

**IAG35-03-2013**  
**MODELO MECANICISTA EMPÍRICO PARA ANÁLISIS DE PAVIMENTOS**  
**FLEXIBLES DESARROLLADO EN ARGENTINA**  
**MODELO MECANICISTA EMPÍRICA PARA PAVIMENTO FLEXÍVEL**  
**DESENVOLVIDO NA ARGENTINA**

Oscar Giovanon  
Laboratorio Vial IMAE, FCEIA, Universidad Nacional de Rosario  
Rosario, Argentina  
ogiovanon@hotmail.com

Marta Pagola  
Laboratorio Vial IMAE, FCEIA, Universidad Nacional de Rosario  
Rosario, Argentina  
pagola@fceia.unr.edu.ar

## **Resumen**

Se presenta un Modelo mecanicista empírico desarrollado en el Laboratorio Vial de la Universidad Nacional de Rosario, Argentina. En este artículo, se comentan las aptitudes del Modelo y se muestra una primera calibración de los sub modelos que lo integran, dentro de sus características puede citarse:

- Dispone de un Sistema Experto para la modelización por retroajuste.
- Simula la evolución de la estructura a lo largo de la vida en servicio considerando variaciones de tránsito, clima y comportamiento de los materiales.
- Considera la simulación de los fenómenos de fisuración por fatiga bajo carga, acumulación de deformaciones plásticas por los distintos materiales y fallas por fisuración térmica.
- Permite expresar el comportamiento de la estructura analizada en función de parámetros de superficie rugosidad, porcentaje de fisuras, porcentaje de baches y ahuellamiento.
- Incorpora la opción de análisis con las metodologías mecanicistas clásicas.

## **Resumo**

Nós apresentamos um modelo empírico mecanicista desenvolvido no Laboratório de Estradas da Universidade Nacional de Rosario, Argentina. Neste artigo, vamos discutir as capacidades do modelo e é mostrada uma primeira calibração dos sub-modelos que se integram dentro das suas características podem incluir:

- Possui um Sistema Especialista para a modelagem a retroanálise.
- Simula a evolução da estrutura ao longo da vida útil, considerando as variações de tráfego, o tempo e o comportamento dos materiais.
- Considere a simulação dos fenômenos da trinca por fadiga sob carga, o acúmulo de deformações plásticas para os diferentes materiais e falhas de trincamento térmico.

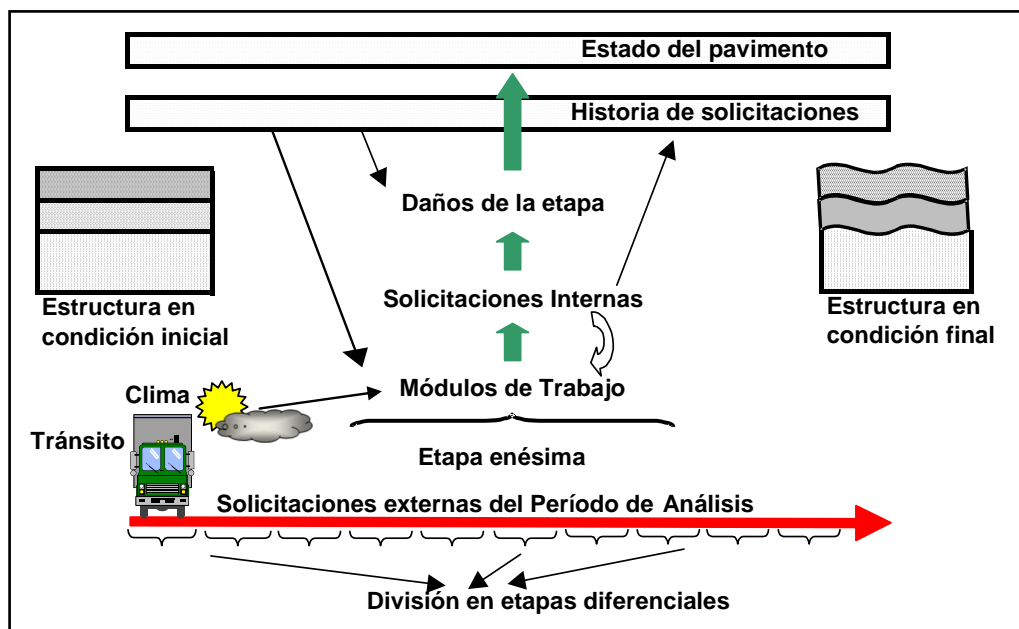
- Permite expressar o comportamento da estrutura analisada em termos de parâmetros de rugosidade superficial, porcentagem de trincas, panelas e afundamento nas trilhas.
- Incorpora opção metodologias de análise clássica.

