

MODELOS OBTENIDOS PARA EL CÁLCULO DE PAVIMENTOS

Autores: Msc. Ings. Oscar Giovanon y Marta Pagola
Institución: Laboratorio Vial IMAE
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Universidad Nacional de Rosario – Argentina
Dirección: Berutti y Riobamba – 2000 Rosario
Teléfono: 0341 4808538 / 4808539 interno 136
Fax: 0341 4808540
Email: pagola@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

La realización de análisis exhaustivos de las estructuras viales resulta compleja como consecuencia de diferentes aspectos, entre los que pueden citarse:

- Los materiales asfálticos resultan susceptibles a condiciones de frecuencia y temperatura (como variables principales)
- Los suelos y materiales granulares son susceptibles al nivel de tensiones y contenido de humedad (como variables principales)
- Los materiales en general son compuestos por diferentes materiales
- El entorno climático, variable, condiciona tanto en temperatura como en lluvias y condición de escurrimiento
- La falla estructural se produce por la reiteración de cargas variables en intensidad y frecuencia (fatiga)
- 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 esta complejidad los planteos a nivel estructural son en general simplificados. Se analizará la necesidad de recurrir a la modelización de la estructura por elementos finitos, respecto a la “aproximación multicapa”.

La utilización de modelos multicapa resulta interesante por su velocidad en el procesamiento pero presenta menores posibilidades frente a las técnicas de elementos finitos o micro-mecánica, donde pueden ponerse de manifiesto efectos de no linealidad a nivel elemento, aspectos de la caracterización dinámica de los materiales o incluso la heterogeneidad del material. En el presente artículo se comentan distintas opciones de modelos y se muestran resultados comparativos de algunos de ellos.

1. ENFOQUES DE LA MECÁNICA ESTRUCTURAL

1.1. Clasificación según la escala

Frente al requerimiento de plantear modelos racionales (también llamados mecanicistas por su sustento en la mecánica) existen diferentes opciones que se pueden clasificar desde un punto de vista de globalidad del enfoque y el nivel de escala en:

- Funciones de tensiones
- Elementos finitos
- Micro-mecánica
- Acoplamiento entre macro y micro-estructuras

1.1.1. Función de tensiones

Consiste en plantear la determinación de las funciones que definen los campos de desplazamientos, deformaciones y tensiones.

Para su resolución se requiere la respuesta del conjunto de ecuaciones diferenciales dadas por las ecuaciones de equilibrio y compatibilidad de desplazamientos condicionadas por las ecuaciones constitutivas de los materiales (relaciones entre tensiones y deformaciones) y las condiciones de contorno.

Un ejemplo de este enfoque es la solución de Burmister obtenida para el medio elástico multicapa apoyada sobre el sólido semi infinito, normalmente aplicada en distintos programas de computación empleados para el cálculo de pavimentos flexibles.

1.1.2. Elementos Finitos

El método de los elementos finitos plantea la estrategia de analizar problemas complejos mediante la subdivisión del medio en fracciones (elementos) de las cuales se conoce su solución y lograr la resolución de problemas complejos mediante la interacción de los elementos individuales.

Este enfoque es normalmente aplicado a nivel macro para las estructuras reales y a nivel macro y/o micro (agregados como elementos o formados por elementos) para ensayos de laboratorio. Dado que la aplicación a nivel micro conlleva un gran esfuerzo computacional, para la actual velocidad de procesamiento implica elevados tiempos de procesamiento.

Las figuras 1 y 2 ejemplifican dos discretizaciones aplicando simetría para reducir número de elementos, La figura 1 de una probeta sometida a tracción indirecta, en este caso para un planteo de viscoelasticidad (1). La figura 2 de un pavimento flexible, en este caso, para el análisis de los esfuerzos con diferentes grados de adherencia en la interfase asfáltica (2).

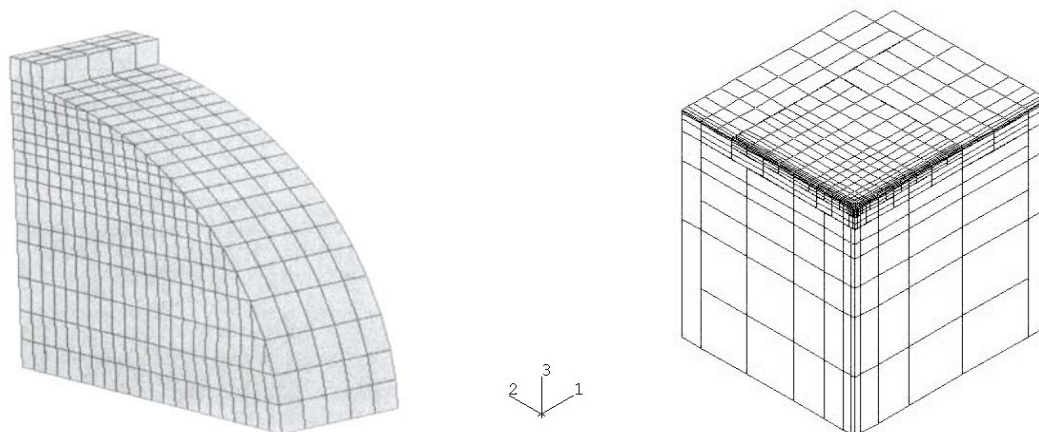
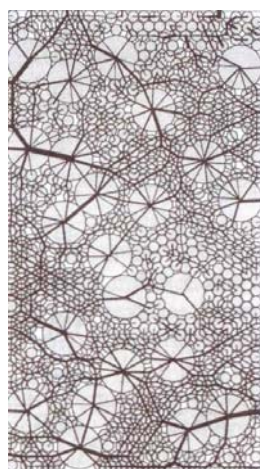


