



# CONTROL ESTADÍSTICO DE CALIDAD DE ENSAYOS DE MÓDULO DINÁMICO Y FATIGA EN EL PROGRAMA DE LABORATORIO CON RECONOCIMIENTO IMT - AMAAC

Luis Jaime Pantoja Peña<sup>1</sup>, Horacio Delgado Alamilla<sup>2</sup>,  
Esbeydi Janet Limeta Dione<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Asociación Mexicana del Asfalto, Querétaro, México, [ljpantoja93@hotmail.com](mailto:ljpantoja93@hotmail.com)

<sup>2</sup> Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México, [hdelgado@imt.mx](mailto:hdelgado@imt.mx)

<sup>3</sup> Asociación Mexicana del Asfalto, Querétaro, México, [elimeta@amaac.org.mx](mailto:elimeta@amaac.org.mx)

## Resumen

El programa de laboratorio con reconocimiento IMT-AMAAC aplicado al diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño se ha desarrollado exitosamente desde el año 2012. Para la categoría de mezclas asfálticas en el Nivel III y Nivel IV se realizan las pruebas de módulo dinámico y fatiga en flexión de cuatro puntos. Sin embargo, para establecer la aceptación o rechazo de los resultados de los distintos participantes en esta categoría se requiere establecer un método para la determinación de las tolerancias estadísticas de los resultados de ensayos.

En esta investigación, se presenta un procedimiento estadístico para realizar la regresión lineal tanto de la prueba de módulo dinámico en la representación de la curva maestra, como de la ley de fatiga, así como la estimación de la varianza determinando su intervalo de confianza.

**Palabras Clave:** Modulo dinámico, Ley de fatiga, Regresión lineal, Intervalo de confianza.

## 1 Introducción

Para un nivel de tránsito mayor a 30 millones de ejes equivalentes existen métodos de prueba del laboratorio utilizados para evaluar el desempeño de mezclas asfálticas, estimando sus parámetros mecánicos.[1]

El módulo dinámico se realiza basado en la norma AASHTO T342, donde determina la deformación que sufre la mezcla en función a la temperatura y velocidad de aplicación de carga, el ensayo es realizado mediante una carga de compresión axial cíclica a diferentes temperaturas y frecuencias [2]. Las distintas temperaturas ensayadas en el laboratorio representan la variación que puede existir en la temperatura del pavimento, mientras que las frecuencias representan la velocidad de operación de los vehículos que pasan sobre la mezcla asfáltica. Usualmente para el programa de laboratorios se pide realizar la prueba a las temperaturas de 0, 10, 20 y 30°C, mientras que las frecuencias solicitadas son a 0.1, 0.5, 1.5 y 10 Hz.

El análisis de resultados de la prueba de módulo dinámico es elaborado a través de la curva maestra construida a partir de los valores del módulo dinámico y las frecuencias de ensayo.



Por lo que respecta al Nivel IV, el ensayo de fatiga se lleva a cabo bajo la norma ASTM D7460, la cual establece la falla a fatiga de una mezcla asfáltica sometiendo una viga apoyada en cuatro puntos a carga repetida.

El fenómeno de fatiga está asociado al deterioro producido en un material a consecuencia de la aplicación de cargas repetidas con una magnitud muy inferior a la resistencia máxima que puede soportar el material. [3]

La prueba se realiza a una temperatura de 20°C y a una frecuencia de 10 Hz. Ambos ensayos carecen de criterios para determinar repetibilidad y reproducibilidad, por lo cual, es indispensable definir un procedimiento estadístico para realizar un análisis confiable de los resultados y establecer un método claro para la aceptación y rechazo de los datos obtenidos durante las evaluaciones en el programa de laboratorios.

## 2 Descripción del experimento

Como primera parte del estudio, se realizaron los ensayos para obtener las referencias en la categoría de mezclas asfálticas Nivel III y Nivel IV.

La mezcla asfáltica se realizó utilizando un material pétreo tipo basalto de buena calidad con asfalto convencional, de clasificación PG 64-16. La granulometría de TN. De 19.00 mm y un contenido óptimo de asfalto del 6%. (con respecto a la masa de la mezcla asfáltica).