## INTRODUCCIÓN

Los modelos de comportamiento estructural son utilizados para el diseño y verificación de los pavimentos, pudiéndolos encontrar también formando parte de los sistemas de gestión. Estos sistemas son una herramienta muy útil para las administraciones públicas y las empresas concesionarias, pues permiten realizar una mejor programación de sus inversiones, definiendo el momento más apropiado para la realización de las tareas de mantenimiento, tanto para sustentar una adecuada calidad de servicio del pavimento como para lograr un mayor beneficio económico.

El desarrollo de modelos de comportamiento de las estructuras viales resulta complejo como consecuencia de diferentes aspectos, entre los que pueden citarse:

- Los materiales asfálticos resultan susceptibles a condiciones de frecuencia y temperatura (como variables de principales)
- Los suelos y materiales granulares son susceptibles al nivel de tensiones y contenido de humedad (como variables de principales)
- Cada una de las capas constitutivas del pavimento se encuentran, en general, constituidas por un conglomerado de diferentes materiales
- El entorno climático variable condiciona tanto mediante la temperatura como mediante el contenido de humedad.
- Las fallas estructurales se producen por fatiga, siendo la reiteración de las cargas variable en intensidad y frecuencia.
- La vida útil de la estructura no finaliza con la aparición de la primera fisura en el punto más crítico, sino cuando es evidente en superficie con diferentes grados de fisuración y/o deformaciones plásticas.



**Figura 1. Esquema del Modelo de análisis incremental**

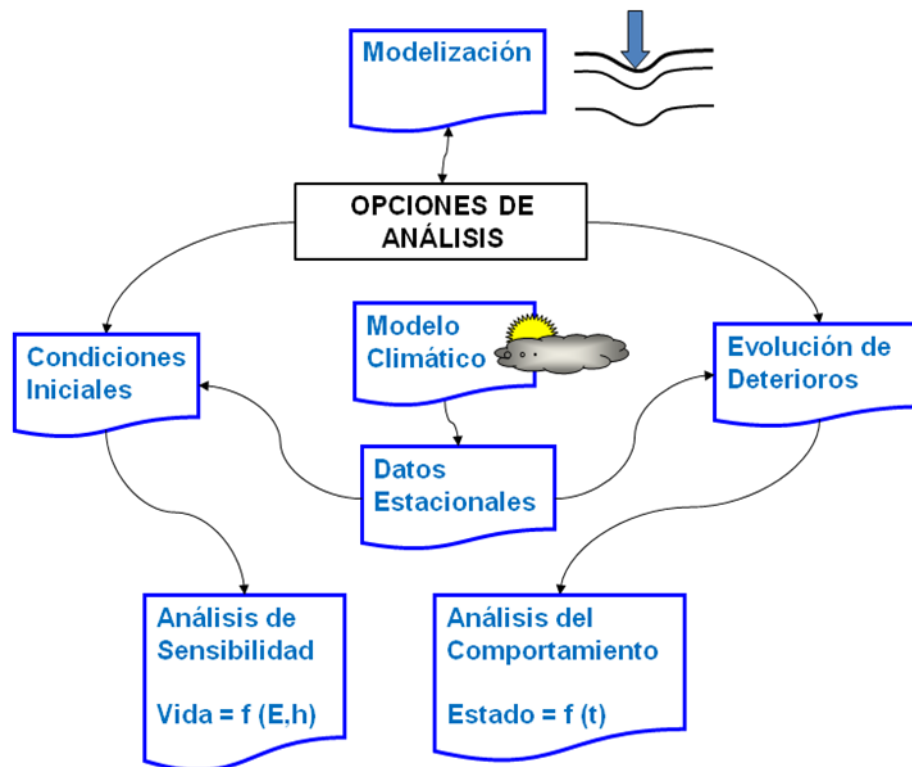
Frente a esta problemática los planteos mecanicistas a nivel estructural pueden catalogarse según los distintos grados de aproximación en: condiciones medias ponderadas, consideración de períodos anuales en condiciones iniciales y análisis incremental a lo largo de la vida en servicio.