Figura 1. Probeta sometida a tracción indirecta

Figura 2. Estructura de pavimento flexible.

1.1.3. Micro-mecánica

Micro-mecánica es la mecánica de cosas y procesos cuyas medidas se expresan en micrones. Es el ámbito particularmente apto para abordar el estudio de materiales no homogéneos, poniendo de manifiesto los diferentes componentes. Al ser analizadas en pequeña escala la mayoría de los materiales que se plantean como homogéneos en escala macro puede notarse que el material no es uniforme, sino que está formado por varios elementos constitutivos, cada uno de los cuales puede tener propiedades distintas y presentarse con formas características.



En este nivel es posible llegar a abordar deslizamientos entre granos, formación de vacíos, porosidades, micro-fisuras, crecimiento de fases sólidas y otros.

La figura 3 ejemplifica una modelización micro-mecánica (3) donde se muestran las fuerzas entre las partículas luego de de compactación de un material granular, de acuerdo a una escala de grosores del trazo. En este caso se optó por representar cada partícula como un disco.

Figura 3. Fuerzas entre partículas en una probeta de material granular

1.1.4. Acoplamiento entre macro y micro-estructuras

Dada la gran cantidad de variables que requiere el análisis a nivel micro un interesante planteo, en actual evolución, es una resolución mixta donde se conjugue un planteo global a nivel macro con detalles a nivel micro que permitan el análisis de puntos críticos o la determinación de los parámetros de comportamiento a nivel macro.

La escala macroscópica tiene medidas relacionadas a las dimensiones del sólido o de la estructura considerada; en esa escala se desarrollan por ejemplo comportamientos elásticos, zonas de plasticidad y grietas visibles; problemas mecánicos y térmicos que se modelan con la mecánica del continuo. En el nivel micro las dimensiones son del orden entre mm y micrones. En esa escala aparecen formaciones ordenadas de elementos que forman una micro-estructura. La micro-estructura puede sufrir cambios en el tiempo, dados por los esfuerzos y el clima.

Se requieren criterios para definir la interacción micro-macro y homogeneización para atribuir parámetros macro a las propiedades heterogéneas del nivel micro. Se establecen por ejemplo promedios de la respuesta del material sobre un volumen considerado (4).

1.2. Tipo de Análisis

En forma independiente de los enfoques de acuerdo a la escala, se pueden luego catalogar por el tipo de análisis realizado.

- Respecto a la frecuencia de las solicitaciones en estático, pseudo estático o dinámico
- Respecto a la caracterización del material existen numerosas opciones, isótropo, anisótropo, elástico lineal, elástico no lineal, viscoelástico, etc
- Respecto a la evolución de la estructura, condiciones fijas (iniciales o ponderadas) o análisis incremental (consideración de la evolución en el tiempo).

1.2.1. Respecto a la frecuencia de las solicitaciones

Los análisis se realizan dentro de una teoría estática cuando los elementos que la integran se mantienen en equilibrio en una posición nombrándose los desplazamientos sólo como consecuencia de la acumulación de deformaciones específicas respecto a la estructura sin cargas.

El análisis es pseudo estático cuando una situación que en realidad es dinámica por existir elementos en movimiento se aproxima a la solución estática, considerando por ejemplo los módulos de los materiales viscosos para la frecuencia de sollicitación asemejada al proceso en estudio.

El análisis se realiza dentro del campo dinámico cuando se consideran dentro del equilibrio las fuerzas de inercia generadas por las variaciones de movimiento.

1.2.2. Respecto a la caracterización del material

Existen en este punto numerosas opciones se citarán aquí las que se consideran más relevantes con una muy breve descripción:

- isótropo, las características del material no difieren respecto a la dirección en la que se considere.
- anisótropo, las características del material difieren respecto a la dirección en la que se considere, si estas diferencias son respecto a direcciones perpendiculares entre si se denomina ortótropo.
- elástico, las deformaciones producidas en el material son totalmente recuperables, no se producen fenómenos de plasticidad. Aquí resulta interesante diferenciar la elasticidad no lineal donde para caracterizar el material no bastan, números y es requerida su ecuación constitutiva.
- viscoelástico, se agrega aquí una componente de la rigidez del material función de la velocidad de deformación (frecuencia de ensayo).

