



INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

Análisis y modelación de la variación de parámetros de diseño en el comportamiento a deformación permanente de una mezcla asfáltica

Horacio Delgado Alamilla
Yelitza Ayala del Toro
Juan Manuel Zambrano Delgado

Publicación Técnica No. 632
Sanfandila, Qro.
2021

ISSN 0188-7297

Esta investigación fue realizada en la Coordinación Infraestructura de Vías Terrestres del Instituto Mexicano del Transporte, por el Dr. Horacio Delgado Alamilla, la M.I. Yelitza Ayala del Toro y el Ing. Juan Manuel Zambrano Delgado.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna II-04/19: Evaluación de propiedades mecánicas de diferentes mezclas asfálticas mediante ensayos de módulo dinámico y creep repetido.

Contenido

	Página
Índice de figuras	iii
Índice de tablas	v
Sinopsis.....	vii
Abstract	ix
Resumen ejecutivo.....	xi
Introducción.....	1
1. Ensayos de evaluación de deformación permanente en laboratorio	3
1.1 Ensayo de rueda cargada de Hamburgo (RCH)	3
1.2 Ensayo de compresión axial cíclica (CAC).....	6
2. Modelo ESSO	15
2.1 Variables del modelo.....	16
2.2 Modelo reducido.....	18
3. Metodología experimental.....	21
3.1 Etapa 1: Diseño de la mezcla asfáltica.....	21
3.2 Etapa 2: Evaluación del desempeño a deformación permanente	24
3.3 Etapa 3: Calibración del modelo ESSO.....	27
4. Análisis del comportamiento de la mezcla a deformación permanente	29
4.1 Análisis del ensayo de rueda cargada de Hamburgo	29
4.2 Análisis del ensayo de compresión axial cíclica	35
5. Análisis del modelo ESSO	45
5.1 Calibración del modelo ESSO.....	45

5.2	Validación de modelo ESSO	49
5.3	Calibración del modelo ESSO en distintos materiales	53
	Bibliografía	61

Índice de figuras

Figura 1.1 Equipo Rueda Cargada de Hamburgo.	3
Figura 1.2 Análisis de resultados de la Rueda Cargada de Hamburgo.	4
Figura 1.3 Preparación de especímenes.	7
Figura 1.4 Adaptación de LVDT's.	7
Figura 1.5 Deformación por ciclo, fr = 10 Hz.	8
Figura 1.6 Aplicación de la carga, fr = 10 Hz.	8
Figura 1.7 Aplicación de la carga, fr = 5 Hz.	9
Figura 1.8 Aplicación de la carga, fr = 1 Hz.	9
Figura 1.9 Evolución de la deformación.	10
Figura 1.10 Evolución de la deformación por ciclo.	11
Figura 1.11 Evolución de la deformación acumulada.	11
Figura 1.12 Estimación de ϵ	12
Figura 1.13 Deformación del espécimen durante el ensayo.	13
Figura 3.1 Granulometría TN 12.5 mm ½".	23
Figura 3.2 Granulometría TN 12.5 mm ½".	23
Figura 3.3 Corte de especímenes para ensayo RCH.	25
Figura 3.4 Especímenes después de ser ensayados.	26
Figura 3.5 Preparación de especímenes.	26
Figura 3.6 Instrumentación de los LVDT's.	27
Figura 3.7 Aplicación de carga, fr = 1 Hz.	27
Figura 4.1 Deformación permanente para criterio de aceptación en México (50°C y 20,000 pasadas).	29
Figura 4.2 Deformación permanente a 50°C y 30,000 pasadas.	30
Figura 4.3 Evolución de la deformación permanente a 50°C	31
Figura 4.4 Evolución de la deformación permanente a 55°C	31
Figura 4.5 Evolución de la deformación permanente a 60°C	31
Figura 4.6 Evolución de la deformación permanente de la mezcla con A1	32
Figura 4.7 Evolución de la deformación permanente de la mezcla con A2	32
Figura 4.8 Evolución de la deformación permanente de la mezcla con A3	33
Figura 4.9 Efecto de temperatura en la evolución de la deformación permanente a 20000 repeticiones de carga	34
Figura 4.10 Efecto de temperatura en la evolución de la deformación permanente a 30000 repeticiones de carga	34
Figura 4.11 Corte de los núcleos de mezcla asfáltica	36
Figura 4.12 Evolución de la deformación permanente a 30°C.	37
Figura 4.13 Evolución de la deformación permanente a 40°C.	37
Figura 4.14 Evolución de la deformación permanente a 50°C.	37
Figura 4.15 Curva maestra del módulo dinámico de las mezclas asfálticas.	39
Figura 4.16 Diagrama de Black de las mezclas asfálticas.	40
Figura 4.17 Evolución de la deformación permanente de la mezcla con A1.	41

Figura 4.18 Evolución de la deformación permanente de la mezcla con A2.	41
Figura 4.19 Evolución de la deformación permanente de la mezcla con A3.	41
Figura 5.1 Constantes A y B.....	45
Figura 5.2 Variación del σ_H – Constante C.....	46
Figura 5.3 Extrapolación al origen – Constante C.....	46
Figura 5.4 Determinación de la Constante C.....	47
Figura 5.5 Extrapolación al origen – Constante D.....	47
Figura 5.6 Determinación de la Constante D.....	48
Figura 5.7 Error relativo, modelo ESSO reducido.	50
Figura 5.8 Validación modelo ESSO reducido.	50
Figura 5.9 Análisis de variabilidad, asfalto A3.....	52
Figura 5.10 Determinación de constantes de mezcla con asfalto A1 (PG64-16) ..	54
Figura 5.11 Determinación de constantes de mezcla con asfalto A2 (PG76-22) ..	54
Figura 5.12 Ajuste de la mezcla con asfalto A1 (PG64-16).....	55
Figura 5.13 Análisis de variabilidad, asfalto A1	56
Figura 5.14 Ajuste de la mezcla con asfalto A2 (PG76-22).....	57
Figura 5.15 Análisis de variabilidad, asfalto A2	58
Figura 5.16 Variación de las constantes por tipo de asfalto	59

Índice de tablas

Tabla 1.1 Especificación para RCH.....	5
Tabla 1.2 Distintas especificaciones para ensayo RCH.	6
Tabla 2.1 Modelos de predicción de deformación permanente.....	15
Tabla 2.2 Modelos de predicción de deformación permanente (continuación).	16
Tabla 2.3 Ensayos para modelo ESSO.....	17
Tabla 2.4 Ensayos para modelo ESSO reducido.	19
Tabla 3.1 Evaluación del material pétreo.	21
Tabla 3.2 Características de calidad del material asfáltico.....	22
Tabla 3.3 Diseños volumétricos de las mezclas.....	24
Tabla 3.4 Total de ensayos para RCH.	25
Tabla 3.5 Resultados para modelo ESSO reducido.	28
Tabla 4.1 Análisis de las granulometrías por el método Bailey.	39
Tabla 5.1 Variables, Constante C.....	46
Tabla 5.2 Variables, Constante D.....	47
Tabla 5.3 Constantes modelo ESSO reducido.	48
Tabla 5.4 Validación de resultados, modelo ESSO reducido.	50
Tabla 5.5 Resultados de la tasa de deformación.	53
Tabla 5.6 Constantes del modelo ESSO por tipo de asfalto.	59

Sinopsis

La publicación presenta los resultados de la evaluación de las propiedades de una mezcla asfáltica a deformación permanente mediante dos diferentes ensayos. Primeramente, se realizó el análisis con el ensayo de rueda cargada de Hamburgo, el cual es el ensayo empírico más utilizado en México para el diseño y control de calidad de mezclas asfálticas. En base a los resultados obtenidos se decidió realizar una evaluación complementaria mediante un ensayo mecánico, el cual permite identificar las variaciones en los parámetros de diseño de una mezcla asfáltica. El ensayo utilizado fue el de compresión axial repetida.

El análisis de los resultados experimentales demuestra la pertinencia de utilizar un ensayo mecánico para la evaluación de las propiedades mecánicas a deformación permanente de una mezcla asfáltica, así como su implantación para el diseño de pavimentos asfálticos que van a estar sometidos a altos niveles de tránsito ($>20 \times 10^6$ ESAL's).

Abstract

The document presents the results of the evaluation of the properties of an asphalt mixture under permanent deformation by means of two different tests. The first one was the Hamburg Loaded Wheel Test, which is the most popular test in Mexico for the design and quality control of asphalt mixtures. Based on the results, it was decided to carry out a complementary evaluation by means of a mechanical test, which allows the identification of variations in the design parameters of an asphalt mix. The test used was the repeated axial compression test.

The analysis of the experimental results shows the relevance of using a mechanical test for the evaluation of the mechanical properties to permanent deformation of an asphalt mix, as well as its implementation for the design of asphalt pavements that are to be subjected to high levels of traffic ($>20 \times 10^6$ ESAL's).

Resumen ejecutivo

El incremento continuo en el nivel de tránsito (volumen e intensidad) ocasiona la aparición de fallas prematuras en el pavimento. Estas son debidas a los niveles de esfuerzos internos que se presentan en la carpeta asfáltica. Estos esfuerzos originan microfisuras que se transforman en fallas como son la deformación permanente y el agrietamiento por fatiga. Por esto, es importante realizar una adecuada evaluación de la mezcla asfáltica tanto en el diseño como en el control de calidad.

En lo referente a la evaluación de la deformación permanente, en México se utiliza un ensayo empírico tanto para el diseño como para el control de calidad. Sin embargo, en muchas ocasiones, de las evaluaciones realizadas se han obtenidos resultados incongruentes y se ha observado que no logra identificar pequeñas variaciones en los parámetros de diseño de la mezcla asfáltica (granulometría, % vacíos de aire, tipo de asfalto). Por lo cual el presente estudio se enfoca en este comportamiento realizando la evaluación de una mezcla asfáltica bajo diferentes condiciones de ensayo, estructura granulométrica y material asfáltico.

El primer capítulo describe los ensayos utilizados en el estudio; primeramente, el ensayo de rueda cargada de Hamburgo, el cual es el más utilizado en México para verificar la susceptibilidad a la deformación permanente de la mezcla asfáltica en el diseño y control de calidad de mezcla asfálticas, se describe brevemente el proceso de evaluación, así como las especificaciones utilizadas en México y en algunos de los departamentos de transporte de Estados Unidos. El segundo ensayo es el de compresión axial cíclica, el cual, a diferencia del primero, es un ensayo mecánico en el cual se pueden controlar diferentes parámetros como son el nivel de carga axial (σ_v), presión de confinamiento (σ_h), temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y frecuencia (Hz). Sin duda, la ejecución de este ensayo requiere de un conocimiento más amplio de instrumentación, tratamiento y análisis de datos. Pero esto nos permite identificar de manera precisa las variaciones de materiales y condiciones de ensayo.

El segundo capítulo presenta el modelo matemático utilizado para el análisis de comportamiento mecánico a deformación permanente de la mezcla asfáltica, el cual es un modelo de predicción en función del número de ciclos de aplicación de la carga y esfuerzo. Se presentan las variables del modelo general y reducido, así como una descripción para su cálculo.

El tercer capítulo describe la metodología experimental seguida en el estudio, presentando los resultados de la caracterización de los materiales, el diseño volumétrico de las mezclas y los criterios de realización de los ensayos. En este estudio se evaluaron dos diferentes granulometrías con material pétreo del mismo

banco de materiales, tres diferentes materiales asfálticos, los cuales fueron evaluados bajo los dos ensayos anteriormente descritos y analizados con el modelo ESSO.

El cuarto capítulo presenta el análisis de los resultados obtenidos en los ensayos de rueda cargada de Hamburgo y compresión axial cíclica. Los resultados nos demuestran que el ensayo de rueda cargada de Hamburgo no puede detectar variaciones en las características de la mezcla asfáltica bajo las condiciones estándar de ensayo (normativa mexicana), por lo cual es pertinente hacer modificaciones a las condiciones de ensayo dependiendo del tipo de mezcla que se deseé evaluar. El ensayo mecánico de compresión axial cíclica demostró poder identificar las variaciones en las características de la mezcla asfáltica y establecer parámetros mecánicos a deformación permanente como es la pendiente y número de ciclos a la falla.

En el último capítulo se realizó un análisis de los resultados con el modelo ESSO. Este análisis se realizó con el modelo reducido, utilizando 6 diferentes condiciones de ensayo para las dos granulometrías y tres materiales asfálticos propuestos para el estudio.

Introducción

El diseño y evaluación de las mezclas asfálticas ha evolucionado en los últimos años, pasando del uso de ensayos empíricos a la evaluación de propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica para evaluar el desempeño cuando forme parte de un pavimento asfáltico.

En México, estas evaluaciones empezaron en 2010 con el lanzamiento del protocolo AMAAC sobre “Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño”, el cual fue actualizando en 2013. En este protocolo de diseño se propuso evaluar el desempeño de la mezcla asfáltica bajo cuatro diferentes ensayos. Estos evalúan la susceptibilidad de la mezcla a la humedad y a la deformación permanente, el módulo dinámico y la fatiga.

En lo referente a la deformación permanente, se propuso utilizar el ensayo de rueda cargada de Hamburgo. Este ensayo se realiza a una temperatura de 50°C, aplicando 20000 pasadas de una carga de 705 N, al final de esta sollicitación la mezcla deberá cumplir con una deformación permanente menor a 10 mm. En la actualidad, este ensayo es utilizado para evaluar el desempeño de la mezcla asfáltica en la mayoría de los controles de calidad y verificaciones de las obras realizadas en México, demostrando ser eficiente en lo que se refiere a la prevención de formación de roderas prematuras en el pavimento.

Este año, el Instituto Mexicano del Transporte propone una metodología de diseño y control de mezclas asfálticas en donde la evaluación del desempeño se realiza en base al nivel de tránsito que va a circular en el pavimento. En esta propuesta además de cambiar el enfoque de la evaluación, se propone utilizar un ensayo mecánico adicional para evaluar la deformación permanente de la mezcla asfáltica.

La razón de esta inclusión es que, durante varios años, el laboratorio de asfaltos y mezclas asfálticas del IMT ha realizado evaluaciones de deformación permanente mediante el ensayo de rueda de Hamburgo y se ha observado que si la estructura granulométrica es seleccionada de manera adecuada, las mezclas cumplen con la especificación, independientemente si el asfalto es modificado. Sin embargo, en la práctica, los pavimentos presentan diferentes comportamientos en lo que se refiere a la deformación permanente. Por lo cual, es indispensable utilizar en el diseño de la mezcla asfáltica un ensayo que nos proporcione parámetros mecánicos para determinar su comportamiento a la deformación permanente.

El ensayo más utilizado para evaluar las propiedades a la deformación permanente de una mezcla asfáltica, es un ensayo de compresión axial cíclica, por lo que es el ensayo seleccionado para realizar este estudio. El estudio comprenderá realizar evaluaciones de la mezcla asfáltica variando tres parámetros (temperatura, carga,

frecuencia); con los resultados obtenidos se podrá establecer la influencia de los parámetros de diseño en el comportamiento mecánico a la deformación permanente y se podrá calibrar un modelo de comportamiento de la mezcla asfáltica a deformación permanente.

El estudio que a continuación se presenta tiene como objetivo principal establecer la capacidad de los ensayos Rueda Cargada de Hamburgo y compresión axial cíclica para identificar la variación de los parámetros de diseño de una mezcla asfáltica. Para esto se evaluaron dos estructuras granulométricas (TN 19 mm y TN 12.5 mm) y tres diferentes asfaltos (1 asfalto convencional y 2 asfaltos modificados). Cada una de estas condiciones fue evaluada y analizada en ambos ensayos. Finalmente se realizó una calibración del modelo matemático ESSO para predecir el comportamiento de deformación permanente de una mezcla asfáltica y realizar una comparación de los parámetros del modelo para cada una de las condiciones evaluadas.

1. Ensayos de evaluación de deformación permanente en laboratorio

1.1 Ensayo de rueda cargada de Hamburgo (RCH)

El ensayo se realiza de acuerdo con la norma AASHTO T324 descrita en el procedimiento *MAC-V. Método de prueba para determinar la resistencia a la deformación permanente y daño por humedad en una mezcla asfáltica en caliente compactada mediante la Rueda Cargada de Hamburgo* (IMT, Publicación Técnica No. 516) y siguiendo las recomendaciones de temperatura y tiempo de carga de la Recomendación AMAAC RA-01 (2017). Este método de prueba consiste en un procedimiento para evaluar la susceptibilidad a la humedad y a la formación de roderas en especímenes de una mezcla asfáltica en caliente.

El equipo de Rueda Cargada de Hamburgo (RCH) (Figura 1.1), consiste en dos ruedas de acero de 47 mm de ancho y 203.2 mm de diámetro que se mueven axialmente sobre un espécimen fabricado en el laboratorio o extraído en campo. La carga en cada rueda es de 71.6 ± 0.45 kg (705 ± 4.5 N) y su velocidad es de 30.5 cm/s aproximadamente, medida en el punto central, para generar 52 ± 2 pasadas por minuto. Tiene un baño de agua que controla la temperatura con una variación de $\pm 1^\circ\text{C}$, en un rango de 25 a 70°C . La deformación es medida con transductores (LVDT) con un rango de medición de 0 a 20 mm y una precisión de 0.01 mm.



Figura 1.1 Equipo Rueda Cargada de Hamburgo

El método consiste en la aplicación de una carga en movimiento, simulando el paso de los vehículos (mediante una rueda metálica cargada) sobre especímenes de mezcla asfáltica previamente acondicionados y sumergidos en agua dentro del equipo a $50 \pm 1^\circ\text{C}$. Se fabrican 4 especímenes de prueba utilizando un compactador

giratorio —de acuerdo con la norma ASTM D6925 descrita en el procedimiento *MAC-I. Método de prueba para la preparación y compactación de especímenes de mezclas asfálticas en caliente por medio del compactador giratorio*— con dimensiones de 150 mm de diámetro y altura de 38 – 100 mm, además de un contenido de vacíos de 7 ± 0.5 %. La altura de los especímenes se ajusta de acuerdo al tamaño nominal del agregado, así como a los moldes y a la marca del equipo utilizado. Los especímenes se deben cortar a una distancia aproximada de 16 mm del centro del espécimen al borde exterior. La distancia exacta de corte se deberá verificar con el tamaño de los moldes.

El baño de agua debe estar previamente acondicionado a la temperatura de ensayo y los especímenes previamente montados en los moldes deberán sumergirse por un tiempo de 30 min previo al inicio de la prueba. Se inicia el ensayo, programando el equipo para aplicar un total de 10,000 ciclos de carga, que es lo equivalente a 20,000 pasadas. Conforme el ensayo avanza, la mezcla se va deformando con el paso de la rueda y esta deformación se va registrando en un software de adquisición de datos como la profundidad de rodera contra el número de pasadas.

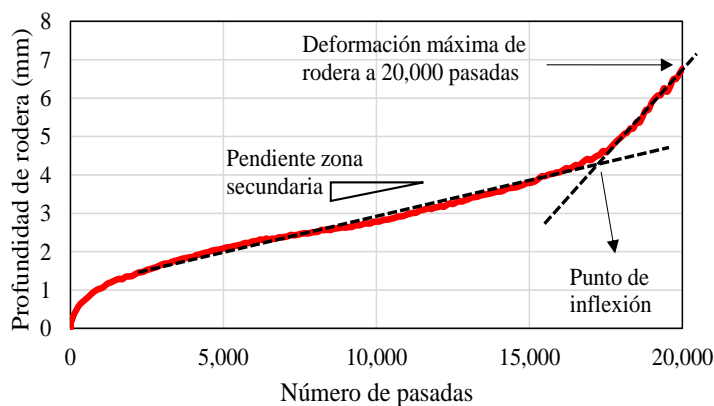


Figura 1.2 Análisis de resultados de la Rueda Cargada de Hamburgo

Finalmente, se reporta la deformación máxima de rodera a 20,000 pasadas, como el promedio de la rodera registrada en ambas ruedas. Como análisis adicional, se puede determinar la pendiente en la zona secundaria de la curva de deformación, conocida como tasa de deformación, así como el punto de inflexión, en caso de observarse el cambio hacia la zona terciaria (Figura 1.2).

La especificación del Protocolo de Diseño AMAAC indica que los especímenes deberán resistir cierto número de pasadas antes de alcanzar la deformación máxima permitida de 10 mm, dependiendo del nivel de diseño, como se indica en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Especificación para RCH

Nivel de tránsito	Pasadas mínimas para la deformación de 10 mm
Bajo	10,000
Medio	15,000
Alto y muy alto	20,000

1.1.1 Especificaciones actuales para la deformación permanente

En Estados Unidos, gracias a la facilidad para ejecutar la prueba y la buena correlación entre los resultados de campo y de laboratorio, numerosos departamentos de transporte utilizan la prueba de la Rueda Cargada de Hamburgo para complementar el diseño de mezclas asfálticas. Los estados que actualmente usan esta prueba como criterio de aceptación o rechazo de mezclas asfálticas son California, Colorado, Illinois, Iowa, Luisiana, Massachusetts, Montana, Oklahoma, Texas, Utah, Washington y Wisconsin.

Debido a que la norma AASHTO T324 no especifica una temperatura de prueba, todos los estados modificaron dicho método para reflejar las condiciones ambientales locales. Los estados de Texas, Colorado y Montana usan su propia norma —Tex-242F, CP-L5112 y MT-334, respectivamente—; los demás estados mencionados recurren a la norma AASHTO T324 o AASHTO T324 modificada, como su procedimiento de prueba.

En la Tabla 1.2 se presentan las especificaciones de los departamentos de transporte en Estados Unidos que utilizan la prueba como criterio de aceptación o rechazo de mezclas asfálticas.

