

LOS MODELOS RACIONALES DE DISEÑO – CRITERIOS DE FALLA

1. EL PROCESO DE DETERIORO ESTRUCTURAL

El abordaje de la problemática del diseño – verificación parte del conocimiento del proceso de deterioro estructural. Los elementos que afectan en forma significativa el comportamiento estructural pueden agruparse dentro de los siguientes aspectos:

- Materiales
- Tránsito
- Ambientales
- Constructivos
- Mantenimientos

Estos aspectos son en mayor o menor grado considerado por los diferentes métodos de diseño – verificación. Desde los primeros planteos se diferenciaron dos líneas de desarrollo metodológicos, las elaboradas basándose fundamentalmente en experiencias y las que presentan una preponderancia de una base teórica con sustento de la mecánica.

El complejo comportamiento real de las estructuras viales será entonces aproximado por modelos que podrían catalogarse como Empíricos o como Mecanicistas de acuerdo al aspecto que se le otorgó mayor peso en su desarrollo. El planteo clásico de estas dos tipos de aproximaciones se comentará en puntos siguientes.

Continuando con la descripción de la problemática del comportamiento en servicio, en la Figura 1 se ponen de manifiesto, en forma esquemática, los distintos elementos que interactúan para arribar a una determinada evolución de la condición de la superficie de la calzada, que es la que finalmente define su aptitud como vía de comunicación.

Queda claro a partir de la observación de este esquema que, en la realidad, **el conjunto de los parámetros que caracterizan el estado de la superficie no evoluciona en forma aislada, sino mediante una interacción entre ellos, otros elementos y el estado previo del conjunto.**

Se evidencia además desde el punto de vista del usuario múltiples causas que determinan en conjunto la aptitud del pavimento; o incluso pueden motivar su ruina en forma individual dependiendo del grado de deterioro alcanzado.

En la Figura 1 se indicó en verde los aspectos o fenómenos que condicionan el proceso y en color rojo los parámetros de superficie que determinan la aptitud del pavimento, estos son:

- Fisuración
- Ahuellamiento
- Desprendimientos

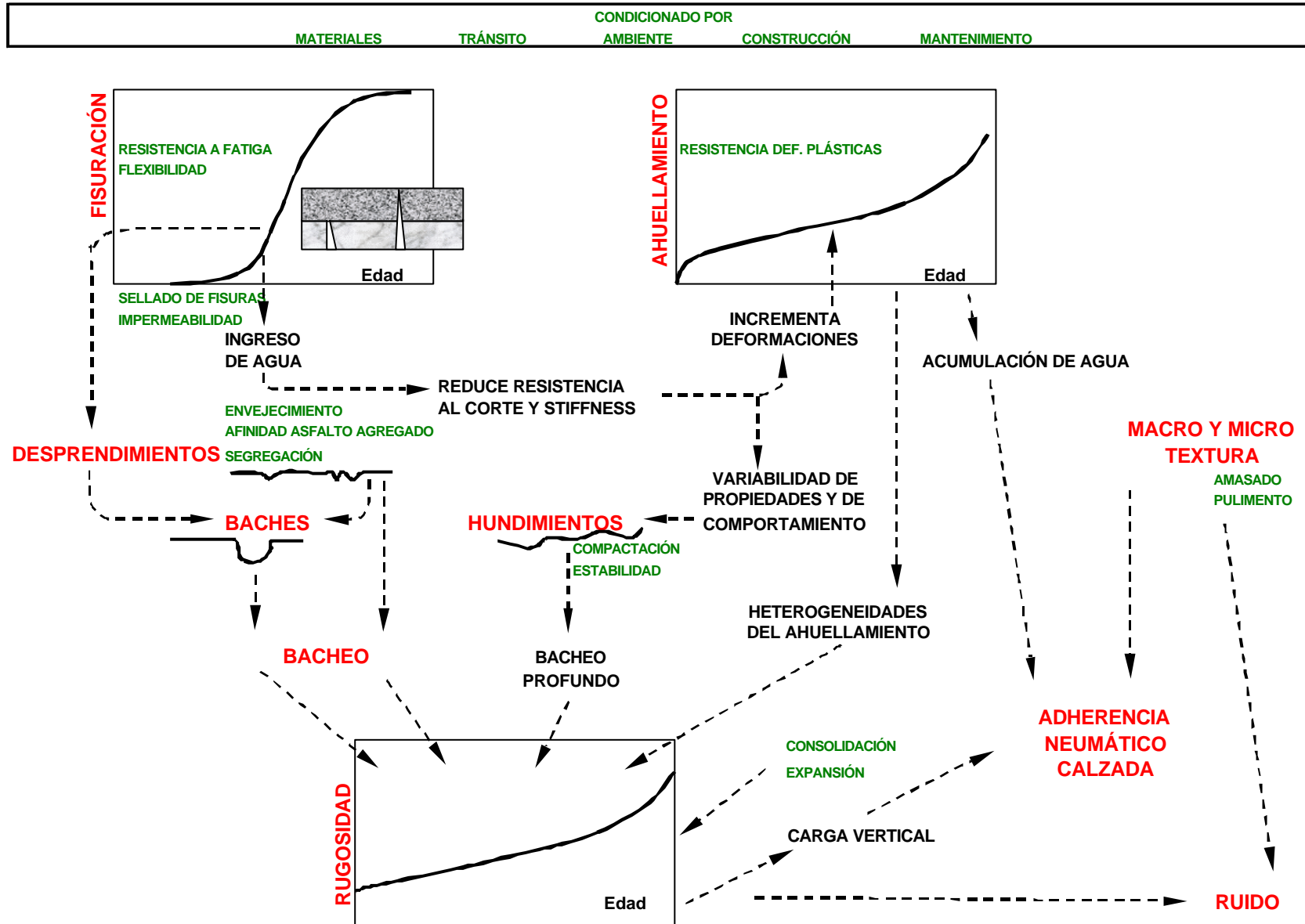


Figura 1. Esquema de a problemática del comportamiento estructural.