Para la prueba de modulo dinámico, se compactaron 2 especímenes con  $7\pm 1$  de vacíos de aire y las dimensiones requeridas (152.44 mm de diámetro y 170.00 mm de altura) para posteriormente hacer extracciones y lograr el porcentaje de vacíos en los especímenes de prueba ( $6\pm 0.5\%$ ). A continuación, en la siguiente tabla se pueden observar los resultados de referencia del ensayo, donde en este caso en particular, solo se ejecutaron tres temperaturas con el barrido de frecuencias, posteriormente los resultados son expresados en la figura 1, usando el principio de superposición tiempo-temperatura se realiza la construcción de la curva maestra.

Tabla 1 Datos de referencia para la categoría de Mezclas asfálticas Nivel III

F (Hz)	T (°C)	Frec. Red (Hz)	Promedio(Probeta 1 y 2)	
			E (Mpa)	$\phi$ Fase
0.1	8.9	2.3	3876	21.2
0.5	8.9	11.3	5467	19.4
1.0	8.9	22.6	6451	17.8
5.0	8.9	112.8	8320	14.7
10.0	8.9	225.6	9554	14.0
0.1	19.2	0.1	1245	26.1
0.5	19.2	0.5	2623	24.1
1.0	19.2	1.0	3189	22.7
5.0	19.2	5.0	4751	20.0
10.0	19.2	10.0	5509	19.5
0.1	29.7	0.01	870	25.9
0.5	29.7	0.06	1111	24.5
1.0	29.7	0.12	1847	24.0
5.0	29.7	0.60	2391	23.9
10.0	29.7	1.20	2963	23.1

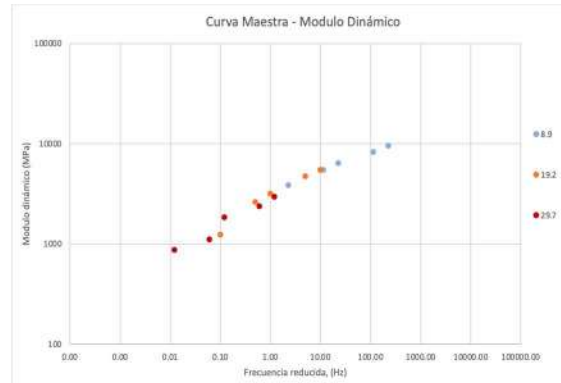


Figura 1. Curva Maestra

Posteriormente, para el nivel IV se compactaron vigas en un compactador lineal a las dimensiones de 50 mm de altura, 63 mm de ancho y 380 mm de largo.

En la tabla 2, se muestran los resultados de cada probeta que se usaran como referencia en la prueba de fatiga. Con los resultados obtenidos en laboratorio en el ensayo de fatiga se puede construir la curva de Wöhler y determinar la ley de fatiga de la mezcla evaluada. Los resultados se presentan en la Tabla 2 y la Figura 2, bajo la representación clásica de la curva de Wöhler, a primera vista se pueden observar que los valores no tienen una dispersión significativa y se puede estimar una regresión clásica establecida en el software de Microsoft Excel, la cual nos proporciona la línea de tendencia exponencial (tendencia clásica) y el valor de  $R^2$ . Sin embargo, este tipo de análisis no permite realizar comprobaciones estadísticas más profundas y la problemática se presentará durante la construcción del pavimento ya que no se han determinado los intervalos de confianza para los resultados obtenidos en el diseño.

Tabla 2 Datos de referencia para la categoría de Mezclas asfálticas Nivel IV

No. Probeta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Solicitación ( $\mu\epsilon$ )	300	400	500	700	600	400	600	300	700	500
Ciclos a la falla ( $\times 10^3$ )	3913	1930	370	69	120	1515	140	5327	55	660

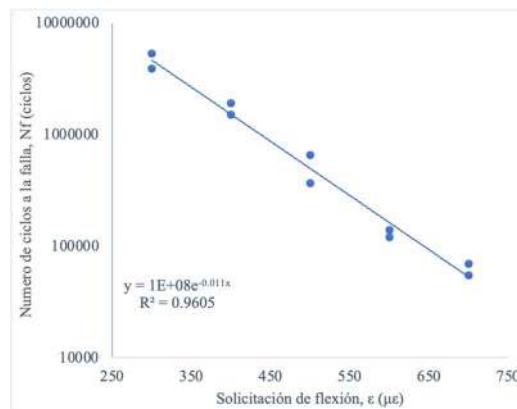


Figura 2. Curva de Wöhler



### 3 Estimación de una recta de regresión

Para el presente trabajo, se expone el método estadístico para los resultados obtenidos en el ensayo de fatiga. Sin embargo, el procedimiento es similar para el ensayo de módulo dinámico.

