

METODOLOGIA RACIONAL DE ANALISIS APLICADA A LA EVALUACION DE PAVIMENTOS FLEXIBLES Y DISEÑO DE MEJORAS

Grupo de Investigación Laboratorio Vial IMAE:
Ings. Jorge TOSTICARELLI, Hugo PONCINO, Marta PAGOLA, Fernando
MARTINEZ, Oscar GIOVANON y Silvia ANGELONE

Berutti y Riobamba - 2000 Rosario - Argentina
Teléfono: 041-256010 / 256028 int. 36 Fax: 041-256207
Laboratorio Vial - Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE)
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Universidad Nacional de Rosario

RESUMEN:

El Laboratorio Vial del IMAE, en forma continua desde hace 20 años, ha llevado a cabo el desarrollo e implementación de diferentes técnicas experimentales, metodologías de evaluación y sistemas de procesamiento y análisis aplicables a la Ingeniería de Pavimentos.

Los mismos han constituido avances significativos en áreas tales como: evaluación estructural y funcional de pavimentos, caracterización de materiales en laboratorio y en campo, modelización estructural por técnicas de retroajuste y diseño de espesores por medios computacionales. Todos ellos han sido presentados al medio vial en distintas oportunidades y aunque en forma aislada, han conducido a un objetivo único de un esquema metodológico integral.

Una primera aproximación fue presentada en el trabajo "Contribución del Grupo de investigación de Rosario a la evaluación y refuerzo de pavimentos en Argentina. Período 1979-1989", realizada en el 2nd International Symposium on Pavement Evaluation and Overlay Design, Brasil, en el año 1989 (1).

El presente trabajo tiene por objeto mostrar las actualizaciones producidas en las distintas áreas desde esa oportunidad complementando un esquema integrado para ser aplicado al diseño estructural de las mejoras de los pavimentos.

1. INTRODUCCION

El problema de la evaluación y el diseño de mejoras de los pavimentos flexibles, ha merecido permanentemente la atención tanto de los organismos encargados de la construcción y el mantenimiento de los caminos como de los dedicados a la investigación básica y aplicada. La necesidad de disponer de un “método” práctico y sencillo, para un problema que es esencialmente complejo, ha determinado que en distintas épocas hayan existido, a veces contraponiéndose, planteos excesivamente simplificativos y con distinta base de sustentación. Por un lado los exclusivamente “empíricos” y por otro lado los exclusivamente “mecanicistas”.

En la actualidad ya no puede sostenerse seriamente que ambas tendencias puedan aisladamente resultar autosuficientes y es universalmente reconocida la necesidad de su complementación, pero dada la diversidad de técnicas que han surgido tanto en el terreno del conocimiento empírico a través del uso de moderno instrumental, como en el del conocimiento mecanicista a partir del desarrollo de la computación, es necesario definir con la mayor precisión posible el grado de esa complementación. En nuestra opinión es preferible no hablar de un “método” sino de una “metodología” para el estudio del problema y de su solución, que contemple con igual grado de importancia a cada uno de los parámetros fundamentales y que aplique el criterio ingenieril y el análisis de sensibilidad para la selección de la alternativa técnico-económica más conveniente.

En el presente trabajo se presenta el estado actual de la Metodología propuesta por el Grupo de Investigación del Laboratorio Vial del IMAE, la que comprende una serie de desarrollos y contribuciones de modernas técnicas introducidas al medio vial Argentino a lo largo de los últimos años.

2. NECESIDAD DE EVALUACION DE LOS PAVIMENTOS

El relevamiento periódico de la condición del pavimento, en forma ordenada y sistemática, es una tarea muy importante. Con la disponibilidad de dicha información es que puede conformarse la función de comportamiento de los distintos tramos de la ruta y pueden luego predecirse las tareas de mantenimiento necesarias en magnitud y momento. Dicho relevamiento es necesario hacerlo desde el inicio de la vida de la estructura, determinando así el nivel cero o punto de partida de la condición. El mismo periódico incluye la valoración de los deterioros de la superficie (rugosidad, ahuellamiento, fisuración, baches, desprendimientos, exudaciones) y de la respuesta frente a las sollicitaciones de la estructura en su conjunto (deflexiones), realizados con ensayos no destructivos y en lo posible con

equipos de alto rendimiento operacional. Este nivel de evaluación se realiza en lo posible para toda la red.

Ese conjunto de datos de relevamiento periódico es necesario archivarlos en forma ordenada y sistemática, en soporte informático, en una Base de Datos. En la misma es deseable guardar también información relacionada con la historia constructiva de la ruta (fechas y materiales), historia de los mantenimientos realizados, tránsito, etc. La base de datos centraliza toda la información básica como así también los modelos estructurales obtenidos del análisis de la misma; permitiendo el estudio de tendencias particulares o grupales.

El disponer de los datos brinda la posibilidad de utilizar herramientas de predicción futura de los deterioros o softwares de gestión del mantenimiento de los pavimentos tal como el HDM III, herramienta muy utilizada tanto a nivel red como a nivel tramo.

Cuando los indicadores de estado superficial alcanzan determinados niveles, se deben proyectar las correspondientes tareas de mantenimiento. Para ello es necesario realizar estudios particulares de la estructura del tramo a mejorar, siendo algunos de ellos de tipo puntual y destructivo (DCP, calicatas, módulos de los materiales).

El conocimiento de los parámetros indicativos de la respuesta estructural del pavimento es de fundamental importancia para poder evaluar la evolución de su comportamiento y realizar un diagnóstico objetivo de las causas que conducen a la aparición de determinado tipo de falla y definir las tareas correctivas que son necesarias aplicar para devolverle al pavimento las condiciones óptimas de utilización. De acuerdo con la metodología desarrollada los parámetros finales se resumen en el conocimiento de los espesores, los valores modulares efectivos (o sea formando parte de un sistema estratificado) de cada una de las capas componentes de la estructura, la condición de vinculación entre cada una de estas capas (condición de las interfaces) y los criterios de falla asociados a cada material. Inclusive los tratamientos estándar de la información como ser la interacción con otros Softwares pueden ser planteadas dentro de una aplicación de la base para simplificar las tareas y reducir los errores por carga de información.