- Baches
- Hundimientos
- Superficie Bacheada
- Rugosidad
- Macro textura
- Micro textura
- Adherencia neumático calzada
- Ruido

Estos diferentes aspectos son tratados en forma variada dentro de los distintos métodos de diseño, dependiendo del método algunos son específicamente evaluados y acotados a valores admisibles, otros son indirectamente considerados mediante una adecuada dosificación de materiales y técnicas constructivas, y otros dejados de lado por asignarles una menor trascendencia.

Es decir, si determinamos que una estructura vial está compuesta por determinados espesores de dados materiales, restan una gran cantidad de aspectos a verificar para posibilitar su adecuado comportamiento. Dado que, por el momento la caracterización de los materiales para el diseño deja de lado aspectos que tendrán que ser considerados en la formulación de cada material y en los procesos constructivos, como ser:

- Afinidad asfalto agregado
- Permeabilidad de la carpeta de rodamiento
- Contenido de sales nocivas
- Expansión de los suelos
- Integridad de los agregados pétreos
- ...
- ...

1.a. METODOLOGÍAS EMPÍRICAS

Estas metodologías tienen su sustento principal en la realización de una experiencia a escala real, en ella se caracterizan el conjunto de las variables intervinientes, se evalúa el comportamiento resultante para cada uno de los casos y finalmente se obtiene una relación matemática denominada “Modelo de Comportamiento” que vincula los diferentes parámetros intervinientes. Este planteo se esquematiza en la Figura 2.

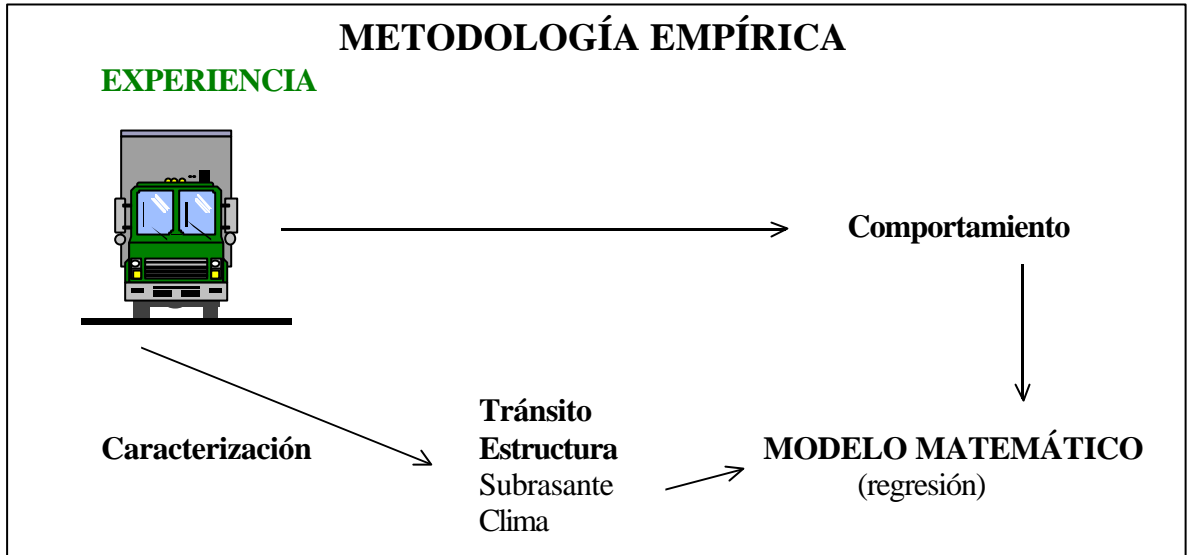


Figura 2. Esquema del desarrollo de un método Empírico.

Su principal ventaja es que se puede plantear la obtención de la Función de Comportamiento que nos permite obtener no sólo el momento de una condición final adoptada como crítica, sino la evolución de los aspectos considerados a lo largo del tiempo.

Esto posibilita por ejemplo un mejor análisis del costo de los usuarios a lo largo del período considerado o la adecuación del estado final al caso específico, notemos aquí el caso de las concesiones viales donde se requiere valores determinados de parámetros de superficie como ser la Rugosidad.

Como principal inconveniente surge la dificultad de apartarse del dominio de la experiencia, circunstancias para las cuales puede no resultar apto el modelo obtenido, estas podrían ser:

- Nuevos materiales
- Diferentes climas
- Particularidades del tránsito

Es notoria la tendencia actual planteada en el sentido de caracterizar los distintos aspectos de la problemática en base a parámetros racionales, circunstancia que minora en cierto grado el inconveniente planteado.

1.b. METODOLOGÍAS RACIONALES

El énfasis está aquí establecido sobre el sustento teórico del problema, definido el modelo racional planteado, se calculan solicitaciones en la estructura que se vinculan al comportamiento en servicio mediante "Criterios de Falla" de cada uno de los materiales intervinientes. Si bien la obtención de los criterios de falla también plantea la realización de una experiencia a ella se le asigna en general un menor peso. Este planteo se esquematiza en la Figura 3.

