305} (C)(C_H) \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{4.3666} \left(\frac{1}{E}\right)^{3.3633} \quad \text{Ecuación 33}$$

La relación entre el valor estimado de número de ciclos a la falla según la Ecuación 33 y el entregado por el ensayo se presenta en el Gráfico 5. El coeficiente de correlación entre ambos valores es igual a 0.5884, si bien no es satisfactorio, para mejorar el resultado es necesario expandir la base de datos.

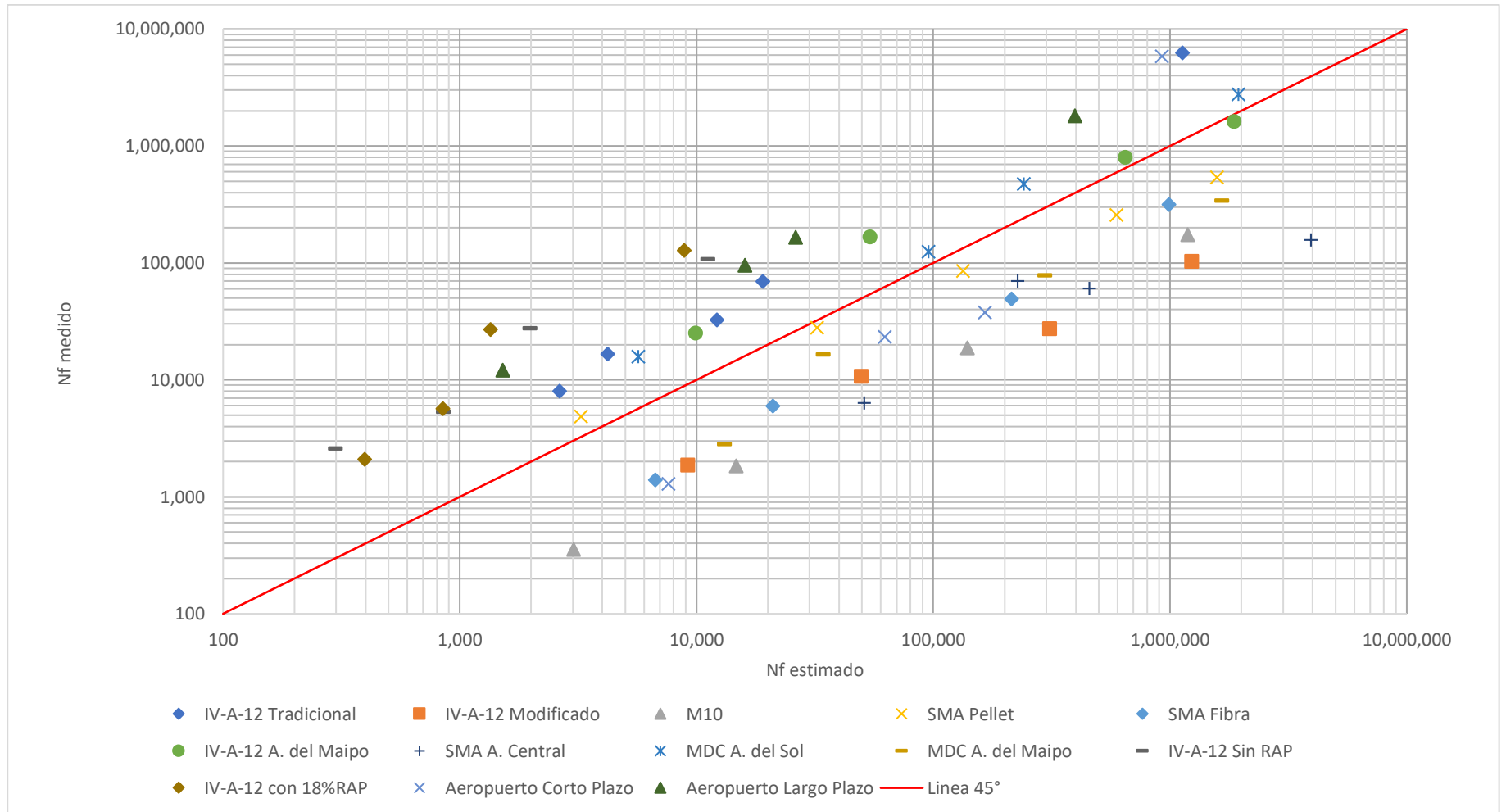


Gráfico 5 Evaluación modelo con un solo set de factores de ajuste para todas las mezclas

4.2.3 Amplitud Térmica como un criterio para agrupar mezclas

Con el fin de mejorar los resultados, donde el número de ciclos a la falla estimado se acerque más al medido en el ensayo, se propone incorporar como un criterio la amplitud térmica. Este criterio se incorpora separando las mezclas en tres grupos: ligantes tradicionales (cuya amplitud térmica es menor o igual a 95°C) y modificados de dos tipos: con una amplitud térmica entre 96°C y 105°C (ambos extremos incluidos) y aquellos que poseen una amplitud térmica mayor a 106°C. Los grupos quedan definidos según lo que se indica en la Tabla 48.

Tabla 48 Grupos de mezclas según amplitud térmica

| Grupo | Identificador Mezcla |
|---------------------------------------|--|
| Amplitud Térmica ≤ 95 | IV-A-12 Tradicional IV-A-12 IV-A-12 18%RAP |
| $96 \leq$ Amplitud Térmica ≤ 105 | IV-A-12 Modificado M-10 SMA Modificado Pell SMA Modificado Cel |
| $106 \leq$ Amplitud Térmica | SMA A. Central M10 A. del Maipo M10 A. del Sol IV-A-12 A. del Maipo Mezcla Aeropuerto CP Mezcla Aeropuerto LP |

Los parámetros de ajuste de calibración se determinan de igual forma que en la sección anterior. Se determinan las constantes β_1 , β_2 y β_3 en el software R Studio de forma independiente para cada grupo de mezclas. Los resultados se indican en la Tabla 49

Tabla 49 Constantes de calibración local: mezclas agrupadas según amplitud térmica 1

| Amplitud Térmica | β_1 | β_2 | β_3 |
|---------------------------------------|------------------------|-----------|-----------|
| Amplitud Térmica ≤ 95 | $3.2654 \cdot 10^8$ | 1.0673 | 2.7395 |
| $96 \leq$ Amplitud Térmica ≤ 105 | $3.2347 \cdot 10^{37}$ | 1.1592 | 6.5683 |
| $106 \leq$ Amplitud Térmica | $2.7487 \cdot 10^1$ | 1.3190 | 1.8345 |

A partir de estos parámetros se puede apreciar en el Gráfico 6, que para los dos grupos con amplitud térmica menor a 106°C la relación entre el valor predicho y medido posee un coeficiente de correlación muy cercano a 1, por lo que los factores de ajuste predicen prácticamente a la perfección el número de ciclos a la falla. Sin embargo, la predicción no resulta tan efectiva para aquellos ligantes más modificados, que poseen una amplitud térmica mayor o igual a 106°C, pues el coeficiente de correlación entre el valor medido y ajustado para este grupo solo es 0.6063, a pesar de no ser un valor tan bajo, prácticamente no mejora la predicción realizada para el grupo completo por lo que no resulta suficiente. El sesgo entre los grupos se relaciona inversamente con el coeficiente de correlación, a medida que este disminuye aumenta el sesgo, es considerable este valor para el grupo conformado por aquellas mezclas con una amplitud térmica menor a 95°C.

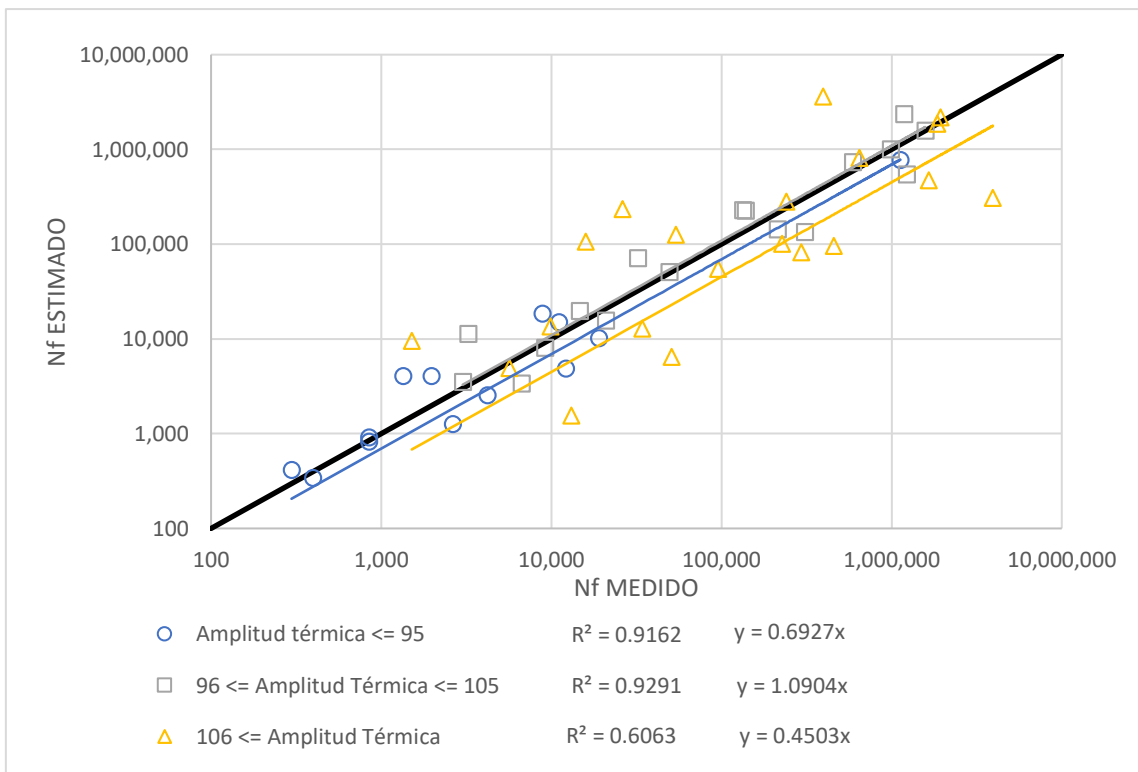


Gráfico 6 Evaluación de mezclas agrupadas según amplitud térmica 1

Las razones que se pueden atribuir para obtener un coeficiente de correlación más bajo en el tercer grupo que en los con una amplitud térmica menor a 106 puede ser debido a que estos ligantes al estar muy modificados poseen grandes diferencias en el módulo dinámico, ya que este es sumamente sensible a variaciones del ligante, lo que se traduce en que los factores de ajustes propuestos no son capaces de predecir en su totalidad el valor de número de ciclos a la falla de fatiga para todas las mezclas.

Se propone modificar el límite de amplitud térmica que divide los ligantes modificados según se indica en la Tabla 50.

Tabla 50 Grupos de mezclas según amplitud térmica 2

| Grupo | Identificador Mezcla |
|--|---|
| Amplitud Térmica ≤ 95 | IV-A-12 Tradicional IV-A-12 IV-A-12 18%RAP |
| $96 \leq$ Amplitud Térmica ≤ 106 | IV-A-12 Modificado M-10 SMA Modificado Pell SMA Modificado Cel Mezcla Aeropuerto CP Mezcla Aeropuerto LP |
| $107 \leq$ Amplitud Térmica | SMA A. Central M10 A. del Maipo M10 A. del Sol IV-A-12 A. del Maipo |

Con estos grupos se obtienen las constantes de calibración local que se muestra en la Tabla 51 y el Gráfico 7.

Tabla 51 Constantes de calibración local: mezclas agrupadas según amplitud térmica 2

| Amplitud Térmica | β_1 | β_2 | β_3 |
|---------------------------------------|-------------------------|-----------|-----------|
| Amplitud Térmica ≤ 95 | $3.2654 \cdot 10^8$ | 1.0869 | 2.7398 |
| $96 \leq$ Amplitud Térmica ≤ 106 | $1.1047 \cdot 10^{-19}$ | 1.3459 | -0.5927 |
| $107 \leq$ Amplitud Térmica | $1.5654 \cdot 10^{-8}$ | 1.2878 | 0.7138 |

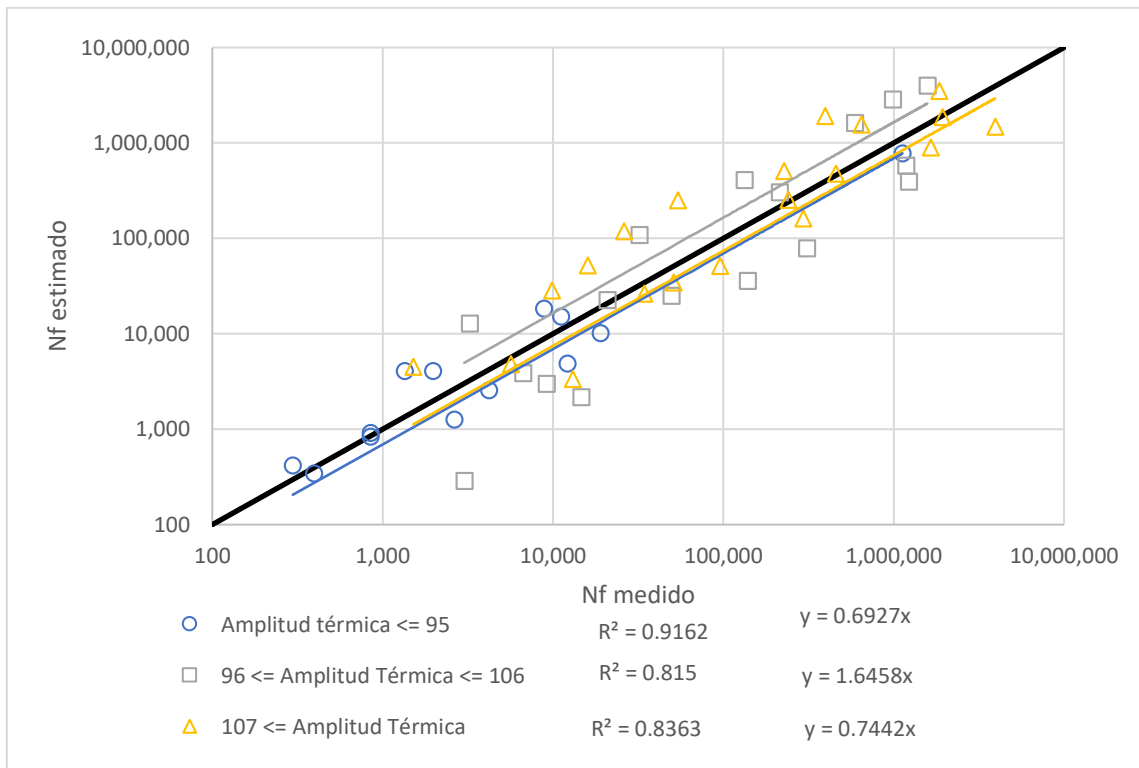


Gráfico 7 Evaluación de mezclas agrupadas según amplitud térmica 2

A partir de este análisis se evidencia una mejora en el coeficiente de correlación del grupo con amplitud térmica mayor o igual a 107 (en comparación a cuando incluye a las mezclas con amplitud térmica igual a 106), esto induce una disminución en la correlación y un aumento considerable en el sesgo para aquellos grupos de ligantes modificados con amplitud térmica entre 96 y 106 al incluir aquellas mezclas del extremo superior del rango

4.2.3.1 Análisis ANOVA

Para validar la hipótesis de que los grupos están bien conformados se realiza un análisis ANOVA. Para realizar este análisis ANOVA de una forma más representativa se realiza entre aquellos resultados del grupo a un mismo nivel de deformación correspondiente a $500\mu\text{strain}$.

El análisis consiste en validar la hipótesis nula que indica la inexistencia de diferencias entre los grupos propuestos. Para ello, la tabla ANOVA asociada al análisis para las mezclas

agrupadas según amplitud térmica 1 corresponde a la Tabla 53 y para el grupo 2 corresponde la Tabla 54 .

Tabla 52 Tabla de cálculo para Análisis ANOVA

| | Suma de cuadrados | Grados de Libertad | Varianza |
|------------------|---|--------------------|---------------------------------------|
| Entre grupos | $SS_{entre} = \sum_{k=1}^K n_k (\bar{x}_k - \bar{x})^2$ | K-1 | $MS_{entre} = \frac{SS_{entre}}{K-1}$ |
| Dentro del grupo | $SS_{intra} = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{n_k} (x_{kj} - \bar{x}_k)^2$ | N-K | $MS_{intra} = \frac{SS_{intra}}{N-K}$ |
| Total | $SS_T = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{n_k} (x_{kj} - \bar{x})^2$ | N-1 | $MS_T = \frac{SS_T}{N-1}$ |

Mediante el análisis ANOVA se busca aceptar o rechazar la hipótesis nula H_0 . Se compara el estadístico $F_{calculado} = \frac{MS_{entre}}{MS_{intra}}$, con el valor del estadístico tabulado para un 95% de confianza para $K=3$ (cantidad de grupos) y $N=13$ (número de mezclas en análisis) $F_{tabulado} = 4.103$

H_0 : no existe diferencia entre los grupos

Tabla 53 Análisis ANOVA para mezclas agrupadas según amplitud térmica 1

| | Suma cuadrados | Grados de Libertad | Varianza |
|------------------|------------------------|--------------------|---------------------|
| Entre grupos | $1.2566 \cdot 10^{10}$ | 2 | $6.2828 \cdot 10^9$ |
| Dentro del grupo | $1.0649 \cdot 10^{10}$ | 10 | $1.0649 \cdot 10^9$ |
| Total | $2.3215 \cdot 10^{10}$ | 12 | |

Tabla 54 Análisis ANOVA para mezclas agrupadas según amplitud térmica 2

| | Suma cuadrados | Grados de Libertad | Varianza |
|------------------|------------------------|--------------------|------------------------|
| Entre grupos | $9.3089 \cdot 10^{10}$ | 2 | $4.6545 \cdot 10^{10}$ |
| Dentro del grupo | $1.5667 \cdot 10^{11}$ | 10 | $1.5667 \cdot 10^{10}$ |
| Total | $2.4976 \cdot 10^{11}$ | 12 | |

A partir de estos valores el estadístico F calculado es 5.8997 para los grupos propuestos según la Tabla 48, por ende, como $F_{\text{tabulado}} \leq F_{\text{calculado}}$ se rechaza la hipótesis nula, concluyendo que para un nivel de confianza del 95% los grupos están bien divididos. Para la opción 2 el estadístico F calculado es 2.9709 (a partir de los datos de la Tabla 54), a raíz de esto se acepta la hipótesis nula para este grupo de datos, no habiendo razón para asumir que están bien divididos los grupos propuestos en la Tabla 50.

4.2.4 Amplitud Térmica como una nueva variable

Al encontrar mejores resultados incorporando la amplitud térmica como un criterio, el nuevo modelo corresponde a incorporar dicha variable en la ecuación. Se proponen 3 distintas ecuaciones para incorporar la amplitud térmica en la ecuación de predicción de fatiga

1. Dentro del parámetro C, según se indica en la Ecuación 13 este parámetro incluye las propiedades volumétricas de la mezcla (vacíos de aire y contenido de asfalto efectivo) por lo que se propone incorporar la amplitud térmica junto con estas propiedades de la forma en que se muestra en la Ecuación 34

$$N_f = C * C_h * (\beta_1 * k_1) * \varepsilon_t^{(\beta_2 * k_2)} * E^{(\beta_3 * k_3)}$$

$$C = 10^{M * \beta_4 * AT}$$

$$\log(N_f) = M * \beta_4 * AT + \log(C_h) + \log(\beta_1 k_1) + \beta_2 k_2 \log(\varepsilon_t) + \beta_3 k_3 \log(E)$$

Ecuación 34

Para este análisis, las constantes de calibración de campo corresponden a $\beta_1 = 2.1462 * 10^6$, $\beta_2 = 1.1037$, $\beta_3 = 2.3972$ y la constante de calibración nueva $\beta_4 = 0.00682$. La relación obtenida entre el número de ciclos a la falla predicho con estas constantes y el obtenido del ensayo se presenta en el Gráfico 8 con un coeficiente de correlación $R^2=0.601$.

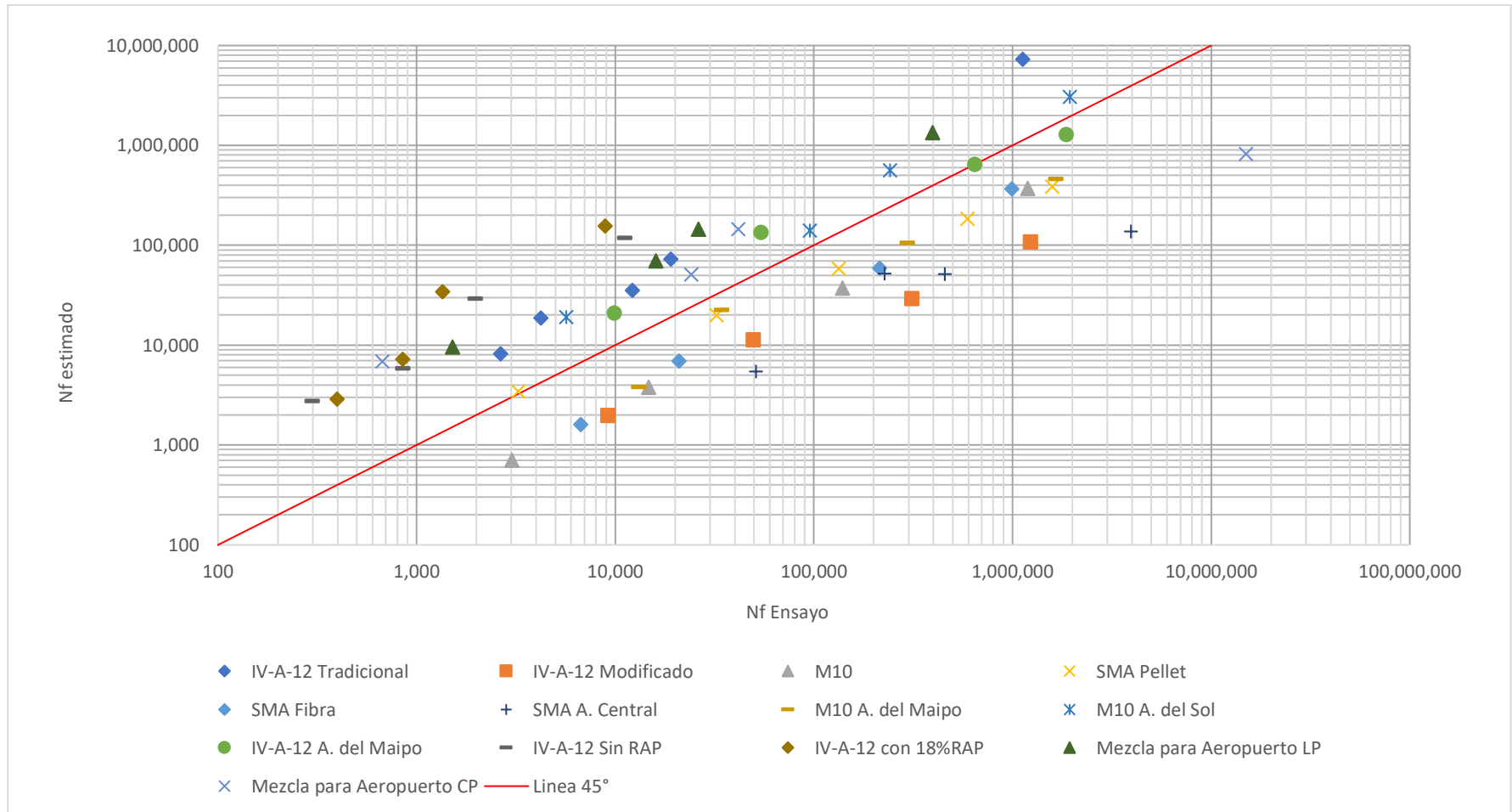


Gráfico 8 Evaluación modelo incorporando amplitud térmica como una nueva variable 1

2. Dentro del parámetro β_1 , como un exponente, no de forma lineal con las variables originales que están incluidas en la fórmula con el fin de evaluar si incide de forma indirecta según se indica en la Ecuación 35

$$N_f = C * C_h * \beta_1 * \varepsilon_t^{\beta_2} * E^{\beta_3}$$

$$\beta_1 = \beta'_1 * 10^{\beta_4 * AT}$$

$$\log(N_f) = \log(C * C_h) + \log(\beta'_1) + \beta_4 * AT + \beta_2 \log(\varepsilon_t) + \beta_3 \log(E) \quad \text{Ecuación 35}$$

Para este análisis, las constantes de calibración de campo corresponden a $\beta'_1 = 4.6698 * 10^{-18}$, $\beta_2 = 1.2493$, $\beta_3 = 0.59$ y la constante de calibración nueva $\beta_4 = 0.08118$. La relación obtenida entre el número de ciclos a la falla predicho con estas constantes y el obtenido del ensayo se presenta en el Gráfico 9 con un coeficiente de correlación igual a 0.7761.

