

Modelo mecanicista empírico para pavimentos flexibles

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.

Palabras clave: modelo, comportamiento, diseño mecanicista

The paper presents a mechanistic empirical model for asphalt pavements developed at the Road Laboratory of the National University of Rosario, Argentina. There are presented the analysis possibilities of model, and a first calibration of the sub models. Some of model characteristics are:

- It has an expert system for back calculation analysis.
- It can simulate the evolution of pavement structure along service life considering traffic variations, climate and material behavior.
- The model can express pavement behavior in terms of surface characteristics: roughness, cracking percentage, potholes and rutting rate.
- It incorporates the option of use classic mechanistic analysis methodologies.

Keywords: model, behavior, mechanistic design

Oscar Giovanon, ogiovanon@hotmail.com
Marta Pagola, martapagola@hotmail.com

Laboratorio Vial IMAE, FCEIA, Universidad Nacional de Rosario

1. 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 constituyen 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.

Modelo mecanicista empírico para pavimentos flexibles

- 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.

Como consecuencia de estos aspectos, los planteamientos mecanicistas a nivel estructural presentan distintos grados de aproximación. Los diferentes enfoques pueden clasificarse en los siguientes grupos:

- Condiciones medias ponderadas.
- Consideración de periodos anuales en condiciones iniciales.
- 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, junto 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.

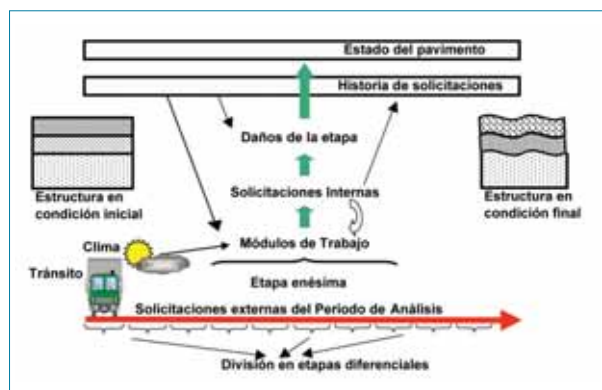


Figura 1. Esquema del Modelo de análisis incremental.

2. 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, dado que la mayoría de los usuarios están habituados a su uso y que, además, integra herramientas de programación propias.

Para la resolución de los algoritmos correspondientes, se optó por la realización de programas ejecutables desde una plataforma Fortran, dada la aptitud de ésta y que además se dispone de experiencias previas con esta herramienta. Existen tres programas externos desarrollados en Fortran, 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.

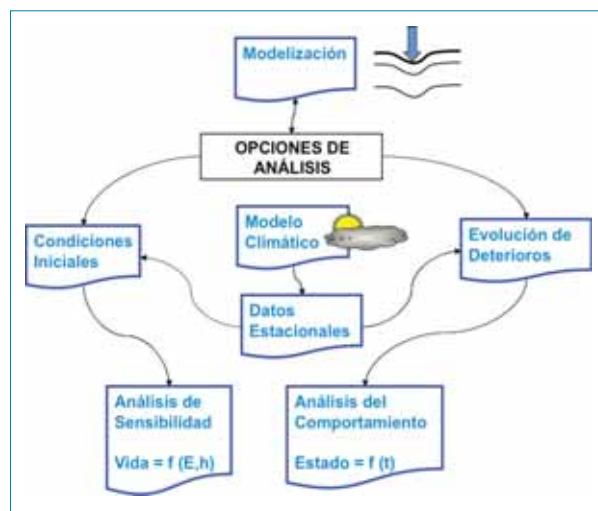


Figura 2. Esquema de BackViDe.

Tabla 1. Criterios de caracterización según el tipo de material.

Tipo de material	Rigidez		Falla por fatiga	
	Caracterización	Variación en el tiempo	Ahuellamiento	Fisuración
1 Asfáltico	Curva maestra	Daño, Curado, Envejecimiento	Si	Si
2 No ligado No Lineal	Modulo Resiliente	Períodos climáticos	Si	No
3 No ligado Lineal	Constante	Períodos climáticos	Si	No
4 Cementado	Constante	Daño, Curado, Envejecimiento	Si	Si

En la Figura 2 se muestra un esquema simplificado del Modelo desarrollado, indicando las principales interacciones. Pueden considerarse las siguientes opciones de análisis:

- Variación de los materiales con la historia de tensiones.
- Consideración de estacionalidades.
 - Mensual
 - Diaria
- Análisis de Fisuración Térmica.

