

Evaluación de propiedades mecánicas a la deformación permanente por medio del modelo ESSO

Yelitza Ayala del Toro Horacio Delgado Alamilla

Publicación Técnica No. 617 Sanfandila, Qro. 2021

ISSN 0188-7297

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Infraestructura de Vías Terrestres del Instituto Mexicano del Transporte, por la M.I. Yelitza Ayala del Toro, estudiante de doctorado de la Universidad Autónoma de Chihuahua, y el Dr. Horacio Delgado Alamilla.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna II 13-18 Evaluación de propiedades mecánicas a la deformación permanente por medio del modelo ESSO.

Contenido

Página

Índi	ce de figurasv
Índi	ce de tablasvii
Sind	opsisix
Abs	tractxi
Res	umen ejecutivoxiii
Intro	oducción1
1.	Ensayo de compresión simple5
2.	Modelo ESSO 13
3.	Calibración del modelo19
4.	Análisis estadístico
5.	Influencia de las variables 41
6.	Conclusiones

Índice de figuras

Figura 1.1 Preparación de especímenes	5
Figura 1.2 Adaptación de LVDT's	6
Figura 1.3 Deformación por ciclo, fr = $10 H_z$.	6
Figura 1.4 Aplicación de la carga, fr = 10 H_Z	7
Figura 1.5 Aplicación de la carga, fr = 5 H_z	7
Figura 1.6 Aplicación de la carga, fr = 1 H_z	8
Figura 1.7 Evolución de la deformación.	8
Figura 1.8 Evolución de la deformación por ciclo	10
Figura 1.9 Evolución de la deformación acumulada	10
Figura 1.10 Estimación de ε	11
Figura 1.11 Deformación del espécimen durante el ensayo.	11
Figura 3.1 Granulometría de Diseño.	19
Figura 3.2 Constantes A y B	21
Figura 3.3 Variación del σ_H – Constante C	22
Figura 3.4 Extrapolación al origen – Constante C.	22
Figura 3.5 Determinación de la Constante C	22
Figura 3.6 Extrapolación al origen – Constante D.	23
Figura 3.7 Determinación de la Constante D	23
Figura 3.8 Extrapolación al origen – Constante F	24
Figura 3.9 Determinación de la Constante F.	24
Figura 3.10 Influencia de las constantes.	25
Figura 3.11 Constantes A y B	26
Figura 3.12 Extrapolación al origen – Constante C	27
Figura 3.13 Determinación de la Constante C	27
Figura 3.14 Extrapolación al origen – Constante D.	27
Figura 3.15 Determinación de la Constante D	28
Figura 4.1 Error relativo, modelo ESSO	32
Figura 4.2 Validación modelo ESSO	33
Figura 4.3 Análisis de variabilidad, modelo ESSO	35
Figura 4.4 Error relativo, modelo ESSO reducido	37
Figura 4.5 Validación modelo ESSO reducido.	37
Figura 4.6 Análisis de variabilidad, modelo ESSO reducido	39
Figura 5.1 Influencia de T y σv para una $fr = 10 H_z$	41
Figura 5.2 Influencia de T y σv para una $fr = 5 Hz$.	42
Figura 5.3 Influencia de T y σv para una $fr = 1 H_z$	42
Figura 5.4 Rangos de visualización de curvas	44

Índice de tablas

Tabla 2.1 Modelos de predicción de deformación permanente	13
Tabla 2.2 Modelos de predicción de deformación permanente (continuación).	14
Tabla 2.3 Ensayos para modelo ESSO.	15
Tabla 2.4 Ensayos para modelo ESSO reducido	17
Tabla 3.1 Parámetros de diseño.	19
Tabla 3.2 Resultados para modelo ESSO	20
Tabla 3.3 Variables, Constante C	21
Tabla 3.4 Variables, Constante D	23
Tabla 3.5 Variables, Constante F.	24
Tabla 3.6 Constantes modelo ESSO	25
Tabla 3.7 Resultados para modelo ESSO reducido	26
Tabla 3.8 Constantes modelo ESSO reducido.	28
Tabla 4.1 Validación de resultados, modelo ESSO	32
Tabla 4.2 Validación de resultados, modelo ESSO reducido	36
Tabla 5.1 Resultados de deformación	43
Tabla 5.2 Clasificación de las curvas de deformación	45

Sinopsis

En el presente estudio se analiza principalmente la validez de un modelo de predicción de la tasa de deformación permanente en mezclas asfálticas mediante un ensayo de compresión simple con carga repetida. Se determinan 5 constantes (A, B, C, D y F), las cuales están ligadas a una variable independiente (σ_V , σ_H , T, y f_r) del ensayo que influye directamente en el comportamiento de la mezcla. Aunado a esto, se analiza la aplicabilidad de una propuesta de reducción del modelo a 4 constantes. De acuerdo con los resultados obtenidos, estadísticamente, el modelo presenta una buena correlación entre los datos experimentales y los resultados pronosticados, lo cual indica ser un buen método para predecir el comportamiento de la mezcla bajo cualquier condición de las variables independientes y así establecer la ley de comportamiento a la deformación permanente.

Abstract

This paper presents, mainly, the validation of a prediction model of the permanent deformation rate in asphalt mixtures, based in a simple compression test with repeated loading. Five constants (A, B, C, D y F) are determined, which are linked to an independent variable (σ_V , σ_H , T, y f_r) of the test that directly influences the behavior of the mixture. In addition, it analyzes the applicability of a proposal to reduce the model to 4 constants. According to the results obtained, statistically the model presents a good correlation between the experimental data and the predicted results, which indicates a good method to predict the behavior of the mixture at any condition of the independent variables and thus, to establish the behavior law of permanent deformation.

Resumen ejecutivo

Actualmente, existen varios ensayos empíricos y mecánicos para evaluar la deformación permanente, así como modelos de predicción para determinar parámetros de correlación con dicho deterioro. Los ensayos mecánicos dan acceso a determinar características intrínsecas del material y los modelos resultantes de estos son más fáciles de llevar a la escala de la estructura. Por otro lado, el ensayo debe permitir que el material esté sujeto a condiciones similares a las que prevalecen en el pavimento.