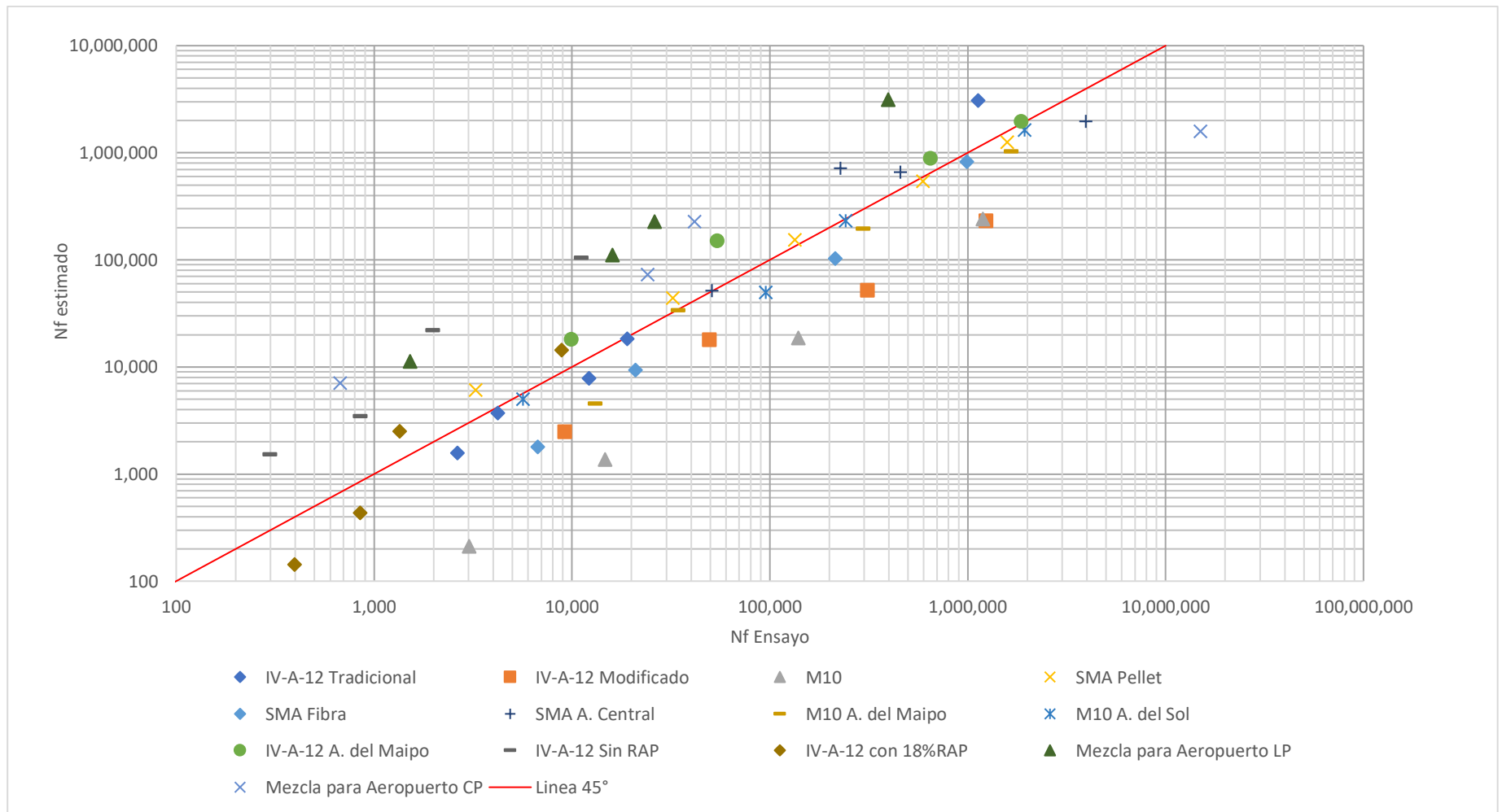


Gráfico 9 Evaluación modelo incorporando amplitud térmica como una nueva variable 2

3. Dentro del parámetro β_1 se incorpora la amplitud como una nueva variable para calibrar, de forma lineal a las variables explicativas originalmente incluidas. La nueva relación se presenta en la Ecuación 36.

$$N_f = C * C_h * \beta_1 * \varepsilon_t^{\beta_2} * E^{\beta_3}$$

$$\beta_1 = \beta'_1 * AT^{\beta_4}$$

$$\log(N_f) = \log(C * C_h) + \log(\beta'_1) + \beta_4 \log(AT) + \beta_2 \log(\varepsilon_t) + \beta_3 \log(E) \quad \text{Ecuación 36}$$

Para este análisis, las constantes de calibración de campo corresponden a $\beta'_1 = 4.0798 * 10^{-46}$, $\beta_2 = 1.2479$, $\beta_3 = 0.6718$ y la constante de calibración nueva $\beta_4 = 18.4169$. La relación obtenida entre el número de ciclos a la falla predicho con estas constantes y el obtenido del ensayo se presenta en el Gráfico 10 con un coeficiente de correlación igual a 0.7762.

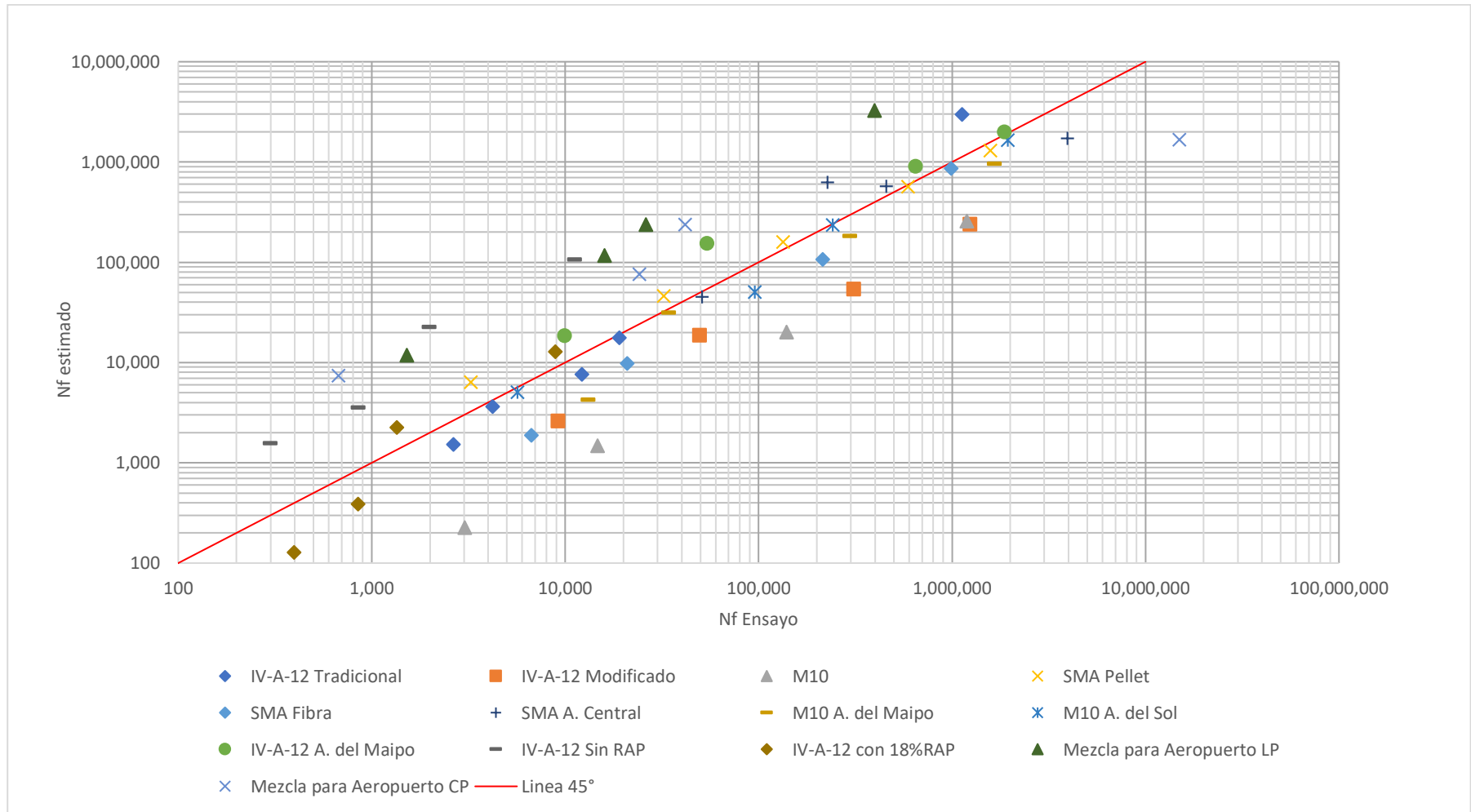


Gráfico 10 Evaluación modelo incorporando amplitud térmica como una nueva variable 3

A partir de los 3 gráficos y el análisis realizado se establece que la mejor relación es la que entrega el Gráfico 10, con un coeficiente de correlación 0.7762.

Para validar los resultados presentados en esta sección, se realiza un análisis matemático con el fin de evaluar si agregar la nueva variable aporta información relevante para la ecuación. Esto se lleva a cabo mediante el análisis de suma de cuadrados extra. Donde se plantea la hipótesis nula de que el coeficiente β_4 tiene un valor 0.

Tabla 55 Análisis suma de cuadrados extra para agregar AT como nueva variable

| | Suma cuadrados regresión 1 | Suma cuadrados regresión 2 | Suma residuos regresión 2 | l-k | n-l-1 | Estadístico F0 |
|------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|-----|-------|-------------------|
| ε_t, E, AT | 50.982 | 65.369 | 17.252 | 1 | 46 | 38.36 |

Se compara la suma de cuadrados obtenida del análisis ANOVA a la regresión 1, que se considera la relación obtenida en la Ecuación 33. La suma de cuadrados y de residuos de la regresión 2 corresponde al análisis ANOVA de la relación obtenida de la Ecuación 36. El parámetro “l” corresponde a los grados de libertad (variables en la ecuación) de la regresión 2 (3 variables correspondientes a ε_t, E, AT) y “k” a los grados de libertad de la regresión 1 (ε_t, E). N corresponde a la cantidad de datos analizados que es igual a 50.

A partir de este análisis se obtiene un estadístico de prueba $F0 = 38.36$ que es comparado con el estadístico F_{Fisher} para una confiabilidad del 95% que corresponde a $F_{Fisher} = 4.052$.

$$F0 > F_{Fisher}$$

Ecuación 37

Como el estadístico de prueba es mucho mayor al valor de referencia, la hipótesis nula se rechaza, por ende, el coeficiente de calibración que acompaña a la variable AT (amplitud térmica) no puede ser 0, es decir, esta variable es relevante para el análisis.

En conclusión, el mejor modelo para predecir el número de ciclos a la falla a fatiga es aquel que incorpora la amplitud térmica como una variable explicativa al modelo. De esta

forma la ecuación final a utilizar propuesta corresponde a la Ecuación 38. Al reemplazar las constantes de calibración global y de campo responde a una ecuación de la siguiente forma:

$$N_f = C * C_h * k_{f1} * \beta'_1 * AT^{\beta_4} * \varepsilon_t^{k_{f2} * \beta_2} * E^{k_{f3} * \beta_3} \quad \text{Ecuación 38}$$

Donde:

$$k_{f1} = 0.007566$$

$$k_{f2} = -3.9492$$

$$k_{f3} = -1.281$$

$$\beta'_1 = 4.0798 * 10^{-46}$$

$$\beta_2 = 1.2479$$

$$\beta_3 = 0.6718$$

$$\beta_4 = 18.4169$$

$$N_f = C * C_h * 3.0867 * 10^{-48} * AT^{18.4169} * \varepsilon_t^{-4.9281} * E^{-0.8606} \quad \text{Ecuación 39}$$

Finalmente, observando la Ecuación 39 se plantea la posibilidad de eliminar la variable explicativa E (módulo dinámico de la mezcla asfáltica) y luego eliminar dicha variable junto al parámetro C que contiene las propiedades volumétricas de la mezcla.

4. Se elimina la variable explicativa E. La nueva relación se presenta en la Ecuación 42.

$$N_f = C * C_h * \beta_1 * \varepsilon_t^{\beta_2} \quad \text{Ecuación 40}$$

$$\beta_1 = \beta'_1 * AT^{\beta_4} \quad \text{Ecuación 41}$$

$$\log(N_f) = \log(C * C_h) + \log(\beta'_1) + \beta_4 \log(AT) + \beta_2 \log(\varepsilon_t) \quad \text{Ecuación 42}$$

Las constantes de calibración de campo corresponden a $\beta'_1 = 4.8779 * 10^{-57}$, $\beta_2 = 1.2553$ y la constante de calibración nueva $\beta_4 = 21.3347$. La relación obtenida entre el número de ciclos a la falla predicho con estas constantes y el obtenido del ensayo se presenta en el Gráfico 11 con un coeficiente de correlación igual a 0.7707.

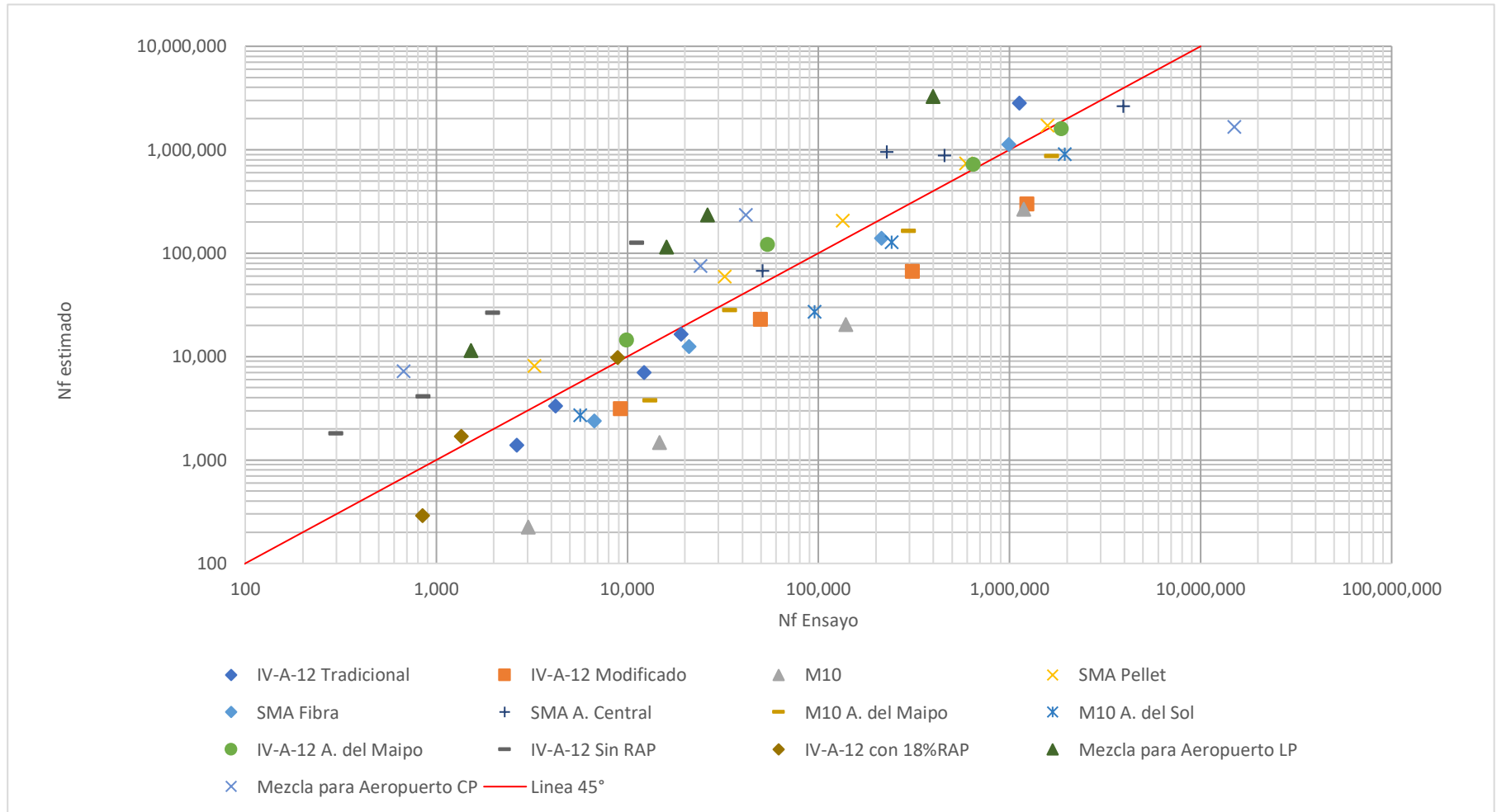


Gráfico 11 Evaluación modelo incorporando amplitud térmica como una nueva variable 4

5. Se elimina la variable explicativa E y el parámetro C. La nueva relación se presenta en la Ecuación 45.

$$N_f = C_h * \beta_1 * \varepsilon_t^{\beta_2} \quad \text{Ecuación 43}$$

$$\beta_1 = \beta_1' * AT^{\beta_4} \quad \text{Ecuación 44}$$

$$\log(N_f) = \log(C_h) + \log(\beta_1') + \beta_4 \log(AT) + \beta_2 \log(\varepsilon_t) \quad \text{Ecuación 45}$$

Las constantes de calibración de campo corresponden a $\beta_1' = 2.1679 * 10^{-53}$, $\beta_2 = 1.1945$ y la constante de calibración nueva $\beta_4 = 19.9523$. La relación obtenida entre el número de ciclos a la falla predicho con estas constantes y el obtenido del ensayo se presenta en el Gráfico 12 con un coeficiente de correlación igual a 0.8324.

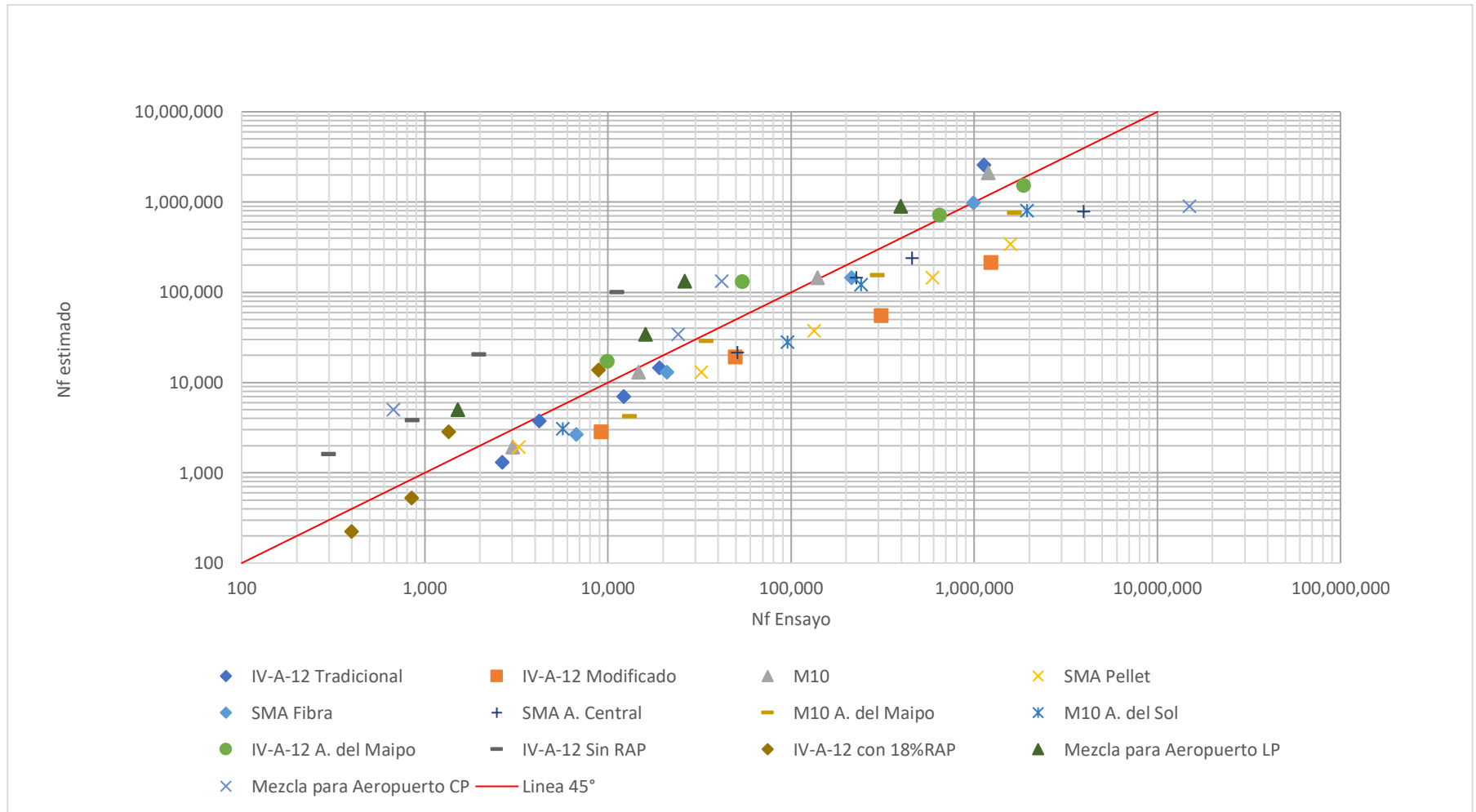


Gráfico 12 Evaluación modelo incorporando amplitud térmica como una nueva variable 5

Se aprecia de forma evidente que esta última propuesta mejora sustancialmente el coeficiente de correlación obtenido. Eliminar solamente el módulo dinámico no genera una mejora significativa en la ecuación, al eliminar también el parámetro C, que ajusta la ecuación con una constante determinada por las propiedades volumétricas de la mezcla, mejora el coeficiente de correlación ya que el módulo dinámico y estas propiedades están estrechamente ligadas.

Finalmente, la ecuación que describe esta nueva propuesta queda definida según las siguientes constantes:

$$N_f = C_h * k_{f1} * \beta'_1 * AT^{\beta_4} * \varepsilon_t^{k_{f2} * \beta_2} \quad \text{Ecuación 46}$$

Donde:

$$k_{f1} = 0.007566$$

$$k_{f2} = -3.9492$$

$$\beta'_1 = 2.1679 * 10^{-53}$$

$$\beta_2 = 1.1945$$

$$\beta_4 = 19.9523$$

$$N_f = C_h * 1.6402 * 10^{-55} * AT^{19.9523} * \varepsilon_t^{-4.7173} \quad \text{Ecuación 47}$$

4.3 VALIDACIÓN DE CALIBRACIÓN POR MEDIO DE JACK – KNIFE

En esta sección se utiliza el método Jack-knife para estimar el intercepto, pendiente y el valor del coeficiente de correlación para el modelo de vida a fatiga con las calibraciones locales dispuestas en la Ecuación 39 y la Ecuación 47. Se seleccionan el modelo presentado en la Ecuación 39 (que corresponde a incorporar la amplitud térmica a la ecuación de forma lineal) debido a que es el modelo que presenta una mejor correlación al incorporar la amplitud térmica y es compatible con el uso del software MEPDG. Además, se analiza el modelo presentado en la Ecuación 47 como una alternativa que mejora la correlación.

Para realizar la validación de Jack-knife se eliminó el grupo de datos correspondiente a los resultados de una mezcla asfáltica a la vez. Esto equivale a 13 grupos en total, 11 de ellos con 4 datos y 2 grupos con 5 datos.

4.3.1 Dentro del parámetro β_1 se incorpora la amplitud como una nueva variable para calibrar, de forma lineal a las variables explicativas originalmente incluidas.

$$N_f = C * C_h * 3.0867 * 10^{-48} * AT^{18.4169} * \varepsilon_t^{-4.9281} * E^{-0.8606}$$

Se presentan a continuación las tablas asociadas a los resultados utilizados para la validación Jack-knife, los estimadores de regresión para el grupo completo de datos y el obtenido al utilizar los N-1 grupos de datos (13) para cada análisis.