Una vez realizados todos los estudios del tramo, llega el momento de definir cual es la acción de mantenimiento más adecuada y la magnitud de la misma. En esa etapa es que se realizan modelizaciones estructurales con

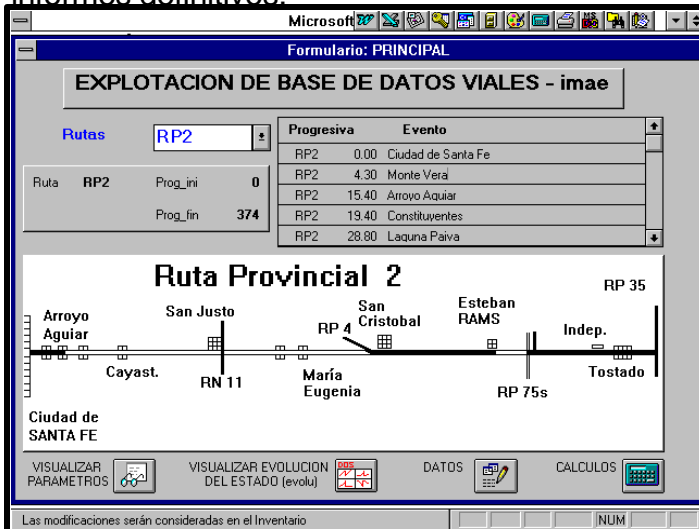
softwares de retroajuste modular para luego valorar las vidas útiles de las diferentes opciones de la mejora.

Las herramientas citadas son descriptas en mayor detalle en capítulos siguientes.

3. BASE DE DATOS

Una base de datos cumple con la especial finalidad de permitir preservar la información disponible, de forma tal que pueda ser consultada en forma ágil y logrando visualizar gráficamente las variables relevantes. Además debe permitir la generación automática de aquellos informes que resulten asiduamente consultados, siendo evidente la conveniencia de armarla con un soporte informático.

En general la estructura de la base de datos responde a las necesidades o fines con que se va a utilizar la misma. Debe estar preparada para una introducción sencilla de datos nuevos y disponer de procesamientos útiles y confiables. A los fines de su utilización en mantenimiento de pavimentos la misma debe contener al menos los siguientes aspectos: inventario, condición del pavimento, historia de la construcción - mantenimiento - rehabilitación, tránsito, y opcionalmente costos. El aprovechamiento de la base de datos debe permitir un procesamiento ágil de la información, produciendo salidas de tablas y gráficos listos para ser aprovechados como informes definitivos.



Entre los procesamientos más usuales se encuentran: definición de tramos homogéneos, cálculo de tránsitos equivalentes a partir del TMDA, evolución de los deterioros en el tiempo, deterioros anuales por progresivas, etc.

Figura 1. Pantalla principal de la aplicación de base de datos

El Laboratorio Vial del IMAE ha desarrollado una aplicación de base de datos (con las características citadas) en soporte Microsoft Access,

habiendo sido la misma concebida para su utilización en diseño y seguimiento de tramos de camino, y conteniendo datos de rutas nacionales y provinciales. Dentro de los usos actuales podemos citar el ajuste de los modelos de deterioro del HDM III y la definición de criterios de falla de pavimentos flexibles por criterios racionales.

4. EVALUACION SUPERFICIAL

En Argentina la evaluación superficial se realiza siguiendo los lineamientos indicados en el Instructivo de Evaluación de Pavimentos de la Dirección Nacional de Vialidad (2). En el mismo se plantea el relevamiento de los siguientes deterioros superficiales: rugosidad, ahuellamiento, fisuración, baches y desprendimientos calculando luego un indicador combinado, el Índice de Estado (IE). Este IE asume valores de 1 a 10, correspondiendo 10 al mejor estado de la superficie. La ecuación que se utiliza para su cálculo es:

$$IE = 10 \times e^{-(a1 \times D1 + a2 \times D2 + a3 \times D3 + a4 \times D4)}$$

donde: D1 a D4 grados de severidad de los distintos deterioros definidos en base a catálogo fotos y tablas
a1 a a4 coeficientes de peso que dependen del tipo de carpeta de rodamiento (mezcla asfáltica, tratamiento superficial y hormigón)

En los Pliegos que rigen las Concesiones se exigen no solo límites al Índice de Estado sino también a los parámetros individuales citados; las exigencias para calzadas de concreto asfáltico son: IE >6, Rugosidad < 2m/km (BPR a 30 km/h - 2.7 m/km IRI) (3), Ahuellamiento < 12 mm, Fisuración < 15% grado4, Desprendimientos y Baches ninguno, Exudación ninguna (no entra en el IE), Coef. de fricción > 0.40 (MuMeter a 60 km/h) (no entra en el IE).

Para la valoración de la rugosidad, el Laboratorio Vial del IMAE dispone del rugosímetro MAYS-JMF (4)(5), con el cual se realizan mediciones en rutas.



Figura 2. Rugosímetro MAYS-JMF

El rugosímetro MAYS-JMF es del tipo respuesta dinámica, o sea que sus mediciones son el resultado de las reales deformaciones de la calzada filtradas por un determinado sistema dinámico, estando el mismo calibrado respecto a IRI según normas ASTM E 1448-92.

El mismo consiste de un trailer de dos ruedas con suspensión independiente, con una lanza de gran longitud para aislarlo del vehículo tractor, en el que se encuentra montado el sistema sensor de los desplazamientos verticales en una de las ruedas. (Figura 2)

La adherencia neumático-calzada es un parámetro muy importante por su relación con la seguridad que brinda la superficie de rodamiento frente a solicitudes de frenado y curvas (6). Este parámetro depende de dos características intrínsecas de la superficie de rodamiento, la macrotextura y la microtextura.

Recientemente ha sido definido un Índice Internacional para evaluar la adherencia, IFI. Dicho Índice reúne las dos condiciones citadas, una medición de macrotextura (por ejemplo a partir de “parche de arena”) y una de fricción (con equipos de medición continua o con mediciones puntuales de Péndulo Inglés); el cual aún no se encuentra especificado bajo normas. Actualmente se desarrollan actividades tendientes a profundizar los estudios sobre la adherencia e incluir el MuMeter entre los equipos aptos para obtener el IFI. En el Laboratorio Vial del IMAE se dispone de los equipos para medición puntual citados, Péndulo Inglés y Parche de Arena, que se muestran en las Figuras 3 y 4 (7).

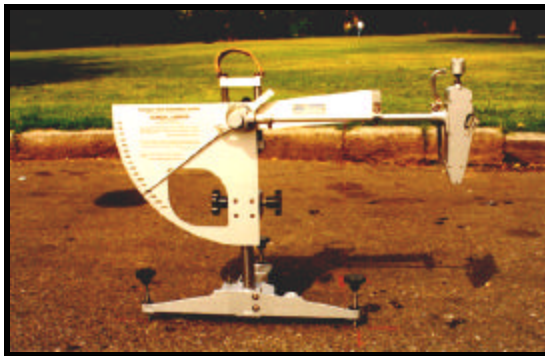


Figura 3. Péndulo de Fricción



Figura 4. Parche de Arena

La evaluación de los deterioros de la superficie de las calzadas pavimentadas se realiza fundamentalmente a nivel red a fin de posibilitar el análisis de la evolución de los deterioros en el tiempo y definir el momento adecuado de realización de las tareas de mantenimiento. Para ello resulta recomendable que los equipos y metodologías que se utilicen con este fin sean de gran rendimiento operacional.