En el presente estudio se analizó la validación del modelo ESSO —el cual es un modelo de predicción en función del número de ciclos y restricciones— así como la validación de este por medio de un ensayo mecánico de compresión axial cíclica. Se realizaron 17 ensayos para establecer las constantes del modelo y posteriormente 12 ensayos adicionales para su validación. Se determinó el error relativo del modelo y se validaron los resultados estadísticamente, donde se determinó una buena correlación entre ellos.

Finalmente, se determinaron las constantes en base al modelo ESSO reducido resultando también en una buena correlación de la tasa de deformación a excepción de los puntos experimentales donde se consideran parámetros conservadores (temperaturas y solicitaciones bajas, y altas frecuencias de carga). Lo anterior se presenta debido a la rigidez de la mezcla asfáltica bajo dichas condiciones, lo que conlleva a obtener niveles de deformación tan bajos que se genera una alta dispersión en los resultados. El modelo ESSO indica ser una buena herramienta para definir la ley del comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica a la deformación permanente.

Introducción

Antecedentes

En México, hace aproximadamente diez años, la Asociación Mexicana del Asfalto (AMAAC) en su protocolo PA-MA 01/2013 "Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño" propuso el uso del ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo para evaluar la susceptibilidad a la deformación de las mezclas asfálticas. En este protocolo se indica que para condiciones de alto tránsito la mezcla asfáltica debe ser ensayada a 50°C y cumplir con una deformación permanente menor a 10 mm para 20'000 pasadas. En la actualidad, este ensayo es utilizado para evaluar el desempeño en la mayoría del control 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.

En el laboratorio de asfaltos y mezclas asfálticas del IMT, se adquirió el equipo Rueda Cargada de Hamburgo en 2013 y desde entonces se han realizado ensayos con diferentes tipos de asfaltos siguiendo la Recomendación AMAAC RA-01/17 "Susceptibilidad a la humedad y a la deformación permanente por rodera de una mezcla asfáltica tendida y compactada, por medio del analizador de Rueda de Carga de Hamburgo (HWT)". Durante las evaluaciones realizadas se ha podido observar que, si la estructura granulométrica es seleccionada de manera adecuada, las mezclas cumplirán con la especificación (rodera \leq 10 mm en 20'000 pasadas), 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.

Debido a que el ensayo de rueda cargada es un ensayo empírico, no se pueden obtener parámetros mecánicos de las propiedades a la deformación permanente, ni tampoco permite diferenciar con facilidad mezclas asfálticas de comportamientos diferentes, mientras la estructura granulométrica esté correctamente seleccionada. Por lo cual, es indispensable utilizar en el diseño de la mezcla asfáltica un ensayo que nos proporcione parámetros mecánicos para predecir 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 simple, 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 calibrará un modelo de comportamiento de la mezcla asfáltica a este modo de falla.

Deformación permanente

La deformación permanente es uno de los principales modos de falla de un pavimento asfáltico, que debe ser considerado tanto en el diseño del pavimento como de la mezcla asfáltica. Existen diferentes ensayos para evaluar la resistencia a la deformación permanente en las mezclas asfálticas, los cuales se pueden agrupar en dos clasificaciones generales: ensayos empíricos y ensayos mecánicos. En México actualmente se utiliza un ensayo empírico para estimar la deformación permanente durante el diseño de la mezcla, el cual es un ensavo de rueda cargada (Wheel Tracking Test), principalmente en el equipo Rueda Cargada de Hamburgo (HWT); habiendo también otras evaluaciones de rueda cargada similares: Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA) y ensayo de Pista Española. Sin embargo, la tendencia mundial para la evaluación de la deformación permanente se inclina hacia la evaluación de ensayos mecánicos, como el ensayo de compresión axial cíclica (Wang, Molenaar, Van De Ven, & Wu, 2016), (Kaloush, Witczak, & Sullivan, 2003), (Zhou, Scullion, & Lijun, 2004), (Biligiri, Kaloush, Michael, & Witczak, 2007). De acuerdo con Meunier (2012), los ensayos empíricos se deben utilizar solo con fines de control y caracterización ya que permiten cuantificar la influencia de varios parámetros (carga, temperatura, velocidad, etc.) pero no permiten tener en cuenta la variabilidad de las condiciones reales observadas en una carretera (gradiente de temperatura, espesor de las capas, etc.). Por lo anterior, se establece que los ensayos empíricos no predicen la evolución de la deformación permanente y, por lo tanto, no permiten optimizar la estructura del pavimento.

Los ensayos mecánicos se pueden catalogar en ensayos uniaxiales, ensayos triaxiales con carga vertical y confinamiento constantes y ensayos triaxiales con carga vertical y confinamiento variables. Dentro de los ensayos uniaxiales se encuentran los ensayos estáticos en compresión simple y ensayos de compresión cíclica. Los ensayos estáticos aportan poca información sobre el proceso de deformaciones permanentes en las mezclas asfálticas, al ser poco representativos de las complejas solicitaciones que originan el fenómeno de la deformación. Los ensayos de compresión cíclica permiten la aplicación de carga y descarga del material, el cual es un fenómeno esencial para determinar el proceso de evolución de la deformación, además de permitir una interpretación más directa en la ley de comportamiento del material en base a las condiciones de la solicitación; sin embargo, este ensayo no permite evaluar el efecto de las rotaciones de tensión observadas al pasar la carga de una rueda. Los ensayos triaxiales con confinamiento constante permiten determinar el comportamiento del material simulando las condiciones de confinamiento a las cuales estará sometido el pavimento asfáltico.

Los ensayos mecánicos dan acceso a determinar propiedades intrínsecas del material y los modelos resultantes de estos son más fáciles de llevar a la escala real. Por otro lado, el ensayo utilizado en la evaluación de un deterioro debe permitir

que el material esté sujeto a condiciones similares a las que prevalecen en el pavimento, por lo que los ensayos mecánicos son los más adecuados para predecir su comportamiento.

