

## Modelación del envejecimiento de los pavimentos asfálticos con la metodología de la superficie de respuesta

### *Pavement Aging Model by Response Surface Modeling*

Chávez-Valencia L.E.

*Departamento de Ingeniería Civil. División de Ingenierías  
Universidad de Guanajuato  
E-mail: lechavez@ugto.mx.*

Hernández-Barriga C.

*Departamento de Diseño  
División de Arquitectura, Arte y Diseño  
Universidad de Guanajuato  
E-mail: c.hernandez@ugto.mx*

Manzano-Ramírez A.

*Centro de investigaciones y de estudios avanzados del IPN  
Unidad Querétaro  
E-mail: amanzano@qro.cinvestav.mx*

Información del artículo: recibido: mayo de 2008, aceptado: enero de 2011

#### Resumen

En la presente investigación se realizó la modelación del envejecimiento de una carpeta asfáltica por medio de la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR). Se elaboraron muestras cilíndricas tipo Marshall, que fueron colocadas en un horno bajo las condiciones de tiempo y temperatura establecidos por las condiciones ambientales de la región geográfica donde se construyen pavimentos asfálticos con el AC-20 de la Refinería Ing. Antonio M. Amor, los cuales fueron codificados en la MSR, con esto se determinaron los modelos que predicen el cambio de la estabilidad Marshall ( $\Delta L$ ) y del flujo ( $\Delta F$ ), así como la volatilización del material (VM). Además, se extrajeron muestras cilíndricas de una carpeta asfáltica piloto para determinar el error de modelación, observando que el material volatilizado predicho por el modelo VM fue muy cercano al real, no así para los modelos de  $\Delta L$  y  $\Delta F$ , posiblemente asociado a los factores ambientales que no fueron considerados al inicio de la investigación.

#### Abstract

*In this work, surface course aging was modeled by Response Surface Methodology (RSM). The Marshall specimens were placed in a conventional oven for time and temperature conditions established on the basis of the environment factors of the region where the surface course is constructed by AC-20 from the Ing. Antonio M. Amor refinery. Volatilized material (VM), load resistance increment ( $\Delta L$ ) and flow resistance increment ( $\Delta F$ ) models were developed by the RSM. Cylindrical specimens with real aging were extracted from the surface course pilot to evaluate the error of the models. The VM model was adequate, in contrast ( $\Delta L$ ) and ( $\Delta F$ ) models were almost adequate with an error of 20 %, that was associated with the other environmental factors, which were not considered at the beginning of the research.*

#### Descriptores

- deterioro
- envejecimiento
- pavimento asfáltico
- MSR
- modelación y asfaltos

#### Keywords

- wear
- aging
- surface course
- RSM
- pavement modeling

## Introducción

El envejecimiento del cemento asfáltico es considerado una causa del deterioro de la superficie de los pavimentos flexibles, que se presenta como desprendimientos del agregado pétreo en general o la pérdida de la capa de rodadura en particular (Reunión del Consejo de Directores de Carreteras de Iberia e Iberoamérica, 2002). El fenómeno del envejecimiento de cemento asfáltico tiene décadas de investigación, en las cuales se han propuesto una gran variedad de relaciones matemáticas simples basadas esencialmente en los resultados de los laboratorios. Además, se han establecido relaciones entre el tiempo de servicio de la carpeta asfáltica y el desempeño de la misma, mediante la representación gráfica de los resultados de campo (Bell, 1989).

La mayoría de los modelos matemáticos o análogos propuestos por los investigadores son limitados, ya que corresponden a ecuaciones generadas en condiciones locales, para sistemas específicos que no son aplicables en otras geografías o cuando algún elemento del sistema cambia, por ejemplo, la calidad del cemento asfáltico. Lo anterior, nos remite a buscar técnicas de modelación que sean asertivas en el momento de generar los resultados.

La modelación es la representación simplificada de un fenómeno de la naturaleza que nos interesa conocer con mayor profundidad de la que la misma nos permite, pero que a la vez incluye las variables necesarias para que las conclusiones desprendidas sean válidas para el sistema real. La modelación puede ser física, analógica, administrativa, matemática, así como la abstracta o de simulación que es la que nos ocupa.

A su vez, los modelos de simulación se pueden clasificar como: determinísticos, estocásticos (probabilísticos), estáticos, dinámicos, discretos y continuos. Las aplicaciones prácticas de los modelos de simulación son: predicción, entrenamiento, juegos, investigación y toma de decisiones. Las características deseables de un modelo son: confiabilidad, sencillez, bajo costo de desarrollo y operación, manejabilidad, de fácil entendimiento y una relación costo/beneficio positiva (Azarang, 1996).

Los modelos de simulación determinísticos se caracterizan por ser una técnica de resolución de problemas, como un cambio en conjunto de las variables con el tiempo. Los modelos son una aproximación al sistema real y en ningún momento optimizan el proceso o los sistemas. De lo anterior, resulta la necesidad de repetir múltiples ejecuciones de la simulación, consecuentemente, su uso en una investigación debe planificarse como una serie de experimentos que conduzcan

a interpretaciones significativas de las relaciones de interés. Los experimentos pueden ser tan complejos que requieren el uso de técnicas estadísticas de diseño de experimentos.

Para generar el modelo de simulación se consideraron los siguientes pasos (Bratly, 1987):

1. Definición del sistema,
2. Elección del método de modelación,
3. Variables,
4. Recolección y análisis de datos,
5. Codificación del modelo, y
6. Validación del modelo.

La elección del método de modelación es el paso siguiente al análisis del sistema. Dicha elección resulta un proceso complejo, ya que las herramientas analíticas de resolución son escasas y en ocasiones la elegida no es la apropiada. Por lo que, para esta investigación se empleó la metodología de superficie de respuesta (MSR). Esta metodología de modelación es un acercamiento holístico que permite postular la forma de la función objetivo, actualizar y limitar los valores de los parámetros, así como explorar la región cercana al óptimo estimado.

La MSR es una herramienta empleada en la investigación científica y desarrollo tecnológico, que combina el uso de los diseños experimentales, técnicas de modelación del análisis de regresión y técnicas matemáticas de optimización (Castaño, 2003).

