

Aspectos Relevantes en los Criterios de Falla

O. Giovanon y M. Pagola

Universidad Nacional de Rosario, Argentina

RESUMEN: Los criterios de falla son utilizados en los modelos mecanicistas para la verificación/diseño de pavimentos, estos requiere la utilización de modelos que vinculen los esfuerzos generados en los materiales con los deterioros manifestados en la superficie de la calzada. Las simplificaciones adoptadas en los modelos, conjuntamente con incertidumbres existentes en los detalles presentes en los mecanismos de deterioro, impiden al presente sustentar la caracterización de la estructura sólo con ensayos de laboratorio de los materiales individuales. Este hecho se enfatiza en la actualidad cuando se plantea el requerimiento de complementar los deterioros puramente estructurales (fisuración y ahuellamiento) con los vinculados al punto de vista del usuario (rugosidad y adherencia neumático calzada), motivando un aumento de la componente empírica de los mismos. Este hecho se reconoce mediante un cambio de denominación como metodologías empírico mecanicistas. En el presente trabajo se plantea la relación existente entre los conceptos utilizados en los métodos de diseño empírico mecanicistas y los criterios de falla utilizados, destacando los aspectos más relevantes a tener presentes en la definición de los mismos y que plantean dificultades al pretender adoptar criterios ajenos.

1 INTRODUCCIÓN

Un Sistema de Administración de Carreteras debe estar constituido por un conjunto de elementos que guarden una armónica relación entre sí, entre ellos podemos citar: las especificaciones técnicas, las metodologías constructivas, los materiales disponibles, las metodologías de diseño.

En este sentido, por ejemplo, resulta un error la incorporación de especificaciones técnicas de otros países que no guarden relación con los materiales o las metodologías constructivas disponibles localmente.

Similar conflicto surge en los criterios de falla, no resultando posible la adopción de criterios ajenos sin un profundo análisis de las discreciones adoptadas en su determinación. En el presente trabajo se aborda esta temática, acotando los aspectos más relevantes a tener presentes en la definición de estos criterios y en la comparación de los criterios propios con otros preexistentes o los obtenidos de ensayos de laboratorio.

Lo expresado en este trabajo resulta de la experiencia de los autores en el desarrollo y ajuste de modelos tanto empíricos como racionales sobre la base del comportamiento de rutas reales en servicio con diferentes características estructurales y tránsito.

2 LOS MODELOS DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS

El proceso de modelización estructural consiste en el planteo de un símil del complejo Sistema que presenta la Realidad, en un modelo matemático, donde se adoptan parámetros representativos de los distintos aspectos de la Realidad con el fin de poder predecir su respuesta en el tiempo frente a diferentes condicionantes externas e internas, esquematizado en la Figura 1.

Particularmente, en los problemas ingenieriles se destacan entre estos parámetros aquellos que pueden ser modificados por el proyectista, constituyendo las variables del diseño, que dan origen a las diferentes alternativas. Alternativas que serán comparadas técnica económicamente para la adopción de la solución del problema.

