

Evaluación de la guía AASHTO 1986 para el diseño de pavimentos

Michael Darter

Profesor de Ingeniería Civil, Universidad de Illinois, U.S.A.

RESUMEN: Uno de los principales desafíos que presenta la Ingeniería Vial actualmente, es el de generar herramientas adecuadas para el diseño de los pavimentos. Históricamente en Chile se han adoptado modelos desarrollados en otros países (principalmente Estados Unidos), cuyos resultados al aplicarlos a nuestra realidad, generalmente han despertado dudas. Conscientes de estas limitaciones, las autoridades viales nacionales hace algunos años iniciaron un programa de seguimiento de pavimentos, cuyos resultados se espera entreguen antecedentes para un mejor diseño de la estructura del pavimento, y que sean válidas para nuestra realidad. Sin embargo, aún no se han aplicado en los diseños los antecedentes obtenidos hasta el momento en dichos estudios.

En la práctica, la mayoría de los Consultores en ingeniería vial en Chile han adoptado como método de diseño, la versión 1986 de la Guía AASHTO, que al igual que las versiones anteriores está basada en la prueba experimental AASHTO realizada entre los años 1958 y 1960, en Illinois, Estados Unidos. Esta última versión incorpora una gran cantidad de nuevos parámetros que no han sido validados a la realidad nacional, y consecuentemente sus resultados no cuentan con una aceptación generalizada de los especialistas de diseño.

I. TRAMOS DE PRUEBA AASHTO:

La ecuación original AASHTO, así como sus posteriores correcciones, se sustentan fundamentalmente en los datos recogidos de una prueba experimental (prueba AASHTO) desarrollada entre los años 1958 y 1960, en Illinois, Estados Unidos, y cuya duración fue de aproximadamente dos años.

Los tramos de prueba estaban constituidos por seis circuitos principales, con dos pistas de circulación de 3.5 metros de ancho cada una. Cada circuito fue sometido a distintos volúmenes de tránsito de camiones, y su forma típica es la que se muestra en la figura 1.

Los tipos de pavimentos considerados en la prueba fueron principalmente concreto asfáltico (AC) y hormigón con juntas simples (JPCP), además de algunas secciones de hormigón armado y hormigón pretensado.

Los volúmenes máximos de tránsito acumulados durante los dos años que duró la prueba fueron del orden de 1,1 millones de ejes equivalentes, con una tipología de ejes simples y tándem.

Este aspecto es muy importante, por cuanto actualmente en un año se puede alcanzar fácilmente ese volumen de ejes equivalentes, en las carreteras principales de Chile.

El comportamiento de los pavimentos fue medido con el índice de Serviciabilidad Presente (P), cuya escala varía entre 0 y 5. A un pavimento nuevo se le asigna un valor entre 4 y 5 (según su calidad constructiva), a medida que se deteriora va disminuyendo hasta llegar a valores en que se requiere una rehabilitación, que en el caso de carreteras de alta velocidad varía entre 2 y 3, y en caminos de bajo tránsito 2 o menos. En relación a este índice cabe destacar que se trata de una calificación subjetiva (asignada por el usuario), asociada con el confort y la calidad del desplazamiento que percibe el usuario al transitar sobre un determinado pavimento, la figura 2 muestra el comportamiento típico de este índice con el tiempo, donde PI representa el índice de serviciabilidad terminal cuando se requiere la rehabilitación.

Las características climáticas de la zona de la prueba AASHTO, Illinois, presentan condiciones de alta pluviometría, con precipitaciones medidas anuales de 860 milímetros; profundidades de helada relativamente altas (630 milímetros), y con un promedio de 12 ciclos de heladas por año. De acuerdo a estos antecedentes, las condiciones ambientales se pueden definir como muy rigurosas, de alta humedad y fuertes heladas.

II. CARACTERÍSTICAS DE LA ESTRUCTURA DE LOS PAVIMENTOS DE HORMIGÓN EN LA PRUEBA AASHTO:

Como se mencionó anteriormente, los pavimentos de hormigón en la prueba AASHTO fueron diseñados mayoritariamente con juntas simples (JPCP). El espaciamiento entre juntas fue de 4.5 metros, con barras de traspaso de carga. Las barras de traspaso tenían diámetros que variaban entre 25 y 41 milímetros, dependiendo del espesor de la losa.

Las bases de todos los pavimentos de hormigón estaban constituidas por agregados con una gran cantidad de finos arcillosos, los cuales contribuyeron a una excesiva erosión de la base (pumping). la subrasante estaba constituida por una arcilla limosa muy pobre.