## Desarrollo

### Definición del sistema

El pavimento flexible o asfáltico es el sistema real, el cual está formado por varias capas constructivas, siendo la carpeta asfáltica o superficie de rodamiento la que se encuentra directamente expuesta al medio ambiente y consecuentemente presenta envejecimiento. El envejecimiento se ha asociado a factores ambientales: radiación térmica, tiempo de radiación, temperatura ambiente, rayos UV, ozono, oxígeno, evapotranspiración, precipitación y humedad relativa (Yoder *et al.*, 1975).

El ozono, oxígeno y los rayos UV son factores que existen, pero no varían, los demás factores ambientales tienen interdependencia: la humedad relativa, es un indicador de la evapotranspiración y precipitación, y depende de la temperatura. La variación de la temperatura del día a la noche es función de la radiación térmica del sol y del tiempo de radiación.

Entonces, los factores importantes que describen las condiciones ambientales a las que está sujeto el pavimento asfáltico son: la temperatura ( $T$  en grados Celsius) y la humedad relativa ( $H$  en porcentaje), ya que todos los demás están relacionados con estos dos. Si continuamos suponiendo que la carpeta asfáltica fue construida con materiales y procedimiento especificados, ésta tendrá una impermeabilidad mínima establecida por la SCT de 95 a 100%, por lo que la humedad relativa no tiene influencia en el envejecimiento. Se concluye que, de todos los factores ambientales, sólo la temperatura tiene una influencia marcada en el envejecimiento, lo cual coincide con los resultados de las investigaciones actuales (Bell, 1989).

Se supone que los demás factores tienen una influencia mínima y pueden presentar un error sistemático, para aceptar o rechazar esta suposición se tomaron muestras del campo previamente caracterizadas y se compararon los resultados de las propiedades evaluadas con las predichas por el modelo, la diferencia, que se espera sea muy pequeña, corresponde a la influencia de los factores ambientales que fueron considerados con una influencia despreciable en el envejecimiento del pavimento asfáltico.

Si consideramos al envejecimiento del asfalto en dos etapas: a corto plazo (cuando se elabora la mezcla) y a largo plazo (representativo del servicio), las unidades experimentales ya presentan el envejecimiento a corto plazo y sólo resta analizar el envejecimiento a largo plazo ( $t$  en días) que sucede en el campo y se simuló con un intemperismo acelerado en un horno convencional de circulación forzada.

Por lo anterior, se determinaron 2 factores de experimentación, la temperatura ( $T$ ) y el tiempo ( $t$ ), sus niveles de aplicación se determinaron de acuerdo con las zonas climáticas. Para el factor temperatura, la zona geográfica de modelación corresponde a los lugares donde se construyen los pavimentos asfálticos con el cemento asfáltico AC-20 de la refinería Ing. Antonio M. Amor de la ciudad de Salamanca, Gto., en la cual se presentan tres tipos de clima: Cálido Húmedo-Lluvioso en verano con 30°C de temperatura máxima promedio anual (TMPA), Templado Húmedo-Lluvioso en verano con 25°C de TMPA y Estepario-Lluvioso en verano con 20°C de TMPA. Para el factor tiempo ( $t$ ) las mejores condiciones de experimentación se establecen conforme se realiza la modelación por medio de la MSR.

### Elección de método de modelación

La MSR es un método que consiste en tres pasos (Montgomery, 2001), el primero llamado *Prediseño*, un diseño

factorial  $2^2$  se implementó para generar un modelo lineal que es necesario para el segundo paso, llamado *Ascenso por la trayectoria de mayor pendiente*, donde una línea recta trazada de manera tangente al modelo lineal es la auxiliar para encontrar el máximo o mínimo de la propiedad monitoreada. El tercer paso, llamado *Caracterización de la superficie de respuesta*, se propuso un diseño factorial  $3^2$  para generar un modelo de segundo orden.

### Variables

Las propiedades de la mezcla asfáltica que se emplearon como funciones de salida fueron  $\Delta L$  (cambio en la estabilidad Marshall de la muestra colocada en el horno y el patrón de referencia según ASTM D 5581),  $\Delta F$  (cambio en el flujo de la muestra colocada en el horno y el patrón de referencia según ASTM D 5581) y  $VM$  (cambio en la gravedad específica de la muestra colocada en el horno y el patrón de referencia según ASTM D 1188).

### Recolección, análisis de datos y codificación del modelo

#### Prediseño

En este paso la temperatura se consideró como la variable independiente que causa la volatilización del cemento asfáltico. La metodología recomienda plantear un diseño experimental que pueda generar un modelo lineal, por lo que se implementó un diseño experimental factorial  $2^2$  para verificar la selección adecuada de los factores y sus niveles. De acuerdo con las temperaturas de la zona geográfica, se propusieron 20 y 30°C como el nivel bajo y alto del factor temperatura, respectivamente, después 2 y 4 días como el nivel bajo y alto del factor tiempo, respectivamente. Si  $t$ , denota la variable independiente tiempo y  $T$ , la variable independiente temperatura, entonces las variables codificadas se pueden calcular con las ecuaciones siguientes:

$$X_1 = \frac{t-3}{2} \quad (1)$$

$$X_2 = \frac{T-25}{5} \quad (2)$$

El diseño factorial  $2^2$  fue empleado para recolectar los datos de  $\Delta L$ ,  $\Delta F$  y  $VM$ , por medio de cuatro corridas (condiciones  $t$  y  $T$  para la prueba), aumentado en 5 puntos centrales para evaluar el error experimental y verificar el ajuste adecuado del modelo lineal (Montgomery, 2001). Se elaboraron treinta y tres especímenes cilíndricos con el contenido óptimo de cemento asfáltico de

acuerdo a la norma ASTM D 5581, se conservaron 6 como muestras de referencia y el resto de ellos fueron colocados en un horno convencional en grupos de 3 (réplicas) según las condiciones de prueba para  $t$  y  $T$ , mostradas en la tabla 1. Después de terminar el intemperismo acelerado, los especímenes fueron enfriados a temperatura ambiente y se determinaron  $\Delta L$ ,  $\Delta F$  y  $VM$  correspondientes.