1.2.3. Respecto a la evolución de la estructura

El análisis puede realizarse en condiciones fijas (iniciales o ponderadas) como habitualmente se realiza en los métodos mecanicistas clásicos o plantear a la estructura como un ente que evoluciona a lo largo de la vida planteando el progresivo deterioro de los materiales.

Se requiere aquí un análisis por diferencias finitas y la definición de modelos que pongan de manifiesto las variaciones de las características de los materiales en función de la historia de tensiones del punto.

2. MODELIZACIÓN DENTRO DE LA INGENIERÍA VIAL

La resolución de problemas dentro de la ingeniería implica en general el desarrollo de modelos capaces de predecir el comportamiento de las estructuras a proyectar / verificar.

Estos modelos ya se traten de modelos de naturaleza empírica o racional, deben permitir la realización de la prognosis del comportamiento con cierta certidumbre, posibilitando así la verificación del comportamiento y/o la elección entre diferentes alternativas de diseño.

La realización de análisis que intenten, dentro del ámbito vial, un profundo acercamiento con la realidad estructural resulta muy compleja como consecuencia de diferentes aspectos, de los que se citaran a continuación los considerados más relevantes.

2.1. Rigidez de los Materiales asfálticos

Los materiales asfálticos resultan susceptibles a condiciones de frecuencia y temperatura, resultando su módulo una variable compleja que presenta una componente en fase con la carga y otra desfasada respecto de esta, dependiendo el valor y la importancia relativa de estas componentes tanto de las particularidades de la mezcla asfáltica como de las condiciones de las sollicitaciones aplicadas. En este sentido se requeriría un análisis dinámico para tener en cuenta estos aspectos del material, siendo lo habitual la aproximación seudo dinámica.

Al realizar un ensayo con un deflectógrafo dinámico a impacto FWD, la metodología habitual consiste en utilizar sólo los valores máximos de carga y desplazamiento para la realización del retroajuste modular, pero tanto el valor de la carga aplicada como los desplazamientos bajo cada sensor son en realidad funciones del tiempo, en la figura 4 se muestran las variaciones de la carga aplicada y las mediciones de desplazamiento en función del tiempo para un sitio determinado (5).

Se evidencian en este ejemplo el desfase temporal existente entre los valores máximos y la posterior atenuación de los parámetros en el tiempo. En este estudio realizado por Karim Chatti y otros se comparan los resultados obtenidos mediante retroajustes con diferentes modelos, lineales, no lineales y dinámicos, concluyendo entre otros aspectos que *“los mejores resultados fueron obtenidos usando análisis no lineal, implicando que en la respuesta del pavimento tiene mayor importancia el efecto no lineal que el efecto dinámico”*.

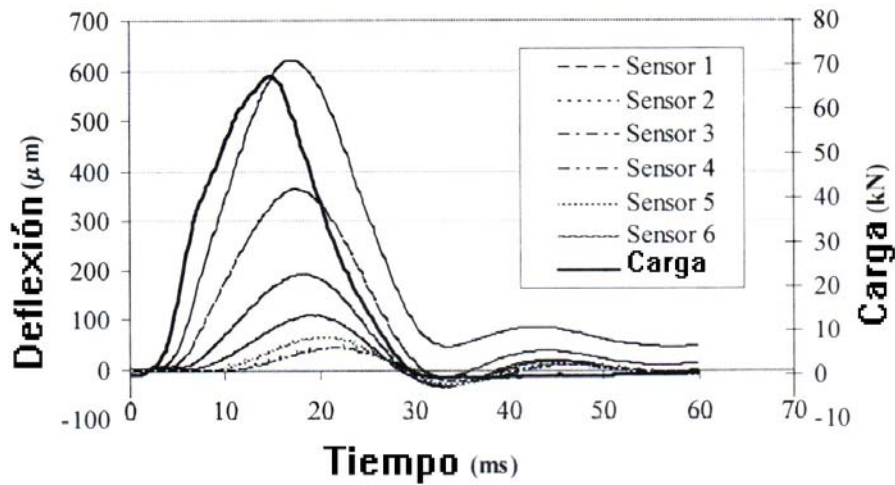


Figura 4. Carga y deflexiones en función del tiempo

2.2. Rigidez de los Materiales no ligados

Los suelos y materiales granulares son susceptibles al nivel de tensiones y contenido de humedad presentando un comportamiento caracterizable por una adecuada ecuación constitutiva pero con una dada susceptibilidad con el contenido de humedad.