Tabla 56 Calibración local para Fatiga (modelo incorporando amplitud térmica 3)

| Estimadores Calibración Local | | | |
|-------------------------------|---------------------|----------------------|-----------------|
| Pendiente (a-n) | Intercepto (b-n) | Coef. Corr. (r-n) | Fisher (Z-n) |
| 0.856 | 0.657 | 0.872 | 1.342 |

Tabla 57 Estimadores Parciales Método Jack-knife para Fatiga (modelo incorporando amplitud térmica 3)

| N° análisis | Estimadores Parciales | | | |
|--------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|----------------|
| | Pendiente (a-n) | Intercepto (b-n) | Coef. Corr. (r-n) | Fisher (Zt) |
| 1 | 0.829 | 0.793 | 0.862 | 1.301 |
| 2 | 0.870 | 0.639 | 0.879 | 1.373 |
| 3 | 0.846 | 0.785 | 0.896 | 1.453 |
| 4 | 0.852 | 0.664 | 0.863 | 1.305 |
| 5 | 0.846 | 0.728 | 0.869 | 1.330 |
| 6 | 0.907 | 0.391 | 0.882 | 1.384 |
| 7 | 0.867 | 0.538 | 0.895 | 1.445 |
| 8 | 0.915 | 0.327 | 0.883 | 1.391 |
| 9 | 0.811 | 0.902 | 0.848 | 1.249 |
| 10 | 0.849 | 0.674 | 0.864 | 1.309 |
| 11 | 0.859 | 0.668 | 0.871 | 1.336 |
| 12 | 0.847 | 0.702 | 0.866 | 1.315 |
| 13 | 0.845 | 0.688 | 0.865 | 1.313 |
| Promedio | 0.857 | 0.654 | 0.873 | 1.344 |
| Desv. Esta. | 0.028 | 0.157 | 0.014 | 0.059 |

Tabla 58 Pseudo Valores Método Jack-knife para Fatiga (modelo incorporando amplitud térmica 3)

| N° análisis | Pseudo Valores | | |
|--------------------|---------------------|----------------------|-----------------|
| | Pendiente (a*-n) | Intercepto (b*-n) | Fisher (Z*t) |
| 1 | 1.187 | -0.979 | 1.834 |
| 2 | 0.695 | 0.880 | 0.973 |
| 3 | 0.986 | -0.875 | 0.009 |
| 4 | 0.904 | 0.573 | 1.784 |
| 5 | 0.984 | -0.198 | 1.487 |
| 6 | 0.246 | 3.848 | 0.842 |
| 7 | 0.735 | 2.086 | 0.105 |
| 8 | 0.156 | 4.614 | 0.751 |
| 9 | 1.403 | -2.284 | 2.458 |
| 10 | 0.942 | 0.449 | 1.742 |
| 11 | 0.822 | 0.524 | 1.408 |
| 12 | 0.973 | 0.120 | 1.660 |
| 13 | 0.999 | 0.282 | 1.691 |
| Promedio | 0.849 | 0.695 | 1.322 |
| Desv. Esta. | 0.340 | 1.889 | 0.713 |

A partir del resultado obtenido en los pseudo valores se obtiene un coeficiente de correlación Z transformado (Z*t) igual a 1.322, cuya transformada inversa de Fisher nos entrega el coeficiente de correlación no sesgado que corresponde 0.867. A partir de este valor se obtiene el estimador del sesgo según Jack-knife

$$B_{jack}(R) = R_t - R^* = 0.872 - 0.867 = 0.005$$

El sesgo es positivo y nos muestra que el coeficiente de correlación de la calibración local sobre-estima la magnitud en análisis. Estadísticamente la diferencia es prácticamente cero por lo que la validación del modelo se acepta con una diferencia porcentual entre el coeficiente de correlación sesgado y el de la calibración local de 0.56%.

4.3.2 Eliminando la variable explicativa E y el parámetro C.

$$N_f = C_h * 1.6402 * 10^{-55} * AT^{19.9523} * \varepsilon_t^{-4.7173}$$

Se presentan a continuación las tablas asociadas a los resultados utilizados para la validación Jack-knife, los estimadores de regresión para el grupo completo de datos y el obtenido al utilizar los N-1 grupos de datos (13) para cada análisis.

Tabla 59 Calibración local para Fatiga (modelo incorporando amplitud térmica 5)

| Estimadores Calibración Local | | | |
|--------------------------------------|---------------------|----------------------|-----------------|
| Pendiente (a-n) | Intercepto (b-n) | Coef. Corr. (r-n) | Fisher (Z-n) |
| 0.797 | 0.850 | 0.909 | 1.522 |

Tabla 60 Estimadores Parciales Método Jack-knife para Fatiga (modelo incorporando amplitud térmica 5)

| N° análisis | Estimadores Parciales | | | |
|--------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------|
| n | Pendiente (a-n) | Intercepto (b-n) | Coef. Corr. (r-n) | Fisher (Zt) |
| 1 | 0.767 | 0.999 | 0.905 | 1.499 |
| 2 | 0.807 | 0.841 | 0.915 | 1.556 |
| 3 | 0.775 | 0.952 | 0.906 | 1.505 |
| 4 | 0.807 | 0.843 | 0.911 | 1.532 |
| 5 | 0.783 | 0.923 | 0.906 | 1.505 |
| 6 | 0.842 | 0.625 | 0.917 | 1.569 |
| 7 | 0.800 | 0.796 | 0.919 | 1.580 |
| 8 | 0.854 | 0.528 | 0.926 | 1.628 |
| 9 | 0.766 | 1.016 | 0.893 | 1.437 |
| 10 | 0.804 | 0.825 | 0.904 | 1.496 |
| 11 | 0.797 | 0.870 | 0.908 | 1.519 |
| 12 | 0.791 | 0.892 | 0.906 | 1.507 |
| 13 | 0.783 | 0.890 | 0.906 | 1.502 |
| Promedio | 0.798 | 0.846 | 0.909 | 1.524 |
| Desv. Esta. | 0.026 | 0.138 | 0.008 | 0.048 |

Tabla 61 Pseudo Valores Método Jack-knife para Fatiga (modelo incorporando amplitud térmica 5)

| N° análisis | Pseudo Valores | | |
|--------------------|---------------------|----------------------|-----------------|
| | Pendiente (a*-n) | Intercepto (b*-n) | Fisher (Z*t) |
| 1 | 1.161 | -0.927 | 1.791 |
| 2 | 0.681 | 0.969 | 1.117 |
| 3 | 1.066 | -0.367 | 1.723 |
| 4 | 0.683 | 0.945 | 1.400 |
| 5 | 0.971 | -0.017 | 1.724 |
| 6 | 0.256 | 3.554 | 0.951 |
| 7 | 0.765 | 1.507 | 0.828 |
| 8 | 0.113 | 4.721 | 0.251 |
| 9 | 1.170 | -1.142 | 2.546 |
| 10 | 0.711 | 1.161 | 1.832 |
| 11 | 0.798 | 0.616 | 1.558 |
| 12 | 0.873 | 0.351 | 1.695 |
| 13 | 0.968 | 0.376 | 1.760 |
| Promedio | 0.786 | 0.904 | 1.498 |
| Desv. Esta. | 0.317 | 1.651 | 0.574 |

A partir del resultado obtenido en los pseudo valores se obtiene un coeficiente de correlación Z transformado (Z*t) igual a 1.498, cuya transformada inversa de Fisher nos entrega el coeficiente de correlación no sesgado que corresponde 0.905. A partir de este valor se obtiene el estimador del sesgo según Jack-knife

$$B_{jack}(R) = R_t - R^* = 0.905 - 0.909 = 0.005$$

El sesgo es positivo y nos muestra que el coeficiente de correlación de la calibración local sobre-estima la magnitud en análisis. Estadísticamente la diferencia es prácticamente cero por lo que la validación del modelo se acepta con una diferencia porcentual entre el coeficiente de correlación sesgado y el de la calibración local de 0.47%.

5 MODELOS DE PREDICCIÓN PARA EL MÓDULO DINÁMICO

Existe una extensa revisión bibliográfica que propone modelos para predecir el módulo dinámico. En este capítulo, abordaremos las predicciones de esta propiedad mediante los modelos más estudiados en la literatura: las dos ecuaciones de Witczak (AASHTO, 2004a; Bari, 2005) y el modelo propuesto por Hirsch (Christensen et al., 2003).

Para determinar las predicciones, se utilizarán los resultados dispuestos en el capítulo 3: “Proceso experimental y resultados de laboratorio” sección 3.3 Módulo Dinámico y las propiedades volumétricas de las probetas ensayadas presentes en la Tabla 62.

Tabla 62 Propiedades Volumétricas de Probetas Módulo Dinámico

| Proyecto | Identificador Mezcla | V_a | V_{be} | VMA | VFA |
|---|------------------------|-------|----------|-------|-------|
| Mezclas fabricadas en laboratorio FONDEF D09I1174 | IV-A-12 Tradicional | 5.8 | 11.61 | 17.4 | 66.7 |
| | IV-A-12 Modificado | 4.4 | 11.69 | 16.1 | 72.5 |
| | M-10 | 13 | 10.15 | 23.1 | 43.8 |
| | SMA Modificado Pell | 2.9 | 15.06 | 17.9 | 84.1 |
| | SMA Modificado Cel | 4.6 | 13.15 | 17.8 | 73.9 |
| Mezclas en pistas de prueba FONDEF D09I1174 | SMA A. Central | 3 | 15.34 | 18.34 | 83.64 |
| | SMA A. del Maipo | 3 | 13.50 | 16.5 | 81.82 |
| | M10 A. del Maipo | 10 | 11.96 | 21.96 | 54.46 |
| | M10 A. del Sol | 10 | 11.19 | 21.19 | 52.81 |
| | IV-A-12 A. del Maipo | 4.7 | 13.58 | 18.28 | 74.29 |
| Mezclas con RAP | IV-A-12 | 6.9 | 10.98 | 13.25 | 49.81 |
| | IV-A-12 8%RAP | 7.2 | 10.64 | 12.15 | 41.97 |
| | IV-A-12 18%RAP | 6.7 | 9.6 | 11.65 | 41.20 |
| Aeropuerto | Mezcla para Aeropuerto | 3.5 | 12.08 | 14.4 | 10.9 |

La granulometría de cada mezcla se presenta en la sección 3.1 Mezclas asfálticas. Donde se indica la banda granulométrica utilizada para cada mezcla, que se utiliza para realizar las predicciones del Módulo dinámico.

Para realizar las predicciones de módulo dinámico se construye la curva maestra de cada mezcla a una temperatura de referencia de 21°C, de este modo, se compara la curva

maestra obtenida a partir de los ensayos de laboratorio (a la que llamaremos medido) con la obtenida a partir de la predicción, a la que llamaremos valor predicho o estimado.

El capítulo se compone de cinco secciones, las primeras tres corresponden a la evaluación de los modelos predictivos presentes en la literatura. La cuarta sección presenta la comparación de estos modelos con el fin de establecer aquel que mejor estima los resultados al compararlos con los valores medidos en laboratorio. En la última sección, se realiza la calibración de las constantes del modelo seleccionado, determinando las que mejor modelan las mezclas asfálticas en estudio.

5.1 MODELO DE WITCZAK ORIGINAL

En esta sección se determina el valor estimado mediante el modelo de Witczak, según se muestra en la Ecuación 48. Para determinar la viscosidad se utiliza el método VTS con los valores recomendados por la nueva AASHTO 2002 Guía de diseño (2002 Design Guide, 2004a), los valores utilizados se muestran en la Tabla 63 según el grado de desempeño (PG) del ligante asfáltico.

$$\log|E^*| = 3.750063 + 0.02932\rho_{200} - 0.001767(\rho_{200})^2 - 0.002841\rho_4 - 0.058097V_a - 0.802208 \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} + \frac{3.871977 - 0.0021\rho_4 + 0.003958\rho_{38} - 0.000017(\rho_{38})^2 + 0.005470\rho_{34}}{1 + e^{-0.603313 - 0.313351 \log(f) - 0.393532 \log(\eta)}}$$

Ecuación 48

Tabla 63 Valores de Viscosidad según método VTS

| PG | A | VTS | η 10 ⁶ poise |
|-------|--------|--------|---------------------------------|
| 64-28 | 10.980 | -3.680 | 48.736 |
| 70-22 | 10.299 | -3.426 | 76.497 |
| 70-28 | 9.715 | -3.217 | 32.892 |
| 82-22 | 9.209 | -3.019 | 173.011 |
| 64-16 | 11.375 | -3.822 | 78.825 |
| 76-28 | 9.200 | -3.024 | 54.409 |
| 82-28 | 8.750 | -2.856 | 72.463 |

A partir de las Tabla 62 y Tabla 63 se procede a calcular la curva maestra estimada para cada mezcla asfáltica en análisis.

De forma comparativa se muestra en el Gráfico 13 el comportamiento del valor estimado contra el medido en el ensayo. A través de la gráfica se observa que este modelo sobreestima el valor, obteniendo una recta desplazada en la línea vertical. A partir del coeficiente de correlación R^2 podemos evaluar la precisión de la predicción del valor, siendo este igual a 0.804.

Con respecto al sesgo de la predicción, se aprecia que el valor estimado supera en aproximadamente un 33% el valor medido, sobre-estimandolo en la mayoría de sus puntos.

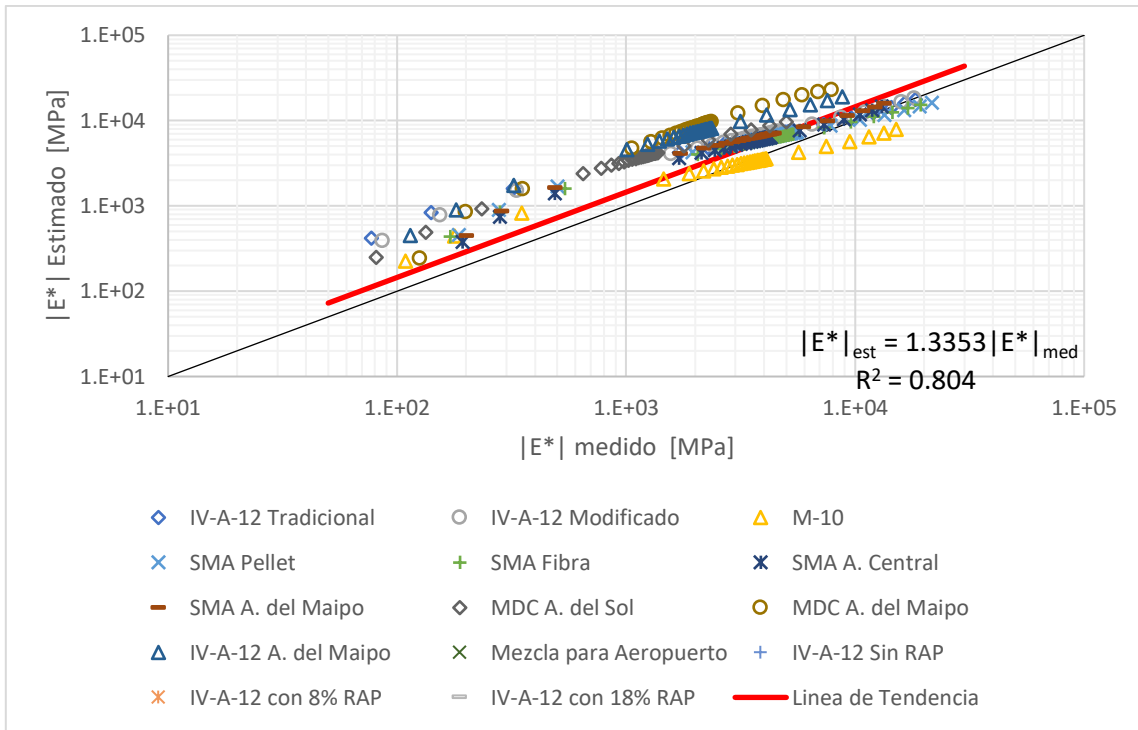


Gráfico 13 Modelo de Witczak Original

Para eliminar el sesgo de esta predicción se aplica un factor de calibración determinado como el inverso de la pendiente entregada en el gráfico. Esto se aprecia en el Gráfico 14.

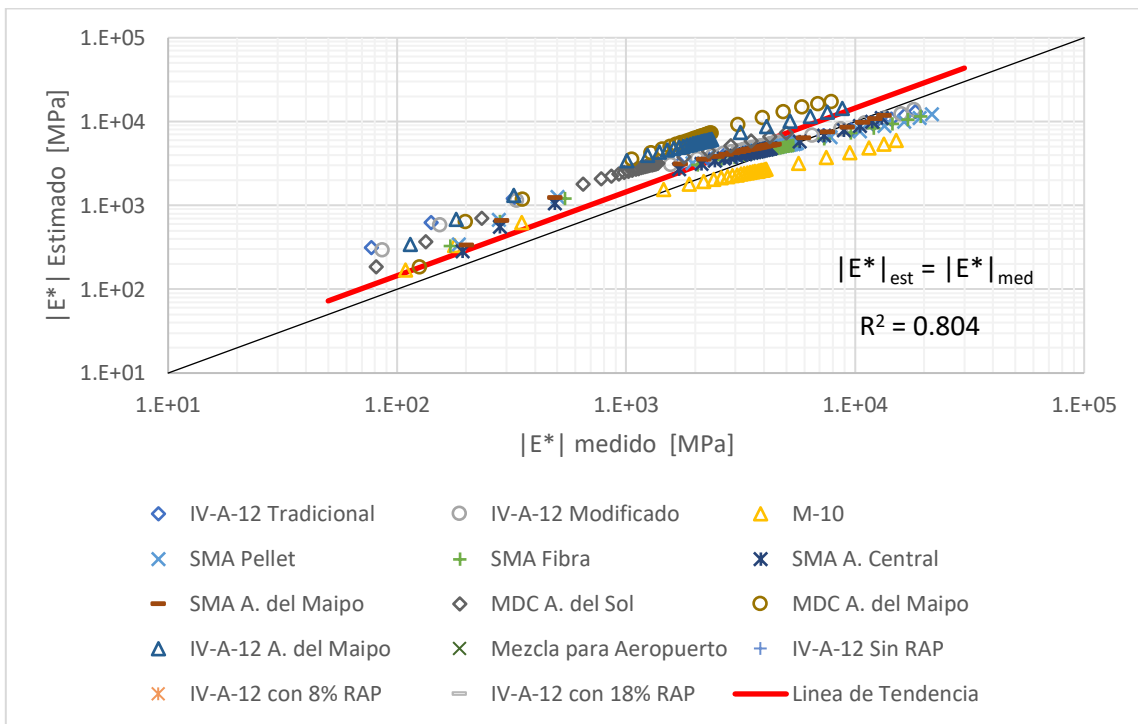


Gráfico 14 Modelo de Witczak Original sin sesgo

5.2 MODELO DE WITCZAK MODIFICADO

En esta sección se determinará el módulo dinámico mediante el modelo de Witczak Modificado. Este modelo caracteriza el ligante a través de datos medidos del módulo de corte dinámico y el ángulo de fase, de este modo, se utilizan las propiedades medidas del ligante asfáltico a utilizar en la mezcla.

En esta sección se utiliza la Ecuación 49 para estimar el valor de módulo dinámico. El módulo de corte dinámico asociado a cada mezcla y el ángulo de fase se encuentra disponible en el Anexo N°2. De igual forma que el capítulo anterior, los parámetros volumétricos de la mezcla y la granulometría se encuentran disponibles en la Tabla 62 y el capítulo “3.1 Mezclas asfálticas”, respectivamente.

$$\begin{aligned} \log|E^*| = & -0.349 + 0.754(|G_b^*|^{-0.0052}) \left(6.65 - 0.032\rho_{200} + 0.0027(\rho_{200})^2 + 0.011\rho_4 - 0.0001(\rho_4)^2 \right. \\ & \left. + 0.006\rho_{38} - 0.00014(\rho_{38})^2 - 0.08V_a - 1.06 \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right) \\ & + \frac{2.56 + 0.03V_a + 0.71 \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} + 0.012\rho_{38} - 0.0001(\rho_{38})^2 - 0.01\rho_{34}}{1 + e^{-0.7814 - 0.5785 \log|G_b^*| + 0.8834 \log(\delta_b)}} \end{aligned} \quad \text{Ecuación 49}$$

De las 14 mezclas disponibles solo 10 de ellas poseen información medida del módulo de corte dinámico. De estas 10, existen 5 que poseen información del ligante en sus tres estados (original, envejecido con PAV y envejecido con HPDR), de las 5 restantes no posee información medida del ligante en estado original.

Las 10 mezclas analizadas corresponden a las fabricadas en laboratorio y obtenidas en terreno del proyecto Fondef D09I1174, siendo las fabricadas en laboratorio las que tienen información completa del ligante en sus tres estados.

A continuación, se presentan los resultados disponibles que se analizaron para los tres estados del ligante.

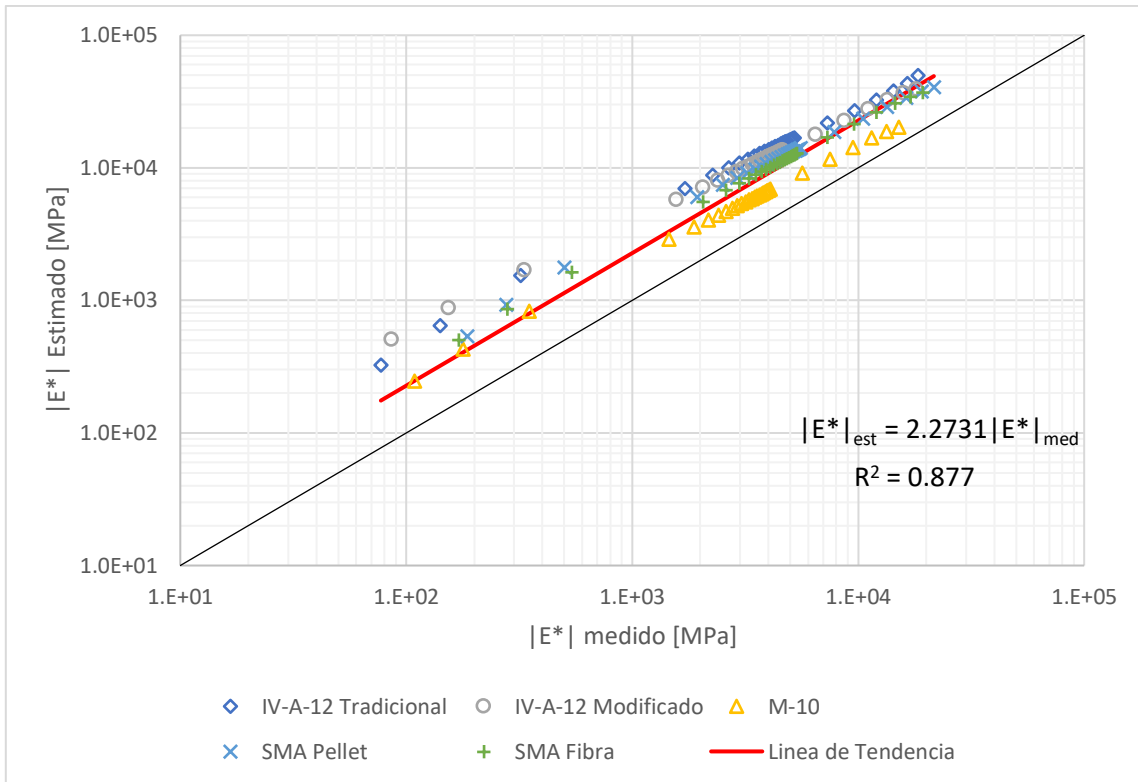


Gráfico 15 Modelo de Witzzak Modificado, ligante en estado Original

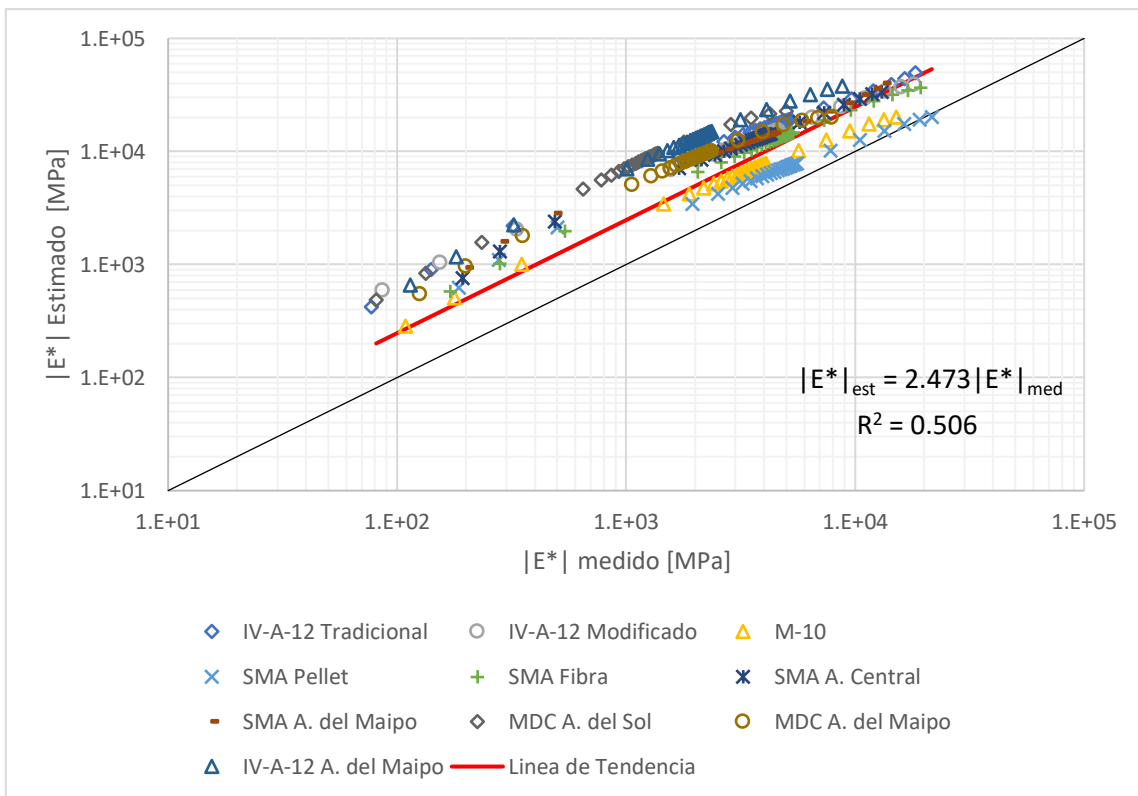


Gráfico 16 Modelo de Witzzak Modificado, ligante envejecido HPDR

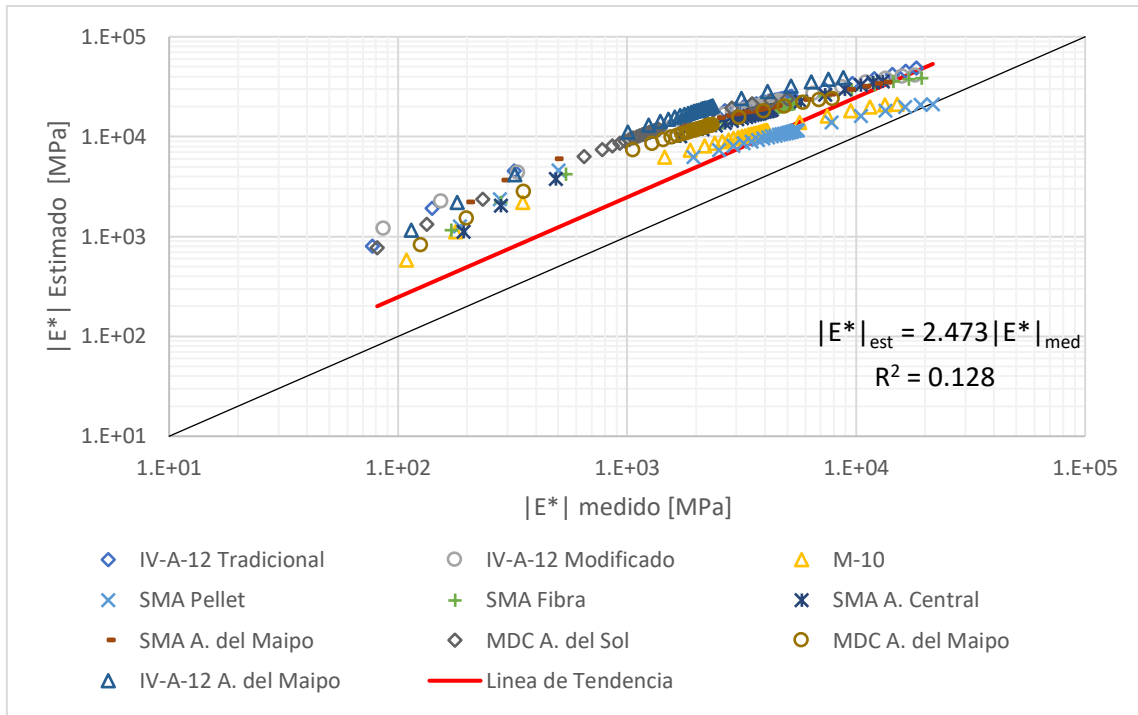


Gráfico 17 Modelo de Witzzak Modificado, ligante envejecido PAV

En base a este modelo predictivo se observa que el que mejor estima el módulo dinámico corresponde a aquel en que se incorpora la información del ligante en estado original, con una correlación de 0.877 indicando una baja variabilidad. Sin embargo, el sesgo es elevado ya que el valor predicho supera en más de un 100% el valor medido.