Se observa que el material volatilizado ( $VM$ ) no presentó cambio, porque los días de prueba fueron pocos. Siguiendo el procedimiento de resolución de experimentos factoriales de dos niveles (algoritmo de Yates), los datos experimentales fueron ajustados por mínimos cuadrados a un modelo lineal con la ayuda de software comercial. Dicho software fue empleado para ajustar los datos y generar el análisis de varianza del modelo que verifica su ajuste. Las tablas 2 y 3 muestran el análisis de varianza de los modelos lineales.

Para verificar si el modelo  $\Delta L$  es adecuado, se emplean los resultados de la tabla 2 como sigue: si usamos

$\alpha$  (probabilidad de error) = 0.05, el valor crítico del valor  $F$  (prueba de estadística) es  $F_{0.05, 2, 22} = 3.05$ . Entonces para el valor  $F = 397.22 > 3.05$  de la fuente de variación *Modelo*, se observa que  $t$  y  $T$  tienen efecto sobre el modelo de  $\Delta L$ . El valor  $P$ ,  $9.4E-09$  (probabilidad del valor  $F$ ) para *Modelo es cero*. En contraste, el valor  $F$  para la fuente de variación *Interacción* y para *Cuadrático* están muy cercanos a cero, se observa que  $(t)(T)$  - *interacción*, y  $t^2$ ,  $T^2$  - *cuadráticos*, no tienen efecto en el modelo de  $\Delta L$ . Los valores  $P$  para *Interacción* y *Cuadrático* están muy cercanos a uno. Como el efecto de *Interacción* y *Cuadrático* no son significantes y el valor  $F$  del modelo es significativo, entonces el modelo lineal (modelo de primer orden) es adecuado para modelar los resultados del cambio en la resistencia a la carga ( $\Delta L$ ). Se emplearon los resultados de la tabla 3 para verificar si el modelo  $\Delta F$  es adecuado, como sigue: si usamos  $\alpha = 0.05$  el valor crítico de  $F$  es  $F_{0.05, 2, 22} = 3.05$ . Entonces el Valor  $F$  para *Modelo* es  $647.3782 > 3.05$ , se observa que  $t$  y  $T$  tienen efecto sobre el modelo de  $\Delta F$ . El valor  $P = 9.6742E-11$  para *Modelo es*

Corridas	Réplica	Variables codificadas		$t$	$T$	Li	Lf	$\Delta L$	Fi	Ff	$\Delta F$
		$X_1$	$X_2$	días	°C	kg	Kg	kg	mm	mm	mm
1	1	1	1	4	30	950	1200	250	3.1	3.5	0.4
2	1	1	-1	4	20	950	1195	245	3.1	4	0.9
3	1	-1	1	2	30	950	1190	240	3.1	3.8	0.7
4	1	-1	-1	2	20	950	1188	238	3.1	4.2	1.1
5 (Centro)	1	0	0	3	25	950	1192	242	3.1	3.85	0.75
6 (Centro)	1	0	0	3	25	950	1193	243	3.1	3.87	0.77
7 (Centro)	1	0	0	3	25	950	1193	243	3.1	3.87	0.77
8 (Centro)	1	0	0	3	25	950	1192	242	3.1	3.85	0.75
9 (Centro)	1	0	0	3	25	950	1192	242	3.1	3.86	0.76
1	2	1	1	4	30	950	1200	250	3.1	3.55	0.45
2	2	1	-1	4	20	950	1196	246	3.1	3.97	0.87
3	2	-1	1	2	30	950	1194	244	3.1	3.81	0.71
4	2	-1	-1	2	20	950	1187	237	3.1	4.15	1.05
5 (Centro)	2	0	0	3	25	950	1192	242	3.1	3.85	0.75
6 (Centro)	2	0	0	3	25	950	1193	243	3.1	3.87	0.77
7 (Centro)	2	0	0	3	25	950	1193	243	3.1	3.87	0.77
8 (Centro)	2	0	0	3	25	950	1192	242	3.1	3.85	0.75
9 (Centro)	2	0	0	3	25	950	1192	242	3.1	3.86	0.76
1	3	1	1	4	30	950	1201	251	3.1	3.6	0.5
2	3	1	-1	4	20	950	1197	247	3.1	4.1	1
3	3	-1	1	2	30	950	1191	241	3.1	3.86	0.76
4	3	-1	-1	2	20	950	1187	237	3.1	4.12	1.02
5 (Centro)	3	0	0	3	25	950	1192	242	3.1	3.85	0.75
6 (Centro)	3	0	0	3	25	950	1193	243	3.1	3.87	0.77
7 (Centro)	3	0	0	3	25	950	1193	243	3.1	3.87	0.77
8 (Centro)	3	0	0	3	25	950	1192	242	3.1	3.85	0.75
9 (Centro)	3	0	0	3	25	950	1192	242	3.1	3.86	0.76

Tabla 1. Datos empleados para el ajuste del modelo lineal de  $\Delta L$ ,  $\Delta F$  y  $VM$

Donde:  $Li$  significa resistencia a la carga inicial que es el promedio de la resistencia a la carga de los 6 especímenes de referencia y  $Lf$  es la resistencia a la carga de los especímenes cilíndricos después de haber sido tratados térmicamente en el horno, de manera semejante para  $Fi$  y  $Ff$ , sólo que aquí la propiedad determinada es el flujo. Los cambios en las propiedades  $\Delta L$  y  $\Delta F$  son las restas de  $Lf - Li$  y  $Ff - Fi$ , respectivamente

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	F	Valor P
Modelo ( $\beta_1, \beta_2$ )	281.6666	2	140.8333	397.2222	9.4E-09
Residual	15.6222				
Interacción	0.0000	1	0	0	1.000
Cuadrático	0.0222	1	0.0222	0.03133	0.9765
Error	15.6000	22	0.7091		
Total SC	297.2888	26			