Adoptado el tercer enfoque, sobre la base de priorizar los aspectos de mayor peso, se plantea un modelo multicapa pseudo dinámico con posibilidad de considerar el comportamiento no lineal de los materiales. Se analiza, aplicando incrementos finitos, la evolución de los materiales en el tiempo conjuntamente con los aspectos estacionales del tránsito y el clima, como se esquematiza en la Figura 1.

Adicionalmente y reconociendo la importancia de los datos, el Modelo integra dentro de sí la posibilidad de ajuste de los módulos aplicando un Sistema Experto, en base a diferentes tipos de mediciones de campo y/o laboratorio (Giovanon e Pagola, 2007).

## **ESTRUCTURA DEL MODELO**

El Modelo desarrollado BackViDe, está constituido por un conjunto de subprogramas que interactúan entre sí, permitiendo una optimización entre los programas que efectúan más eficientemente la resolución de algoritmos y aquellos que brindan una interfaz amigable con el usuario. Para constituir la interfaz con el usuario se adoptó una planilla Excel y para la resolución de los algoritmos correspondientes se optó por la realización de programas ejecutables desde una plataforma Fortran.



**Figura 2. Esquema de BackViDe**

Existen tres programas externos que interactúan mediante archivos de intercambio de datos y de banderas de finalización de procesos, siendo sus funciones las siguientes:

- Backmod: realiza el proceso de retroajuste modular en base a mediciones de deflexión
- Vida: calcula la vida útil de la estructura aplicando un modelo mecanicista de comportamiento en condiciones iniciales, con la posibilidad de declarar periodos dentro del año.
- Deterioro: calcula la evolución de los deterioros de superficie aplicando un modelo mecanicista empírico, considerando las variaciones de los materiales en el tiempo.

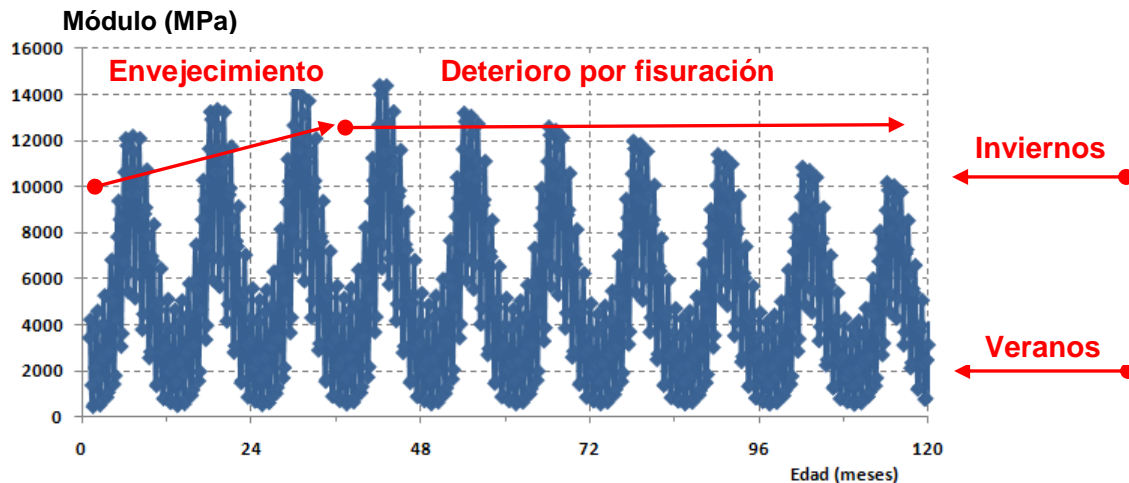
En la Figura 2 se muestra un esquema simplificado del Modelo desarrollado, indicando las principales interacciones.