1.Ensayo de compresión simple

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 fue basado en los parámetros indicados en la norma de referencia AASHTO TP79-15, donde inicialmente se debe fabricar un espécimen de 150 mm de diámetro y 170 mm de altura, para posteriormente extraer el núcleo y cortarlo transversalmente con el objetivo de obtener un espécimen de ensayo de 100 mm de diámetro y 150 mm de altura, como se observa en la Figura 1.1. El rango de vacíos es variable, a ser definido por el experimento.



Figura 1.1 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 se pueda realizar la medición del desplazamiento axial (Figura 1.2). 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 1.2 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 carga de 10 Hz (Figura 1.3). La deformación total (ε_t) se descompone en deformación permanente (ε_p) y deformación recuperable (ε_r), como se indica en la Ecuación 1.



 $\varepsilon_t = \varepsilon_p + \varepsilon_r$

(1)



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 1.4, 1.5, y 1.6, para 10, 5 y 1 Hz, respectivamente.











Figura 1.6 Aplicación de la carga, fr = 1 H_z .

El comportamiento general de la deformación permanente de una mezcla asfáltica presenta una curva de evolución como la que se observa en la Figura 1.7. En el análisis de la deformación permanente —de acuerdo con distintos autores— existen 3 fases y varios parámetros a considerar.



Figura 1.7 Evolución de la deformación.

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 este.

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

 $\dot{\varepsilon}$ = 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 (NF).

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 (µɛ) 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). En la Figura 1.8 se ilustra un ejemplo del comportamiento de la deformación permanente y recuperable en un ensayo. En un ensayo típico, la deformación recuperable se mantiene constante y suele ser de mayor magnitud que la deformación permanente. La deformación permanente entonces adquiere la forma observada en la Figura 1.9, y debido a que la deformación recuperable es constante, la deformación total presenta la misma forma que la deformación permanente. Por otro lado, la deformación recuperable acumulada se incrementa de manera lineal, como se observa en la misma figura.



Figura 1.8 Evolución de la deformación por ciclo



Figura 1.9 Evolución de la deformación acumulada

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 este (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 $\dot{\varepsilon}$. Lo anterior se ejemplifica en la Figura 1.10, donde se puede observar cómo a 50,000 ciclos la tendencia de la tasa de deformación se reflejaría como la línea roja resultado en una sobreestimación del valor $\dot{\varepsilon}$; 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 1.10 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 ser un rango suficiente, ya que en los ensayos con falla rápida (ej: T=50 °C y σ_V =600 kPa) los especímenes se llegaban a deformar hasta un punto que comenzaban a romperse. En la Figura 1.11 se observa un espécimen antes y después de ser ensayado, donde se observa cómo la carga aplicada genera una compresión axial y expansión lateral.



Figura 1.11 Deformación del espécimen durante el ensayo.

Lo anterior también es un criterio que considerar, pues si los especímenes se destruyen durante la ejecución de la prueba, los LVDT's pueden llegar a dañarse irreparablemente. Otro criterio importante por considerar es la temperatura, pues 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 esta 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 2.1 y 2.2 se indican los modelos comúnmente utilizados para predecir el comportamiento de la deformación en la mezcla asfáltica.

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

Tabla 2.1 Modelos de predicción de deformación permanente.

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
	VESYS	$\dot{\varepsilon} = \mu * \varepsilon_r N^{-lpha}$	Kenis 1977
Modelos de	AASHTO 2002	$\log \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = \log C + 0.4262 * \log N$	Witczak 2001
predicción en función del número de	Tseng y Lytton	$\varepsilon_{p} = \varepsilon_{0} e^{-(\rho/N)^{\beta}}$ $\dot{\varepsilon} = \varepsilon_{0} \beta \rho^{\beta} \frac{\sqrt[N^{\beta}]{A}}{N^{(\beta+1)}}$	Tseng y Lytton 1989
ciclos de aplicación de la carga y	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
esfuerzos	ESSO	$log \dot{\varepsilon} = A + B \log \sigma_V + C\sigma_H + D(T_i - T_0) + F \log \left(\frac{fr_j^{T_i}}{fr_0^{T_0}}\right)$	Aussedat 1977

Tabla 2.2 Modelos de predicción de deformación permanente (continuación).

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 $fr_0^{T_0}$, y una presión de confinamiento σ_{h_0} . Aussedat fue el primero en proponer T_0 =30 °C, $fr_0^{T_0}$ =10 Hz y σ_{H_0} =0 Pa*10⁵ como dominio de referencia para definir las constantes del modelo ESSO.

$$\log \dot{\varepsilon} = A + B \log \sigma_V + C \sigma_H + D(T_i - T_0) + F \log\left(\frac{f r_j^{T_i}}{f r_0^{T_0}}\right)$$
(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 Pa*10⁵, $\sigma_H = 0$, 1 y 2 Pa*10⁵, $f_r = 10$, 5 y 1 Hz.

Tabla 2.3 Ensayos para modelo ESSO.						
No. Ensayo	<i>T_i</i> [°C]	<i>σ_V</i> [Pa * 10⁵]	σ_H [Pa * 10 ⁵]	fr [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 esta 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.

La constante C evalúa el efecto del esfuerzo horizontal (confinamiento), y se determina mediante la pendiente de la relación lineal, en el dominio semilogarítmico, entre la ordenada al origen (a σ H) de la relación de la tasa de deformación ($\dot{\varepsilon}$) 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 ($\dot{\varepsilon}$) 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 $\left(\Delta(\log fr) = \log fr_i^{T_i} - \log fr_0^{T_0}\right)$.

De cada ensayo se determina el valor de la tasa de deformación $\dot{\varepsilon}$, siendo esta 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.

La constante C evalúa el efecto del esfuerzo horizontal (confinamiento), y se determina mediante la pendiente de la relación lineal, en el dominio semilogarítmico, entre la ordenada al origen ($a_{\sigma H}$) 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 ($\dot{\varepsilon}$) 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 ($\dot{\varepsilon}$) 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 $\left(\Delta(\log fr) = \log fr_i^{T_i} - \log fr_0^{T_0}\right)$.