Tabla 2. Análisis de varianza de  $\Delta L$  del ajuste de primer orden

Fuente de Variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	F	Valor P
Modelo ( $\beta_1, \beta_2$ )	0.6121	2	0.30604	647.3782	9.6742E-11
Residual	0.0355				
Interacción	0.0147	1	0.01470	15.5481	0.000693
Cuadrático	0.0000	1	0.00000	0.0000	1
Error	0.0208	22	0.00095		
Total SS	0.6476	26			

Tabla 3. Análisis de varianza de  $\Delta F$  del ajuste de primer orden

Términos	Coeficientes en variables codificadas	Coeficientes de		Valor -P	$R^2$	$R^2$ adj
		Valor-P	Regresión			
Promedio	243.8333	0.0	219.2037	3E-25		
Tiempo (t)	4.3333	1E-14	4.3333	0.002	0.94983	0.94071
Temperatura (T)	2.1667	9E-09	0.4333	0.010		
Interacción (T*t)	0.0000	1.0	0.0000	1.00		

Tabla 4. Estimación de los efectos de los términos del modelo de  $\Delta L$ 

cero. En contraste el valor  $F$  para la fuente de variación *Interacción* no es cero (15.5481), entonces, es significativa y el valor  $F$  para la fuente de variación *Cuadrático* están muy cerca de cero, por lo que, no es significativa, además la interacción  $(t)(T)$ , tiene efecto sobre el modelo  $\Delta F$ , aun cuando los términos cuadráticos no tienen efecto y el *Modelo* es significativa, los términos de interacción tienen el efecto suficiente para considerar el modelo lineal no adecuado, quizás un modelo de segundo orden podría tener un ajuste mejor, pero como en este paso de la metodología no es el objetivo, no se realizó. Por lo que el modelo lineal de  $\Delta L$  fue el único adecuado. En la tabla 4, se presenta la estimación de los efectos de los términos del modelo, obtenidos con el uso de un programa comercial.

El valor  $P$  del término  $T$  igual a 0.00 y el valor  $P$  del término  $t$  igual a 0.00 indican que los coeficientes de regresión son significantes, en contraste, el valor  $P$  del término  $(t)(T)$  igual a 1.00 indica que este coeficiente de regresión no es significativo, para  $\alpha = 0.05$  con 95% de intervalo de confianza (Box, 1987). Entonces el modelo lineal es:

$$\Delta L = 219.20 + 4.33t + 0.433T \quad (3)$$

Donde  $\Delta L$  es el modelo que describe el efecto de las variables  $t$  y  $T$  sobre el cambio de la estabilidad Marshall

en kilogramos y se observa que dicho efecto no existe para los términos de interacción y cuadráticos, entonces  $t$  y  $T$  podrían ser los principales factores causantes de la volatilización.

#### Ascenso por la trayectoria de mayor pendiente

En este paso se trazó una línea tangente al modelo, con la cual podemos encontrar la respuesta máxima del cambio en las propiedades ( $\Delta L$ ,  $\Delta F$  y  $VM$ ) que se están determinando a los especímenes cilíndricos. De los coeficientes de las variables codificadas de la tabla 4, se puede observar que si establecemos el punto de origen en las coordenadas  $X_1 = 0$  y  $X_2 = 0$  y considerando un desplazamiento de 4.333 unidades en la dirección  $X_1$  y de 2.1666 en la dirección  $X_2$  se da una pendiente de ascenso de 0.5. Se decidió utilizar un paso de ascenso para la variable  $T$  de 15°C. Para cada uno de los pasos se elaboraron tres especímenes cilíndricos con el contenido óptimo de cemento asfáltico de acuerdo con la norma ASTM D 5581, para las condiciones de tiempo y temperatura mostrados en la tabla 5 y para 6 especímenes de referencia.

Los especímenes cilíndricos fueron retirados del horno, se dejaron enfriar a temperatura ambiente y se les determinó su estabilidad Marshall, se calculó  $\Delta L$  y se observó su comportamiento hasta que se notó un

cambio. Los resultados se presentan en la tabla 5, donde se observa un valor máximo en el cambio de  $\Delta L$  en el cuarto paso y todos los demás valores son menores o fueron destruidos por el calor. El valor óptimo se encuentra en  $X_1 = 4$  y  $X_2 = 2$ , para variables codificadas que son  $t = 42$  días y  $T = 93^\circ\text{C}$  para variables independientes. Al igual que el prediseño, las variables  $t$  y  $T$  parecen ser las variables que tienen más influencia en el cambio de propiedades del material.

#### Caracterización de la superficie de respuesta

Se propuso un diseño factorial de tres niveles ( $3^2$ ) para los dos factores ( $t$  y  $T$ ). Como el valor óptimo de  $\Delta L$  se observó para  $t = 42$  días y  $T = 93^\circ\text{C}$ , entonces se propusieron los niveles de los factores en valores cercanos a éstos para tener una buena descripción de la superficie del modelo y en consecuencia, un mejor ajuste. Los valores para los niveles de la temperatura propuestos son 60, 80 y  $100^\circ\text{C}$  para el nivel bajo, medio y alto, respectivamente. Para los niveles de tiempo son 24, 36 y 48 días para el nivel bajo, medio y alto, respectivamente, lo que da un total de nueve corridas con seis réplicas y nueve especímenes cilíndricos como referencia, sumando un total de 54 especímenes cilíndricos elaborados con el contenido óptimo de cemento asfáltico, según la norma ASTM D5581 y colocados en un horno convencional, de acuerdo con las condiciones mostradas en la tabla 6.

Las muestras se retiraron del horno después de su tratamiento térmico, se dejaron enfriar a temperatura ambiente y se les determinó la estabilidad Marshall ( $L_f$ ), el flujo ( $F_f$ ) y la gravedad específica ( $GE_f$ ), con los datos de las muestras de referencia se calculó  $\Delta L$ ,  $\Delta F$  y  $VM$ . Los resultados se resumen en la tabla 6.