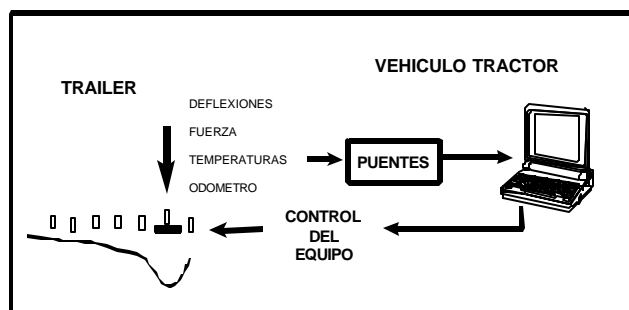
5. EVALUACION ESTRUCTURAL

La metodología de evaluación estructural ha ido variando con el tiempo en función de los continuos avances de la técnica y se requiere que los nuevos equipos de medición permitan la evaluación sistemática de los parámetros característicos del pavimento, que además posibilitem un gran rendimiento operacional y que su trabajo interfiera lo menos posible con el uso normal de la carretera.

La evaluación estructural del pavimento puede dividirse en dos aspectos o etapas: uno de ellos es el seguimiento periódico durante la vida en servicio, analizando la respuesta del paquete estructural frente a las cargas en su conjunto, midiendo Deflexiones, y mediante las fallas de superficie, otro es cuando ha llegado el momento de realizar una mejora, efectuando mediciones particulares incluyendo algunas destructivas de las distintas capas que forman la estructura, como ser: calicatas, DCP, ensayos de materiales y medición de espesores con georadar, de ser necesario.

5.1. Deflexiones

La técnica tradicional de medición de deflexiones es a través de la Regla Benkelman, técnica muy difundida en el ámbito vial. La misma utiliza un equipo de muy bajo costo pero también de bajo rendimiento operativo, por lo cual su uso queda limitado a estudios específicos a nivel proyecto y para seguimiento de obras de refuerzo o rehabilitación. Por otro lado, los deflectógrafos Lacroix adoptados por la D.N.V. efectúan un intensivo muestreo de la calzada con un buen rendimiento operacional, siendo aptos tanto a nivel red como para estudios particulares. Finalmente, los deflectógrafos a impacto (FWD)(8) son equipos de última generación que



cumplen con las características citadas (gran rendimiento operacional y con la menor interferencia posible al uso normal de la carretera).

Figura 5. Esquema de un FWD

En Argentina existe un deflectógrafo a impacto KUAB, el cual se utiliza para actividades de difusión tecnológica y asistencia técnica a través del Laboratorio Vial en el marco de un convenio vigente desde 1994.

Los mismos evalúan la capacidad estructural de la calzada a través de la medición de la deflexión de la superficie, bajo la acción de una carga de impacto, simultáneamente en el centro del área cargada y en varios puntos alejados de la misma. De esa forma se obtiene el cuenco de la deformada bajo una carga dinámica similar a la de un vehículo pesado. Los datos de esta deformada en superficie son luego utilizados por softwares de retroajuste modular para modelizar la estructura del pavimento y caracterizar las distintas capas componentes de la misma.

5.2. DCP

El Penetrómetro Dinámico de Cono (DCP)(9)(10) es un método no destructivo de ensayo capaz de medir la capacidad estructural in situ del pavimento y del suelo de fundación. El instrumento DCP mide la penetración dinámica por golpe, a través de las distintas capas componentes de un pavimento. Esta penetración es función de la resistencia al corte in situ de los materiales del paquete estructural.

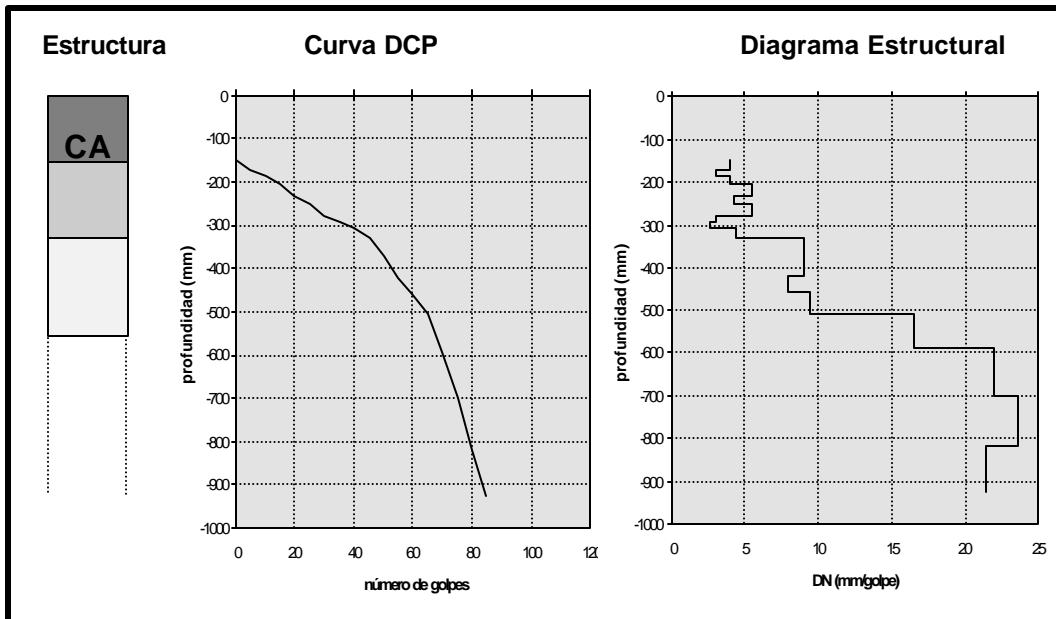


Figura 6. Ejemplo de Curva DCP y Diagrama Estructural

El perfil de resistencias en profundidad brinda por lo tanto una indicación de las propiedades, en el lugar, de los materiales de los diferentes estratos componentes en las condiciones reales en que estos se encuentran en el momento del ensayo. Estandarizados el equipo y la metodología de ensayo, el DCP puede utilizarse para: Campaña de reconocimiento rápido del

terreno, Evaluación de pavimentos existentes, Identificación de tramos homogéneos con características estructurales similares, Detección e identificación de anomalías en alguna o algunas de las capas una vez construidas, Seguimiento del comportamiento estructural del camino y análisis de la influencia de las solicitaciones (tránsito y clima), Verificación de la eficiencia de los equipos de compactación utilizados en obra, Control durante la construcción de las distintas capas que componen el paquete estructural.