3. 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 cuatro diferentes tipologías para los mismos, identificadas mediante la siguiente numeración:

1. Mezcla asfáltica.
2. No ligado lineal.
3. No ligado no lineal.
4. Cementado, con ligante hidráulico.

Dentro de BackViDe, este número precede a su nombre en los 32 materiales disponibles, para facilitar su reconocimiento por el usuario. En la Tabla 1 se resumen los criterios de caracterización según el tipo de material, criterios que se describen en los puntos siguientes de este capítulo, recordando para cada concepto a qué tipo de material se aplica.

3.1 Rigidez

Curva Maestra del Módulo Dinámico (Material Tipo 1)

La expresión Curva Maestra hace referencia a la generalización dentro de una curva expresada en condiciones de referencia de diferentes curvas asociadas a diversas condiciones de trabajo del material, en este caso las variables son frecuencia y temperatura respecto a las cuales expresar el valor del módulo. La curva maestra adoptada corresponde a una función sigmoideal, de la cual se disponen resultados de materiales locales (Martinez et al 2009).

Curva Maestra de Relajación (Material Tipo 1)

Para el cálculo de las sollicitaciones térmicas, provocadas por las variaciones de temperatura, el módulo de relajación de este material se expresa en función de su curva maestra de relajación. En esta oportunidad, el término curva maestra se refiere a la adopción de -20 °C como temperatura de referencia y la definición de las correspondencias para obtener las equivalencias a otras temperaturas.

El comportamiento a la temperatura de referencia se define mediante un modelo de relajación generalizado de Maxwell de cinco elementos, dados por su módulo y tiempo de relajación a -20 °C y una expresión para el corrimiento por temperatura, que permite calcular un tiempo ficticio (tiempo reducido) para una temperatura distinta de la referencia y utilizar el modelo de relajación dado.

Existen diferentes expresiones para el cálculo del coeficiente de corrimiento, dadas por diferentes estudios Arrhe-

Modelo mecanicista empírico para pavimentos flexibles

nus, Williams-Landel-Ferry y polinómicas (Walubita et al 2010) (Rowe et al 2011). Entre ellas, se optó por una función polinómica de segundo grado para representar su logaritmo por debajo de 0 °C, continuando con la tangente de esta curva para temperaturas superiores.

Procediendo en el análisis incremental, la variación de la deformación específica se obtiene a partir de la variación de temperatura dada por el modelo climático y del coeficiente de contracción térmica de la mezcla asfáltica, llegándose por medio del modelo de relajación al cálculo de las tensiones en el tiempo.

Módulo Resiliente (Material Tipo 2)

Se caracteriza la rigidez del material mediante la ecuación de su módulo resiliente (módulo en función del nivel de tensiones alcanzado), permitiendo esta opción representar el comportamiento no lineal de los suelos y materiales granulares no cementados. La ecuación del módulo resiliente puede ser obtenida de ensayos triaxiales dinámicos, utilizándose para su realización la norma AASHTO T-294-92.

Existen diferentes opciones para la formulación de la ecuación de módulo resiliente. Se optó, entre ellas, por la que la expresa en función del primer invariante de tensiones y del esfuerzo de corte octaédrico, que representan, respectivamente, el confinamiento y la importancia de los esfuerzos de cortes, disponiéndose de experiencia local (Angelone et al 2009).

3.2 Variaciones de la rigidez

Para poner de manifiesto otros aspectos que condicionan la rigidez de los materiales, y que se relacionan al paso del tiempo o al deterioro producido por la acción de las cargas, se adicionan en el Modelo los criterios de curado, envejecimiento, daño y estacionalidad.

Curado y envejecimiento (materiales Tipo 1 y 4)

En particular, estos criterios fueron concebidos para representar aspectos como:

- Curado de las emulsiones asfálticas (maduración que acontece en los primeros meses de colocación).

- Envejecimiento de las capas de rodamiento asfálticas por acción del clima.
- Endurecimiento de las capas con ligante hidráulico

Si bien su planteo inicial fue en forma separada, en la práctica, las expresiones de curado y envejecimiento pueden ser utilizadas conjuntamente para representar los aspectos indicados u otro a plantear por el usuario.

Respecto al proceso de curado, se manifiesta mediante la adopción de una relación modular inicial y un período para alcanzar el valor final. Se plantea que el valor del módulo es un porcentaje que varía en el tiempo hasta alcanzar el valor unitario (100%) al cabo de un número de meses, se adoptó un factor parabólico que se aplica sólo si el eje tiempo es menor al periodo de maduración establecido.

Para poner de manifiesto fenómenos como el de envejecimiento a lo largo de la vida útil, se plantea una variación relativa del módulo por unidad de tiempo.

Daño (Materiales Tipo 1 y 4)

Los materiales ligados degradan su rigidez con la acción reiterada de las cargas. Para representar este proceso de deterioro por fatiga de los materiales se plantea una función, para cada material, que disminuye el valor del módulo con el daño medio por fisuración acumulado en la capa.