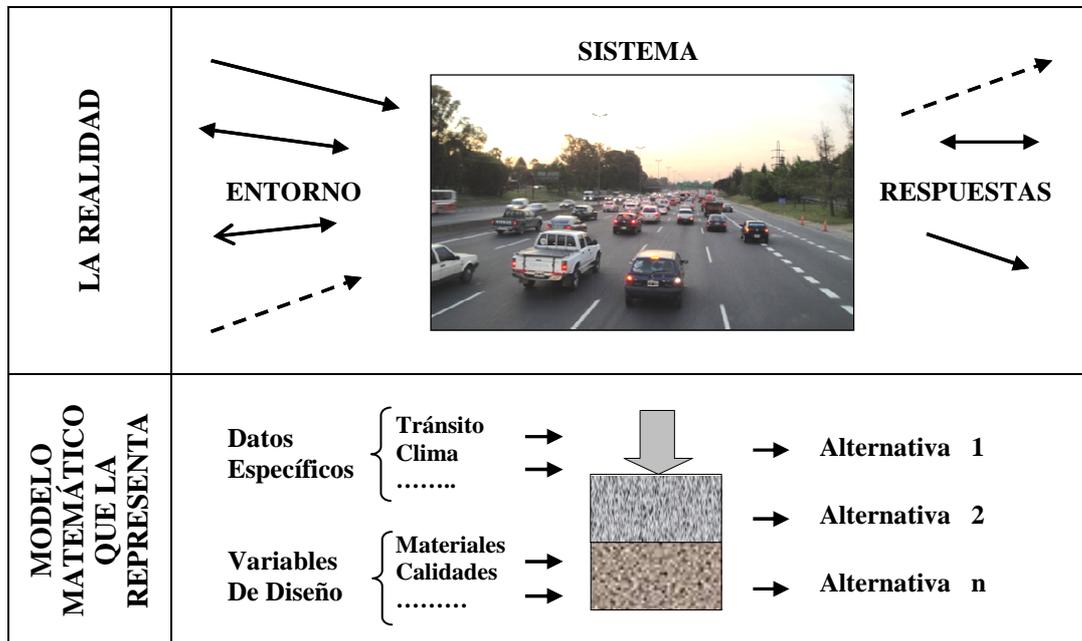


Figura 1. Esquema del proceso de modelización.

Se denominan modelos empírico mecanicistas a aquellos que sustentan sus hipótesis de comportamiento dentro de la mecánica aplicada, que relacionan los deterioros estructurales con los esfuerzos (tensiones, deformaciones, desplazamientos,...) que las cargas y el clima imponen a los distintos puntos de la estructura, y haciendo uso de los resultados de experiencias de campo ajustan estos deterioros con la realidad.

Dentro de este enfoque y dada la complejidad de la Realidad se recurre habitualmente a distintos grados de simplificación del Modelo Estructural, existiendo una amplia gama de posibilidades, yendo desde el modelo de capas elásticas lineales en condiciones estructurales iniciales y con esfuerzos calculados para sólo una condición considerada representativa, hasta modelos dinámicos no lineales que consideran la estacionalidad y el progresivo daño de cada material estructural interviniente.

Pueden diferenciarse particularmente dos tipos de modelos estructurales, que se denominarán Iniciales e Incrementales:

- Los modelos Iniciales valoran solamente los esfuerzos presentes en la estructura en momentos próximos a su construcción y, en general, plantean a los diferentes materiales constitutivos en su condición íntegros, sólo con la excepción de aquellos materiales cementados muy frágiles que prácticamente inician su vida en condición fisurada.
- Los modelos Incrementales pretenden simular las variaciones de comportamiento que tienen los materiales a lo largo de la vida útil, lo que ocasiona una redistribución de los esfuerzos iniciales.

2.1 Los criterios de falla

Obtenidos los esfuerzos en el modelo mecanicista empírico adoptado, los Criterios de Falla consisten en las relaciones usadas para calcular el tiempo en que se producen los deterioros, bajo las tensiones y/o deformaciones impuestas por el tránsito y el clima.

En los modelos Iniciales, estos consisten en una función que relaciona las tensiones y deformaciones existentes en cada material con el número de reiteraciones admisibles para la falla de la estructura. Un factor importante que no siempre es claramente explicitado en este enfoque es

que nivel de deterioro final está asignado a la condición de falla.

En su lugar, en los modelos Incrementales, los criterios de falla dejan de ser una única función y pasan a ser un modelo de análisis, pues se tiene que explicitar tanto la acumulación del daño en cada material como las variaciones que su historia de tensiones determina en su comportamiento, y finalmente, de acuerdo al deterioro de superficie a considerar, puede requerirse una función que brinde el modelado de este deterioro a partir del estado de los materiales y eventualmente de otros deterioros.

Los criterios de falla obtenidos en ensayos de laboratorio no pueden ser directamente aplicables en los modelos, ya que en su determinación se realizan un conjunto de simplificaciones que no se corresponden directamente con la realidad, como ser las diferencias en el estado de tensiones.

La determinación de los criterios de falla o el ajuste de estos a partir de tendencias obtenidas en laboratorio se realiza sobre la base del comportamiento de estructuras a escala real. Procedimiento que 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 o en pistas de ensayo especialmente diseñadas para tal fin.

