

# METODO DIRECTO PARA LA EVALUACION DE LAS NECESIDADES ESTRUCTURALES DE PAVIMENTOS FLEXIBLES BASADO EN DEFLEXIONES CON EL DEFLECTOMETRO DE IMPACTO (FWD)

## Resumen

Este trabajo presenta un método simple y directo (YONAPAVE) para la evaluación de las necesidades estructurales de pavimentos flexibles basado en la interpretación del cuenco de deflexiones usando conceptos mecanísticos y empíricos. La primera parte de YONAPAVE<sup>1</sup> estima el Número Estructural Efectivo (SN) y el módulo equivalente de la subrasante independientemente del espesor de las capas constitutivas del pavimento. Por ello, no hay necesidad de practicar perforaciones, permitiendo ahorros en tiempo y dinero, y evitando incomodidades al flujo del tránsito. La segunda parte de YONAPAVE requiere la medición del espesor de la carpeta asfáltica existente por medio de perforaciones superficiales para verificar las condiciones de fatiga en la capa asfáltica y proponer el refuerzo necesario para satisfacer los criterios de fatiga para los niveles de tráfico futuro estimados.

Las simples ecuaciones y algoritmos de YONAPAVE permiten rápidas estimaciones estructurales en el campo. La simplicidad del método y su independencia del uso de sofisticados programas de computadora hacen de YONAPAVE un método apto para evaluar las necesidades estructurales de una red de carreteras y hacer un estimativo de los costos usando la información deflectométrica del FWD. Con el reiterado uso y la cimentación de experiencia local, sumado a la comparación y calibración con otros métodos de evaluación estructural y cálculo de refuerzos, YONAPAVE puede constituirse en el método adoptado para determinar las necesidades de refuerzo a nivel de proyecto ejecutivo.

## Introducción

La Guía AASHTO de 1993 para el Diseño Estructural de Pavimentos (1) presenta tres métodos para determinar el Número Estructural Efectivo ( $SN_{ef}$ ) de un pavimento flexible convencional. Uno de los métodos, denominado Método NDT (por Non Destructive Testing), se basa en la medición e interpretación de Ensayos No Destructivos (deflexiones). Este método supone que la capacidad

---

<sup>1</sup> Nota del autor: La primera parte de YONAPAVE fue publicada originalmente en inglés en "Direct Method for Evaluating the Structural Needs of Flexible Pavements Based on FWD Deflections", Transportation Research Record 1860, TRB, Washington DC, 2003. Acá se presentan las dos partes de YONAPAVE en castellano para facilitar la comprensión global del método.

estructural de un pavimento depende de su espesor total y de su rigidez. La relación entre  $SN_{ef}$ , el espesor y la rigidez en la Guía AASHTO es:

$$SN_{eff} = 0.0045h_p \sqrt[3]{E_p} \dots [1]$$

Donde:

$h_p$  = espesor total de las capas del pavimento por encima de la subrasante, en pulgadas

$E_p$  = modulo efectivo de las capas del pavimento por encima de la subrasante, en psi

La guía AASHTO recomienda retrocalcular el valor de  $E_p$  en base a datos deflectométricos usando el modelo bi-capa elástico lineal (también conocido como el modelo de Burmister).

La búsqueda de soluciones al problema de determinar el número estructural efectivo basado en la interpretación de deflexiones medidas con el deflectómetro de impacto – FWD (Falling weight deflectometer) se conoce hace tiempo (2, 3, 4). La mayoría de los métodos se basa en la relación intrínseca entre los parámetros derivados del cuenco de deflexiones y los coeficientes de capa, o módulos de elasticidad y espesores del sistema pavimento-subrasante.

La idea de relacionar características de carga-deformación (cuencos de deflexiones del FWD) con parámetros estructurales (el SN) del pavimento es atractiva ya que refleja una relación fundamental de la mecánica clásica. Por otro lado, la idea de combinar postulados mecanistas con el Número Estructural de AASHTO puede parecer un tanto controversial debido a la naturaleza empírica de SN (5). Sin embargo, el empiricismo forma parte integral de la ingeniería de pavimentos desde el establecimiento de la relaciones como  $M_R = 1,500 \text{ CBR}$  (6) (donde  $M_R$  es el módulo de resiliencia de la subrasante expresado en psi, y CBR es el California Bearing Ratio). Esta expresión empírica, que fue publicada hace 40 años atrás, sigue siendo usada ampliamente en todo el mundo.

La evaluación del número estructural SN de un pavimento en servicio es útil ya que refleja su aptitud o deficiencia, y se presta a determinar directamente las necesidades estructurales. Obviamente, el valor de SN sólo no es suficiente y un valor bajo de SN no es necesariamente malo, dependiendo del tráfico y la capacidad portante de la subrasante. Si esta capacidad es alta y la demanda de tráfico es baja, entonces todo lo que se necesita es un SN bajo. De esta manera, la evaluación estructural es útil cuando esta proporciona el valor de SN conjuntamente con la capacidad portante de la subrasante.