Siguiendo el método de resolución para diseños de tres niveles y con la ayuda de un programa comercial,

los datos de la tabla 6 se ajustaron a un modelo de segundo orden y se realizó el análisis de varianza. Los términos del modelo se separaron en principales y de interacción. Se determinaron los valores  $P$  para cada grupo como se muestran en la tabla 7. El valor  $P$  del grupo de los términos principales ( $T$ ,  $T^2$ ,  $t$ ,  $t^2$ ) están más cercanos al cero que los términos de interacción ( $Tt$ ,  $Tt^2$ ,  $T^2t$ ,  $T^2t^2$ ), debido a que los coeficientes principales contribuyen más significativamente (Walpole, 1998) y para tener un modelo con los términos necesarios para un uso práctico, se seleccionaron sólo los coeficientes principales. Los datos de la tabla 6 se volvieron a ajustar por mínimos cuadrados con la ayuda de un programa comercial y se realizó el análisis de varianza para comprobar si el modelo es el adecuado, los resultados se muestran en las tablas 8 y 9, respectivamente.

De la tabla 9, se verificó lo adecuado de los modelos  $\Delta L$ ,  $\Delta F$ ,  $VM$  como sigue (Box, 2000): usando  $\alpha = 0.05$ , el valor crítico de  $F$  es  $F_{0.05, 4, 45} = 2.55$ . Los valores  $F$  son iguales a 608.46, 494.80 y 880.51 para el factor  $T$  de los modelos  $\Delta L$ ,  $\Delta F$  y  $VM$ , respectivamente, y los valores  $F$  iguales a 43.74, 82.11 y 1072.35 para el factor  $t$  de los modelos  $\Delta L$ ,  $\Delta F$ ,  $VM$ , respectivamente son mayores que 2.55, entonces los factores  $T$  y  $t$  son significantes, además los valores  $F$  de error de ajustes son más pequeños que los de los factores  $T$  y  $t$ , entonces el error de ajuste es no significativo para el modelo.

Los modelos de  $\Delta L$ ,  $\Delta F$  y  $VM$  son los siguientes de acuerdo con los coeficientes de regresión de la tabla 8, donde  $T$  es la temperatura ambiente en  $^\circ\text{C}$  y  $t$  es el tiempo de envejecimiento en meses:

$$\Delta L(\text{Kg}) = 1798 - 112T + 0.92T^2 + 33t - 0.1t^2 \quad (4)$$

$$\Delta F(\text{mm}) = 1.0008 + 0.1091T - 0.0007T^2 + 0.0128t - 0.0001t^2 \quad (5)$$

$$VM(\%) = -5.4494 - 0.0029T + 0.0002T^2 + 0.5494t - 0.0037t^2 \quad (6)$$

Pasos	Variables codificadas		$t$	$T$	$L_i$	$L_f$	$\Delta L$
	$X_1$	$X_2$	(días)	( $^\circ\text{C}$ )	Kg	Kg	(kg)
Origen	0	0.0	3	25			242.4
$\Delta$	1	0.5	30	15			
Origen + 1 $\Delta$	1	0.5	33	40	986	1855	869
Origen + 2 $\Delta$	2	1.0	36	43	986	1903	917
Origen + 3 $\Delta$	3	1.5	39	68	986	2041	1055
Origen + 4 $\Delta$	4	2.0	42	93	986	2228	1242
Origen + 5 $\Delta$	5	2.5	45	118	986	2091	1105
Origen + 6 $\Delta$	6	3.0	48	143	986	-	Los
Origen + 7 $\Delta$	7	3.5	51	168	986	-	especímenes
Origen + 8 $\Delta$	8	4.0	54	193	986	-	fueron
Origen + 9 $\Delta$	9	4.5	57	218	986	-	destruidos
Origen + 10 $\Delta$	10	5.0	60	243	986	-	por el exceso
							de calor

Tabla 5. Experimento del ascenso por la máxima pendiente

Donde  $L_i$  significa resistencia a la carga inicial que es el promedio de la resistencia a la carga de los 6 especímenes de referencia y  $L_f$  es el promedio de la resistencia a la carga de tres especímenes cilíndricos después de haber sido tratados térmicamente en el horno, de manera semejante se definen  $F_i$  y  $F_f$ , sólo que aquí, la propiedad determinada es el flujo. Los cambios en las propiedades  $\Delta L$  y  $\Delta F$  son la resta de  $L_f - L_i$  y  $F_f - F_i$ , respectivamente.

Tabla 6. Datos para el ajuste a modelos de segundo orden de  $\Delta L$ ,  $\Delta F$  y  $VM$ 