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}).

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

Los autores proponen utilizar el dominio de referencia: $T_0=50$ °C, $fr_0^{T_0}=1$ Hz y $\sigma_{h_0}=0$ Pa*10⁵, en base a los resultados observados mediante el empleo de distintos dominios, siendo este, 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.

rabia 2.4 Ensayos para modelo ESSO reducido.						
No. Ensayo	T _i [°C]	σ _v [Pa*10 ⁵]	σ _H [Pa*10 ⁵]	fr [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		

Tabla 2.4 Ensayos para modelo ESSO reducido

3. Calibración del modelo

3.1 Descripción del experimento

Para llevar a cabo la calibración del modelo se utilizó una mezcla asfáltica con agregado de origen basáltico y granulometría densa como la indicada en la Figura 3.1. Los resultados del diseño volumétrico se presentan en la Tabla 3.1. El ligante asfáltico es un material producto de refinería en México, sin modificador incorporado y que cumple con una clasificación Grado PG 64-16.



Figura 3.1 Granulometría de Diseño.

	Tabla 3.1 Parámetros de diseño.							
P _b , %	Promedio G _{mb} @N _{dis}	Promedio G _{mb} @N _{ini}	G _{mm}	%G _{mm} @N _{ini}	%G _{mm} @N _{dis}	VAM [%]	VFA [%]	DP [%]
5.4	2.432	2.151	2.542	84.6	95.7	14.5	70.1	1.1
E	Especificacio	nes de Dise	ño	≤ 89	96	≥ 13	65 - 75	0.6 - 1.2

Se realizaron inicialmente los ensayos de compresión axial cíclica indicados en las Tablas 2.3 y 2.4 para obtener el valor de la tasa de deformación ($\dot{\varepsilon}$) 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 200,000 ciclos para las frecuencias de 10 y 5 Hz (1 seg por ciclo), lo que equivale a una

duración aproximada de 2.3 días; así como 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 se indican en la Tabla 3.2 para determinar las constantes del modelo.

No. Ensayo	<i>T_i</i> [°C]	$\sigma_{V} [Pa^{*}10^{5}]$	$\sigma_{H} [Pa^{*}10^{5}]$	fr [Hz]	έ [%/Μc]
1	30	2	0	10	0.316
2	30	4	0	10	1.217
3	30	6	0	10	3.331
4	30	6	1	10	1.352
5	30	6	2	10	0.922
6	40	2	0	10	8.860
7	40	4	0	10	18.536
8	40	6	0	10	113.993
9	50	2	0	10	91.968
10	50	4	0	10	243.420
11	50	6	0	10	624.333
12	30	2	0	5	1.284
13	30	4	0	5	6.659
14	30	6	0	5	16.646
15	30	2	0	1	3.417
16	30	4	0	1	19.393
17	30	6	0	1	72.954

		_			
Tabla	3.2	Resultados	para	modelo	ESSO.

3.2 Modelo ESSO

La calibración del modelo se realizó partiendo de la recomendación de Aussedat para un dominio de referencia de $T_0=30$ °C, $fr_0^{T_0}=10$ Hz y $\sigma_{H_0}=0$ Pa*10⁵.

Las constantes A y B evalúan la *relación base* del modelo, que es la relación entre la deformación y el esfuerzo vertical $(\log \dot{\varepsilon} = A + B \log \sigma_V)$, 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, 2 y 3, Tabla 3.2). En la Figura 3.2 se observa la determinación de la constante A = log (0.0701) = -1.1543 y la constante B = 2.1235.



Figura 3.2 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*10⁵ y $\sigma_H = 2$ Pa*10⁵, ambos a un $\sigma_V = 6$ Pa*10⁵ como se observa en la Figura 3.3 (ensayos No. 1, 2, 3, 4 y 5 - Tabla 3.2). Las curvas se extrapolan para obtener el valor de la ordenada al origen ($a_{\sigma H}$) —indicados en la Tabla 3.3— para cada nivel de confinamiento como se observa en la Figura 3.4. Finalmente, se determina la constante C como la pendiente de la relación $a_{\sigma H}$ con el $\Delta \sigma_H$ (Figura 3.5) en el dominio semi-logarítmico; C = log($e^{-0.614}$) = -0.2667.

Tabla 3.3 Variables, Constante C.						
σ _H (Pa*10 ⁵)	а _{σн} (%/Мс)	$\Delta\sigma_H$ (Pa*10 ⁵)				
0	0.0701	0				
1	0.0301	1				
2	0.0205	2				



Figura 3.3 Variación del σ_H – Constante C.



Figura 3.4 Extrapolación al origen – Constante C.



Figura 3.5 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 3.6

(ensayos No. 1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10 y 11 - Tabla 3.2). 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) a cada condición de temperatura (Tabla 3.4). Finalmente, se determina la constante D como la pendiente de la relación a_T con el Δ T en el dominio semi-logarítmico; D = log($e^{0.297}$) = 0.1290 (Figura 3.7).

Tabla 3.4 Variables, Constante D.						
T (°C)	a⊤ (%/Mc)	Δ <i>T</i> (°C)				
30	0.0701	0				
40	1.5742	10				
50	26.625	20				



Figura 3.6 Extrapolación al origen – Constante D.



Figura 3.7 Determinación de la Constante D.

Finalmente, la constante F evalúa el efecto de la frecuencia, y se determina partiendo de la *relación lineal*, en el dominio logarítmico, de la tasa de deformación

($\dot{\varepsilon}$) y el esfuerzo vertical a distintas frecuencias (ensayos No. 1, 2, 3, 12, 13, 14, 15, 16 y 17 - Tabla 3.2) para extrapolar las curvas y determinar la ordenada al origen (a_{fr}) de cada condición de frecuencia (fr = 1, 5 y 10 Hz); ver Figura 3.8. Finalmente, se determina la constante F como la pendiente —en el dominio semi-logarítmico— de la relación a_{fr} con el valor de $\Delta(\log fr)$, indicados en la Tabla 3.5; F = log($e^{-1.869}$) = -0.8117 (Figura 3.9).