Una de las mayores desventajas del esquema de AASHTO y de otros métodos derivados de él es su gran dependencia de los espesores de capas y del pavimento. Esta fuerte dependencia de los espesores de capas existe también en los métodos de retrocálculo que utilizan los cuencos de deflexiones medidos con el FWD para la determinación de módulos de elasticidad en base a técnicas de comparación (7, 8).

Si bien se podría alegar que el problema de los espesores de capa se puede resolver con unas pocas calicatas, es frecuente encontrar que estos valores son ambiguos, heterogeneos, y difíciles de determinar, incluso en secciones cortas de pavimento. Además, las perforaciones son costosas, lentas y causan problemas al flujo del tránsito. La Tabla 1 muestra datos obtenidos en secciones de carretera de Israel en la que se puede observar la dificultad en determinar valores únicos de espesores.

**TABLA 1: Espesores de Capa y valor de  $h_P$  en Secciones Analizadas de Israel**

Carretera No.	Longitud (km)	No. de Calicatas	Rango de Espesores Medidos			Suelo de Subrasante
			$h_{AC}$ (cm)	$h_{GR}$ (cm)	$h_P$ (cm)	
4	5.5	11	13 á 28	25 á 44	45 á 70	A-3
90	7.0	29	8 á 20	5 á 72	15 á 80	A-2-7
60	2.0	8	15 á 33	17 á 115	40 á 130	A-7-6
2	2.0	9	9 á 13	35 á 65	45 á 80	A-3
73	5.7	22	20 á 50	20 á 85	50 á 120	A-7-6
767	2.5	10	12 á 17	0 á 55	15 á 70	A-7-6
MB	1.0	8	8 á 18	22 á 90	35 á 110	A-2-4, A-7-6

Nota:  $h_{AC}$ = Espesor de capas asálticas;  $h_{GR}$ =Espesor de capas granulares;  $h_P$ =Espesor total del pavimento

El valor de  $h_P$  tiene un efecto pronunciado en los resultados de evaluación. Por ejemplo, utilizando el esquema propuesto por Rohde (2) se puede mostrar que valores de  $h_P$  en el rango de 40 á 80 cm resultan en estimativos de  $SN_{ef}$  que difieren en un rango de 40% á 80% o más.

Este trabajo presenta un método directo (YONAPAVE) para determinar  $SN_{ef}$  y el módulo de resiliencia de la subrasante basado en los cuencos de deflexiones medidos con el FWD y que es independiente de  $h_P$ . El método se basa en el modelo de Hogg que representa una losa infinita sustentada por una subrasante elástica de espesor finito o infinito. Los módulos de subrasante determinados con YONAPAVE guardan una alta correlación con los obtenidos con el programa MODULUS (7, 9).

## Derivación del Método YONAPAVE

A.H.A. Hogg presentó el análisis de una losa de espesor delgado sustentada por una fundación elástica de espesor finito o infinito en 1938 (10) y 1944 (11). Wiseman et al (12) demostraron la utilidad del modelo para la evaluación estructural de pavimentos y Hoffman (13) amplió la solución para el cálculo de cuencos de deflexiones con el modelo de Hogg para cargas de cualquier forma y a diferentes distancias del eje de la carga. La Tabla 2 muestra los parámetros y las definiciones del modelo.

Incorporando los valores de  $\mu_p=0.25$  y  $\mu_{sg}=0.5$  en las ecuaciones [2] y [3], y realizando las sustituciones algebraicas pertinentes, la Ecuación [1] se puede reformular como:

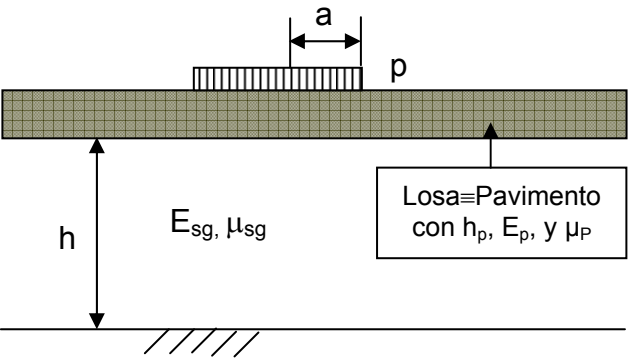
$$SN_{ef} = 0.0182l_0^3\sqrt{E_{sg}} \dots [4]$$

Donde:

$l_0$  = Longitud Característica, en cm,

$E_{sg}$  = Módulo de Elasticidad de la subrasante, en Mpa.