## **CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES**

Dado que a los distintos materiales empleados en las estructuras viales les corresponden diferentes criterios para la caracterización de su rigidez y resistencia a fatiga, se plantean en el modelo 4 diferentes tipologías para los mismos: mezclas asfálticas, no ligados, no ligados con comportamiento no lineal, y cementados con ligantes hidráulicos. Los criterios empleados son los siguientes.

### **Rigidez**

Para las mezclas asfálticas se utiliza la Curva Maestra del Módulo Dinámico (Martínez e Angelone, 2009) para evaluar los esfuerzos del tránsito, y la Curva Maestra de Relajación (Walubita et al, 2010) (Rowe e Sharrock, 2011) para los esfuerzos asociados al clima. Los materiales no ligados no lineales se caracterizan con su Módulo Resiliente (Angelone et al, 2009), adoptando una ecuación que expresa la rigidez en función de dos invariantes de tensiones:  $t_1$  y  $t_2$  octaédrico.



**Figura 3. Módulo de una carpeta de rodadura en función del tiempo**

Para poner de manifiesto otros aspectos relacionados al paso del tiempo o al deterioro producido por la acción de las cargas como el curado de las emulsiones asfálticas, el envejecimiento de las capas de rodadura asfálticas por acción del clima, el endurecimiento de las capas con ligante hidráulico, el deterioro por fatiga y efectos estacionales, se adicionan los submodelos de Curado, Envejecimiento, Daño y Estacionalidad.

Es posible generar desde el programa una gran cantidad de gráficos de los numerosos resultados intermedios, en referencia a la variación de la rigidez, se ejemplifica en la Figura 3 la variación del módulo de una carpeta de rodadura asfáltica en función del tiempo, pudiéndose evidenciar, en esta gráfica, las variaciones dadas por: los ciclos anuales, el proceso de envejecimiento y el deterioro por fisuración.

## Resistencia a la Fatiga

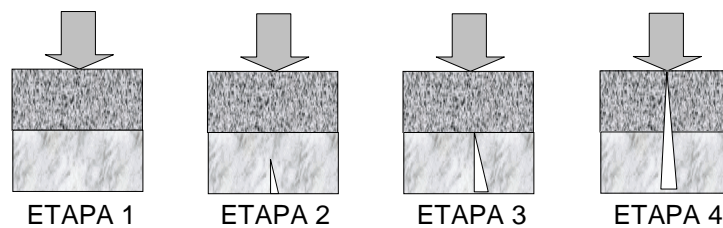
Entendiendo a la fatiga como el efecto reiterado de las cargas, en forma genérica, se engloban en ella tanto los procesos de fisuración como los de acumulación de deformaciones plásticas. Dado que el comportamiento de los materiales depende de los estados de sollicitaciones previos se requiere, en ambos procesos de fatiga, considerar la historia de tensiones. Esta historia se resume en un parámetro particular para cada proceso.

### *Fisuración*

En referencia al proceso de Fisuración el parámetro que resume la historia de solicitaciones es el daño acumulado por fatiga obtenido como la acumulación de los daños de los diferentes períodos. La expresión no difiere de la usualmente empleada en los análisis mecanicistas clásicos que sólo consideran el modelo en la condición inicial, pero si difiere en el criterio asociado al número de reiteraciones admisibles, correspondiendo el daño unitario al inicio de la fisura en el punto donde este daño es calculado.