Tabla 3.5 Variables, Constante F.								
fr (Hz)	a _{fr} (%/Mc)	$\Delta(\log fr)$ (Hz)						
10	0.0701	0.0						
5	0.1589	-0.3						
1	0.4825	-1.0						



Figura 3.8 Extrapolación al origen – Constante F.



Figura 3.9 Determinación de la Constante F.

De acuerdo con lo descrito anteriormente, se obtienen las 5 constantes del modelo ESSO como se indican en la Tabla 3.6. En el ejemplo indicado en la Figura 3.10, se puede observar cómo aplicando el modelo a distintos valores de las variables independientes (σ_V , σ_H , T, f_r), las constantes A y B marcarán el inicio de la posición de la curva y las constantes C, D, y F únicamente la trasladarán verticalmente; es decir, el incremento del confinamiento (C) disminuirá la deformación, trasladando la curva hacia abajo; mientras que el decremento de la frecuencia de carga (F) y el incremento en la temperatura (T) la aumentarán, trasladando la curva hacia arriba. La dirección en la que se trasladarán dependerá si la variable le generará menor o mayor deformación a la mezcla dependiendo del dominio de referencia elegido.

Tabla 3.6 Constantes modelo ESSO.						
Constante	Valor					
A	-1.1543					
В	2.1235					
С	-0.2667					
D	0.1290					
F	-0.8117					



Figura 3.10 Influencia de las constantes.

Una vez determinadas las constantes, se puede calcular el valor de $\log \dot{\varepsilon}$ para cualquier nivel de esfuerzo vertical, horizontal, temperatura o frecuencia, recordando el dominio de referencia con el cual fueron calculadas: $T_0=30$ °C, $fr_0^{T_0}=10$ Hz y $\sigma_{H_0}=0$ Pa * 10⁵. La sustitución de las constantes en el modelo se muestra a continuación:

$$\log \dot{\varepsilon} = -1.1543 + 2.1235 \log \sigma_V - 0.2667 \sigma_H + 0.1290(T_i - 30) - 0.8117 \log \left(\frac{f r_j^{T_i}}{10}\right)$$

3.3 Modelo ESSO reducido

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*10⁵. Los resultados de cada ensayo para determinar las constantes se indican en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7 Resultados para modelo ESSO reducido.								
No. Ensayo	T _i [°C]	$\sigma_V [Pa^*10^5]$	<i>σ_H</i> [Pa*10⁵]	fr [Hz]	έ [%/Μc]			
1	50	2	0	1	153.205			
2	50	6	0	1	2133.376			
3	50	6	1	1	1770.876			
4	50	6	2	1	1599.311			
5	30	6	0	1	72.954			
6	40	6	0	1	321.217			

En la Figura 3.11 se observa la determinación de las constantes A = log (29.082) = 1.4636 y la constante B = 2.3973, por medio de dos puntos experimentales (ensayos 1 y 2, Tabla 4). Las constantes C y D se obtuvieron asumiendo nuevamente una pendiente constante para la variación de la influencia de cada variable en el esfuerzo vertical y realizando la extrapolación al origen. En las Figuras 3.12 y 3.13 se ilustra la determinación de la constante C = $log(e^{-0.144}) = -0.0625$; mientras que en las Figuras 3.14 y 3.15 se puede observar la determinación de la constante D = $log(e^{-0.1688}) = 0.0733$.



Figura 3.11 Constantes A y B.







Figura 3.13 Determinación de la Constante C.



Figura 3.14 Extrapolación al origen – Constante D.



Figura 3.15 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 3.8. Como se puede observar, respecto a las constantes del modelo completo, la constante B es muy similar, por lo que se deduce que es un valor que se mantiene constante independientemente del dominio de referencia.

Tabla 3.8 Constantes modelo ESSO reducido.						
Constante	Valor					
A	1.4636					
В	2.3973					
С	-0.0625					
D	0.0733					

Una vez determinadas las constantes, se puede calcular el valor de $\log \dot{\varepsilon}$ para cualquier nivel de esfuerzo vertical, horizontal, temperatura o frecuencia, recordando el dominio de referencia con el cual fueron calculadas: $T_0=50$ °C, $fr_0^{T_0}=1$ Hz y $\sigma_{H_0}=0$ Pa * 10⁵.

El valor de $log(a_T)$ se obtiene por medio de la Ecuación 3, donde el valor de la temperatura se refiere a la utilizada en cada ensayo de compresión axial cíclica (T_i) ; 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 $T_{ref} = 20 \ ^{\circ}C$. La ecuación es única para cada tipo de mezcla asfáltica, la cual se obtiene de la calibración de la curva maestra. Finalmente, los valores restantes son $T_0=50 \ ^{\circ}C$ y $fr_0^{T_0}=1$ Hz, que se refieren al dominio de referencia.

$$\log(a_T) = 0.0016T_{ref}^2 - 0.01677T_{ref} + 2.6504$$
(3)

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

$$\log \dot{\varepsilon} = 1.4636 + 2.3973 \log \sigma_V - 0.0625 \sigma_H + 0.0733 \left\{ (T_i - 50) + \frac{(T_i - 50)}{1.7346} \log \left(\frac{fr_j^{T_i}}{1} \right) \right\}$$

4. Análisis estadístico

Para verificar la validez tanto de la calibración del modelo ESSO completo, como del modelo reducido, se realizó un análisis mediante el error relativo porcentual para un total de 29 puntos experimentales para el modelo completo y 31 puntos experimentales para el modelo reducido.

Los valores del logaritmo de la tasa de deformación $(\log(\dot{\varepsilon}))$ estimados por el modelo "*Y*" se comparan con los valores del logaritmo de la tasa de deformación $(\log(\dot{\varepsilon}))$ obtenidos experimentalmente "*X*", con una comparación directa entre las variables. La relación que se busca es una lineal del tipo: $Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon$, donde se espera que la pendiente de la recta sea cercana a uno y la dispersión de los puntos alrededor de la recta ideal Y = X sea razonablemente pequeña.