Para mejorar la predicción, se utiliza el inverso de la pendiente calculada como factor de calibración, de este modo al multiplicar la ecuación por dicho factor se elimina el sesgo resultando el Gráfico 18

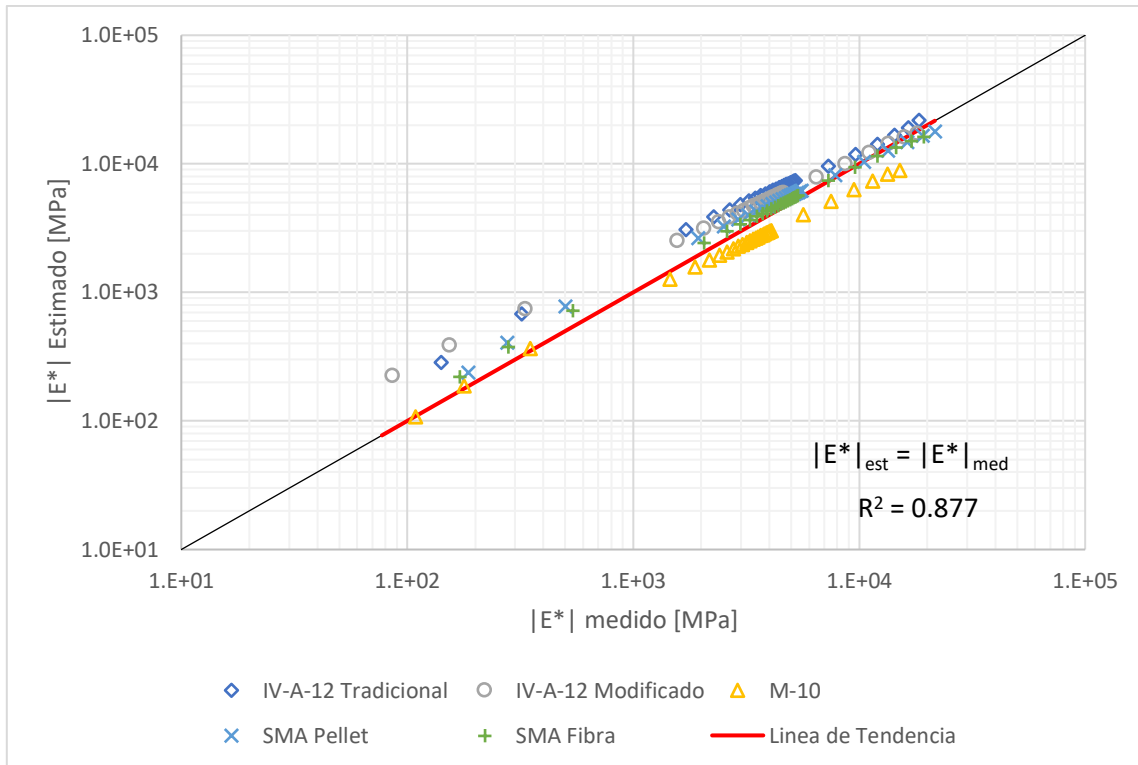


Gráfico 18 Modelo de Witzzak ligante original sin sesgo.

Gráficamente los datos se desplazan en la línea vertical quedando mejor alineados en la recta igualdad mejorando significativamente el sesgo de los datos y manteniendo la exactitud obtenida inicialmente.

Es importante destacar la cantidad de mezclas analizadas, ya que si bien se observan mejores resultados utilizando el módulo de corte dinámico del ligante en estado original esto puede ser debido a que aquella muestra tiene menos especímenes de análisis con respecto a los modelos en que se utiliza el módulo de corte dinámico del ligante en estado envejecido.

5.3 MODELO DE HIRSCH

El modelo de Hirsch, al igual que el Modelo de Witczak del capítulo anterior, utiliza el módulo de corte dinámico del ligante medido en laboratorio. Por ende, se analizan las mismas mezclas que en la sección anterior, 5 para el ligante en estado original y 10 para ligantes envejecidos (con PAV y HPDR).

El modelo predictivo de Hirsch se describe en la Ecuación 50, y los parámetros volumétricos para determinar el módulo dinámico se presentan en la Tabla 64.

$$|E^*| = P_c \left[4200000 \left(1 - \frac{VMA}{100} \right) + 3|G^*|_{binder} \left(\frac{VFA \cdot VMA}{10000} \right) \right] + (1 - P_c) \left[\frac{1 - \frac{VMA}{100}}{4200000} + \frac{VMA}{VFA \cdot 3|G^*|_{binder}} \right]^{-1} \quad \text{Ecuación 50}$$

$$P_c = \frac{\left(20 + \frac{VFA \cdot 3|G^*|_{binder}}{VMA} \right)^{0.58}}{650 + \left(\frac{VFA \cdot 3|G^*|_{binder}}{VMA} \right)^{0.58}}$$

Tabla 64 Propiedades volumétricas para Hirsch

| Mezcla | VMA | VFA |
|----------------------|-------|-------|
| IV-A-12 Tradicional | 17.39 | 66.74 |
| IV-A-12 Modificado | 16.10 | 72.61 |
| M10 | 23.15 | 43.84 |
| SMA Pellet | 17.90 | 84.13 |
| SMA Fibra | 17.79 | 73.92 |
| SMA A. Central | 18.34 | 83.64 |
| SMA A. del Maipo | 16.5 | 81.82 |
| MDC A. del Sol | 21.19 | 52.81 |
| MDC A. del Maipo | 21.96 | 54.46 |
| IV-A-12 A. del Maipo | 18.28 | 74.29 |

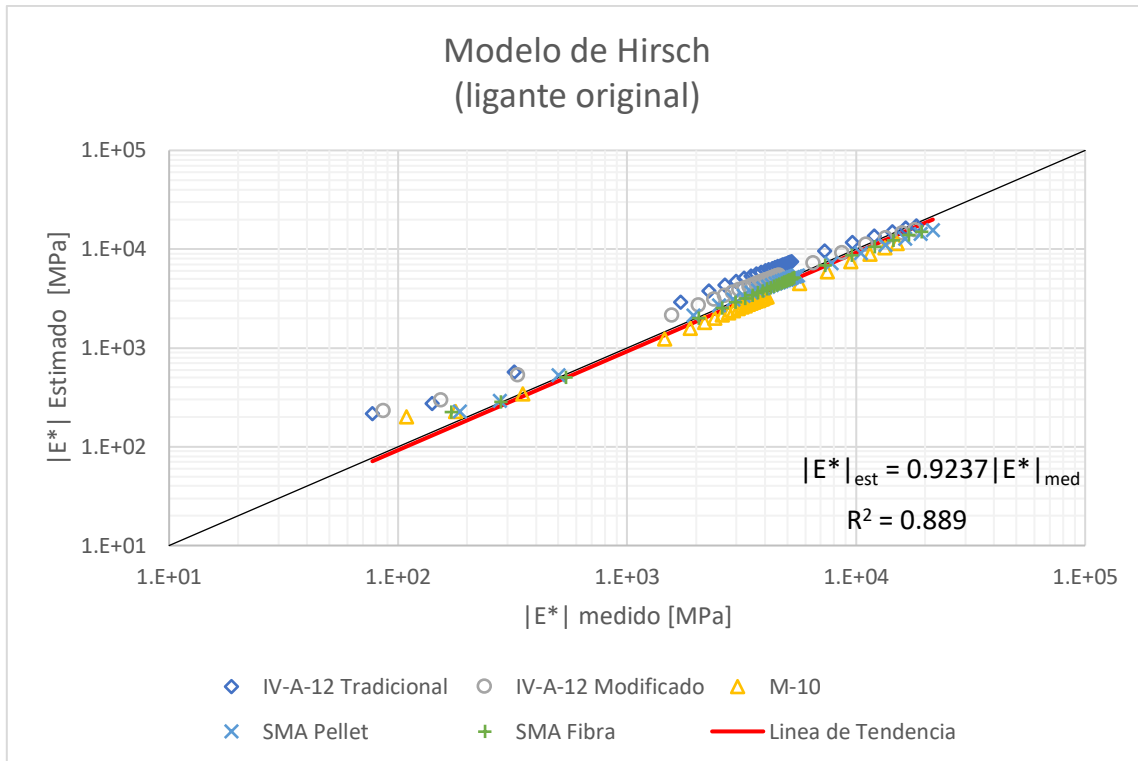


Gráfico 19 Modelo de Hirsch, ligante original

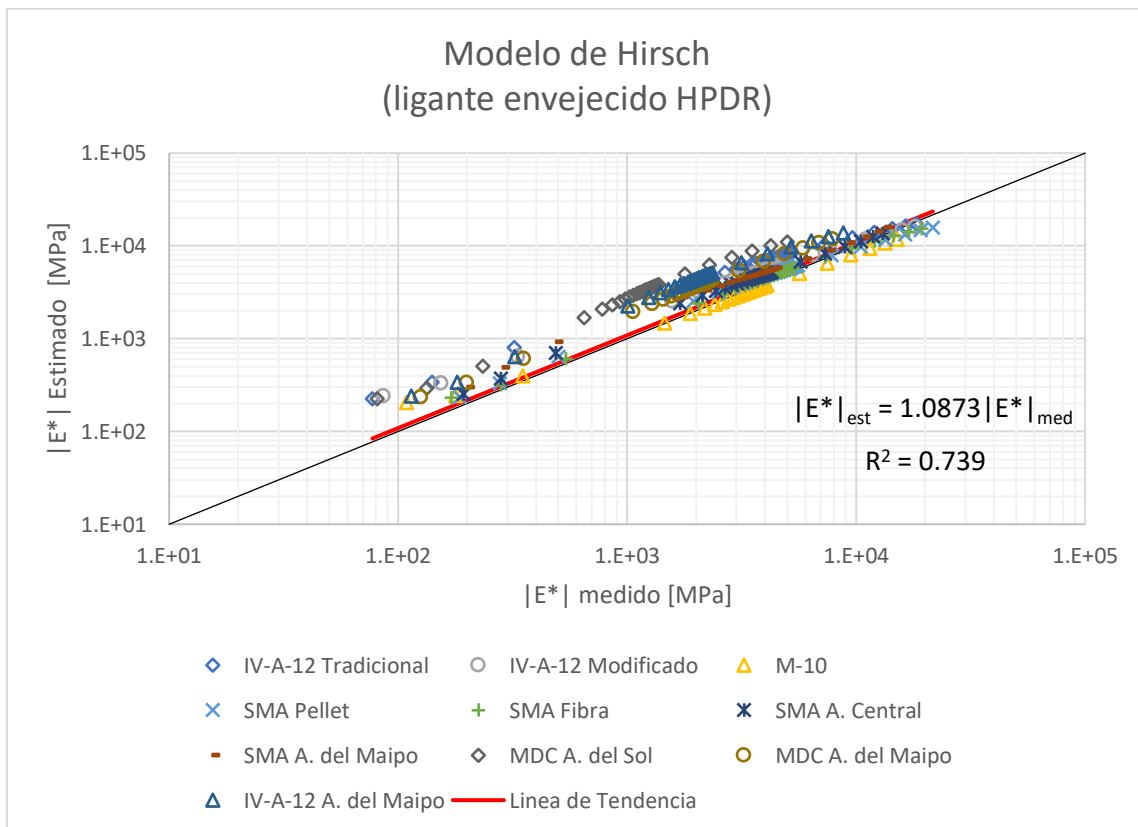


Gráfico 20 Modelo de Hirsch, ligante envejecido HPDR

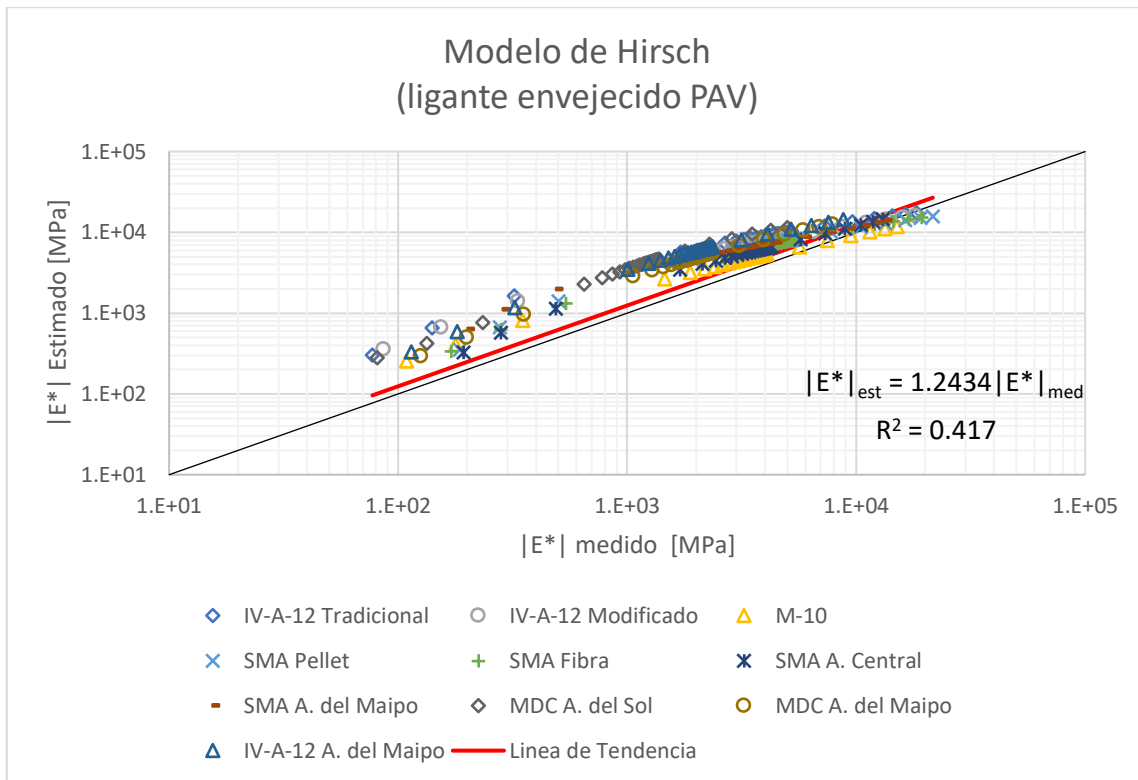


Gráfico 21 Modelo de Hirsch, ligante envejecido PAV

Este modelo se comporta similar al modelo de Witczak Modificado, teniendo un resultado más similar al medido para el ligante en estado original y alejándose a medida que se envejece el ligante. El ligante original subestima levemente el resultado estimado mientras que los ligantes envejecidos sobreestiman el valor.

5.4 COMPARACIÓN DE MODELOS

Para comparar los modelos predictivos, se genera la Tabla 65 con la exactitud presentada mediante el coeficiente de correlación (R^2) entre las predicciones y el valor medido de módulo dinámico; y el sesgo mediante la pendiente de la recta interceptando el origen. De este modo, se puede apreciar de forma más evidente los resultados obtenidos.

Tabla 65 Resumen Modelos Predictivos Módulo Dinámico

| Estado Ligante | Witczak Original | | Witczak Modificado | | Hirsch | |
|-----------------|------------------|-------|--------------------|-------|-----------|-------|
| | Exactitud | Sesgo | Exactitud | Sesgo | Exactitud | Sesgo |
| Original | 0.80 | 1.45 | 0.88 | 2.27 | 0.89 | 0.93 |
| Envejecido HPDR | | | 0.51 | 2.47 | 0.73 | 1.09 |
| Envejecido PAV | | | 0.13 | 2.96 | 0.42 | 1.24 |

Los resultados que arrojan una mayor exactitud corresponden a aquellos asociados al ligante en su estado original, tanto para el modelo de Witczak Modificado como para el modelo de Hirsch. Esto puede ser atribuible a que se analiza una menor nube de datos al estar comparando la curva maestra de solo 5 mezclas. Mientras más envejecido está el ligante, el valor estimado difiere más del medido obteniendo una correlación más baja y un mayor desfase en la vertical.

El modelo predictivo de Witczak Original arroja resultados con un buen coeficiente de correlación y una sobreestimación del valor medido solo en un 33%, sin embargo, se descarta realizar un mayor análisis con este modelo ya que al tener resultados reales medidos del módulo de corte dinámico del ligante se privilegia esta información frente la aproximación que se realiza a través de la viscosidad.

El modelo de Witczak modificado presenta una buena correlación para el ligante original, no así para el ligante en su estado envejecido con HPDR y PAV. En todos los estados del ligante se aprecia que los valores estimados están sobrestimados en más de un 100%.

El modelo de Hirsch presenta un coeficiente de correlación alto para el ligante en estado original, un poco menor para el ligante envejecido con HPDR y más bajo para el ligante envejecido en PAV. Con respecto al sesgo de los resultados obtenidos, se aprecia que para cualquier estado del ligante este es cercano a 1. Si bien la exactitud no es alta en todos los

casos, se puede observar que los resultados se acercan a la recta de igualdad, principalmente, en los valores más altos de módulo dinámico, alejándose para los más bajos.

A partir del análisis se concluye que el mejor modelo para predecir los resultados corresponde al de Hirsch con el ligante en su estado original, sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, al ser una menor muestra esto puede no ser tan determinante. Por consiguiente, se propone analizar el modelo de Hirsch para el ligante en sus tres estados.

5.5 CALIBRACIÓN DEL MODELO DE HIRSCH

Para mejorar el modelo de Hirsch se busca obtener una menor diferencia entre el valor medido y el estimado, para ello se realiza un proceso de calibración modificando las constantes de la Ecuación 5 según se muestra a continuación.

$$P_c = \frac{\left(20 + \frac{VFA \cdot 3|G^*|_{binder}}{VMA}\right)^{0.58}}{650 + \left(\frac{VFA \cdot 3|G^*|_{binder}}{VMA}\right)^{0.58}} \quad \text{Ecuación 51}$$

Se definen las constantes de calibración indicadas en color rojo en la ecuación anterior denominándose como constante 1 a la del numerador, constante 2 en el denominador y la constante 3 igual para ambos exponentes.

A partir de la modificación de dichas constantes se busca minimizar la diferencia entre el valor medido y el estimado a través de la función buscar objetivo, se minimiza la diferencia entre ambos valores.

Este proceso se lleva a cabo de forma independiente para los tres estados del ligante, con la finalidad de obtener distintos factores de calibración, entendiendo que existen diferencias significativas en los resultados del módulo de corte dinámico dependiendo del grado de envejecimiento del ligante. Los resultados de estas constantes de calibración se presentan en la Tabla 66.

Tabla 66 Constantes de Calibración Modelo de Hirsch

| Estado Ligante | Hirsch | | |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| | C ₁ | C ₂ | C ₃ |
| Original | 4.924 | 580.468 | 0.569 |
| Envejecido HPDR | 36.194 | 2125.408 | 0.669 |
| Envejecido PAV | 328.214 | 24652.566 | 0.874 |

A partir de estos resultados se obtienen las siguientes gráficas donde se muestra de forma comparativa el valor estimado del módulo dinámico con cada una de las nuevas constantes de calibración vs el valor teórico.