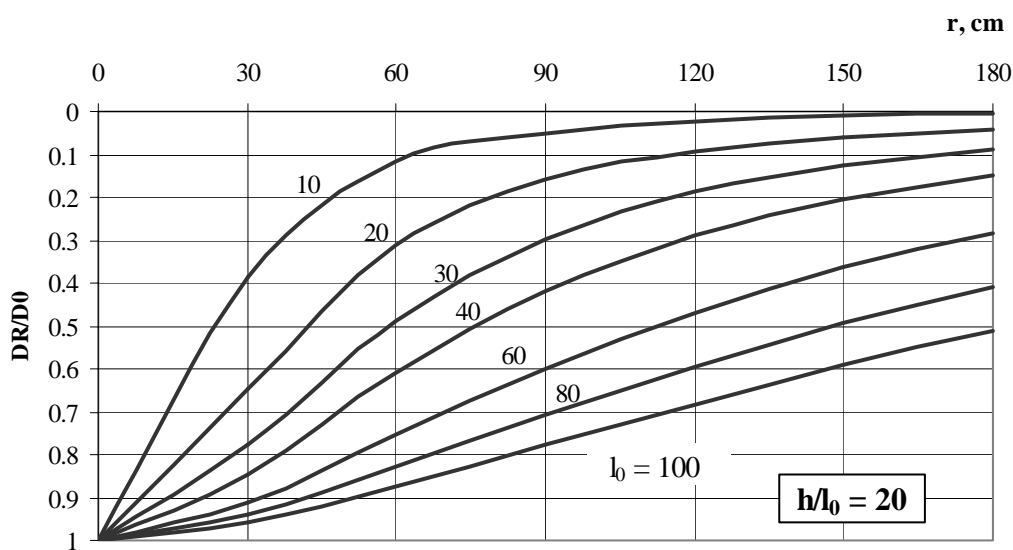
**TABLA 2: Parámetros y Definiciones del Modelo de Hogg**

Geometría del Modelo	 <p>Losas=Pavimento con <math>h_p</math>, <math>E_p</math>, y <math>\mu_p</math></p>
Parámetros Básicos del Modelo	<p>Rigidez de la losa (pavimento), <math>D = \frac{E_p h_p^3}{12(1 - \mu_p^2)} \dots [2]</math></p> <p>Longitud Característica, <math>l_0 = \sqrt[3]{\frac{D}{E_{sg}} * \frac{(1 + \mu_{sg})(3 - 4\mu_{sg})}{2(1 - \mu_{sg})}} \dots [3]</math></p> <p>Módulo de Subrasante y coeficiente de Poisson, <math>E_{sg}</math>, <math>\mu_{sg}</math></p>

Se observa en la Ecuación [4], que reemplazando el sistema pavimento-subrasante real por medio de la simplificación de Hogg, es posible evaluar el SN efectivo de acuerdo al postulado de la AASHTO, por medio de la longitud característica y el módulo de elasticidad de la subrasante. El SN efectivo del pavimento ya no es más una función directa de  $h_p$ . El problema se reduce, entonces, a la determinación de  $l_0$  y  $E_{sg}$  de la interpretación del cuenco de deflexiones con el FWD.

## Cuenco de Deflexiones en el Modelo de HOGG

La Figura 1 muestra cuencos de deflexiones calculados con el modelo de Hogg "cargado" con la configuración geométrica del FWD, es decir, con una carga circular de 6 pulgadas de radio. La figura ilustra la variación del cociente de las deflexiones  $D_r/D_0$  para valores de deflexiones a diferentes distancias del eje de carga en relación a la deflexión central para diferentes valores de  $l_0$ , y para una base rígida (capa rocosa) a un espesor equivalente a 20 veces  $l_0$  ( $h/l_0=20$ ).



**FIGURA 1: Variación de  $D_r/D_0$  vs.  $l_0$  en el Modelo de Hogg para  $h/l_0=20$ , Carga de FWD**

La Figura 2 muestra la variación del Area del cuenco de deflexiones en función de la longitud característica para el modelo de Hogg con una capa rocosa a una profundidad de 10 veces  $l_0$  ( $h/l_0=10$ ). El Area del cuenco de deflexiones se calcula en base a la siguiente expresión (12):