La resistencia media a la flexotracción a los 28 días fue de 4.8 Newton por milímetro cuadrado (49 kilogramos por centímetro cuadrado) y a la compresión de 42 Newton por milímetro cuadrado (428 kilogramos por centímetro cuadrado).

III. DESARROLLO DE LAS ECUACIONES DE DISEÑO AASHTO:

Al finalizar el período de prueba de dos años, el equipo de investigación se abocó a la tarea de desarrollar ecuaciones a partir de los datos recogidos en terreno, cuya expresión original tuvo la siguiente forma:

$$W = f(D, L1, L2, P1, P2)$$

donde:

- W : Número de ejes de carga que pasan por la pista
- D : Espesor de la losa
- L1 : Carga por eje
- L2 : Tipo de eje (simple o tándem)
- P1 : índice de serviciabilidad pavimento nuevo
- P2 : índice de serviciabilidad de rehabilitación

Todas las otras variables estaban esencialmente fijas. La ecuación resultante fue totalmente estadística y empírica y no fue más que una regresión desarrollada por los ingenieros y estadísticos trabajando en el lugar de la prueba. Estaba basada en alrededor de 300 secciones de prueba durante un período de dos años. El resultado más importante fue que se presentó EROSIÓN y BOMBEO extensivo en todos los pavimentos.

Por otro lado, la ecuación plateada originalmente omitió una serie de factores que indudablemente influyen en el diseño, de tal forma que para poder ser aplicada fuera de Illinois, se le agregaron empíricamente otros factores a la ecuación, basados en el criterio de unos pocos ingenieros.

Los primeros factores que se incorporaron, en el año 1961, fueron la resistencia del hormigón, el módulo de elasticidad del hormigón, la transferencia de carga en las juntas, y el módulo de reacción de la subrasante, a partir de las ecuaciones desarrolladas por Spangler para las tensiones en la esquina de la losa.

Posteriormente, en los años 1972 y 1981, se publicaron versiones revisadas de la ecuación original, con carácter provisional (Interim Guide), que también incorporaron modificaciones.

Finalmente, en el año 1986 nuevamente se agregaron otros parámetros que fueron el Coeficiente de drenaje, la Pérdida de soporte del suelo, y la Confiabilidad del diseño. Todos éstos parámetros también fueron agregados en forma cualitativa.

IV. APLICACIÓN DE LA GUIA AASHTO EN CHILE:

A continuación, se hará un breve análisis y discusión de la aplicabilidad de la Guía de Diseño AASHTO al caso chileno. Es necesario ser muy cuidadoso cuando se traslada un método de diseño y se aplica en situaciones diferentes a las originales. Al respecto, los principales factores que se deben analizar dicen relación con el clima, diseño de juntas, tipos de base, técnicas de construcción, drenaje, resistencia y durabilidad del hormigón, suelos de la subrasante, confiabilidad del diseño, y cargas de tráfico.

Respecto del clima, si se toma la ecuación AASHTO deducida en un medio ambiente muy húmedo, con lluvias y fuertes heladas, con un hormigón saturado la mayor parte del tiempo, y se calcula el deterioro de un pavimento en el tiempo, esta curva será probablemente muy distinta si se coloca ese mismo pavimento en Chile, en donde se tiene un clima mucho más seco, con menos heladas, y en general con un clima menos riguroso. Es factible que ese pavimento en Chile tenga una duración significativamente mayor que la que predice la ecuación AASHTO. Esta situación se ilustra en la figura 3.

Al respecto, es necesario destacar que se ha comparado el deterioro de los pavimentos de hormigón en los valles de California, donde existe un clima similar al de Chile, y se ha encontrado que la vida útil real puede llegar a ser el doble de la que predice la ecuación AASHTO. De manera que el clima tiene un efecto muy importante en el deterioro. Es de notar que en la prueba AASHTO se presentaron grandes problemas de bombeo y erosión, lo cual en un clima más seco debiera ser mucho más moderado, dado que hay menos agua disponible y menos escarcha para destruir y dañar la base granular y la base tratada con cemento, o para saturar el hormigón.