2.2 Ajuste de criterios/modelos

Los criterios de falla tienen que reconocerse como uno de los aspectos integrantes del Sistema de Administración de Carreteras vigente, existen por lo tanto gran cantidad de particularidades en cada Sistema específico, que condicionan estos criterios. Pese a lo cual pueden identificarse aspectos generales, que condicionan y diferencian los resultados obtenidos.

Estos aspectos condicionantes son forman parte del planteo de ajuste de criterio, esquematizado en la Figura 2, están asociados a las hipótesis generales del modelo estructural, a particularidades locales de los materiales, del tránsito, del clima y/o a las metodologías presentes en el relevamiento de los deterioros.

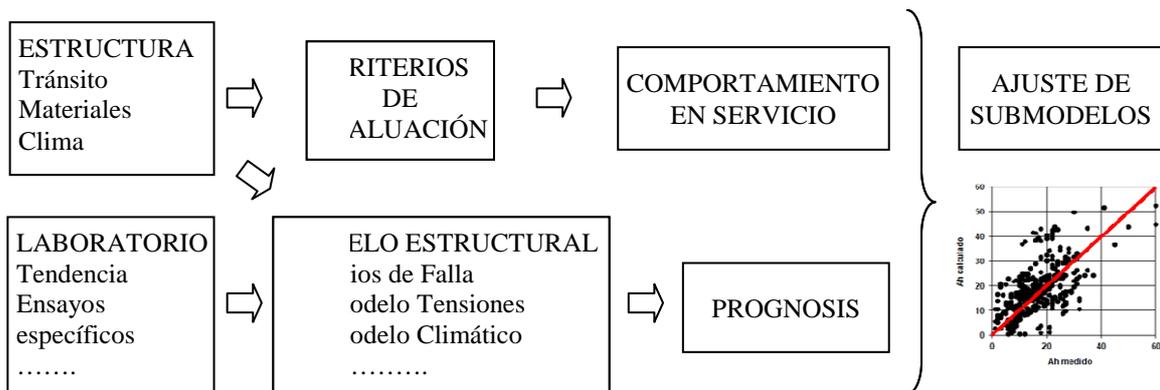


Figura 2. Esquema del proceso de ajuste de criterios/modelos.

3 INFLUENCIA DE ASPECTOS PARTICULARES

Como se acotó previamente son diversos los aspectos particulares presentes en el proceso de ajuste que condicionan y modifican los criterios/modelos de falla obtenidos. Se comentan a continuación, a modo de ejemplo, algunos de estos aspectos:

- Distribución lateral de cargas
- Criterio de Fisuración
- Equivalencia de cargas, eje de referencia
- Criterios estadísticos
- Metodologías de medición
- Criterios de falla desde el punto de vista del usuario

3.1 Distribución lateral de cargas

Es común, que los métodos de diseño adopten la simplificación de considerar que las cargas del tránsito pasen todas concentradas en una línea en el carril de circulación. Si se abandona esta simplificación y se opta por representar la distribución lateral de las cargas mediante una función de probabilidad, resultará que el daño ocasionado por las cargas se distribuirá en diferentes puntos dentro de la estructura y en consecuencia resultará un menor daño crítico. En la Figura 3 se muestra este aspecto para un eje de ruedas duales:

- en la parte superior, la distribución lateral de las cargas siguiendo una distribución de Laplace, como un histograma de frecuencias.
- en la parte inferior, la deformación específica de tracción en la parte inferior de una capa asfáltica ϵ_t , donde cada curva representa distintos espesores de capa asfáltica.