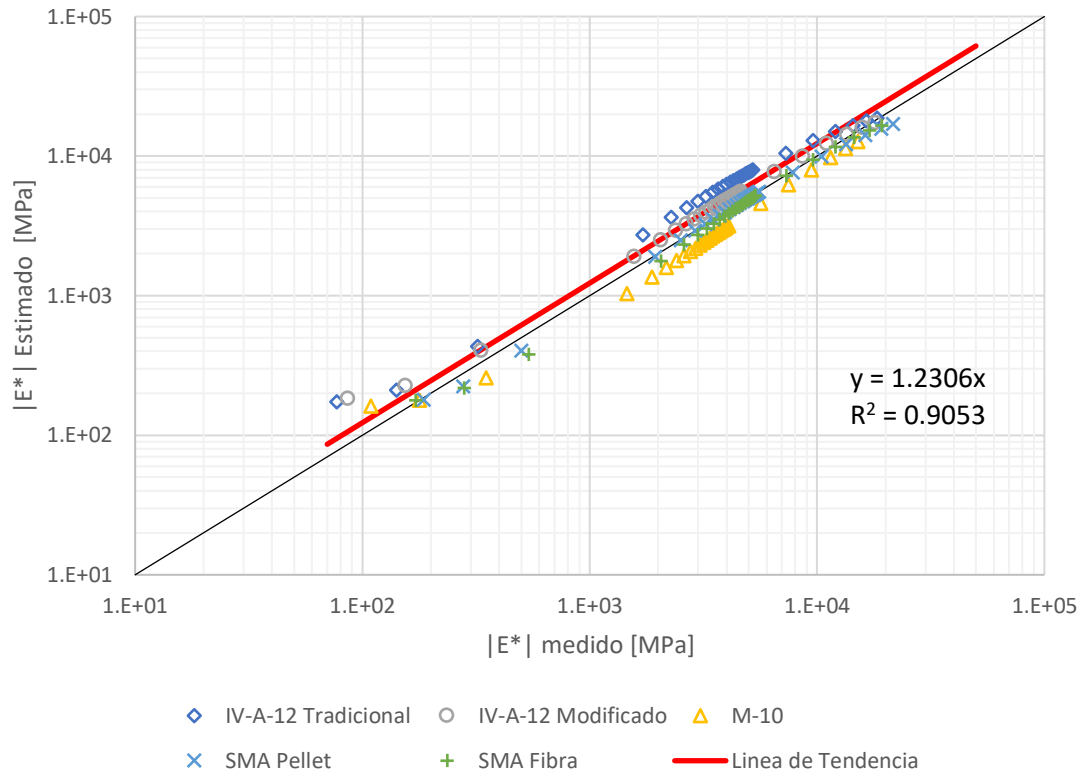


Gráfico 22 Modelo de Hirsch corregido, ligante original

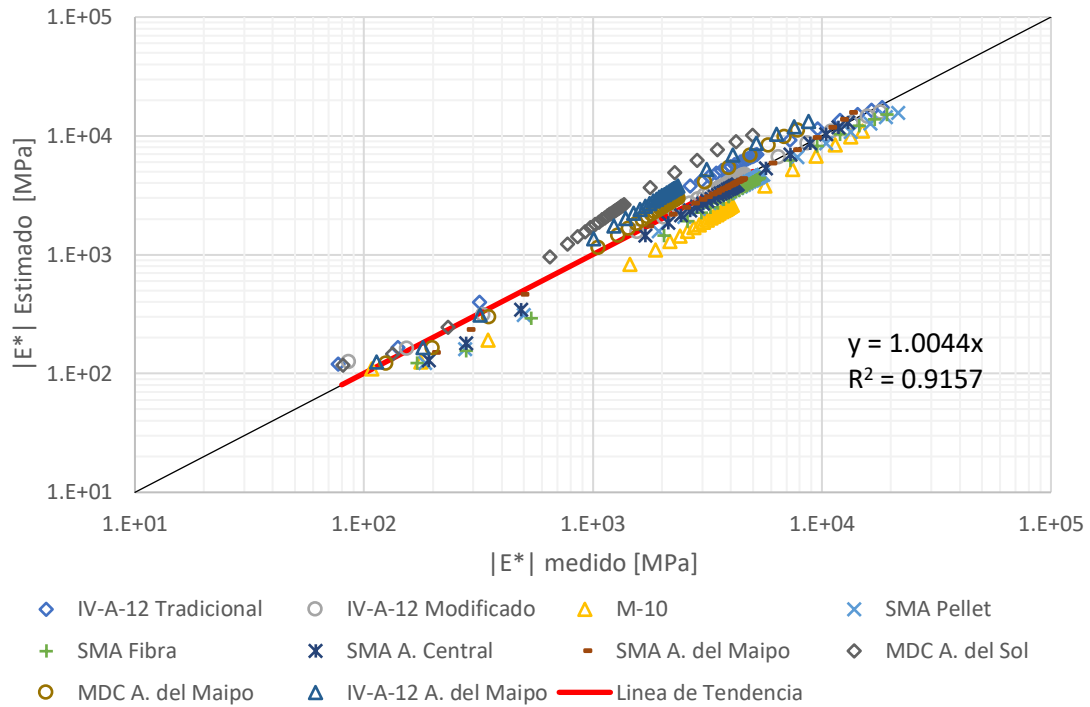


Gráfico 23 Modelo de Hirsch Corregido, ligante envejecido HPDR

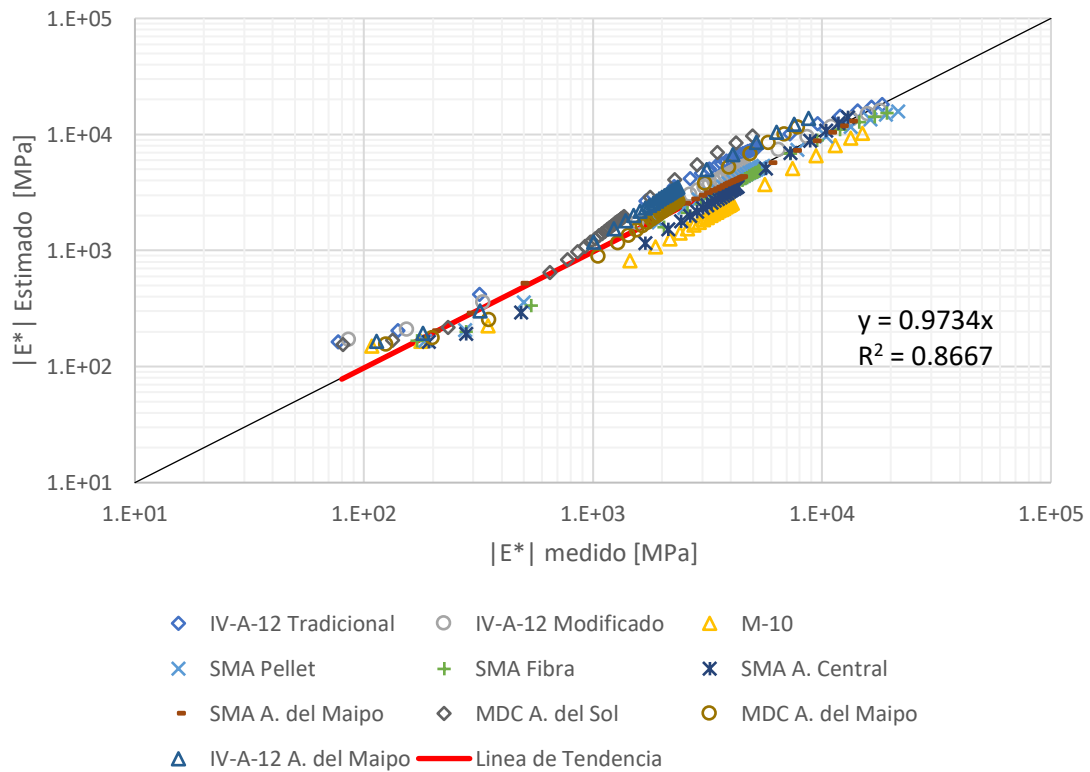


Gráfico 24 Modelo de Hirsch Corregido, ligante envejecido PAV

Se aprecia en los tres gráficos que en todos los casos, el modelo de Hirsch calibrado predice con excelente exactitud y precisión los valores del módulo dinámico en todos los estados del ligante. Se mantiene la tendencia de que el estado original del ligante es el que mejor predice los resultados medidos, sin embargo, el ligante envejecido con PAV toma un segundo lugar a diferencia del modelo sin calibrar en que el modelo PAV presentaba malos resultados. El modelo con el ligante envejecido en HPDR también mejora significativamente.

A partir de estos resultados se calibra la ecuación para poder predecir el módulo dinámico a través de las mediciones del módulo de corte dinámico en cualquier estado del ligante arrojando buenos resultados.

En las tres gráficas se aprecia también la tendencia para frecuencias bajas la curva no aproxima bien el resultado, generando el mayor error en el tramo de frecuencias menores a 0.001Hz. Esto se podría calibrar de forma independiente separando la ecuación en tramos, sin embargo, los resultados obtenidos sin este procedimiento son buenos y mejorarlos no aporta más información nueva.

5.6 VALIDACIÓN DE CALIBRACIÓN POR MEDIO DE JACK – KNIFE

En esta sección se utiliza el método Jack-knife para estimar el intercepto, pendiente y el valor del coeficiente de correlación para el modelo de vida a fatiga con las calibraciones locales dispuestas en la Ecuación 39 y la Ecuación 47.

Para realizar la validación de Jack-knife se eliminó el grupo de datos correspondiente a los resultados de una mezcla asfáltica a la vez.

5.6.1 Modelo de Hirsch con ligante en estado original, calibrado.

$$|E^*| = P_c \left[4200000 \left(1 - \frac{VMA}{100} \right) + 3|G^*|_{binder} \left(\frac{VFA \cdot VMA}{10000} \right) \right] \\ + (1 - P_c) \left[\frac{1 - \frac{VMA}{100}}{4200000} + \frac{VMA}{VFA \cdot 3|G^*|_{binder}} \right]^{-1} \\ P_c = \frac{\left(4.924 + \frac{VFA \cdot 3|G^*|_{binder}}{VMA} \right)^{0.569}}{580.468 + \left(\frac{VFA \cdot 3|G^*|_{binder}}{VMA} \right)^{0.569}}$$

Los resultados de esta calibración se predicen para 5 mezclas asfálticas (como se comenta en capítulos anteriores), por lo que se utilizan 5 grupos de datos para realizar el método Jack Knife. Se presentan a continuación las tablas asociadas a los resultados utilizados para la validación Jack-knife, los estimadores de regresión para el grupo completo de datos y el obtenido al utilizar los N-1 grupos de datos (5) para cada análisis.

Tabla 67 Calibración local para Módulo Dinámico (Hirsch con ligante en estado Original)

| Estimadores Calibración Local | | | |
|-------------------------------|---------------------|----------------------|-----------------|
| Pendiente (a-n) | Intercepto (b-n) | Coef. Corr. (r-n) | Fisher (Z-n) |
| 0.958 | 0.171 | 0.975 | 2.191 |

Tabla 68 Estimadores Parciales Método Jack-knife para Módulo Dinámico (Hirsch con ligante en estado Original)

| N° análisis | Estimadores Parciales | | | |
|--------------------|------------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------|
| n | Pendiente (a-n) | Intercepto (b-n) | Coef. Corr. (r-n) | Fisher (Zt) |
| 1 | 0.967 | 0.099 | 0.986 | 2.473 |
| 2 | 0.975 | 0.095 | 0.973 | 2.146 |
| 3 | 0.949 | 0.232 | 0.981 | 2.319 |
| 4 | 0.951 | 0.204 | 0.971 | 2.117 |
| 5 | 0.947 | 0.222 | 0.972 | 2.136 |
| Promedio | 0.958 | 0.170 | 0.977 | 2.221 |
| Desv. Esta. | 0.012 | 0.068 | 0.006 | 0.155 |

Tabla 69 Pseudo Valores Método Jack-knife para Módulo Dinámico (Hirsch con ligante en estado Original)

| N° análisis | Pseudo Valores | | |
|--------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------|
| n | Pendiente (a*-n) | Intercepto (b*-n) | Fisher (Z*t) |
| 1 | 0.919 | 0.458 | 1.065 |
| 2 | 0.889 | 0.475 | 2.375 |
| 3 | 0.992 | -0.074 | 1.682 |
| 4 | 0.985 | 0.038 | 2.491 |
| 5 | 1.001 | -0.032 | 2.413 |
| Promedio | 0.957 | 0.173 | 2.005 |
| Desv. Esta. | 0.050 | 0.271 | 0.618 |

A partir del resultado obtenido en los pseudo valores se obtiene un coeficiente de correlación Z transformado (Z^*t) igual a 2.005, cuya transformada inversa de Fisher nos entrega el coeficiente de correlación no sesgado que corresponde 0.964. A partir de este valor se obtiene el estimador del sesgo según Jack-knife.

$$B_{jack}(R) = R_t - R^* = 0.975 - 0.964 = 0.011$$

El sesgo es positivo y nos muestra que el coeficiente de correlación de la calibración local sobre-estima la magnitud en análisis. Estadísticamente la diferencia es prácticamente cero por lo que la validación del modelo se acepta con una diferencia porcentual entre el coeficiente de correlación sesgado y el de la calibración local de 1.12%.

5.6.2 Modelo de Hirsch con ligante envejecido con HPDR, calibrado.

$$|E^*| = P_c \left[4200000 \left(1 - \frac{VMA}{100} \right) + 3|G^*|_{binder} \left(\frac{VFA \cdot VMA}{10000} \right) \right]$$

$$+ (1 - P_c) \left[\frac{1 - \frac{VMA}{100}}{4200000} + \frac{VMA}{VFA \cdot 3|G^*|_{binder}} \right]^{-1}$$

$$P_c = \frac{\left(36.194 + \frac{VFA \cdot 3|G^*|_{binder}}{VMA} \right)^{0.669}}{2125.408 + \left(\frac{VFA \cdot 3|G^*|_{binder}}{VMA} \right)^{0.669}}$$

Los resultados de esta calibración se predicen para 10 mezclas asfálticas (como se comenta en capítulos anteriores), por lo que se utilizan 10 grupos de datos para realizar el método Jack Knife. Se presentan a continuación las tablas asociadas a los resultados utilizados para la validación Jack-knife, los estimadores de regresión para el grupo completo de datos y el obtenido al utilizar los N-1 grupos de datos (10) para cada análisis.

Tabla 70 Calibración local para Módulo Dinámico (Hirsch con ligante envejecido HPDR)

| Estimadores Calibración Local | | | |
|-------------------------------|---------------------|----------------------|-----------------|
| Pendiente (a-n) | Intercepto (b-n) | Coef. Corr. (r-n) | Fisher (Z-n) |
| 0.968 | 0.127 | 0.958 | 1.916 |

Tabla 71 Estimadores Parciales Método Jack-knife para Módulo Dinámico (Hirsch con ligante envejecido HPDR)

| N° análisis | Estimadores Parciales | | | |
|--------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|----------------|
| n | Pendiente (a-n) | Intercepto (b-n) | Coef. Corr. (r-n) | Fisher (Zt) |
| 1 | 0.963 | 0.134 | 0.955 | 1.880 |
| 2 | 0.970 | 0.121 | 0.953 | 1.861 |
| 3 | 0.970 | 0.144 | 0.965 | 2.010 |
| 4 | 0.969 | 0.136 | 0.956 | 1.901 |
| 5 | 0.968 | 0.142 | 0.958 | 1.916 |
| 6 | 0.960 | 0.163 | 0.956 | 1.892 |
| 7 | 0.961 | 0.155 | 0.954 | 1.877 |
| 8 | 1.002 | -0.016 | 0.969 | 2.073 |
| 9 | 0.961 | 0.144 | 0.956 | 1.892 |
| 10 | 0.968 | 0.110 | 0.961 | 1.956 |
| Promedio | 0.968 | 0.135 | 0.957 | 1.911 |
| Desv. Esta. | 0.003 | 0.009 | 0.005 | 0.058 |

Tabla 72 Pseudo Valores Método Jack-knife para Módulo Dinámico (Hirsch con ligante envejecido HPDR)

| N° análisis | Pseudo Valores | | |
|--------------------|---------------------|----------------------|-----------------|
| n | Pendiente (a*-n) | Intercepto (b*-n) | Fisher (Z*t) |
| 1 | 1.016 | 0.068 | 2.240 |
| 2 | 0.950 | 0.181 | 2.418 |
| 3 | 0.953 | -0.026 | 1.072 |
| 4 | 0.960 | 0.051 | 2.053 |
| 5 | 0.971 | -0.005 | 1.923 |
| 6 | 1.043 | -0.198 | 2.140 |
| 7 | 1.035 | -0.125 | 2.267 |
| 8 | 0.661 | 1.415 | 0.511 |
| 9 | 1.030 | -0.027 | 2.134 |
| 10 | 0.966 | 0.281 | 1.564 |
| Promedio | 0.970 | 0.054 | 1.941 |
| Desv. Esta. | 0.027 | 0.081 | 0.521 |

A partir del resultado obtenido en los pseudo valores se obtiene un coeficiente de correlación Z transformado (Z^*) igual a 1.941, cuya transformada inversa de Fisher nos entrega el coeficiente de correlación no sesgado que corresponde 0.959. A partir de este valor se obtiene el estimador del sesgo según Jack-knife.

$$B_{jack}(R) = R_t - R^* = 0.958 - 0.959 = -0.001$$

El sesgo es positivo y nos muestra que el coeficiente de correlación de la calibración local sub-estima la magnitud en análisis. Estadísticamente la diferencia es prácticamente cero por lo que la validación del modelo se acepta con una diferencia porcentual entre el coeficiente de correlación sesgado y el de la calibración local de 0.2%.

5.6.3 Modelo de Hirsch con ligante envejecido con PAV, calibrado.

$$|E^*| = P_c \left[4200000 \left(1 - \frac{VMA}{100} \right) + 3|G^*|_{binder} \left(\frac{VFA \cdot VMA}{10000} \right) \right] \\ + (1 - P_c) \left[\frac{1 - \frac{VMA}{100}}{4200000} + \frac{VMA}{VFA \cdot 3|G^*|_{binder}} \right]^{-1} \\ P_c = \frac{\left(328.214 + \frac{VFA \cdot 3|G^*|_{binder}}{VMA} \right)^{0.874}}{24652.566 + \left(\frac{VFA \cdot 3|G^*|_{binder}}{VMA} \right)^{0.874}}$$

Los resultados de esta calibración se predicen para 10 mezclas asfálticas (como se comenta en capítulos anteriores), por lo que se utilizan 10 grupos de datos para realizar el método Jack Knife. Se presentan a continuación las tablas asociadas a los resultados utilizados para la validación Jack-knife, los estimadores de regresión para el grupo completo de datos y el obtenido al utilizar los N-1 grupos de datos (10) para cada análisis.

Tabla 73 Calibración local para Módulo Dinámico (Hirsch con ligante envejecido PAV)

| Estimadores Calibración Local | | | |
|-------------------------------|---------------------|----------------------|-----------------|
| Pendiente (a-n) | Intercepto (b-n) | Coef. Corr. (r-n) | Fisher (Z-n) |
| 0.962 | 0.146 | 0.966 | 2.029 |

Tabla 74 Estimadores Parciales Método Jack-knife para Módulo Dinámico (Hirsch con ligante envejecido PAV)

| N° análisis | Estimadores Parciales | | | |
|--------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|----------------|
| n | Pendiente (a-n) | Intercepto (b-n) | Coef. Corr. (r-n) | Fisher (Zt) |
| 1 | 0.958 | 0.145 | 0.968 | 2.054 |
| 2 | 0.967 | 0.126 | 0.963 | 1.986 |
| 3 | 0.971 | 0.137 | 0.975 | 2.184 |
| 4 | 0.962 | 0.153 | 0.963 | 1.988 |
| 5 | 0.962 | 0.156 | 0.964 | 2.003 |
| 6 | 0.955 | 0.181 | 0.967 | 2.040 |
| 7 | 0.962 | 0.150 | 0.963 | 1.991 |
| 8 | 0.977 | 0.082 | 0.968 | 2.054 |
| 9 | 0.952 | 0.179 | 0.964 | 2.002 |
| 10 | 0.963 | 0.129 | 0.968 | 2.063 |
| Promedio | 0.964 | 0.143 | 0.967 | 2.038 |
| Desv. Esta. | 0.005 | 0.012 | 0.005 | 0.084 |

Tabla 75 Pseudo Valores Método Jack-knife para Módulo Dinámico (Hirsch con ligante envejecido PAV)

| N° análisis | Pseudo Valores | | |
|--------------------|---------------------|----------------------|-----------------|
| | Pendiente (a*-n) | Intercepto (b*-n) | Fisher (Z*t) |
| 1 | 1.003 | 0.155 | 1.802 |
| 2 | 0.924 | 0.320 | 2.416 |
| 3 | 0.880 | 0.225 | 0.632 |
| 4 | 0.967 | 0.079 | 2.394 |
| 5 | 0.968 | 0.055 | 2.266 |
| 6 | 1.024 | -0.169 | 1.931 |
| 7 | 0.968 | 0.108 | 2.373 |
| 8 | 0.831 | 0.715 | 1.800 |
| 9 | 1.052 | -0.153 | 2.272 |
| 10 | 0.956 | 0.296 | 1.720 |
| Promedio | 0.949 | 0.167 | 1.902 |
| Desv. Esta. | 0.047 | 0.109 | 0.752 |

A partir del resultado obtenido en los pseudo valores se obtiene un coeficiente de correlación Z transformado (Z*t) igual a 1.902, cuya transformada inversa de Fisher nos entrega el coeficiente de correlación no sesgado que corresponde 0.956. A partir de este valor se obtiene el estimador del sesgo según Jack-knife.

$$B_{jack}(R) = R_t - R^* = 0.966 - 0.956 = 0.010$$

El sesgo es positivo y nos muestra que el coeficiente de correlación de la calibración local sobre-estima la magnitud en análisis. Estadísticamente la diferencia es prácticamente cero por lo que la validación del modelo se acepta con una diferencia porcentual entre el coeficiente de correlación sesgado y el de la calibración local de 0.99%.

6 APLICACIÓN DE LA CALIBRACIÓN EN LA GUÍA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS EMPÍRICO MECANICISTA

La guía de diseño de pavimentos predice el daño de pavimentos rígidos y flexibles mediante datos de entrada ingresados por el usuario y ecuaciones predictivas incorporadas en el software.

La aplicación de los resultados obtenidos en esta memoria se basa en incorporar los factores de calibración local para el daño por fatiga en el software, con el fin de predecir el deterioro de una forma más real según lo medido con las mezclas en análisis.

Para caracterizar la mezcla asfáltica, el programa posee tres niveles de información diferenciados según la información que se posee del módulo dinámico y el módulo de corte dinámico según se especifica en la Tabla 76.

Tabla 76 Nivel de Información para MEPDG

| | Módulo Dinámico (E*) | Módulo de corte dinámico (G*) |
|---------|---------------------------------|--|
| Nivel 1 | Ensayo en laboratorio | Ensayo en laboratorio |
| Nivel 2 | Granulometría | Ensayo en laboratorio |
| Nivel 3 | Granulometría | Viscosidad según PG |

El nivel de información de las mezclas, según grupo de ensayos, para ingresar a la guía se presenta en el siguiente cuadro descriptivo

Tabla 77 Nivel de información asociado a mezclas en análisis

| | Módulo Dinámico (E*) | Módulo de corte dinámico (G*) | Nivel de información |
|---|-----------------------------|--|-----------------------------|
| Mezclas fabricadas en laboratorio FONDEF D09I1174 | Ensayo en laboratorio | Ensayo en laboratorio | Nivel 1 |
| Mezclas en pistas de prueba FONDEF D09I1174 | Ensayo en laboratorio | Ensayo en laboratorio (solo para ligante envejecido) | Nivel 1 / Nivel 3 |
| Mezclas con RAP | Ensayo en laboratorio | Viscosidad según PG | Nivel 3 |
| Aeropuerto | Ensayo en laboratorio | Viscosidad según PG | Nivel 3 |

Al no tener información medida del módulo de corte dinámico, inmediatamente una gran parte de los datos ingresan al nivel 3 de información para caracterizar la mezcla. Esto produce que los resultados del análisis sean más imprecisos al no disponer de información real disponible.

Luego de ingresar la información del ligante, se caracterizan las capas granulares y la subrasante, se ingresan los datos climáticos y espectros de carga a utilizar.

Cuando el diseño se encuentra listo, se ingresan los parámetros de calibración local para el deterioro de fatiga y se ejecuta el programa para obtener los resultados.

Al ejecutar el programa los resultados entregados no son coherentes con lo esperado, esto se debe a que los parámetros de calibración local solo calibran la ecuación que predice el número de ciclos a la falla y no así el deterioro mismo. Para solucionar esto se propone en un futuro calibrar la función de transferencia con datos medidos en terreno, de este modo se puede obtener el deterioro calibrado y predecir el daño por fatiga en pavimentos.

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La primera etapa de esta memoria consistió en realizar una revisión bibliográfica al material disponible de los ensayos realizados en laboratorio LEMCO. Para ello se generó una matriz donde se identifica la información disponible para cada mezcla. De esta forma se entrega un control ordenado de información para que en un posterior análisis se pueda utilizar como base de datos e ir complementando con nuevas mezclas y proyectos.

Luego de la revisión de datos, se seleccionó los resultados de ensayos de módulo dinámico y fatiga para realizar la calibración de los modelos predictivos. Predecir el módulo dinámico de una mezcla responde a la necesidad de estimar este valor de forma rápida y confiable sin la necesidad de realizar ensayos. La predicción de fatiga se realizó con el fin de obtener las constantes de calibración del número de ciclos a la falla para incorporarlas en el software la guía de diseño empírico mecanicista con el horizonte de en un futuro realizar la calibración del daño por fatiga mediante la ecuación de transferencia para complementar estos resultados.

La predicción del número de ciclos a la falla de fatiga se realizó utilizando como base la ecuación dispuesta por la guía empírico mecanicista. Con los resultados de este primer acercamiento se calibraron las constantes locales de forma independiente para cada una de las mezclas en análisis obteniendo una predicción casi exacta. Sin embargo, esta forma de predecir los resultados no es útil al momento de querer utilizarla de forma genérica, pues sirve solo para mezclas con el mismo ligante y granulometría que la utilizada para calibrar.

Luego de la primera aproximación se procede a calibrar fatiga utilizando un solo set de constantes para todas las mezclas, obteniendo un coeficiente de correlación igual a 0.5884. Si bien este resultado, para el tipo de análisis que se está realizando no es malo se busca mejorar incorporando un nuevo factor a la ecuación, la amplitud térmica. La amplitud térmica se incorpora como una nueva variable en la ecuación mejorando el coeficiente de correlación igual a 0.7762.

Para comprobar que incorporar una nueva variable sea estadísticamente correcto y no se esté forzando la ecuación a predecir mejores resultados sin ser necesario se realiza un

análisis de suma de cuadrados extra, donde se comprueba que incorporar la amplitud térmica está debidamente justificado.

La predicción de fatiga entrega resultados muy cercanos al valor obtenido en el ensayo, por lo que las constantes de calibración se consideran apropiadas para definir las como constantes de calibración local para predecir el número de ciclo de falla a fatiga en mezclas chilenas.