La aplicación del método de regresión de dos parámetros  $\epsilon$  (Solicitud de ensayo en  $\mu\epsilon$ ) y  $N_f$  (Número de ciclos a la falla) exige, en primer lugar, que una de las variables ( $\epsilon$  por ejemplo) no sea aleatoria. Siendo que el experimento puede ser definido a partir de valores fijos y conocidos de  $\epsilon$ .

Por otro lado, se debe admitir que la media del otro parámetro ( $N_f$ ) es función de  $\epsilon$ ,  $f(\epsilon)$ . Con una forma algebraica conocida (función lineal o polinomial). La cual será representada por el modelo matemático siguiente:

$$N_f = f(\epsilon; A, B, \dots) + E_m(\epsilon) \quad (1)$$

A, B Constantes del modelo

$E_m(\epsilon)$  Variable aleatoria de media nula de distribución normal

El objetivo de la regresión es poder estimar uno de parámetros ( $N_f$ ) cuando se conoce el otro ( $\epsilon$ ). Para esta determinación conduce a varias etapas, las cuales se mencionan a continuación:

- Adopción de un modelo matemático lineal en el caso más simple.
- Establecer un programa experimental seleccionando valores  $\epsilon$ , del número de mediciones, tipo de materiales, ...
- Realización de las mediciones que generan pares de valores  $N_f$  y  $\epsilon$  :  $N_{f1}-\epsilon_1, N_{f2}-\epsilon_2, \dots$ , en donde ciertos valores de  $\epsilon$  pueden repetirse.
- Cálculo de las estimaciones de a, b de los valores desconocidos de A, B del modelo matemático.
- Cálculo de la estimación de la varianza asociada.
- Verificación de la validez de la hipótesis establecida en el modelo matemático por medio de un test estadístico.

#### 3.1 Estimación de los parámetros de la recta de regresión

Para la selección de la ecuación matemática se optó por realizar el análisis con el Valor de Log ( $N_f$ ), y utilizar una regresión lineal ( $\text{Log } N_f = A + B\epsilon$ ). En donde la pendiente B es el coeficiente de regresión de  $N_f$  y  $\epsilon$ . Los valores considerados en el modelo, así como las sumatorias de los parámetros estadísticos calculados se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3 Sumatorias de los parámetros estadísticos

$\epsilon_i (\mu\epsilon)$	$N_{fi}\alpha$	$n_i$	$n_i * \epsilon_i$	$n_i * \epsilon_i^2$	$\sum N_{fi}\alpha$	$(\sum N_{fi}\alpha)^2/n_i$	$\sum N_f^2 i\alpha$	$\sum \epsilon_i * N_{fi}\alpha$
300	6.593	6.726	2	600	180,000	13.3	88.7	3995.7
400	6.286	6.180	2	800	320,000	12.5	77.7	4986.4
500	5.568	5.820	2	1000	500,000	11.4	64.8	5693.9
600	5.079	5.146	2	1200	720,000	10.2	52.3	6135.2
700	4.839	4.740	2	1400	980,000	9.6	45.9	6705.4
		$\Sigma$ 10		5000	2,700,000	57.0	329.397	27516.6



Las estimaciones  $a$  y  $b$  corresponden a una recta  $N_f = a + b \varepsilon$  que es una estimación de la recta real la cual es desconocida. La estimación de  $b$  se obtiene minimizando la suma de las diferencias cuadradas  $(N_{fi} - N'_{fi})$  entre los valores experimentales  $N_{fi}$  y las ordenadas correspondientes  $N'_{fi}$  de la recta estimada.