En cuanto a las especificaciones o criterios de aceptación de la mezcla, la ciudad de Hamburgo (Alemania) especifica una deformación permanente de 4 mm y 20, 000 pasadas. En Estados Unidos, las especificaciones varían de un estado a otro. A continuación, se mencionan los criterios adoptados en algunos de los estados:

- California, Wisconsin y Iowa usan la deformación permanente (rodera final) y el punto de inflexión como criterio de aceptación y los demás estados únicamente la deformación permanente.
- California también especifica el número de pasadas del punto de inflexión para diferentes Grados PG.
- Iowa y Wisconsin especifican que la relación de la pendiente de desgranamiento con respecto a la pendiente del *creep* debe ser igual o mayor que 2.
- Illinois señala que “puede ser útil ejecutar cada prueba hasta 20,000 pasadas para recolectar datos adicionales sobre la susceptibilidad a la humedad”.

Tabla 1.2 Distintas especificaciones para ensayo RCH.

Departamento de Transporte	Temperatura de prueba (°C)	Grado de desempeño (PG)	Especificación	
			Núm. de pasadas	Deformación permanente (mm)
Texas	50	64 o menor	10 000	12.7
		70	15 000	
		76 o mayor	20 000	
Colorado	45	58	20 000 10 000	10.0 4.0 ^c
	50	64		
	55	70		
	60	76		
California	45	58	10 000	12.7
	50	64	15 000	
	55	70	20 000	
		76 o >	25 000	
Montana	44	58	10 000 ^a 15 000 ^b	12.7
	50	64		
	56	70		
Luisiana	50	58	12 000	12.7
		64	20 000	
		70 (OGFC)	7 500	
Illinois	50	58 o <	5 000	12.7
		64	7 500	
		70	15 000	
		76 o >	20 000	
Utah	46	58	20 000	20.0
	50	64		
	54	70		
Massachussetts	45	Todos		
Iowa			Relación pendiente3/pendiente2	≥ 2.0
Wisconsin			Relación pendiente3/pendiente2	≥ 2.0

a. Mezcla producida en planta

b. Mezcla de diseño

c. Profundidad de rodera > 4 mm antes de 10 000 pasadas se considera como falla

1.2 Ensayo de compresión axial cíclica (CAC)

El ensayo de compresión axial cíclica consiste en la aplicación de una carga haversine axial de compresión mediante el uso de un Equipo para Desempeño de la Mezcla Asfáltica (AMPT, por sus siglas en inglés). El equipo utilizado es marca GCTS, modelo ATM-025. El ensayo se basa en los parámetros indicados en la norma de referencia AASHTO TP79-15, donde inicialmente se deben fabricar

especímenes de 150 mm de diámetro y 170 mm de altura, para posteriormente extraer el núcleo y cortarlo con el objetivo de obtener especímenes de ensayo de 100 mm de diámetro y 150 mm de altura, como se observa en la Figura 1.3. El rango de vacíos es una variable a definir por el experimento.



Figura 1.3 Preparación de especímenes

Se colocan adaptadores de acero (pin) al espécimen para ajustar el transductor de variación lineal (LVDT) en sentido longitudinal del mismo y para poder realizar la medición del desplazamiento axial (Figura 1.4). Los desplazamientos axiales resultantes son medidos en función del tiempo y utilizados para calcular parámetros de deformación (ϵ) durante cada uno de los ciclos de aplicación de carga. La deformación es un parámetro adimensional que se expresa comúnmente en unidades de $\mu\epsilon$ (micro deformación) o % (porcentaje).



Figura 1.4 Adaptación de LVDT's

El ensayo se puede llevar a cabo con y sin confinamiento, así como a distintas temperaturas y frecuencias. En un procedimiento de carga repetida, un espécimen es sometido a un pulso de carga axial de compresión haversine mediante la aplicación de la carga durante 0.1 s y un periodo de relajación del material de 0.9 s, lo que completa un ciclo de 1.0 s y se traduce en una frecuencia de 10 Hz (Figura

1.5). La deformación total (ϵ_t) se descompone en deformación permanente (ϵ_p) y deformación recuperable (ϵ_r), como se indica en la Ecuación 1.

$$\epsilon_t = \epsilon_p + \epsilon_r \quad (1)$$

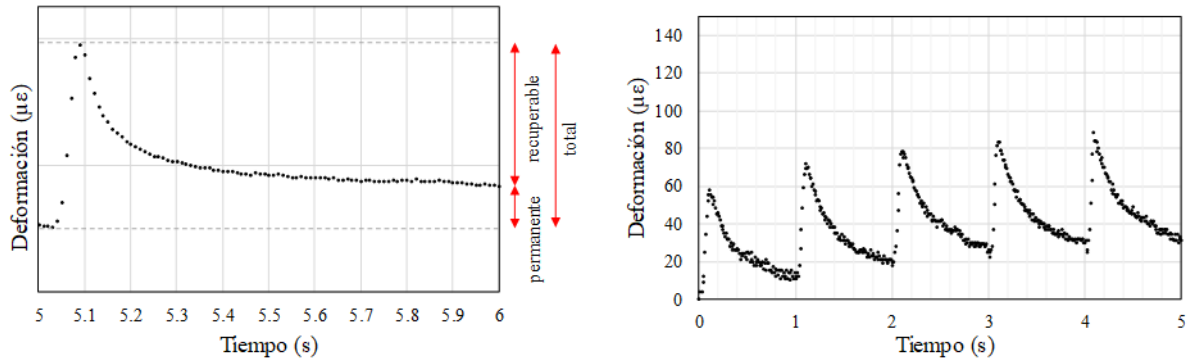


Figura 1.5 Deformación por ciclo, fr = 10 Hz

Se pueden utilizar distintos valores de frecuencias de carga y duración del periodo; por ejemplo, para este estudio se utilizaron 5 Hz de carga que equivale a la aplicación de la misma durante 0.2 s y un tiempo total del ciclo de 1.0 s, lo que equivale a un periodo de relajación del material de 0.8 s; y 1 Hz de carga que equivale a la aplicación de la misma durante 1.0 s y un tiempo total del ciclo de 2.0 s, lo que equivale a un periodo de relajación del material de 1.0 s. El pulso de carga para cada nivel de frecuencia se ilustra en las Figuras 1.6, 1.7, y 1.8, para 10, 5 y 1 Hz, respectivamente.

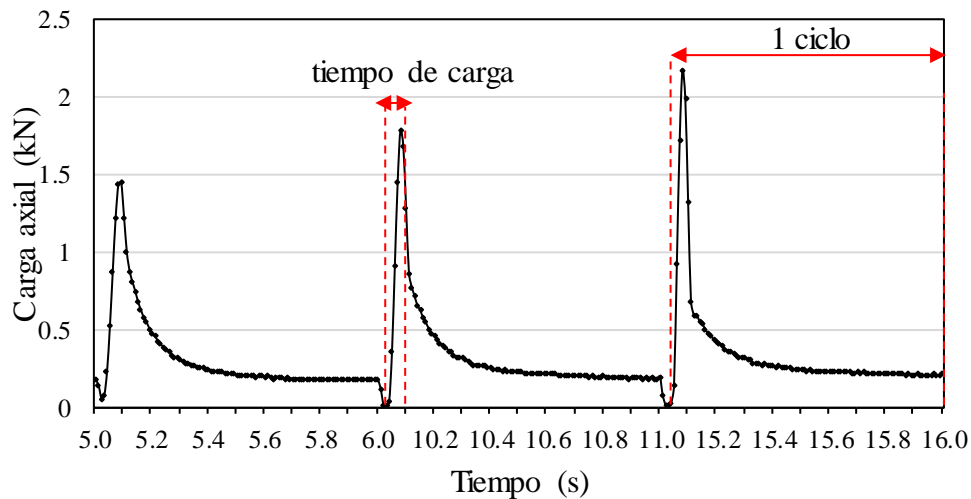


Figura 1.6 Aplicación de la carga, fr = 10 Hz

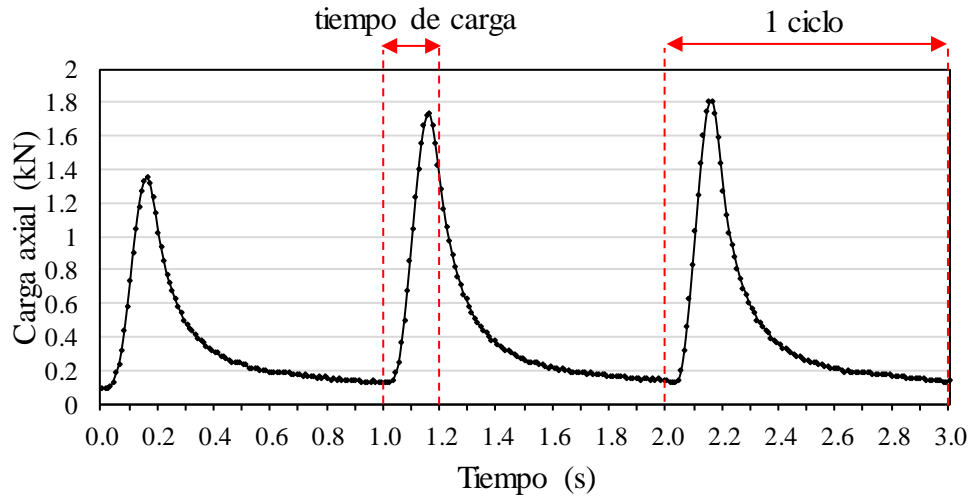


Figura 1.7 Aplicación de la carga, $f_r = 5$ Hz

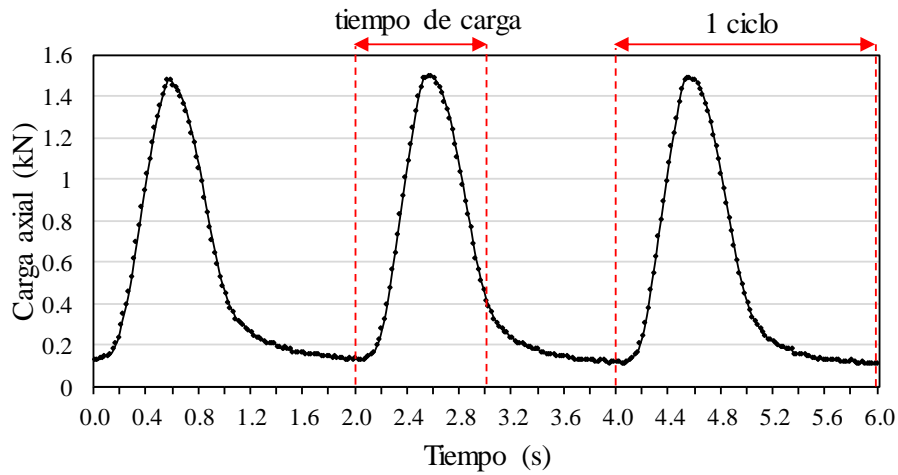


Figura 1.8 Aplicación de la carga, $f_r = 1$ Hz

El comportamiento general de la deformación permanente de una mezcla asfáltica presenta una curva de evolución como la que se observa en la Figura 1.9. En el análisis de la deformación permanente —de acuerdo con distintos autores— existen 3 fases y varios parámetros a considerar.

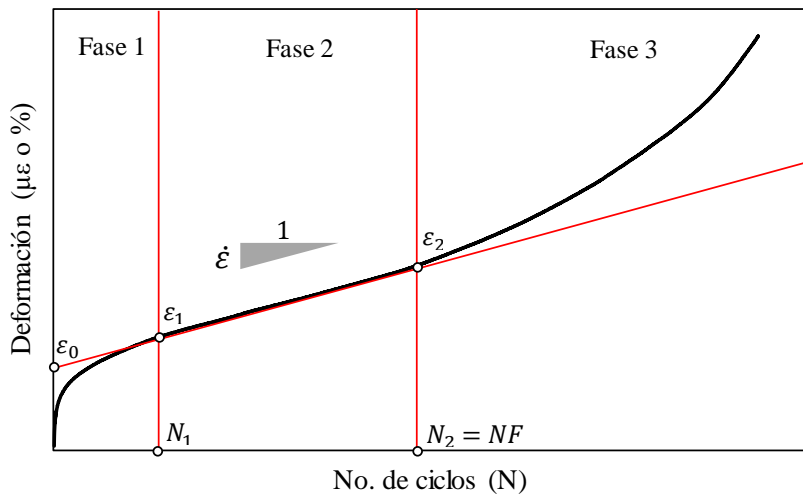


Figura 1.9 Evolución de la deformación

ϵ_0 = deformación inicial; se refiere a la intersección con el eje de las ordenadas de la curva de deformación de la Fase 2.

$\dot{\epsilon}$ = tasa de deformación; se refiere a la pendiente de la curva de evolución de la deformación en la Fase 2.

ϵ_1, N_1 = deformación y número de ciclos al finalizar la Fase 1.

ϵ_2, N_2 = deformación y número de ciclos al finalizar la Fase 2. El valor N_2 se conoce también como Número de Flujo.

Fase 1 = comprende el periodo para completar la acumulación inicial de deformación en el espécimen; la cual se incrementa rápidamente. Parte del inicio del ensayo hasta el punto donde la acumulación de la deformación comienza a ser constante. Se manifiesta comúnmente por el reacomodo de partículas de agregado al estar sometidas a un esfuerzo de confinamiento inicial.

Fase 2 = comprende el periodo en el que la pendiente de la curva de evolución de la deformación se mantiene constante, una vez finalizada la Fase 1 y hasta el inicio de un segundo cambio de pendiente drástico. Esta fase se caracteriza por indicar la tasa de deformación del material en un estado estable.

Fase 3 = comprende el periodo en el que la pendiente de la Fase 2 incrementa de magnitud drásticamente y hasta finalizar la aplicación de la carga. En esta fase se observa la falla del material y puede ocurrir de manera muy rápida y repentina dependiendo la rigidez de éste.

En un ensayo de compresión axial cíclica, el equipo mide la deformación longitudinal (mm) de compresión que va experimentando el espécimen con cada ciclo de aplicación de carga. Dicha deformación se mide en tres secciones del espécimen

por medio de los LVDT's y la convierte en microdeformación ($\mu\epsilon$) dividiéndola por la longitud del transductor de desplazamiento (101.6 mm = 4 in). La deformación medida por cada LVDT es promediada y así se obtiene un valor de deformación por ciclo. En cada ciclo se registra la deformación permanente y la deformación recuperable, mediante las cuales se puede calcular la deformación total (Ecuación 1).

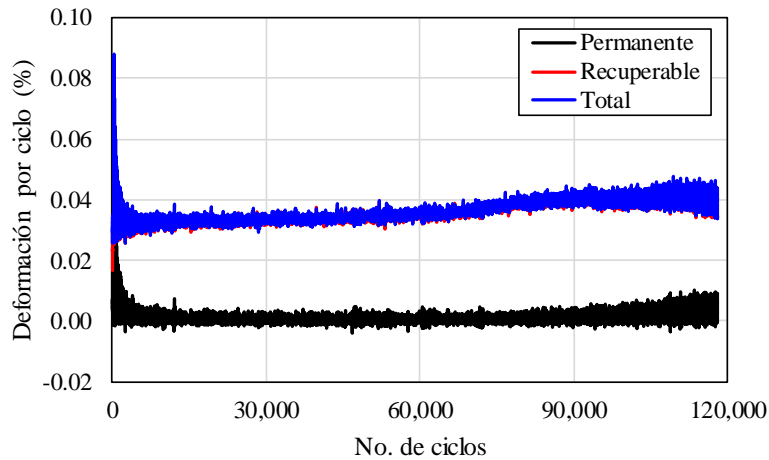


Figura 1.10 Evolución de la deformación por ciclo

En la Figura 1.10 se ilustra un ejemplo del comportamiento de la deformación permanente y recuperable por ciclo, mientras que en la Figura 1.11 se muestran las deformaciones acumuladas durante la ejecución de un ensayo. En un ensayo típico, la deformación recuperable se mantiene constante y suele ser de mayor magnitud que la deformación permanente.

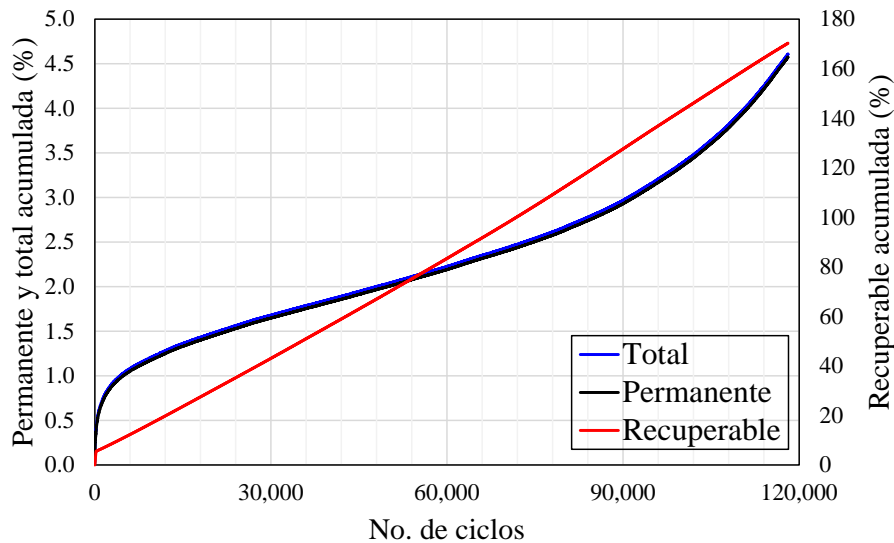


Figura 1.11 Evolución de la deformación acumulada

1.2.1 Consideraciones adicionales al ensayo de Compresión axial cíclica

No existe especificación por norma que establezca el número determinado de ciclos de aplicación de la carga para la ejecución del ensayo, ya que esto dependerá del objetivo de éste (determinar la tasa de deformación, determinar el número de flujo, etc.); sin embargo, se ha observado que un número de ciclos menor a 100,000 en ocasiones no es suficiente para establecer el verdadero valor de la tasa de deformación $\dot{\epsilon}$. Lo anterior se ejemplifica en la Figura 1.12, donde se puede observar cómo a 50,000 ciclos la tendencia de la tasa de deformación se reflejaría como la línea roja resultando en una sobreestimación del valor $\dot{\epsilon}$; por otro lado, conduciendo el ensayo hasta 100,000 ciclos, al menos, se obtendría una tasa de deformación real como lo indica la línea azul.

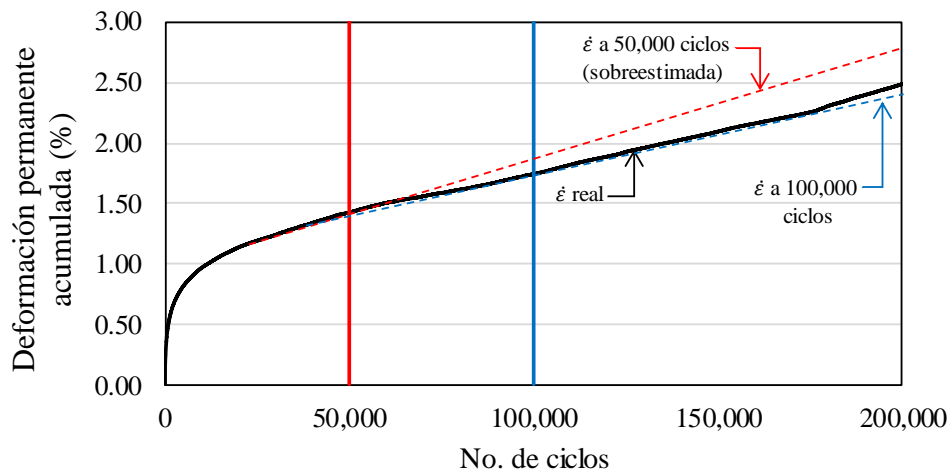


Figura 1.12 Estimación de $\dot{\epsilon}$

Por otro lado, es importante destacar que se debe contar con LVDT's con un rango de desplazamiento suficiente, para lograr observar la deformación completa en la Fase 2 y llegar a la Fase 3. Para la presente investigación se utilizaron LVDT's con un rango de lectura de 5.0 mm, el cual se considera como un rango suficiente para observar la segunda fase de la deformación permanente. En los ensayos con falla rápida (ej: $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $\sigma_V=600\text{ kPa}$) los especímenes se deforman hasta la condición de ruptura de la probeta, por lo cual se debe colocar un límite de desplazamiento en el equipo de ensayo para no dañar los LVDT's. En la Figura 1.11 se observa un espécimen antes y después de ser ensayado, donde puede verse cómo la carga aplicada genera una compresión axial y expansión lateral.

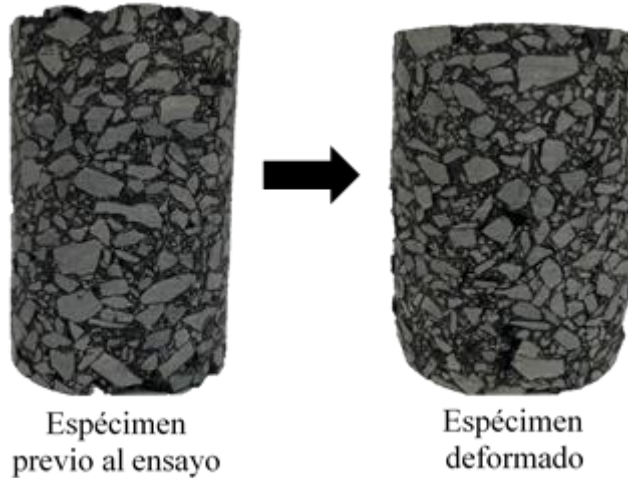


Figura 1.13 Deformación del espécimen durante el ensayo.