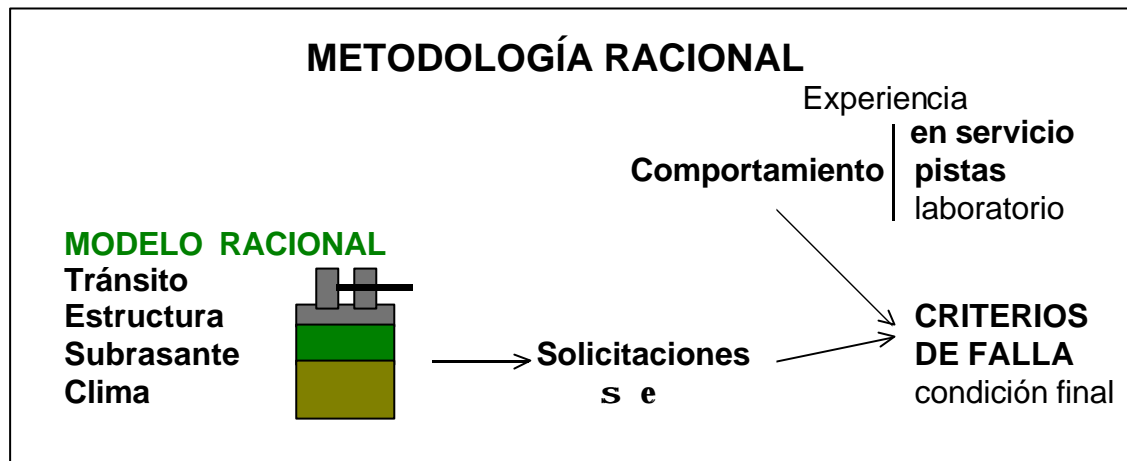


Figura 3. Esquema del desarrollo de un método Empírico.

Como principal ventaja podemos citar la mayor confianza que plantean los resultados al apartarse los datos del dominio de la experiencia. Confianza dada por la adopción de parámetros de caracterización racionales para los distintos aspectos que condicionan el comportamiento, y estos considerarían estas diferencias con un adecuado peso en la definición de este comportamiento.

A modo de ejemplo un eje con una forma atípica puede valorarse representando adecuadamente su impronta y presión de contacto lo que motivara la obtención de las solicitaciones particulares de esta carga dentro de cada estructura analizada.

Podríamos nombrar también la consideración de alternativas de diseño particulares como ser mezclas asfálticas de alto módulo, estas resultan consideradas adecuadamente al caracterizar la misma dentro del paquete estructural mediante su Stiffnes en las condiciones de diseño.

Como principal inconveniente surge la dificultad de evaluar la evolución de parámetros de Serviciabilidad de la calzada diferentes de los planteados en los criterios de falla como podría ser la Rugosidad. Los criterios de falla plantean sólo una condición límite para la Fisuración y el Ahuellamiento

Consideramos a continuación la importancia en el análisis de los métodos racionales clásicos de la determinación de Criterios de Falla válidos dentro de los mismos.

2. CRITERIOS DE FALLA EN LOS MÉTODOS RACIONALES

En el presente punto se indican la metodología de trabajo utilizada y los criterios de falla obtenidos para algunos materiales viales disponibles en la región litoral de la República Argentina, que vinculan el estado de tensiones iniciales originado por una carga de referencia con la vida útil de la estructura, para una determinada condición final de deterioro superficial.

Los criterios de falla utilizados en los métodos de diseño poseen en la actualidad, a nivel mundial, tres posibles líneas de obtención que pueden complementarse entre sí, ellas son:

1. la realización de ensayos de laboratorio y la necesaria determinación de coeficientes de ajuste con respecto al comportamiento en servicio.
2. la determinación en pistas de ensayo a escala natural o mediante equipamiento especial sobre tramos de ruta reales.
3. explotación de datos obtenidos del seguimiento en servicio de tramos de rutas reales con tránsito real.

En el caso del presente punto se utilizó para la determinación de los criterios de falla la tercera de las líneas planteadas, aprovechando que en nuestro país (Argentina) existe información de relevamientos periódicos anuales de los deterioros de superficie desde 1983 a la fecha y censos de tránsito en numerosas rutas.

Finalmente se realiza, a modo comparativo, un contraste con los criterios de falla más utilizados en los métodos de diseño de pavimentos flexibles en uso en Argentina.

2.a. LA PROBLEMÁTICA DE LOS CRITERIOS DE FALLA

Como se comento, los criterios de falla a utilizar en los métodos de diseño poseen tres líneas de trabajo que pueden complementarse entre sí:

- El trabajo con ensayos de laboratorio y la necesaria determinación de coeficientes de ajuste con respecto al comportamiento en servicio (Figuras 4 y 5).
- La determinación en pistas de ensayo (Figura 6) o equipamiento especial sobre rutas reales (equipo simulador de tránsito pesado).
- Explotación de datos obtenidos del seguimiento en servicio de tramos reales.



Figura 4. Ensayo de Fatiga en Laboratorio, laboratorio Vial IMAE.

Estas líneas poseen ventajas e inconvenientes relativos, por ejemplo la segunda está actualmente en desarrollo en países como Francia, España y Sudáfrica, la misma implica un alto costo en equipamiento lo que plantea para nuestro país una importante traba a la misma.

En Argentina a nivel Laboratorio se realizaron a la actualidad ensayos tendientes a la obtención de los criterios de falla de materiales viales (parte importante de los mismos dentro de nuestro Grupo de Trabajo), pero se encuentran aún en curso la realización de un mayor número de ensayos tendientes a establecer tendencias generales de comportamiento.

Circunstancia por la cual se continúa trabajando activamente en esta línea, para en un futuro cercano complementarla con la de este capítulo y lograr los necesarios coeficientes de ajuste (calage), obtenidos a partir de las diferencias del comportamiento en el Laboratorio y en servicio.



Figura 5. Ensayo de Deformación Plástica de Suelos en Laboratorio, laboratorio Vial IMAE.



Figura 6. Equipo para ensayo a escala real, pista de Nantes Francia.

Diferencias que lógicamente deben tender a ser nulas (factor de ajuste unitario) cuando se puedan ponderar con criterios ciertos las variables asociadas que caracterizan una metodología acelerada de ensayo en laboratorio o el progresivo proceso de deterioro en servicio.