Corrida	Réplica	T °C	t días	Li kg	Lf kg	$\Delta L$ kg	Fi mm	Ff mm	$\Delta F$ mm	GEi kg/m <sup>3</sup>	GEf kg/m <sup>3</sup>	VM %
1	1	60	24	1089	1119	30	3.12	8.37	5.25	2359	2259.7	4.21
2	1	60	36	1089	1634	545	3.12	8.51	5.39	2359	2245.3	4.82
3	1	60	48	1089	1041	-48	3.12	8.61	5.49	2359	2254.0	4.45
4	1	80	24	1089	1898	809	3.12	8.61	5.49	2359	2255.0	4.41
5	1	80	36	1089	2068	979	3.12	8.68	5.56	2359	2223.6	5.74
6	1	80	48	1089	2305	1216	3.12	8.83	5.71	2359	2244.6	4.85
7	1	100	24	1089	2905	1816	3.12	8.29	5.17	2359	2242.2	4.95
8	1	100	36	1089	3397	2308	3.12	8.32	5.20	2359	2200.9	6.7
9	1	100	48	1089	4752	3663	3.12	8.37	5.25	2359	2228.8	5.52
1	2	60	24	1089	1095	6	3.12	8.38	5.26	2359	2259.2	4.23
2	2	60	36	1089	1397	308	3.12	8.51	5.39	2359	2243.9	4.88
3	2	60	48	1089	1186	97	3.12	8.53	5.41	2359	2255.0	4.41
4	2	80	24	1089	1661	572	3.12	8.56	5.44	2359	2255.2	4.4
5	2	80	36	1089	1854	765	3.12	8.64	5.52	2359	2226.4	5.62
6	2	80	48	1089	2407	1318	3.12	8.68	5.56	2359	2245.1	4.83
7	2	100	24	1089	2936	1847	3.12	8.27	5.15	2359	2241.5	4.98
8	2	100	36	1089	3600	2511	3.12	8.33	5.21	2359	2196.7	6.88
9	2	100	48	1089	4800	3711	3.12	8.37	5.25	2359	2238.0	5.13
1	3	60	24	1089	1166	77	3.12	8.35	5.23	2359	2260.2	4.19
2	3	60	36	1089	1383	294	3.12	8.46	5.34	2359	2244.4	4.86
3	3	60	48	1089	1339	250	3.12	8.56	5.44	2359	2255.2	4.4
4	3	80	24	1089	2041	952	3.12	8.61	5.49	2359	2255.4	4.39
5	3	80	36	1089	2115	1026	3.12	8.73	5.61	2359	2227.8	5.56
6	3	80	48	1089	2359	1270	3.12	8.78	5.66	2359	2246.2	4.78
7	3	100	24	1089	3366	2277	3.12	8.28	5.16	2359	2241.3	4.99
8	3	100	36	1089	3464	2375	3.12	8.32	5.20	2359	2201.7	6.67
9	3	100	48	1089	4617	3528	3.12	8.34	5.22	2359	2237.5	5.15
1	4	60	24	1089	1210	121	3.12	8.37	5.25	2359	2260.4	4.18
2	4	60	36	1089	1288	199	3.12	8.48	5.36	2359	2245.8	4.8
3	4	60	48	1089	1186	97	3.12	8.51	5.39	2359	2255.9	4.37
4	4	80	24	1089	1915	826	3.12	8.58	5.46	2359	2255.0	4.41
5	4	80	36	1089	2312	1223	3.12	8.68	5.56	2359	2224.3	5.71
6	4	80	48	1089	2017	928	3.12	8.78	5.66	2359	2245.1	4.83
7	4	100	24	1089	2966	1877	3.12	8.28	5.16	2359	2238.9	5.09
8	4	100	36	1089	3498	2409	3.12	8.31	5.19	2359	2197.9	6.83
9	4	100	48	1089	4861	3772	3.12	8.34	5.22	2359	2237.5	5.15
1	5	60	24	1089	1441	352	3.12	8.36	5.24	2359	2259.2	4.23
2	5	60	36	1089	1193	104	3.12	8.48	5.36	2359	2244.4	4.86
3	5	60	48	1089	1159	70	3.12	8.49	5.37	2359	2256.6	4.34
4	5	80	24	1089	1966	877	3.12	8.53	5.41	2359	2255.9	4.37
5	5	80	36	1089	2536	1447	3.12	8.61	5.49	2359	2222.4	5.79
6	5	80	48	1089	1881	792	3.12	8.73	5.61	2359	2245.1	4.83
7	5	100	24	1089	2722	1633	3.12	8.29	5.17	2359	2243.2	4.91
8	5	100	36	1089	4136	3047	3.12	8.31	5.19	2359	2204.0	6.57
9	5	100	48	1089	4458	3369	3.12	8.32	5.20	2359	2235.6	5.23
1	6	60	24	1089	1210	121	3.12	8.35	5.23	2359	2260.2	4.19
2	6	60	36	1089	1102	13	3.12	8.48	5.36	2359	2246.2	4.78
3	6	60	48	1089	1180	91	3.12	8.48	5.36	2359	2256.1	4.36
4	6	80	24	1089	2078	989	3.12	8.51	5.39	2359	2254.5	4.43
5	6	80	36	1089	2102	1013	3.12	8.64	5.52	2359	2223.4	5.75
6	6	80	48	1089	1864	775	3.12	8.83	5.71	2359	2246.0	4.79
7	6	100	24	1089	2627	1538	3.12	8.28	5.16	2359	2244.4	4.86
8	6	100	36	1089	3671	2582	3.12	8.33	5.21	2359	2205.2	6.52
9	6	100	48	1089	5458	4369	3.12	8.33	5.21	2359	2237.7	5.14

Donde  $L_i$  significa resistencia a la carga inicial que es el promedio de la resistencia a la carga de los 9 especímenes de referencia y  $L_f$  es la resistencia a la carga de los especímenes cilíndricos después de haber sido tratados térmicamente en el horno, de manera semejante para  $F_i$  y  $F_f$ , sólo que aquí la propiedad determinada es el flujo. Los cambios en las propiedades  $\Delta L$  y  $\Delta F$  son la resta de  $L_f - L_i$  y  $F_f - F_i$ , respectivamente.  $GE_i$  es la gravedad específica de las muestras de referencia y  $GE_f$  es la gravedad específica de los especímenes cilíndricos después de haber sido tratados térmicamente,  $VM$  es la resta  $GE_i - GE_f$ .

Modelo	Factor	SC	PSC	(GL)	SC/GL	Valor F	Valor P
$\Delta L$	T	5.85E+07					
	T T	2312945	6.52E+07	4	2E+07	326.1009	1.666E-27
	t	4373675					
	t t	878					
	T t	581561					
Principales	T t t	293633	1123921	4	280980	5.61938	6.63E-03
	T T t	157543					
	T T t t	91184					
	T	0.191547					
	T T	0.953824	1.335442	4	0.3339	288.4573	2.179E-26
$\Delta F$	t	0.187893					
	t t	0.002178					
	T t	0.01862					
	T t t	0.002638	0.038606	4	0.0097	8.338949	8.31E-04
	T T t	0.015258					
Interacción	T T t t	0.00209					
	T	11.914					
	T T	0.07521	26.59059	4	6.6476	1021.442	3.191E-38
	t	0.73388					
	t t	13.8675					
Principales	T t	0.00807					
	T t t	0.27556	0.36159	4	0.0904	13.27793	2.936E-05
	T T t	0.07736					
	T T t t	0.0006					
	T T t t	0.0006					

Tabla 7. Valores P para el grupo de factores principales y de interacción

Donde SC significa suma de cuadrados, PSC significa promedio de suma de cuadrados y GL significa grados de libertad.