En relación a los factores constructivos, un aspecto de singular relevancia es el de las condiciones climáticas durante el hormigonado. En Chile habitualmente el hormigonado se ejecuta en la temporada de verano, con altas temperaturas y viento, lo que permite que la cara superior de la losa se seque en forma mucho más rápida que la inferior, induciendo un alabeo de tipo "cóncavo", con la losa apoyada sólo en su parte central; ello, en presencia de cargas, puede inducir grandes tensiones que agrieten la losa. En cambio, el hormigonado en la prueba AASHTO se realizó bajo condiciones de menor temperatura, de modo que el deterioro del pavimento tiende a ser menor con el tiempo, como se esquematiza en la figura 4.

La Universidad de Chile ha efectuado varias investigaciones sobre el tema, cuyos resultados podrían utilizarse para orientar las faenas constructivas, en condiciones climáticas más favorables.

Es muy probable que existan otras diferencias constructivas respecto de la prueba AASHTO, tales como la compactación y el curado, las que evidentemente tendrán un efecto en el comportamiento de los pavimentos.

Otro aspecto que es fundamental analizar, es el diseño de las juntas, el cual no es tratado con mucha profundidad en la Guía de Diseño AASHTO-1986. Los factores más relevantes en éste aspecto dicen relación con la transferencia de carga en juntas transversales, juntas longitudinales con las bermas, y dirección y espaciado de las juntas.

La transferencia de carga en las juntas transversales, está relacionada con las deflexiones y tensiones producidas en la interface de dos losas contiguas. Una buena transferencia se logra disminuyendo estas tensiones y deformaciones frente al paso de una carga, como por ejemplo mediante barras de traspaso.

En Chile, en general no se usan barras de traspaso, al igual que en muchos estados de la parte oeste de los Estados Unidos, cuyas características climáticas son calurosas y secas. En muchos casos el resultado ha sido exitoso, porque usan bases estabilizadas con cemento o con asfalto, lo que de alguna forma les proporciona alguna medida de transferencia de carga. Sin embargo, en situaciones de tránsito

muy pesado y climas más húmedos, se ha presentado alguna erosión cuyo resultado es un escalonamiento en las juntas. Ahora bien, el factor J de la ecuación AASHTO-1986, que toma en cuenta la transferencia de carga en la junta, considera básicamente la tensión en la losa, y no el escalonamiento producido, de tal forma que sólo representa una consideración del agrietamiento pero no del escalonamiento. Al respecto, es necesario recordar que en la prueba AASHTO todas las juntas tenían barras de traspaso, con tamaño adecuado, y en consecuencia no se presentó escalonamiento.

Las bermas de hormigón ancladas al pavimento mediante barras de acero (tied concrete shoulders), también mejoran la transferencia de carga en las juntas, disminuyendo las tensiones y deformaciones de la losa. Una forma alternativa, y de uso extensivo en Europa y Estados Unidos, es usar pistas ensanchadas, demarcando el límite exterior de la pista aproximadamente a medio metro de la interfase losa-berma. La Guía AASHTO no entrega indicaciones para este tipo de soluciones.

Otra tendencia actual en el diseño de juntas, es el uso de juntas transversales desviadas, cuyo principal impacto consiste en reducir el ruido causado por juntas escalonadas. Sin embargo, si se disponen barras de traspaso de carga en las juntas, su utilidad no es muy evidente.

El espaciamiento entre juntas es otro factor muy importante en el diseño, que afecta tanto el agrietamiento como al escalonamiento. Cuanto menor sea el espaciamiento entre juntas, tanto mejor es el comportamiento del pavimento en términos de agrietamiento y escalonamiento.

Ahora bien, el establecer un valor de J para Chile, debe ser producto de un profundo análisis de la realidad de los pavimentos en el país, y no es aceptable adoptar un valor sin tener en consideración los conceptos básicos que lo sustentan.

Otro factor relevante que se incorpora en la nueva guía de diseño AASHTO es el coeficiente de drenaje, Cd. Está basado en dos parámetros, uno es el tiempo para drenar el pavimento después de una tormenta de lluvia y otro es el porcentaje de tiempo que el pavimento está expuesto a condiciones de saturación.

Después de una gran tormenta de lluvia, el agua llena la base del pavimento. Cuanto más tiempo permanece el agua allí mayor es el daño que puede hacer, especialmente en presencia de grandes cargas. De manera que conceptualmente es una idea muy buena incorporar el drenaje en el diseño, pero cuando se trata de seleccionar un valor es cuando se encuentran las dificultades.

Para las condiciones de la prueba AASHTO este factor se supone igual a uno, que corresponde a un drenaje muy insuficiente. Ello provocó erosión extensiva y bombeo. Por lo tanto, condiciones de drenaje más favorables indudablemente requerirán un valor mayor que uno.