Finalmente remarcamos la necesidad de experiencias de validación - determinación de criterios de falla para materiales viales en base a las diferencias existentes en climas y materiales, planteando serias dudas respecto a la confiabilidad en la extrapolación de criterios extranjeros.

2.b. ASPECTOS TEÓRICOS

Reconociendo la real complejidad del comportamiento estructural como se comento en parte en el punto 1, se remarcan algunos aspectos teóricos que condicionan los resultados obtenidos y justifican las dispersiones encontradas en las actuales metodologías de diseño racional.

2.a.1. Condiciones medias ponderadas

Tanto las cargas actuantes (en sus valores de intensidad, frecuencia y configuración), como el entorno (considerado desde un punto de vista amplio que incluya drenaje, clima..), condicionan y determinan los esfuerzos inducidos en la estructura vial.

Razón por la cual estos esfuerzos, lejos de ser constantes, presentan una importante variación determinada por la variabilidad del tránsito y el entorno asociado a cada caso estructural.

La solución simplificada de este problema consiste en determinar condiciones medias ponderadas para las cuales se determinan los esfuerzos asumiendo que los daños inducidos por la reiteración de este esfuerzo es equivalente al espectro real de esfuerzos que solicita la estructura; surgen en base a este criterio:

- ejes de referencia
- temperaturas medias anuales ponderadas
- rigideces de las distintas capas y subrasante.

2.a.2. Esfuerzos iniciales

Las rigideces de las distintas capas a lo largo de la vida en servicio tampoco constituyen una constante aún si se consideran sólo las condiciones medias ponderadas antes mencionadas.

Como consecuencia del proceso de fatiga las capas asfálticas disminuyen progresivamente sus módulos efectivos de trabajo, motivando esto una redistribución de las tensiones inducidas en toda la estructura. Esta variación de los esfuerzos es dependiente del aporte de estas capas asfálticas a la rigidez global de la estructura.

Esta circunstancia también se plantea en los ensayos de fatiga realizados en laboratorio, pues a igualdad de esfuerzos iniciales se obtiene la falla a distintos números de reiteraciones si se realiza el ensayo a tensión controlada o a deformación controlada. Existe una analogía con el comportamiento estructural aproximándose un ensayo a deformación controlada con el comportamiento de los esfuerzos en las capas asfálticas de pequeño espesor apoyadas sobre importantes estructuras granulares y en el otro extremo grandes espesores asfálticos sobre subrasantes débiles pueden aproximarse a ensayos a tensión controlada.

Resultan entonces diferentes las vidas útiles a igualdad de esfuerzos iniciales siendo inferior en aquellas estructuras que posean mayor rigidez relativa de las

capas asfálticas respecto al conjunto de la estructura. Tanto desde el punto de vista de la fisuración como del ahuellamiento. Circunstancia en general no considerada en los métodos de diseño.

2.a.3. Acumulación de deformaciones

La deformación plástica de superficie es la consecuencia de la acumulación de las deformaciones plásticas de las distintas capas sometidas a esfuerzos variables a lo largo de la profundidad de la estructura.

En general se simplifica la problemática asociando la vida útil de la estructura con los esfuerzos de un punto de la capa en la cual estos resulten más críticos.

También un elemento a considerar es la historia de tensiones de cada material; la acumulación de deformaciones plásticas por ciclo para solicitaciones constantes es función del número de ciclos (aproximadamente lineal con el logaritmo del número de reiteraciones).

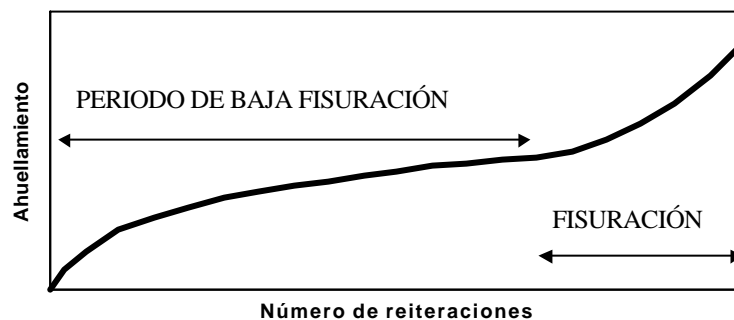


Figura 7. Esquema teórico de progreso del Ahuellamiento.

Esta circunstancia se evidencia en superficie en una disminución de la tasa de crecimiento del ahuellamiento con el aumento del número de ciclos, siempre que no se produzca la aparición de fisuración lo que brindaría mayor peso a la influencia de la variación de los esfuerzos por el menor módulo de las capas asfálticas provocando una aceleración en el crecimiento del ahuellamiento por un aumento de las solicitaciones, conjuntamente con el posible ingreso de agua a la estructura dependiendo de las tareas de mantenimiento, ver la Figura 7 donde se evidencian estos dos períodos evolutivos.

2.b. METODOLOGÍA DE TRABAJO

El objetivo del presente capítulo consiste en la obtención de criterios de falla que vinculen el estado de tensiones originado por una carga de referencia con la vida útil de la estructura, planteada a partir de la definición de una condición de su estado final, y expresada como número de reiteraciones de esta carga de referencia.