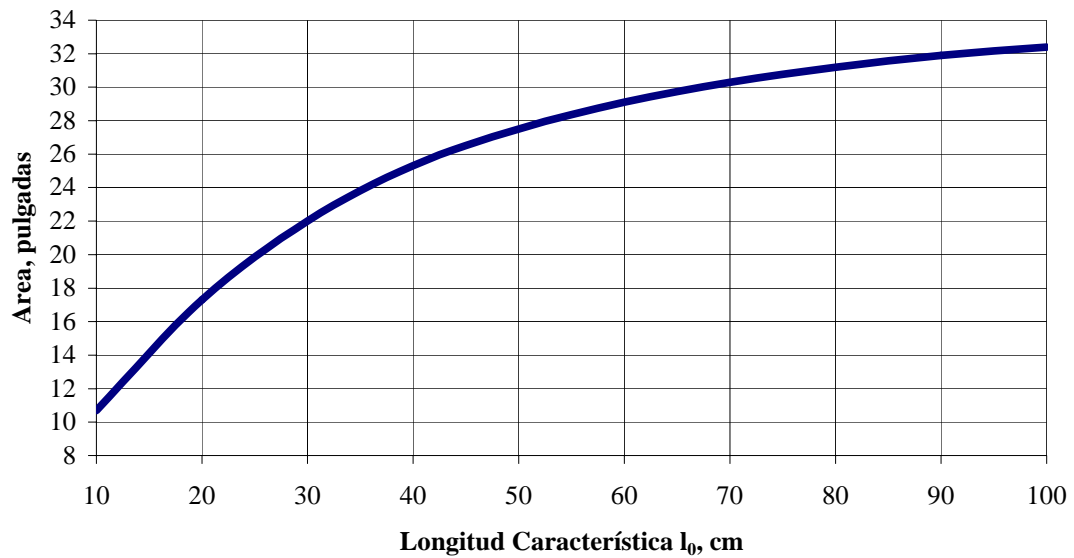
$$Area = 6\left(1 + 2\frac{D_{30}}{D_0} + 2\frac{D_{60}}{D_0} + \frac{D_{90}}{D_0}\right) \dots [5]$$

Donde:

Area = Area del cuenco de deflexiones, en pulgadas,  
 $D_0, D_{30}, D_{60}, D_{90}$  = Deflexiones del FWD para  $r=0, 30, 60$  and  $90$  cm respectivamente.

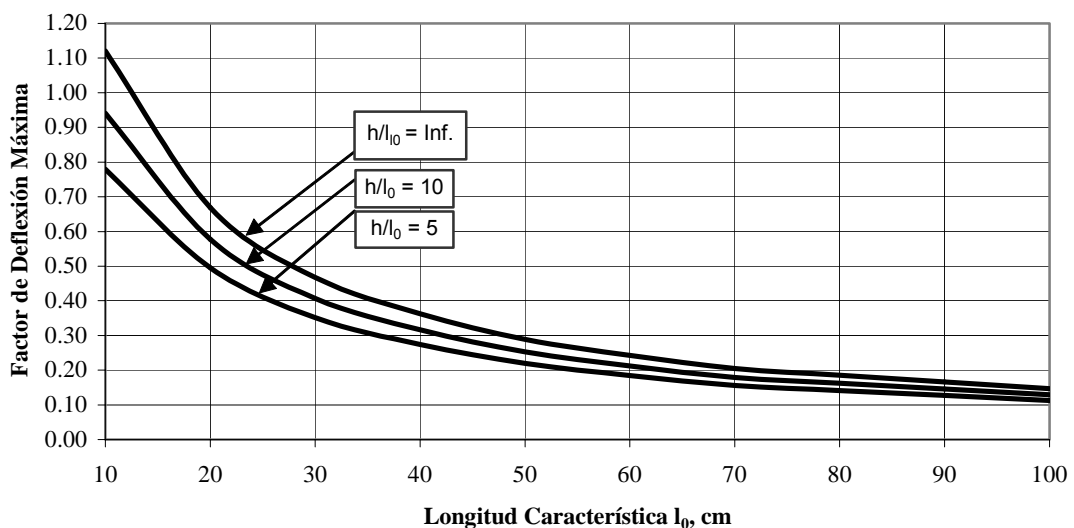
De la Figura 2 puede verse que la longitud característica se determina en forma directa del valor del Area del cuenco de deflexiones para un valor seleccionado de  $h/l_0$ . Curvas similares de AREA vs  $l_0$  pueden desarrollarse para diferentes

valores de  $h/l_0$ . También puede verse que la longitud característica se determina en forma independiente del valor del espesor del pavimento.



**FIGURA 2: “Área” del Cuenco de Deflexiones vs.  $l_0$  en el Modelo de Hogg para  $h/l_0=10$ , Carga de FWD**

La Figura 3 muestra la variación del factor de deflexión máxima en el modelo de Hogg en función de la longitud característica para diferentes valores de  $h/l_0$ .