La interpretación de los resultados del ensayo de campo puede ser abordada a través de gráficos como los que muestra la Figura 6. La **Curva DCP** consiste en una representación del progreso de la penetración del equipo a través de la estructura del pavimento en profundidad. La Figura 6 muestra un ejemplo de esta curva DCP, donde en las ordenadas se indican las profundidades hasta los 800 mm. y en las abscisas el número acumulado de golpes para alcanzar dichas profundidades. Mientras que el **Diagrama estructural** consiste en la representación del **Índice de penetración (DN)** en función de la profundidad de auscultación, donde DN es el número que define la penetración del penetrómetro a través de una capa específica medida en mm/golpe. En base a la interpretación de los gráficos Curva DCP y/o Diagrama estructural es posible deducir que cuando la pendiente de la curva DCP es constante, o bien el valor del Índice de penetración no varía con la profundidad significa una uniformidad de las propiedades del material, y su variación implica un cambio de las mismas.

Con el objeto de integrar la utilización del DCP con otros medios de evaluación estructural de pavimentos, tales como la ejecución de calicatas o la medición de deflexiones, en el Laboratorio Vial del IMAE se han establecido relaciones entre los resultados del DCP y otros parámetros de calificación de la capacidad resistente de los materiales tales como el Valor Soporte Relativo CBR ó el Módulo Resiliente Mr para suelos y materiales granulares no tratados. Las correlaciones analizadas son:

- Correlación DCP - Valor Soporte Relativo (CBR)

$$\text{CBR} = 358 \cdot \text{DN}^{-0.969}$$
- Correlación DCP - Módulo Resiliente Mr

Para suelos finos	$\text{Mr} = 200 \cdot \text{DN}^{-0.50}$
Para suelos gruesos	$\text{Mr} = 400 \cdot \text{DN}^{-0.50}$

donde: Mr = Módulo Resiliente (Mpa) y DN = Índice de Penetración (mm/golpe)

5.3. Caracterización de materiales en laboratorio y criterios de falla

Los actuales métodos de análisis estructural requieren para cada material el conocimiento de los parámetros elásticos iniciales y de su deterioro en el

tiempo y el uso, como así también de la definición de criterios de falla que se refieren al límite admisible, en términos del número de aplicaciones de un cierto nivel de solicitaciones impuesto, de un cierto indicador de respuesta estructural (tensiones o deformaciones).

Los ensayos tradicionales de laboratorio no son aptos para este fin y si bien se han establecido algunas correlaciones con los nuevos ensayos, es indispensable efectuar verificaciones locales. El Grupo de Investigación del IMAE de Rosario ha incorporado a la técnica vial Argentina, a lo largo de los últimos años una serie de técnicas experimentales a este objetivo. El estado actual es resumido a continuación al tratar los criterios adoptados para cada tipo de material.

5.3.a. Suelos y materiales no tratados

La determinación de los parámetros que caracterizan las capas de suelos y materiales no tratados se realiza sobre los materiales recuperados durante la ejecución de las calicatas o bien de yacimientos establecidos. Los ensayos mínimos a realizar incluyen la determinación de la granulometría, plasticidad, clasificación HRB, las condiciones de humedad y densidad in situ (si se trata de un camino existente), o ensayo de compactación de referencia, y el Módulo Resiliente.

El módulo de las capas de materiales no ligados pertenecientes a pavimentos flexibles se ha tratado como un parámetro de magnitud constante durante mucho tiempo (por ejemplo $E = 100$ CBR). Pero el desarrollo de nuevas formas experimentales de caracterizar en forma dinámica estos materiales ha establecido que no es correcta esta adopción, ya que se ha establecido la dependencia del módulo con el nivel de tensiones aplicado (11)(12). La determinación del Módulo Resiliente de suelos y materiales no tratados se efectúa a través del ensayo triaxial dinámico con la aplicación de tensores desviadores pulsantes y distintas presiones de confinamiento estáticas, de acuerdo a lo descrito en la norma



AASHTO T 294-92, "Método standard de ensayo de Módulo Resiliente de Bases granulares no ligadas, Materiales de sub-base y Suelos de subrasante - Protocolo SHRP P 46". (Figura 7)

Figura 7. Equipo Triaxial dinámico - IMAE

Los resultados que se obtienen del ensayo son relaciones entre los tensores desviadores aplicados y las deformaciones axiales resilientes que resultan para las distintas condiciones de carga, los que permiten definir modelos de comportamiento resiliente según diversas expresiones matemáticas.

$Mr = \sigma_d / \varepsilon_r$ donde: Mr módulo resiliente
 σ_d tensor desviador pulsante aplicado
 ε_r deformación específica resiliente o recuperable

El modelo que se aplica actualmente, que tiene buena correlación entre los valores predichos y los medidos, es el propuesto por Uzam (13),

$$Mr = A \cdot (\theta)^B \cdot (\sigma_d)^C$$

donde: A, B, C coeficientes experimentales, dependen del tipo de suelo, del contenido de humedad y de la densidad
 σ_d tensor desviador
 θ primer invariante de tensiones

Este modelo permite el ingreso a los Métodos de Diseño Estructural en vigencia, ajustar mejor los valores modulares de las capas de base, sub-base y suelo de fundación, y considerar así el comportamiento no lineal de los suelos. En la tabla de la Figura 8 se observan los coeficientes hallados para algunos suelos ensayados en el Laboratorio Vial del IMAE.

CLASIFICAC. HRB SUELO	DENSIDAD SECA MAXIMA (gr/cm ³)	HUMEDAD OPTIMA (%)	CONSTANTES MODULO RESILIENTE (MPa)		
			A	B	C
A-2-4 (0)	2.042	10.0	1030	0.46	0.00
A-4 (8)	1.401	25.0	35	0.26	-0.44
A-6 (10)	1.540	24.3	32	0.10	-0.30
A-7-6 (11)	1.521	25.9	27	0.00	-0.21

Figura 8. Constantes de ensayo de Módulo Resiliente de distintos suelos

Para la relación de Poisson de este tipo de materiales, se ha adoptado un valor constante igual a 0.40 considerando que es suficientemente representativo y no altamente influyente en el análisis del estado de tensional de la estructura del pavimento.

La ley de falla de estos materiales se basa en predecir la acumulación de deformaciones permanentes que afectan a todas las capas construidas con suelo o materiales granulares no ligados. Dos son los procedimientos utilizados para la verificación del criterio de falla por acumulación de deformaciones permanentes en los suelos de la subrasante (14).