Se incluye un factor que se aplica para fisuras iniciando desde la superficie y afecta las solicitaciones admisibles. Se considera también el efecto de concentración de tensiones, mediante un factor asociado al estado y modo de fisuración del material de la capa adjunta.

Este planteo obliga a poner de manifiesto la propagación de fisuras dentro de la estructura hasta la superficie y la vinculación del daño de la capa de superficie con la intensidad de la fisuración. En el modelo pueden diferenciarse cuatro etapas, que se esquematizan en Figura 4, si estas evolucionan de abajo hacia arriba.



**Figura 4. Etapas del deterioro fisuración**

- Etapa 1. Estructura sin fisuras (daño menor que la unidad en todo punto, análisis solamente del inicio de fisura).
- Etapa 2. Capa ligada inferior con fisura en progreso (daño mayor que la unidad en una zona de la capa, se incorpora el cálculo del progreso de fisuras).
- Etapa 3. Capa ligada inferior totalmente fisurada (daño mayor que la unidad en toda la capa, se incorpora la consideración de la concentración de tensiones en las capas adyacentes).
- Etapa 4. Estructura con fisura en superficie (daño mayor a uno en superficie, se requiere una función que modele la cantidad de fisuras en función del valor del daño en superficie).

El progreso de fisuras es modelado habitualmente mediante la ley de Paris (Martinez e Angelone, 2003), que representa adecuadamente a los materiales sólo cuando estos se comportan a medianas o bajas temperatura e insume gran cantidad de esfuerzo computacional, haciéndola inadecuada por el momento para su utilización en estructuras a escala real y modelos incrementales.

Es por ello que se aplica un modelo simplificado, donde una vez iniciada la fisura progresa con una velocidad de propagación función del daño que sigue acumulando el punto de inicio de la fisura, hasta interesar a la totalidad de la capa. A partir de este momento la totalidad de la capa progresa a la misma tasa de daño.

El criterio de falla por Ahuellamiento en el Modelo Incremental fue adoptado en base a una ecuación general de manera que su formato sea común a todos los tipos de materiales, expresando el valor de la deformación plástica en función del número de ciclos (Aussedat, 1977). Dado que las solicitaciones de cada período son variables en valor y número, se adopta a la deformación específica plástica acumulada como el parámetro que representa la historia de tensiones de cada punto.

## **VARIABLES DEL ENTORNO**

El comportamiento de la estructura es el resultado del comportamiento de cada uno de los materiales actuando en conjunto, bajo la acción del tránsito y el clima. Comentados los materiales en los puntos anteriores se expresan a continuación las consideraciones realizadas en referencia al tránsito y al clima.

El tránsito se representa mediante el número de reiteraciones del eje adoptado como referencia, este eje consiste, por defecto, en un eje simple de ruedas duales de 80 KN. Pudiendo ser definido por el usuario para representar casos particulares. Este criterio fue adoptado momentáneamente en lugar del espectro de carga, para reducir los tiempos de procesamiento y permitir la calibración del modelo con los datos de campo disponibles localmente, hecho que podrá modificarse en posteriores versiones.

Es posible establecer la fracción del valor anual del tránsito para cada período, hasta en períodos de cuatro horas de cada día típico de cada mes, dependiendo de la discretización temporal adoptada por el usuario.

Para poner de manifiesto como el grado de deterioro de la carretera afecta dinámicamente la respuesta de los vehículos provocando un mayor efecto destructivo de los mismos, se declara el factor de agresividad dinámica. Este factor dependerá del tipo de suspensión de los vehículos y mayora el número de ejes equivalentes asociando esta agresividad con el nivel de rugosidad del camino expresado en unidades del Índice Internacional de Rugosidad "IRI".

En referencia al clima, la cantidad de datos requeridos depende, al igual que el tránsito, de la opción de discretización temporal seleccionada dentro del año, mensual o diaria. Se diferencian los datos de temperatura, que afectan a las capas de materiales asfálticos y los datos estacionales concebidos para representar por ejemplo, las variaciones del contenido de humedad en los suelos y materiales granulares.