**FIGURA 3: Factor de Deflexión Máxima en el Modelo de Hogg para diferentes valores de  $h/l_0$**

El valor del factor de deflexión máxima se define como:

$$FactorDeflexionMaxima = \frac{D_0 E_{sg}}{pa} \dots [6]$$

Donde:

$D_0$  = Deflexión máxima bajo el plato de carga circular del FWD de 12 pulgadas de diámetro, en unidades de longitud.

$E_{sg}$  = Módulo de Elasticidad de la subrasante, en unidades de carga/superficie.

$p$  = Presión en el plato de carga del FWD, en las mismas unidades de  $E_{sg}$ .

$a$  = radio del plato de carga del FWD, en las mismas unidades de  $D_0$ .

Una vez que  $h/l_0$  ha sido seleccionado, y  $l_0$  ha sido determinado por medio de una relación similar a la de la Figura 2, se puede determinar el factor de deflexión máxima por medio de la Figura 3. El módulo de elasticidad de la subrasante es calculado multiplicando el factor de deflexión máxima por la presión y el radio del plato de carga, y dividiendo por la deflexión máxima medida con el FWD. Una vez que se han determinado  $l_0$  y  $E_{sg}$ , es posible calcular el valor del número estructural SN por medio de la Ecuación [4].

## Algoritmos de YONAPAVE

Basado en múltiples comparaciones entre el módulo de elasticidad determinado usando el método propuesto y el programa MODULUS, se ha podido determinar que la mayor coincidencia entre ambos módulos se obtiene cuando la profundidad de la capa rocosa en el modelo de Hogg, es decir el valor de  $h/l_0$ , es determinado en función del Area del cuenco de deflexiones. Usando simples técnicas de ajuste de curvas es posible expresar la relación entre la longitud característica y el Area del cuenco de deflexiones usando una expresión de la forma:

$$l_0 = A \times e^{B \times Area} \dots [7]$$

Donde:

$l_0$  = Longitud Característica en cm,

Area = Area del Cuenco de Deflexiones, en pulgadas,

A, B = Coeficientes de ajuste de curvas según se describe en la Tabla 3.

**TABLA 3: Coeficientes de Ajuste de Curvas para el Cálculo de  $l_0$** 

Rango de Valores del Area, pulgadas	$h/l_0$	A	B
Area $\geq 23.0$	5	3.275	0.1039
$21.0 \leq \text{Area} < 23.0$	10	3.691	0.0948
$19.0 \leq \text{Area} < 21.0$	20	2.800	0.1044
Area $< 19.0$	40	2.371	0.1096

De una manera similar, es posible ajustar una curva exponencial para la determinación de  $E_{sg}$  usando una expresión de la forma:

$$E_{sg} = m \times \frac{P}{D_0} \times l_0^n \dots [8]$$

Donde:

$E_{sg}$  = Módulo de Elasticidad de la Subrasante, en Mpa.

$p$  = Presión de carga en el plato del FWD, en kpa.

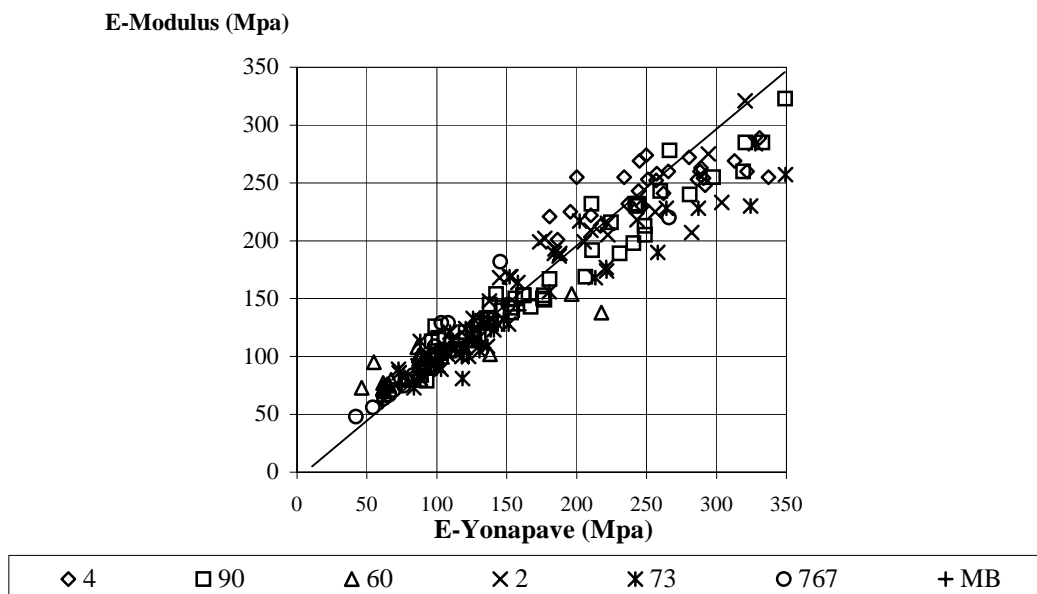
$D_0$  = Deflexión del FWD bajo el plato de carga, en  $\mu\text{m}$ .