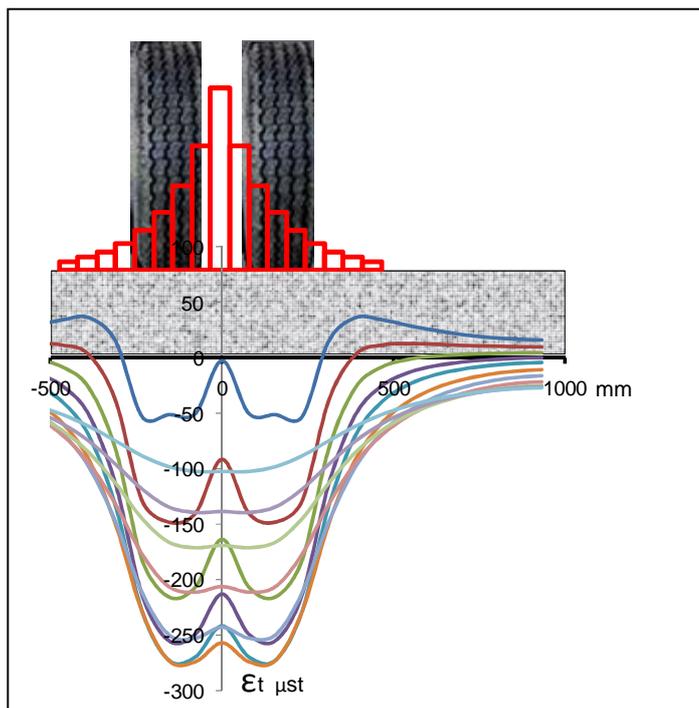


Figura 3. Distribución lateral de las cargas y deformaciones específicas de tracción para distintos espesores de capa asfáltica.

Para ejemplificar la influencia de la distribución lateral de las cargas se realizó un análisis teórico referido al submodelo de inicio de fisuras en una mezcla asfáltica para condiciones constantes de frecuencia y temperatura. En la Figura 4 se encuentra graficada la variación obtenida en el submodelo. Con línea continua se muestra el criterio considerando la variación lateral de las cargas, y con línea de trazo el criterio considerando que todas las cargas pasan por el mismo lugar. Dado que el comportamiento real respecto al cual realizar el ajuste es único, los submodelos son diferentes, y se obtienen menores reiteraciones admisibles cuando se considera la distribución lateral de cargas, para un mismo nivel de deformación específica.

En este análisis existe también una variación de la susceptibilidad de los materiales respecto al nivel de deformaciones, evidenciado por los exponentes de las curvas obtenidas en el análisis teórico. Esto está asociado a que para mayores profundidades es menor la influencia de la distribución lateral y también son menores las tensiones provocadas por las cargas.

Este aspecto, ejemplificado desde el punto de vista de la fisuración, también tiene influencia en el criterio de falla por ahuellamiento.

La consideración de este aspecto en el modelo de análisis estructural, logrará una reducción en la dispersión entre mediciones y predicciones y por lo tanto un mejor acercamiento a la predicción del comportamiento estructural.

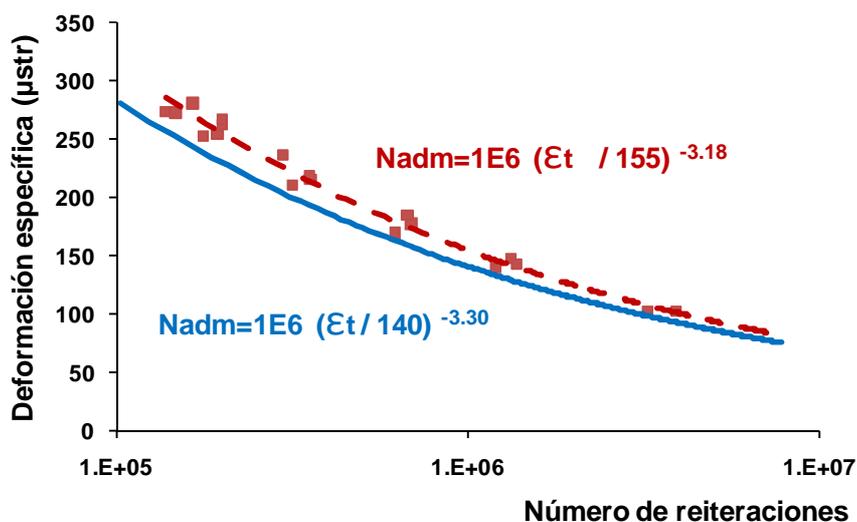


Figura 4. Submodelo inicio de fisuras para una mezcla asfáltica con distinta consideración de la distribución lateral de cargas

3.2 Criterios de fisuración

3.2.1 Modelos iniciales:

En los Modelos Iniciales se asigna la falla por fisuración a la capa en la cual el número de reiteraciones admisibles resulta mínimo, y no siempre en estos modelos se expresa claramente la condición final de falla (tipo y porcentaje de fisuras).