4.1 Modelo ESSO

Refiriéndonos nuevamente al modelo con la sustitución de las constantes, se procede a calcular el valor de $\log \dot{\varepsilon}$ para los valores teóricos. Es importante mencionar que la ecuación indicada a continuación no es un modelo de uso general, sino que se obtuvo del modelo ESSO (Ecuación 2) con las constantes definidas para la mezcla en estudio (Tabla 3.6), por lo que solo es válida para la mezcla evaluada; cualquier variación en el tipo de material o formulación de la mezcla conlleva a una nueva determinación de las constantes de ensayo.

$$\log \dot{\varepsilon} = -1.1543 + 2.1235 \log \sigma_V - 0.2667 \sigma_H + 0.1290(T_i - 30) - 0.8117 \log\left(\frac{fr_j^{T_i}}{10}\right)$$

En la Tabla 4.1 se indican los resultados considerando los ensayos experimentales para determinar las constantes del modelo (1-17) y 12 ensayos adicionales (18-29) para la validación de este. Los ensayos adicionales se implementaron con el objetivo de establecer puntos de predicción fuera del marco de la determinación de las constantes del modelo y obtener una validación real.

Se determinó el error relativo (%) del log $\dot{\varepsilon}$ experimental contra el log $\dot{\varepsilon}$ teórico, donde se encontraron valores bajos de error en la mayoría de los puntos experimentales, a excepción de los puntos 12 y 24. En la Figura 4.1 se muestra gráficamente el porcentaje de error relativo de cada prueba, mientras que en la Figura 4.2 se muestra la precisión del modelo mediante la línea de igualdad y la real. Entre más cercana sea la línea real del modelo a la línea de igualdad (45°), mejor es la correlación entre los datos experimentales y teóricos.

	Tabla 4.1 Validación de resultados, modelo ESSO.									
	No. Ensavo	Ti	σ_V	σ_H	fr _j	log(έ) Experimental "X"	log(ε) Teorico "Y"	Error relativo		
		[°C]	[Pa * 10 ⁵]	[Pa * 10 ⁵]	[Hz]	[%/Mc]	[%/Mc]	(%)		
	1	30	2	0	10	-0.501	-0.5150	2.9		
	2	30	4	0	10	0.085	0.1242	45.3		
0	3	30	6	0	10	0.523	0.4981	-4.7		
lela	4	30	6	1	10	0.131	0.2315	76.7		
οοι	5	30	6	2	10	-0.035	-0.0352	-0.7		
л н	6	40	2	0	10	0.947	0.7748	-18.2		
ara	7	40	4	0	10	1.268	1.4140	11.5		
ď	8	40	6	0	10	2.057	1.7880	-13.1		
iór	9	50	2	0	10	1.964	2.0647	5.1		
tac	10	50	4	0	10	2.386	2.7039	13.3		
en	11	50	6	0	10	2.795	3.0778	10.1		
i.	12	30	2	0	5	0.109	-0.2707	-349.4		
Jec	13	30	4	0	5	0.823	0.3685	-55.2		
X	14	30	6	0	5	1.221	0.7425	-39.2		
-	15	30	2	0	1	0.534	0.2967	-44.4		
	16	30	4	0	1	1.288	0.9359	-27.3		
	17	30	6	0	1	1.863	1.3098	-29.7		
	18	40	2	0	1	1.471	1.5865	7.8		
'n	19	40	4	0	1	2.150	2.2257	3.5		
ara	20	40	6	0	1	2.507	2.5997	3.7		
du	21	50	2	0	1	2.185	2.8764	31.6		
iốn	22	50	4	0	1	2.934	3.5156	19.8		
tac	23	50	6	0	1	3.329	3.8895	16.8		
lid I	24	40	2	0	5	0.446	1.0192	128.6		
rim va	25	40	4	0	5	1.874	1.6584	-11.5		
Del	26	40	6	0	5	2.079	2.0323	-2.2		
Щ	27	50	2	0	5	2.035	2.3090	13.5		
-	28	50	4	0	5	2.773	2.9482	6.3		
	29	50	6	0	5	3.145	3.3222	5.6		







Figura 4.2 Validación modelo ESSO

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	39.939	39.9393	425.39	0.000
Experimental	1	39.939	39.9393	425.39	0.000
Error	27	2.535	0.0939		
Total	28	42.474			

Resumen del modelo

		R-cuad.	R-cuad.
S	R-cuad.	(ajustado)	(pred)
0.306412	94.03%	93.81%	93.22%

Coeficientes

		EE del			
Término	Coef	coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	-0.152	0.101	-1.51	0.144	
Experimental	1.1242	0.0545	20.62	0.000	1.00

Ecuación de regresión

Teórico = -0.152 + 1.1242 Experimental

Ajustes y diagnósticos para observaciones poco comunes

					Resid				
	Obs	Teórico	Ajuste	Resid	est.				
	17	1.3098	1.9425	-0.6327	-2.11	R			
	24	1.0192	0.3493	0.6699	2.27	R			
I	Residuo grande R								

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

- De acuerdo a los coeficientes, la predicción del modelo mantiene una relación lineal y se confirma que no se requiere la ordenada al origen (β₀) al aceptarse la hipótesis nula (p > 0.05) de que el coeficiente es igual a cero (no hay efecto).
- Los ensayos No. 17 y No. 24 indican ser posibles datos atípicos.
- Existe un muy buen nivel de predicción con un $R^{2}_{ajustado} = 93.81$ %.

En relación con la variabilidad (Figura 4.3) 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 4.3 Análisis de variabilidad, modelo ESSO

4.2 Modelo ESSO reducido

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

$$\log \dot{\varepsilon} = 1.4636 + 2.3973 \log \sigma_V - 0.0625 \sigma_H + 0.0733 \left\{ (T_i - 50) + \frac{(T_i - 50)}{1.7346} \log \left(\frac{f r_j^{T_i}}{1} \right) \right\}$$

En la Tabla 4.2 se indican los resultados del modelo considerando los puntos experimentales para determinar las constantes de este (1-6) y 25 puntos adicionales (7-31) para su validación. Cabe mencionar que la mayoría de estos puntos son los mismos con que se determinó y validó el modelo ESSO inicial, a excepción de los puntos 3 y 4 que fueron adicionales propuestos por Meunier et al. (2013).