$m$ ,  $n$  = Coeficientes de ajuste de curva según se describe en la Tabla 4.

**TABLA 4: Coeficientes de Ajuste para el Cálculo de  $E_{sg}$** 

$h/l_0$	$m$	$N$
5	926.9	-0.8595
10	1,152.1	-0.8782
20	1,277.6	-0.8867
40	1,344.2	-0.8945

La Figura 4 muestra la concordancia entre los valores de  $E_{SG}$  obtenidos con MODULUS y con YONAPAVE en varias secciones de pavimentos de Israel (véase Tabla 1).



**FIGURA 4: Módulos de Elasticidad de MODULUS vs. YONAPAVE**

La figura muestra que los módulos obtenidos por sendos métodos son razonablemente similares y se distribuyen alrededor de la línea de igualdad. La mejor concordancia es obtenida para módulos por debajo de 200 MPa.

### Determinación de $SN_{ef}$

Una vez que los valores de  $l_0$  y  $E_{SG}$  han sido determinados, según se explicó en la sección anterior, es posible calcular  $SN_{ef}$  usando la ecuación [4]. Debido a las características intrínsecas del modelo de Hogg, en el cual la estructura del pavimento es modelada como una losa de espesor pequeño, y consecuentemente no se producen deformaciones verticales en la estructura del pavimento, la ecuación [4] subestima el valor de SN, para lo cual se propone la corrección detallada a continuación.

Basado en numerosos análisis de retrocálculo con el programa MODULUS, donde se utilizó la mejor información disponible en lo que a espesores de capa se refiere, se derivó un valor de SN calculado en base a MODULUS conjuntamente con el SN calculado con la ecuación [4]. El valor SN derivado de MODULUS utilizó los módulos de elasticidad retrocalculados de los cuencos de deflexiones medidos con el FWD en base al esquema propuesto en la guía AASHTO (1). Este valor de SN fue adoptado como el valor "correcto" del SN efectivo del pavimento.

La comparación de los valores de SN derivados del programa MODULUS y los obtenidos usando la ecuación [4] permite definir una simple ecuación de corrección de la forma:

$$SN_{ef} \text{ corregido} = 2 SN_{Ecuacion [4]} - 0.5 \dots [9]$$

La ecuación [9] tiene un coeficiente de determinación de  $R^2 = 0.84$ . De esta manera, los valores de SN obtenidos por medio de la ecuación [4] deben ser

corregidos usando la ecuación [9] para contrarrestar la subestimación relacionada con la losa del modelo de Hogg.

### **Corrección de $SN_{ef}$ por Temperatura**

La temperatura tiene un impacto directo sobre el módulo de elasticidad de la carpeta asfáltica. Este efecto se ve directamente reflejado en los parámetros del cuenco de deflexiones medido con el FWD a diferentes temperaturas. El grado de influencia de la temperatura sobre el módulo de elasticidad del asfalto, y consecuentemente sobre las deflexiones, depende del tipo de mezcla, de su edad, de su grado de deterioro, etc. El efecto de la temperatura sobre las deflexiones medidas con el FWD se ve afectado también por el espesor de la carpeta asfáltica.

Basado en numerosas mediciones de cuencos de deflexiones con el FWD en pavimentos flexibles tanto de carreteras como de aeropuertos durante el mismo día de verano a diferentes temperaturas, se han podido definir rangos típicos de los efectos de la temperatura en Israel para carpetas de más de 10 cm de espesor, según se indica a continuación:

- Entre la mañana y las primeras horas de la tarde, la temperatura de la carpeta asfáltica a una profundidad de 5 cm aumenta típicamente hasta un 60%.
- Para ese rango de temperaturas, la deflexión máxima bajo el plato de carga del FWD aumenta típicamente hasta un 20%.
- En ese rango de temperaturas, el AREA del cuenco de deflexiones disminuye típicamente hasta un 7%.