El primero de ellos está orientado a limitar las tensiones o deformaciones recuperables en el nivel superior de la fundación a valores admisibles que permitan estimar que, para el período de proyecto no ocurrirán deformaciones permanentes excesivas que puedan comprometer la calidad de circulación. Para este caso se ha adoptado en forma tentativa la

expresión utilizada por el Manual de Diseño de Estructuras de Pavimentos Shell (15).

$$\varepsilon_z = c \cdot N^{-0.25}$$

donde: ε_z deformación específica vertical
 N número de repeticiones de carga (80 KN)
 c constante que depende del nivel de confiabilidad
 (c = 0.021 para 85% y c = 0.018 para 95%).

En general este criterio está derivado de la observación de tramos construidos de acuerdo con diferentes procedimientos de diseño estructural, los que modelizados adecuadamente permitan establecer una correlación entre la deformación vertical recuperable a nivel de la subrasante y el número de aplicaciones de una carga patrón para un dado nivel de ahuellamiento en la superficie del pavimento.

El segundo procedimiento consiste en establecer para cada material componente de la estructura, y en particular para la subrasante, una ecuación constitutiva entre la deformación permanente y el estado de tensiones aplicados, número de aplicaciones de la misma y las características intrínsecas del material. Si bien la bibliografía analizada propone diversos modelos alternativos, en función del grado de ajuste de cada uno de ellos, se ha adoptado finalmente como modelo de evolución el siguiente:

$$\log \varepsilon_p = F + G \cdot \log N$$

donde: ε_p deformación específica permanente
 N número de ciclos aplicados
 F, G constantes experimentales

Actualmente se está trabajando en la determinación experimental de las constantes F y G para distintos tipos de suelos en distintas condiciones de trabajo (humedad, densidad, tensiones), basado en el ensayo Triaxial Dinámico descripto.

5.3.b. Materiales ligados con asfalto

Las mezclas asfálticas son materiales viscoelásticos cuyas propiedades, dependientes de la temperatura y la frecuencia de aplicación de las cargas, condicionan su posterior comportamiento en servicio. Desde el punto de vista estructural, las propiedades mecánicas más importantes son el módulo de deformación, la resistencia a la fatiga y la resistencia a las deformaciones permanentes.

El módulo de deformación define en forma genérica la relación propia de cada material entre las tensiones aplicadas y las deformaciones resultantes. En el caso de las mezclas asfálticas este módulo de deformación recibe el nombre de módulo dinámico o Stiffness.

La resistencia a la fatiga y a las deformaciones permanentes involucra el análisis del comportamiento de estos materiales frente a la acción reiterada

de las cargas en lo que respecta a los dos tipos de falla principales en los pavimentos flexibles: la fisuración y el ahuellamiento.

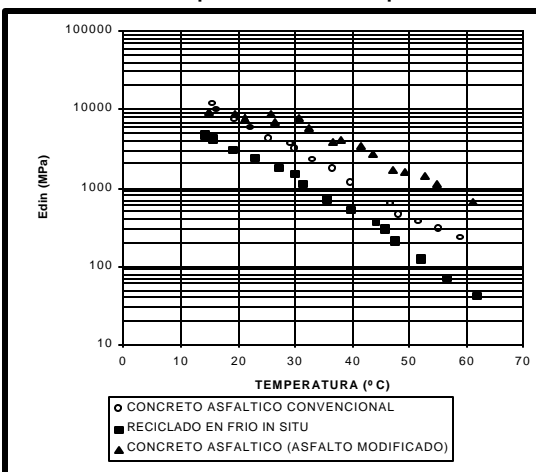
La metodología experimental adoptada para estos fines es la de tracción indirecta por compresión diametral con cargas repetidas. La Figura 9 presenta una fotografía del equipo de ensayos en su versión actual, en donde una computadora del tipo PC realiza el control del ensayo y la adquisición de los resultados permitiendo conformar un archivo procesable por otros programas comerciales. La determinación del módulo dinámico se efectúa normalmente a tres temperaturas (10, 25 y 40 °C) y cinco frecuencias de sollicitación (2.5, 2.0, 1.0, 0.5 y 0.25 Hz).



Figura 9. Equipo de ensayos Módulo Dinámico – IMAE

Sin embargo, los vehículos pesados solicitan a esta capa con frecuencias de aproximadamente 10 Hz, que no es posible obtener directamente en el campo experimental por las limitaciones propias del sistema de aplicación de cargas.

Aprovechando el concepto de equivalencia frecuencia-temperatura válido para materiales viscoelásticos en donde estos parámetros juegan un rol recíproco (una disminución de la temperatura resulta equivalente a un aumento de la frecuencia), es posible extrapolar racionalmente los resultados experimentales presentándolos en una única curva, denominada



Curva Maestra (16) . La misma muestra la variación del módulo dinámico en función de la temperatura para una única frecuencia de sollicitación.

Por las razones expuestas precedentemente, esta frecuencia ha sido seleccionada en 10 Hz. La Figura 10 muestra tres Curvas Maestras, correspondientes a diferentes materiales ligados con asfalto.

Figura 10. Ejemplos de Curvas Maestras a 10 Hz.

En lo que respecta a la resistencia a la fatiga (17), las leyes de falla son:

$$N_R = K_1 \cdot \sigma_T^{K_2}$$

$$N_R = K_3 \cdot \varepsilon_T^{K_4}$$

donde: N_R número de ciclos para producir la falla
 σ_T tensión principal de tracción aplicada
 ε_T def. de tracción en el centro de la muestra
 K_i constantes experimentales de regresión

Dado que el ensayo de tracción indirecta produce en la probeta en ensayo un estado biaxial de tensiones, es posible utilizar también un criterio de falla basado en la diferencia de tensiones $\Delta\sigma$ calculada a partir de las tensiones principales de tracción y compresión actuantes en el centro de la muestra. Al haber implementado un sistema de adquisición de datos que en forma continua, a lo largo de cada ensayo, monitorea las cargas aplicadas y deformaciones resultantes, es posible seguir la evolución y deterioro paulatino del desempeño estructural del material analizado.

La Figura 11 muestra la evolución del módulo dinámico respecto al valor inicial respecto al número de ciclos aplicados. Ello posibilita definir la vida en fatiga no sólo en base a la rotura total de la muestra sino con otros criterios tales como la reducción a un nivel prefijado del módulo dinámico respecto al valor inicial, al alcanzarse una determinada deformación permanente o mediante la introducción de criterios energéticos (energía total disipada o energía de deformación).