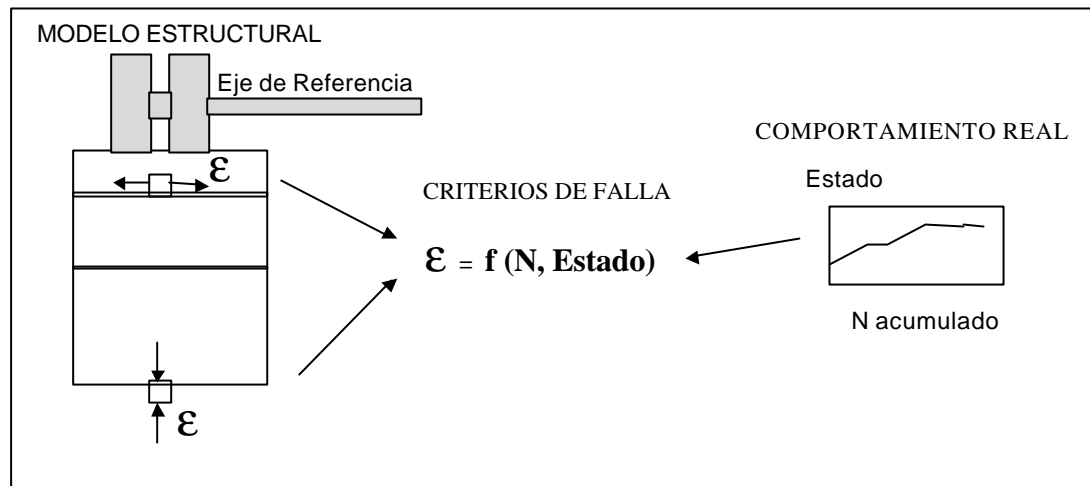


Figura 8. Esquema de la metodología utilizada.

La metodología utilizada (Figura 8) consistió en la explotación de dos espectros de datos diferentes originados del comportamiento en servicio de tramos reales de rutas. Uno corresponde a tramos de importancia por su estructura y nivel de tránsito, que son evaluados sistemáticamente por la Dirección Nacional de Vialidad Argentina desde 1983. El otro corresponde a rutas de la Dirección Provincial de Vialidad de Santa Fe (por el momento de menor importancia en número de observaciones), y por lo tanto asociadas en general a menores tránsitos y espesores estructurales. A partir de la información disponible se realizó:

1. Definición de tramos homogéneos. Se realizó en la forma habitual, observando cierta constancia dentro del mismo de las características de su estructura, tránsito, deformabilidad y comportamiento en servicio.
2. Modelización estructural. En cada tramo homogéneo se adoptaron espesores y módulos de las capas estructurales en base a la información disponible en cada caso:
 - Antecedentes estructurales
 - Calicatas y/o penetrómetro dinámico de cono y/o..
 - Deformabilidad estructural Benkelman, Lacroix o FWD
 - Con dicha información se realizó un retroajuste modular para lograr el modelo estructural del tramo.
3. Cálculo de las tensiones inducidas por la carga de referencia (eje dual de 80KN) para cada modelo estructural de cada tramo homogéneo en las

condiciones medias del diseño y considerando íntegras las capas realizadas en el período de comportamiento analizado (condición de servicio inicial).

4. Se relacionaron estas tensiones con el estado de superficie (fisuración y ahuellamiento) y el número de reiteraciones soportado por la estructura hasta alcanzar el mismo (obtenido de censos de tránsito disponibles).
5. Desarrollo de ecuaciones de regresión para el conjunto de las evaluaciones de los tramos, vinculando los esfuerzos iniciales, el número de reiteraciones y los estados de la superficie conocidos, logrando así la determinación de los criterios de falla.
6. Un paso importante fue la valoración de las dispersiones encontradas para poder utilizar las ecuaciones halladas en un diseño donde se pretenda un grado de confiabilidad respecto de la prognosis del comportamiento.

Sólo se consideraron las fallas de fisuración y ahuellamiento asociadas al aspecto estructural, los restantes elementos que determinan el nivel de servicio como ser adherencia neumático calzada o rugosidad no se analizaron en este estudio.

2.c. RESULTADOS OBTENIDOS

2.c.1. Criterio de falla por ahuellamiento

En base al análisis de alrededor de 300 puntos de comportamiento se procedió al planteo de correlaciones entre la deformación específica vertical máxima de subrasantes y suelos seleccionados para la condición estructural media, y el ahuellamiento de superficie medio.

Se plantearon inicialmente distintas opciones interpolando condiciones finales de ahuellamiento preestablecidos entre los valores de las distintas evaluaciones, pero finalmente se consideró de mayor utilidad el planteo de una función de superficie donde la variable ahuellamiento representa el tercer eje de coordenadas, obteniéndose así la función:

$$N = (\epsilon_z / 680)^{-3.10} (Ah / 12)^{1.77}$$

Donde: ϵ_z deformación específica vertical provocadas por el eje de referencia [microdeformaciones]
 N número de reiteraciones [ejes de referencia millones]
 Ah ahuellamiento de superficie [milímetros]

Esta función se grafica en forma espacial en la Figura 9 donde puede verse, para Epsilon z definidos, la evolución del ahuellamiento en función del número de reiteraciones.

En la Figura 10 se encuentra graficada la misma ecuación para condiciones finales de ahuellamiento medio prefijadas en 7, 12, 19 y 25 milímetros.

Sobre el conjunto de los 300 puntos analizados se calculó el error cuadrático medio del logaritmo del número de reiteraciones dado por la ecuación de falla, este presenta una desviación estándar de 0,45. La misma es del orden de los valores planteados por la metodología AASHTO en su guía para el diseño y puede ser aplicado de forma similar para obtener valores con un determinado grado de confiabilidad.

$$\text{Log } N_c = \text{Log } N - Z S$$

Donde: N_c número de reiteraciones para una confianza C de ser superado [ejes de referencia millones]
 N número de reiteraciones para el 50% de confianza [ejes de referencia millones] (el obtenido de la ecuación precedente)
 S desviación estándar de la predicción
 Z valor inverso de la integral de la distribución Gaussiana para el valor de la confianza C

Es necesario recalcar que dentro de este error se incluyen todas las dispersiones de las variables que intervienen en el diseño estructural, (valoración del tránsito, época de medición de las deformaciones, tipos de suelos, particularidades estructurales, etc.) circunstancias que en parte se compensan con un gran número de muestras, pero que se ponen de manifiesto en una mayor dispersión y en tendencias particulares para cada grupo particular de la muestra.