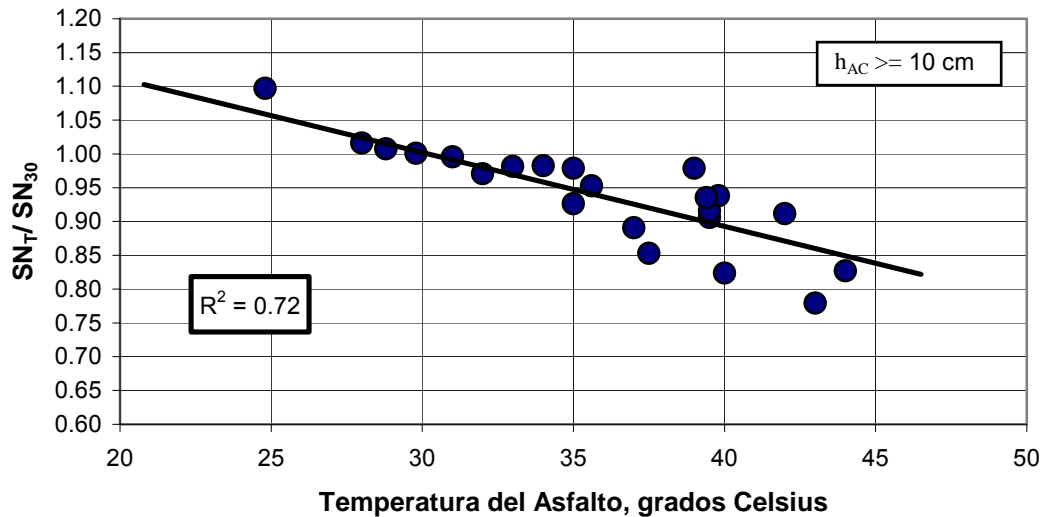
En ese rango de temperaturas, los módulos de elasticidad retrocalculados con el programa MODULUS para un modelo tricapa elástico representando a estos pavimentos tiene las siguientes variaciones típicas:

- Variación típica del módulo de la carpeta  $E_{AC}$ : -50%
- Variación típica del módulo de las capas granulares: +10%
- Variación típica del módulo de la subrasante  $E_{SG}$ : -10%

Es interesante notar que una mezcla asfáltica "fresca", ensayada en el laboratorio, exhibe normalmente una variación del módulo de resiliencia del orden de 100% o más en el mismo rango de temperaturas (13). Una discusión sobre las diferencias de comportamiento entre el material de "capa" y la "muestra" de laboratorio excede el alcance de este trabajo, aunque por lo general se observa que el comportamiento de la "capa" en el sitio es menos pronunciada que el comportamiento de la "muestra" en el laboratorio. Este efecto más moderado tiene que ver también con la influencia recíproca entre las diferentes capas y efectos de no linealidad, los cuales son muy difíciles de reproducir y medir en el laboratorio.

La Figura 5 muestra la variación del número estructural a cualquier temperatura con respecto a una temperatura base de 30 °C versus la temperatura de la carpeta asfáltica medida a una profundidad de 5 cm. Los valores de SN a distintas temperaturas fueron calculados usando YONAPAVE para diferentes carreteras y aeropuertos de Israel, en los cuales se midieron cuencos de

deflexiones el mismo día a diferentes horas desde la mañana temprano hasta la tarde. Una temperatura referencial de 30 °C fue seleccionada como representativa de las condiciones climáticas prevalecientes en Israel.



**FIGURA 5: Variación del SN Efectivo con la Temperatura de la Carpeta Asfáltica**

La relación lineal representada en la Figura 5 puede expresarse como:

$$SN_T / SN_{30^{\circ}C} = 1.33 - 0.011T \dots [10]$$

Donde::

SN<sub>T</sub> = SN efectivo a cualquier temperatura

SN<sub>30°C</sub> = SN efectivo a una temperatura base de 30° C

T = Temperatura de la carpeta asfáltica en °C a 5 cm de profundidad.

La ecuación [10] puede ser usada para corregir el SN efectivo calculado con YONAPAVE a diferentes temperaturas a una temperatura base referencial de 30° C. Esta ecuación fue desarrollada para temperaturas de carpetas asfálticas en el rango de 22 á 45° C. No es recomendable realizar extrapolaciones fuera de este rango sin una verificación experimental. Además, la ecuación es aplicable al caso de carpetas asfálticas de 10 ó más cm de espesor. En el caso de carpetas con espesores menores á 10 cm se evidencia un efecto pequeño y por lo tanto despreciable, de la temperatura sobre el valor de SN. De la Figura 5 o la ecuación [10] es posible desarrollar una corrección por temperatura para otros valores referenciales distintos de 30° C.