El conjunto de pares  $(\varepsilon_i, N_{fi})$  intervienen en los términos de la fórmula 4, al igual que en fórmulas siguientes. Lo que quiere decir que si  $n_i$  resultados de  $N_{fi}$  son obtenidos para un mismo valor  $\varepsilon_i$ ,  $\varepsilon_i$  debe intervenir  $n_i$  veces. Por consecuencia  $\bar{\varepsilon}$  y  $\bar{N}_f$  son las medias aritméticas siguientes:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sum_i n_i \varepsilon_i}{N} = \frac{5000}{10} = 500 \quad (2)$$

$$\bar{N}_f = \frac{\sum_i n_i N_{fi}}{N} = \frac{57.0}{10} = 5.70 \quad (3)$$

Las ecuaciones de cálculo para la determinación de  $a$  y  $b$ , son las siguientes:

$$b = \frac{\sum_i (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})(N_{fi} - \bar{N}_f)}{\sum_i (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2} = \frac{N \sum_i \varepsilon_i N_{fi} - \sum_i n_i \varepsilon_i \sum_i N_{fi}}{N \sum_i n_i \varepsilon_i^2 - [\sum_i n_i \varepsilon_i]^2} = \frac{-972.0222}{200,000} = -0.00486 \quad (4)$$

$$a = \bar{N}_f - b \bar{\varepsilon} = 8.13 \quad (5)$$

En donde  $n_i$  es el número de datos por nivel de solicitud,  $N_{fi}$  obtenidos por el valor  $\varepsilon_i$ .  $N$  es el número total de datos ( $N = \sum_i n_i$ ). La ecuación de la recta de regresión estimada queda de la siguiente manera:

$$\text{Log } N_f = 8.1278 - 0.00486 * \varepsilon$$

### 3.2 Estimación de la varianza asociada

Para evaluar la significación del modelo por medio del análisis de varianza, se estima la varianza asociada, la cual se obtiene a partir de la suma de los cuadrados  $\sum_i \sum_\alpha (N_{fi} - N'_{fi})^2$  que sigue una ley a  $(N-2)$  grados de libertad, la cual se presenta simplificando la escritura en la Ecuación 6.

$$s^2 = \frac{\sum (N_{fi} - \bar{N}_f)^2 - b^2 \sum (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2}{N-2} = \frac{4.8102 - .7241}{10-2} = 0.0108 \quad (6)$$

En donde:

$$\sum (N_{fi} - \bar{N}_f)^2 = \frac{N \sum N_{fi}^2 - [N_{fi}]^2}{N} = \frac{48.102}{10} = 4.8102$$

$$b^2 \sum (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2 = \frac{[N \sum \varepsilon_i N_{fi} - \sum \varepsilon_i \sum N_{fi}]^2}{N [N \sum \varepsilon_i^2 - (\sum \varepsilon_i)^2]} = \frac{944,827.16}{200,000} = 4.7241$$



### 3.3 Control de la regresión lineal

Es evidente que hay una relación física entre  $N_f$  y  $\epsilon$ , la cual es ineludible, sin embargo, como ejemplo de cálculo se realizará esta verificación. Si se supone que la relación eventual entre  $N_f$  y  $\epsilon$  es una regresión lineal, es suficiente con verificar que las dos variables no son independientes. Comparando la pendiente de la regresión  $B$  a un valor 0 se puede admitir la existencia de la linealidad de la relación entre la media de  $N_f$  y  $\epsilon$ . Cuando la hipótesis  $H_0$  de nulidad de la pendiente es rechazada se puede admitir que  $N_f$  depende de  $\epsilon$ . Esto se calcula mediante la estimación de  $s^2$  de la varianza asociada.

$$s_b^2 = \frac{s^2}{\sum n_i(\epsilon_i - \bar{\epsilon})^2} \quad (7)$$

Si el valor probable  $B$  de  $b$  es nulo, la relación  $t = b/s_b$  sigue la ley de student a  $(N - 2)$  grados de libertad. Por lo cual, el valor  $t$  es calculado a partir de los resultados experimentales y comparado a los límites  $t_{1-\alpha/2}$  y  $t_{\alpha/2} = -t_{1-\alpha/2}$  dados por la ley de student a  $(N - 2)$  grados de libertad para un nivel de probabilidad  $(1 - \alpha)$ .

$$s_b^2 = \frac{0.0108}{200000} = 5.379 * 10^{-8} ; s_b = 0.00023$$

$$t = \frac{b}{s_b} = \frac{0.00486}{0.00023} = 20.96 \text{ con } 8 \text{ grados de libertad}$$

Este valor es superior al límite dado por la ley de student para una probabilidad de  $(1 - \alpha) = 0.99$  :  $t_{1-\alpha/2} = t_{0.995} = 3.355$  para 8 grados de libertad. Este test estadístico permite admitir que  $N_f$  depende de  $\epsilon$ .