Como recomendación, se busca seguir con la investigación de fatiga y complementar la calibración realizada con una calibración del daño producido por el deterioro medido en terreno. De este modo, se incorporan las nuevas constantes asociadas a la función de transferencia en el software de la guía de diseño de pavimentos empírico mecanicista y se puede obtener una predicción real del daño esperado por fatiga para mezclas Chilenas.

En cuanto al módulo dinámico, se comparan tres modelos predictivos utilizados comúnmente en la literatura. De ellos, dos incorporan el módulo de corte dinámico del ligante dentro de la ecuación y uno utiliza la viscosidad. Idealmente, se busca conocer el módulo de corte dinámico del ligante con el fin de que las predicciones realizadas sean más reales, sin embargo, para efectos de análisis se compararan los tres modelos.

De los modelos analizados, es el modelo de Hirsch el que predice mejor los resultados en cualquier estado del ligante, ya sea original o envejecido. En consecuencia, se realiza una calibración a las constantes de la ecuación de Hirsch para que prediga de forma más exacta los resultados en mezclas chilenas.

La calibración entrega como coeficiente de correlación 0.9053, 0.9157 y 0.8667 para la ecuación utilizando el ligante en estado original, envejecido con PAV y con HPDR, respectivamente.

Como recomendación final, es importante destacar que esta memoria puede continuarse, incorporando nuevos resultados de mediciones de fatiga y módulo dinámico, con el fin de obtener un mayor número de datos para calibrar las ecuaciones con mayor exactitud.

Finalmente, los resultados obtenidos satisfacen los objetivos planteados inicialmente, encontrando las calibraciones apropiadas y proponiendo la aplicación de estos resultados a la guía de diseño de pavimentos empírico mecanicista. A partir de esto sería posible actualizar el diseño de pavimentos que se realiza en la actualidad obteniendo resultados más precisos.

REFERENCIAS

American Association of State Highway and Transportation Officials. “Standard Practice for Preparing Hot Mix Asphalt (HMA) specimens by Means of the Rolling Wheel Compactor”, PP3. 1996.

American Association of State Highway and Transportation Officials. “Standard Method of Test for Determining the fatigue life of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending”, T 321-07. 2007.

American Association of State Highway and Transportation Officials. “Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt (HMA)”, R30-02. 2015.

American Association of State Highway and Transportation Officials. “Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)”, AASHTO T342, EE.UU. 2011.

American Association of State Highway and Transportation Officials. “Mechanistic – Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice” Interim edition. 2008.

ABDI Hérve, WILLIAMS Lynne. “Jackknife”, Encyclopedia of Research Design pp655-660. 2010.

ÁVILA Carrillo, Marcelo. “Estimación de la resistencia a la fatiga de mezcla asfáltica en caliente con 8% de RAP mediante ensayo de flexión en cuatro puntos”. Memoria para optar al título de Constructor Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, 2017.

BONAQUIST, R., and CHRISTENSEN, D.W. “A Practical Procedure for Developing Dynamic Modulus Master Curves for Pavement Structural Design.” 84th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Paper No. 05-0389, Washington D.C. 2005.

BARI, Javed. “Development of a New Revised Version of the Witczak E* Predictive Models for Hot Mix Asphalt Mixtures”. Ph.D. Dissertation, Arizona State University, Phoenix, AZ. 2005.

CHRISTENSEN, D.W., PELLINEN, T.K., and BONAQUIST, R.F. "Hirsch Model for Estimating the Modulus of Asphalt Concrete." Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 72, Lexington, KY. 2003.

CORONA Rojas, Camila. "Determinación de módulo de rigidez y caracterización de módulo dinámico de mezcla Superpave". Memoria para optar al título de Constructor Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, 2017.

Dirección de Aeropuertos, Ministerio de Obras Públicas. "Especificaciones Técnicas Especiales para pavimentos bituminosos tipo mezcla en planta diseñado por Superpave" Santiago. 2015.

ELIZONDO Fabián, JIMÉNEZ Mónica. "Calibración de un modelo para valorar la susceptibilidad al agrietamiento por fatiga de mezclas asfálticas en Costa Rica". 2013.

ESCOBAR Ramos, Nicolás. "Resistencia a fatiga de mezcla Superpave envejecida a largo plazo". Memoria para optar al título de Constructor Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, 2017.

FREDES Estay, Hector. "Estimación de la resistencia a la fatiga de mezcla asfáltica en caliente con granulometría micro - aglomerado discontinuo en caliente (MDC) mediante ensayo de flexión en cuatro puntos". Memoria para optar al título de Constructor Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, 2015.

GARCIA, Gabriel; THOMPSON, Marshall. "HMA dynamic modulus predictive models (a review)", Research Report FHWA-ICT-07-005, Illinois Center for Transportation, EE.UU. 2007.

GARCÍA, Gabriel, MARÍN Esteban, DELGADILLO Rodrigo y WAHR Carlos. Caracterización del desempeño a fatiga de mezclas asfálticas mediante los enfoques fenomenológico y de disipación de energía. Carreteras, 4(198), pp. 5-14. 2014.

LEIVA Torres, Jesus. "Estimación de la resistencia a la fatiga de mezcla asfáltica en caliente con granulometría micro-aglomerado discontinuo en caliente (MDC) mediante

ensayo de flexión en cuatro puntos”. Memoria para optar al título de Constructor Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, 2015.

LOBOS Cuevas, Sonia. “Estudio de comportamiento a fatiga de mezclas SMA de Autopista Central y Autopista de Maipo”. Memoria para optar al título de Constructor Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, 2016.

MARÍN Gaete, Esteban. “Caracterización del desempeño a fatiga mediante el enfoque fenomenológico y de disipación de energía de mezclas asfálticas chilenas”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil y Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, 2013.

MONTALVA Gorodezky, Nicolás. “Estimación de la resistencia a la fatiga de mezcla asfáltica en caliente con 18 % de RAP mediante ensayo de flexión en cuatro puntos”. Memoria para optar al título de Constructor Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, 2016.

PACHECO Sepulveda, Giselle. “Estudio de comportamiento a fatiga de mezcla asfáltica IV-A-12 con asfalto modificado con SBS, utilizada en pista de prueba”. Memoria para optar al título de Constructor Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, 2016.

PELL, P. S. "Fatigue of Asphalt Pavement Mixes." Proceedings of the Second International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, pp. 577-594. 1967.

PELLINEN, T.K., and WITCZAK, M.W. “Stress Dependent Master Curve Construction for Dynamic (Complex) Modulus.” Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 71. Colorado Spring, CO. 2002.

VASQUEZ Zamora, Andrés. “Resistencia a fatiga de mezcla Superpave envejecida a corto plazo”. Memoria para optar al título de Constructor Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, 2017.

TORO Estay, Mauricio “Caracterización del Módulo Dinámico de mezclas asfálticas chilenas y caracterización de la Rigidez a bajas temperaturas de betunes con BBR”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, 2013.

VALENZUELA Henriquez, Carla. “Estudio del comportamiento de mezclas asfálticas con RAP”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, 2017.

2002 Design Guide for New & Rehabilitated Pavements (Final Report). “Part 2- Design Inputs, Chapter 2 Material Characterization, 2.2.2 Input Characterization for the Asphalt Material Group”, NCHRP Project 1-37A. 2004a.

2002 Design Guide for New & Rehabilitated Pavements (Final Report). “Appendix II-1: Calibration of fatigue cracking models for flexible pavements”, NCHRP Project 1-37A. 2004b.

2002 Design Guide for New & Rehabilitated Pavements (Final Report) (2004). “Part 3- Design Analysis, Chapter 3 Design of new and reconstructed flexible pavements”, NCHRP Project 1-37A. 2004c.

ANEXOS

ANEXO 1

RESULTADOS ENSAYO A FATIGA

MEZCLAS FABRICADAS EN LABORATORIO FONDEF D09I1174

IV-A-12 Tradicional

| Geometría y propiedades volumétricas | | | | | Resultados ensayo fatiga | | |
|--------------------------------------|-----------|------------|------------|-------------|--|---------|----------|
| N° Probeta | Alto (mm) | Ancho (mm) | Largo (mm) | % De Vacíos | Nivel de Deformación μ strain (mm/mm x 10-6) | Nf50 | Si [Mpa] |
| 1 | 50 | 62 | 381 | 4 | 500 | 2400 | 3911 |
| 2 | 47.2 | 63.2 | 380.5 | 4.61 | 500 | 3200 | 3984 |
| 3 | 50.5 | 62.8 | 378.5 | 4.45 | 500 | 2382 | 4782 |
| 4 | 53.2 | 61.5 | 380 | 5 | 400 | 3699 | 4438 |
| 5 | 48 | 62.8 | 377.5 | 5.03 | 400 | 4178 | 5148 |
| 6 | 50 | 63 | 378.5 | 4.45 | 400 | 4800 | 5736 |
| 7 | 50.2 | 62.5 | 378.8 | 4.2 | 350 | 13280 | 4408 |
| 8 | 49.8 | 62.5 | 378.8 | 5.03 | 350 | 11272 | 5493 |
| 9 | 51 | 64.2 | 374.5 | 4.73 | 350 | 12045 | 5028 |
| 10 | 51.7 | 62.3 | 380 | 4.1 | 300 | 23675 | 4444 |
| 11 | 46.8 | 62.7 | 380 | 4.61 | 300 | 15664 | 5110 |
| 12 | 51 | 64 | 374.6 | 4.73 | 300 | 18537 | 3307 |
| 13 | 49.6 | 62 | 376 | 5.09 | 100 | 1333500 | 8863 |
| 14 | 49.3 | 62 | 375.5 | 5.09 | 100 | 948500 | 8064 |

IV-A-12 Modificado

| Geometría y propiedades volumétricas | | | | | Resultados ensayo fatiga | | |
|--------------------------------------|-----------|------------|------------|-------------|--|---------|----------|
| N° Probeta | Alto (mm) | Ancho (mm) | Largo (mm) | % De Vacíos | Nivel de Deformación μ strain (mm/mm x 10-6) | Nf50 | Si [Mpa] |
| 1 | 49.7 | 62 | 379 | 4.44 | 750 | 9037 | 2541 |
| 2 | 50.2 | 62.4 | 379.5 | 4.52 | 750 | 9298 | 2705 |
| 3 | 49.7 | 61.5 | 379.5 | 4.44 | 500 | 65069 | 3053 |
| 4 | 50.3 | 61.9 | 379.6 | 4.52 | 500 | 42670 | 2899 |
| 5 | 50 | 63 | 379.8 | 4.63 | 500 | 43500 | 2828 |
| 6 | 50.7 | 61.2 | 379 | 4.68 | 400 | 187691 | 3355 |
| 7 | 50 | 62 | 379.1 | 4.9 | 400 | 497000 | 3660 |
| 8 | 50 | 63 | 379.8 | 4.24 | 400 | 318179 | 3327 |
| 9 | 50.2 | 61.5 | 379 | 4.68 | 300 | 1351552 | 4081 |
| 10 | 50 | 63 | 380 | 4.24 | 300 | 1120814 | 3807 |

M10

| Geometría y propiedades volumétricas | | | | | Resultados ensayo fatiga | | |
|--------------------------------------|-----------|------------|------------|-------------|--|---------|----------|
| N° Probeta | Alto (mm) | Ancho (mm) | Largo (mm) | % De Vacíos | Nivel de Deformación $\mu\text{strain (mm/mm x } 10^{-6})$ | Nf50 | Si [Mpa] |
| 1 | 51.8 | 65.2 | 374 | 9.22 | 750 | 7038 | 1843 |
| 2 | 51.1 | 65 | 379.8 | 9.01 | 750 | 4771 | 1827 |
| 3 | 50 | 64.2 | 374 | 9.46 | 750 | 6449 | 1855 |
| 4 | 51.7 | 64 | 376 | 9.15 | 500 | 10952 | 2398 |
| 5 | 51 | 64.8 | 379.8 | 10.62 | 500 | 11380 | 2353 |
| 6 | 51.2 | 64 | 374 | 9.22 | 500 | 20879 | 2378 |
| 7 | 51.3 | 64 | 378 | 9.07 | 300 | 141500 | 3683 |
| 8 | 52.4 | 64.8 | 376 | 9.15 | 300 | 157555 | 2826 |
| 9 | 51.3 | 64.7 | 377 | 9.06 | 300 | 253991 | 3619 |
| 10 | 50.5 | 64.3 | 378.4 | 10.06 | 300 | 111638 | 2583 |
| 11 | 50.7 | 65 | 379.6 | 9.03 | 170 | 1123149 | 3530 |
| 12 | 51.7 | 64.2 | 379.1 | 11.17 | 170 | 1947714 | 3327 |
| 13 | 50.2 | 64.7 | 374 | 10.45 | 170 | 765000 | 3033 |

SMA Pellet

| Geometría y propiedades volumétricas | | | | | Resultados ensayo fatiga | | |
|--------------------------------------|-----------|------------|------------|-------------|--|---------|----------|
| N° Probeta | Alto (mm) | Ancho (mm) | Largo (mm) | % De Vacíos | Nivel de Deformación $\mu\text{strain (mm/mm x } 10^{-6})$ | Nf50 | Si [Mpa] |
| 1 | 49.5 | 63.5 | 381 | 2.62 | 750 | 8864 | 1995 |
| 2 | 48.3 | 63 | 379 | 2.61 | 750 | 10626 | 2342 |
| 3 | 49.8 | 61.5 | 378.3 | 3.04 | 750 | 12854 | 2099 |
| 4 | 49.7 | 63.6 | 380.8 | 2.62 | 500 | 57579 | 2422 |
| 5 | 48 | 60.3 | 377.9 | 2.98 | 500 | 70212 | 2855 |
| 6 | 49.5 | 63.3 | 378.3 | 2.61 | 400 | 107000 | 2967 |
| 7 | 50 | 62.7 | 384.3 | 2.45 | 400 | 101029 | 2972 |
| 8 | 50 | 63.2 | 384 | 2.45 | 300 | 683788 | 3223 |
| 9 | 48.3 | 61.5 | 378 | 2.98 | 300 | 642475 | 3114 |
| 10 | 48.3 | 60.3 | 379.3 | 3.04 | 300 | 688000 | 3316 |
| 11 | 48.3 | 62.8 | 378 | 3.01 | 250 | 2894033 | 3103 |
| 12 | 49.3 | 62.2 | 378.5 | 3.01 | 250 | 1010248 | 3238 |
| 13 | 48.4 | 63 | 379 | 2.8 | 250 | 1338000 | 3463 |

SMA Fibra

| Geometría y propiedades volumétricas | | | | | Resultados ensayo fatiga | | |
|--------------------------------------|-----------|------------|------------|-------------|--|---------|----------|
| N° Probeta | Alto (mm) | Ancho (mm) | Largo (mm) | % De Vacíos | Nivel de Deformación μ strain (mm/mm x 10-6) | Nf50 | Si [Mpa] |
| 1 | 49.5 | 62.8 | 380.0 | 5.55 | 750 | 5324 | 1879 |
| 2 | 50.0 | 62.7 | 380.3 | 5.38 | 750 | 7259 | 1766 |
| 3 | 49.7 | 63.0 | 375.5 | 5.60 | 750 | 7734 | 1809 |
| 4 | 49.5 | 63.0 | 378.6 | 5.68 | 500 | 24098 | 2216 |
| 5 | 49.8 | 63.0 | 380.0 | 5.55 | 500 | 20883 | 2503 |
| 6 | 49.8 | 63.2 | 381.0 | 5.38 | 500 | 18198 | 2244 |
| 7 | 50.3 | 63.3 | 378.5 | 5.68 | 300 | 219404 | 2904 |
| 8 | 49.8 | 64.2 | 378.0 | 6.00 | 300 | 208091 | 3002 |
| 9 | 50.3 | 64.0 | 378.0 | 5.64 | 200 | 1214423 | 3192 |
| 10 | 50.0 | 64.3 | 378.0 | 5.64 | 200 | 683434 | 3397 |
| 11 | 49.8 | 63.2 | 375.5 | 5.60 | 200 | 1162026 | 3106 |

MEZCLAS EN PISTAS DE PRUEBA FONDEF D09I1174

IV-A-12 Autopista del Maipo

| Geometría y propiedades volumétricas | | | | | Resultados ensayo de fatiga | | |
|--------------------------------------|-----------|------------|------------|-------------|--|---------|----------|
| Probeta | Alto (mm) | Ancho (mm) | Largo (mm) | % de Vacíos | Nivel de Deformación μ strain (mm/mm x 10-6) | Nf50 | Si [MPa] |
| M1 | 51.31 | 63.04 | 381.3 | 4.11 | 350 | 1048908 | 2423 |
| M2 | 49.66 | 63.66 | 379.8 | 4.82 | 350 | 547665 | 2673 |
| M3 | 50.13 | 62.3 | 379.2 | 4.79 | 350 | 467114 | 2774 |
| M3 | 50.48 | 60.77 | 379.2 | 4.79 | 300 | 2238075 | 2650 |
| M4 | 50.65 | 65.59 | 381.7 | 4.55 | 300 | 2084434 | 2533 |
| M4 | 49.73 | 63.37 | 380 | 4.55 | 300 | 1372415 | 2836 |
| M8 | 50.47 | 63.1 | 379.8 | 5.09 | 500 | 30370 | 3000 |
| M8 | 51.07 | 62.02 | 379 | 4.77 | 500 | 72800 | 2529 |
| M10 | 50.93 | 65.23 | 380.8 | 4.11 | 500 | 70935 | 2290 |
| M9 | 49.92 | 62.59 | 379.7 | 5.01 | 750 | 15404 | 1631 |
| M9 | 48.73 | 62.02 | 379.3 | 5.01 | 750 | 11714 | 1855 |
| M10 | 49.56 | 64.62 | 379.5 | 4.77 | 750 | 5329 | 2049 |

SMA Autopista Central

| Geometría y propiedades volumétricas | | | | | Resultados ensayo de fatiga | | |
|--------------------------------------|-----------|------------|------------|-------------|---|---------|----------|
| Probeta | Alto (mm) | Ancho (mm) | Largo (mm) | % de Vacíos | Nivel de Deformación μ strain (mm/mm x 10 ⁻⁶) | Nf50 | Si [MPa] |
| 1 | 50.4 | 63.9 | 379.8 | 3.07 | 750 | 42869 | 1592 |
| 2 | 50.5 | 62.6 | 380.3 | 4.08 | 750 | 27560 | 1442 |
| 3 | 50.9 | 63.7 | 381 | 4.08 | 750 | 111649 | 1226 |
| 4 | 48.5 | 63.3 | 379.8 | 2.18 | 500 | 271168 | 2066 |
| 5 | 49.1 | 62 | 379.5 | 2.18 | 500 | 294458 | 2008 |
| 6 | 50.7 | 63.2 | 377.1 | 3.07 | 500 | 146157 | 2088 |
| 7 | 49.7 | 63.1 | 379.9 | 3.97 | 450 | 666419 | 1727 |
| 8 | 48.9 | 62.1 | 379.3 | 3.54 | 450 | 429550 | 2054 |
| 9 | 49.3 | 62 | 378.8 | 3.54 | 450 | 330257 | 1905 |
| 10 | 50 | 62 | 379.4 | 4.01 | 350 | 2334451 | 1813 |
| 11 | 49.9 | 63.4 | 379.8 | 4.01 | 350 | 3944033 | 2390 |
| 12 | 50.1 | 63.2 | 379.8 | 3.97 | 350 | 6630500 | 2240 |

SMA Autopista del Maipo

| Geometría y propiedades volumétricas | | | | | Resultados ensayo de fatiga | | |
|--------------------------------------|-----------|------------|------------|-------------|---|--------|----------|
| Probeta | Alto (mm) | Ancho (mm) | Largo (mm) | % de Vacíos | Nivel de Deformación μ strain (mm/mm x 10 ⁻⁶) | Nf50 | Si [MPa] |
| 1 | 50.6 | 62 | 378.8 | 3.47 | 750 | 1519 | 3103 |
| 2 | 50.8 | 63.5 | 380.4 | 4.03 | 750 | 791 | 2687 |
| 3 | 50.4 | 63.2 | 380 | 4.03 | 750 | 995 | 1699 |
| 4 | 50 | 62.2 | 378.8 | 3.07 | 500 | 15238 | 2259 |
| 5 | 50.2 | 62.4 | 376.9 | 3.07 | 500 | 14233 | 4264 |
| 6 | 49.7 | 58.3 | 379.1 | 3.8 | 500 | 19791 | 3731 |
| 7 | 50 | 58.9 | 378.8 | 3.08 | 350 | 258986 | 3663 |
| 8 | 51.1 | 64.3 | 379.1 | 3.74 | 350 | 23381 | 3420 |
| 9 | 50.3 | 63.9 | 378.8 | 3.74 | 350 | 9742 | 2584 |
| 10 | 50.6 | 63.7 | 378.9 | 2.48 | 250 | 46438 | 4410 |
| 11 | 51.6 | 59.5 | 378.9 | 2.48 | 250 | 336176 | 4365 |
| 12 | 50.5 | 63.7 | 378.8 | 3.47 | 250 | 355161 | 3728 |

MDC Autopista del Sol

| Geometría y propiedades volumétricas | | | | | Resultados ensayo de fatiga | | |
|--------------------------------------|-----------|------------|------------|-------------|--|---------|----------|
| Probeta | Alto (mm) | Ancho (mm) | Largo (mm) | % de Vacíos | Nivel de Deformación μ strain (mm/mm x 10-6) | Nf50 | Si [MPa] |
| L2/V1 | 48.9 | 62.8 | 379.7 | 9.82 | 750 | 5224 | 872 |
| L2/V2 | 48.9 | 62.8 | 380.3 | 9.82 | 750 | 3706 | 905 |
| L3/V1 | 50 | 63 | 379.7 | 9.94 | 750 | 9315 | 840 |
| L5/V1 | 50.2 | 65.3 | 380.7 | 9.06 | 500 | 82319 | 713 |
| L5/V2 | 49.6 | 63.8 | 379.7 | 9.06 | 500 | 95557 | 1128 |
| L6/V1 | 51.4 | 64.9 | 380.3 | 8.43 | 500 | 110090 | 975 |
| L6/V2 | 49.6 | 65.5 | 380 | 8.43 | 250 | 4651127 | 1290 |
| L7/V1 | 49.8 | 62.7 | 379.3 | 8.7 | 250 | 1544277 | 1594 |
| L7/V2 | 49.7 | 64.4 | 380.3 | 8.7 | 250 | 1011323 | 1498 |
| L8/V1 | 49.7 | 65.2 | 380.3 | 9.4 | 350 | 288326 | 1218 |
| L8/V2 | 51.4 | 63.1 | 380 | 9.4 | 350 | 182356 | 1289 |
| L9/V1 | 51.1 | 64.5 | 381.3 | 9.95 | 350 | 265953 | 1326 |

MDC Autopista del Maipo

| Geometría y propiedades volumétricas | | | | | Resultados ensayo de fatiga | | |
|--------------------------------------|-----------|------------|------------|-------------|--|---------|----------|
| Probeta | Alto (mm) | Ancho (mm) | Largo (mm) | % de Vacíos | Nivel de Deformación μ strain (mm/mm x 10-6) | Nf50 | Si [MPa] |
| 1 | 50 | 65 | 379 | | 750 | 24601 | 1040 |
| 2 | 50 | 64 | 379 | | 750 | 14568 | 980 |
| 3 | 50 | 62 | 380 | | 750 | 6226 | 1140 |
| 4 | 49 | 63 | 379 | | 500 | 69699 | 1400 |
| 5 | 49 | 62 | 379 | | 500 | 48370 | 1639 |
| 6 | 49 | 63 | 380 | | 500 | 11885 | 2370 |
| 7 | 50 | 62 | 479 | | 375 | 266949 | 1866 |
| 8 | 51 | 63 | 379 | | 375 | 199971 | 1847 |
| 9 | 50 | 63 | 379 | | 375 | 479830 | 1635 |
| 10 | 50 | 63 | 380 | | 250 | 3112700 | 1583 |
| 11 | 50 | 61 | 380 | | 250 | 2011103 | 1738 |
| 12 | 52 | 63 | 380 | | 250 | 719658 | 1820 |

MEZCLAS CON RAP

IV-A-12 Sin RAP

| Geometría y propiedades volumétricas | | | | | Resultados ensayo de fatiga | | |
|--------------------------------------|-----------|------------|------------|-------------|--|-------|----------|
| Probeta | Alto (mm) | Ancho (mm) | Largo (mm) | % de Vacíos | Nivel de Deformación μ strain (mm/mm x 10-6) | Nf50 | Si [MPa] |
| M1V3P1 | 53 | 64 | 400 | 4.32 | 250 | 9816 | 5457 |
| M1V3P2 | 54 | 64 | 399 | 4.32 | 250 | 11690 | 5064 |
| M1V4P1 | 55 | 64 | 397 | 4.13 | 250 | 11989 | 4907 |
| M1V4P2 | 53 | 64 | 389 | 4.13 | 350 | 3345 | 4901 |
| M1V5P1 | 53 | 65 | 400 | 4.02 | 350 | 1073 | 6123 |
| M1V5P2 | 54 | 64 | 399 | 4.02 | 350 | 2126 | 6308 |
| M1P2 | 53 | 65 | 385 | 4.26 | 500 | 693 | 3377 |
| M1V7P2 | 53 | 62 | 399 | 4.01 | 500 | 718 | 4499 |
| M1P4 | 54 | 68 | 384 | 4.41 | 500 | 1235 | 4770 |
| M1V6P1 | 54 | 64 | 400 | 4.11 | 600 | 363 | 3796 |
| M1V6P2 | 53 | 63 | 400 | 4.11 | 600 | 394 | 4986 |
| M1V7P1 | 54 | 64 | 404 | 4.01 | 600 | 183 | 3854 |