La figura 5 muestra a modo de ejemplo la resolución mediante un programa propio de elementos finitos ELFIN aplicando no linealidad, mediante las ecuaciones constitutivas del módulo resiliente E de los suelos en función del primer invariante θ y el esfuerzo de corte octaédrico τ_o

En esta figura se grafica mediante una escala de colores el módulo resultante para la subrasante de una estructura bajo la carga de un FWD aplicando 40 kN, en este caso los ensayos sobre la subrasante determinaron la siguiente ecuación constitutiva para valores expresados en Mega Páscals $E = 16.5 \theta^{0.34} \tau_o^{-0.58}$ y un módulo máximo de 75 MPa.

Se evidencia la variación del módulo en un caso particular poniendo en evidencia la necesidad del coeficiente C introducido por AASHTO (6) al pretender obtener el valor modular bajo la carga en base a sensores distantes del FWD (7).

Resulta interesante aquí plantear como solución alternativa, con un muy importante ahorro en tiempo de procesamiento, la consideración de la no linealidad a nivel capa. Consistente en atribuir a toda la capa el módulo correspondiente a la zona más solicitada y por lo tanto la que presenta las mayores deformaciones. La figura 6 muestra la gran similitud de las

elásticas de una estructura obtenidas por elementos finitos y por no linealidad a nivel capa bajo cuatro niveles de carga aplicados con un FWD (8).