Debido a que existen varios valores de  $N_f$  por valor de  $\epsilon$ , hay que controlar la linealidad de la regresión verificando la existencia de una relación entre  $\epsilon$  y  $N_f$  empleando un método de análisis de varianza con el objetivo de determinar si el parámetro fijo  $\epsilon$  tiene una influencia sobre el resultado.

$$Q_X = \sum_i \sum_{\alpha} (\bar{N}_{fi} - \bar{N}_f)^2 = \sum_i \frac{[\sum_{\alpha} N_{fi\alpha}]^2}{n_i} - \frac{1}{N} [\sum_i \sum_{\alpha} N_{fi\alpha}]^2 \quad (8)$$

$$Q_X = \frac{(13.3)^2}{2} + \frac{(12.5)^2}{2} + \frac{(11.4)^2}{2} + \frac{(10.2)^2}{2} + \frac{(9.6)^2}{2} - \frac{1}{10} (57.4)^2 = 4.757$$

$$Q_R = \sum_i \sum_{\alpha} (N_{fi\alpha} - \bar{N}_{fi})^2 = \sum_i \sum_{\alpha} N_{fi\alpha}^2 - \sum_i \frac{[\sum_{\alpha} N_{fi\alpha}]^2}{n_i} \quad (9)$$

$$Q_R = 329.451 - 329.397 = 0.053$$

Con el número de grados de libertad  $V_X = p - 1$  y  $V_R = N - p$ , en donde  $p$  es el número de valores de  $\epsilon$ . La función discriminante utilizada para realizar el test de Snedecor es:



$$F = \frac{\frac{Q_X}{v_X}}{\frac{Q_R}{v_R}} = \frac{\frac{4.757}{(5-1)}}{\frac{0.053}{10-5}} = 111.82 \quad (10)$$

El valor de F es superior a  $F_{0.99}(4; 5) = 11.39$  lo cual confirma la existencia de la relación. Cuando se admite la influencia de  $\varepsilon$  sobre  $N_f$  ya sea por razones experimentales o por conclusión del test previo, es posible controlar la linealidad de la regresión comprando dos varianzas que son idénticas si la curva de regresión es la recta estimada y la varianza asociada es constante:

Esta oración está bien, se refiere a que está comprobando la linealidad del modelo.

- La varianza  $\sigma_1^2$  que caracteriza la dispersión de las medias  $\overline{N_{fl}}$  alrededor de la recta estimada.
- La varianza  $\sigma_{intra}^2$  común a la población de las medias diferentes y de la misma varianza, varianza intraclase de  $N_{fi}$  que caracteriza la dispersión de los valores individuales  $N_{fi\alpha}$  sin importar cuál sea la curva de regresión.

$$s_1^2 = \frac{Q - Q_R}{p-2} = \frac{0.086 - 0.053}{3} = 0.011 \quad (11)$$

En donde  $Q = (N - 2) s_2^2$  el cual es el numerador de la fórmula 6 utilizada en el cálculo de  $s^2$ .

$$s_{intra}^2 = \frac{1}{N-p} \sum_1 \sum_{\alpha} (N_{fi\alpha} - \overline{N_{fl}})^2 = \frac{Q_R}{v_R} = \frac{0.053}{5} = 0.0106 \quad (12)$$

Cuando la regresión es lineal, las estimaciones  $s_{intra}^2$  y  $s_1^2$  son independientes de una misma varianza, por lo cual pueden ser compradas con un test de Snedecor.