Para modelar esta caída modular en función del daño, se utilizó una función sigmoideal, planteada entre el valor del material en su condición de integridad (Daño nulo) y un valor del módulo mínimo para su condición de máximo deterioro.

Estacionalidad

Para representar procesos asociados a períodos estacionales, diferentes de las variaciones térmicas y que afectan la rigidez de los materiales, como ser el contenido de humedad en los suelos, se asocia a cada mes del año y cada capa un nuevo factor, que multiplica al módulo de la capa, independientemente de su tipo. Definido por defecto en el valor unitario, anulando su efecto, debiendo ser modificado por el usuario si desea representar estas variaciones.

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 Figu-

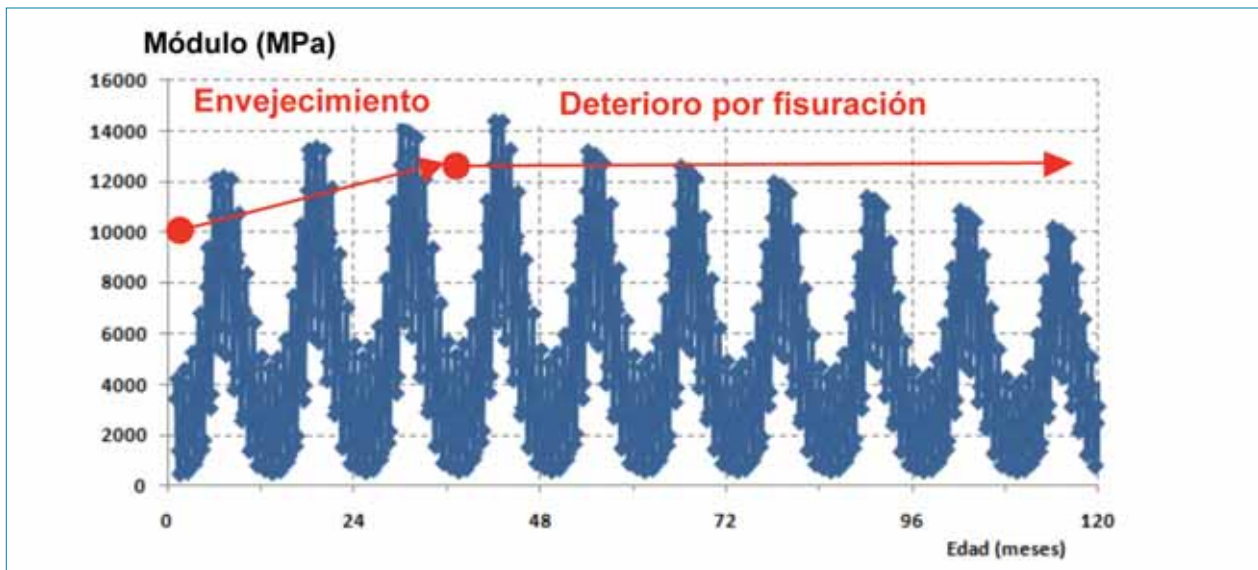


Figura 3. Módulo de una carpeta de rodamiento en función del tiempo.

ra 3 la variación del módulo de una carpeta de rodamiento 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.

3.3 Resistencia a la fatiga

Entendiendo 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 previas, se requiere, en ambos procesos de fatiga, considerar la historia de tensiones. Esta historia se resume en un parámetro particular para cada proceso.

Resistencia a la fisuración (Materiales Tipo 1 y 4)

En este proceso, el parámetro que resume la historia de sollicitaciones 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 un modelo en la condición inicial, pero sí difiere en el criterio asociado al número de reiteraciones admisibles.

$$D_n = \sum_{i=1}^n \frac{F_s N_i}{N_{iadm}}$$

donde

D_n : daño acumulado del material hasta el período n

N_i : número de reiteraciones del esfuerzo en el período i

N_{iadm} : número de reiteraciones admisibles del esfuerzo en el período i

F_s : factor de seguridad

$$F_s = 10^{t^c s}$$

t^c : parámetros de la distribución normal, asociado a una dada confiabilidad

S : desviación estándar del error del logaritmo del número de reiteraciones predicho para fisuración

El número de reiteraciones admisibles que provoca un daño acumulado unitario se asocia aquí al inicio de la fisura en el punto donde este daño es calculado. En el cálculo de los esfuerzos de cada período, se obtienen en cada interfaz los diferentes esfuerzos, realizando en análisis de daños acumulados en cada uno de ellos para determinar el punto de inicio de fisuras, ya sea desde la parte inferior o superior de la capa.

El número de reiteraciones admisible se obtiene con diferentes expresiones, dependiendo del tipo de material ligado. Se indican a continuación las ecuaciones asociadas a cada uno de ellos.