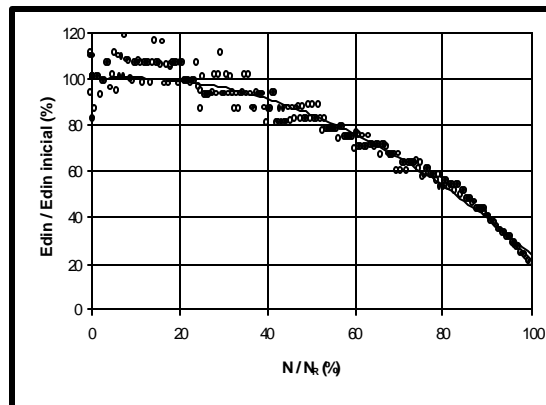
Finalmente en lo que respecta a la acumulación de las deformaciones permanentes, se ha considerado la utilización de leyes del tipo:

$$\varepsilon_p = A \cdot N^\alpha \quad \text{donde:} \quad \begin{array}{ll} \varepsilon_p & \text{deformación permanente (\%)} \\ N & \text{número de ciclos aplicados} \\ A \text{ y } \alpha & \text{constantes de regresión} \end{array}$$

El parámetro A es la deformación específica permanente para el primer ciclo en tanto que α es indicativa de la velocidad de acumulación de las

deformaciones permanentes dependiendo entre otros factores, de la temperatura de ensayo, el nivel de tensiones aplicado y la naturaleza del material frente a su susceptibilidad frente a este tipo de falla.

Figura 11. Evolución del módulo dinámico respecto al número de ciclos



5.3.c Materiales estabilizados con ligantes hidráulicos

En el caso de los materiales ligados con agentes hidráulicos, la técnica de caracterización de los mismos es dependiente del nivel de tratamiento o estabilización conseguido por la adición de cal, cemento, escorias siderúrgicas, etc (18)(19)(20).

Si se trata de un material tratado en donde no se persigue conseguir el desarrollo de una fuerte matriz cementante, las técnicas de caracterización son comunes a las de los suelos y los materiales granulares no tratados. Por el contrario, si se trata de un estabilizado con una importante adición de un ligante hidráulicos, las técnicas de ensayo son muy similares a las desarrolladas para las mezclas asfálticas.

6. SOLICITACIONES

El tránsito y el clima son las solicitaciones que sufre una estructura de pavimento durante su vida útil. Interactúan simultáneamente y en ocasiones potencian sus efectos perjudiciales. La posibilidad de reducir este análisis a variables únicas como son el número de ejes equivalentes y la temperatura media anual ponderada, como usualmente se realiza, es generalmente suficiente aproximación a la realidad estructural, salvo en casos particulares como ser períodos anuales de tránsito notoriamente diferenciados. Esta circunstancia motivará la obtención del resultado de la vida útil estimada en base a la acumulación de los daños estructurales calculados en cada sub-período anual (21)(22).

El planteo del número de ejes equivalentes se realizará de ser posible en base al conocimiento del espectro de cargas reales ponderado en cada caso de acuerdo al criterio de falla del material que se esté verificando (23). Esto está motivado por las diferentes sensibilidades de los materiales frente al nivel de solicitaciones impuesto y la gran variación que presentan los histogramas de carga por eje (efectos destructivos por camión) entre distintas rutas aún dentro de la misma zona geográfica.

7. MODELIZACION ESTRUCTURAL POR RETROAJUSTE MODULAR

La existencia de metodologías de retroajuste modular se justifica en la necesidad de un conocimiento de los módulos de trabajo de las distintas capas integrantes de un pavimento existente. Este requerimiento se presenta tanto en el proyecto de mejoras como en el seguimiento de tramos testigo que avalan los métodos de diseño y/u optimizan las técnicas constructivas.

En la medida que se ausculten múltiples puntos de la deformada en superficie crece la posibilidad de ajuste y disminuye la importancia puntual de errores de medición. Esta circunstancia plantea la ventaja de esta práctica como así también de la realización de ensayos que complementen la información modular (DCP y ensayos de Laboratorio), para lograr una mejor aproximación en los módulos retroajustados. Es importante notar que los módulos de trabajo retroajustados se corresponden con las circunstancias propias del momento y metodología de medición de las deformadas. Las distintas técnicas de medición de deflexiones (Benkelman, Lacroix y FWD) difieren en su metodología y condiciones de aplicación de cargas y esto origina que los módulos obtenidos difieran, en correspondencia con estas diferencias (24).

Los softwares comerciales se basan en la medición de deformadas en superficie y en forma absoluta lo que plantea un inconveniente al emplear deflexiones medidas respecto a una base referencial (Benkelman o Lacroix). El Laboratorio Vial del IMAE ha desarrollado un software, denominado BACKMOD(25). Este se ejecuta en una PC y permite considerar distintas formas de medición de la deformada en superficie, en forma absoluta (por medio de un deflectógrafo a impacto FWD) o a través de una cierta base de referencia como con la regla Benkelman y el deflectógrafo Lacroix pudiendo esquematizarse las características diferentes de carga y dimensiones de los sistemas de medición.

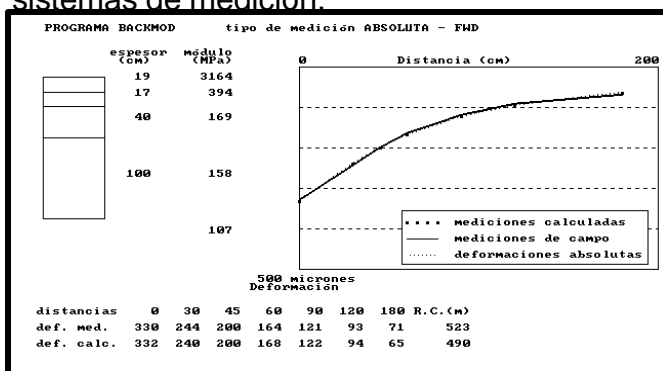


Figura 12. Pantalla de salida gráfica del software BACKMOD

Como posibilidades más relevantes del software BACKMOD pueden citarse las siguientes:

- permite la simulación de cuatro técnicas de mediciones diferentes: Lacroix, Benkelman simple, Benkelman doble y mediciones absolutas de la deformada
- en la simulación de las cuatro técnicas citadas la geometría de los equipos de medición y los valores de las cargas aplicadas se sugieren en su valor habitual, pero pueden ser modificados para ser adaptados a un equipo especial o mediciones particulares realizadas expreso con diferentes valores de carga

- posee seis tipos de definición de los módulos de las distintas capas estructurales: **1-** el módulo constituye un DATO (previamente definido a través de un valor determinado, representa un comportamiento elástico lineal), **2-** se declara la ECUACION CONSTITUTIVA (se suministran los coeficientes A, B y C de la ecuación de los materiales no ligados), **3-** el módulo constituye la INCOGNITA (el módulo o ecuación constitutiva de esta capa es ajustada en el proceso de convergencia entre los valores medidos y calculados), **4-** aplica escalonamiento según BARKER para bases (adopta las fórmulas de BARKER para bases al plantear el escalonamiento modular con la capa inferior), **5-** aplica escalonamiento según BARKER para sub-bases (adopta las fórmulas de BARKER para sub-bases al plantear el escalonamiento modular con la capa inferior), **6-** se indica un FACTOR de escalonamiento modular (permite adoptar un valor predeterminado de escalonamiento modular con la capa inferior, opción apta para la utilización de los resultados del DCP)
- como salida se muestran en pantalla los módulos obtenidos en las distintas capas, y una gráfica comparativa del cuenco de las deformadas medidas y ajustadas. La Figura 12 muestra un ejemplo.