		Tapi	a 4.2 validad	cion de resu	itados	s, modelo ESSO	reauciao	•
	No.	Ti	σ_V	σ_{H}	fri	log(ċ)	log(ċ)	Error relativo
	Ensavo					Experimental	Modelo	(- ()
<u> </u>		[°C]	[Pa * 10°]	[Pa * 10°]	[Hz]	[%/Mc]	[%/MC]	(%)
elo ici	1	50	2	0	1	2.185	2.185	0.0
nta ode	2	50	6	0	1	3.329	3.329	0.0
ne De	3	50	6	1	1	3.248	3.267	0.6
ra	4	50	6	2	1	3.204	3.204	0.0
pa pa	5	30	6	0	1	1.863	1.863	0.0
ч	6	40	6	0	1	2.507	2.596	3.6
	7	30	2	0	1	0.534	0.719	34.8
	8	30	4	0	1	1.288	1.441	11.9
	9	40	2	0	1	1.471	1.452	-1.3
	10	40	4	0	1	2.150	2.174	1.1
	11	50	4	0	1	2.934	2.907	-0.9
	12	30	2	0	5	0.109	1.310	1107.0
ý	13	30	4	0	5	0.823	2.032	146.7
ŭ,	14	30	6	0	5	1.221	2.454	100.9
ida	15	40	2	0	5	0.446	1.748	291.9
val	16	40	4	0	5	1.874	2.469	31.7
ā	17	40	6	0	5	2.079	2.891	39.1
bai	18	50	2	0	5	2.035	2.185	7.4
u.	19	50	4	0	5	2.773	2.907	4.8
cić	20	50	6	0	5	3.145	3.329	5.9
nta	21	30	2	0	10	-0.501	1.564	-412.4
Jer	22	30	4	0	10	0.085	2.286	2575.2
irin	23	30	6	0	10	0.523	2.708	418.2
be	24	40	2	0	10	0.947	1.875	97.9
ŵ	25	40	4	0	10	1.268	2.596	104.8
	26	40	6	0	10	2.057	3.019	46.8
	27	50	2	0	10	1.964	2.185	11.3
	28	50	4	0	10	2.386	2.907	21.8
	29	50	6	0	10	2.795	3.329	19.1
	30	30	6	1	10	0.131	2.646	1919.8
	31	30	6	2	10	-0.035	2.583	-7387.4

En las Figuras 4.4 y 4.5 se observa la magnitud del error para cada ensayo, así como la correlación entre el valor de la deformación del modelo con la deformación experimental. Observando los resultados se determina que el modelo reducido presenta muy buena correlación con los puntos experimentales, sin embargo, debido a que el modelo reducido se determina a temperaturas y niveles de carga altos, los ensayos realizados en condiciones conservadoras --temperatura y niveles de solicitación bajos, así como frecuencias de carga altas (p.ej. T_0 =30 °C, σ_V =2 Pa * 10⁵ y $fr_0^{T_0}$ =10 Hz)— son difíciles de predecir. Lo anterior se presenta debido a la rigidez de la mezcla asfáltica bajo dichas condiciones, lo que conlleva a obtener niveles de deformación tan bajos que se genera una alta dispersión en los resultados.







Figura 4.5 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	19.445	19.4448	131.09	0.000
Experimental	1	19.445	19.4448	131.09	0.000
Error	29	4.302	0.1483		
Total	30	23.746			

Resumen del modelo

		R-cuad.	R-cuad.
S	R-cuad.	(ajustado)	(pred)
0.385138	81.89%	81.26%	79.13%

Coeficientes

		EE del			
Término	Coef	coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	0.392	0.125	3.14	0.004	
Experimental	0.7251	0.0633	11.45	0.000	1.00

Ecuación de regresión

Teórico = 0.392 + 0.7251 Experimental

Ajustes y diagnósticos para observaciones poco comunes

				Resid	
Obs	Teórico	Ajuste	Resid	est.	
27	0.917	1.816	-0.899	-2.38	R
Residuo grande R					

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

- La predicción del modelo mantiene una relación lineal, sin embargo, se requiere la ordenada al origen (β_0) al rechazarse la hipótesis nula (p < 0.05) de que el coeficiente es igual a cero.
- El ensayo No. 27 indica ser un dato atípico.
- Existe un nivel de predicción relativamente bueno, con un R²_{ajustado} = 81.26 %.

En relación con la variabilidad (Figura 4.6) 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 4.6 Análisis de variabilidad, modelo ESSO reducido.

5. Influencia de las variables

Con el objetivo de analizar a mayor profundidad los resultados obtenidos de cada uno de los ensayos experimentales requeridos para el modelo ESSO y su validación, se indica a continuación la influencia de cada una de las variables en el comportamiento a la deformación permanente para la mezcla de diseño.

En el presente análisis se indica la evolución de la deformación durante todos los ciclos de aplicación de la carga para cada nivel de frecuencia. En las Figuras 5.1, 5.2 y 5.3 se puede observar el comportamiento general de la mezcla: a mayor temperatura y/o nivel de esfuerzo vertical se presenta una mayor deformación inicial (ε_0) y una mayor tasa de deformación $(\dot{\varepsilon})$. Del mismo modo, conforme ambas variables se incrementan, la aparición de la Fase 3 comienza a un número menor de ciclos de aplicación de la carga; es decir, la mezcla se deformará en mayor medida a temperaturas altas y/o niveles de esfuerzos verticales altos.



Figura 5.1 Influencia de T y σ_v para una f_r = 10 Hz.



Figura 5.2 Influencia de T y σ_v para una f_r = 5 Hz.