Lo anterior también es un criterio que considerar ya que, si los especímenes se destruyen durante la ejecución de la prueba, los LVDT's pueden dañarse. Otro criterio importante por considerar es la temperatura; se deberá contar con dos sensores de temperatura: el primero para controlar la temperatura dentro de la cámara de acondicionamiento y el segundo dentro de un espécimen testigo "dummy" que será la referencia de la temperatura al interior del espécimen. Para este tipo de ensayos de larga duración, se recomienda que el equipo se encuentre dentro de un cuarto con temperatura controlada debido a las fluctuaciones de temperatura durante el día y la noche que le generan inestabilidad en el control de ésta y por consiguiente se generan las mismas variaciones en la deformación del espécimen.

2. Modelo ESSO

A lo largo de las últimas décadas, se han ido desarrollado una gran variedad de modelos para predecir la evolución de la deformación permanente, los cuales se pueden clasificar de manera general en: (1) modelos de predicción en función del número de ciclos de aplicación de la carga, (2) modelos de predicción en función de esfuerzos, y (3) modelos de predicción en función del número de ciclos de aplicación de la carga y esfuerzos. En las Tablas 2.1 y 2.2 se indican los modelos comúnmente utilizados para predecir el comportamiento de la deformación en la mezcla asfáltica.

Tabla 2.1 Modelos de predicción de deformación permanente

Tipo	Descripción	Modelo	Referencia
Modelos de predicción en función del número de ciclos de aplicación de la carga	Barksdale	$\varepsilon_p = a_1 + b_1 \log N$ $\dot{\varepsilon} = \frac{b_1}{N} (N > 1)$	Barksdale 1972
	Ley de potencia	$\varepsilon_p = a * N^b$	Monismith et al. 1975
	Estado de Ohio	$\varepsilon_p = a * N^{1-m}$	Majidzadeh et al. 1980
	McLean & Monismith	$\log \varepsilon_p = C_0 + C_1(\log N) + C_2(\log N)^2 + C_3(\log N)^3$	Monismith et al. 1975
	Hornych	$\dot{\varepsilon} = A \left[1 - \left(\frac{N}{100} \right)^{-B} \right] + \varepsilon_p^1(100)$	Hornych et al. 1993
	Sweere	$\log(\dot{\varepsilon}) = a + b \log(N)$	Sweere 1990
	Superpave	$\log \varepsilon_p = \log \varepsilon_p(1) + S * \log N$	Lytton et al. 1993
Modelos de predicción en función de esfuerzos	Shenton	$\varepsilon_p = K * \left(\frac{q_{max}}{\sigma_3} \right)^a$	Shenton 1974

Tabla 2.2 Modelos de predicción de deformación permanente (continuación)

Tipo	Descripción	Modelo	Referencia
Modelos de predicción en función de esfuerzos	Lekarp	$\frac{\varepsilon_p(N_{ref})}{(L/p_0)} = a * \left(\frac{q}{p}\right)_{MAX}^b$	Lekarp y Dawson 1997
Modelos de predicción en función del número de ciclos de aplicación de la carga y esfuerzos	VESYS	$\dot{\varepsilon} = \mu * \varepsilon_r N^{-\alpha}$	Kenis 1977
	AASHTO 2002	$\log \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = \log C + 0.4262 * \log N$	Witczak 2001
	Tseng y Lytton	$\varepsilon_p = \varepsilon_0 e^{-(\rho/N)^\beta}$ $\dot{\varepsilon} = \varepsilon_0 \beta \rho^\beta \frac{N^\beta \sqrt{A}}{N^{(\beta+1)}}$	Tseng y Lytton 1989
	Modelo de tres etapas	$\varepsilon_p = a_T * N^{b_T}$ $\varepsilon_p = \varepsilon_{PS} + c_T(N - N_{PS})$ $\varepsilon_p = \varepsilon_{ST} + d_T(e^{f_T(N-N_{ST})} - 1)$	Zhou et al. 2004
	ESSO	$\log \dot{\varepsilon} = A + B \log \sigma_V + C \sigma_H$ $+ D(T_i - T_0)$ $+ F \log \left(\frac{f r_j^{T_i}}{f r_0^{T_0}} \right)$	Aussedat 1977

Fuente: Meunier, 2015.

2.1 Variables del modelo

El modelo ESSO —desarrollado por Aussedat (1977)— expresa la relación entre la tasa de deformación ($\dot{\varepsilon}$) bajo compresión cíclica y cuatro variables independientes: esfuerzo vertical (σ_V), esfuerzo horizontal o de confinamiento (σ_H), temperatura (T) y frecuencia (f_r). Este modelo, indicado en la Ecuación 2, contempla cinco constantes independientes (A, B, C, D, y F), las cuales son relacionadas al comportamiento de una mezcla asfáltica en específico, de acuerdo a un dominio de referencia que relaciona una temperatura T_0 , una frecuencia $f r_0^{T_0}$, y una presión de confinamiento σ_{h_0} . Aussedat fue el primero en proponer $T_0=30$ °C, $f r_0^{T_0}=10$ Hz y $\sigma_{H_0}=0$ Pa* 10^5 como dominio de referencia para definir las constantes del modelo ESSO.

$$\log \dot{\varepsilon} = A + B \log \sigma_V + C \sigma_H + D(T_i - T_0) + F \log \left(\frac{f r_i^{T_i}}{f r_0^{T_0}} \right) \quad (2)$$

En la Tabla 2.3 se indica la secuencia de 17 ensayos propuestos por Aussedat para la determinación de las constantes del modelo ESSO, rigiendo en la mayoría ellos los parámetros del dominio de referencia, y haciendo variaciones en dichos parámetros para detectar la influencia de cada uno en la deformación permanente de la mezcla asfáltica: $T = 30, 40$ y 50 °C, $\sigma_V = 2, 4$ y $6 \text{ Pa} \cdot 10^5$, $\sigma_H = 0, 1$ y $2 \text{ Pa} \cdot 10^5$, $f_r = 10, 5$ y 1 Hz .

Tabla 2.3 Ensayos para modelo ESSO

No. Ensayo	T_i [°C]	σ_V [Pa * 10 ⁵]	σ_H [Pa * 10 ⁵]	f_r [Hz]
1	30	2	0	10
2	30	4	0	10
3	30	6	0	10
4	30	6	1	10
5	30	6	2	10
6	40	2	0	10
7	40	4	0	10
8	40	6	0	10
9	50	2	0	10
10	50	4	0	10
11	50	6	0	10
12	30	2	0	5
13	30	4	0	5
14	30	6	0	5
15	30	2	0	1
16	30	4	0	1
17	30	6	0	1

De cada ensayo se determina el valor de la tasa de deformación $\dot{\varepsilon}$, siendo ésta la variación de la deformación permanente respecto al tiempo en la Fase 2 de la curva de evolución de la deformación.

Las constantes A y B evalúan la *relación base* entre la deformación y el esfuerzo vertical, por lo tanto, se determinan a partir de la relación lineal de la tasa de deformación ($\dot{\varepsilon}$) con la magnitud del esfuerzo vertical (σ_V) en el dominio logarítmico. Como se observa en la primera parte del modelo ($\log \dot{\varepsilon} = A + B \log \sigma_V$), las constantes A y B determinarán la posición inicial (pendiente e inicio) del comportamiento a la deformación de la mezcla; y posteriormente, las constantes C, D y F, únicamente la trasladarán verticalmente en el eje cartesiano.

En todos los casos, el modelo ESSO asume que la constante B es invariable en el dominio de referencia fijado por el usuario. Sin embargo, la magnitud de la constante A es fuertemente dependiente del dominio de referencia.

De cada ensayo se determina el valor de la tasa de deformación $\dot{\epsilon}$, siendo ésta la variación de la deformación permanente respecto al tiempo en la Fase 2 de la curva de evolución de la deformación.

Las constantes A y B evalúan la *relación base* entre la deformación y el esfuerzo vertical, por lo tanto, se determinan a partir de la relación lineal de la tasa de deformación ($\dot{\epsilon}$) con la magnitud del esfuerzo vertical (σ_V) en el dominio logarítmico. Como se observa en la primera parte del modelo ($\log \dot{\epsilon} = A + B \log \sigma_V$), las constantes A y B determinarán la posición inicial (pendiente e inicio) del comportamiento a la deformación de la mezcla; y posteriormente, las constantes C, D y F, únicamente la trasladarán verticalmente en el eje cartesiano.

En todos los casos, el modelo ESSO asume que la constante B es invariable en el dominio de referencia fijado por el usuario. Sin embargo, la magnitud de la constante A es fuertemente dependiente del dominio de referencia.

La constante C evalúa el efecto del esfuerzo horizontal (confinamiento), y se determina mediante la pendiente de la relación lineal, en el dominio semi-logarítmico, entre la ordenada al origen (a_{σ_H}) de la relación de la tasa de deformación ($\dot{\epsilon}$) con la magnitud del esfuerzo vertical (σ_V) a distintas presiones de confinamiento (σ_H), y la diferencia entre la presión de confinamiento de prueba y la condición de confinamiento del dominio ($\Delta\sigma_H = \sigma_{H_i} - \sigma_{H_0}$). Para la determinación de las ordenadas se asume que la pendiente de la relación esfuerzo-deformación se mantiene constante.

Similarmente, la constante D evalúa el efecto de la temperatura, y se determina mediante la pendiente de la relación lineal, en el dominio semi-logarítmico, entre la ordenada al origen (a_T) de la relación de la tasa de deformación ($\dot{\epsilon}$) con la magnitud del esfuerzo vertical (σ_V) a distintas temperaturas (T), y la diferencia entre la temperatura de ensayo y la temperatura del dominio ($\Delta T = T_i - T_0$).

Finalmente, la constante F evalúa el efecto de la frecuencia, y se determina mediante la pendiente de la relación lineal, en el dominio semi-logarítmico, entre la ordenada al origen (a_{fr}) de la relación de la tasa de deformación ($\dot{\epsilon}$) con la magnitud del esfuerzo vertical (σ_V) a distintas frecuencias (f_r), y la diferencia entre el logaritmo de la frecuencia de ensayo y el logaritmo de la frecuencia del dominio ($\Delta(\log fr) = \log fr_j^{T_i} - \log fr_0^{T_0}$).

2.2 Modelo reducido

Meunier et al. (2013) propusieron una reducción al modelo ESSO (Ecuación 3) utilizando el Principio de Superposición Tiempo-Temperatura (TTSP, por sus siglas en inglés), logrando así definir el modelo ESSO con 4 constantes y realizando tan solo 6 ensayos (Tabla 5). El parámetro $\log(a_T)$ se obtiene de la curva maestra de la mezcla asfáltica (Delgado et al. 2017) a una temperatura de referencia (T_{ref}).

$$\log \dot{\varepsilon} = A + B \log \sigma_V + C \sigma_H + D \left\{ (T_i - T_0) + \frac{(T_i - T_{ref})}{\log(a_T)} \log \left(\frac{f r_i^{T_i}}{f r_0^{T_0}} \right) \right\} \quad (3)$$

Los autores proponen utilizar el dominio de referencia: $T_0=50$ °C, $f r_0^{T_0}=1$ Hz y $\sigma_{h_0}=0$ Pa* 10^5 , en base a los resultados observados mediante el empleo de distintos dominios, siendo éste, el que mejor correlación presentó entre los datos experimentales y los resultados del modelo.

Las constantes A, B, C y D se obtienen de la misma manera que en el modelo ESSO de Aussedat, con la diferencia que las constantes A y B se determinan con tan solo 2 puntos, y se asume que la pendiente de la relación esfuerzo-deformación se mantiene constante también para la variación de la temperatura (constante D). La secuencia de ensayos propuesta se indica en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Ensayos para modelo ESSO reducido

<i>No. Ensayo</i>	T_i [°C]	σ_V [Pa* 10^5]	σ_H [Pa* 10^5]	$f r$ [Hz]
1	50	2	0	1
2	50	6	0	1
3	50	6	1	1
4	50	6	2	1
5	30	6	0	1
6	40	6	0	1

3. Metodología experimental

En este capítulo se describe la metodología experimental utilizada. Partiendo de la caracterización de los materiales y el diseño de las mezclas asfálticas, después la realización de los ensayos RCH y CAC. Por último, utilizando los parámetros del ensayo CAC se calibró el modelo de predicción de deformación permanente ESSO.

3.1 Etapa 1: Diseño de la mezcla asfáltica

3.1.1 Caracterización del material pétreo

El material pétreo utilizado para la fabricación de las mezclas fue producto del banco de material La Cañada, ubicado en el municipio de El Marqués en el estado de Querétaro; el agregado es de origen basáltico. En la Tabla 3.1 se muestran las características físicas del material, las cuales se determinaron de acuerdo con el Manual de Ensayos para Laboratorio: Agregados (AG) para Mezclas Asfálticas (IMT, Publicación Técnica No. 551).

Tabla 3.1 Evaluación del material pétreo

Fracción gruesa			
Característica	Norma	Resultado	Especificación
Desgaste Los Ángeles, %	ASTM C131	14.2	30 máx.
Desgaste Microdeval, %	ASTM D6928	12.8	18 máx.
Intemperismo acelerado, %	ASTM C88	3	15 máx. (sulfato de sodio)
Caras fracturadas, % (2 caras o más)	ASTM D5821	99	90 mín.
Partículas planas y alargadas, %	ASTM D4791	2.4	5 a 1 %, 10 máx
Adherencia con el asfalto, %	AMAAC RA-08	70	90 mín.
Fracción fina			
Característica	Norma	Resultado	Especificación
Equivalente de arena, %	ASTM D 2419	62.83	50 mín.
Angularidad, %	AASHTO T 304	47.4	40 mín.
Azul de metileno, mg/g	AMAAC RA-05	28	15 máx.

*El agregado no cumplió con los ensayos azul de metileno y adherencia del asfalto, por lo cual se utilizó un promotor de adherencia en el asfalto para solventar la deficiencia.

3.1.2 Caracterización del material asfáltico

Se utilizaron tres tipos de materiales asfálticos: PG 64V-16 con promotor de adherencia (A1), PG 76H-22 modificado con SBS (A2) y PG 76H-16 modificado con ELVALOY 0.75% y ácido polifosfórico 0.10% (A3). En la Tabla 3.2 se muestra la caracterización de los 3 diferentes ligantes asfálticos.

Tabla 3.2 Características de calidad del material asfáltico

Propiedades Físicas						
Ensayo	Norma	Tipo asfalto	Temperatura de prueba	Parámetro	Resultado	Especificación
Condición original						
Recuperación elástica por torsión	M-MMP-4-05-024-02	A1	25 °C	Re	8	-
		A2			53.25 %	35% mín.
		A3			36.50	
Punto de reblandecimiento	ASTM D36-14	A1	N/A	Pr	50.50 °C	N/A
		A2			61.90 °C	
		A3			60.87 °C	
Grado PG - ASTM D6373-15						
Ensayo	Norma	Tipo asfalto	Temperatura de prueba	Parámetro	Resultado	Especificación
Condición original						
Viscosidad	ASTM D4402-15	A1	135 °C	η	0.466 Pa·s	≤ 3 Pa·s
		A2			0.927 Pa·s	
		A3			0.871 Pa·s	
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	A1	64 °C	G*/sen δ	1.980 kPa	≥ 1 kPa
		A2	76 °C		1.505 kPa	
		A3	76 °C		1.450 kPa	
Después de envejecimiento en Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO), ASTM D2878-12						
Cambio de masa	ASTM D2872-12	A1	163 °C	CM	-0.463 %	$\leq 1.0\%$
		A2			-0.226 %	
		A3			-0.312 %	
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	A1	64 °C	G*/sen δ	8.156 kPa	≥ 2.2 kPa
		A2	76 °C		3.545 kPa	
		A3	76 °C		3.139 kPa	
Después de envejecimiento en Vasija de Presión y Temperatura (PAV), ASTM D6521-13						
Envejecimiento PAV	ASTM D6521-13	A1	100 °C		N/A	
		A2				
		A3				
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	A1	28 °C	G*(sen δ)	2659 kPa	$\leq 5,000$ kPa
		A2	31 °C		1001 kPa	
		A3	31 °C		1718 kPa	
Reómetro de Viga a Flexión (BBR)	ASTM D6648-08	A1	-6 °C	S	72.70 MPa	≤ 300 MPa
				m	0.329	≥ 0.300
		A2	-12 °C	S	151.0 MPa	≤ 300 MPa
				m	0.341	≥ 0.300
		A3	-6 °C	S	74.80 MPa	≤ 300 MPa
				m	0.325	≥ 0.300
Clasificación MSCR N·CMT·4·05·004/18						
Ensayo	Norma	Tipo asfalto	Temperatura de prueba	Jnr 3.2kPa (kPa ⁻¹)	RE 3.2kPa (%)	Clasificación
MSCR (Multi- Stress Creep Recovery)	N·CMT·4·05·004/18	A1	64 °C	0.9101	6.68 %	H
		A2	76 °C	1.3748	35.34 %	H
		A3	76 °C	1.3794	23.05 %	V
Temperatura de mezclado y compactación						
	Temperatura de mezclado	A1	160 ± 3 °C			
		A2-A3	170 ± 3 °C			
	Temperatura de compactación	A1	150 ± 3 °C			
		A2-A3	160 ± 3 °C			

3.1.3 Estructura granulométrica

La granulometría de cada fracción se determinó con base en lo establecido en la norma AG-II. Método de prueba para el análisis granulométrico de agregados finos y gruesos y se combinaron tres fracciones (grueso, sello y fino) para obtener la granulometría de diseño con un tamaño nominal de 12.5 mm (1/2") y 19.0 mm (3/4").

En las Figuras 3.1 y 3.2 se visualiza la representación gráfica de la estructura granular con los puntos de control. El eje de las abscisas representa la abertura de la malla, elevada a la potencia 0.45; mientras que el eje de las ordenadas el porcentaje de material que pasa cada malla.

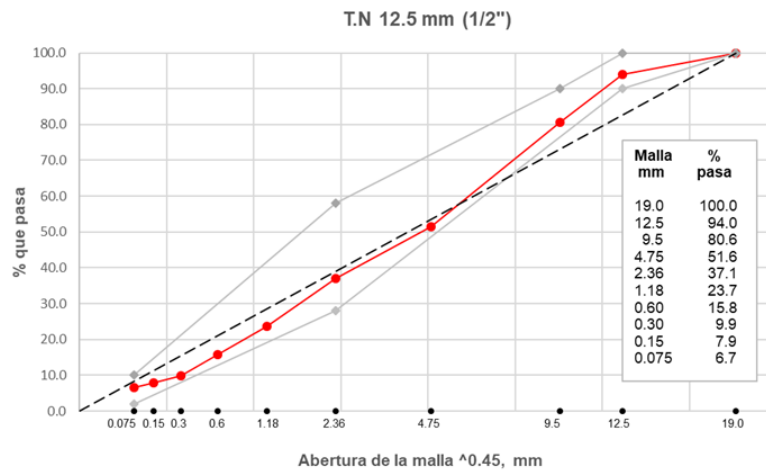


Figura 3.1 Granulometría TN 12.5 mm 1/2"

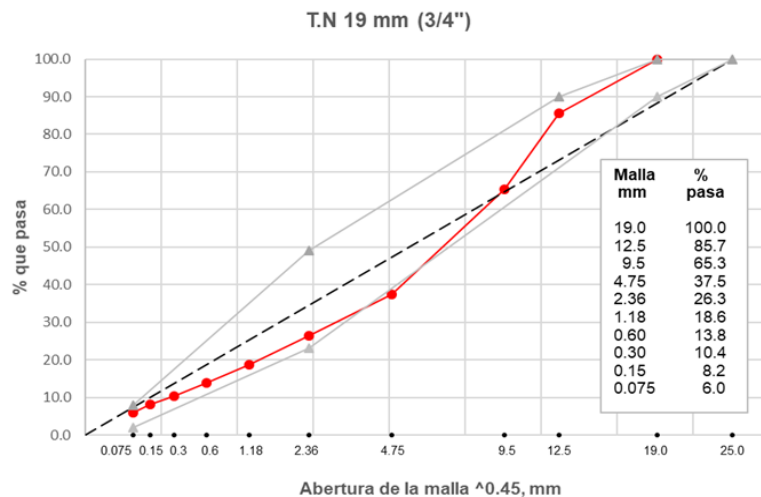


Figura 3.2 Granulometría TN 19 mm 3/4"

3.1.4 Diseño volumétrico

Se diseñaron dos mezclas para soportar un nivel de tránsito alto (de 3 a 30 millones de ejes equivalentes), con granulometrías de TN12.5 mm y TN 19.0 mm. Por lo anterior, para el nivel de tránsito y granulometría definida, los requerimientos volumétricos que debe cumplir la mezcla asfáltica son: 4% de vacíos de aire, vacíos del agregado mineral mayor a 13 y 14%, vacíos llenos con asfalto entre 65 y 75%, una relación de filler-asfalto entre 0.6 y 1.2 y la compactación de los especímenes de diseño son a 100 giros, con revisión de los niveles de compactación al Nini y Nmax a 8 y 160 giros, respectivamente. Los resultados de los diseños volumétricos de las dos mezclas se presentan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Diseños volumétricos de las mezclas.