Modelo mecanicista empírico para pavimentos flexibles

Material asfáltico:

$$N_{iadm} = \left(\frac{E_f}{3000} \right)^{c_{f2}} \left(\frac{A_{CT} \varepsilon}{\varepsilon_6 F_{TD} A} 10 \right)^{c_{f1}}$$

donde

N_{iadm} : millones de reiteraciones requeridas para el inicio de fisuras en la condición del período i

ε : máxima deformación específica de elongación (str)

E_f : módulo del período (MPa)

F_{TD} : factor aplicable sólo a fisuras iniciando desde la superficie (Top Down)

A_{CT} : factor asociado a concentración de tensiones

A : porcentaje de asfalto en volumen (%)

ε_6 C_{f1} C_{f2} : parámetros que caracterizan al material

Material cementado:

$$N_{iadm} = 10^{\left(1 - \frac{A_{CT} \sigma}{\sigma_6}\right) c_{f1}}$$

donde

σ : máxima tensión de tracción (MPa)

σ_6 C_{f1} : parámetros que caracterizan al material

El factor A_{CT} está asociado a la concentración de tensiones, dada por el estado y modo de fisuración del material de la capa adjunta. Se aplica sólo si la capa adjunta, en esa interfaz, se encuentra fisurada y con un mayor daño al punto en análisis, adoptando en caso contrario un valor unitario.

$$A_{CT} = F_{CT} + \frac{D_D}{F_{CI}}$$

donde

F_{CT} : parámetros que caracterizan el modo de fisuración del material de la capa adjunta, próximo a uno en materiales que se microfisuran y por lo tanto con reducido efecto de concentración de tensiones

D_D : diferencia de daños en la interface

F_{CI} : factor que minora la concentración de tensiones dada por la diferencia de daños, constituye un parámetro de calibración del Modelo

En este Modelo incremental se ponen de manifiesto, y por lo tanto, se debe modelizar una serie de procesos hasta arribar a la presencia en la superficie de la estructura de un porcentaje de fisuras. El daño unitario se corresponde con el inicio de la fisura y no a una condición de deterioro de la superficie, como en otros modelos iniciales o incrementales.

Este planteo, conceptualmente más correcto, 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 gravedad del estado de fisuración. En el modelo pueden diferenciarse cuatro etapas de fisuración. En la Figura 4 se esquematizan las etapas de la fisuración, si estas evolucionan de abajo hacia arriba.

- Etapa 1. Estructura sin fisuras (daño menor que la unidad en todo punto, análisis 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 et al 2003), que representa adecuadamente a los materiales sólo cuando estos se com-

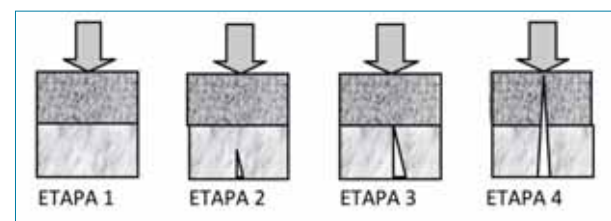


Figura 4. Etapas del deterioro fisuración.

portan 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.

Por ello, 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.

$$Lf_i = Lf_{i-1} + C_{PF} \Delta D_i$$

donde

Lf_i : longitud de fisuras del período i (mm)

Lf_{i-1} : longitud de fisuras del período anterior (mm)

ΔD_i : daño acumulado del material en el período i

C_{PF} : parámetro que caracteriza al material, velocidad de progreso de fisuras en milímetros por unidad de daño (mm)

Resistencia a las deformaciones plásticas

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 (Aussedat 1977), expresando el valor de la deformación plástica en función del número de ciclos, según la siguiente expresión:

$$\log \epsilon_p = C_{A1} + C_{A2} \epsilon_e + C_{A3} \log \epsilon_e + C_{A4} \log F_S N + C_{A5} \epsilon_e \log F_S N + C_{A6} (T + 273)$$

donde

ϵ_p : deformación específica plástica (μstr)

ϵ_e : deformación específica elástica (μstr)

N : número de reiteraciones de ϵ_e

T : temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

F_S : factor de seguridad

C_{Ai} : parámetros que caracterizan al material

$$F_S = 10^{t^c} S$$

donde

t^c : parámetros de la distribución normal asociado a una dada confiabilidad

S : desviación estándar del error del logaritmo del número de reiteraciones predicho para ahuellamiento

Se adoptó a la deformación específica plástica acumulada como el parámetro que representa la historia de tensiones de cada punto.

4. 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.

4.1 Tránsito

Eje de referencia

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, que puede ser definido por el usuario para representar casos particulares, como se ejemplifica en la Figura 5 en su utilización en una terminal portuaria. El número de reiteraciones utilizado en los criterios de falla para calcular los daños producidos en cada período se corresponderá entonces con las reiteraciones del eje de referencia declarado.