Figura 5.3 Influencia de T y σ_v para una f_r = 1 Hz

Comparando las tres Figuras anteriores, se observa la influencia de la frecuencia (tiempo de aplicación de la carga) en el comportamiento de la mezcla con el cambio en el esfuerzo vertical y la temperatura; es decir, a menor frecuencia de carga, la influencia del esfuerzo vertical es mayor. Por ejemplo, hay que notar cómo se abre el rango de respuesta de los especímenes evaluados a 30 °C cuando se evalúan a 10 Hz, en comparación con la respuesta de los especímenes evaluados a la misma temperatura, pero con una frecuencia de 1 Hz.

Por otro lado, conforme la frecuencia de carga se incrementa, los niveles de deformación son menores; por ejemplo, a una frecuencia de 10 Hz y 30 °C (**¡Error! N o se encuentra el origen de la referencia.**, color verde) se puede observar que las curvas de deformación presentan una pendiente baja y no se logra observar el término de la Fase 2 (inicio de la Fase 3). Los resultados, en función de la tasa de deformación, de cada curva analizada se indican en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Resultados de deformación					
Frecuencia	Temperatura	Esfuerzo vertical	Ė		
(Hz)	(°C)	(σ _ν)	(%/Mc)		
		200	0.316		
	30	400	1.2		
		600	3.3		
		200	8.9		
10	40	400	18.5		
		600	113.9		
		200	92.0		
	50	400	243.4		
		600	624.3		
		200	1.3		
	30	400	6.7		
		600	16.6		
		200	2.8		
5	40	400	74.9		
		600	119.9		
		200	108.3		
	50	400	592.6		
		600	1394.9		
		200	3.4		
	30	400	19.4		
		600	73.0		
		200	29.5		
1	40	400	141.4		
		600	321.2		
		200	153.2		
	50	400	859.7		
		600	2133.4		

Por lo anterior, se definió la siguiente clasificación con base a la forma de la curva para clasificar el nivel de deformación que presenta la mezcla asfáltica en un rango de 200,000 ciclos de aplicación de la carga:

- Baja: tasa de deformación del 0 al 10 %/Mc y sin inicio de la Fase 3.
- Media: tasa de deformación del 5 al 30 %/Mc y con inicio de la Fase 3.
- Alta: tasa de deformación del 31 al 100 %/Mc y con inicio de la Fase 3.
- Muy Alta: tasa de deformación mayor a 100 %/Mc y generalmente no se alcanza a diferenciar la Fase 2 de la Fase 3.

Es importante destacar que la visualización de las Fases 2 y 3 dependerá también de la escala en que se observe la curva, ya que se puede apreciar de manera distinta si se observa en un rango de 0 – 200,000 ciclos, que si se aprecia la misma en un rango de 0 – 80,000 ciclos; como se observa en la curva "T₃₀, σv_{600} " de la Figura 5.4 donde en la imagen de la izquierda se podría notar una curva con deformación muy alta, mientras que en segundo caso se podría clasificar como alta.



Figura 5.4 Rangos de visualización de curvas

En la Tabla 5.2 se define la clasificación de cada curva de deformación de la mezcla asfáltica en estudio con base a las definiciones anteriores. De la clasificación se puede destacar que un rango adecuado para analizar el desempeño de la mezcla puede fungir en una curva con clasificación media o alta, siendo estas suficientes para detectar las Fases 2 y 3 de la deformación permanente, así como lograr obtener resultados en un periodo de tiempo relativamente corto.

Tabla 5.2 Clasificación de las curvas de deformación					
Frecuencia (Hz)	Temperatura (°C)	Esfuerzo vertical (σ _v)	έ (%/Mc)	Clasificación de la curva	
		200	0.316	Baja	
	30	400	1.2	Baja	
		600	3.3	Baja	
		200	8.9	Media	
10	40	400	18.5	Media	
		600	113.9	Muy Alta	
		200	92.0	Alta	
	50	400	243.4	Muy Alta	
		600	624.3	Muy Alta	
	30	200	1.3	Baja	
		400	6.7	Baja	
		600	16.6	Media	
	40	200	2.8	Baja	
5		400	74.9	Alta	
		600	119.9	Muy Alta	
		200	108.3	Muy Alta	
	50	400	592.6	Muy Alta	
		600	1394.9	Muy Alta	
1	30	200	3.4	Baja	
		400	19.4	Media	
		600	73.0	Alta	
		200	29.5	Media	
	40	400	141.4	Muy Alta	
		600	321.2	Muy Alta	
		200	153.2	Muy Alta	
	50	400	859.7	Muy Alta	
		600	2133.4	Muy Alta	

6.Conclusiones

Algunos modelos matemáticos estiman la deformación permanente por medio del inicio de la Fase 3 (NF); sin embargo, este es un parámetro complicado de determinar en mezclas asfálticas con un alto desempeño y condiciones de ensayo conservadoras; por ejemplo: buena granulometría, asfalto modificado, temperaturas bajas, bajos niveles de solicitación, frecuencia de 10 Hz; debido a que resistirá un gran número de ciclos (> 200,000) antes de llegar a la Fase 3, lo que se traduce en un consumo excesivo de recursos (tiempo y dinero).

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 indica ser una buena herramienta para definir la ley del comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica a la deformación permanente; así como el modelo reducido es adecuado para definir el comportamiento de la mezcla, siempre y cuando se utilice en el rango de trabajo con condiciones no conservadoras.

Es posible clasificar la forma de la curva de deformación con base a la tasa de deformación obtenida y la misma forma de la curva. Se deberán realizar validaciones adicionales con distintos materiales pétreos y asfálticos para adecuar los rangos de deformación para los niveles: bajo, medio, alto y muy alto.

Bibliografía

Richard Kim, Y. (2009). Modeling of Asphalt Concrete. EUA: Mc Graw Hill.

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

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&it em_s_key=00526119

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., 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

Witczak, M., Kaloush, K., Pellinen, T., El-Basyouny, M., & Von Quintus, H. (2002). *NCHRP Report 465: Simple Performance Test for Superpave Mix Design*. Washington, D.C.: National Academy Press.



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/