Aunque esta formulación no es excluyente, habitualmente en las mezclas asfálticas, se expresan fórmulas del tipo de la Ecuación 1, que incorporan o no aspectos volumétricos, pero no se incorpora dentro de la misma el estado final considerado.

$$Nadm = \left[\left(\frac{\mathcal{E}_t}{\mathcal{E}_{t6}} \right) * \left(\frac{E}{E_r} \right)^a * \left(\frac{A_r}{A} \right) \right]^b \quad (1)$$

Donde \mathcal{E}_t = deformación específica de tracción en la capa; \mathcal{E}_{t6} = deformación específica de tracción para la cual soporta un millón de reiteraciones; $Nadm$ = número de millones de reiteraciones admisibles; E = módulo dinámico; A = porcentaje de asfalto en volumen; E_r = módulo de referencia y A_r = porcentaje de asfalto de referencia; y a y b = coeficientes de susceptibilidad.

La Ecuación 2 generaliza la expresión anterior incorporando el deterioro de superficie como un factor adicional en la ecuación.

$$Nadm = \left[\left(\frac{\mathcal{E}_t}{\mathcal{E}_{t6}} \right) * \left(\frac{E}{E_r} \right)^a * \left(\frac{A_r}{A} \right) * \left(\frac{F}{F_r} \right)^c \right]^b \quad (2)$$

Donde F = porcentaje de fisuras en superficie declarado como crítico; F_r = valor de referencia y c = factor de susceptibilidad.

El planteo de modelos iniciales no invalida la consideración de períodos, pudiendo representar en ellos las diferentes condiciones del clima y/o del tránsito. En cuyo caso el número de reiteraciones admisibles para la falla se obtendrá por medio de la acumulación de los daños de los diferentes períodos expresada en general con una fórmula como la mostrada en la Ecuación 3.

$$Daño_i = \frac{N_i}{Nadm_i} \quad (3)$$

Donde $Daño_i$ = daño de un período genérico; N_i = número de reiteraciones en el período y $Nadm_i$ = número de reiteraciones admisible para la sollicitación del período i .

3.2.2 Modelos incrementales:

En los modelos incrementales se tienen que expresar una serie de submodelos hasta poder arribar a la valoración de la condición de falla en superficie.

El inicio de la fisura se expresa mediante la acumulación de los daños de los diferentes períodos temporales con una fórmula del tipo de la Ecuación 1, los coeficientes variarán aproximándose a los valores obtenidos en laboratorio ya que en este caso el daño unitario se corresponde con el inicio de la fisura y no a una condición de deterioro de la superficie como el caso anterior.

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 criterio de falla pueden diferenciarse cuatro etapas de fisuración. En la Figura 5 se esquematizan las etapas de la fisuración de abajo hacia arriba, como la evolución en una estructura con dos capas asfálticas y se resumen en forma simplificada en los siguientes puntos:

- Etapa 1. Estructura sin fisuras (daño menor que la unidad en todo punto, submodelo inicio de fisuras).
- Etapa 2. Capa asfáltica inferior con fisura en progreso (daño mayor que la unidad en una zona de la capa, submodelo progreso de fisuras).
- Etapa 3. Capa asfáltica inferior totalmente fisurada (daño mayor que la unidad en toda la capa, motivando concentración de tensiones en las capas adyacentes, submodelo concentración de tensiones).
- Etapa 4. Estructura con fisura en superficie (daño mayor a uno en superficie, se requiere otro submodelo, función de transferencia que calcule la cantidad de fisuras en función del valor del daño en superficie).