Distribución temporal

El dato tránsito se introduce mediante el número de reiteraciones en cada uno de los años, y la distribución del tránsito anual en correspondencia con la discretización temporal realizada; esto se logra declarando la fracción del valor anual para cada período. Estos períodos serán cada uno de doce meses, o cada período de cuatro horas de cada día típico de cada mes, según la discretización temporal adoptada por el usuario.

Efecto dinámico

Para poner de manifiesto cómo el grado de deterioro de la carretera afecta dinámicamente la carga aplicada por los

Modelo mecanicista empírico para pavimentos flexibles

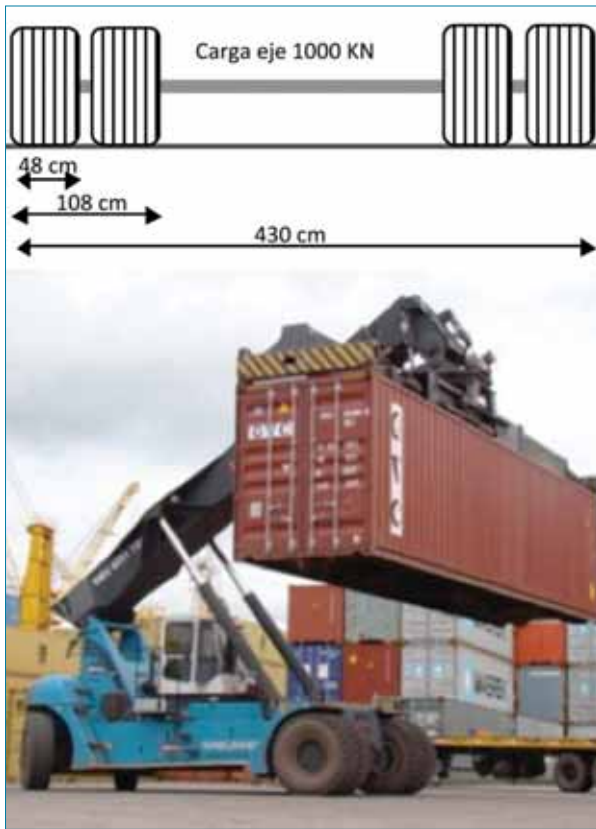


Figura 5. Adopción del eje de referencia para un caso particular.

vehículos, se declara anualmente el factor de agresividad dinámica.

Este factor considera el tipo de suspensión de los vehículos y da en mayor porción el número de ejes equivalentes, asociando esta agresividad con el nivel de rugosidad del camino, expresado en unidades del Índice Internacional de Rugosidad (IRI). La expresión utilizada es la siguiente:

$$N_i = N_{ei} + (1 + F_{di} R_i^2)$$

donde

N_i : número de reiteraciones del eje de referencia considerando el efecto dinámico para el período i

N_{ei} : número de reiteraciones del eje de referencia declarado como dato para el período i , obtenido como el valor anual multiplicado por el factor de distribución del período

F_{di} : factor dinámico que caracteriza el tipo de suspensión del tránsito pesado en el período i

R_i : rugosidad IRI de la calzada en el período i (mm/km)

4.2 Clima

La cantidad de datos climáticos requeridos es variable. Dependiendo 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 Tipo 1.
- Los datos estacionales concebidos para representar las variaciones del contenido de humedad en los suelos y materiales granulares, capas de materiales Tipo 2 y 3.

En forma similar al tránsito, la temperatura puede ser representada como una media anual, mensual o cada cuatro horas de cada día típico de cada mes, completando aquí con valores cada cinco centímetros de profundidad. Estos valores pueden ser cargados por el usuario, recomendándose su importación desde un archivo de clima.

Los archivos de clima son generados desde el programa de simulación de clima 'Tempe' (complementario del Modelo) sobre la base de los datos de la zona: temperatura ambiente, radiación solar, velocidad del viento y características de los materiales en general.

Las ubicaciones del conjunto de archivos climáticos pre-existentes se brindan georeferenciadas, facilitando la selección de datos climáticos para una dada ruta mediante su visualización en un programa adecuado como ser Google Earth. Los factores estacionales fueron descritos en el punto 3.2.

5. Deterioros de superficie

El análisis mecanicista permite el cálculo de las tensiones y deformaciones elásticas en diferentes puntos de la estructura. Vinculando éstos con los criterios de falla, es posible obtener las deformaciones plásticas y los daños por fatiga a lo largo de la vida en servicio. Luego, a partir de estos resultados, se obtienen los diferentes deterioros de la superficie.

La versión actual del Modelo permite obtener los siguientes deterioros de superficie:

- Ahuellamiento.
- Porcentaje de fisuras.
- Porcentaje de baches.