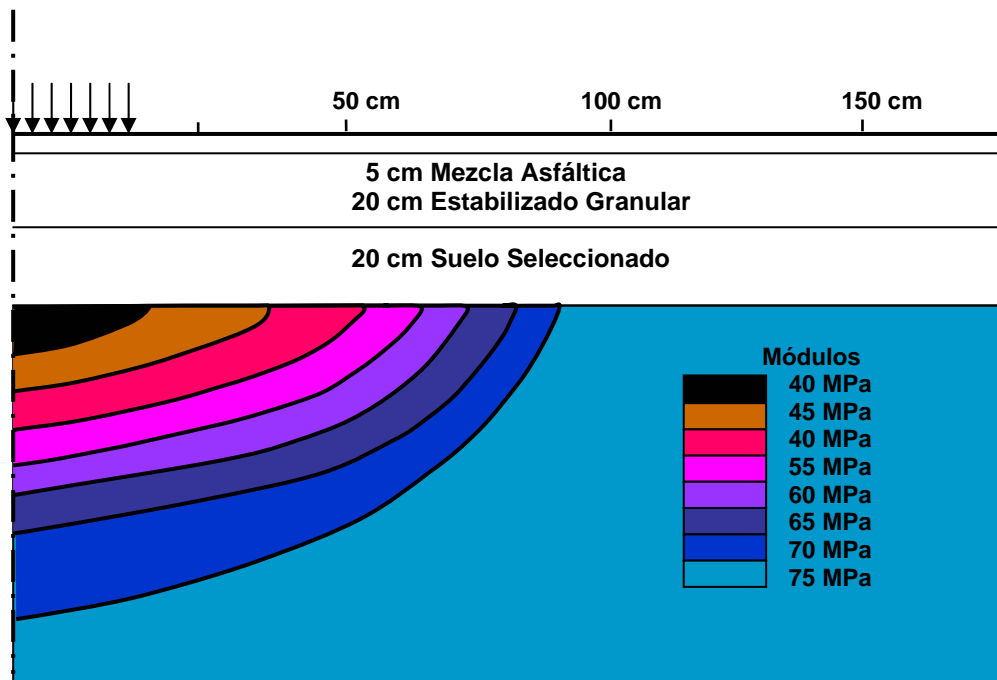


Figura 5. Módulo de la subrasante obtenidos por elementos finitos

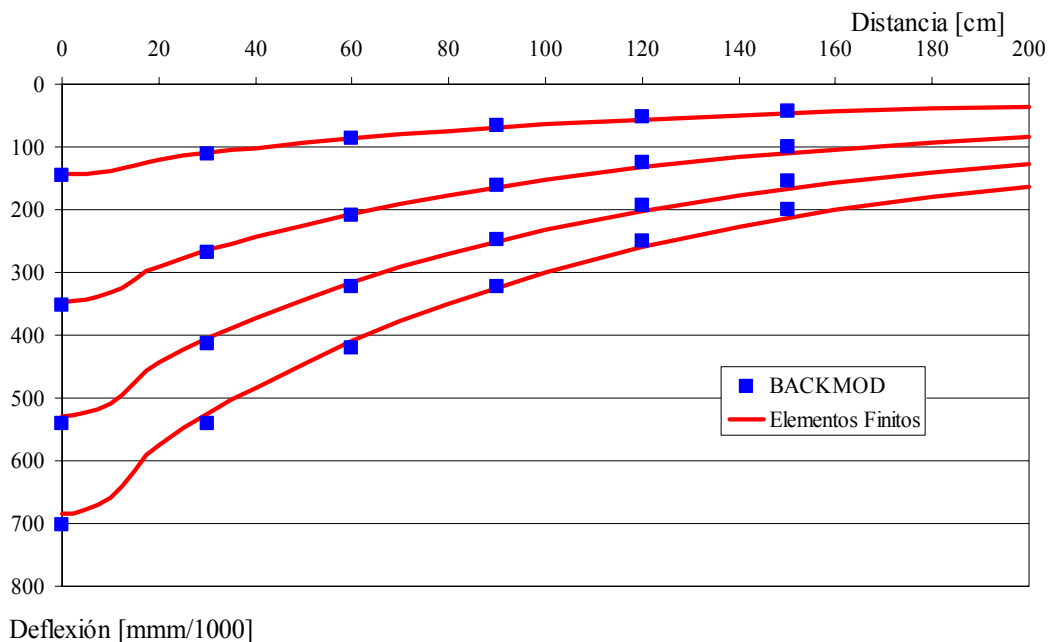


Figura 6. Comparación de cuencos en superficie para cuatro niveles de carga, para una simulación de medición con FWD.

Otro aspecto en el que se continúa investigando para lograr una más realista caracterización, es la anisotropía que presentan los materiales dada fundamentalmente por su forma de compactación, esta temática puede ser abordada conceptualmente por los diferentes modelos comentados. Siendo su mayor dificultad la implementación dentro de los ensayos de caracterización (9)(10).

2.3. Materiales Compuestos

En general los materiales son compuestos por diferentes materiales en contraposición con la habitual hipótesis de materiales homogéneos como se comentó, para considerar este aspecto se requiere un análisis de elementos finitos a nivel micro o la aplicación de micro-mecánica.

A modo de ejemplo citaremos el trabajo realizado por Waheed Uddin (11) referente al cálculo del módulo para diferentes tiempos de relajación de mezclas asfálticas en función de las características de los agregados y del asfalto. En este caso se aplica un modelo de micro mecánica desarrollado por Aboudi llamado método de celdas. La figura 7 muestra una comparación de módulos medidos y calculados por el modelo micro mecánico correspondiente a este trabajo.

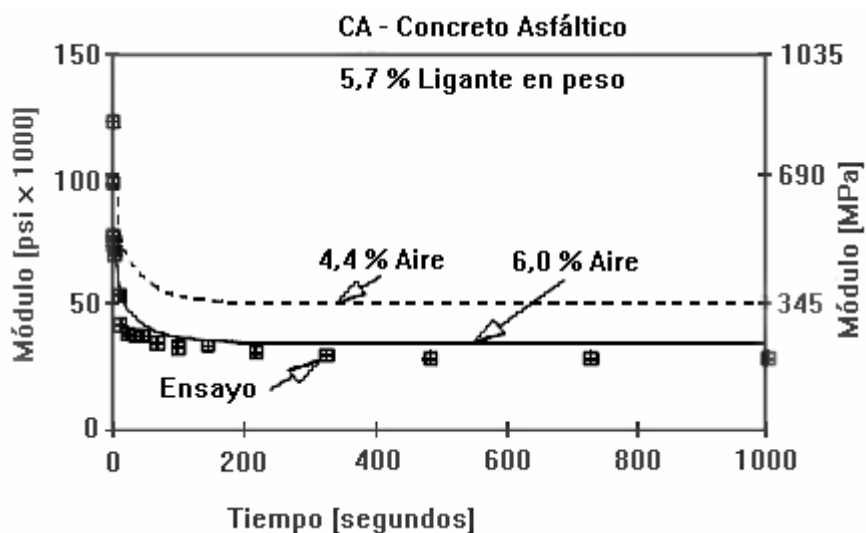


Figura 7. Comparación de módulos medidos y calculados por el modelo micro mecánico.

2.4. El entorno climático

El entorno climático motiva variaciones tanto de las temperaturas de trabajo como de los contenidos humedad, parámetros que sin lugar a dudas condicionan el comportamiento estructural.

La metodología más habitual consiste en la adopción de una condición representativa, ya sea promedio o ponderada, de manera de lograr que el daño producido en la estructura bajo las variables condiciones climáticas se aproxime al logrado manteniendo esta condición a lo largo del año. Esta temática resulta más crítica cuando a lo largo del año las cargas presentan una marcada heterogeneidad, circunstancia que es relativamente simple de considerar abandonando la solución de un caso y acumulando los daños de la estructura en los distintos períodos considerados, como actualmente se encuentra automatizado en diferentes programas mecanicistas de verificación de pavimentos.