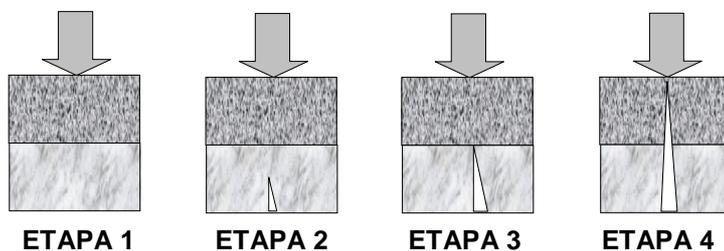


Figura 5. Esquema de las etapas de fisuración en una estructura con dos capas asfálticas.

3.2.3 Comparación de criterios:

Dado que en ambos modelos y en los ensayos de laboratorio es aplicable la Ecuación 1, es posible la comparación de los criterios sobre la base de los parámetros de la misma. En la Figura 6 se grafica, para una mezcla asfáltica convencional y en base a ajustes realizados con modelos desarrollados y ajustados por los autores del trabajo en trabajos previos, la deformación específica vertical $\mathcal{E}t6$ en micro deformaciones requerida para soportar un millón de reiteraciones con condiciones fijas del resto de los parámetros (módulo de la mezcla asfáltica = 2500 MPa, porcentaje de asfalto en volumen = 11 %, condiciones medias y sin consideración de distribución lateral de cargas). El valor de $\mathcal{E}t6$ indicado como del ensayo de laboratorio corresponde a ensayo fatiga en tracción por compresión diametral a tensión controlada.

La gráfica se plantea con el objetivo de enfatizar sobre el concepto referido a la existencia de diferentes valores para un mismo parámetro, enfatizando la necesidad de ajustar los valores obtenidos de ensayos de laboratorio, y para analizar la coherencia de las diferencias encontradas, en

el valor de ϵ_{t6} , parámetro habitualmente utilizado como ajuste de los criterios de falla para diferentes condiciones.

Puede observarse que el valor de ϵ_{t6} del modelo asociado a condiciones iniciales disminuye su valor al considerar menor porcentaje de fisuras en superficie como condición crítica, aproximando su valor al correspondiente al modelo incremental. Es correcto que se logre esta aproximación sin llegar al valor del modelo incremental. Esta diferencia corresponde a que el valor indicado para el modelo incremental se corresponde con la aparición de la fisura en la parte inferior de la capa, restando la consideración de la propagación hasta la superficie.

Una consideración especial merece el valor obtenido en laboratorio, correspondiente al inicio de fisuras, que dista de los anteriores. Esta diferencia puede adjudicarse a un conjunto de características, entre ellas se cita como relevante la diferencia en el estado de tensiones, dado que en servicio el estado de tensiones es triaxial y en el ensayo de laboratorio se corresponde con un estado plano de tensiones, originado en este ejemplo en un ensayo de tracción por compresión diametral a tensión controlada.