8. DISEÑO DE LA MEJORA

Abordar el diseño de la mejora de una estructura de pavimento flexible implica determinar cual es el espesor de refuerzo a colocar sobre la misma para que soporte un determinado número de aplicaciones de carga (tránsito). En esta tarea entran en juego los siguientes aspectos: modelización del paquete existente, comportamiento lineal o no lineal de los materiales, valoración del tránsito futuro, leyes de falla de los distintos materiales, parámetros límites de superficie (fisuración y ahuellamiento).

Con respecto a los materiales, la forma deseable de caracterización es a través de modelos elásticos no lineales, ya que esto permite recalcular el nuevo módulo de trabajo de la capa al variar el estado de tensiones que la solicita.

Con respecto a las leyes de falla a adoptar para cada material, existen muchas en referencias bibliográficas, pero lo deseable es que las mismas estén validadas por ensayos propios y/o por seguimiento de tramos. Las leyes de falla dependen del tipo de material y del estado final de deterioro de superficie que se adopte.

En el Laboratorio Vial del IMAE se ha desarrollado el software VIDA, con el cual pueden calcularse las vidas útiles de la estructura con distintos espesores de refuerzo y por dos criterios de falla (ahuellamiento y

fisuración). El análisis se basa en un modelo mecanicista donde se calculan tensiones y deformaciones, para luego obtener el número de reiteraciones admisibles por medio de los criterios de falla correspondientes. Se calculan: tensiones de tracción en capas cementadas, deformaciones de tracción en capas asfálticas y deformaciones verticales de compresión en las capas no ligadas.

El software VIDA posee las siguientes características: tiene incorporados los valores de carga de diseño (80 KN), pudiendo ser modificados si así se lo requiere; los módulos de las capas se pueden ingresar como dato o con la ecuación constitutiva; las capas pueden definirse como variables tanto en módulo como en espesor, estableciendo el valor inicial, el valor final y el incremento.

Como resultado del procesamiento por VIDA se obtiene la variación de vidas expresadas en número de ejes equivalentes para los distintos espesores y módulos planteados; como puede verse en la Figura 13 en forma gráfica y numérica.

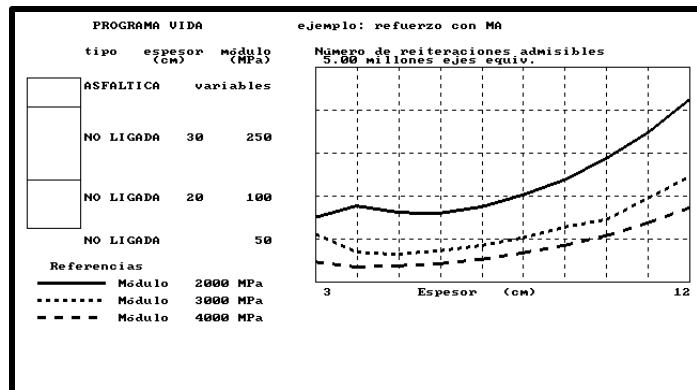
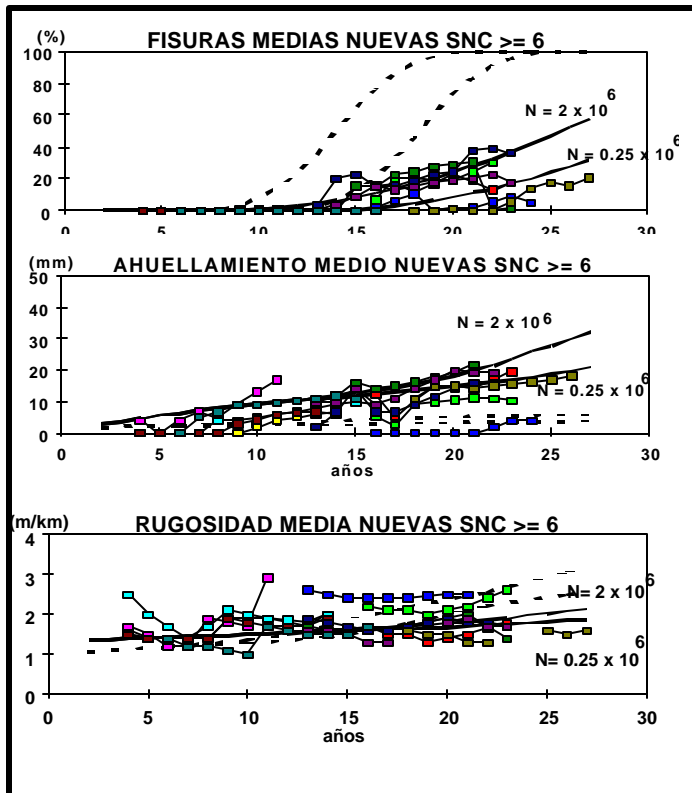


Figura 13. Pantalla de salida del software VIDA.

9. PROGNOSIS DEL COMPORTAMIENTO CON MODELOS DE DETERIORO HDM III

Si bien con la metodología descrita en el punto 8 y el software VIDA es posible obtener la vida útil de una determinada estructura, no es posible obtener la evolución que tendrán en el tiempo los distintos deterioros de superficie. Para valorar esa evolución es necesario utilizar otras



herramientas, softwares de gestión, que poseen modelos incorporados para cada parámetro individual.

El modelo HDM III es un software diseñado especialmente por el Banco Mundial (26) para ser utilizado en los países en vías de desarrollo para analizar la factibilidad técnico económica del mantenimiento de rutas.

Figura 14. Evolución de los deterioros con HDM III ajustado (en líneas llenas) y sin ajustar (en líneas de trazo) para un

entorno estructural.

El mismo está constituido básicamente por dos modelos: modelos de deterioro de pavimentos y modelo de costos.