El cálculo  $F = \frac{s_1^2}{s_{intra}^2}$  sigue la ley de Snedecor a  $v_1 = p - 2$  y  $v_{intra} = N - p$  grados de libertad cuando se realiza la hipótesis de igualdad de varianzas.

$$F = \frac{s_1^2}{s_{intra}^2} = \frac{0.0110}{0.0106} = 1.04$$

El valor de F calculado a partir de resultados experimentales es comparado con el límite estadístico  $F_{1-\alpha}(p - 2; N - p)$  para un nivel de probabilidad de  $(1 - \alpha)$ , para esta evaluación es  $F_{0.99}(3;5) = 12.06$ . Como el valor F experimental es inferior al límite estadístico se puede admitir la linealidad de la regresión. Esto significa que los valores obtenidos en el ensayo de fatiga a flexión están correctamente representados con la recta de regresión y por lo cual no se presentaron errores de durante la medición, no hubo un factor de la composición de la mezcla que afectara las mediciones, la tendencia analizada es lineal.

#### 4 Intervalo de confianza de la recta de regresión

En el punto anterior se estableció la recta de regresión, sin embargo, esto no es suficiente para la realización del control de calidad durante el proceso constructivo, por lo cual se requiere establecer el intervalo de confianza de la recta de regresión. El intervalo de confianza a determinar es un intervalo  $(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$  alrededor de  $\varepsilon_0$  que contiene el valor verdadero de N con una probabilidad de  $1 - \alpha$ .



El valor  $\varepsilon_0$  (datos de muestra de campo) debe encontrarse al interior del dominio del intervalo, es decir entre los valores extremos calculados para ser considerado un valor aceptable estadísticamente en comparación con los valores obtenidos en el diseño.

Para demostrar que los límites  $\varepsilon_1$  y  $\varepsilon_2$  del intervalo de confianza, dado que  $\varepsilon_0$  varía, se evaluará la siguiente hipérbola de ecuación:

$$N_f = a + b \varepsilon_0 \pm s_0 * t_{1-\alpha/2} \quad (13)$$

Donde:

$$s_0 = s \sqrt{\frac{1}{n_0} + \frac{1}{N} + \frac{(\varepsilon_0 - \bar{\varepsilon})^2}{\sum(\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2}} \quad (14)$$

s es la estimación de la desviación estándar asociado (fórmula 6),  $n_0$  el número de mediciones del factor fijo, N número total de mediciones,  $\bar{\varepsilon}$  y  $\sum(\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2$  son los valores obtenidos durante el cálculo de la recta de regresión,  $t_{1-\alpha/2}$  es el valor de la variable de Student a (N - 2) grados de libertad tal que  $Prob(|t| < t_{1-\alpha/2}) = 1 - \alpha$ .

La fórmula 14 muestra que la desviación estándar estimada por  $s_0$  corresponde a la combinación de errores

- Error asociado a la medición de  $Nf_0$ ; su varianza es estimada por  $\frac{s^2}{n_0}$
- Error asociado al empleo de una recta de regresión imprecisa. Este error es sistemático; su varianza es estimada por  $s^2 \left[ \frac{1}{N} + \frac{(\varepsilon_0 - \bar{\varepsilon})^2}{\sum(\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2} \right]$

Una vez se traza la hipérbola, la media de  $\bar{N}_0$  de las mediciones es utilizada para determinar la estimación  $\varepsilon_0$ . De acuerdo con la fórmula 14, el valor más bajo del intervalo de confianza corresponde a  $\varepsilon_0 = \bar{\varepsilon}$ , es decir en un valor de la solicitación en deformación medida sensiblemente en el centro del rango de medición. Cuando  $\varepsilon_0$  es cercano de la media  $\bar{\varepsilon}$  se tiene

$$\frac{(\varepsilon_0 - \bar{\varepsilon})^2}{\sum(\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2} \ll \frac{1}{n_0} + \frac{1}{N} \quad (15)$$

El intervalo de confianza es ahora obtenido por medio de dos rectas D1 y D2. Este caso solamente, el intervalo de confianza ( $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ) es simétrico alrededor de  $\varepsilon_0$ , la ecuación se escribe de la siguiente forma:

$$m_0 = \varepsilon_0 \pm \frac{s_0}{b} t_{1-\alpha/2} = \varepsilon_0 + \frac{s}{b} \sqrt{\frac{1}{n_0} + \frac{1}{N}} * t_{1-\alpha/2} \quad (16)$$