IV-A-12 Con 8% RAP

| Geometría y propiedades volumétricas | | | | | Resultados ensayo de fatiga | | |
|--------------------------------------|-----------|------------|------------|-------------|--|------|----------|
| Probeta | Alto (mm) | Ancho (mm) | Largo (mm) | % de Vacíos | Nivel de Deformación μ strain (mm/mm x 10-6) | Nf50 | Si [MPa] |
| M2P6 | 52 | 66 | 385 | 4.09 | 500 | 431 | 10530 |
| M2P7 | 54 | 66 | 399 | 4.65 | 500 | 749 | 4618 |
| M2P8 | 51 | 62 | 400 | 4.65 | 500 | 690 | 3581 |

IV-A-12 Con 18% RAP

| Geometría y propiedades volumétricas | | | | | Resultados ensayo de fatiga | | |
|--------------------------------------|-----------|------------|------------|-------------|--|-------|----------|
| Probeta | Alto (mm) | Ancho (mm) | Largo (mm) | % de Vacíos | Nivel de Deformación μ strain (mm/mm x 10-6) | Nf50 | Si [MPa] |
| M3V2P2 | 54 | 65 | 401 | 5.21 | 250 | 12101 | 7016 |
| M3V4P2 | 54 | 64 | 399 | 4.02 | 250 | 15424 | 9063 |
| M3V10P1 | 55 | 64 | 397 | 4.25 | 250 | 3724 | 8750 |
| M2V7P1 | 56 | 65 | 399 | 4.87 | 350 | 1015 | 8416 |
| M3V7P2 | 53 | 64 | 398 | 4.87 | 350 | 1254 | 7235 |
| M3V10P2 | 54 | 62 | 385 | 4.25 | 350 | 1911 | 7836 |
| M3V1P1 | 53 | 63 | 400 | 4.37 | 500 | 1506 | 7339 |
| M3V1P2 | 53 | 64 | 400 | 4.37 | 500 | 735 | 8046 |
| M3V2P1 | 54 | 64 | 384 | 5.21 | 500 | 548 | 5103 |
| M3V8P2 | 54 | 64 | 390 | 4.97 | 600 | 444 | 5585 |
| M3V9P1 | 52 | 64 | 400 | 5.11 | 600 | 284 | 6206 |
| M3V9P2 | 54 | 64 | 390 | 5.11 | 600 | 491 | 5716 |

PROYECTO AEROPUERTO

Mezclas con Acondicionamiento a Largo Plazo

| Geometría y propiedades volumétricas | | | | | Resultados ensayo de fatiga | | |
|--------------------------------------|-----------|------------|------------|-------------|--|---------|----------|
| Probeta | Alto (mm) | Ancho (mm) | Largo (mm) | % de Vacíos | Nivel de Deformación μ strain (mm/mm x 10-6) | Nf50 | Si [MPa] |
| F2 | 49 | 63 | 380 | 2.3 | 250 | 330520 | 5784 |
| F7 | 47 | 61 | 376 | 3.3 | 250 | 1013383 | 3466 |
| F8 | 47 | 60 | 376 | 3.3 | 250 | 185420 | 3228 |
| F19 | 48 | 63 | 377 | 3.8 | 375 | 14769 | 5244 |
| F21 | 47 | 61 | 376 | 5 | 375 | 44639 | 3947 |
| F23 | 49 | 62 | 378 | 3.5 | 375 | 27106 | 4614 |
| F3 | 49 | 63 | 380 | 2.1 | 500 | 15430 | 4013 |
| F4 | 49 | 63 | 380 | 2.1 | 500 | 9863 | 4114 |
| F12 | 49 | 64 | 379 | 4.3 | 500 | 26696 | 2591 |
| F13 | 49 | 62 | 379 | 2.5 | 750 | 1789 | 3426 |
| F14 | 49 | 63 | 378 | 2.5 | 750 | 2146 | 3139 |
| F15 | 49 | 63 | 380 | 5 | 750 | 903 | 3210 |

Mezclas con Acondicionamiento a Corto Plazo

| Geometría y propiedades volumétricas | | | | | Resultados ensayo de fatiga | | |
|--------------------------------------|-----------|------------|------------|-------------|--|----------|----------|
| Probeta | Alto (mm) | Ancho (mm) | Largo (mm) | % de Vacíos | Nivel de Deformación μ strain (mm/mm x 10-6) | Nf50 | Si [MPa] |
| F9 | 48 | 62 | 379 | 4.0 | 250 | 918086 | 3356 |
| F10 | 48 | 63 | 379 | 4.3 | 250 | 12605065 | 3602 |
| F11 | 48 | 62 | 378 | 4.3 | 250 | 17298767 | 1486 |
| F20 | 49 | 61 | 379 | 3.8 | 375 | 19047 | 4254 |
| F22 | 49 | 62 | 376 | 5 | 375 | 54293 | 3362 |
| F24 | 46 | 63 | 378 | 3.5 | 375 | 51474 | 3673 |
| F1 | 49 | 63 | 380 | 2.3 | 500 | 17557 | 3150 |
| F27 | 48 | 62 | 378 | 4.7 | 500 | 33569 | 3257 |
| F6 | 50 | 62 | 380 | 3.7 | 500 | 21173 | 2975 |
| F16 | 49 | 63 | 378 | 5 | 750 | 921 | 2653 |
| F17 | 49 | 62 | 378 | 3.8 | 750 | 5599 | 2021 |
| F18 | 49 | 62 | 380 | 3.8 | 750 | 422 | 692 |

ANEXO 2

MÓDULO DE CORTE DINÁMICO Y ÁNGULO DE FASE

Módulo de Corte Dinámico Ligante Original

| | | | | LIGANTE ORIGINAL | | | | | | | | |
|------------------|---------------|---------------------|---------------------|------------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|
| | | | | 64-22 | | | 70-28 | | | 70-22 | | |
| Frecuencia Hz | log (fr [Hz]) | Frecuencia rad/s | log (fr [rad/s]) | log(G*[Pa]) | G* [Pa] | G* [KPa] | log(G*[Pa]) | G* [Pa] | G* [KPa] | log(G*[Pa]) | G* [Pa] | G* [KPa] |
| 0.0001 | -4.00 | 0.00062832 | -3.20182013 | 2.9059919 | 805.363419 | 0.80536342 | 3.21348606 | 1634.88069 | 1.63488069 | 3.40497683 | 2540.83717 | 2.54083717 |
| 0.001 | -3.00 | 0.00628319 | -2.20182013 | 3.85941841 | 7234.66471 | 7.23466471 | 3.90656387 | 8064.24789 | 8.06424789 | 4.1656483 | 14643.6149 | 14.6436149 |
| 0.01 | -2.00 | 0.06283185 | -1.20182013 | 4.76480243 | 58183.8467 | 58.1838467 | 4.61647895 | 41350.3269 | 41.3503269 | 4.91245966 | 81744.7111 | 81.7447111 |
| 0.5 | -0.30 | 3.14159265 | 0.49714987 | 6.14478098 | 1395664.34 | 1395.66434 | 5.79651777 | 625918.472 | 625.918472 | 6.10060866 | 1260691.01 | 1260.69101 |
| 1 | 0.00 | 6.28318531 | 0.79817987 | 6.36339285 | 2308834.73 | 2308.83473 | 5.99528805 | 989208.976 | 989.208976 | 6.29533338 | 1973937.4 | 1973.9374 |
| 1.5 | 0.18 | 9.42477796 | 0.97427113 | 6.48714015 | 3070012.55 | 3070.01255 | 6.10942468 | 1286544.12 | 1286.54412 | 6.40650879 | 2549815.72 | 2549.81572 |
| 2 | 0.30 | 12.5663706 | 1.09920986 | 6.57302616 | 3741331.27 | 3741.33127 | 6.18936314 | 1546547.06 | 1546.54706 | 6.4841011 | 3048604.63 | 3048.60463 |
| 2.5 | 0.40 | 15.7079633 | 1.19611988 | 6.63852611 | 4350369.12 | 4350.36912 | 6.2507395 | 1781309.99 | 1781.30999 | 6.54352551 | 3495630.4 | 3495.6304 |
| 3 | 0.48 | 18.8495559 | 1.27530112 | 6.69130622 | 4912541.34 | 4912.54134 | 6.30046389 | 1997394.68 | 1997.39468 | 6.59157323 | 3904570.18 | 3904.57018 |
| 3.5 | 0.54 | 21.9911486 | 1.34224791 | 6.73540716 | 5437598.8 | 5437.5988 | 6.34219887 | 2198866.56 | 2198.86656 | 6.63183545 | 4283861.78 | 4283.86178 |
| 4 | 0.60 | 25.1327412 | 1.40023986 | 6.77321685 | 5932214.53 | 5932.21453 | 6.37811881 | 2388464.59 | 2388.46459 | 6.66644013 | 4639168.29 | 4639.16829 |
| 4.5 | 0.65 | 28.2743339 | 1.45139238 | 6.80626229 | 6401213.16 | 6401.21316 | 6.40961948 | 2568144.67 | 2568.14467 | 6.69675116 | 4974519.75 | 4974.51975 |
| 5 | 0.70 | 31.4159265 | 1.49714987 | 6.83557819 | 6848227.73 | 6848.22773 | 6.43764987 | 2739364.81 | 2739.36481 | 6.72369458 | 5292910.81 | 5292.91081 |
| 5.5 | 0.74 | 34.5575192 | 1.53854256 | 6.86189754 | 7276081.28 | 7276.08128 | 6.4628842 | 2903248.44 | 2903.24844 | 6.74792754 | 5596642.13 | 5596.64213 |
| 6 | 0.78 | 37.6991118 | 1.57633112 | 6.88575818 | 7687022.99 | 7687.02299 | 6.48581852 | 3060684.17 | 3060.68417 | 6.76993303 | 5887528.59 | 5887.52859 |
| 6.5 | 0.81 | 40.8407045 | 1.61109323 | 6.90756623 | 8082881.77 | 8082.88177 | 6.50682828 | 3212390.13 | 3212.39013 | 6.79007628 | 6167033.09 | 6167.03309 |
| 7 | 0.85 | 43.9822972 | 1.64327791 | 6.9276357 | 8465170.28 | 8465.17028 | 6.52620445 | 3358957.03 | 3358.95703 | 6.80864007 | 6436356.14 | 6436.35614 |
| 7.5 | 0.88 | 47.1238898 | 1.67324113 | 6.9462143 | 8835157.67 | 8835.15767 | 6.544177 | 3500878.15 | 3500.87815 | 6.82584774 | 6696497.94 | 6696.49794 |
| 8 | 0.90 | 50.2654825 | 1.70126986 | 6.96350081 | 9193921.99 | 9193.92199 | 6.56093082 | 3638570.72 | 3638.57072 | 6.84187873 | 6948302.67 | 6948.30267 |
| 8.5 | 0.93 | 53.4070751 | 1.72759879 | 6.97965711 | 9542388.79 | 9542.38879 | 6.57661676 | 3772391.55 | 3772.39155 | 6.85687932 | 7192490.86 | 7192.49086 |
| 9 | 0.95 | 56.5486678 | 1.75242238 | 6.99481673 | 9881360.1 | 9881.3601 | 6.59135947 | 3902648.82 | 3902.64882 | 6.87097032 | 7429683.58 | 7429.68358 |
| 9.5 | 0.98 | 59.6902604 | 1.77590347 | 7.0090911 | 10211536.7 | 10211.5367 | 6.60526312 | 4029610.96 | 4029.61096 | 6.88425263 | 7660420.77 | 7660.42077 |
| 10 | 1.00 | 62.8318531 | 1.79817987 | 7.02257416 | 10533535.4 | 10533.5354 | 6.61841563 | 4153513.54 | 4153.51354 | 6.89681137 | 7885175.52 | 7885.17552 |
| 31.6 | 1.50 | 198.691765 | 2.29817987 | 7.30969336 | 20402968.3 | 20402.9683 | 6.90339877 | 8005690.03 | 8005.69003 | 7.16749531 | 14706025.5 | 14706.0255 |
| 100 | 2.00 | 628.318531 | 2.79817987 | 7.56566282 | 36784327.5 | 36784.3275 | 7.16684761 | 14684109.3 | 14684.1093 | 7.41526054 | 26017198.8 | 26017.1988 |
| 316.2 | 2.50 | 1986.91765 | 3.29817987 | 7.78835599 | 61426530.6 | 61426.5306 | 7.40590174 | 25462540.8 | 25462.5408 | 7.63794551 | 43445570.9 | 43445.5709 |
| 1000 | 3.00 | 6283.18531 | 3.79817987 | 7.97564629 | 94546681.1 | 94546.6811 | 7.61770076 | 41466822.6 | 41466.8226 | 7.83338871 | 68137894.4 | 68137.8944 |
| 3162.3 | 3.50 | 19869.1765 | 4.29817987 | 8.12540716 | 133477221 | 133477.221 | 7.79938427 | 63006342.3 | 63006.3423 | 7.99942861 | 99868520.2 | 99868.5202 |
| 10000 | 4.00 | 62831.8531 | 4.79817987 | 8.23551202 | 171993495 | 171993.495 | 7.94809186 | 88734368.7 | 88734.3687 | 8.1339037 | 136114284 | 136114.284 |

Módulo de Corte Dinámico Ligante Envejecido con HPDR

| | | | | LIGANTE ENVEJECIDO HPDR | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|---------------|---------------------|---------------------|-------------------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|
| | | | | 64-22 | | | 70-28 | | | 70-22 | | | 76-28 | | | 82-28 | | |
| Frecuencia Hz | log (fr [Hz]) | Frecuencia rad/s | log (fr [rad/s]) | log(G*[Pa]) | G* [Pa] | G* [KPa] | log(G*[Pa]) | G* [Pa] | G* [KPa] | log(G*[Pa]) | G* [Pa] | G* [KPa] | log(G*[Pa]) | G* [Pa] | G* [KPa] | log(G*[Pa]) | G* [Pa] | G* [KPa] |
| 0.0001 | -4.00 | 0.00062832 | -3.20182013 | 3.29381652 | 1967.05507 | 1.96705507 | 3.40433594 | 2537.09041 | 2.53709041 | 3.48744038 | 3072.13556 | 3.07213556 | 3.64398981 | 4405.44523 | 4.40544523 | 3.89770921 | 7901.49388 | 7.90149388 |
| 0.001 | -3.00 | 0.00628319 | -2.20182013 | 4.21027957 | 16228.5443 | 16.2285443 | 4.09168726 | 12350.5773 | 12.3505773 | 4.26300111 | 18323.191 | 18.323191 | 4.26589057 | 18445.5061 | 18.4455061 | 4.4872171 | 30705.5658 | 30.7055658 |
| 0.01 | -2.00 | 0.06283185 | -1.20182013 | 5.06546422 | 116269.077 | 116.269077 | 4.79216424 | 61967.5375 | 61.9675375 | 5.00898116 | 102089.519 | 102.089519 | 4.89113272 | 77827.4361 | 77.8274361 | 5.05958023 | 114704.439 | 114.704439 |
| 0.5 | -0.30 | 3.14159265 | 0.49714987 | 6.34524381 | 2214337.5 | 2214.3375 | 5.9476391 | 886419.097 | 886.419097 | 6.17459823 | 1494852.1 | 1494.8521 | 5.911973 | 816531.615 | 816.531615 | 5.98247531 | 960451.222 | 960.451222 |
| 1 | 0.00 | 6.28318531 | 0.79817987 | 6.54578776 | 3513886.74 | 3513.88674 | 6.14093518 | 1383359.91 | 1383.35991 | 6.36414688 | 2312846.87 | 2312.84687 | 6.08218282 | 1208322.38 | 1208.32238 | 6.13840513 | 1375324.34 | 1375.32434 |
| 1.5 | 0.18 | 9.42477796 | 0.97427113 | 6.65908852 | 4561298.78 | 4561.29878 | 6.25171286 | 1785306.79 | 1785.30679 | 6.47229016 | 2966812.91 | 2966.81291 | 6.17973155 | 1512625.95 | 1512.62595 | 6.22844852 | 1692187.66 | 1692.18766 |
| 2 | 0.30 | 12.5663706 | 1.09920986 | 6.73763804 | 5465602.48 | 5465.60248 | 6.32919789 | 2134017.07 | 2134.01707 | 6.54774912 | 3529792.02 | 3529.79202 | 6.24797474 | 1770006 | 1770.006 | 6.29179806 | 1957934.06 | 1957.93406 |
| 2.5 | 0.40 | 15.7079633 | 1.19611988 | 6.79749827 | 6273332.03 | 6273.33203 | 6.38863109 | 2446983.79 | 2446.98379 | 6.60553657 | 4032148.97 | 4032.14897 | 6.30032975 | 1996777.86 | 1996.77786 | 6.3406235 | 2190904.78 | 2190.90478 |
| 3 | 0.48 | 18.8495559 | 1.27530112 | 6.84570725 | 7009826.12 | 7009.82612 | 6.43674176 | 2733642.79 | 2733.64279 | 6.65226205 | 4490162.42 | 4490.16242 | 6.34271957 | 2201504.48 | 2201.50448 | 6.38031174 | 2400555.43 | 2400.55543 |
| 3.5 | 0.54 | 21.9911486 | 1.34224791 | 6.88597135 | 7690797.12 | 7690.79712 | 6.4770941 | 2999812.46 | 2999.81246 | 6.69141911 | 4913818.51 | 4913.81851 | 6.37828101 | 2389356.82 | 2389.35682 | 6.41372236 | 2592521.46 | 2592.52146 |
| 4 | 0.60 | 25.1327412 | 1.40023986 | 6.92047952 | 8326826.53 | 8326.82653 | 6.5118028 | 3249397.19 | 3249.39719 | 6.72507723 | 5309788.6 | 5309.7886 | 6.40887507 | 2563746.47 | 2563.74647 | 6.44255545 | 2770482.75 | 2770.48275 |
| 4.5 | 0.65 | 28.2743339 | 1.45139238 | 6.95063072 | 8925462.39 | 8925.46239 | 6.54222466 | 3485175.59 | 3485.17559 | 6.7545625 | 5682801.73 | 5682.80173 | 6.43569579 | 2727066.86 | 2727.06686 | 6.46790383 | 2936999.23 | 2936.99923 |
| 5 | 0.70 | 31.4159265 | 1.49714987 | 6.9773725 | 9492322.92 | 9492.32292 | 6.56928174 | 3709212.68 | 3709.21268 | 6.78077514 | 6036360.07 | 6036.36007 | 6.45955456 | 2881074.95 | 2881.07495 | 6.49051144 | 3093936.82 | 3093.93682 |
| 5.5 | 0.74 | 34.5575192 | 1.53854256 | 7.00137581 | 10031729.5 | 10031.7295 | 6.59362885 | 3923095.25 | 3923.09525 | 6.80435388 | 6373146.14 | 6373.14614 | 6.48102766 | 3027106.21 | 3027.10621 | 6.51090747 | 3242705.18 | 3242.70518 |
| 6 | 0.78 | 37.6991118 | 1.57633112 | 7.02313281 | 10547093.9 | 10547.0939 | 6.61574762 | 4128075.36 | 4128.07536 | 6.82576812 | 6695270.43 | 6695.27043 | 6.50053893 | 3166204.25 | 3166.20425 | 6.52948169 | 3384400.06 | 3384.40006 |
| 6.5 | 0.81 | 40.8407045 | 1.61109323 | 7.04301502 | 11041168 | 11041.168 | 6.63600243 | 4325162.56 | 4325.16256 | 6.8453728 | 7004430.02 | 7004.43002 | 6.51840906 | 3299203.16 | 3299.20316 | 6.54652948 | 3519893.17 | 3519.89317 |
| 7 | 0.85 | 43.9822972 | 1.64327791 | 7.0613096 | 11516210.6 | 11516.2106 | 6.6546756 | 4515185.54 | 4515.18554 | 6.86344269 | 7302014.52 | 7302.01452 | 6.5348865 | 3426782.21 | 3426.78221 | 6.56227995 | 3649891.43 | 3649.89143 |
| 7.5 | 0.88 | 47.1238898 | 1.67324113 | 7.07824304 | 11974104.4 | 11974.1044 | 6.67199019 | 4698834.97 | 4698.83497 | 6.88019482 | 7589179.38 | 7589.17938 | 6.55016759 | 3549503.38 | 3549.50338 | 6.57691437 | 3774977.49 | 3774.97749 |
| 8 | 0.90 | 50.2654825 | 1.70126986 | 7.09399704 | 12416438.5 | 12416.4385 | 6.6881255 | 4876693.96 | 4876.69396 | 6.89580352 | 7866897.96 | 7866.89796 | 6.56441014 | 3667837.93 | 3667.83793 | 6.59057863 | 3895638.34 | 3895.63834 |
| 8.5 | 0.93 | 53.4070751 | 1.72759879 | 7.10871954 | 12844569 | 12844.569 | 6.70322777 | 5049260.36 | 5049.26036 | 6.91041092 | 8135999.64 | 8135.99964 | 6.57774285 | 3782185.7 | 3782.1857 | 6.60339187 | 4012285.84 | 4012.28584 |
| 9 | 0.95 | 56.5486678 | 1.75242238 | 7.12253255 | 13259664.9 | 13259.6649 | 6.71741779 | 5216963.45 | 5216.96345 | 6.9241344 | 8397198.13 | 8397.19813 | 6.59027207 | 3892889.43 | 3892.88943 | 6.6154526 | 4125272.08 | 4125.27208 |
| 9.5 | 0.98 | 59.6902604 | 1.77590347 | 7.13553788 | 13662742.5 | 13662.7425 | 6.73079653 | 5380176.54 | 5380.17654 | 6.93707199 | 8651113.03 | 8651.11303 | 6.60208665 | 4000245.58 | 4000.24558 | 6.62684324 | 4234900.77 | 4234.90077 |
| 10 | 1.00 | 62.8318531 | 1.79817987 | 7.14782133 | 14054691.8 | 14054.6918 | 6.74344915 | 5539226.86 | 5539.22686 | 6.94930638 | 8898286.4 | 8898.2864 | 6.61326159 | 4104512.6 | 4104.5126 | 6.63763341 | 4341436.08 | 4341.43608 |
| 31.6 | 1.50 | 198.691765 | 2.29817987 | 7.40925178 | 25659711.9 | 25659.7119 | 7.01672388 | 10392592.1 | 10392.5921 | 7.21352456 | 16350256.3 | 16350.2563 | 6.85509241 | 7162958.03 | 7162.95803 | 6.87561918 | 7509641.08 | 7509.64108 |
| 100 | 2.00 | 628.318531 | 2.79817987 | 7.64236589 | 43890031.5 | 43890.0315 | 7.26752878 | 18515216 | 18515.216 | 7.45683286 | 28630758.9 | 28630.7589 | 7.0782234 | 11973563 | 11973.563 | 7.10524991 | 12742361.2 | 12742.3612 |
| 316.2 | 2.50 | 1986.91765 | 3.29817987 | 7.84571959 | 70100254.4 | 70100.2544 | 7.4930026 | 31117349.3 | 31117.3493 | 7.67772963 | 47613447.4 | 47613.4474 | 7.28048402 | 19075855.2 | 19075.8552 | 7.32607351 | 21187197.1 | 21187.1971 |
| 1000 | 3.00 | 6283.18531 | 3.79817987 | 8.0178688 | 104200259 | 104200.259 | 7.69028407 | 4900929.2 | 49009.9292 | 7.87471323 | 74939921.4 | 74939.9214 | 7.45970367 | 28820643.1 | 28820.6431 | 7.53763788 | 34485607.2 | 34485.6072 |
| 3162.3 | 3.50 | 19869.1765 | 4.29817987 | 8.15736943 | 143671103 | 143671.103 | 7.85651197 | 71864096.5 | 71864.0965 | 8.04628204 | 111245395 | 111245.395 | 7.61371178 | 41087695.6 | 41087.6956 | 7.73949093 | 54889708.6 | 54889.7086 |
| 10000 | 4.00 | 62831.8531 | 4.79817987 | 8.26277739 | 183137548 | 183137.548 | 7.98882503 | 97459691.1 | 97459.6911 | 8.19093442 | 155215260 | 155215.26 | 7.74033779 | 54996847.4 | 54996.8474 | 7.93118056 | 85345486.6 | 85345.4866 |