En relación al tránsito, la ecuación AASHTO tiende a sobredimensionar el espesor de la losa de hormigón para niveles de tránsito altos. Lo anterior se puede ilustrar en la figura 5.

La Confiabilidad en el Diseño es otro de los factores recientemente incorporados a la guía de diseño AASHTO. Conceptualmente representa la probabilidad de que el pavimento dure efectivamente la vida útil considerada en el diseño.

En la figura 6 se muestra un conjunto de caminos de hormigón en el Estado de Illinois, en el cual se representa el porcentaje acumulativo de pavimentos fallados respecto de la edad de esos pavimentos. Todos los pavimentos tenían un espesor de 25 centímetros y se construyeron con las mismas especificaciones:

Se puede apreciar que muy pocos de ellos fallaron antes de los 10 años, y la mayoría duró más de 20 años. Incluso hay algunos que tienen más de 30 años de vida útil. El promedio de vida es de 21 años, en el cual se presenta aún un 50% de sobrevivencia.

Las causas de las fallas se pueden deber a muchos factores, tales como: tráfico mal estimado, malos materiales, mala construcción, etc.

Lo que se pretende con el factor de confiabilidad es adoptar un factor de seguridad en el diseño, que amplifique el número de ejes equivalentes considerado. Al respecto, es necesario recalcar que todos los parámetros de la ecuación AASHTO son valores medios (resistencias, capacidad de soporte, ejes equivalentes, etc.).

Otros factores que no son adecuadamente tratados en la nueva guía de diseño AASHTO, son los espesores trapezoides, empleados con bastante éxito en Francia, y el uso de bases permeables, que sin duda mejoran el comportamiento de los pavimentos de hormigón.

En forma similar al hormigón, la guía tiene serias limitaciones en el caso del diseño de pavimentos asfálticos en la realidad del país. Estas dicen relación con los siguientes factores principales:

- **Coefficientes estructurales:** lo más probable es que los materiales que se usan en Chile sean distintos a los utilizados en la prueba AASHTO, y por lo tanto sus coeficientes estructurales. Estos últimos representan en realidad coeficientes de desempeño relacionados con la pérdida de serviciabilidad global del pavimento.
- **Módulo resiliente de la subrasante:** la guía AASHTO asume valores del módulo resiliente del orden de 3000 psi (210 kg/cm²). Por lo tanto se requiere estudiar los valores de módulos resilientes para los suelos chilenos, así como su correlación con valores de CBR.
- **Durabilidad de los cementos asfálticos:** Este es otro aspecto que debiera ser estudiado de acuerdo a la durabilidad de los cementos asfálticos que se están empleando actualmente en Chile, y como se relacionan con aquellos utilizados hace treinta años en la prueba AASHTO.

V. VERIFICACIONES DE DISEÑO

Debiera aplicarse en la mayoría de los casos, un procedimiento de verificación del diseño basado en otras consideraciones no establecidas en la guía AASHTO. Debemos recordar que la ecuación AASHTO diseña sólo para la consideración de índice de Serviabilidad, que representa básicamente la rugosidad de la superficie. Sin embargo, para el caso de los pavimentos de hormigón, es fundamental verificar el diseño considerando el agrietamiento y el escalonamiento, que son dos variables muy críticas del comportamiento del pavimento.

Estos procedimientos de verificación se pueden realizar aplicando conceptos analíticos. La tendencia actual en Estados Unidos es desarrollar los procedimientos analíticos, con el fin de mejorar los métodos empíricos de diseño. Recientemente la AASHTO ha terminado un estudio con el objeto de mejorar la guía de diseño con conceptos analíticos.

En la figura 7 se muestra un modelo de porcentaje de agrietamiento de losas (percent slabs cracked) en función de las solicitaciones de carga por eje, para un pavimento de hormigón con juntas simples. El número permisible de cargas por eje en el pavimento (N), se ha determinado a partir de una ecuación de fatiga.

$$\text{Log}N = 213 \cdot (1/\text{SR})^{1,2}$$

donde:

- N = Número máximo permitido de aplicaciones de carga de 18 kips.
- n = Número acumulado de aplicaciones de carga de 18 kips, en la esquina de la losa.
- SR = Razón entre la tensión de esquina y el módulo de ruptura a los 28 días (Stress Ratio).

Se puede apreciar que a medida que se aproxima al valor de tensión crítica ($\text{Log } n/N = 0$), el desarrollo del agrietamiento es muy fuerte.