Las temperaturas del pavimento (cada cuatro horas, de cada día típico de cada mes, cada 5 centímetros de profundidad) pueden ser importadas desde archivos de clima generados desde el programa de simulación de clima "Tempe", sobre la base de los datos de la zona como temperatura ambiente, radiación solar, velocidad del viento y características de los materiales en general. Las ubicaciones del conjunto de archivos climáticos preexistentes, se brindan georeferenciadas en un archivo tipo kmz facilitando la selección de datos climáticos para una dada ruta, mediante la visualización de estas ubicaciones.

Los factores estacionales aplicables a todos los tipos de capas, pueden expresarse mensualmente y en forma diferenciada para cada una de las capas. Estos factores multiplican a los módulos de trabajo, de cada capa, luego de todas las consideraciones particulares del tipo de material.

## **DETERIOROS DE SUPERFICIE**

La versión actual del modelo permite obtener las variaciones del ahuellamiento, el porcentaje de fisuras, el porcentaje de Baches y la rugosidad a lo largo del período de análisis.

El ahuellamiento es valorado integrando la deformación específica plástica de los diferentes puntos de la estructura a lo largo de las capas y de los períodos temporales.

Para el porcentaje de fisuras se plantea un submodelo empírico que lo calcula a partir del daño en la superficie y análogamente se procede en relación al porcentaje de baches.

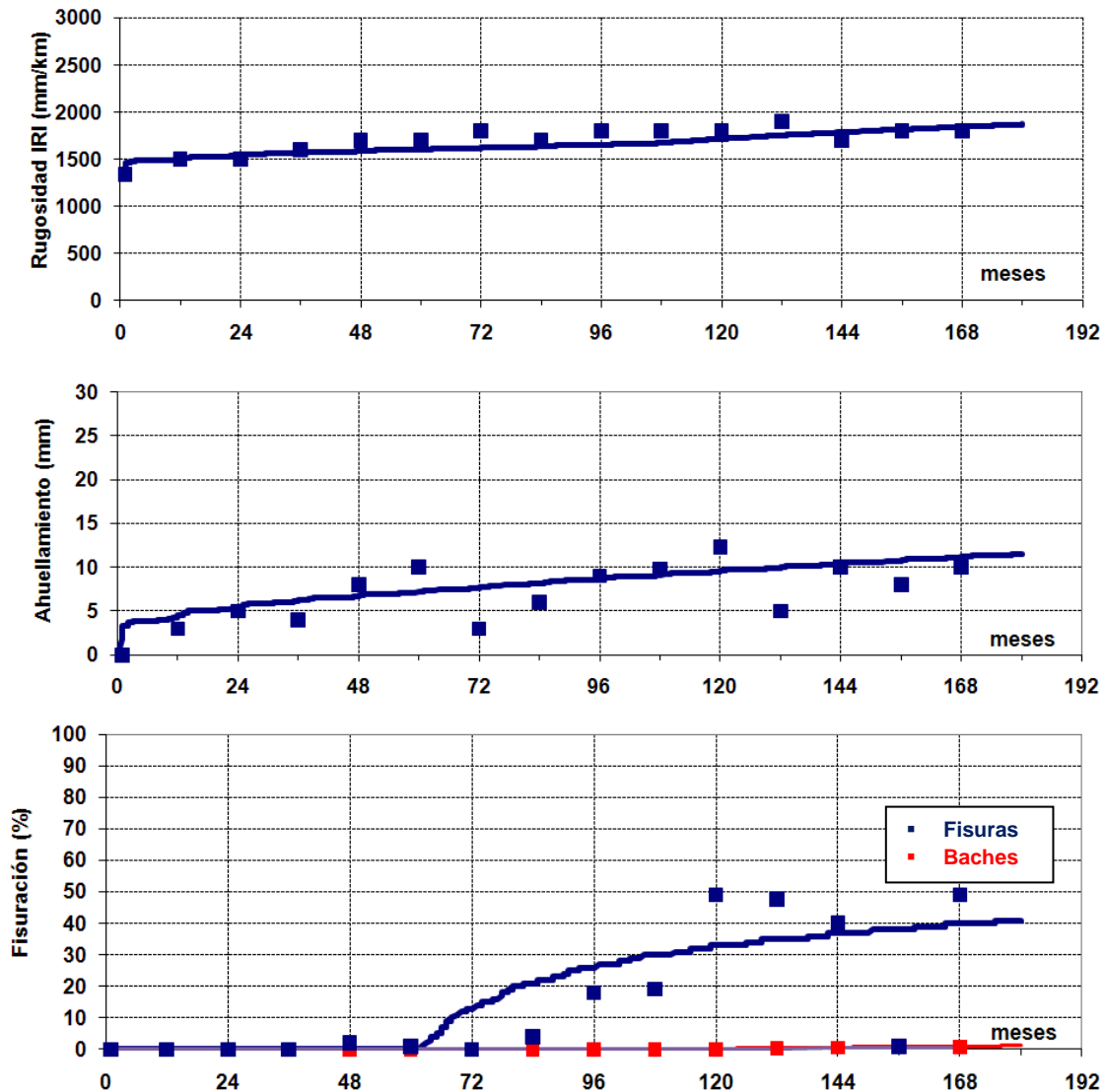
Para obtener la rugosidad el submodelo correspondiente plantea, a partir del valor de IRI inicial, una la variación obtenida como la suma de un incremento anual fijo más otro función de la variación de los otros deterioros (en particular ahuellamiento y baches).