	Tamaño Nominal (TN) de la mezcla asfáltica	
	12.5 mm (1/2")	19.0 mm (3/4")
CA, %	5.5	5.4
G _{sb}	2.674	2.691
G _{se}	2.794	2.774
VA, %	4	4.3
VMA, %	13.35	14.52
VFA %	70.03	70.11
P _{ba} , %	1.66	1.1
P _{be} , %	3.93	5.40
DP, %	1.7	1.12
G _{mm}	2.554	2.542
G _{mb}	2.447	2.432

3.2 Etapa 2: Evaluación del desempeño a deformación permanente

En esta etapa se evalúa el desempeño de las mezclas con los diferentes ensayos de deformación permanente mediante el ensayo empírico (RCH) y el ensayo mecánico (CAC), variando granulometrías, tamaño nominal y diferente ligante asfáltico.

3.2.1 Rueda cargada de Hamburgo

En el presente estudio se evaluó el efecto de la temperatura de prueba y la granulometría en los resultados de RCH para determinar la capacidad del ensayo para discriminar el comportamiento de diferentes tipos de ligantes asfálticos.

De cada mezcla se fabricaron 12 especímenes de prueba dado que cada una de ellas se evaluaría a tres distintas temperaturas: 50 °C, 55 °C y 60 °C. En resumen, se evaluarán 6 mezclas distintas a 3 temperaturas diferentes, dando un total de 18 ensayos. Los ensayos se ejecutaron hasta 30,000 pasadas de la rueda de carga, con la finalidad de observar si se presentaba el desgranamiento de la mezcla y obtener más información sobre el comportamiento de la misma.

Tabla 3.4 Total de ensayos para RCH

Granulometría	Material asfáltico	Nomenclatura		
TN 12.5 mm	A1	A1.TN12.5.T50	A1.TN12.5.T55	A1.TN12.5.T60
	A2	A2.TN12.5.T50	A2.TN12.5.T55	A2.TN12.5.T60
	A3	A3.TN12.5.T50	A3.TN12.5.T55	A3.TN12.5.T60
TN19.0 mm	A1	A1.TN19.0.T50	A1.TN19.0.T55	A1.TN19.0.T60
	A2	A2.TN19.0.T50	A2.TN19.0.T55	A2.TN19.0.T60
	A3	A3.TN19.0.T50	A3.TN19.0.T55	A3.TN19.0.T60

Para cada ensayo se utilizaron 4 especímenes, los cuales se cortaron a una distancia aproximada de 16 mm del centro del espécimen al borde exterior, para ser montadas en moldes de polietileno, como se muestra en la Figura 3.3



Figura 3.3 Corte de especímenes para ensayo RCH

Una vez cortados y montados los especímenes, se procedió a registrar los datos del ensayo en software y se esperó a que la temperatura del agua alcanzara la temperatura de ensayo (50, 55 y 60°C). Una vez teniendo el agua a la temperatura deseada, se acondiciona la muestra sumergiéndola en el agua durante 30 minutos y se inicia la prueba.



Figura 3.4 Especímenes después de ser ensayados

3.2.2 Compresión Axial Cíclica

Se eligió trabajar con una variación de temperaturas de 30, 40 y 50 °C, mientras que el esfuerzo vertical se mantuvo en 600 kPa con una frecuencia de carga constante de 1 Hz y un tiempo por ciclo de 2 s, lo que equivale a 1.0 s de carga y 1.0 s de relajación. El esfuerzo de confinamiento se mantuvo nulo (0 kPa) para esta fase de las evaluaciones.

Se fabricaron especímenes de 150 mm de diámetro y 170 mm de altura, para posteriormente extraer el núcleo y cortarlo con el objetivo de obtener especímenes de ensayo de 100 mm de diámetro y 150 mm de altura, como se observa en la Figura 3.5. El rango de vacíos de 4.



Figura 3.5 Preparación de especímenes

Se colocaron adaptadores de acero (pin) al espécimen para ajustar el transductor de variación lineal (LVDT) en sentido longitudinal del mismo y se pueda realizar la medición del desplazamiento axial (Figura 3.6). Los desplazamientos axiales resultantes son medidos en función del tiempo y utilizados para calcular parámetros de deformación (ϵ) durante cada uno de los ciclos de aplicación de carga. La

deformación es un parámetro adimensional que se expresa comúnmente en unidades de $\mu\varepsilon$ (micro deformación) o % (porcentaje).



Figura 3.6 Instrumentación de los LVDT's

Los especímenes son sometidos a un pulso de carga axial de compresión haversine mediante la aplicación de la carga durante 1.0 s y un periodo de relajación del material de 1.0 s, lo que completa un ciclo de 2.0 s y se traduce en una frecuencia de 1 Hz (Figura 3.7). La deformación total (ε_t) se descompone en deformación permanente (ε_p) y deformación recuperable (ε_r), como se indica en la Ecuación 1.

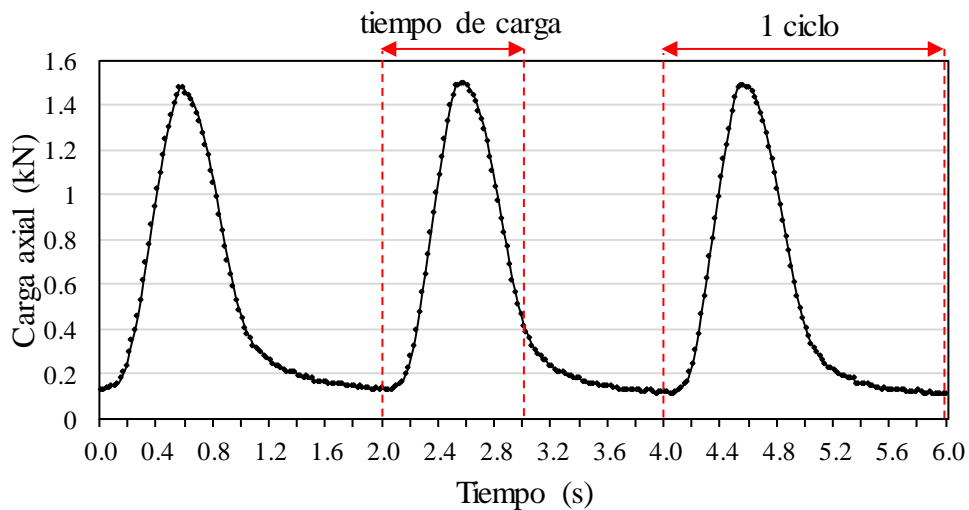


Figura 3.7 Aplicación de carga, fr = 1 Hz

3.3 Etapa 3: Calibración del modelo ESSO

Para llevar a cabo la calibración del modelo se utilizó la mezcla asfáltica con agregado de origen basáltico, asfalto PG 76H-16 (A3), y granulometría densa tamaño nominal $\frac{1}{2}$ ". Los parámetros del diseño completo se pueden observar en la

Etapa 1 de este mismo capítulo, así como las características de los materiales mencionados.

Se realizaron inicialmente los ensayos de compresión axial cíclica indicados en la Tabla 2.4 para obtener el valor de la tasa de deformación ($\dot{\epsilon}$) como la pendiente de la Fase 2 en la curva de evolución de la deformación. La tasa de deformación se estableció en unidades de porcentaje [mm/mm * 100] sobre 1'000,000 de ciclos [Mc] y se ejecutaron ensayos con una duración de 100,000 ciclos para la frecuencia de 1 Hz (2 seg por ciclo), lo que equivale a la misma duración (2.3 días).

Los resultados de cada ensayo requerido para realizar la calibración del modelo se indican en la Tabla 3.5. De cada ensayo se calculó únicamente el valor de la tasa de deformación ($\dot{\epsilon}$), como la pendiente de la Fase 2 (fase estable en donde la deformación permanente de la mezcla se incrementa de manera constante).

Tabla 3.5 Resultados para modelo ESSO reducido

No. Ensayo	T_i (°C)	σ_V (Pa*10⁵)	σ_H (Pa*10⁵)	fr (Hz)	$\dot{\epsilon}$ (%/Mc)
1	50	2	0	1	1.408
2	50	6	0	1	172.924
3	50	6	1	1	105.712
4	50	6	2	1	81.333
5	30	6	0	1	2.375
6	40	6	0	1	20.634

4. Análisis del comportamiento de la mezcla a deformación permanente

En este capítulo se analiza el efecto de tres variables de diseño como son la granulometría, el tipo de asfalto y la temperatura de ensayo en el comportamiento a la deformación permanente de la mezcla asfáltica mediante ensayos de rueda cargada de Hamburgo y el ensayo de compresión axial cíclica.

4.1 Análisis del ensayo de rueda cargada de Hamburgo

Para cada una de las granulometrías y mezclas asfálticas se ejecutaron ensayos a tres diferentes temperaturas (50, 55 y 60 °C), siguiendo el procedimiento de prueba MAC-V. “Método de prueba para determinar la resistencia a la deformación permanente y daño por humedad en una mezcla asfáltica en caliente mediante la rueda cargada de Hamburgo”. En lo referente a número de pasadas, los ensayos se realizaron hasta 30 000 pasadas de la rueda de carga.

4.1.1 Influencia de la aplicación de los ciclos de carga

El primer análisis se realizó en las condiciones establecidas para la prueba en México, Figura 4.1. Este primer análisis deja ver que, si se tiene un material pétreo de buena calidad y una estructura granulométrica adecuada, el ensayo de rueda cargada de Hamburgo, no logra discriminar la influencia del tamaño nominal del agregado y el tipo de asfalto utilizado.

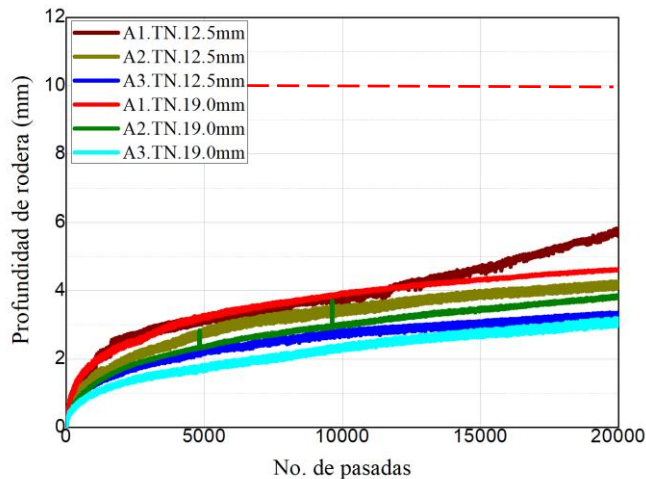


Figura 4.1 Deformación permanente para criterio de aceptación en México (50°C y 20,000 pasadas)

La profundidad de rodera registrada para todas las variaciones se mantiene en un rango de 4 ± 2 mm, indicando que prácticamente todas las mezclas se comportarían similar a la deformación permanente.

Figura 4.2 presenta la deformación permanente hasta 30 000 pasadas; se observa nuevamente que prácticamente todas las muestras cumplen con el requerimiento de 10 mm de profundidad de rodera máximo, siendo solo la muestras A1.TN.12.5 la que presentó una degradación excesiva con el aumento del número de pasadas, la que la hace inadecuada para condiciones de tránsito extremo.

Otro punto importante es que aun y cuando hay un aumento en la profundidad de rodera no se observa una diferencia significativa entre las diferentes mezclas asfálticas evaluadas. Esto confirma que el ensayo no puede discriminar las variaciones en las características de la mezcla asfáltica cuando se utilizan las condiciones de ensayo establecidas en la especificación mexicana (50°C y 20,000 pasadas).

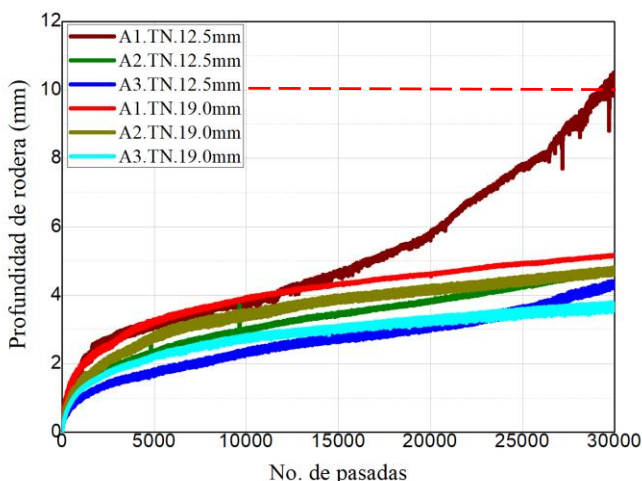


Figura 4.2 Deformación permanente a 50°C y 30,000 pasadas

4.1.2 Influencia del asfalto y la granulometría

Como se mencionó anteriormente, para evaluar el efecto del asfalto y la granulometría se realizaron ensayos a 50 , 55 y 60°C , las líneas punteadas indican los límites establecidos en la especificación, línea negra límite de repeticiones de carga y línea roja límite de profundidad de rodera.

Los resultados de las pruebas son presentados en las Figura 4.3 a 4.5. En estas figuras se ve claramente el efecto de la temperatura para cada una de las mezclas evaluadas, presentándose un incremento en la deformación permanente con el aumento de la temperatura, la cual está en función del tipo de granulometría y asfalto. También se puede observar que las mezclas con TN de 19.0 mm, tienen una mayor resistencia y soportan casi todas las condiciones de ensayo, excepto el PG 64-16 (A1) a 60°C , Esto puede ser un indicador de que si la estructura granular

no es muy resistente van a presentarse fallas a deformación permanente en condiciones extremas, aun y cuando se utilicen asfaltos modificados.

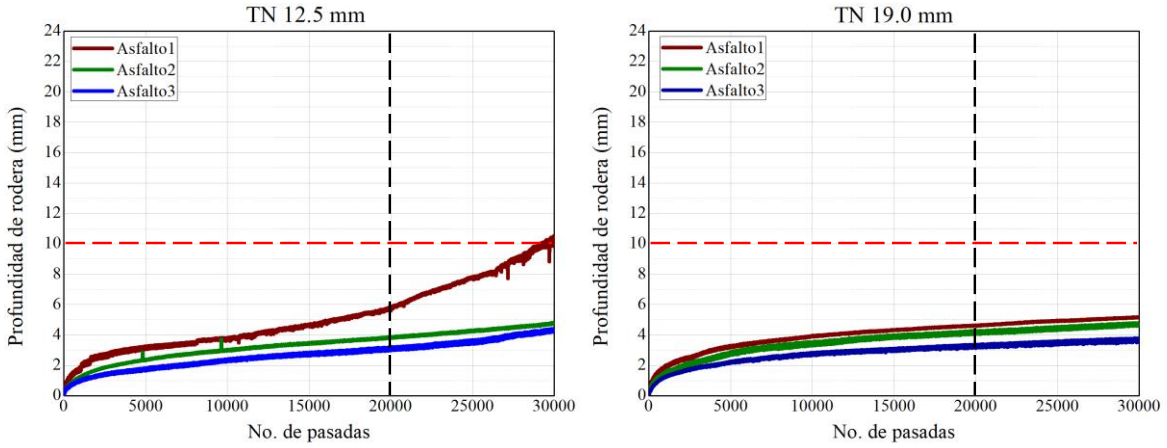


Figura 4.3 Evolución de la deformación permanente a 50°C

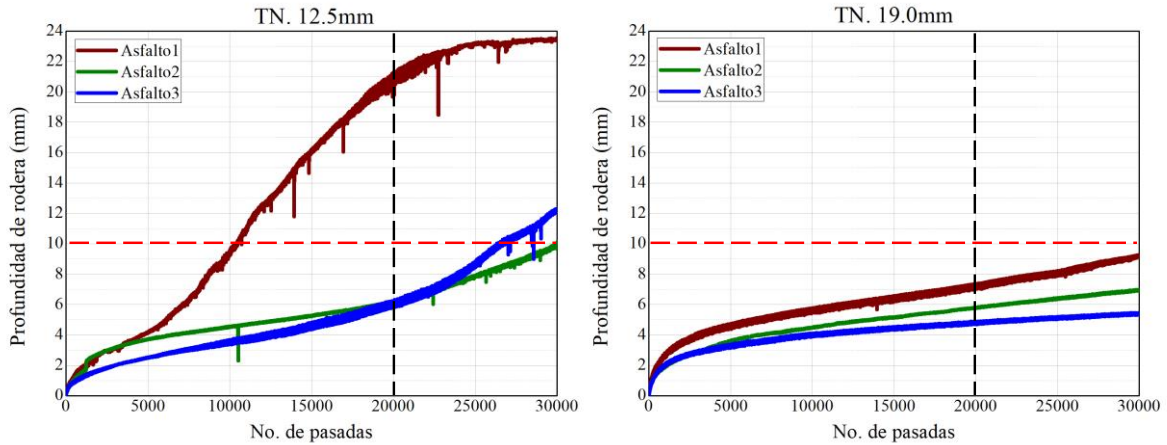


Figura 4.4 Evolución de la deformación permanente a 55°C

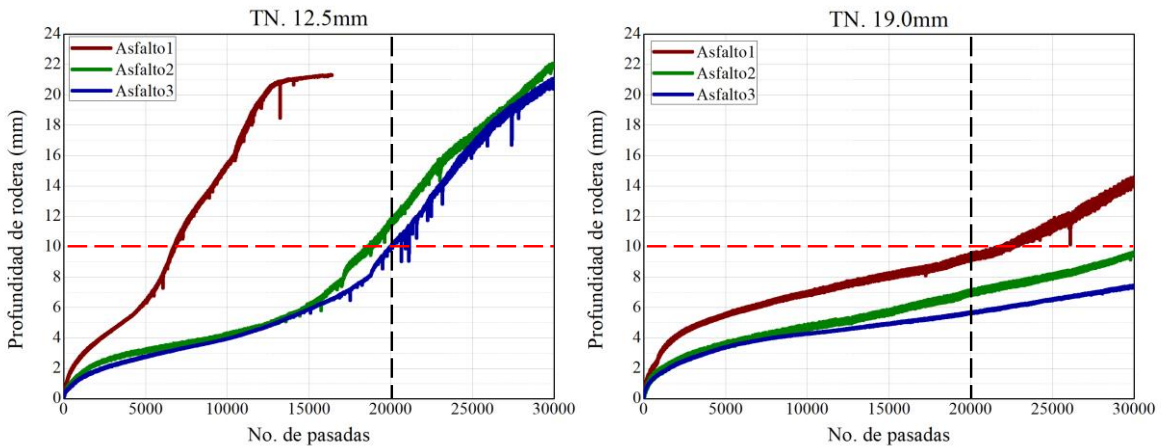


Figura 4.5 Evolución de la deformación permanente a 60°C

En las mezclas con TN de 12.5 mm ($1/2''$) no se logra ver el efecto de los diferentes tipos de asfalto, ya que la estructura granulométrica no es tan resistente y tiene una mayor influencia en la deformación permanente de la mezcla asfáltica. Con estos resultados se observa la influencia clara del TN, siendo que el aumento del mismo mejora las propiedades mecánicas a deformación permanente de una mezcla asfáltica.

4.1.3 Influencia de la temperatura

En las Figura 4.6 a 4.8 se presenta la influencia de la temperatura en los diferentes asfaltos analizados. De los resultados se puede observar la influencia del tamaño nominal, las mezclas de TN 19.0 mm presentan menor deformación permanente en todas las temperaturas para los tres asfaltos evaluados. En las mezclas con el mismo TN 19.0 mm y diferente asfalto, se verifica que la inclusión del polímero al asfalto mejora las propiedades mecánicas de la mezcla en todas las temperaturas de prueba. Asimismo, estas mezclas no sufrieron desgranamiento.