- Rugosidad.
- Índice de estado (indicador global función de los deterioros precedentes).

5.1 Ahuellamiento

Una vez obtenida la deformación específica plástica de los diferentes puntos de la estructura, ésta se integra a lo largo de la estructura y de los períodos temporales, obteniendo así la estimación del ahuellamiento.

$$\Delta h_n = \int_{t_0}^t \int_0^{h_e} \epsilon_p dh dt - \Delta_{Ah}$$

donde

ϵ_p : deformación específica plástica

dh : diferencial altura

h_e : espesor de la estructura, incluida la subrasante

dt : diferencial de tiempo

Δ_{Ah} : variación del ahuellamiento dada por las acciones externas

Para considerar la subrasante se realizó un análisis sobre diferentes estructuras, determinando el valor del espesor ficticio del semi infinito, para el cual, supuestos constantes los esfuerzos a nivel de su punto superior, provoca el mismo ahuellamiento que el obtenido considerando su variación en profundidad, adoptándose el valor medio obtenido de 400 milímetros.

Si se considera un comportamiento no lineal (tipo 2), el programa genera en la subrasante tres subcapas adicionales de 200, 300 y 400 milímetros de espesor para considerar la variación de módulos y solicitaciones en profundidad.

5.2 Fisuración

El análisis descrito en el punto 3.3 permite llegar hasta el valor del daño en la superficie, correspondiendo el daño unitario a la aparición de la primer fisura. Se requiere, entonces, la aplicación de ecuaciones empíricas que vinculen el daño presente en superficie, superior a la unidad, con el porcentaje de fisuras.

Las ecuaciones adoptadas son:

$$\begin{aligned} Fis &= Fis_{Tra} + Fis_{Ter} \leq 100 \\ Fis_{Tra} &= C_F (D_{IT} - 1)^{C_{Fe}} \\ Fis_{Ter} &= C_{FT} (D_{ITer} - 1)^{C_{FTe}} \end{aligned}$$

donde

Fis : porcentaje total de fisuras

Fis_{Tra} : porcentaje de fisuras por acción del tránsito

Fis_{Ter} : porcentaje de fisuras térmicas

D_{IT} : daño en superficie para el período por tránsito

D_{ITer} : daño en superficie para el período por efecto térmico

$C_F, C_{Fe}, C_{FT}, C_{FTe}$: parámetros de calibración del Modelo

Si se declaran fisuras preexistentes, BacViDe calculará el daño asociado existente en la capa de superficie, despejándolo de las ecuaciones previas.

5.3 Baches

Para representar los baches se plantea, en el submodelo de baches, que éstos inician luego de un determinado porcentaje de fisuras totales, y progresan en función de la variación del daño acumulado en superficie.

La ecuación adoptada es la siguiente:

$$Bach_i = Bach_{i-1} + C_B (D_i - D_{i-1})^{C_{Be}} \quad \text{si } Fis > C_{Bi}$$

donde

$Bach_i$: porcentaje de baches para el período i

C_{Bi} : porcentaje de fisuras para el inicio de baches, parámetro del submodelo

C_B, C_{Be} : parámetros de calibración del Modelo

5.4 Rugosidad

El submodelo de rugosidad plantea que, a partir del valor de la obra inicial o tarea mayor de rehabilitación, la variación del IRI es la suma de un incremento anual fijo, más otro función de la variación de los otros deterioros (en particular ahuellamiento y baches). La ecuación adoptada es la siguiente:

$$IRI_i = IRI_{i-1} + \frac{C_{Ra}}{nper} + C_{RH} \Delta_{Ah} + C_{RB} \Delta_{Bach}$$

Modelo mecanicista empírico para pavimentos flexibles

donde

IRI_i : rugosidad del período i (mm/Km)

ΔAh_i : variación del ahuellamiento en el período (mm)

ΔB_{ach} : variación del porcentaje de baches en el período (%)

n_{per} : número de períodos en el año

CR_a, CR_H, CR_B : parámetros de calibración del Modelo

6. Acciones de mejora

Es posible simular la realización de acciones de mejora 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 se considera la opción Fresado, que implica la eliminación de un espesor a declarar.

La tarea Fresado puede ser utilizada para representar diferentes acciones que impliquen la eliminación de un determinado espesor desde la superficie, como ser, borrado de huella, reciclado, reconstrucción. Por ejemplo, el Fresado de 10 mm, cuando existe un ahuellamiento de 13 mm, implica que la estructura quedará con 3 mm de ahuellamiento, con la rugosidad declarada en la tarea fresado y sin disminución de las fisuras existentes. Si el espesor de fresado es mayor que el de la capa de superficie, ésta o el conjunto de capas asociadas al espesor son eliminadas, pudiendo representarse reciclados parciales y reconstrucciones, al agregar sobre esta tarea las capas correspondientes.