2.5. Cambios con la Vida

Continuando con el análisis temporal planteado en el punto anterior existen otros aspectos que se modifican con el transcurso del tiempo y de los ciclos de carga acumulados sobre los materiales. Estas modificaciones plantean variaciones de las sollicitaciones y comportamiento respecto a las producidas en la estructura en condiciones iniciales, entre ellas se pueden nombrar:

- Deterioro modular de los materiales ligados
- Redistribución de tensiones
- Aparición y progreso de fisuras
- No linealidad en la acumulación de deformaciones plásticas
- Curado de materiales emulsionados
- Envejecimiento de asfalto de las mezclas
- Variación efectos dinámicos
- Tareas de mantenimiento
- Naturaleza aleatoria

Es difícil la exhaustiva consideración de la totalidad de estas variables pero el camino pasa por la incorporación dentro del modelo de intervalos temporales que abarquen la totalidad del período de diseño multiplicando apreciablemente el número de casos a resolver. La figura 8 muestra un esquema temporal genérico donde se ponen de manifiesto algunas de las interacciones requeridas.

Además del elevado esfuerzo computacional necesario para la inclusión de este análisis ya que se requiere la discretización de años de vida útil, la tarea que resulta ser realmente compleja es la fehaciente determinación de los modelos que representen cada uno de los efectos a considerar.

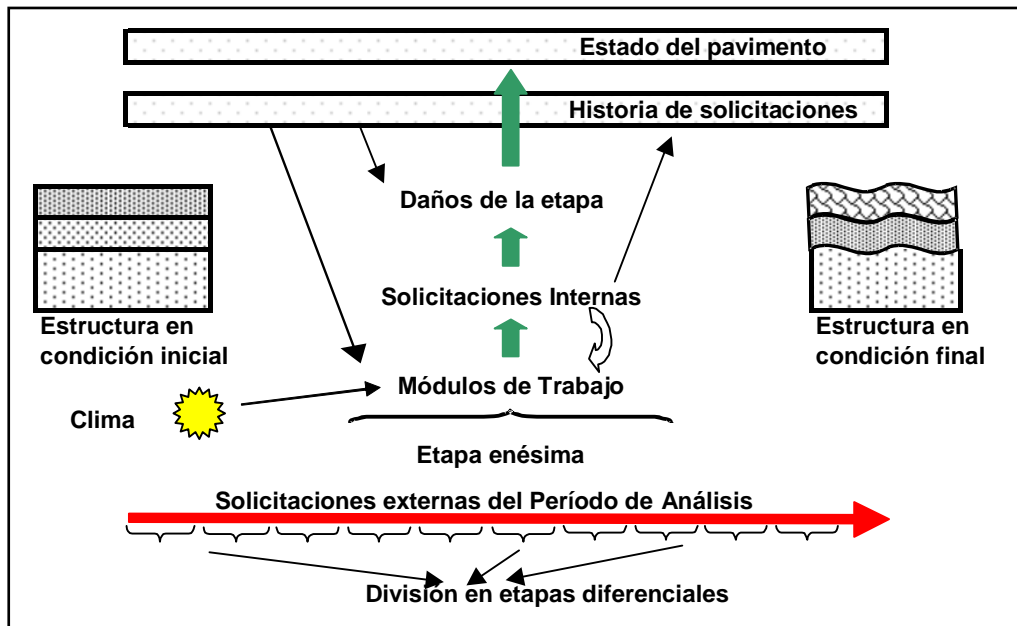


Figura 8. Esquema temporal genérico

Se puede citar aquí el programa desarrollado con anterioridad en el Laboratorio Vial del IMAE (12) (13) plan de investigación comenzado en 1996 y actualmente en proceso de ajuste y validación. A modo de ejemplo de resultados se muestra en la gráfica de la figura 9 la deformación específica máxima a lo largo del tiempo para uno de los casos resueltos.

En este mismo sentido la Guía para el Diseño Empírico Mecanicista de Estructuras Nuevas y Rehabilitaciones 2004 de la NCHRP auspiciada por AASHTO y otros (14) plantea un análisis mecanicista con el mismo espíritu de diferencias temporales y numerosos modelos que consideran los diferentes aspectos. Estos modelos sufrieron un primer ajuste y se están realizando actualmente esfuerzos para mejorar los modelos y recalibrar en base a datos de campo ampliados.