Para arribar a los fines técnicos fijados en el Laboratorio Vial se ha trabajado solamente sobre los modelos de deterioro y su ajuste/calibración a las condiciones de utilización de la región Litoral de la Argentina (27). Para proceder a esa calibración se han utilizado los datos existentes en la Base de Datos, sobre evaluaciones de estado periódicas realizadas por la Dirección Nacional de Vialidad desde 1983, y se determinaron los "coeficientes de ajuste" de los distintos modelos de deterioro particulares. Luego, esos modelos ajustados, pueden ser utilizados para verificar la evolución de los parámetros de superficie y definir el momento de aplicación

de futuras acciones de mantenimiento cuando los indicadores de superficie caigan por debajo de los límites de aceptabilidad prefijados.

Actualmente se trabaja sobre la posibilidad de obtener la evolución de los parámetros de superficie pero partiendo de modelos mecanicistas para la caracterización estructural.

10. CONCLUSIONES

El presente trabajo describe resumidamente un conjunto de desarrollos tendientes a la definición de una metodología que permita abordar la evaluación de los pavimentos flexibles y el diseño de las correspondientes mejoras. En mucho de los aspectos citados, se trata de técnicas innovadoras cuya aplicación al medio vial argentino se ha mostrado factible constituyendo avances significativos al conocimiento actual.

Su implementación es un proceso dinámico que permite superaciones y adaptaciones respecto a las necesidades y avances tecnológicos que todos los días se producen en el campo vial.

11. BIBLIOGRAFIA

1. "Contribución del grupo de investigación de Rosario a la evaluación y refuerzo de pavimentos en Argentina. Período 1979-1989". J.Tosticarelli, H.Poncino, S.Angelone, O.Giovanon, F.Martínez y M.Pagola. 2nd International Symposium on pavement evaluation and overlay design, Río de Janeiro (Brasil) setiembre de 1989.
2. "Instructivo de Evaluación de Pavimentos". D.N.V. de la República Argentina.
3. "Actualización de Condiciones Técnicas exigidas a las Calzadas Pavimentadas sobre: Rugosidad de Pavimentos". H.Poncino, M.Pagola, O.Giovanon y M.Noste. Asociación Argentina de Carreteras - n° 149 octubre 1996.
4. "Calibración de Rugosímetros según Patrones Internacionales". M.Pagola y J.Tosticarelli. XXVI Reunión del Asfalto, Buenos Aires diciembre 1990.
5. "Nuevo sistema de adquisición de datos del Rugosímetro MAYS-JMF". M.Pagola, O.Giovanon y J.Tosticarelli. XXVIII Reunión del Asfalto, Buenos Aires, abril de 1995. 8º Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, 1995.
6. "Adherencia neumático calzada". Informes Convenio Cámara de Concesionarios Viales. - IMAE. H.Poncino, M.Pagola, O.Giovanon y M.Noste, 1996 - 1997.
7. "Encuentro de Compatibilización, Pendulos de Fricción." M.Pagola y O.Giovanon. Asociación Argentina de Carreteras - n° 149 octubre 1996.
8. "Aplicación de deflectógrafos a impacto (FWD) en Argentina". O.Giovanon y J. Tosticarelli. 8º Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Bolivia, noviembre 1995.
9. "El Penetrómetro Dinámico de Cono. Su aplicación al control y". S.Angelone, J.Tosticarelli y F.Martínez. 6º Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Chile, 1991.
10. "Aplicación del Penetrómetro Dinámico de Cono en obras viales y controles de compactación. S.Angelone y F.Martínez. 3er Encuentro de Centros del Instituto Panamericano de Carreteras (IPC). San Pablo, Brasil, noviembre 1994.

11. "Módulo resiliente de suelos y materiales no tratados. Su aplicación al diseño estructural de pavimentos". S. Angelone, F. Martínez y J. Tosticarelli, Revista Carreteras de la Asoc. Arg. de Carreteras, Enero-Marzo de 1988.
12. "Módulo resiliente de suelos y materiales granulares ...(2a. Parte)". Silvia Angelone y Fernando Martínez, XXV^o Reunión Anual del Asfalto, Córdoba, 1988.
13. "Characterization of granular material", TRR N° 1022, 1985.
14. "Deformación permanente en suelos de subrasante. Análisis experimental y aplicación al diseño estructural de pavimentos flexibles". S. Angelone y F. Martínez. 8vo IberoLatinoamericano del Asfalto, Bolivia, 1995.
15. Addendum to the Shell Pavement Design Manual, Shell Company Limited, London, 1985.
16. "Caracterización reológica de mezclas asfálticas mediante el ensayo de tracción indirecta con cargas repetidas". S. Angelone, F. Martínez y J. Tosticarelli. XXVII Reunión Anual del Asfalto, Buenos Aires, 1992.
17. "La falla por fatiga de las mezclas asfálticas mediante el ensayo de tracción indirecta". S. Angelone y F. Martínez. 7mo IberoLatinoamericano Asfalto. Venezuela, 1993
18. "Dynamics characteristics of lime-treated soils". S. Angelone y F. Martínez. Roads 96, Christchurch, Nueva Zelandia.
19. "Caracterización de materiales tratados con ligantes hidráulicos. Su aplicación". H. Poncino, R. Cassan y G. Coirini, 4to IberoLatinoamericano del Asfalto, Méjico, 1987.
20. "Caracterización elástica de estabilizados con escoria de alto horno y cal". H. Poncino y R. Cassan. 5to Ibero Latinoamericano del Asfalto, Uruguay, 1989.
21. "Predicción de la temperatura de la mezcla a partir del clima de una región". O. Giovanon. XXIV Reunión Anual del Asfalto, Argentina, 1986.
22. "Influencia de la distribución anual del tránsito en la vida de diseño". O. Giovanon y M. Pagola. XXV Reunión Anual del Asfalto, Argentina, 1988.
23. "Ejes Equivalentes para el diseño de pavimentos flexibles". F. Lilli y J. Lockhart. 8^o Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Bolivia, 1995.
24. "Retroajuste modular de estructuras de Pavimentos - Influencia de la metodología de auscultación". O. Giovanon y M. Pagola. XXIX Reunión del Asfalto, Argentina, noviembre 1996
25. "El Programa BACKMOD para el cálculo de los módulos estructurales a partir de mediciones de la deformada en superficie". O. Giovanon y M. Pagola. XXVII Reunión del Asfalto, Argentina, 1992.
26. "Highway Design and Maintenance Standars Model (HDMIII), VolumenIV, Model Description and User's Manual". Word Bank, Transportation Department, Washington, D.C., 1987.
27. "Modelos de deterioro de pavimentos flexibles en Argentina. Segunda parte". M. Pagola, O. Giovanon y J. Tosticarelli. 7^{mo} IberoLatinoamericano del Asfalto, Venezuela, 1993.