Como parte del ejemplo de la determinación de los intervalos de confianza de la recta de regresión se realizará el cálculo para un valor al interior del rango de evaluación ( $300\mu\varepsilon - 700\mu\varepsilon$ ), por lo cual se seleccionó un valor de  $\varepsilon_0$  de  $500\mu\varepsilon$ . En lo que respecta al valor de  $n_0$ , como solo se puede obtener



un valor de número de ciclos a la falla por espécimen ensayado este parámetro siempre tendrá el valor de 1.

$$s_0 = \sqrt{0.0108} \sqrt{\frac{1}{1} + \frac{1}{10} + \frac{(\varepsilon_0 - 500)^2}{200,000}}$$

El valor de  $t_{1-\alpha/2} = t_{0.975}$  para 8 grados de libertad es de 2.306

$$m_0 = 500 \pm \frac{2.306}{-0.00486} * \sqrt{0.0108} \sqrt{\frac{1}{1} + \frac{1}{10} + \frac{(\varepsilon_0 - 500)^2}{200,000}} = 500 \pm 51.615$$

Con estas estimaciones de  $\varepsilon$  y utilizando la ecuación de la recta de regresión se pueden estimar el rango de valores de  $N_f$  y definir los intervalos de confianza. La figura 3 presenta los resultados estimados para la ecuación presentada previamente.

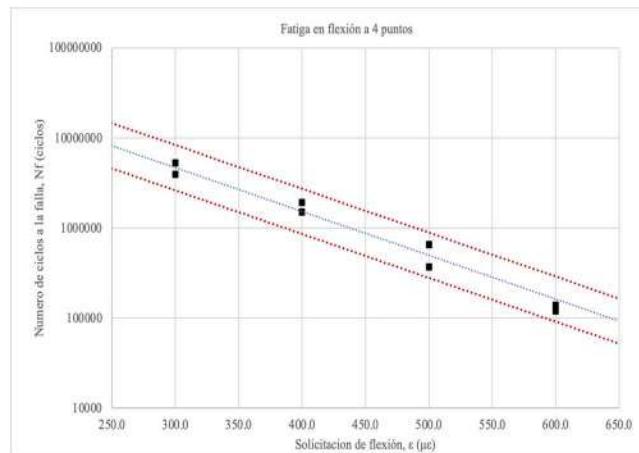


Figura 3. Intervalos de confianza de la recta de regresión del ensayo de fatiga a flexión

Estos intervalos de confianza servirán como rangos de aceptación o rechazo de los resultados de los ensayos de fatiga realizados en el control de calidad de la mezcla asfáltica. Si los resultados están dentro del rango establecido se considerarán adecuados, en caso contrario se deberá hacer un análisis de las causas asignables (error en la toma de la muestra, ejecución de ensayo, variación de la granulometría y/o contenido de asfalto, grado de compactación) y estimar la afectación en la vida útil del pavimento asfáltico.

Se pueden observar que la recta de regresión no es igual a la línea de tendencia utilizada en la Figura 1, en donde se utilizó una ecuación exponencial (clásica) por lo cual las tendencias no son comprobables de forma directa. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el objetivo no es proponer una nueva forma de análisis para al diseño de la mezcla asfáltica, el objetivo es definir los intervalos de confianza para que estos sean utilizados durante el control de calidad realizado en el proceso constructivo.

## 5 Aplicación del método

Con la finalidad de ejemplificar lo expuesto en este documento, se presentan los intervalos de confianza calculados respecto a los valores de referencia tanto en la categoría de mezclas asfálticas Nivel III como en el nivel IV, además de la evaluación de dos mezclas asfálticas con las tolerancias definidas para con los datos de referencia

En la figura 4 se ilustran los límites (líneas rojas) resultantes en la prueba de fatiga a flexión a cuatro puntos, asimismo los datos de los dos participantes.

En este análisis se observa que la Mezcla 1 cumple las tolerancias establecidas, mientras que los resultados de la Mezcla 2, a pesar de mostrar una tendencia paralela al rango inferior de la referencia, los datos son incorrectos.