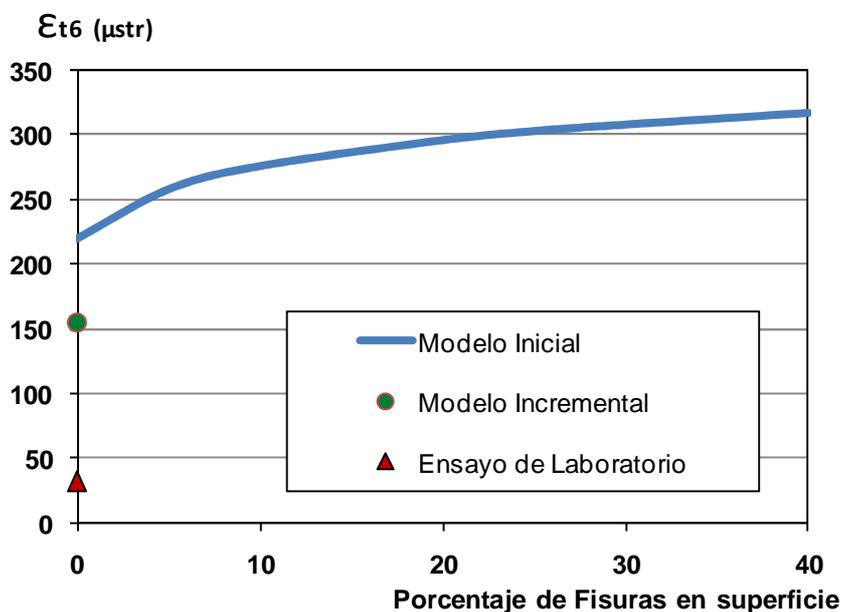


Figura 6. Variación de ϵ_{t6} según distintos criterios de análisis

Surge aquí la discusión de cuál es el criterio de falla adecuado para poner de manifiesto la falla, quizás algún criterio más complejo basado en la energía disipada, pero que requiere de mayor esfuerzo computacional dificultando momentáneamente su implementación en un modelo de diseño de uso generalizado.

En este mismo sentido resulta justificable la adopción de criterios diferentes para la representación de la fisuración de abajo hacia arriba o de arriba hacia abajo, ya sea que se trate de modelos Incrementales o Iniciales.

3.3 Equivalencia de cargas, eje de referencia

Este aspecto también corresponde a las hipótesis del modelo aplicado para el cálculo del efecto destructivo del tránsito. Esta simplificación consiste en simular las cargas del tránsito real como la aplicación reiterada de un eje de referencia. La definición de un eje de referencia resulta una hipótesis práctica y muchas veces sustentada en la falta de conocimiento del espectro de cargas correspondiente a los diferentes ejes actuantes.

Además, el cálculo del número de ejes equivalentes requiere la definición de la equivalencia en efecto destructivo de las distintas cargas respecto a algún deterioro en particular, difiriendo esta equivalencia con el deterioro analizado (fisuración, ahuellamiento, pulimento de los áridos, etc.).

Al adoptar entonces una única relación de equivalencia, se prioriza un determinado tipo de deterioro, mejorando el ajuste del mismo en detrimento de los demás.

Si no se abandona el eje de referencia, los criterios /modelos estarán entonces influenciados en mayor grado por el espectro de carga de los sitios donde estos fueron ajustados.

3.4 Criterios estadísticos

Este aspecto corresponde al parámetro estadístico del deterioro empleado en el proceso de ajuste del modelo. Siempre resultará trascendente si se trabajó a partir de valores medios y se ajustó también a valores medios y con qué grado de dispersión se logró el ajuste, permitiendo así al usuario la aplicación de su propio criterio para el planteo de una cobertura sobre su caso particular.

Pudiendo acontecer que quizás ya exista en el criterio planteado un cierto grado de confianza no claramente explicitado, brindando este modelo vidas inferiores a la media con algún grado de cobertura adoptado por el desarrollador del criterio.

3.5 Metodologías de medición

Este aspecto corresponde a los procedimientos y criterios utilizados en las metodologías de medición condicionando los valores relevados al procedimiento metodológico. Para una más clara descripción de este aspecto se considera adecuado ejemplificar.

Si un criterio de ahuellamiento fue ajustado para la valoración de este parámetro con respecto a una regla de tres metros de longitud brindará predicciones sistemáticamente algo superiores al pretender aplicarlo para la medición de este mismo parámetro con regla de 1.20 metros (parámetro utilizado en Argentina).

Interactuando con el aspecto estadístico anteriormente mencionado tendrá que considerarse si se desea predecir el ahuellamiento máximo o el medio del sector analizado.

Otro posible ejemplo surge de las consideraciones metodológicas realizadas para obtener a partir de elementos lineales como las fisuras un porcentaje de área representativa de las mismas, donde cada metodología adopta distintos anchos (por ejemplo: 50 cm ó 1 m).



Figura 7. Diferentes metodologías de evaluación

3.6 Criterios de falla desde el punto de vista del usuario

Abordados precedentemente los criterios de falla más vinculados al comportamiento mecanicista, se engloban aquí al resto de criterios de falla, no menos trascendentes, pero que distan de ser valorados en forma directa por un análisis de tensiones y deformaciones.