Es posible simular la realización de acciones de mejora y colocación de nuevas capas estructurales luego del inicio del análisis, esto se logra indicando la edad en la que esta acción se realizará y sus características. En la versión actual del modelo es posible la incorporación de cualquier tipo de capa en superficie, y también la acción de fresado, que implica la eliminación de un espesor a declarar, pudiendo representarse reciclados parciales y reconstrucciones.

## **PRIMERA CALIBRACIÓN**

Los criterios de falla obtenidos en ensayos de laboratorio no pueden ser directamente aplicables en los modelos mecanicistas, requiriéndose un proceso de calibración. Esto es consecuencia entre otros aspectos del conjunto de simplificaciones que se realizan en el modelo apartándolo de la realidad, y de las diferencias en los estados de tensiones entre los ensayos de caracterización e insitu (Giovanon e Pagola, 2012).





**Figura 5. Comportamiento de superficie con parámetros ajustados para el tramo T10**

Los datos disponibles para la primera calibración del modelo de comportamiento corresponden a un conjunto de rutas en servicio Nacionales y Provinciales de las que se cuenta con información de sus capas estructurales, deflectometría, tránsito y comportamiento. Esta adopción tiene como beneficio que las técnicas constructivas, la valoración del tránsito y en general las evaluaciones; resultan similares a las que se aplicarán posteriormente en el diseño o constatación de vidas útiles. En contraposición se dispone de menor cantidad de ensayos sobre los materiales y en general presentan mayores dispersiones, particularmente las asociadas a la agresividad del tránsito y a las evaluaciones de estado.

La Figura 5 muestra las gráficas correspondientes a los parámetros de estado de la superficie generadas por BackViDe luego de haber realizado el ajuste de los submodelos, en el tramo T10, observándose una adecuada correspondencia entre los valores medidos (indicados con puntos) y las estimaciones (graficadas con trazo continuo).

Se evidencia en estas gráficas la dispersión de los datos de campo originada por corresponder estos tramos a rutas en servicio donde no se tuvo especial cuidado al efectuar las evaluaciones de estado. En particular el ahuellamiento y la fisuración se determinaron visualmente mediante un muestreo de 20 m/Km.

Pese a disponer por el momento de sólo once tramos, se plantea el análisis de confiabilidad sobre los parámetros de Ahuellamiento y Fisuración en base a la hipótesis que el logaritmo del error del número de reiteraciones presenta una distribución normal. Esto permite optar por una confiabilidad de la prognosis, función de la desviación estándar del logaritmo del error de estimación.