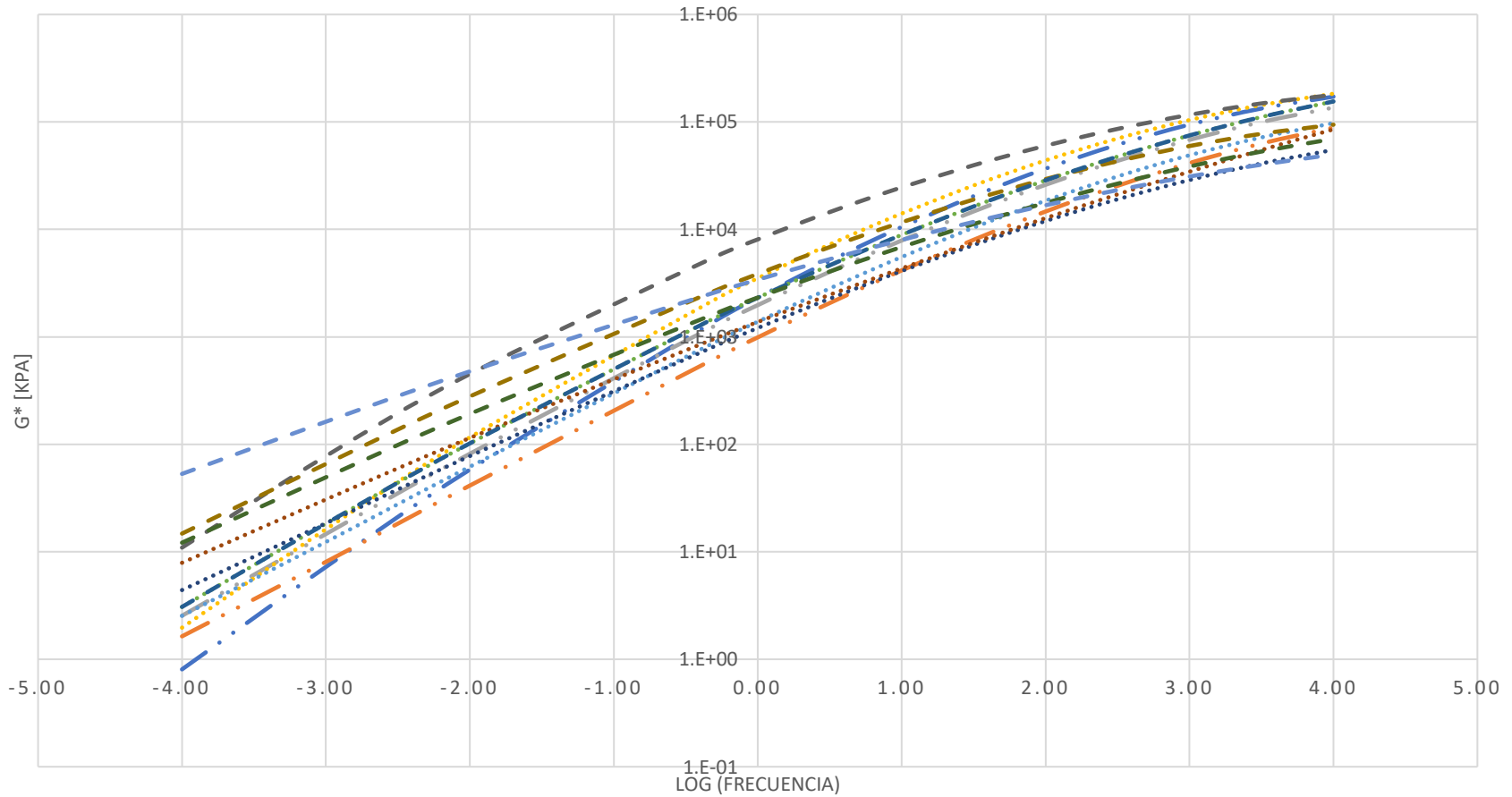
Módulo de Corte Dinámico Ligante Envejecido con PAV

| | | | | LIGANTE ENVEJECIDO PAV | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|---------------|------------|------------------|------------------------|------------|------------|-------------|------------|------------|-------------|------------|------------|-------------|------------|------------|-------------|------------|------------|
| | | | | 64-22 | | | 70-28 | | | 70-22 | | | 76-28 | | | 82-28 | | |
| Frecuencia | log (fr [Hz]) | Frecuencia | log (fr [rad/s]) | log(G*[Pa]) | G* [Pa] | G* [KPa] | log(G*[Pa]) | G* [Pa] | G* [KPa] | log(G*[Pa]) | G* [Pa] | G* [KPa] | log(G*[Pa]) | G* [Pa] | G* [KPa] | log(G*[Pa]) | G* [Pa] | G* [KPa] |
| 0.0001 | -4.00 | 0.00062832 | -3.20182013 | 4.03920189 | 10944.6503 | 10.9446503 | 4.16955421 | 14775.9092 | 14.7759092 | 3.48744038 | 3072.13556 | 3.07213556 | 4.08482148 | 12156.8618 | 12.1568618 | 4.72515406 | 53107.2807 | 53.1072807 |
| 0.001 | -3.00 | 0.00628319 | -2.20182013 | 4.89103624 | 77810.1469 | 77.8101469 | 4.81749638 | 65689.5648 | 65.6895648 | 4.26300111 | 18323.191 | 18.323191 | 4.69358223 | 49383.5415 | 49.3835415 | 5.21071803 | 162449.369 | 162.449369 |
| 0.01 | -2.00 | 0.06283185 | -1.20182013 | 5.65439817 | 451230.211 | 451.230211 | 5.44615701 | 279355.363 | 279.355363 | 5.00898116 | 102089.519 | 102.089519 | 5.28364762 | 192153.201 | 192.153201 | 5.67880376 | 477313.541 | 477.313541 |
| 0.5 | -0.30 | 3.14159265 | 0.49714987 | 6.74220825 | 5523422.31 | 5523.42231 | 6.42768917 | 2677251.51 | 2677.25151 | 6.17459823 | 1494852.1 | 1494.8521 | 6.21356985 | 1635196.11 | 1635.19611 | 6.41260892 | 2585883.27 | 2585.88327 |
| 1 | 0.00 | 6.28318531 | 0.79817987 | 6.9068256 | 8069109.39 | 8069.10939 | 6.58572965 | 3852384.67 | 3852.38467 | 6.36414688 | 2312846.87 | 2312.84687 | 6.36564276 | 2320826.93 | 2320.82693 | 6.53228071 | 3406282.86 | 3406.28286 |
| 1.5 | 0.18 | 9.42477796 | 0.97427113 | 6.99912813 | 9979944.51 | 9979.94451 | 6.67550625 | 4737031.3 | 4737.0313 | 6.47229016 | 2966812.91 | 2966.81291 | 6.45250791 | 2834705.24 | 2834.70524 | 6.60060985 | 3986665.95 | 3986.66595 |
| 2 | 0.30 | 12.5663706 | 1.09920986 | 7.0628222 | 11556390.3 | 11556.3903 | 6.73795151 | 5469548.92 | 5469.54892 | 6.54774912 | 3529792.02 | 3529.79202 | 6.51316364 | 3259594.98 | 3259.59498 | 6.64831206 | 4449508.65 | 4449.50865 |
| 2.5 | 0.40 | 15.7079633 | 1.19611988 | 7.11119757 | 12918068.1 | 12918.0681 | 6.78565063 | 6104507.41 | 6104.50741 | 6.60553657 | 4032148.97 | 4032.14897 | 6.55963894 | 3627763.26 | 3627.76326 | 6.6848572 | 4840131.88 | 4840.13188 |
| 3 | 0.48 | 18.8495559 | 1.27530112 | 7.15005384 | 14127126.6 | 14127.1266 | 6.82413507 | 6670141.82 | 6670.14182 | 6.65226205 | 4490162.42 | 4490.16242 | 6.59723309 | 3955788.74 | 3955.78874 | 6.714416 | 5181028.77 | 5181.02877 |
| 3.5 | 0.54 | 21.9911486 | 1.34224791 | 7.18243588 | 15220743.9 | 15220.7439 | 6.85632447 | 7183307.77 | 7183.30777 | 6.69141911 | 4913818.51 | 4913.81851 | 6.62874846 | 4253519.82 | 4253.51982 | 6.73919361 | 5485214.47 | 5485.21447 |
| 4 | 0.60 | 25.1327412 | 1.40023986 | 7.21013749 | 16223236.2 | 16223.2362 | 6.88394624 | 7655018.36 | 7655.01836 | 6.72507723 | 5309788.6 | 5309.7886 | 6.65584573 | 4527367.33 | 4527.36733 | 6.76049659 | 5760982.96 | 5760.98296 |
| 4.5 | 0.65 | 28.2743339 | 1.45139238 | 7.23430277 | 17151526.1 | 17151.5261 | 6.90810604 | 8092934.82 | 8092.93482 | 6.7545625 | 5682801.73 | 5682.80173 | 6.67958939 | 4781777.84 | 4781.77784 | 6.77916234 | 6013984.98 | 6013.98498 |
| 5 | 0.70 | 31.4159265 | 1.49714987 | 7.25570522 | 18017943.3 | 18017.9433 | 6.92955373 | 8502638.82 | 8502.63882 | 6.78077514 | 6036360.07 | 6036.36007 | 6.70070227 | 5019983.24 | 5019.98324 | 6.79575942 | 6248264.74 | 6248.26474 |
| 5.5 | 0.74 | 34.5575192 | 1.53854256 | 7.2748917 | 18831794.4 | 18831.7944 | 6.94882087 | 8888344.33 | 8888.34433 | 6.80435388 | 6373146.14 | 6373.14614 | 6.71969735 | 5244418.65 | 5244.41865 | 6.81069133 | 6466828.35 | 6466.82835 |
| 6 | 0.78 | 37.6991118 | 1.57633112 | 7.29226281 | 19600304.3 | 19600.3043 | 6.96629777 | 9253323.96 | 9253.32396 | 6.82576812 | 6695270.43 | 6695.27043 | 6.73695173 | 5456972.08 | 5456.97208 | 6.82425463 | 6671978.43 | 6671.97843 |
| 6.5 | 0.81 | 40.8407045 | 1.61109323 | 7.30812055 | 20329212.3 | 20329.2123 | 6.98227931 | 9600178.52 | 9600.17852 | 6.8453728 | 7004430.02 | 7004.43002 | 6.75275058 | 5659141.8 | 5659.1418 | 6.83667359 | 6865522.38 | 6865.52238 |
| 7 | 0.85 | 43.9822972 | 1.64327791 | 7.32269809 | 21023164.6 | 21023.1646 | 6.99699363 | 9931014.79 | 9931.01479 | 6.86344269 | 7302014.52 | 7302.01452 | 6.76731471 | 5852140 | 5852.14 | 6.84812184 | 7048908.04 | 7048.90804 |
| 7.5 | 0.88 | 47.1238898 | 1.67324113 | 7.33617914 | 21685984.2 | 21685.9842 | 7.01062078 | 10247567.2 | 10247.5672 | 6.88019482 | 7589179.38 | 7589.17938 | 6.78081855 | 6036963.55 | 6036.96355 | 6.85873657 | 7223315.2 | 7223.3152 |
| 8 | 0.90 | 50.2654825 | 1.70126986 | 7.34871092 | 22320859.8 | 22320.8598 | 7.02330529 | 10551283.5 | 10551.2835 | 6.89580352 | 7866897.96 | 7866.89796 | 6.79340226 | 6214443.78 | 6214.44378 | 6.86862795 | 7389719.43 | 7389.71943 |
| 8.5 | 0.93 | 53.4070751 | 1.72759879 | 7.36041321 | 22930483.4 | 22930.4834 | 7.03516494 | 10843386.7 | 10843.3867 | 6.91041092 | 8135999.64 | 8135.99964 | 6.80518011 | 6385282.36 | 6385.28236 | 6.87788584 | 7548937.72 | 7548.93772 |
| 9 | 0.95 | 56.5486678 | 1.75242238 | 7.37138472 | 23517151.5 | 23517.1515 | 7.04629692 | 11124920.7 | 11124.9207 | 6.9241344 | 8397198.13 | 8397.19813 | 6.81624646 | 6550077.82 | 6550.07782 | 6.88658445 | 7701661.9 | 7701.6619 |
| 9.5 | 0.98 | 59.6902604 | 1.77590347 | 7.38170772 | 24082841 | 24082.841 | 7.05678236 | 11396785 | 11396.785 | 6.93707199 | 8651113.03 | 8651.11303 | 6.82668016 | 6709345.52 | 6709.34552 | 6.89478575 | 7848483.51 | 7848.48351 |
| 10 | 1.00 | 62.8318531 | 1.79817987 | 7.39145151 | 24629268.1 | 24629.2681 | 7.06668965 | 11659761 | 11659.761 | 6.94930638 | 8898286.4 | 8898.2864 | 6.83654772 | 6863532.84 | 6863.53284 | 6.90254204 | 7989912.79 | 7989.91279 |
| 31.6 | 1.50 | 198.691765 | 2.29817987 | 7.59739634 | 39572760.2 | 39572.7602 | 7.27841107 | 18985020.6 | 18985.0206 | 7.21352456 | 16350256.3 | 16350.2563 | 7.04987787 | 11217029.8 | 11217.0298 | 7.07024375 | 11755571.6 | 11755.5716 |
| 100 | 2.00 | 628.318531 | 2.79817987 | 7.7787258 | 60079430 | 60079.43 | 7.46846411 | 29407906.7 | 29407.9067 | 7.45683286 | 28630758.9 | 28630.7589 | 7.24670775 | 17648498 | 17648.498 | 7.22506534 | 16790566.1 | 16790.5661 |
| 316.2 | 2.50 | 1986.91765 | 3.29817987 | 7.93516241 | 86131579.8 | 86131.5798 | 7.63497676 | 43149599.1 | 43149.5991 | 7.67772963 | 47613447.4 | 47613.4474 | 7.4257233 | 26651600.8 | 26651.6008 | 7.36606118 | 23230640.4 | 23230.6404 |
| 1000 | 3.00 | 6283.18531 | 3.79817987 | 8.0664287 | 116527572 | 116527.572 | 7.77607703 | 59714119.4 | 59714.1194 | 7.87471323 | 74939921.4 | 74939.9214 | 7.58561047 | 38513276.8 | 38513.2768 | 7.49228566 | 31066023.2 | 31066.0232 |
| 3162.3 | 3.50 | 19869.1765 | 4.29817987 | 8.17224718 | 148678160 | 148678.16 | 7.88989291 | 77605573.8 | 77605.5738 | 8.04628204 | 111245395 | 111245.395 | 7.72505521 | 53095194.3 | 53095.1943 | 7.60279316 | 40067584.5 | 40067.5845 |
| 10000 | 4.00 | 62831.8531 | 4.79817987 | 8.25234038 | 178788831 | 178788.831 | 7.97455241 | 94308841.7 | 94308.8417 | 8.19093442 | 155215260 | 155215.26 | 7.84274348 | 69621517.2 | 69621.5172 | 7.69663806 | 49732244.5 | 49732.2445 |

Ángulo de fase

| | | | | ORIGINAL | | | HPDR | | | | | PAV | | | | |
|------------------|---------------|---------------------|---------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | | | 64-22 | 70-28 | 70-22 | 64-22 | 70-28 | 70-22 | 76-28 | 82-28 | 64-22 | 70-28 | 70-22 | 76-28 | 82-28 |
| Frecuencia Hz | log (fr [Hz]) | Frecuencia rad/s | log (fr [rad/s]) | delta | delta | delta | delta | delta | delta | delta | delta | delta | delta | delta | delta | delta |
| 0.0001 | -4.00 | 0.00062832 | -3.20182013 | 87.1592768 | 62.6018806 | 67.7987176 | 84.3410828 | 61.4943578 | 68.3194326 | 54.3505717 | 57.5378303 | 76.3840115 | 56.5180919 | 60.5388313 | 54.5080032 | 52.283914 |
| 0.001 | -3.00 | 0.00628319 | -2.20182013 | 83.5281276 | 62.7139882 | 67.3345094 | 79.3255608 | 61.7009535 | 64.9822098 | 55.5164084 | 58.4036253 | 69.5690293 | 56.4659253 | 57.9821923 | 54.0016611 | 51.3307749 |
| 0.01 | -2.00 | 0.06283185 | -1.20182013 | 78.5020104 | 63.8529701 | 65.3138907 | 73.348556 | 62.3996624 | 63.0514196 | 55.9146718 | 58.2122408 | 62.5154526 | 54.6988142 | 54.4434681 | 52.7065768 | 49.3911553 |
| 0.5 | -0.30 | 3.14159265 | 0.49714987 | 66.7036661 | 61.1106716 | 56.8943568 | 61.0420142 | 58.7160797 | 55.0424573 | 52.2462303 | 53.9763937 | 50.1924127 | 47.3226521 | 44.4536843 | 47.0539364 | 43.8144546 |
| 1 | 0.00 | 6.28318531 | 0.79817987 | 64.1787985 | 59.6707306 | 54.721142 | 58.5845748 | 57.1781315 | 52.7342509 | 50.9837313 | 52.6824027 | 47.9865591 | 45.556384 | 42.3084633 | 45.6290684 | 42.6086202 |
| 1.5 | 0.18 | 9.42477796 | 0.97427113 | 62.640571 | 58.6937366 | 53.362094 | 57.1089883 | 56.1616622 | 51.2793048 | 50.1742384 | 51.8569031 | 46.6953302 | 44.4837415 | 41.0427085 | 44.7560142 | 41.8878906 |
| 2 | 0.30 | 12.5663706 | 1.09920986 | 61.5216703 | 57.9430149 | 52.3603304 | 56.0450684 | 55.3918336 | 50.20669 | 49.5715984 | 51.2423361 | 45.7790688 | 43.7092555 | 40.1472933 | 44.1227586 | 41.3721137 |
| 2.5 | 0.40 | 15.7079633 | 1.19611988 | 60.6380266 | 57.3292018 | 51.5626466 | 55.2101512 | 54.7686189 | 49.3546213 | 49.0894869 | 50.7499367 | 45.0683977 | 39.4573876 | 43.1025677 | 43.6253126 | 40.9705256 |
| 3 | 0.48 | 18.8495559 | 1.27530112 | 59.9058032 | 56.8080365 | 50.8979141 | 54.5217114 | 54.2434435 | 48.6470182 | 48.6868646 | 50.3378586 | 44.487812 | 42.6039022 | 38.8983184 | 43.2156751 | 40.6419324 |
| 3.5 | 0.54 | 21.9911486 | 1.34224791 | 59.2795282 | 56.3541123 | 50.3270378 | 53.9352571 | 53.7887924 | 48.0417251 | 48.340826 | 49.9828617 | 43.9970156 | 42.1807316 | 38.429835 | 42.8676036 | 40.3640813 |
| 4 | 0.60 | 25.1327412 | 1.40023986 | 58.7316945 | 55.9514005 | 49.8261299 | 53.424003 | 53.387477 | 47.5128424 | 48.037222 | 49.6706367 | 43.5719471 | 41.8133499 | 38.0277452 | 42.5651423 | 40.1235667 |
| 4.5 | 0.65 | 28.2743339 | 1.45139238 | 58.2443606 | 55.5890961 | 49.3794858 | 52.9705481 | 53.0280004 | 47.0432761 | 47.766674 | 49.3917192 | 43.1970827 | 41.4888982 | 37.6763716 | 42.2978497 | 39.9116804 |
| 5 | 0.70 | 31.4159265 | 1.49714987 | 57.8051585 | 55.2595484 | 48.9762091 | 52.5629377 | 52.7022741 | 46.6211326 | 47.522633 | 49.1395105 | 42.8618213 | 41.198514 | 37.3649753 | 42.0585125 | 39.7224437 |
| 5.5 | 0.74 | 34.5575192 | 1.53854256 | 57.4051922 | 54.9571301 | 48.6084198 | 52.1925993 | 52.4043808 | 46.2377925 | 47.300339 | 48.9092193 | 42.5586003 | 40.9358267 | 37.0858801 | 41.8419353 | 39.5515728 |
| 6 | 0.78 | 37.6991118 | 1.57633112 | 57.0378443 | 54.6775747 | 48.2702288 | 51.8531725 | 52.1298552 | 45.8868045 | 47.0962195 | 48.6972523 | 42.2818355 | 40.696102 | 36.8334108 | 41.6442502 | 39.3958932 |
| 6.5 | 0.81 | 40.8407045 | 1.61109323 | 56.6980554 | 54.417566 | 47.9571156 | 51.5398064 | 51.8752408 | 45.5632112 | 46.9075231 | 48.5008431 | 42.0272858 | 40.4757246 | 36.6032539 | 41.4624994 | 39.2529867 |
| 7 | 0.85 | 43.9822972 | 1.64327791 | 56.3818689 | 54.1744727 | 47.6655325 | 51.2487153 | 51.6378049 | 45.2631189 | 46.732084 | 48.317815 | 41.7916545 | 40.2718706 | 36.3920554 | 41.2943694 | 39.120969 |
| 7.5 | 0.88 | 47.1238898 | 1.67324113 | 56.0861303 | 53.9461702 | 47.3926424 | 50.9768874 | 51.4153484 | 44.9834124 | 46.5681661 | 48.1464233 | 41.5723279 | 40.082292 | 36.1971567 | 41.1380166 | 38.9983428 |
| 8 | 0.90 | 50.2654825 | 1.70126986 | 55.808284 | 53.730917 | 47.1361401 | 50.7218866 | 51.2060741 | 44.7215596 | 46.4143559 | 47.9852476 | 41.3671992 | 39.9051701 | 36.0164151 | 40.9919475 | 38.883899 |
| 8.5 | 0.93 | 53.4070751 | 1.72759879 | 55.5462291 | 53.5272671 | 46.8941262 | 50.4817141 | 51.0084937 | 44.4754739 | 46.2694866 | 47.8331151 | 41.174545 | 39.7390123 | 35.8480791 | 40.8549357 | 38.7766471 |
| 9 | 0.95 | 56.5486678 | 1.75242238 | 55.2982179 | 53.3340058 | 46.6650167 | 50.2547095 | 50.8213604 | 44.2434154 | 46.1325839 | 47.6890466 | 40.9929376 | 39.5825788 | 35.6906989 | 40.7259613 | 38.6757655 |
| 9.5 | 0.98 | 59.6902604 | 1.77590347 | 55.06278 | 53.1501028 | 46.4474766 | 50.039478 | 50.6436188 | 44.0239175 | 46.0028251 | 47.5522151 | 40.8211812 | 39.4348283 | 35.5430612 | 40.6041673 | 38.5805652 |
| 10 | 1.00 | 62.8318531 | 1.79817987 | 54.8386667 | 52.974676 | 46.2403698 | 49.8348368 | 50.4743675 | 43.8157326 | 45.8795098 | 47.4219161 | 40.6582643 | 39.2948777 | 35.4041404 | 40.4888262 | 38.4904628 |
| 31.6 | 1.50 | 198.691765 | 2.29817987 | 49.614555 | 48.8431751 | 41.4271418 | 45.1261768 | 46.5704637 | 39.2461285 | 43.0983433 | 44.3946523 | 37.0103159 | 36.2500936 | 32.6538249 | 37.9940369 | 36.5453622 |
| 100 | 2.00 | 628.318531 | 2.79817987 | 44.017493 | 44.5558295 | 36.3859028 | 40.1980928 | 42.6956686 | 35.2393674 | 40.4576803 | 41.2601842 | 33.3854186 | 33.5460525 | 30.9016476 | 35.8442054 | 34.8353407 |
| 316.2 | 2.50 | 1986.91765 | 3.29817987 | 38.0447909 | 40.4936044 | 31.2643311 | 35.052912 | 39.2498284 | 32.4229198 | 38.2379688 | 38.1699229 | 29.7927614 | 31.4373738 | 30.6311521 | 34.3135946 | 33.5014898 |
| 1000 | 3.00 | 6283.18531 | 3.79817987 | 31.6937589 | 37.1223545 | 26.2359175 | 29.692962 | 36.7143925 | 31.5443886 | 36.7680905 | 35.3019231 | 26.2415331 | 30.2123147 | 32.394572 | 33.7190358 | 32.7023182 |
| 3162.3 | 3.50 | 19869.1765 | 4.29817987 | 24.9617071 | 34.992824 | 21.4999652 | 24.1205701 | 35.652413 | 33.4715096 | 36.4253613 | 32.8608823 | 22.7409225 | 30.1927697 | 36.8128313 | 34.4199288 | 32.6137518 |
| 10000 | 4.00 | 62831.8531 | 4.79817987 | 17.8459459 | 34.7406465 | 17.2815899 | 18.3380636 | 36.7085453 | 39.1921508 | 37.6355308 | 31.0781419 | 19.3001186 | 31.7342709 | 44.5755439 | 36.818242 | 33.4291334 |

MÓDULO DE CORTE COMPLEJO DE LIGANTES ASFÁLTICOS



- PG 64-22 ORIGINAL
- PG 70-28 ORIGINAL
- PG 70-22 ORIGINAL
- PG 64-22 HPDR
- PG 70-28 HPDR
- PG 70-22 HPDR
- PG 76-28 HPDR
- PG 82-28 HPDR
- PG 64-22 PAV
- PG 70-28 PAV
- PG 70-22 PAV
- PG 76-28 PAV
- PG 82-28 PAV

ÁNGULO DE FASE DE LIGANTES ASFÁLTICOS