Como se recalcó previamente, si bien los criterios de fisuración y ahuellamiento requieren el ajuste en base a determinaciones de campo, en estos se enfatiza aún más, siendo directamente planteados a partir de estas observaciones, o son el resultado del ajuste de funciones donde intervienen un conjunto de otros criterios con su respectivo peso relativo.

Un ejemplo claro de este criterio lo constituye el criterio utilizado para el deterioro rugosidad, donde el modelo usualmente planteado se muestra en la Ecuación 4.

$$IRI = IRI_0 + a_0 \cdot f(edad) + \sum a_i \cdot g_i(D_i) \quad (4)$$

Donde IRI = rugosidad en unidades internacionales; IRI_0 = valor inicial de rugosidad; $f(edad)$ = variación de la rugosidad en función de la edad; $g(D_i)$ = variación en función de diferentes deterioros D_i ; y a_i = coeficientes de ajuste.

Cada uno de estos deterioros D_i es a su vez obtenido por algún otro modelo, algunos de ellos mecanicistas.

Este tipo de expresiones fueron inicialmente planteadas en los modelos de evolución de deterioros del programa HDM en sus diferentes versiones, y actualmente adoptadas en los modelos incrementales incluido el desarrollado por AASHTO en el proyecto NCHRP 1-37A, planteando diferentes ecuaciones para distintas tipologías estructurales y sus respectivos modos de falla. Estas adaptaciones a los tipos estructurales simplifican las respectivas ecuaciones pero vuelven a introducir una componente regional, como ejemplo, en estructuras asfálticas reforzadas se deja de lado el término asociado al ahuellamiento, hecho que en países como Argentina no resulta un criterio adecuado.

4 OBSERVACIONES FINALES

Se puso de manifiesto la necesidad del ajuste de los criterios de falla dado que estos son el resultado de las hipótesis generales de los modelos donde fueron determinados, de las particularidades locales de los materiales, de las técnicas constructivas y de las metodologías presentes en el relevamiento de los deterioros.

El desarrollo de modelos cada vez más sofisticados permite una más realista representación de la compleja realidad estructural, contribuyendo así a disminuir las importantes dispersiones existentes entre las predicciones y el comportamiento en servicio.

Estas mejoras permiten la progresiva disminución de las diferencias existentes entre las ecuaciones que representan las fallas en laboratorio y en servicio. Pero como resultado de las diferentes simplificaciones asumidas en los modelos los resultados de ensayo de laboratorio no pueden ser directamente aplicables para la determinación de los criterios de falla.

5 REFERENCES

- Argentina National Road Administration. 1981. Methodology for pavement evaluation. Argentina.
- Autret, P., Brousse, J.L. 1994. VIZIR: methodology for asphalt pavement evaluation. *LCPC magazine, special number XVII*.
- FHWA. 2003. Distress Identification Manual for the Long-term Pavement Performance Program. *FHWA-RD-03-031*.
- Giovanon O. & Pagola M. 1997. Road materials failure criteria. *XII Road and Transit Congress*. Argentina.
- Giovanon O. & Pagola M. 1998. Mechanistic deterioration model of asphalt pavement. *XXX Asphalt annual meeting*. Argentina.
- Giovanon O. & Pagola M. 2001. Mechanistic performance model to design flexible pavements. Second international symposium on maintenance and rehabilitation of pavements and technological control. USA.
- Giovanon O. & Pagola M. 2005. Structural models for pavement design. *XIII CILA*. Costa Rica.
- Transport Institute. California University. Berkeley. 1990. Summary Report on Fatigue Response of Asphalt Mixtures. *SHRP-A/IR-90-011*.
- National Cooperative Highway Research Program 1-37A. 2004. Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. www.trb.org/mepdg/guide.htm.
- Shell International Petroleum Company Limited. 1985. Shell Pavement Design Manual. London.

- Sun L. J., Su K., Liu L.P., Tang W., Lu Z. L. 2010. Development of Shear-based Rutting Prediction Model for Asphalt Pavements. *The 11th International Conference on Asphalt Pavements*. Nagoya.
- Word Bank, Transportation Department, Washington, D.C. 2000. Highway Design and Maintenance Standards Model (HDM 4), Volume IV, Model Description and User's Manual.