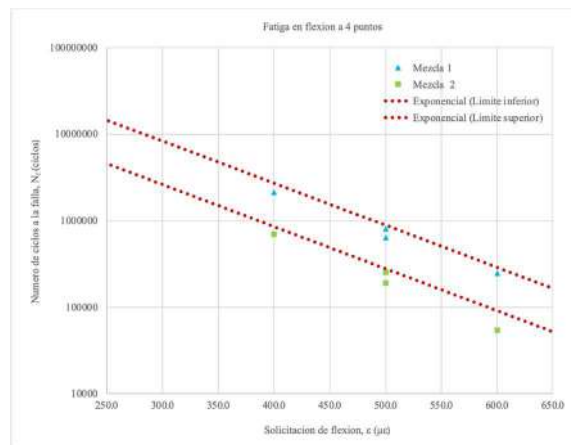


Figura 4. Resultados de categoría Nivel IV

Por último, en la siguiente figura 5 también se muestran las tolerancias establecidas para el ensayo de módulo dinámico.

En este caso, la mezcla 1 a pesar de estar muy cerca del límite inferior de los valores de referencia se considera un resultado satisfactorio, de lo contrario la mezcla 2 además de estar fuera de los parámetros aceptables, muestra demasiada dispersión en los datos que se presentan.

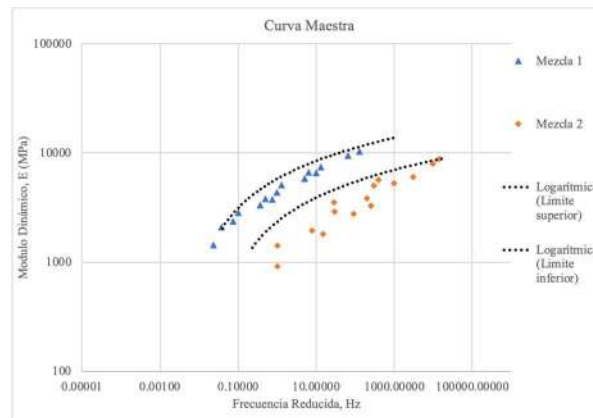


Figura 5. Resultados de categoría Nivel III



## 6 Comentarios

El diseño y evaluación de las mezclas asfálticas ha evolucionado a lo largo de los años lo que ha generado la aparición de nuevos materiales, métodos de diseño y ensayos para la evaluación del desempeño de la mezcla asfáltica. Entre los que podemos encontrar los ensayos de módulo dinámico y fatiga en vigas a flexión en cuatro puntos. Sin embargo, su análisis e interpretación no es sencilla, por lo que se requiere establecer tolerancias estadísticas para evaluar su cumplimiento.

El procedimiento estadístico presentado en el artículo permite establecer una curva de regresión de manera simple, de la cual se puede verificar la relación entre las variables, así como su linealidad, para finalmente definir el intervalo de confianza de la recta de regresión. El cual será una herramienta útil durante la realización del control de calidad de las propiedades a la fatiga de la mezcla asfáltica durante el proceso constructivo.

Este procedimiento permitirá evaluar de mejor manera a los laboratorios participantes en el programa de laboratorio con reconocimiento IMT-AMAAC en las categorías de nivel III y nivel IV en mezclas asfálticas.

## 7 Referencias

- [1] Instituto Mexicano del Transporte. *Manual de ensayos de laboratorio Mezclas Asfálticas en caliente (MAC) Parte 2. Ensayos Mecánicos*. Publicación Técnica No. 603. Sanfandila, Qro., 2020.
- [2] Instituto Mexicano del Transporte. *Propuesta de método de prueba de módulo dinámico en mezclas asfálticas para México*. Publicación Técnica No. 507. Sanfandila, Qro., 2017.
- [3] Pérez-Jiménez, F., Valdés G., R., B., Miró, R., and Martínez, A. *Evaluación del proceso de fatiga de mezclas asfálticas mediante un nuevo procedimiento cíclico de barrido de deformaciones*. Revista de la construcción, 2011, Cataluña, Barcelona, España.
- [4] Di Benedetto H. *Nouvelle approche du comportement des enrobés bitumineux: résultats expérimentaux et formulation rhéologique*. In: RILEM. Ensayos Mecánicos en mezclas asfálticas, 1990, Budapest, pp 387-401.
- [5] Di Benedetto H., Corte J.-F. *Matériaux routiers bitumineux 2: constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges*. Hermes, Lavoisier, 2004.
- [6] Cavé R. *Contrôle statistique des fabrications*. Éditions Eyrolles, París, 1970.