La figura 8 muestra el porcentaje de agrietamiento de las losas en función de s solicitaciones de carga, para distintos espesores de losas. Considera un espaciamiento entre juntas de 4.5 metros (15 pies), y bermas de concreto asfáltico.

Se puede apreciar el importante efecto del espesor de la losa en el desarrollo del agrietamiento transversal.

Otro factor que se puede analizar es el tipo de berma y su efecto en términos de agrietamiento, la figura 9 muestra esta situación, para el caso de una losa de 25 centímetros de espesor y 4.5 metros de separación entre juntas.

También es posible estudiar el espaciamiento entre juntas transversales, y su impacto en el agrietamiento. La figura 10 ilustra esta situación para una losa de 25 centímetros de espesor y bermas de concreto asfáltico.

Se puede apreciar que a medida que se aumenta el espaciamiento entre juntas, el agrietamiento también aumenta.

De la misma forma que el agrietamiento, es posible estudiar el efecto de las solicitaciones y características de diseño en el escalonamiento de las juntas transversales de la losa de hormigón.

VI. CONCLUSIONES

Las principales consideraciones que se deben tener presente al utilizar la ecuación de diseño de la AASHTO, se pueden sintetizar en los siguientes puntos:

- a) La ecuación de diseño AASHTO debe usarse con mucha precaución, y teniendo en consideración los principios que la sustentan, así como las limitaciones que se han mencionado en esta charla. Se debe tener presente que es sólo un procedimiento empírico que requiere mucho criterio en su aplicación en zonas de características diferentes a las de la prueba.
- b) **Es** fundamental adaptar y ajustar el procedimiento de diseño AASHTO a las particulares características de Chile.
- c) Se recomienda las verificaciones de diseño con procedimientos analíticos, principalmente en lo que dice relación con el agrietamiento y el escalonamiento.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo ha sido publicado gracias al aporte del Instituto Chileno del cemento y del Hormigón.

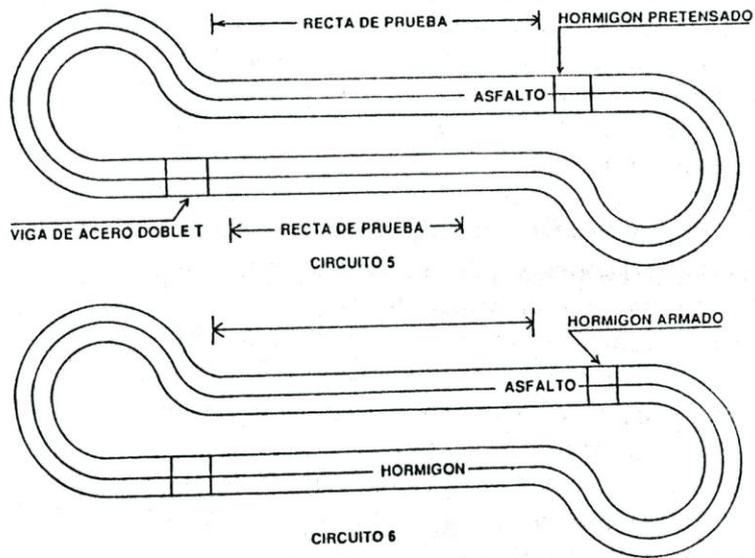


Fig. 1 Forma de los tramos de prueba

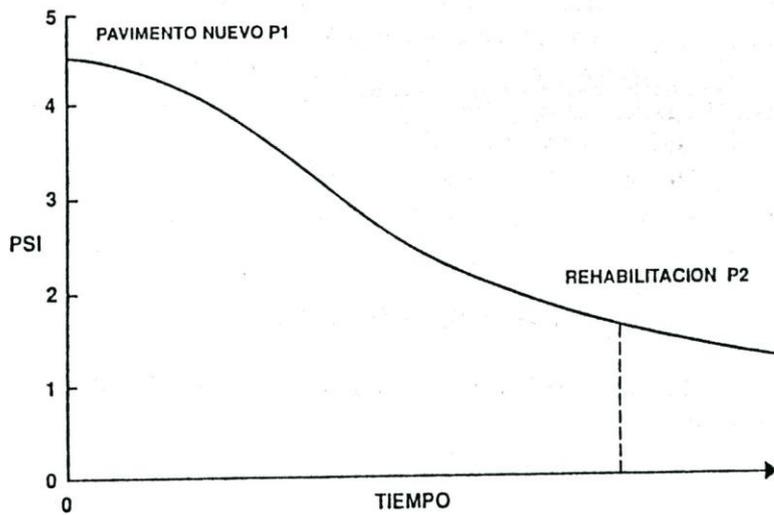


Fig. 2 Índice de serviciabilidad presente (PSI)