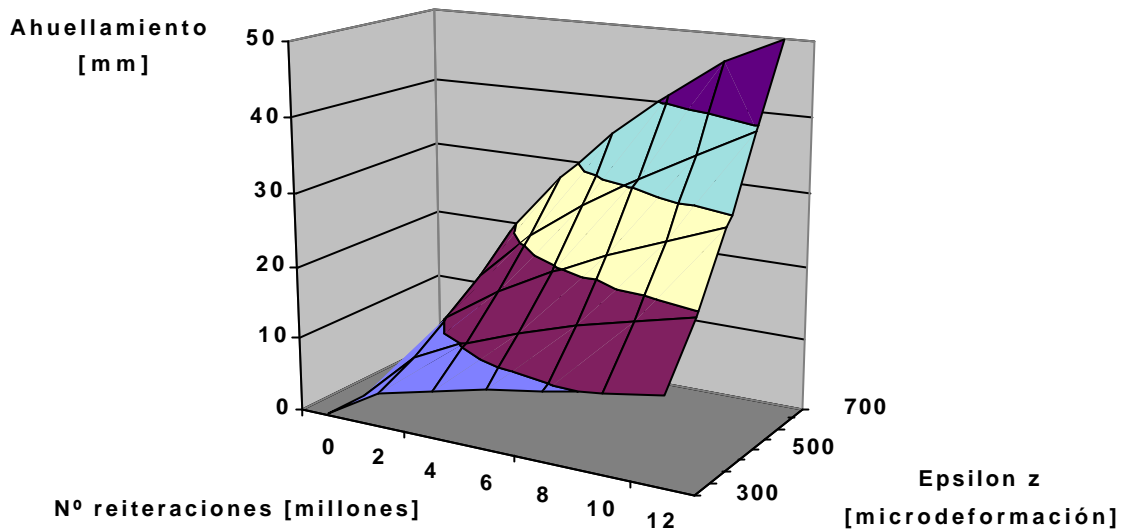


Figura 9. Epsilon z versus número de ciclos para distintos ahuellamientos de superficie.

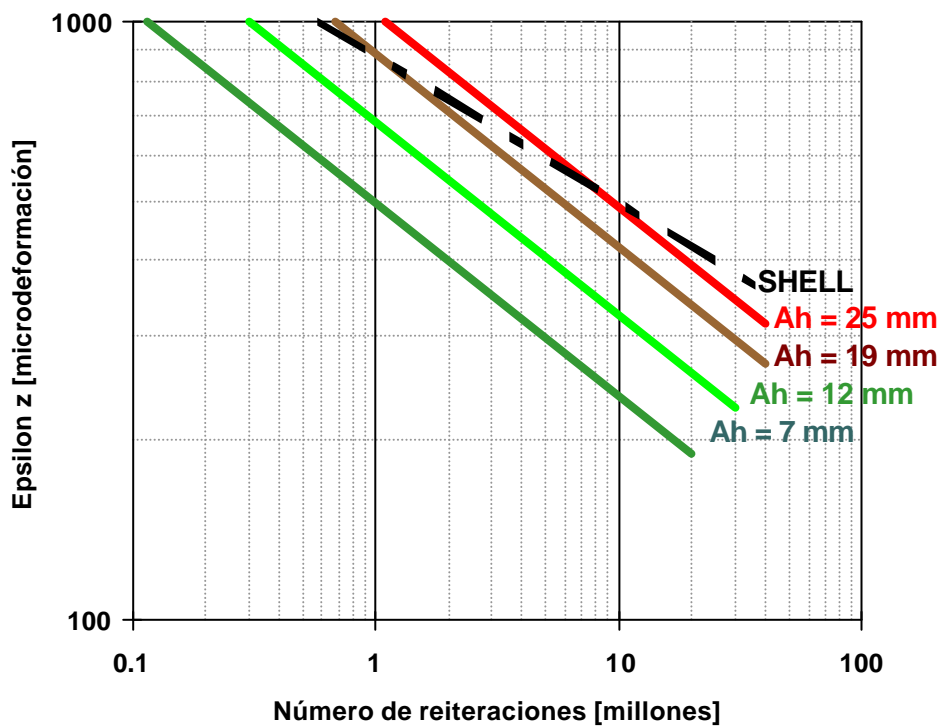


Figura 10. Epsilon z versus número de ciclos para distintos ahuellamientos de superficie.

En la gráfica de la Figura 11 se indican con distintos símbolos las distintas rutas para una condición de 12 milímetros de ahuellamiento, y en línea continua la tendencia general encontrada para esta misma condición.

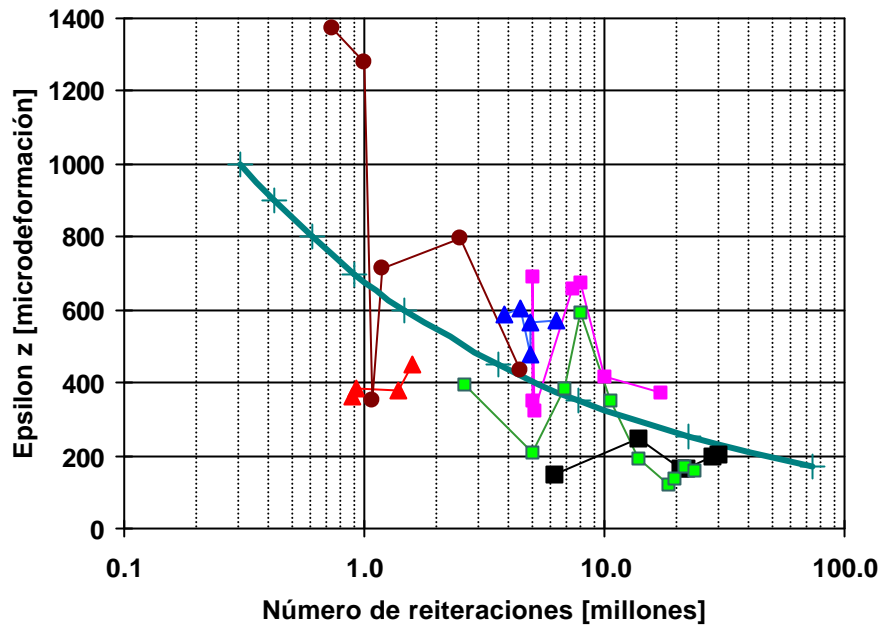


Figura 11. Tendencia diferenciada por ruta para 12 mm de ahuellamiento.