Modelo	Factor	Coefficientes en variables codificadas	Valor P	Coefficientes de regresión	Valor P	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> adj
$\Delta L$	Promedio	1280.4170	0.0000	1798.0000	0.1231		
	T(L)	1275.1390	0.0000	-112.0000	0.0001		
	T(Q)	-219.5140	0.0000	0.9200	0.0000	0.8755	0.8654
	t(L)	348.5560	0.0000	33.0000	0.3096		
	t(Q)	4.2780	0.8951	-0.1000	0.8951		
$\Delta F$	Promedio	5.3610	0.0000	1.0008	0.0000		
	T(L)	-0.0729	0.0000	0.1091	0.0000		
	T(Q)	0.1410	0.0000	-0.0007	0.0000	0.9364	0.9312
	t(L)	0.0722	0.0000	0.0128	0.0130		
	t(Q)	0.0067	0.1769	-0.0001	0.1769		
VM	Promedio	5.0244	0.0000	-5.4494	0.0000		
	T(L)	0.5753	0.0000	-0.0029	0.7626		
	T(Q)	-0.0396	0.0018	0.0002	0.0018	0.9088	0.9014
	t(L)	0.1428	0.0000	0.5494	0.0000		
	t(Q)	0.5375	0.0000	-0.0037	0.0000		

Tabla 8. Coeficientes de regresión de  $\Delta L$ ,  $\Delta F$  y VM

Modelo	Factor	SC	PSC	Valor F	Valor P
$\Delta L$	T(L + Q)	6.08E+07	30424100	608.46	0.0000
	t (L + Q)	4.37E+06	2187277	43.74	0.0000
	Error de ajuste	7.02E+06	1755981	35.12	0.0000
	Error puro	2.25E+06	50002		
	Total SC	7.45E+07			
$\Delta F$	T(L + Q)	1.1454	0.5727	494.80	0.0000
	t(L + Q)	0.1901	0.0950	82.11	0.0000
	Error de ajuste	0.0386	0.0097	8.34	0.0000
	Error puro	0.0521	0.0012		
	Total SC	1.4261			
VM	T(L + Q)	11.9892	5.9946	880.51	0.0000
	t(L + Q)	14.6014	7.3007	1072.35	0.0000
	Error de ajuste	2.3616	0.5904	86.72	0.0000
	Error puro	0.3064	0.0068		
	Total SC	29.2585			

Tabla 9. Análisis de varianza de  $\Delta L$ ,  $\Delta F$  y VM

Donde SC significa suma de cuadrados, PSC significa promedio de suma de cuadrados, GL quiere decir grados de libertad, L significa lineal y Q cuadrático.

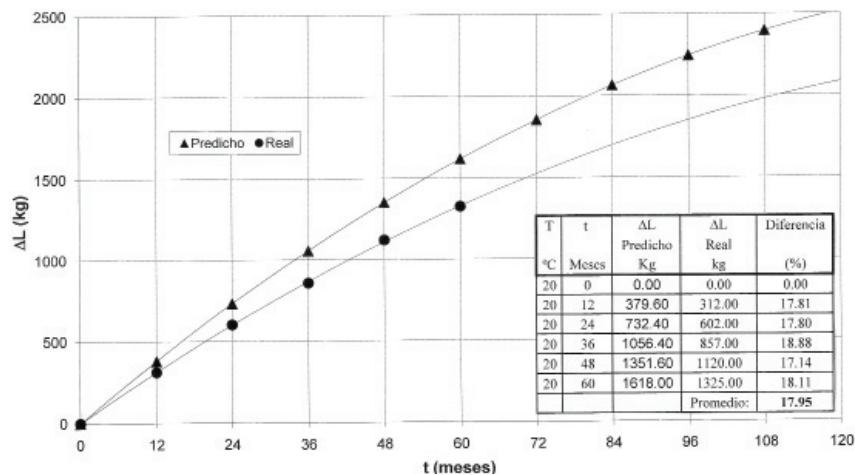
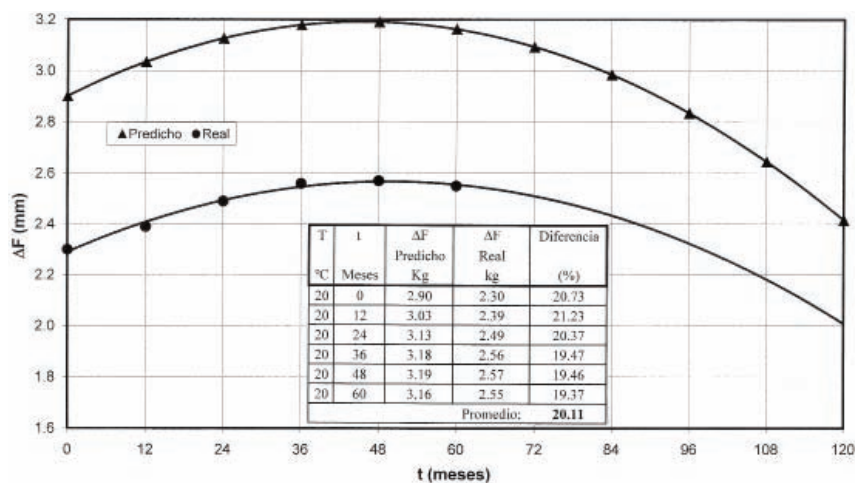
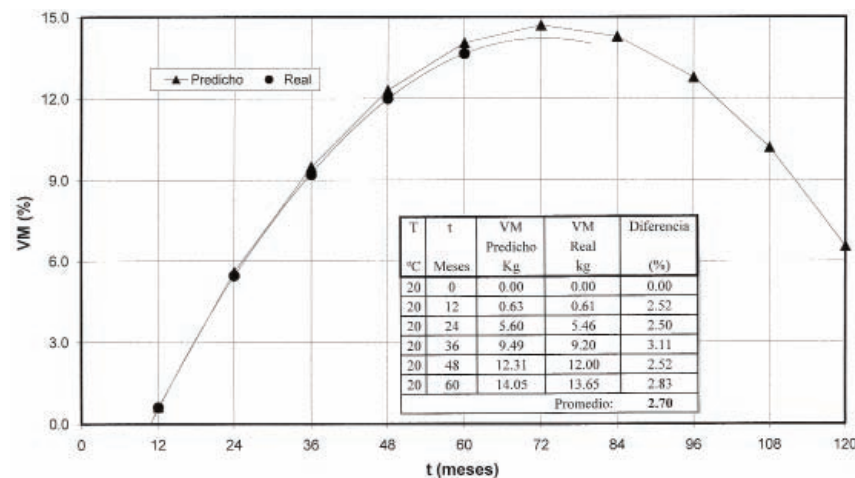
Figura 1. Valores predichos y reales para el modelo  $\Delta L$ Figura 2. Valores predichos y reales para el modelo  $\Delta F$ 