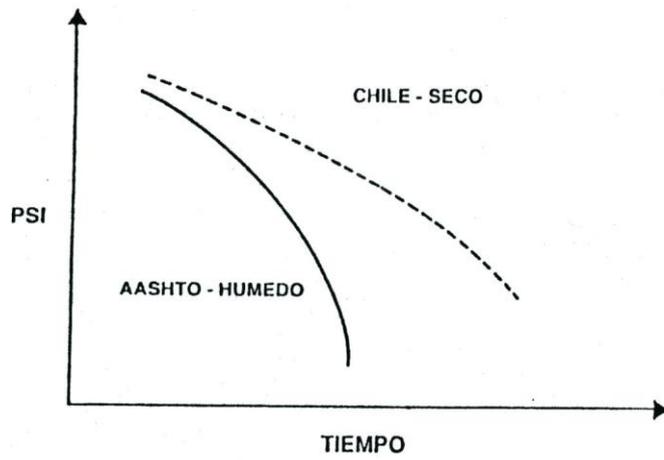


Fig. 3 Efectos climáticos

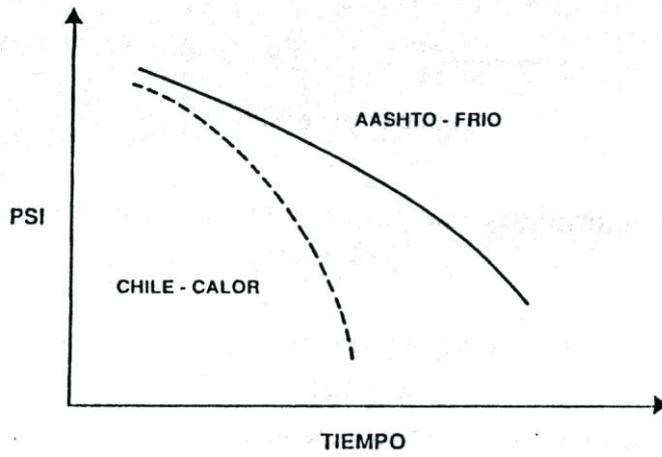


Fig. 4 Efectos de construcción

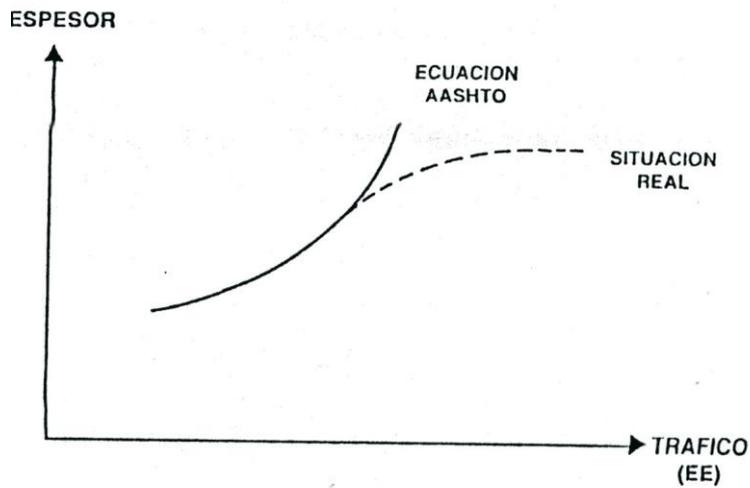


Fig. 5 Relación espesor de la losa vs. tráfico

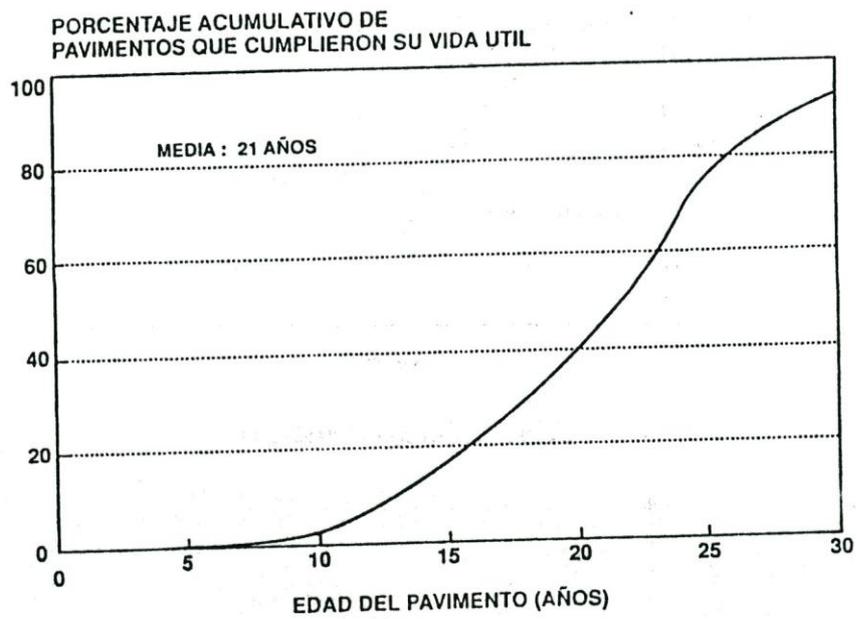


Fig. 6 Porcentaje acumulativo de pavimentos fallados respecto de la edad de los pavimentos