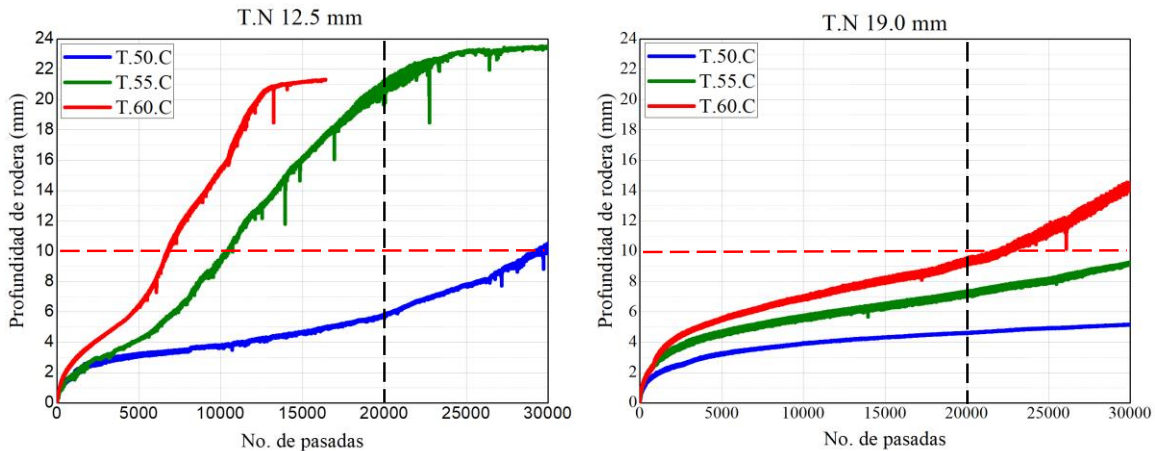


Figura 4.6 Evolución de la deformación permanente de la mezcla con A1

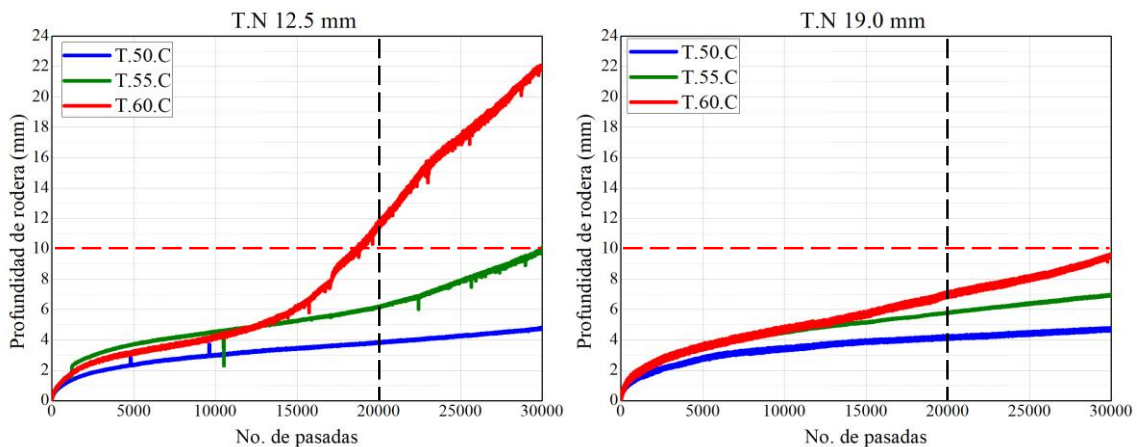


Figura 4.7 Evolución de la deformación permanente de la mezcla con A2

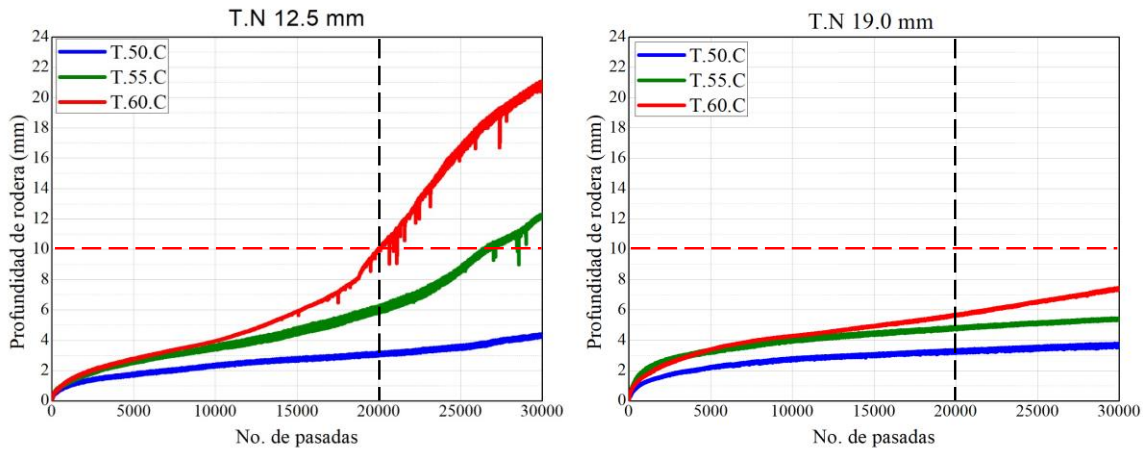


Figura 4.8 Evolución de la deformación permanente de la mezcla con A3

En las Figura 4.6 podemos observar que el asfalto A1 y una mezcla con TN de 19 mm funciona correctamente bajo condiciones estándar del ensayo, y solamente presentó deficiencias para condiciones extremas (60°C y 30000 pasadas). Sin embargo, al utilizar este mismo asfalto en una mezcla con un TN de 12.5 mm, que solo cumple para una condición estándar de evaluación (50°C y 20000 pasadas), y para cualquier aumento en las condiciones de evaluación (temperatura y pasadas), la mezcla ya no cumple con el requerimiento de 10 mm establecido en la especificación.

En las Figura 4.7 y 4.8, con una mezcla con TN de 19.0 mm se observa que cuando la estructura granular es resistente y se tiene un asfalto modificado, la mezcla puede resistir condiciones extremas de tránsito y de temperatura. Teniendo una granulometría de TN de 12.5 mm a 20 000 repeticiones de carga puede soportar las diferentes temperaturas (efecto del polímero), pero no el tránsito extremo (efecto de la granulometría).

Estos resultados dejan ver la influencia de la temperatura en el comportamiento a deformación permanente de la mezcla asfáltica, y siendo que a la temperatura de 50°C (especificación en México), el ensayo no puede detectar la variación ni del tipo de asfalto ni de la granulometría, cabe pensar en una modificación de los criterios de ensayo, variando la temperatura y el número de pasadas dependiendo del tipo de asfalto utilizado como se realiza en varios de los departamentos de transporte de Estados Unidos (Tabla 1.2).

La Figura 4.9 y 4.10 presenta el resumen de las deformaciones permanentes máximas de las mezclas ensayadas. Se observa que los asfaltos aun siendo clasificaciones “H o V” en el ensayo de MSCR, no aseguran que la mezcla tenga un buen desempeño. Esto es porque el factor de mayor influencia en la deformación permanente de la mezcla asfáltica es la estructura granulométrica y no el tipo de asfalto. Sin duda, un asfalto modificado con polímero mejora el comportamiento a deformación permanente, generalmente por la mejoría en su componente elástico (reducción del ángulo de fase), pero si la estructura granular es deficiente el efecto

del polímero no será suficiente para asegurar un correcto comportamiento a deformación permanente. Esto se puede ver en las tendencias de la evolución de la deformación permanente a diferentes temperaturas en donde las mezclas con un TN de 19 mm se observa claramente el efecto de la temperatura y el tipo de asfalto, mientras que en las mezclas de TN 12.5 mm las condiciones del ensayo estándar no permiten ver el efecto del asfalto modificado.

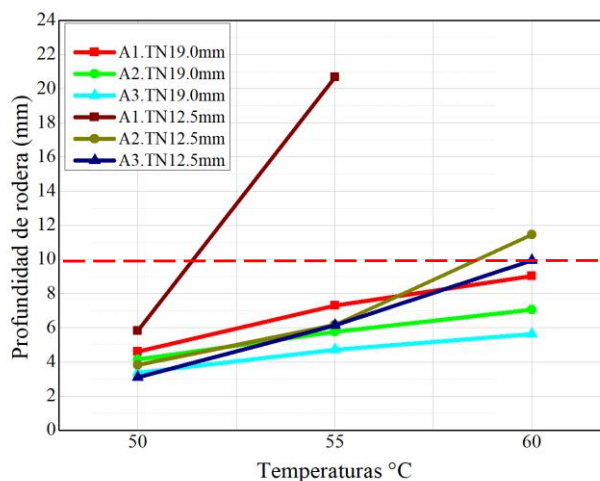


Figura 4.9 Efecto de temperatura en la evolución de la deformación permanente a 20000 repeticiones de carga

Otro punto importante que cabe señalar es la pendiente de evolución de la deformación permanente con la temperatura de prueba, las mezclas con tamaño nominal de 12.5 mm ($\frac{1}{2}$ ") son más sensibles a la temperatura de prueba (mayor pendiente), que las mezclas con tamaño nominal de 19.0 mm ($\frac{3}{4}$ "), indicando que el incremento del tamaño nominal de la mezcla mejora la estabilidad estructural. Por lo tanto, es conveniente hacer una reflexión sobre la condición de ensayo establecida en México, la cual es única para cualquier tipo de ligante asfáltico.

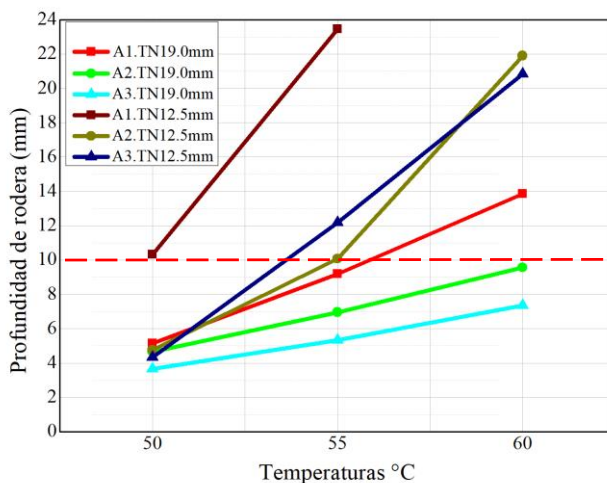


Figura 4.10 Efecto de temperatura en la evolución de la deformación permanente a 30000 repeticiones de carga

4.1.4 Conclusiones del ensayo de RCH

En este estudio se evaluaron mezclas con 3 diferentes asfaltos PG 64V-16, PG 76H-16 y PG 76H-22, cada uno de ellos en granulometrías de TN 12.5 y 19.0 mm, a diferentes temperaturas de prueba (50, 55 y 60 °C) y repeticiones de carga de 20000 y 30000 pasadas en la rueda cargada de Hamburgo. Los resultados obtenidos presentan los siguientes comportamientos.

- Si se tiene un material pétreo de buena calidad y una estructura granulométrica adecuada, el ensayo rueda cargada de Hamburgo bajo condiciones estándar, no logra discriminar la influencia del Tamaño Nominal del agregado ni el tipo de ligante asfáltico utilizado.
- Se observa que el aumento del TN en la estructura granulométrica aumenta el desempeño de la misma a deformación permanente.
- En la mezcla con TN de 12.5 mm, la cual tiene una menor resistencia, se observó que aun y cuando se utilice un asfalto modificado, la mezcla asfáltica presentará deformaciones permanentes en condiciones de sollicitaciones extremas (Temperatura-Tránsito).
- Las mezclas con TN de 19.0 mm presentan una estructura granular más resistente, lo cual permite observar el efecto del tipo de ligantes asfáltico en el comportamiento a deformación permanente. Para el caso de las mezclas con TN de 12.5 mm, la deformación permanente es influenciada más por la estructura granular que por el ligante asfáltico y no se observa el aporte de estos materiales.
- Es recomendable modificar los criterios para la realización de los ensayos de rueda de Hamburgo, variando la temperatura y número de pasadas en función del tipo de ligante asfáltico que se utilice.
- En los últimos años se han desarrollado nuevos ensayos para inferir el comportamiento a la deformación permanente de la mezcla asfáltica mediante ensayos al ligante asfáltico, como es el caso del ensayo MSCR. Los resultados dejan ver que el parámetro Jnr no es un indicador suficiente para asegurar el comportamiento a deformación permanente de una mezcla asfáltica. Esto es debido a que este comportamiento está dominado por la estructura granular de la mezcla asfáltica.
- Se observó que el polímero mejora la resistencia de la mezcla a mayores temperaturas y que una estructura granulométrica proporciona la resistencia a las sollicitaciones del tránsito independientemente del tipo de asfalto utilizado

4.2 Análisis del ensayo de compresión axial cíclica

La evaluación fue realizada de manera similar al ensayo de rueda de Hamburgo, en donde se realizaron evaluaciones para cada granulometría (TN 19 mm y TN 12.5 mm) y a tres diferentes temperaturas de ensayo. Sin embargo, para este ensayo las temperaturas utilizadas fueron 30, 40 y 50 °C. Las condiciones de carga utilizadas

fueron de 600 kPa de esfuerzo vertical (σ_v), una frecuencia de carga constante de 1 Hz (carga 0.1 s – relajación 0.9 s), un esfuerzo de confinamiento (σ_H) nulo (0 kPa) y un límite de 100000 ciclos de repeticiones de carga. El ensayo se realizó siguiendo el procedimiento de prueba MAC VIII “Método estándar para la determinación de la deformación permanente en la mezcla asfáltica sujeta a una carga de compresión axial cíclica”.

4.2.1 Justificación del ensayo

En la evaluación del punto anterior se pudo demostrar que el ensayo de rueda de Hamburgo no puede detectar variaciones en los parámetros de elaboración de la mezcla asfáltica cuando se realiza el ensayo en condiciones estándar (50°C y 20000 pasadas).

Como observó, todas las mezclas con TN de 19 mm tuvieron los mejores comportamientos en el ensayo de rueda cargada de Hamburgo. Sin embargo, en la evaluación surgió una duda adicional. La duda fué si el incremento del TN mejora el comportamiento a la deformación permanente (a mayor TN menor rodera), o si lo que se notó era un efecto en la relación TN – diámetro del molde, es decir que al aumentar el tamaño nominal del material pétreo y mantener el diámetro de molde de ensayo (material más grande en el mismo volumen) se está creando un efecto que reduce la rodera, pero no es debido a la calidad de la mezcla asfáltica si no por el efecto del cambio de esta relación (Figura 4.11).

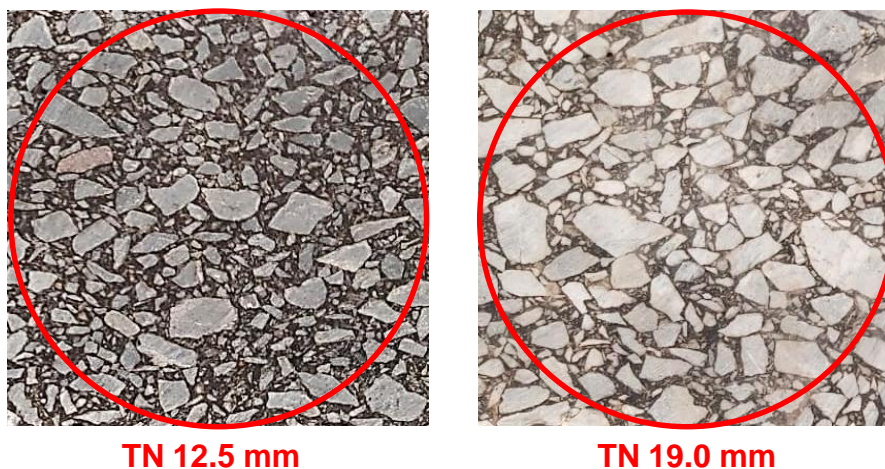


Figura 4.11 Corte de los núcleos de mezcla asfáltica

Por lo cual, un objetivo adicional del estudio, fue poder dar respuesta a esta duda, ya que el ensayo de compresión axial cíclica no está confinado por un molde.

4.2.2 Influencia del asfalto

Como se mencionó anteriormente, para evaluar el efecto de la temperatura se realizaron ensayos a 30, 40 y 50°C; los resultados de las pruebas son presentados en las Figuras 4.12 a 4.14. En estas figuras se puede observar claramente la

diferencia entre cada uno de los ligantes asfálticos; al aumentar la temperatura es más claro observar el efecto de la granulometría en el desempeño de la mezcla.

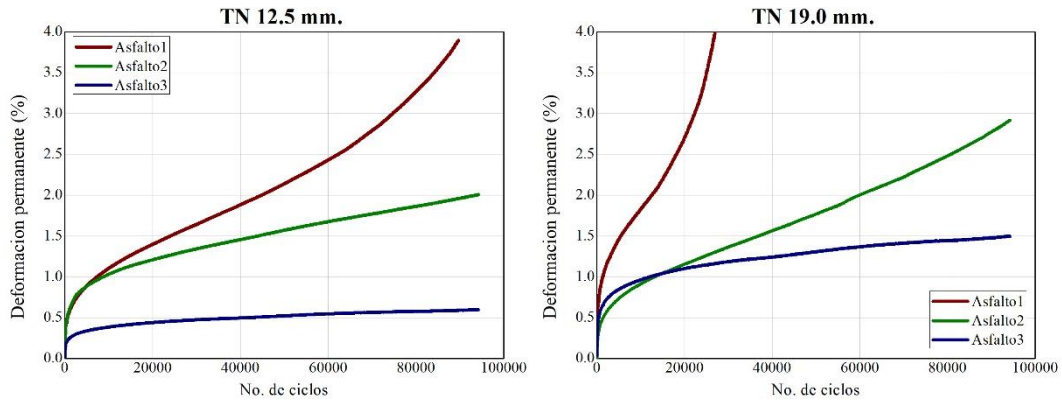


Figura 4.12 Evolución de la deformación permanente a 30°C.

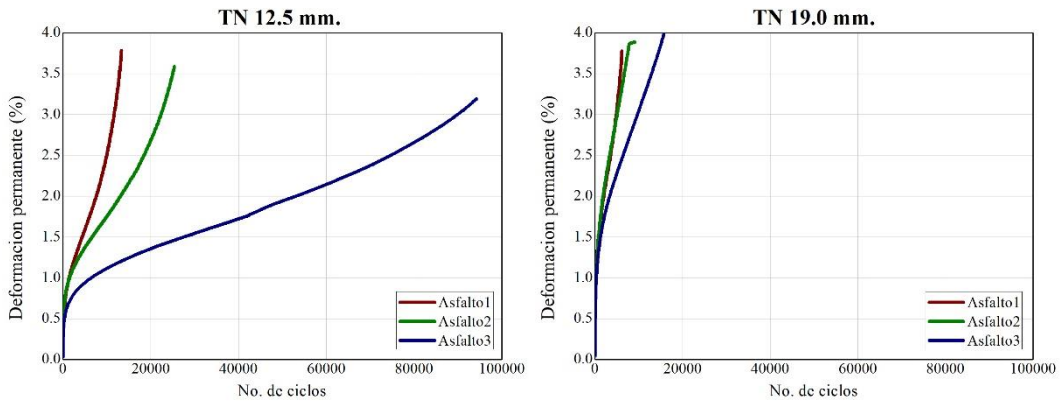


Figura 4.14 Evolución de la deformación permanente a 40°C.

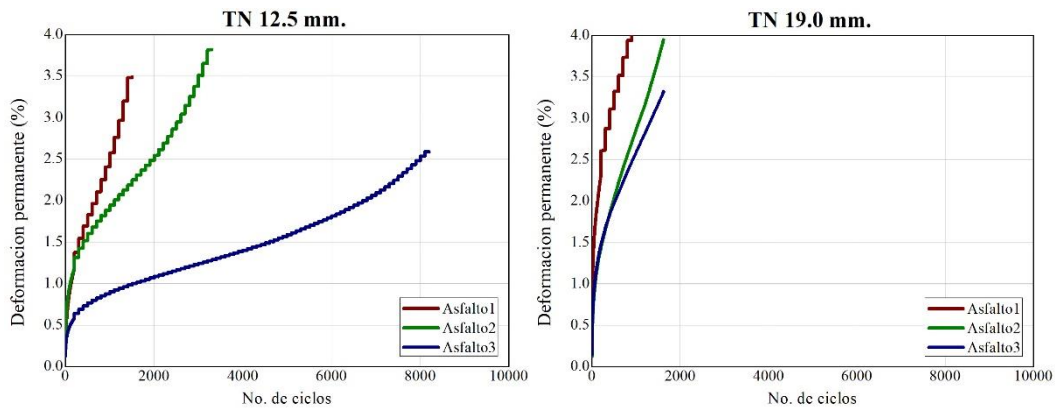


Figura 4.134 Evolución de la deformación permanente a 50°C.

En las figuras se pudo observar que al igual que en la evaluación anterior, al aumentar la temperatura, se incrementa la acumulación de la deformación de la mezcla asfáltica. La diferencia es que en este ensayo se nota claramente el aporte del ligante asfáltico, en donde se ve que el asfalto convencional presenta mayores deformaciones que los asfaltos modificados. Cuando comparamos los dos asfaltos modificados se observa que el asfalto 3 es el que presenta menores deformaciones en todas las condiciones de ensayos evaluadas. Esta tendencia se había observado en algunos de los ensayos de rueda cargada de Hamburgo, sin embargo, en algunas condiciones de ensayos no fue tan evidente. De esta primera observación se puede concluir que el ensayo permite identificar y cuantificar claramente las variaciones de temperatura, granulometría y tipo de ligante asfáltico de la mezcla asfáltica.

El otro punto importante a discutir con respecto a los resultados es que observó que la tendencia entre las granulometrías se invirtió. En el ensayo de carga axial cíclica, la mezcla con granulometría de TN 12.5 mm tiene claramente un mejor comportamiento que la mezcla con granulometría de TN 19.0 mm. Lo que lleva a una discusión muy particular:

¿Cuál de los ensayos está proporcionando la tendencia correcta del comportamiento de la mezcla asfáltica a deformación permanente?

Es difícil dar una respuesta certera sin realizar una campaña experimental más robusta, ya que aún y cuando se hicieron las variaciones necesarias en cuanto a los parámetros de la mezcla (TN-Asfalto-Temperatura), solamente se evaluó un material pétreo y agregados con otros orígenes podrían dar lugar a tendencias diferentes. Sin embargo, se concluye (basado en la información obtenida en el estudio) que el ensayo de compresión axial cíclica proporciona las tendencias correctas. La información considerada es la siguiente:

- Como primer punto tenemos la relación TN-Diámetro del molde; evidentemente que al aumentar el TN de la mezcla (punto 4.2.1) se afecta esta relación creando una concentración mayor de material grueso en un volumen fijo, dando mayor resistencia a deformación permanente de la mezcla asfáltica.
- El ensayo de compresión axial cíclica identifica la variación de los parámetros de diseño de la mezcla asfáltica, lo cual no pudo observarse en el ensayo de rueda cargada de Hamburgo, en donde se tuvieron que cambiar los parámetros de ensayo para ver los efectos del asfalto, pero sin obtener tendencias tan claras.
- Con la evaluación en el ensayo de compresión axial cíclica se tiene una incompatibilidad con respecto al comportamiento comúnmente mencionado en las referencias bibliográficas en donde se indica que al aumentar el TN se incrementa la resistencia de la mezcla asfáltica, lo que no se comenta es que

para que esto se cumpla, la estructura granulométrica debe estar correctamente diseñada.