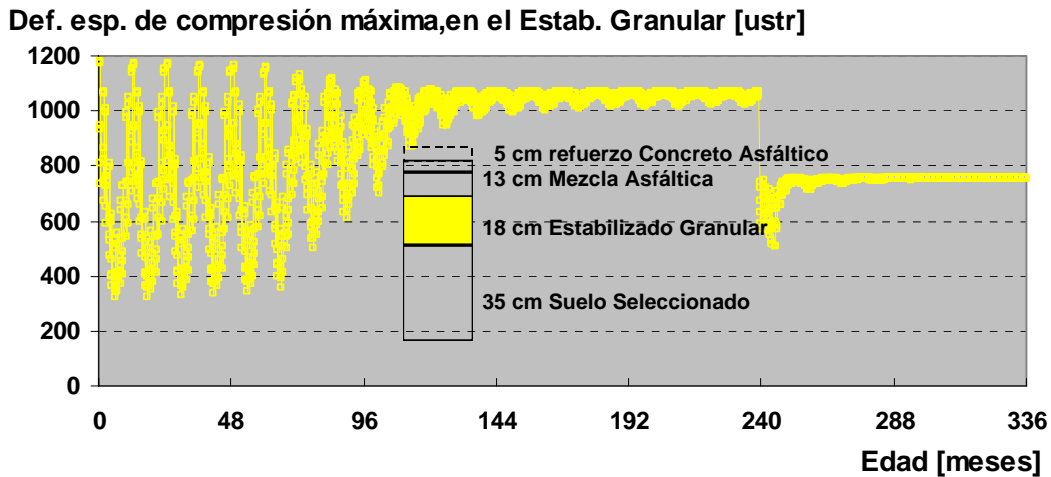


Figura 9. Variación de la deformación específica máxima de compresión en el Estabilizado Granular a lo largo de los años, según el modelo.

Un punto clave en este tipo de análisis es la diferencia de concepción de los criterios de falla considerando por ejemplo la fisuración. En un análisis mecanicista clásico se vincula el daño unitario de cualquier capa (la capa ligada que resulte crítica, aún si esta no es la de superficie), con un determinado estado terminal de la superficie del pavimento. Se integran en el proceso de fisuración estructural distintas etapas. En estos modelos de comportamiento mecanicistas se requiere un criterio diferente, por ejemplo asociar el daño unitario a la aparición de la primera fisura en el material y continuar acumulando el daño en cada punto por sobre la unidad. Si bien este planteo aproxima mejor la realidad del proceso en la estructura y su vinculación con los ensayos de laboratorio, obliga a poner de manifiesto la propagación de fisuras dentro de la estructura hasta la superficie y a modelar la vinculación del daño de la capa de superficie con la gravedad del estado de fisuración, problemática que se esquematiza en la figura 10.

2.6. Cargas Variables

Los diferentes fenómenos que motivan la aparición y progreso de los deterioros de una estructura como ser el cálculo de esfuerzos (dados por la carga y velocidad de circulación), la acumulación de deformaciones plásticas, el inicio de fisuras y el progreso de fisuras presentan en general no linealidad y difieren en su peso ponderal para los distintos materiales. Este hecho motiva que los de criterios de equivalencia entre distintos ejes sean dependientes del tipo de daño y material que se este analizando.

Estos conceptos cuestionan la posibilidad de definir un número de ejes equivalentes y plantean la necesidad de conocer las distribuciones en carga de cada uno de los tipos de ejes actuantes, sus distribuciones en el tiempo y tasas de crecimiento. Esta información es la que solicita en método Empírico Mecanicista AASHTO anteriormente nombrado para el nivel de datos más exhaustivo.

MODELO CLÁSICO	PROCESO DE FATIGA ESTRUCTURAL		MODELO INCREMENTAL
DAÑO MENOR QUE LA UNIDAD	ETAPA 1	SIN FISURAS	DAÑOS < 1
	ETAPA 2	PROGRESO DE LA FISURAS EN LA CAPA CRÍTICA	CONDICIONES DIFERENTES SEGÚN LA CAPA
	ETAPA 3	PROGRESO DE FISURAS HASTA LA CAPA DE SUPERFICIE	
	ETAPA 4	EVOLUCIÓN DE LAS FISURAS EN SUPERFICIE	
DAÑO = 1	ETAPA 5	DETERIORO LÍMITE	

Figura 10. Comparación de posibles criterios de falla

3. USO EN LA PRÁCTICA

Es necesario reconocer la distancia existente entre los estudios teóricos realizados y la aplicación cotidiana de estos conocimientos, entre las acciones que contribuirían a disminuir esta distancia se pueden citar:

- Propiciar una mayor contacto de los responsables de su aplicación con los ámbitos académicos donde estos conocimientos se generan y difunden.
- Fomentar la conciencia sobre la necesidad de datos fidedignos referentes a climas, tránsito y materiales. Implementando una ordenada documentación de los mismos dentro de adecuados sistemas de gestión.
- Subsana la falta de disponibilidad a nivel generalizado del equipamiento requerido para caracterizar los materiales según los requerimientos impuestos.

Respecto a los modelos planteados por la micro-mecánica y la aplicación de elementos finitos a nivel micro, estos presentan actualmente un importante desarrollo pero que se ven limitados al ámbito académico y de investigación presentando muy interesantes posibilidades para una realista análisis de los materiales, incluyendo aspectos estadísticos de distribución, estudios de mecánica de fractura, valoración de efectos dinámicos, acumulación de deformaciones, etc. Elementos que contribuirán a una mejor comprensión de los mecanismos de falla dentro de los materiales.