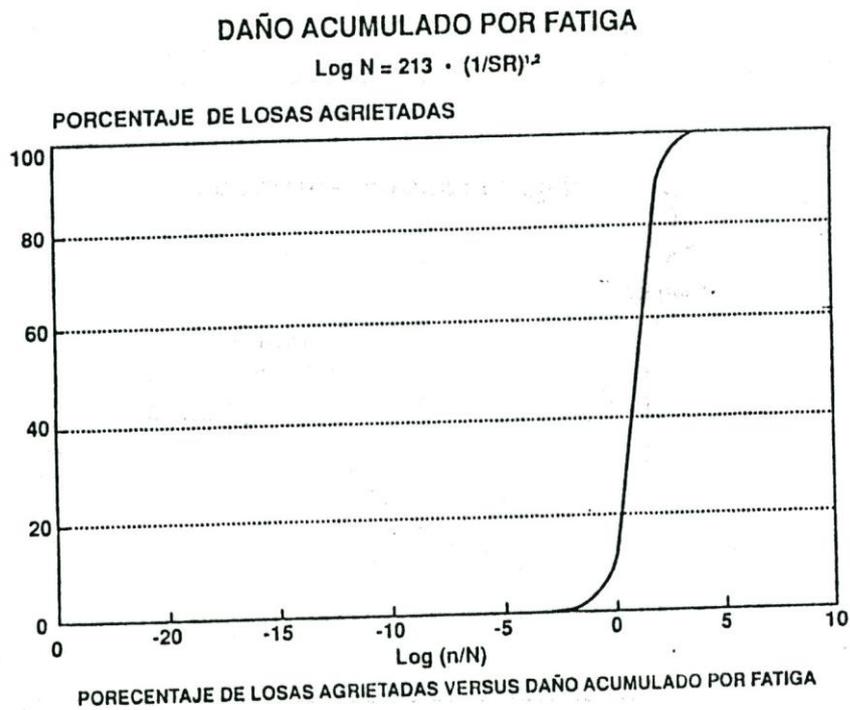


Fig. 7 Daño acumulado por fatiga

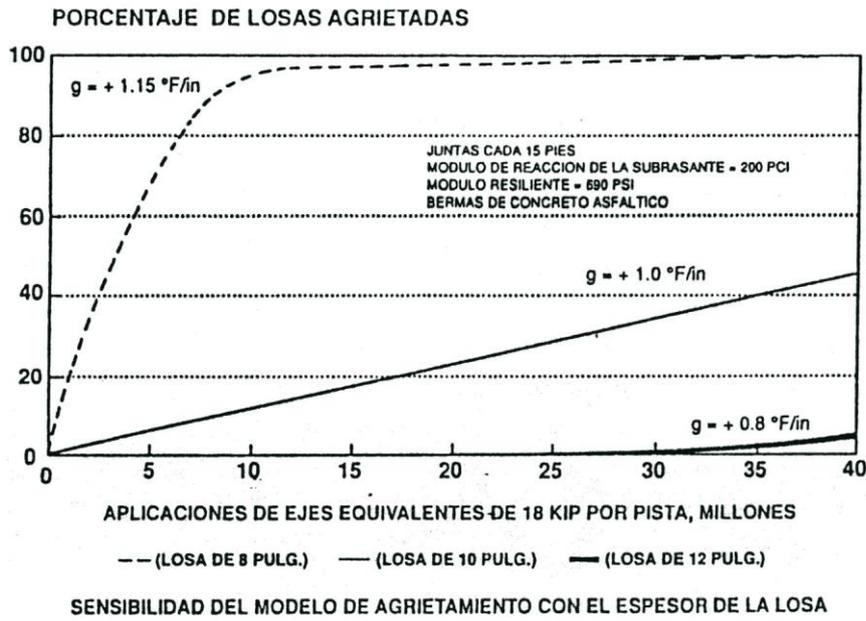


Fig. 8 Agrietamiento transversal para distintos espesores de losa