Figura 3. Valores predichos y reales para el modelo VM

## Validación del modelo

Para conocer los coeficientes  $\beta$  de regresión de estos modelos para la zona geográfica de modelación, se extrajeron especímenes cilíndricos (corazones) de la carpeta asfáltica en servicio, de acuerdo con la norma ASTM D 5361. Se tomaron tres corazones de la carpeta asfáltica con 0, 12, 24, 36, 48 y 60 meses de envejecimiento real, mientras que en los modelos se sustituyó el valor de la temperatura promedio de 20°C y los tiempos 0, 12, 24, 36, 48 y 60 meses. El promedio de los resultados del cambio en la estabilidad Marshall, flujo y el material volátil, así como la comparación en el valor predicho y el real se muestran en las figuras 1, 2 y 3, respectivamente.

La diferencia entre el valor predicho y el real para  $\Delta L$  y  $\Delta F$  son 18% y 20%, respectivamente, y dichas diferencias pueden estar relacionadas con las deficiencias en la construcción, el exceso de tránsito y posiblemente con los factores climáticos que no fueron considerados al inicio de la investigación. Por el contrario, la diferencia entre el valor predicho y el real del modelo VM es 3% lo que indica que el procedimiento de envejecimiento simulado implementado en esta investigación es representativo de las condiciones reales y que la temperatura y el tiempo son los factores ambientales que tienen la mayor influencia sobre la cantidad de material que se volatiliza en la carpeta asfáltica en servicio. El error de modelación de VM de 3% está asociado a variaciones no controladas de la extracción de las muestras de campo, al igual que a las propiedades iniciales de la mezcla asfáltica colocada en la carpeta asfáltica y a la diferencia en el proceso constructivo de los tramos monitoreados.

## Conclusiones

La metodología de superficie de respuesta se empleó para la generación de modelos de simulación del tipo determinístico en varias ramas del conocimiento y en la de materiales de construcción ha demostrado ser asertiva en los resultados que dichos modelos predicen.

Los modelos de las propiedades mecánicas desarrollados en esta investigación presentaron errores de predicción que podrían estar asociados al TDPA, a la carga por eje equivalente y a los demás factores ambientales omitidos en el planteamiento de la modelación, por lo que se deben considerar para que estas diferencias sean menores.

Como el modelo para VM presentó una diferencia o error de modelación de 3%, entonces el procedimiento de simulación del envejecimiento empleado en esta investigación es representativo de las condiciones de tiempo y temperatura reales, y la temperatura es el factor ambiental que tiene mayor efecto sobre la cantidad de material que se volatiliza en la mezcla asfáltica.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo recibido mediante el proyecto 58425 del mismo tema de investigación, así como a la Universidad de Guanajuato por el apoyo financiero a través del proyecto 44/07.

## Referencias

- Azarang-Esfandiari M. *Simulación y análisis de modelos estocásticos*, 1ª edición, McGraw-Hill, México, 1996, p. 2.
- Bell C. *Aging of Asphalt-Aggregate Systems*, 1ª edición, Transportation Research Bureau Press. EUA, 1989, p. 120.
- Box G. *Empirical Model-Building and Response Surfaces*, 1ª edición, John Wiley & Sons, EUA, 1987, pp. 55-68.
- Box G.E. *Statistics for Experimenters. An Introduction to Design, Data Analysis and Model Building*, 1ª edición, John Wiley & Sons, EUA, 2000, pp. 69-78.
- Bratly P. *A Guide to Simulation*, 2ª edición, Springer-Verlag, EUA, 1987, pp. 35-55, 67.
- Castaño-Tostado E. *Experimentos: estrategias y análisis en ciencia y tecnología*, 1ª edición, México, S y G editores, 2003, p. 295.
- Montgomery D. *Response Surface Methodology*, 1ª edición, John Wiley & Sons, EUA, 1995, pp. 24-35.
- Montgomery D. *Design and Analysis of Experimenters*, 2ª edición, John Wiley & Sons, EUA, 2001, pp. 23-150.
- Reunión del Consejo de Directores de Carreteras de Iberia e Iberoamérica. (No.11, 2002, México). *Catálogo de deterioro de pavimentos flexibles*, México, 2002, p. 6.
- Yoder, Witczak. *Principles of Pavement Design*, 2ª edición, John Wiley & Sons, Nueva York, 1975, pp. 24-27.
- Walpole R. *Probability and Statistic for Engineers and Scientists*, 1ª edición, Prentice-Hall, EUA, 1998, pp. 3-12.

## Semblanza de los autores

**Luis Elías Chávez-Valencia.** Ingeniero civil egresado de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en donde realizó estudios de maestría en ciencias de los materiales. Egresó del doctorado en ciencias con especialidad en materiales del CINVESTAV, Unidad Querétaro. Actualmente se desempeña como profesor de tiempo completo en el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Guanajuato.

**Claudia Hernández-Barriga.** Arquitecta egresada de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en donde realizó los estudios de maestría en arquitectura. Obtuvo el doctorado en arquitectura por la Universidad Nacional Autónoma de México. Actualmente se desempeña como profesora de tiempo parcial en el Departamento de Diseño de la Universidad de Guanajuato.

**Alejandro Manzano-Ramírez.** Es ingeniero químico metalurgista por la Universidad Nacional Autónoma de México. Obtuvo su doctorado en ciencias por la Sheffield University, Inglaterra. Actualmente se desempeña como investigador titular (CINVESTAV 3C), en el laboratorio de investigación en materiales del CINVESTAV-IPN, Unidad Querétaro. Es SNI nivel II.