Para demostrar este punto se realizó un análisis de ambas granulometrías utilizando el método Bailey, el cual mediante cuatro parámetros define la calidad de la estructura granulométrica de la mezcla asfáltica. Los resultados se presentan en la tabla siguiente

Tabla 4.1 Análisis de las granulometrías por el método Bailey

Parámetro	TN 19.0	TN 12.5	Especificación
PVFGS ¹	100%	100%	95 – 105
Índice FG ²	0.801	0.605	0.6 – 0.75
FF _a ³	0.426	0.426	0.35 – 0.50
FF _f ⁴	0.559	0.500	0.35 – 0.50

¹ Peso volumétrico de la fracción gruesa suelta

² Índice de la fracción gruesa

³ Fracción fina de las arenas

⁴ Fracción fina del filler

Se puede observar en el análisis que dos de los parámetros de la mezcla con TN de 19.0 mm no cumple; el más importante es el índice de la fracción gruesa ya que un valor muy alto es un indicador de una mezcla blanda debido la fracción gruesa, no puede generar una trabazón o correcto acomodo del material. Con el objetivo de tener una idea más clara del comportamiento mecánico de ambas mezclas asfálticas se realizó un ensayo de módulo dinámico en las mezclas asfálticas presentadas previamente; los resultados se presentan en Figuras 5.5 y 5.6, en las cuales se analizó la zona de temperaturas altas – frecuencias bajas que son las condiciones en donde se puede presentar la deformación permanente (cuadro rojo).

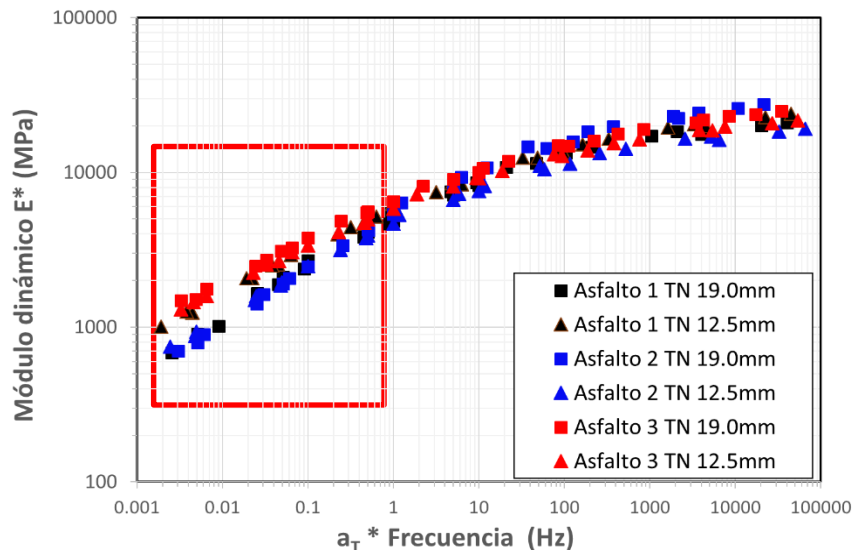


Figura 4.15 Curva maestra del módulo dinámico de las mezclas asfálticas

En la figura anterior se observa que valores de módulo dinámico para las mezclas con TN de 12.5 mm son ligeramente mayores para la mezcla con el asfalto convencional; para los asfaltos modificados no se observa una tendencia clara, lo cual se asocia al efecto del polímero. Analizando solo el valor de módulo dinámico no se obtiene una tendencia entre las dos granulometrías ya que influye el aporte del ligante asfáltico, por lo que el análisis debe realizarse incluyendo el valor del ángulo de fase.

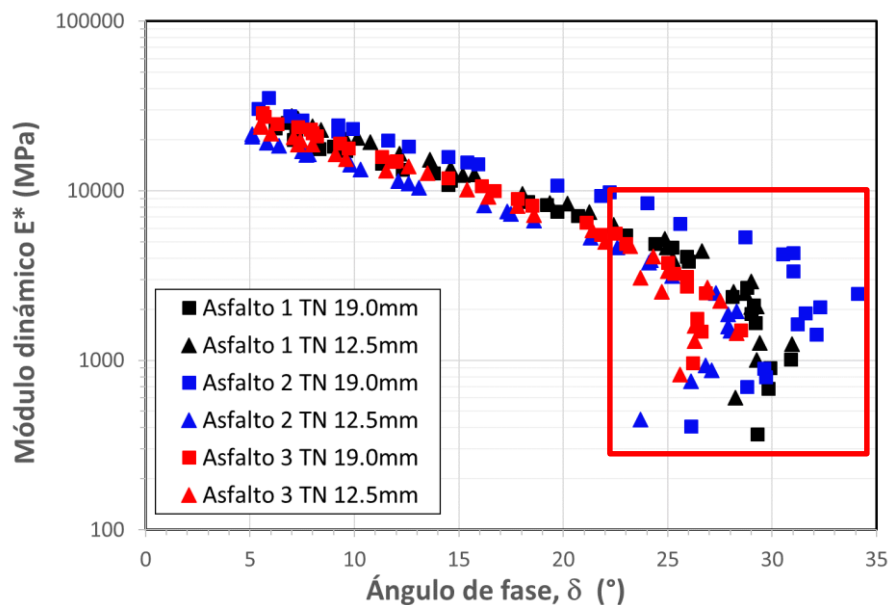


Figura 4.16 Diagrama de Black de las mezclas asfálticas

Para un análisis de los parámetros obtenidos en el ensayo (módulo dinámico y ángulo de fase), se utilizó el diagrama de Black, en este se pueden observar que las mezclas con TN de 12.5 mm tienen ángulos de fase inferiores a las mezclas con TN de 19.0 mm, y se ven ligeramente más contraídas lo que indican que para un mismo valor de módulo dinámico las mezclas con TN de 12.5 mm tienen valores de ángulo de fase menores, lo cual aumenta su componente elástica para una misma condición de carga, lo cual puede representar una menor acumulación de deformación.

4.2.3 Influencia de la temperatura

Como evaluación complementaria se analizó la influencia de la temperatura en los diferentes ligantes asfálticos utilizados en el estudio. Los resultados se presentan en las Figuras 5.7 a 5.9. Se observan las tendencias antes mencionadas, en donde el aumento de la temperatura incrementa la deformación permanente en las mezclas asfálticas. Las mezclas con TN de 12.5 mm presentan una mejor resistencia que las mezclas con TN de 19.0 mm.

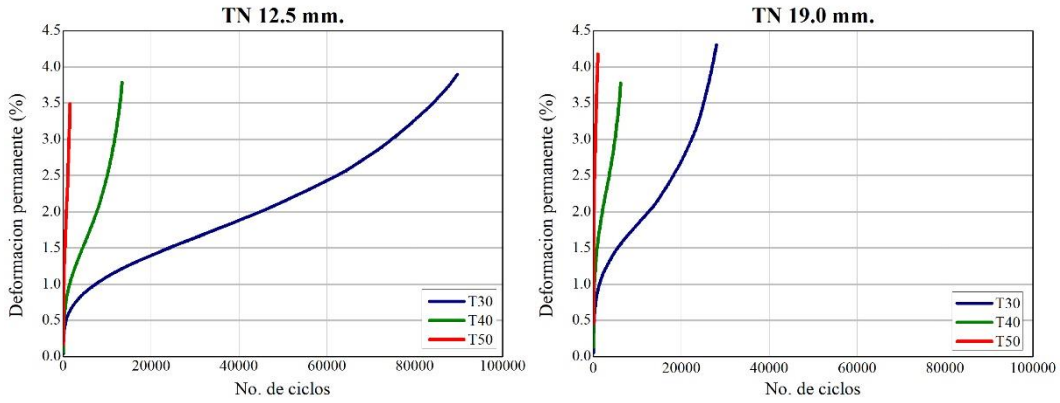


Figura 4.17 Evolución de la deformación permanente de la mezcla con A1

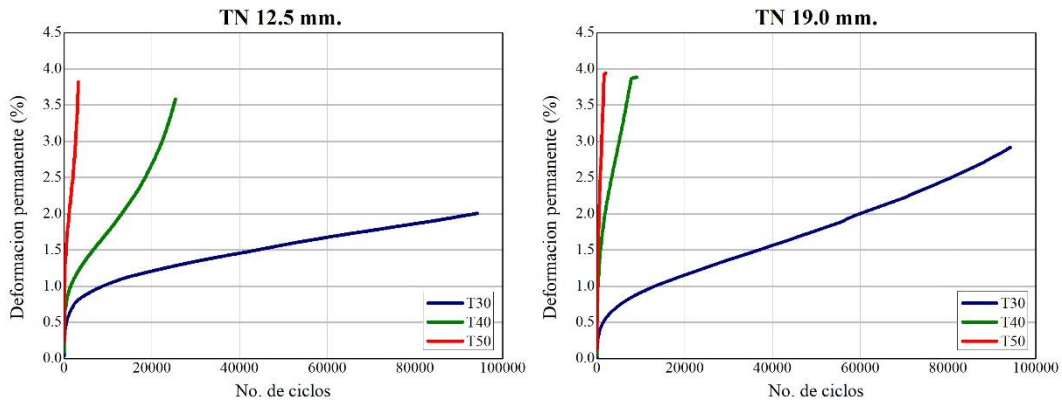


Figura 4.18 Evolución de la deformación permanente de la mezcla con A2

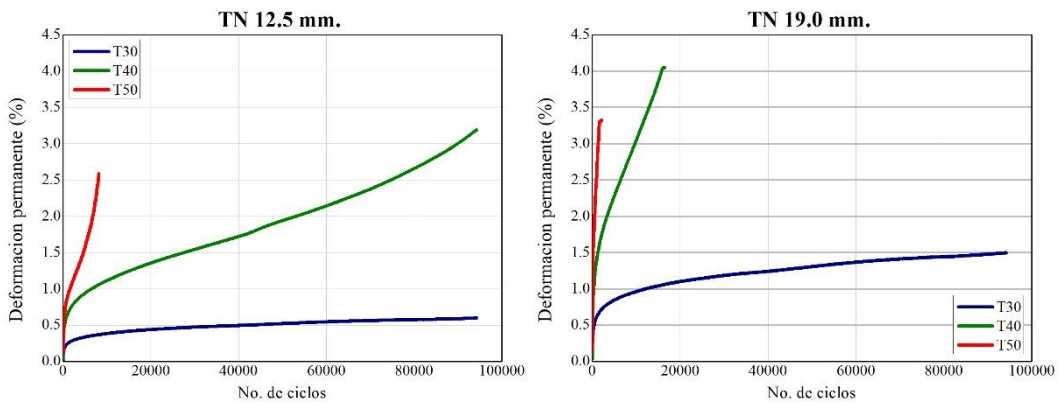


Figura 4.19 Evolución de la deformación permanente de la mezcla con A3

También se pudo observar que el asfalto A3 (PG76-16) modificado con Elvaloy presentó menores niveles de deformación que en su homólogo del Grado PG, el asfalto A2 (PG76-22).

Las mezclas con asfalto A1, en cualquier de las 2 diferentes granulometrías presentan porcentajes de deformación altos para bajos números de ciclos, solamente para el TN de 12.5 mm y temperatura de 30 °C, se superaron los 50 000 ciclos de carga. Analizando los demás asfaltos, se observa que los únicos ensayos que llegaron a terminar su número de ciclos fueron los realizados a una temperatura de 30°C y con asfalto modificado. En los ensayos con temperatura de 50°C no se logra apreciar la pendiente debido a que ésta es muy inclinada y dura pocos ciclos.

En lo que se refiere a la pendiente de evolución de la deformación (Zona 2), para las mezclas con TN de 12.5 mm, los resultados se pueden determinar con precisión para las temperaturas de 30 y 40°C, para las mezclas con TN de 19.0 mm, solamente para la temperatura de 30°C.

4.2.4 Conclusiones del ensayo de CAC

En este estudio se evaluaron mezclas con 3 diferentes asfaltos; PG 64V-16, PG 76H-16 y PG 76H-22, cada uno de ellos en granulometrías de TN 12.5 y 19.0 mm, a diferentes temperaturas de prueba (30, 40 y 50°C) y un esfuerzo vertical de 600 kPa con una frecuencia de carga constante de 1 Hz. Los resultados obtenidos presentan los siguientes comportamientos:

- El ensayo de compresión axial cíclica permite detectar la variación de los parámetros de diseño y de evaluación en el comportamiento de deformación permanente de la mezcla asfáltica,
- Se encontraron tendencias invertidas entre las granulometrías. En el ensayo de carga axial cíclica, la mezcla con granulometría de TN 12.5 mm tiene claramente un mejor comportamiento que la mezcla con granulometría de TN 19.0 mm
- Se pudo demostrar que hay un efecto en la relación TN-Diámetro en el ensayo de rueda de Hamburgo que otorga una mayor resistencia a deformación permanente a la mezcla asfáltica, la cual no es propiamente debida al aporte de la mezcla asfáltica,
- Se demostró la importancia del correcto diseño de la estructura granulométrica de la mezcla asfáltica para resistir la deformación permanente y que solamente aumentar con TN no es un indicador de mejor desempeño,
- Se demostró que la estructura granulométrica es el factor que más influye en el desempeño a deformación permanente en una mezcla asfáltica y no el tipo de ligante asfáltico.
- En relación al uso de asfaltos modificados, se observó que mejoran el comportamiento a deformación permanente de la mezcla asfáltica, ya que al modificar el ángulo de fase hay una menor acumulación de deformación en cada ciclo de carga.

- En esta evaluación se observó que el asfalto modificado A3 presentó menores niveles de deformación —en todas las evaluaciones realizadas— en comparación con el asfalto modificado con SBS; siendo que ambos se clasifican como un PG 76.

5. Análisis del modelo ESSO

Con los parámetros del ensayo mecánico de compresión axial, se evaluó el modelo de predicción (ESSO) del comportamiento a la deformación permanente de la mezcla asfáltica.

5.1 Calibración del modelo ESSO

Para realizar la calibración del modelo ESSO reducido se utilizó el dominio de referencia propuesto por Meunier: $T_0=50$ °C, $fr_0^{T_0}=1$ Hz y $\sigma_{h_0}=0$ Pa* 10^5 y los resultados de la tasa de deformación indicados en la Tabla 3.5 para el asfalto A3.

Las constantes A y B evalúan la relación base del modelo, que es la relación entre la deformación y el esfuerzo vertical ($\log \dot{\epsilon} = A + B \log \sigma_V$), por lo tanto, en forma concreta, la constante A se define como la ordenada al origen y la constante B como la pendiente de la curva (ensayos 1 y 2 de la Tabla 2.4). En la Figura 5.1 se observa la determinación de la constante $A = \log(0.0677) = -1.1694$ y la constante $B = 4.3789$.

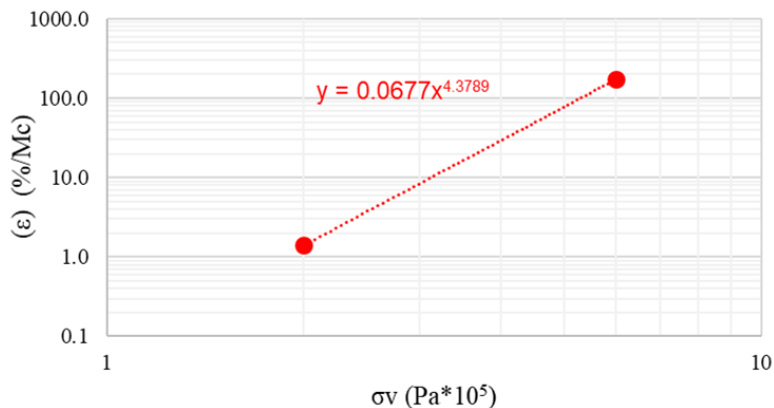


Figura 5.1 Constantes A y B

La constante C evalúa el efecto del confinamiento (esfuerzo horizontal). Para determinar esta constante, se parte de la relación base bajo el supuesto que, con el incremento en el esfuerzo de confinamiento, el valor de la pendiente se mantiene constante (Aussedat, 1977). Por lo anterior, se traslada la relación base hacia los valores experimentales de la tasa de deformación para $\sigma_H = 1$ Pa* 10^5 y $\sigma_H = 2$ Pa* 10^5 , ambos a un $\sigma_V = 6$ Pa* 10^5 como se observa en la Figura 5.2 (ensayos No. 1, 2, 3 y 4 de la Tabla 3.5). Las curvas se extrapolan para obtener el valor de la ordenada al origen ($a\sigma_H$) —indicados en la Tabla 5.1— para cada nivel de confinamiento como se observa en la Figura 5.3. Finalmente, se determina la

constante C como la pendiente de la relación $a\sigma_H$ con el $\Delta\sigma_H$ (Figura 5.4) en el dominio semi-logarítmico; $C = \log(e^{-0.377}) = -0.1637$.

Tabla 5.1 Variables, Constante C

σ_H (Pa*10 ⁵)	$a\sigma_H$ (%/Mc)	$\Delta\sigma_H$ (Pa*10 ⁵)
0	0.0677	0
1	0.0414	1
2	0.0318	2

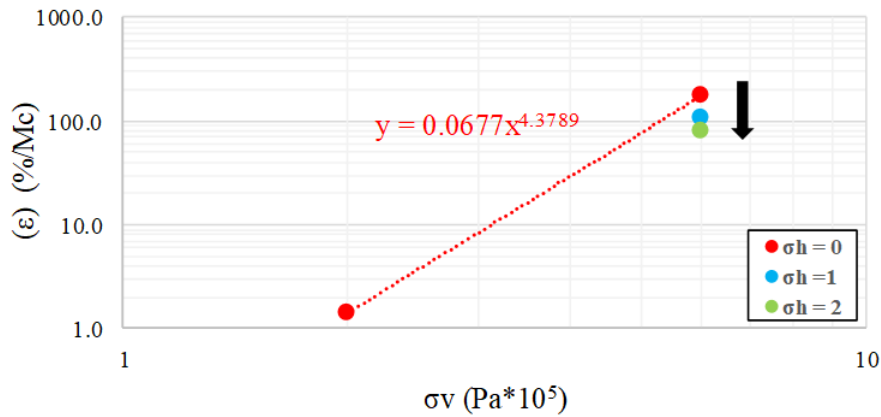


Figura 5.2 Variación del σ_H – Constante C

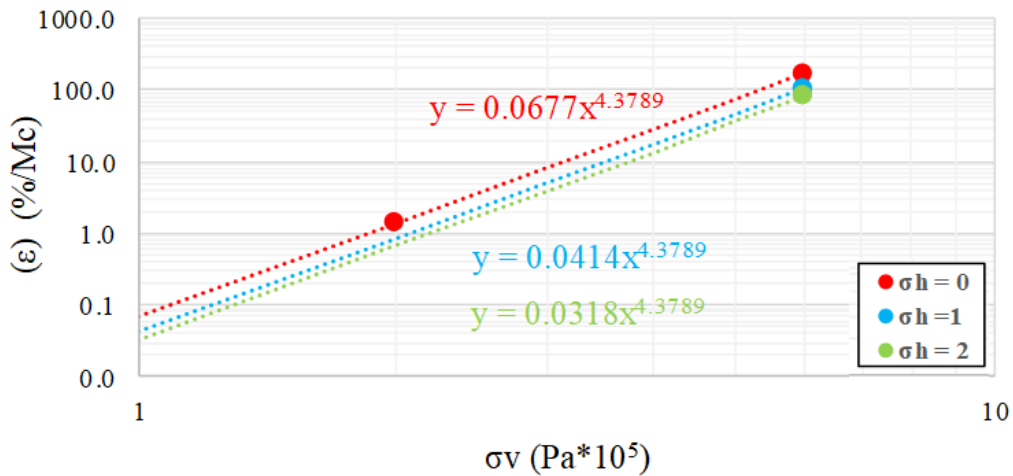


Figura 5.3 Extrapolación al origen – Constante C

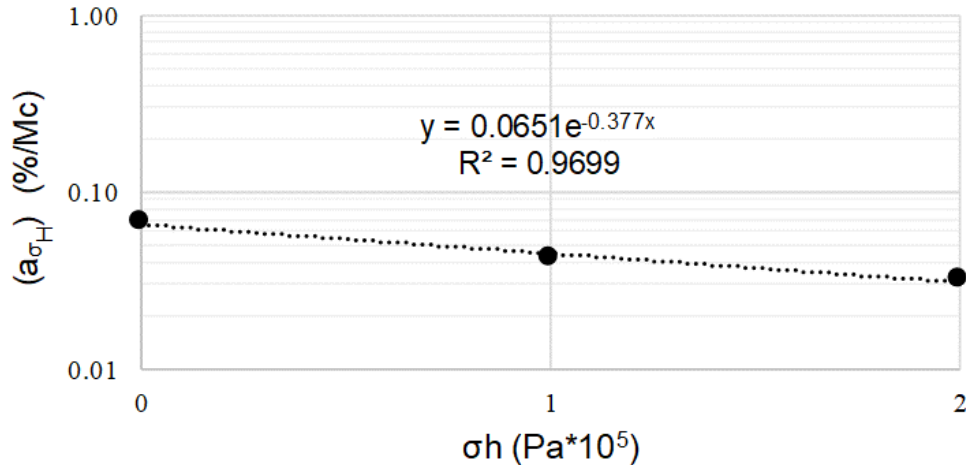


Figura 5.4 Determinación de la Constante C

Similarmente, la constante D evalúa el efecto de la temperatura, y se determina bajo el mismo principio que la constante anterior; sin embargo, en esta sí se cuentan con los valores experimentales para cada nivel de σ_v como se observa en la Figura 5.5 (ensayos No. 1, 2, 5 y 6 de la Tabla 3.5). Se parte de la relación lineal en el dominio logarítmico de la tasa de deformación y el esfuerzo vertical para cada temperatura de ensayo ($T = 30, 40$ y 50 °C), con la finalidad de extrapolar las curvas y determinar la ordenada al origen (a_T) para cada condición de temperatura (Tabla 5.2). Finalmente, se determina la constante D como la pendiente de la relación a_T con el ΔT en el dominio semi-logarítmico; $D = \log(e^{0.2137}) = 0.0928$ (Figura 5.6).