Pero estos estudios no podrán por el momento llevarse directamente al análisis de estructuras de pavimentos de no mediar un muy importante progreso en la capacidad de cálculo de los equipos informáticos.

Respecto a los modelos basados en soluciones al problema multicapa y la aplicación de elementos finitos a nivel macro, son sin duda los que están cobrando cada vez más protagonismo, Afortunadamente este protagonismo se ve acompañado de una toma de conciencia que no puede trabajarse a nivel teórico sin la apoyatura a nivel campo, y de ahí han surgido los métodos Empírico Mecanicista.

Esta dupla experiencia-teoría es tan importante que a medida que se profundicen y optimicen los modelos de aspectos individuales se requerirá la consideración de estos aspectos en relación a la correspondencia con las experiencias de campo, es decir valorar la necesidad de recalibrar los modelos vinculados al comportamiento.

4. COMENTARIOS FINALES

Se comentaron diferentes opciones para la adopción de modelos racionales tanto de estructuras reales en servicio, como para el minucioso análisis destinado al estudio de los materiales en laboratorio.

Se puso de manifiesto la complejidad de la realización de exhaustivos análisis del comportamiento estructural y la necesidad de profundizar en los conocimientos y técnicas de caracterización.

Se pone énfasis en la necesidad de reducir la distancia existente entre la práctica cotidiana de la Ingeniería Vial y los actuales Desarrollos logrados a nivel investigación.

Se espera que los actuales desarrollos de modelos como los de micro-mecánica arrojen la necesaria luz sobre los mecanismos internos que provocan las fallas de los materiales, posibilitando en un futuro optimizar el diseño y construcción logrando mayor certidumbre en las vidas útiles y menores costos globales.

5. BIBLIOGRAFÍA

- (1) "Application of Viscoelastic Analysis of Asphalt Concrete in Indirect Tensile Test". International Journal of Pavements Maintenance and rehabilitation of pavements and technological control – Volume 2 Number 3 September 2003. Haifang Wen.
- (2) "The characterization of pavement layer interfaces". 9º Conferencia Internacional de Pavimentos Asfálticos Copenhagen 2002. Stefan A. Romanoschi y John B. Metcalf.
- (3) "On the Resilient Behaviour of Unbound Aggregates". Fifth International Symposium on Unbound Aggregates in Roads, Nottingham, United Kingdom junio 2000. Walaa E. Khogali y Morched Zeghal.
- (4) "Modelos y Enfoques para Problemas con Acoplamiento de Micro y Macro Estructuras" Mecánica Computacional Vol. XXII, Argentina, Noviembre 2003. Luis A. Godoy.
- (5) "Evaluation of Nonlinear and Dynamic effects on Asphalt Pavement Response Under FWD Loading". International Journal of Pavements, volume 2, number 1-2, January – May 2003. Karim Chatti y otros.
- (6) "AASHTO Guide for Design of Pavement Structures-1993". American Association of State Highway and Transportation Officials de los Estados Unidos de América.
- (7) "Estimación del valor "c" incluido en el método AASHTO-93 para el retro-cálculo modular de la sub-rasante. Caso práctico.". XXXIII Reunión del Asfalto", noviembre de 2004, Mendoza. Ernesto Urbaez, Jorge Lockard, Oscar Giovanon y Fabián Schvartzer.
- (8) Backcalculation of Moduli Using "BACKMOD" Program
Fourth International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, 2005. Oscar Giovanon y Marta Pagola.
- (9) "Effects of fines Content on the Anisotropic Response and Characterization of Unbound Aggregate Bases". Fifth International Symposium on Unbound Aggregates in Roads, Nottingham, United Kingdom junio 2000. E. Tutumluer y U. Seyhan.
- (10) "Simple Methods to Estimate Inherent and Stressinduced Anisotropic Levels of Aggregate Base". TRB 2005 Annual Meeting CD-ROM. S. Kim, D. Little, y E. Masad.
- (11) "A Micromechanical Model for prediction of Creep Compliance and Viscoelastic Analysis of Asphalt Pavements". 2nd International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of

Pavements and Technological Control, July 29 – August 1, 2001, Auburn, Alabama, USA.
Waheed Uddin.

(12) "Modelo mecanicista de deterioro de pavimentos flexibles.". XXX Reunión del Asfalto, Mar del Plata, noviembre de 1998. Oscar Giovanon y Marta Pagola.

(13) "Mechanistic performance model to design flexible pavements". International Journal of Pavements Maintenance and rehabilitation of pavements and technological control – Volume 1 Number 1 January 2002. Oscar Giovanon y Marta Pagola.

(14) "Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures" 2004. www.trb.org/mepdg/guide.htm. National Cooperative Highway Research Program Transportation Research Board National Research Council.