Si la acción que se va a realizar es agregar una capa de un nuevo material de refuerzo, la rugosidad inicial será la declarada para esa capa, las fisuras y baches en superficie serán cero y el ahuellamiento será el veinte por ciento del existente, a menos que se elimine previamente por fresado.

7. Retroajuste modular

La modelización estructural de un pavimento existente se basa en la caracterización de sus materiales y suele complementarse con la medición deflectométrica, posibilitando esta práctica la realización del retroajuste modular.

La técnica del retroajuste modular consiste en lograr un modelo mecanicista de la estructura auscultada, que presente valores deflectométricos similares a los evaluados en cam-

po, logrando de esta forma, en su posterior uso dentro del modelo de deterioro, una más ajustada predicción del comportamiento esperado.

Habitualmente, esta metodología es aplicada basándose en mediciones con deflectógrafos a impacto FWD. En BackViDe existe, además, la posibilidad de utilizar resultados obtenidos con regla Benkelman simple o múltiple, deflectógrafos La-croix u otra metodología de medición de deflexiones absolutas.

Reconociendo la necesidad de una cierta experiencia para la realización de los procesos de retroajuste modular, se trabajó especialmente en este aspecto de BackViDe para dotarlo de características correspondientes a un Sistema Experto (Giovanon et al 2007).

8. Primera calibración

La determinación de los criterios de falla, o la calibración de estos a partir de tendencias obtenidas en laboratorio, se realiza sobre la base del comportamiento de estructuras a escala real. Este procedimiento se realizó históricamente en base a los resultados del ensayo AASHTO de los años cincuenta, y continúa en la actualidad realizándose a partir del seguimiento de tramos de ruta en servicio, en pistas de ensayo especialmente diseñadas para tal fin o mediante equipos simuladores de tránsito.

En la Figura 6 se esquematiza el proceso de calibración de los diferentes submodelos, poniendo de manifiesto los diferentes aspectos involucrados, que condicionarán los resultados de los mismos (Giovanon et al 2012).

8.1 Calibración del Modelo

Los datos disponibles para la primera calibración de los submodelos 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. Se reconoce la importancia de contar con datos confiables para la realización del ajuste/calibración de los distintos submodelos.

El uso de datos de rutas en servicio 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

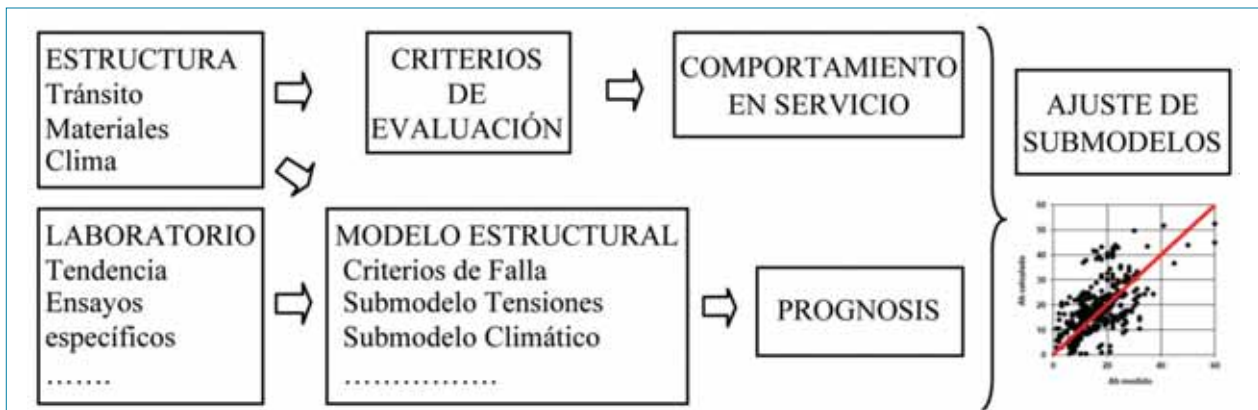


Figura 6. Esquema del proceso de ajuste de criterios/modelos.

dispersiones, particularmente las asociadas a la agresividad del tránsito y a las evaluaciones de estado.

Los once tramos utilizados corresponden en su mayoría a tramos homogéneos de la Red Vial Nacional, incorporando cuatro tramos de Redes Provinciales. Presentan espesores asfálticos entre 12 y 37 cm y tránsitos entre 0,14 y 0,61 10⁶ ejes equivalentes de 80 kN por carril.

La Figura 7 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 T11, observándose una adecuada correspondencia entre los valores medidos (indicados con puntos) y las estimaciones (graficadas con trazo continuo).