Tabla 5.2 Variables, Constante D

T (°C)	a_T (%/Mc)	ΔT (°C)
30	0.0009	-20
40	0.0081	-10
50	0.0667	0

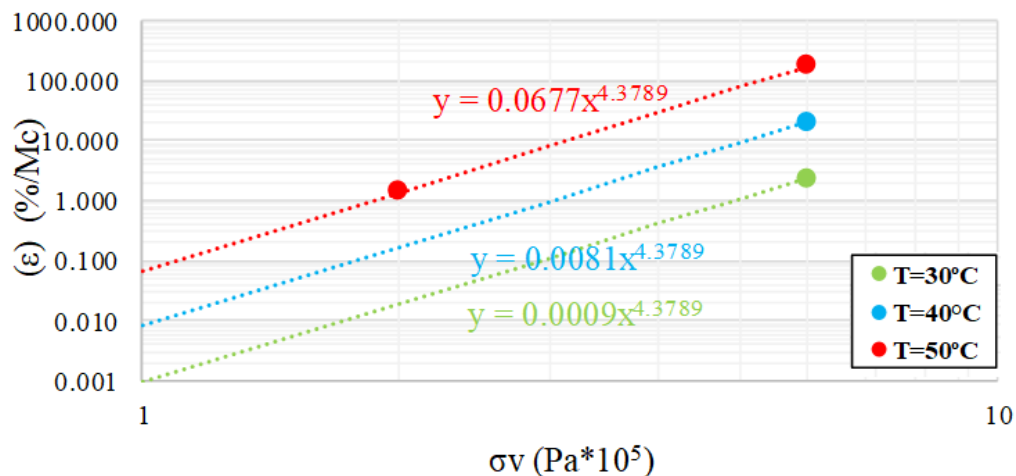


Figura 5.5 Extrapolación al origen – Constante D

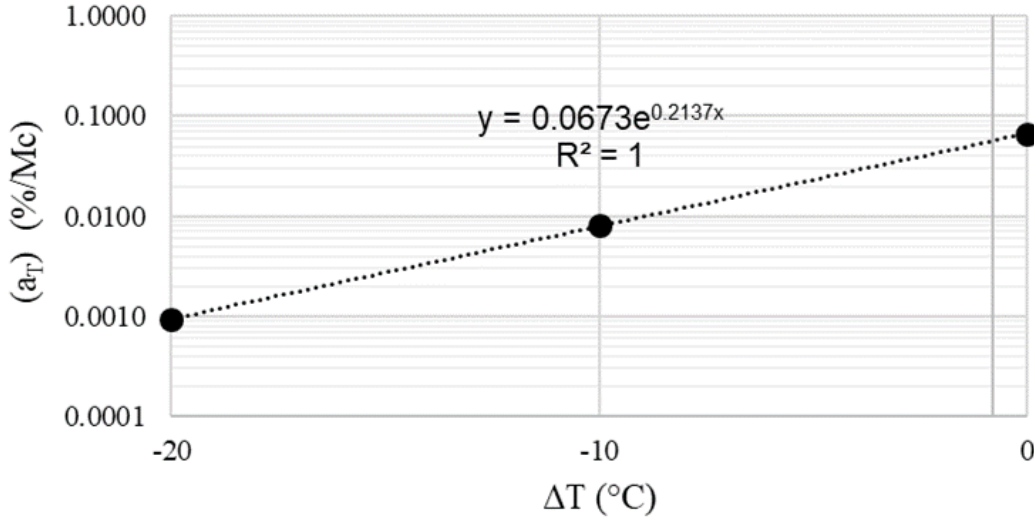


Figura 5.6 Determinación de la Constante D

De acuerdo con lo descrito anteriormente, se obtienen 4 constantes del modelo ESSO reducido como se indican en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3 Constantes modelo ESSO reducido

Constante	Valor
A	-1.17
B	4.38
C	-0.16
D	0.09

Una vez determinadas las constantes, se puede calcular el valor de $\log \dot{\epsilon}$ para cualquier nivel de esfuerzo vertical, horizontal, temperatura o frecuencia, recordando el dominio de referencia con el cual fueron calculadas: $T_0=50\text{ }^\circ\text{C}$, $fr_0^{T_0}=1\text{ Hz}$ y $\sigma_{H_0}=0\text{ Pa}\cdot 10^5$. El valor de $\log(a_T)$ se obtiene por medio de la Ecuación 4, donde el valor de la temperatura se refiere a la utilizada en cada ensayo de compresión axial cíclica, mientras que el valor de la temperatura de referencia (T_{ref}) se refiere a la utilizada para calibrar el valor de $\log(a_T)$ en el cálculo de la curva maestra del material, en este caso $T_{ref} = 20\text{ }^\circ\text{C}$. La ecuación es única para cada tipo de mezcla asfáltica, a la cual se obtiene de la calibración de la curva maestra. Finalmente, los valores restantes son $T_0=50\text{ }^\circ\text{C}$ y $fr_0^{T_0}=1\text{ Hz}$, que se refieren al dominio de referencia.

$$\log(a_T) = 0.0009T_{ref}^2 - 0.1601T_{ref} + 2.8764 \quad (4)$$

La sustitución de las constantes en el modelo se muestra a continuación:

$$\log \dot{\epsilon} = -1.1694 + 4.3789 \log \sigma_V - 0.1637 \sigma_H + 0.0928 \left\{ (T_i - 50) + \frac{(T_i - 50)}{-2.8786} \log \left(\frac{fr_j^{T_i}}{1} \right) \right\}$$

5.2 Validación de modelo ESSO

Se seleccionó el modelo ESSO debido a que integra cuatro factores: (1) el esfuerzo vertical (σ_V), (2) la tensión horizontal (σ_H), (3) la temperatura – T y (4) la frecuencia (f_r), que juegan un papel determinante en el comportamiento de la deformación permanente de las mezclas asfálticas (Meunier, 2012). El modelo ESSO sobreestima la intensidad de la deformación en la fase 1 y subestima la de la fase 3; sin embargo, representa adecuadamente la intensidad de la deformación en la fase 2. Teniendo en cuenta que la fase 2 constituye la fase principal del comportamiento de una mezcla de asfalto con respecto a sus deformaciones permanentes, mientras que la subestimación de la intensidad de las deformaciones de la fase 3 tiene poco efecto en el cálculo, debido a que en esta fase es donde habrá ruptura del material y los resultados asociados con esta fase son inciertos y muy variables.

En el presente capítulo se busca validar la reducción del número de constantes para determinar más rápido la susceptibilidad a la deformación permanente de la mezcla utilizando el modelo ESSO (TTPS) basado en el principio de superposición tiempo-temperatura.

Para verificar la validez de la calibración del modelo ESSO reducido, se realizó un análisis mediante el error relativo porcentual para un total de 9 puntos experimentales.

5.2.1 Modelo ESSO reducido

Haciendo referencia nuevamente al modelo reducido con la sustitución de las constantes, se procede a calcular el valor de $\log \dot{\epsilon}$ para los valores teóricos.

$$\log \dot{\epsilon} = -1.1694 + 4.3789 \log \sigma_V - 0.1637 \sigma_H + 0.0928 \left\{ (T_i - 50) + \frac{(T_i - 50)}{-2.8786} \log \left(\frac{f_r^{T_i}}{1} \right) \right\}$$

En la Tabla 5.4 se indican los resultados del modelo considerando los puntos experimentales para determinar las constantes (1-6) y 3 ensayos adicionales (7-9) para la validación de éste. Se determinó el error relativo (%) del $\log \dot{\epsilon}$ experimental contra el $\log \dot{\epsilon}$ derivado del modelo, donde se encontraron valores bajos de error en la mayoría de los puntos experimentales, a excepción de los puntos 8 y 9. En la Figura 5.7 y la Figura 5.8 se muestra el error obtenido, así como la precisión del modelo.

Tabla 5.4 Validación de resultados, modelo ESSO reducido

	No. Ensayo	T _i [°C]	σ _V [Pa * 10 ⁵]	σ _H [Pa * 10 ⁵]	fr _j [Hz]	log(ε̇) Experimental [%/Mc]	log(ε̇) Modelo [%/Mc]	Error relativo (%)
Modelo	1	50	2	0	1	0.149	0.149	0.11
	2	50	6	0	1	2.238	2.238	0.01
	3	50	6	1	1	2.024	2.074	2.48
	4	50	6	2	1	1.910	1.911	0.02
	5	30	6	0	1	0.376	0.382	1.65
	6	40	6	0	1	1.315	1.310	-0.35
Validar	7	40	6	0	10	0.437	0.421	-3.73
	8	40	4	0	1	0.838	0.539	-35.66
	9	40	4	0	10	-0.008	-0.350	64.97

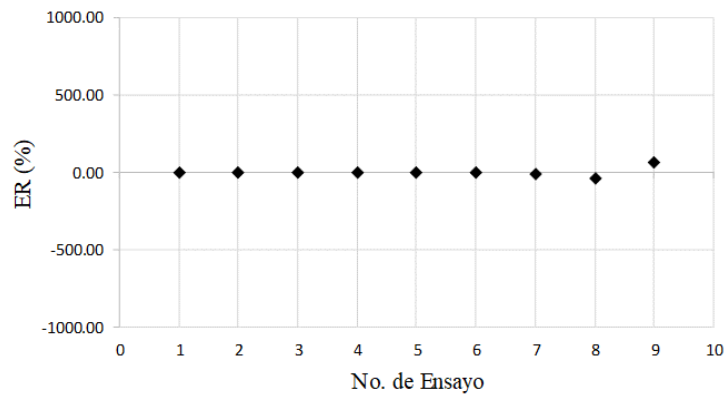


Figura 5.7 Error relativo, modelo ESSO reducido

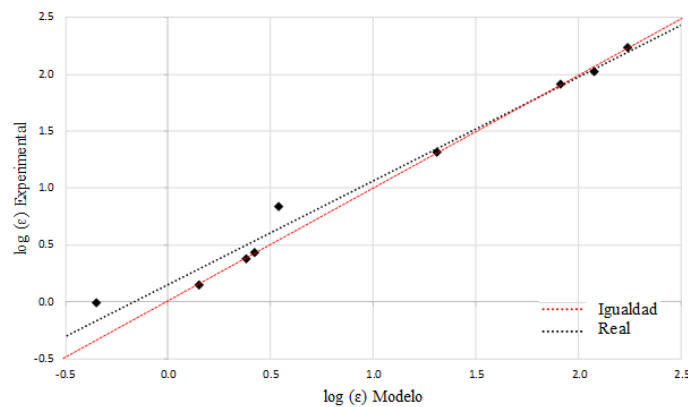


Figura 5.8 Validación modelo ESSO reducido

Se analizaron también los resultados obtenidos teóricamente contra los experimentales mediante regresión lineal ($Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon$) por medio del software Minitab18. El análisis resultó en lo siguiente:

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	1	6.9743	6.97430	367.75	0.000
Experimental	1	6.9743	6.97430	367.75	0.000
Error	7	0.1328	0.01896		
Total	8	7.1070			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.137713	98.13%	97.87%	97.00%

Coeficientes

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	-0.1528	0.0740	-2.06	0.078	
Experimental	1.0805	0.0563	19.18	0.000	1.00

Ecuación de regresión

$$\text{Teórico} = -0.1528 + 1.0805 \text{ Experimental}$$

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis estadístico, se puede concluir lo siguiente:

- La predicción del modelo mantiene una relación lineal.
- La ordenada al origen (β_0) se considera cero (no hay efecto) al aceptarse la hipótesis nula ($p > 0.05$).
- Existe un buen nivel de predicción, con un $R^2_{\text{ajustado}} = 97.87\%$.

En relación con la variabilidad (Figura 5.9) se puede definir lo siguiente:

- En la gráfica de probabilidad normal se detecta normalidad.
- En la gráfica residuos vs. ajustes se puede detectar que los residuos están distribuidos aleatoriamente y tienen una varianza constante.
- El histograma muestra la distribución de los residuos, presentando un comportamiento normal, lo cual indica que se consideran los datos simétricos.
- En la gráfica residuos vs. orden se puede observar que los residuos son independientes, al no mostrar tendencias en orden de tiempo.

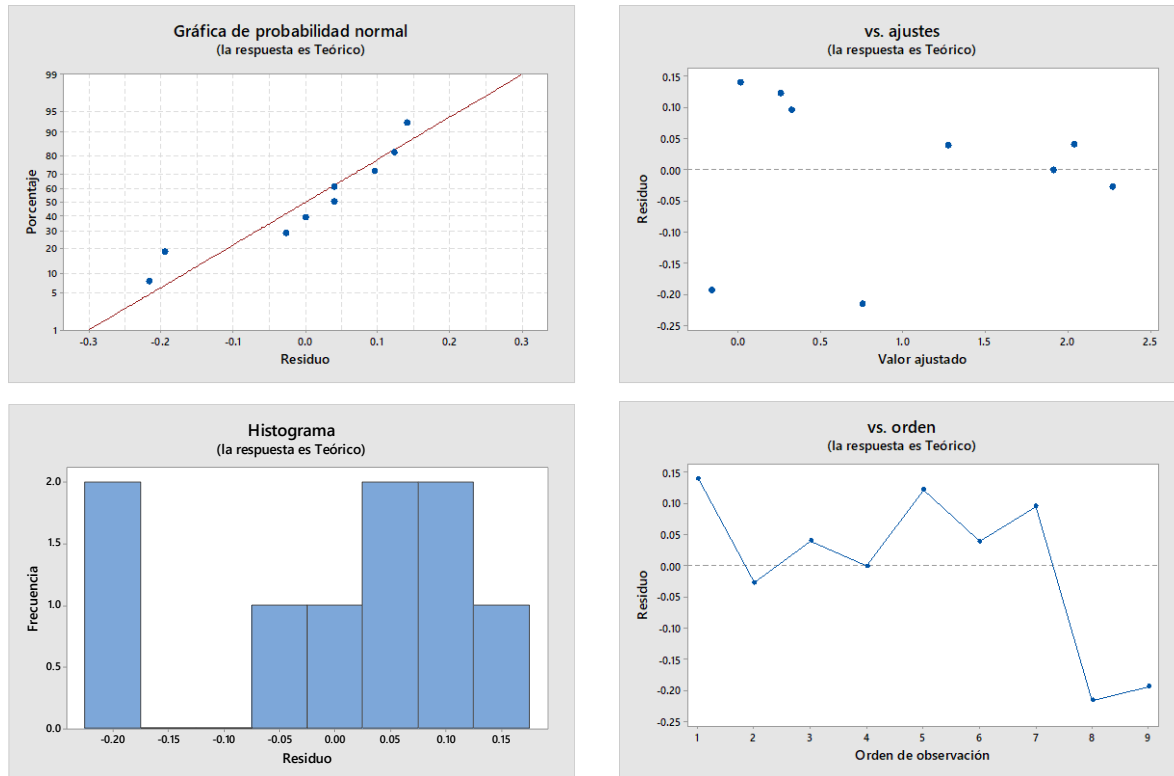


Figura 5.9 Análisis de variabilidad, asfalto A3

5.2.2 Conclusiones

En este estudio se evaluó la mezcla con TN 12.5 mm y asfalto A3. Para validar el modelo se utilizaron los ensayos requeridos en la calibración del modelo y 3 ensayos adicionales en los cuales se varió la frecuencia y la aplicación de la carga vertical. Los resultados obtenidos presentan los siguientes comportamientos.

- El modelo ESSO reducido propuesto por Meunier, presenta una excelente correlación con los valores experimentales dentro de la frecuencia de referencia (1 Hz) y muy buena correlación con los valores experimentales a distintas frecuencias; sin embargo, en condiciones de ensayo conservadoras no se mantiene un buen índice de predicción en los resultados.
- El dominio de referencia propuesto por Meunier parece ser adecuado, debido a que en condiciones más drásticas (temperaturas altas, frecuencias bajas, niveles de carga altos) la evolución de la deformación permanente se define mejor y los resultados son más precisos.
- El modelo ESSO parece ser una buena herramienta para definir la ley del comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica a la deformación permanente.
- Los resultados que obtuvieron variación entre la relación de los resultados experimentales y los resultados obtenidos del modelo, son en los que se presenta una aplicación de carga menor y frecuencias mayores.

5.3 Calibración del modelo ESSO en distintos materiales

El presente capítulo tiene por objetivo realizar una evaluación de las constantes del modelo ESSO en distintos materiales asfálticos; lo anterior para verificar el aporte de cada uno en el comportamiento de la mezcla asfáltica. En el capítulo anterior se demostró la efectividad del modelo ESSO reducido para predecir la tasa de deformación permanente en mezclas asfálticas por medio del ensayo de compresión axial cíclica; mientras que en este capítulo se aborda el análisis del modelo considerando distintos ligantes, granulometría y su aportación a las variables de deformación que considera el modelo. Los ligantes asfálticos en estudio corresponden a los descritos en el capítulo 3.

5.3.1 Resultados experimentales

Los resultados experimentales se presentan en la Tabla 5.5 para cada asfalto utilizado, así como los criterios de los ensayos requeridos para determinar las constantes del modelo. Claramente, a partir de estos resultados se puede observar que el asfalto A3 presentó menores niveles de deformación, en relación con parámetro de la tasa de deformación.

Tabla 5.5 Resultados de la tasa de deformación

No. Ensayo	T _i (°C)	σ _v (Pa*10 ⁵)	σ _H (Pa*10 ⁵)	fr _j (Hz)	A1 (PG64-16)	A2 (PG76-22)	A3 (PG76-16)
					Tasa de deformación experimental (ε̇) (%/Mc)		
1	50	2	0	1	48.634	10.825	1.408
2	50	6	0	1	1466.597	646.715	172.924
3	50	6	1	1	685.688	297.316	105.712
4	50	6	2	1	606.542	260.797	81.333
5	30	6	0	1	25.81	11.142	2.375
6	40	6	0	1	173.338	83.845	20.634

5.3.2 Determinación de las constantes

La calibración del modelo se realizó con la propuesta realizada por Meunier *et al.* (2013). La determinación de las constantes para los nuevos ligantes en análisis (A1 y A2) se ilustran en las Figura 5.10 y 5.11. El procedimiento sigue la secuencia descrita en la Sección 5.1, donde a partir de los valores experimentales de la tasa de deformación se calculan 4 constantes (A, B, C y D) que describen el comportamiento de la mezcla asfáltica para cada condición de ensayo (esfuerzo vertical, esfuerzo horizontal y temperatura); el efecto de la frecuencia del ensayo se deduce a partir del TTSP.

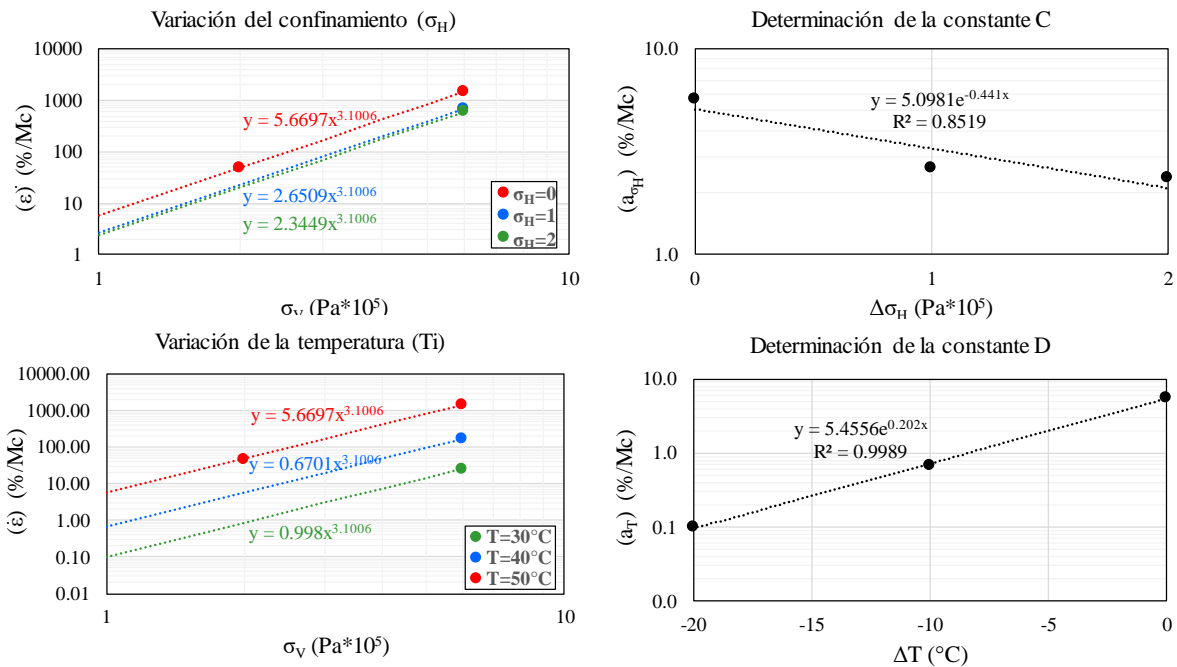


Figura 5.10 Determinación de constantes de mezcla con asfalto A1 (PG64-16)

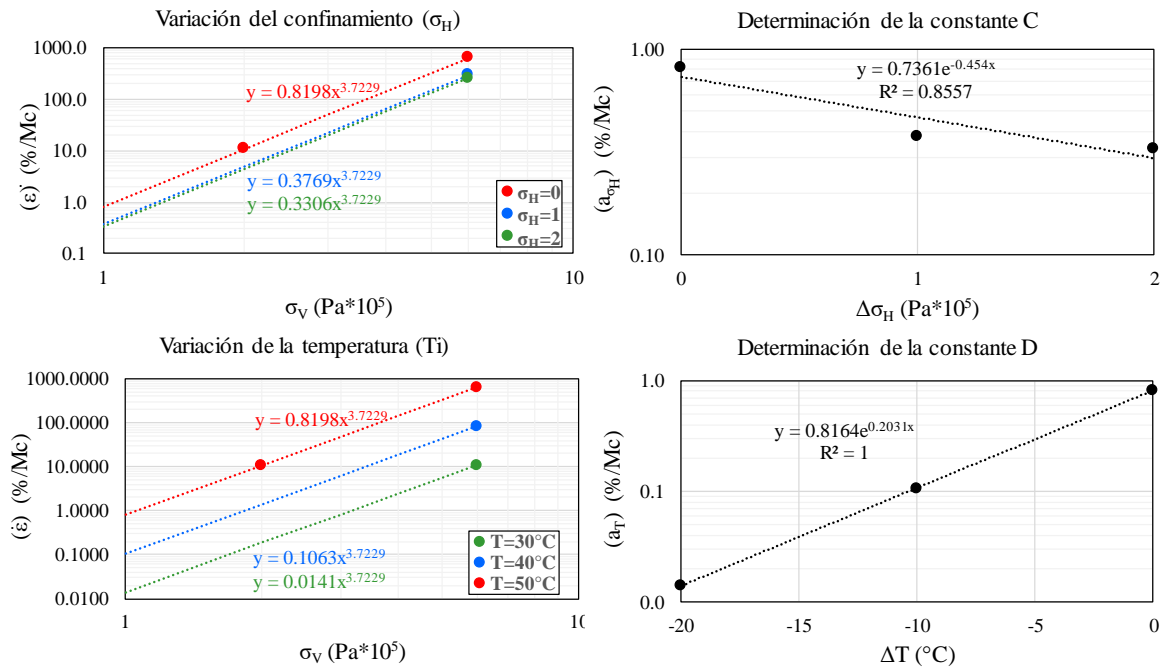


Figura 5.11 Determinación de constantes de mezcla con asfalto A2 (PG76-22)

5.3.3 Validación

Los resultados del análisis del error relativo y la validación estadística se indican a continuación para para los nuevos ligantes en análisis (A1 y A2).