Se obtuvo una desviación estándar en fisuración de 0.17 y en ahuellamiento 0.39 (motivado por la existencia de discrepancias marcadas en los tramos T06 y T08). Como referencia para valorar la magnitud de estas desviaciones se recuerda que el modelo de la metodología empírica AASHTO 1993, presenta una desviación del indicador global PSI de 0.35, en relación a su experiencia origen donde fueron ensayados todos los materiales y pesados todos vehículos que circularon; recomendando valores entre 0.40 y 0.50 para su aplicación en pavimentos de la red Vial.

La comparación con estos valores recomendados, permite expresar como satisfactoria la aproximación obtenida por el Modelo desarrollado.

## **CONCLUSIONES**

Se dispone de un Modelo mecanicista empírico capaz de predecir el Comportamiento en Servicio de los Pavimentos Flexibles, este Modelo cuenta con una importante herramienta para el retroajuste modular en base a mediciones de campo y/o de laboratorio.

Se incorpora a este Modelo la opción de realizar el análisis de comportamiento con las metodologías mecanicistas clásicas, en base a condiciones estructurales iniciales.

El Modelo desarrollado es apto para valorar el comportamiento de una estructura vial (evolución de los parámetros de estado en superficie en el tiempo) en base al análisis de los esfuerzos introducidos por las cargas del tránsito y del clima.

Mediante la simulación de los fenómenos de fisuración por fatiga bajo carga, acumulación de deformaciones plásticas en los distintos materiales y fallas por fisuración térmica, se arriba a expresar el comportamiento de la estructura analizada en función de los parámetros de superficie que valoran la aptitud de la misma para brindar una adecuada calidad a los usuarios, rugosidad, porcentaje de fisuras, porcentaje de baches y ahuellamiento.

En el análisis incremental, se realizan innovaciones al poner de manifiesto las diferentes etapas de progreso de fisuras dentro de la estructura, como así también el deterioro modular debido a los procesos de fatiga.

Se propicia, a partir de los logros alcanzados, continuar con la calibración del Modelo en diferentes tramos de manera de ajustar las dispersiones de predicción calculadas. Se plantea también el objetivo futuro de vincular los resultados de ensayos de caracterización de los materiales en laboratorio con las distintas constantes de los submodelos, quedando así las constantes de calibración de los submodelos como parámetros regionales independientes del material utilizado.

## BIBLIOGRAFÍA

- Angelone S., Martínez F., Cauhape M., Balestrini G. 2009. *Evaluación de modelos para la predicción del módulo resiliente de suelos de subrasante*. XV Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, Mar del Plata.
- Aussedat G. 1977. *Léssai de fluage dynamique dans la formation des enrobés et le dimensionnement des chaussées*. publicación especial V del Laboratorio Central de Puentes y Caminos de Francia.
- Giovanon O., Pagola M. 2007. *Hacia un Sistema Experto en el Diseño de Pavimentos*. 14º Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, La Habana, Cuba.
- Giovanon O., Pagola M. 2012. *Relevant aspects in failure criteria*. MAREPAV7 the seventh International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, Auckland - New Zealand.
- Martinez F, Angelone S. 2009. *Evaluation of different predictive dynamic modulus models of asphalt mixtures used in Argentina*. Eighth International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways, and Airfields, Illinois. EEUU.
- Martinez F., Angelone S. 2003. *Determination of fracture parameters of asphalt mixes by the repeated indirect tensile test*. 6Th International RILEM Symposium Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials, Zurich, Suiza.
- Rowe G., Sharrock M. 2011. *Alternate Shift Factor Relationship For Describing The Temperature Dependency Of The Visco-Elastic Behavior Of Asphalt Materials*. Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, DC.
- Walubita L., Alvarez A., Simate G. 2010. *Evaluating and comparing different methods and models for generating relaxation modulus master-curves for asphalt mixes*. Construction and Building Materials, Published by Elsevier Ltd.