Se evidencia en estas gráficas, especialmente en el parámetro fisuración, la dispersión de los datos de campo, originada en que estos tramos corresponden a rutas en servicio donde no se tuvo especial cuidado al efectuar las evaluaciones de estado. En particular, la fisuración se determinó visualmente mediante un muestreo de 20 m/km.

8.2 Confiabilidad del Modelo

Este tema será motivo de una revisión continua, en la medida que se disponga de un mayor número de tramos para la realización del proceso de calibración de los valores por defecto, como así también se realicen mejoras en los criterios de modelización.

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 dis-

tribución 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.

9. 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.

Modelo mecanicista empírico para pavimentos flexibles

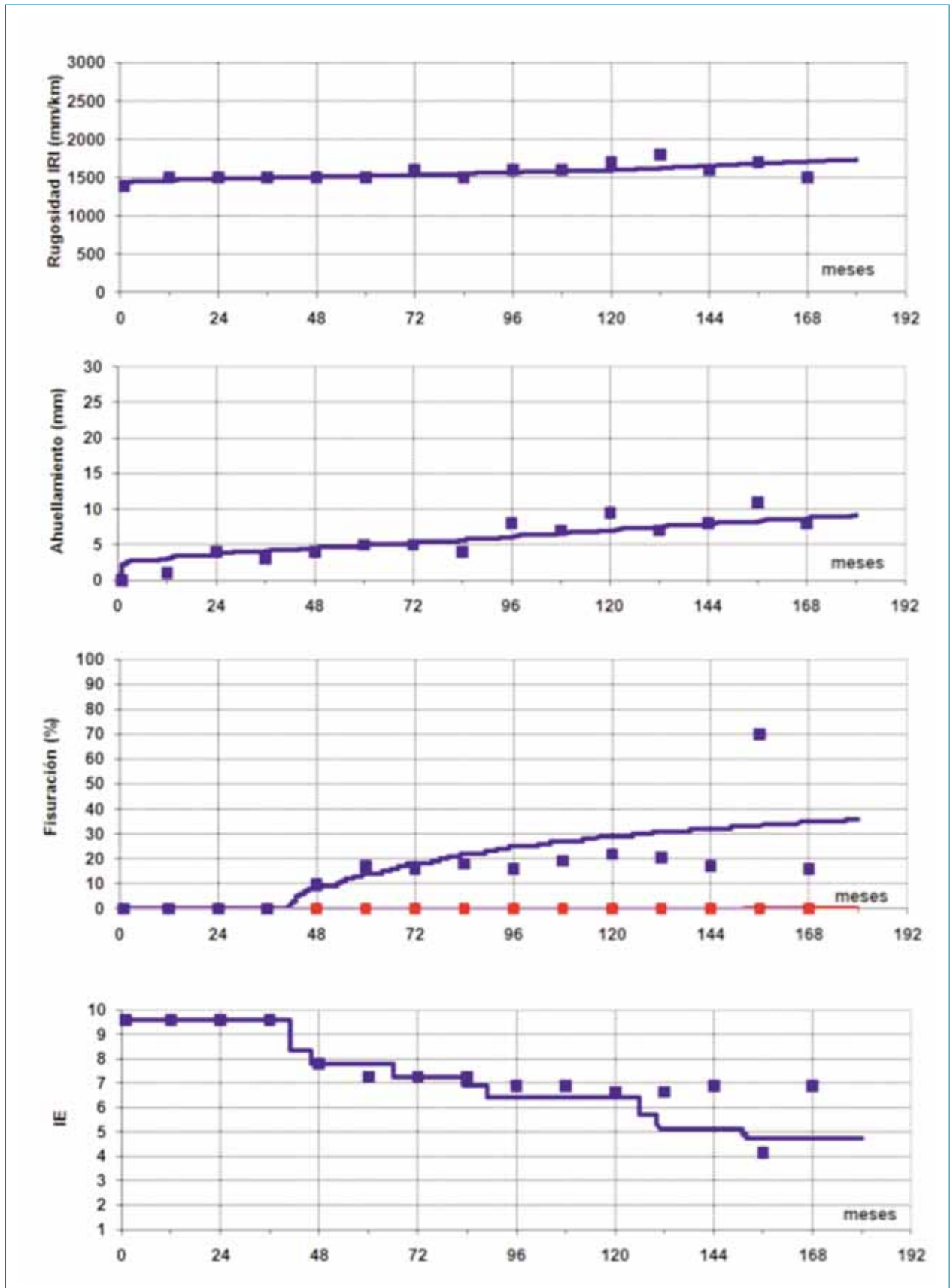


Figura 7. Comportamiento de superficie con parámetros ajustados para el tramo T11.

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 alcanza 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 la 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.

10. Bibliografía

- Angelone S., Martínez F. 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.
- 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.
- Martínez 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.