Puede notarse aquí que si bien la tendencia global es satisfactoria se presentan particularidades para cada ruta (estratificación de las relaciones).

En base a las consideraciones teóricas indicadas en el punto 2.b se realizó el análisis agregando una variable más: la profundidad a la que se encuentra el punto de deformación específica analizado, ya que las capas superiores en realidad también contribuyen al valor de ahuellamiento de superficie. Se logró la siguiente ecuación:

$$\text{Log } \epsilon_z = 4,311 - 0,3211 \text{ Log } N + 0,0126 Ah - 0,992 \text{ Log } H$$

Donde:

- ϵ_z deformación específica vertical provocada por el eje de referencia [microdeformaciones]
- N número de reiteraciones [eje de referencia millones]
- Ah ahuellamiento de superficie [milímetros]
- H profundidad del punto [centímetros]
- Log logaritmo en base 10

Con esta ecuación el error en el logaritmo del número de reiteraciones presenta una desviación cuadrática media de 0,26 apreciablemente inferior a la anterior fórmula.

Se realizó la comparación de los valores de la deformación específica vertical (para 19 mm de ahuellamiento y distintas profundidades del punto de análisis), con los propuestos en el método SHELL, los mismos se encuentran graficados en la Figura 12.

Se observa que la curva del método SHELL se encuentra abarcada por las correspondientes a la ecuación hallada, pero estas últimas brinda mayores vidas útiles para bajos números de reiteraciones y espesores. Esta circunstancia consistía un hecho supuesto previamente a este trabajo y colaboró a la

realización del mismo, para una correcta valoración en el análisis de caminos con bajos volúmenes de tránsito.

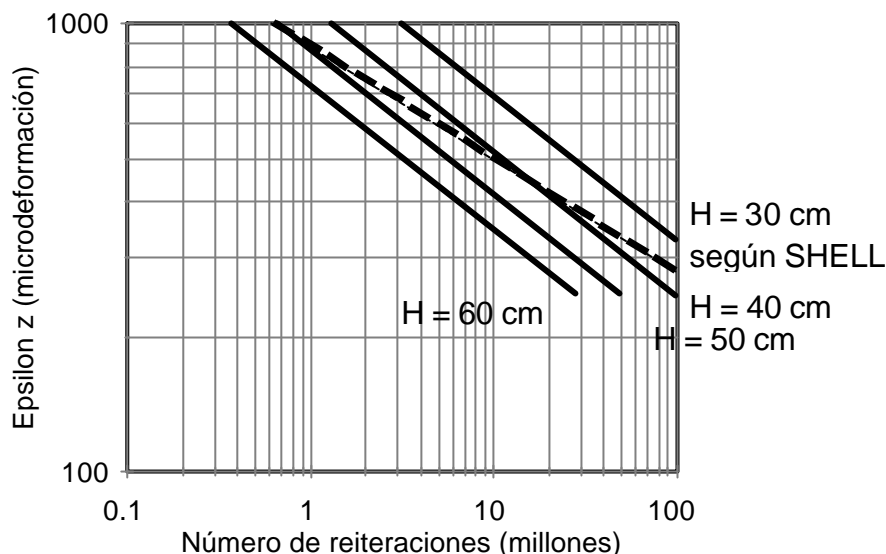


Figura 12. Comparación de los criterios encontrados con el utilizado en el método de diseño SHELL.

2.c.2. Criterio de falla por fisuración

Con respecto a esta variable se dispone de tramos con estructuras nuevas y reforzadas, con mezclas asfálticas convencionales, arenas asfaltos y toscas arenas asfaltos.

Esta misma diversidad junto al hecho de que en muchos de los tramos el nivel de fisuras es aún bajo motivó una mayor dificultad para el planteo de tendencias propias.

Se optó entonces por partir de la fórmula comúnmente utilizada en nuestra metodología de diseño que es la sugerida por la ISAP y obtenida del ensayo AASHO.

$$N = [(\epsilon_T / 240) \times (E/3000)^{0,85} \times (10/Asf)]^{-3,29}$$

Donde: ϵ_T deformación específica de tracción [microdeformaciones]

E módulo de la mezcla asfáltica [MPa]

Asf porcentaje de asfalto en volumen en la mezcla [porcentaje]

N número de reiteraciones para un 10 % de fisuras clase 2 [millones]

Esta fórmula es apropiada ya que plantea la sensibilidad de los esfuerzos admisibles frente al módulo y contenido de asfalto de la mezcla permitiendo la optimización del módulo de diseño de la mezcla asfáltica a ejecutar (conveniencia de rigidizar o flexibilizar la mezcla).

Partiendo de esta fórmula se planteo la generalización de la misma a diferentes condiciones finales del porcentaje de fisura y se ajustó en base a los datos disponibles los coeficientes obteniendo la fórmula indicada a continuación:

$$N = [(\epsilon_T / 293) (E/3000)^{0,85} (10/Asf) (F/30)^{-0,088}]^{-1,85}$$

- Donde: ϵ_T deformación específica de tracción [microdeformaciones]
 E módulo de la mezcla asfáltica [MPa]
 Asf porcentaje de asfalto en volumen en la mezcla [porcentaje]
 N número de reiteraciones para un 30 % de fisuras totales [millones]
 F porcentaje de fisuras totales

En la Figura 13. se muestra la curva obtenida para una mezcla asfáltica con módulo de la de 2000 MPa y un contenido de asfalto del 11% en volumen. Indicándose el crecimiento del porcentaje de fisuras en función del tránsito para distintos niveles de sollicitación.