Asfalto A1 (PG64-16)

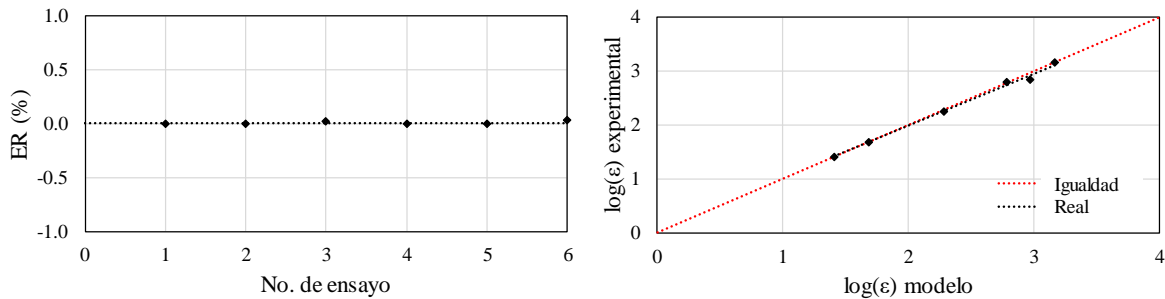


Figura 5.12 Ajuste de la mezcla con asfalto A1 (PG64-16)

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	1	2.54636	2.54636	716.07	0.000
Experimental	1	2.54636	2.54636	716.07	0.000
Error	4	0.01422	0.00356		
Total	5	2.56059			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.0596326	99.44%	99.31%	98.84%

Coefficientes

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	-0.0281	0.0934	-0.30	0.779	
Experimental	1.0253	0.0383	26.76	0.000	1.00

Ecuación de regresión

$$\text{Teórico} = -0.0281 + 1.0253 \text{ Experimental}$$

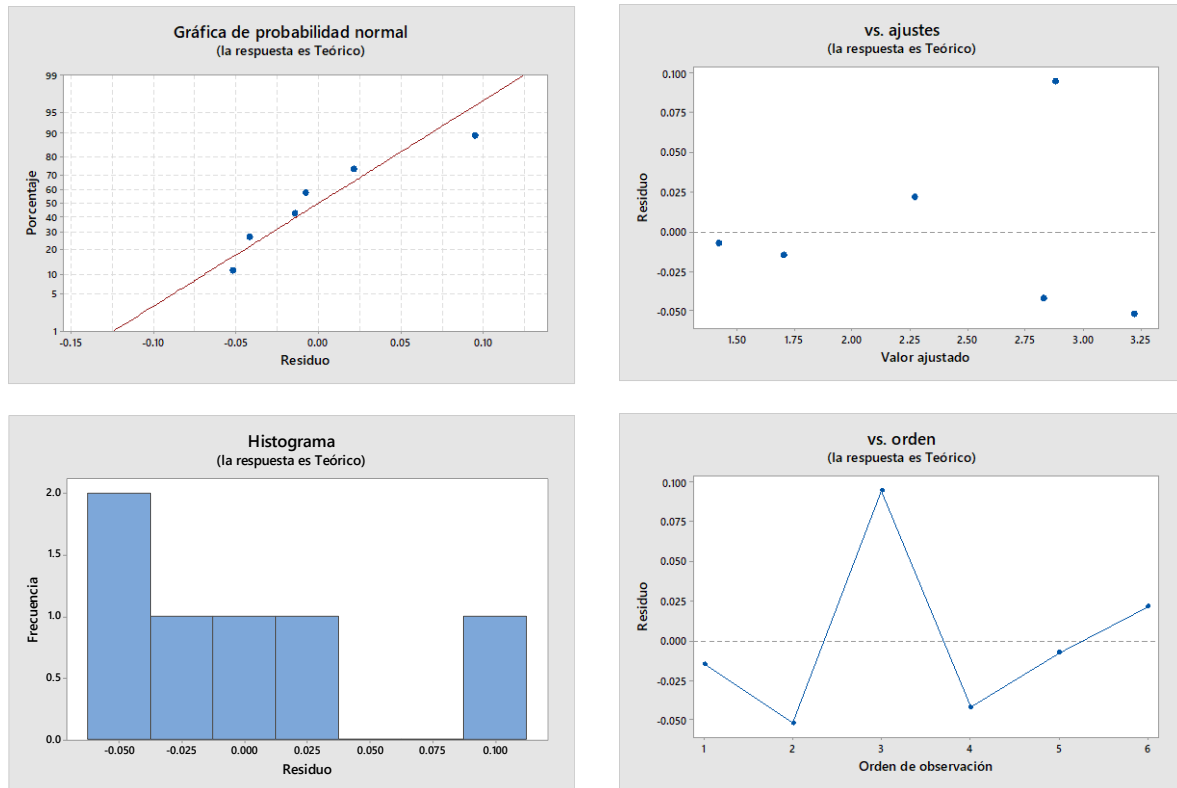


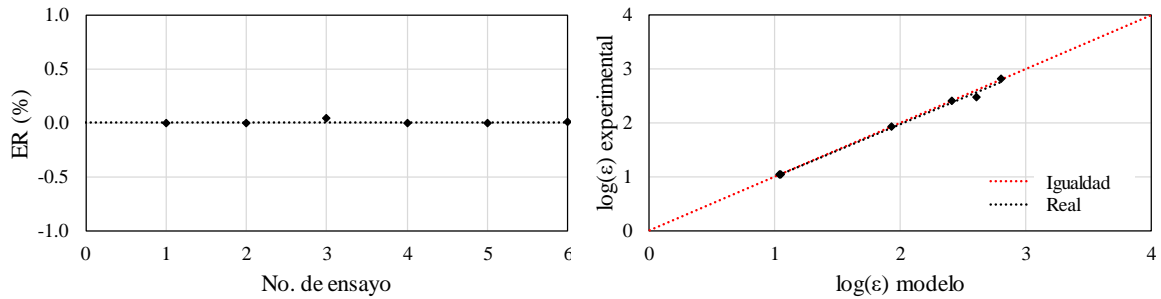
Figura 5.13 Análisis de variabilidad, asfalto A1

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis estadístico, se puede concluir lo siguiente:

- La predicción del modelo mantiene una relación lineal.
- La ordenada al origen (β_0) se considera cero (no hay efecto) al aceptarse la hipótesis nula ($p > 0.05$).
- Existe un buen nivel de predicción, con un $R^2_{ajustado} = 99.31 \%$.

En relación con la variabilidad (Figura 5.13) se puede definir lo siguiente:

- En la gráfica de probabilidad normal se detecta normalidad.
- En la gráfica residuos vs. ajustes se puede detectar que los residuos están distribuidos aleatoriamente y tienen una varianza constante.
- El histograma muestra la distribución de los residuos, presentando un comportamiento normal, lo cual indica que se consideran los datos simétricos.
- En la gráfica residuos vs. orden se puede observar que los residuos son independientes, al no mostrar tendencias en orden de tiempo.

Asfalto A2 (PG76-16)**Figura 5.14 Ajuste de la mezcla con asfalto A2 (PG76-22).**

Se analizaron también los resultados obtenidos teóricamente contra los experimentales mediante regresión lineal ($Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon$) por medio del software Minitab18. El análisis resultó en lo siguiente:

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	1	3.03535	3.03535	847.22	0.000
Experimental	1	3.03535	3.03535	847.22	0.000
Error	4	0.01433	0.00358		
Total	5	3.04968			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.0598556	99.53%	99.41%	99.07%

Coeficientes

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	-0.0255	0.0729	-0.35	0.744	
Experimental	1.0255	0.0352	29.11	0.000	1.00

Ecuación de regresión

$$\text{Teórico} = -0.0255 + 1.0255 \text{ Experimental}$$

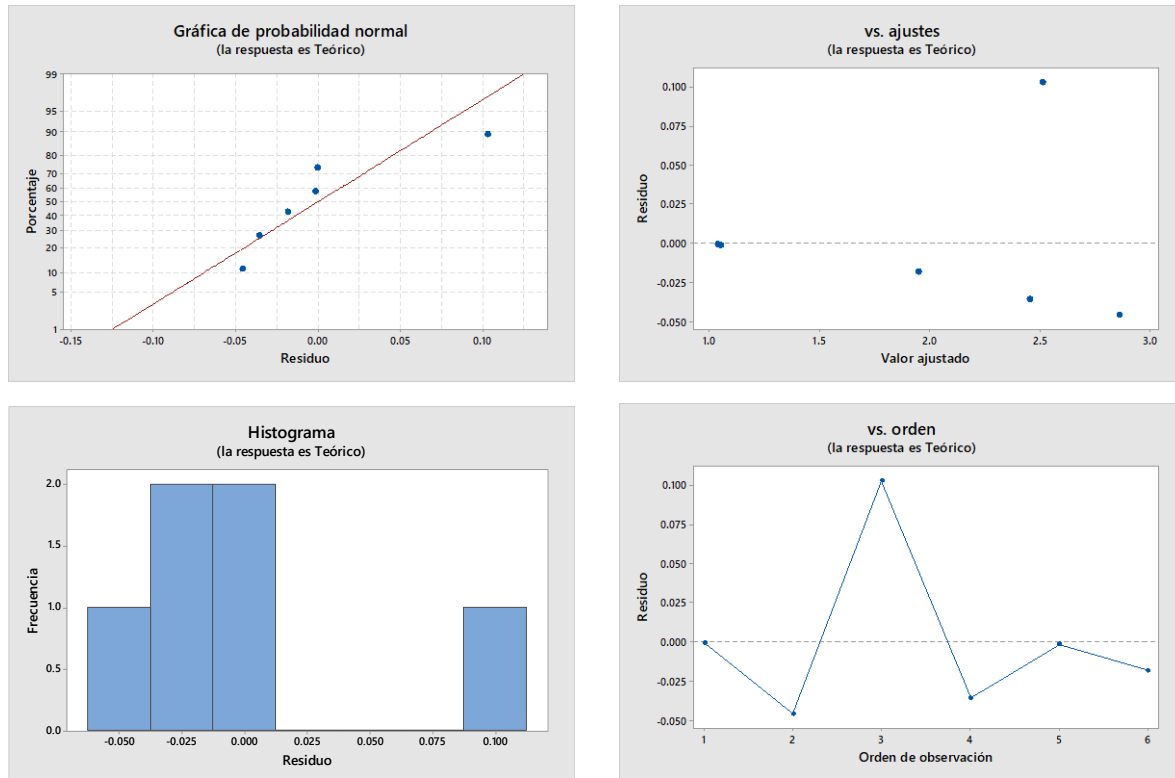


Figura 5.15 Análisis de variabilidad, asfalto A2

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis estadístico, se puede concluir lo siguiente:

- La predicción del modelo mantiene una relación lineal.
- La ordenada al origen (β_0) se considera cero (no hay efecto) al aceptarse la hipótesis nula ($p > 0.05$).
- Existe un buen nivel de predicción, con un $R^2_{ajustado} = 99.41 \%$.

En relación con la variabilidad (Figura 5.15) se puede definir lo siguiente:

- En la gráfica de probabilidad normal se detecta normalidad.
- En la gráfica residuos vs. ajustes se puede detectar que los residuos están distribuidos aleatoriamente y tienen una varianza constante.
- El histograma muestra la distribución de los residuos, presentando un comportamiento normal, lo cual indica que se consideran los datos simétricos.
- En la gráfica residuos vs. orden se puede observar que los residuos son independientes, al no mostrar tendencias en orden de tiempo.

5.3.4 Análisis de las constantes

Los valores determinados para cada constante se resumen en la Tabla 5.6, los cuales se ilustran gráficamente en la Figura 5.16. De acuerdo con esto, se determina que la influencia del ligante asfáltico se verá reflejada principalmente en la resistencia al esfuerzo vertical, mientras que el aporte del esfuerzo de confinamiento no se observa significativo. La deformación inicial, determinada por medio de la constante A, se reduce con el asfalto modificado y el aumento de la pendiente en la constante B varía debido a que se reduce la deformación conforme varía el asfalto. Por último, aunque no en la misma proporción que en las constantes A y B, la influencia de la temperatura se detecta por medio de la constante D, donde se observa cómo disminuye el efecto de la temperatura mientras se incrementa la resistencia del ligante.

Tabla 5.6 Constantes del modelo ESSO por tipo de asfalto.

Constante	A1	A2	A3
A	0.7536	-0.0863	-1.1694
B	3.1006	3.7229	4.3789
C	-0.1915	-0.1972	-0.1637
D	0.0877	0.0882	0.0931

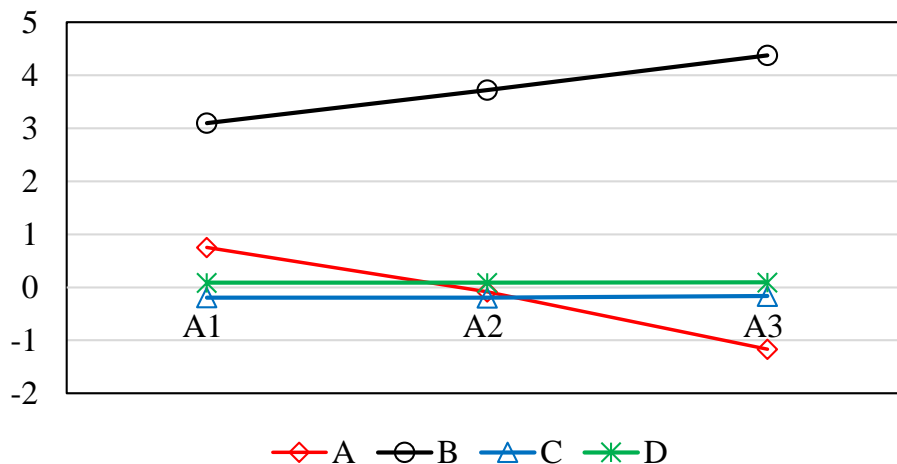


Figura 5.16 Variación de las constantes por tipo de asfalto

5.3.5 Conclusiones

En el presente estudio se evaluaron 3 mezclas con TN 12.5 mm y 3 diferentes ligantes asfálticos (A1, A2 y A3) para determinar las constantes del modelo ESSO y comparar los resultados obtenidos en cada uno de los materiales. Los resultados obtenidos presentan los siguientes comportamientos.

- El modelo ESSO reducido presenta un muy buen nivel de predicción de acuerdo con los puntos experimentales evaluados.
- Se deberá ampliar la validación del modelo fuera del rango de determinación de las constantes para complementar el análisis.
- El asfalto A3 (PG76-16) presentó menores niveles de deformación que los demás ligantes, en relación con la tasa de deformación a los distintos niveles de sollicitación evaluados.
- Las constantes del modelo (A, B, C y D) muestran tendencias en el comportamiento de los materiales.

Bibliografía

AASHTO TP79 (2015). Standard Method of Test for Determining the Dynamic Modulus and Flow Number for Asphalt Mixtures Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT). Recuperado el 18 de septiembre de 2016, de IHS Markit:

https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?document_name=AASHTO%20TP%2079&item_s_key=00526119

AMAAC PA-MA-022 (2016). Control y aseguramiento de calidad para mezclas asfálticas en caliente de granulometría densa de alto desempeño. Ciudad de México: Asociación Mexicana del Asfalto, A.C.

AMAAC PA-MA-013 (2013). Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño. Ciudad de México: Asociación Mexicana del Asfalto, A.C. ISBN: 978-607-8134-19-9.

AMAAC RA-01 (2017). Susceptibilidad a la humedad y deformación permanente por rodera con el analizador de rueda cargada de Hamburgo (HWT), en una mezcla asfáltica compactada. Ciudad de México: Asociación Mexicana del Asfalto, A.C. ISBN: 978-607-8134-06-9.

Aschenbrener, T. (1995). Evaluation of Hamburg Wheel Tracking Device to Predict Moisture Damage in Hot Mix Asphalt. Transportation Research Record 1492: Hot Mix Asphalt Design, Testing, Evaluation and Performance. pp. 193-201.

Aschenbrener, T., Currier G. (1993). Influence of testing variables on the results from the Hamburg Wheel Tracking Device. Report No. CDOT-DTD-R-93-22. Colorado Department of Transportation.

Ayala, Y., Cuellar, V., Delgado & Salazar, A. (2018). Manual de ensayos para laboratorio: Agregados (AG), parte I. Publicación técnica núm. 551. San fandila, Qro.

Ayala, Y., Delgado, H., Guzmán, D. & Salazar, A. (2018). Manual de ensayos para laboratorio: Mezclas asfálticas en caliente (MAC), parte I. Publicación técnica núm. 516. San fandila, Qro. pp 41-48.

Biligiri, K. P., Kaloush, K. E., Michael, S. M., & Witczak, M. W. (2007). Rational modeling of tertiary flow of asphalt mixtures. TRB No. 2001 (págs. 63-72). Washington, D.C.: TRB.

Delgado, H. Lo complejo del módulo complejo: principio de equivalencia tiempo-temperatura (tercera parte). Revista técnica Asfáltica No. 34, abril-junio, 2013.

Delgado, H., Gómez, J., Flores, M. (2017). Propuesta de método de prueba de módulo dinámico en mezclas asfálticas para México. Instituto Mexicano del Transporte. Recuperado el 5 de abril de 2019, de <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt507.pdf>

Kaloush, K., Witczak, M., & Sullivan, B. (2003). Simple performance test for permanent deformation evaluation of asphalt mixtures. Rilem Symposium (págs. 498-505). EUA: Manfred N Partl.

Meunier, M. (2012). Prédiction de l'orniérage lié aux déformations permanents des enrobés bitumineux. Tesis Doctoral presentada en la Escuela de Tecnología Superior de la Universidad de Quebec. Montreal, Canadá.

Meunier, M., Perraton, D., Di Benedetto, H. (2013). Modelling of permanent strain of asphalt concrete using the ESSO model. Road Materials and Pavement Design, 14:4, 864-887. DOI: 10.1080/14680629.2013.837836

Mohammad, N., Elseifi, A., Raghavendra, A. & Ye, M. (2015). Hamburg Wheel-Track Test Equipment Requirements and Improvements to AASHTO T 324: Report 219. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), pp. 27-29.

Rahman, F., & Mustaque, H. (2014). Review and Analysis of Hamburg Wheel Tracking Device Test Data: Report No. KS 14-1, Final Report. Kansas State University Transportation Center.

Romero, P., Vanfrank, K. & Nielson, J. (2008). Analysis of the Hamburg wheel-tracking device to predict behavior of asphalt mixtures at different test temperatures. Report No. UT-08.29. Utah Department of Transportation.

Texas Department of Transportation (Tx DOT) (2006). Hamburg Wheel Test. Technical Advisory.

Walubita L., Faruk A., Zhang J., Hu X. & Lee S. (2016). The Hamburg rutting test – Effects of HMA sample sitting time and test temperature variation. Journal Construction and Building Materials, vol. 108, pp. 22-28.

Wang, J., Molenaar, A., Van De Ven, M., & Wu, S. (2016). Characterization of permanent deformation of a dense asphalt mixture. Transportation Research Board. Delft: TRB.

Zhou, F., Scullion, T., & Lijun, S. (2004). Verification and modeling of three-stage permanent deformation behavior of asphalt mixes. En Journal of Transportation Engineering (págs. 486-494). ASCE.



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Km 12+000 Carretera Estatal 431 “El Colorado Galindo”
Parque Tecnológico San Fandila, Mpio. Pedro Escobedo,
Querétaro, México. C.P. 76703
Tel: +52 (442) 216 97 77 ext. 2610
Fax: +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>