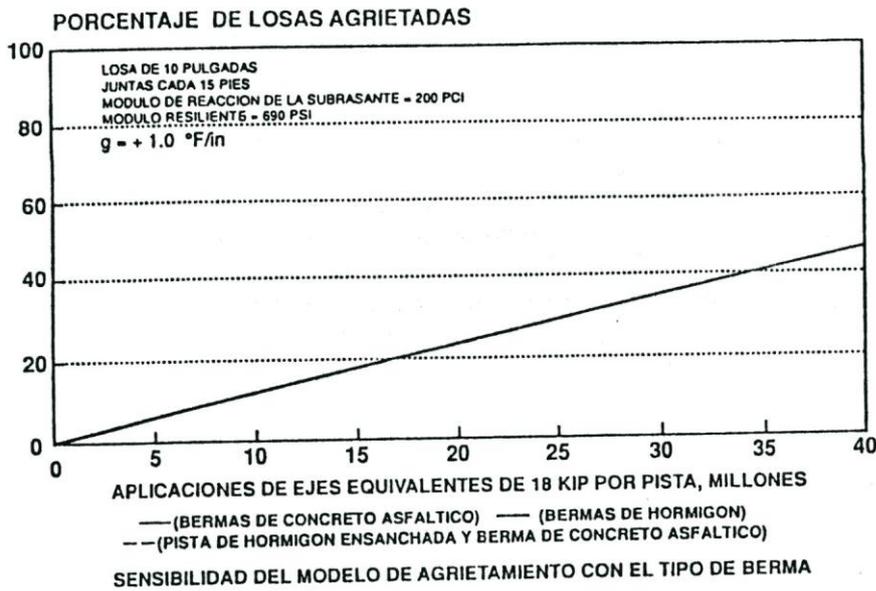


Fig. 9 Agrietamiento transversal según tipo de berma

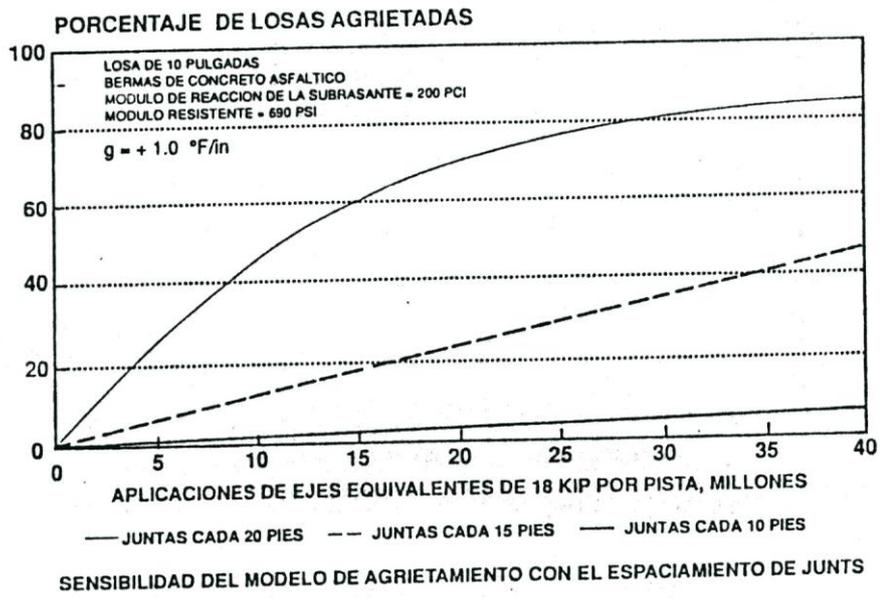


Fig. 10 Agrietamiento transversal debido a espaciamiento entre juntas