La Figura 14 muestra la dispersión de la predicción respecto a la recta diagonal, que representaría la certeza. En esta ecuación de falla el valor de la desviación estándar del logaritmo del error es de 0.35 valor elevado como muestra la Figura 14 pero reducido respecto al rango 0.4 a 0.5 planteado como indicativo por la metodología de diseño AASHTO para los pavimentos flexibles.

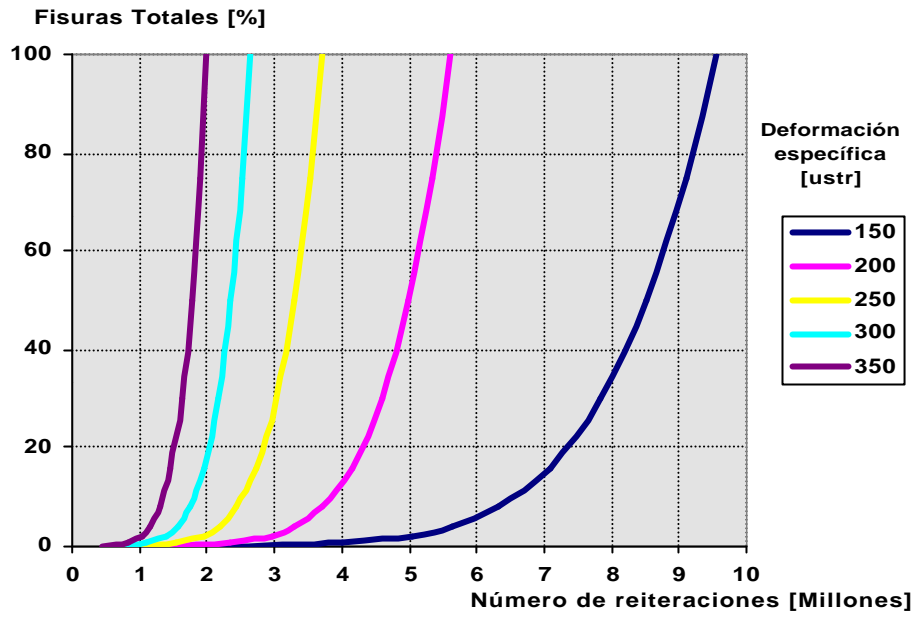


Figura 13. Fisuración en función del tránsito y nivel de solicitación.

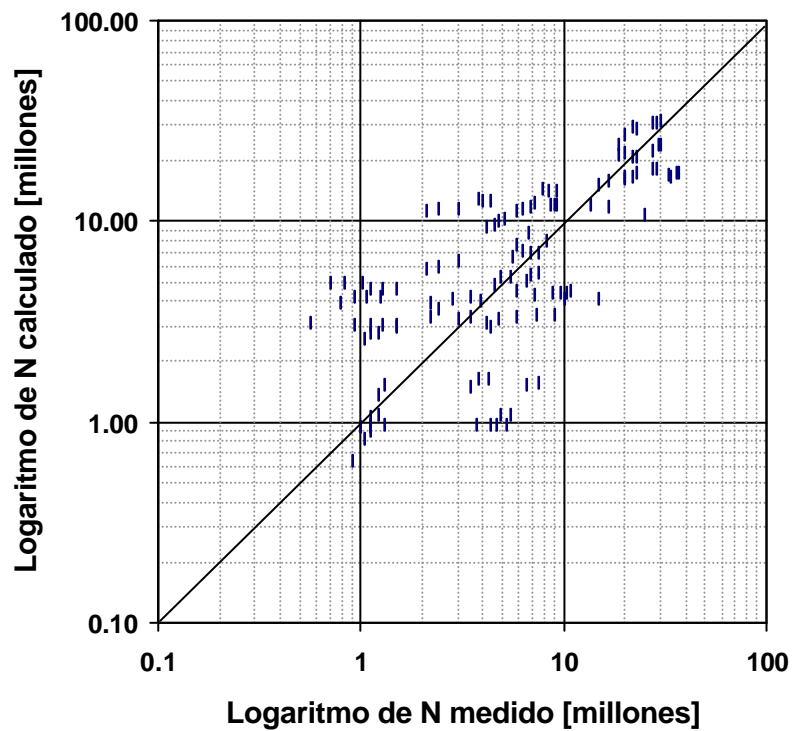


Figura 14. Número de reiteraciones medido versus calculado aplicando el criterio de Fisuración.

3. CONCLUSIONES

El análisis de la problemática global pone de manifiesto la realidad del proceso de diseño estructural, donde es importante complementar los espesores requeridos con adecuadas técnicas de dosificación de materiales y procesos constructivos; para arribar a un satisfactorio diseño integral.

Respecto a los criterios de falla:

Los resultados alcanzados y la coherencia que presentan los mismos frente a las variables analizadas son sumamente satisfactorios respecto a las expectativas planteadas.

Como era nuestro prejuicio la fórmula del método SHELL para estimación de valores admisibles de la deformación específica vertical en los materiales no ligados, resulta más ajustada para tránsitos importantes, sobredimensionando para bajos volúmenes.

Las formulaciones obtenidas resultan en una generalización de los criterios de falla clásicos pues plantea un valor variable de la condición final, pudiendo el deterioro ser estimado a partir de un valor del tránsito y no indicar sólo si es admisible o no.

Se pusieron de manifiesto los posibles errores de estimación cometidos en las predicciones del comportamiento efectuadas con los métodos racionales clásicos.