## **Implementación de YONAPAVE para la Evaluación Estructural y el Diseño del Refuerzos**

La implementación de YONAPAVE para la evaluación estructural y el diseño de refuerzos de pavimentos flexibles comprende dos fases de análisis:

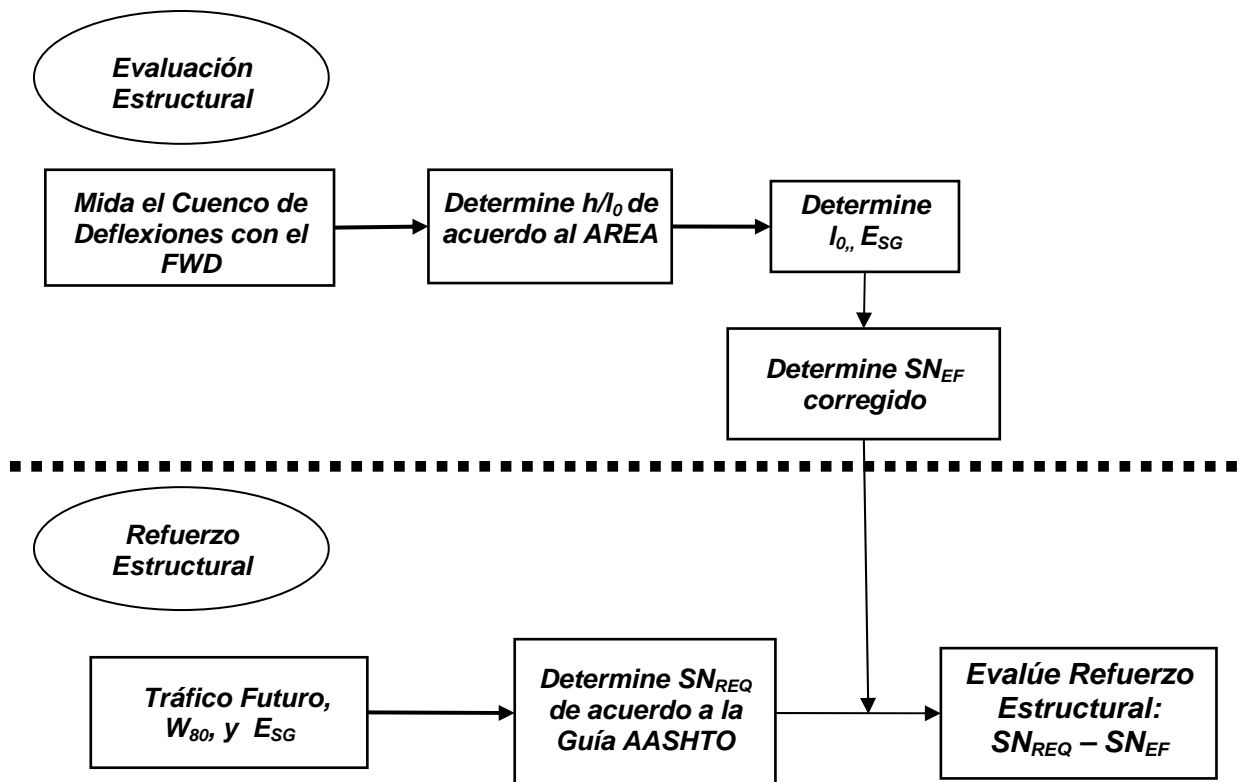
1. La evaluación de la capacidad estructural total del pavimento, y
2. La verificación de la resistencia a la fatiga en las capas asfálticas.

Estas dos fases de análisis se detallan a continuación.

### **Evaluación de la Capacidad Estructural Total del Pavimento**

La evaluación de la capacidad estructural total del pavimento está esquematizada en la Figura 6 y se compone de los siguientes pasos:

1. La medición del cuenco de deflexiones con el FWD con cargas de 45 á 75 KN (dependiendo de los límites legales de carga en la red). Paralelamente, el registro de la temperatura de la carpeta asfáltica a una profundidad de 5 cm cada 1 á 2 horas.
2. El análisis de la homogeneidad del pavimento y de la necesidad de dividirlo en subsecciones dependiendo de los valores de deflexión máxima y/o el AREA del cuenco de deflexiones, y/o la inspección visual de las fallas (tipo, severidad y cantidad), la rugosidad superficial o algún otro criterio.
3. Determinación de  $h/l_0$  en base a los valores del AREA.
4. Cálculo de  $l_0$  y  $E_{SG}$  usando las Ecuaciones [7] y [8], respectivamente.
5. Cálculo del valor de  $SN_{ef}$  usando la Ecuación [4] y corrección de este valor usando la Ecuación [9].
6. Corrección de SN por temperatura usando la Ecuación [10].
7. Para la adopción de valores de diseño se recomienda usar el percentil 30 para  $E_{SG}$ , y percentiles de 10 á 30 para valores corregidos de  $SN_{ef}$  dependiendo de la importancia de la vía analizada, seleccionando los percentiles más bajos para las carreteras más importantes.



**FIGURA 6: Diagrama de flujo esquemático para la evaluación de la capacidad estructural total del Pavimento.**

El refuerzo estructural puede determinarse de acuerdo al siguiente esquema:

1. Evalúe la demanda futura de tráfico en ejes equivalentes de 80 KN (18 kilolibras) durante el período de diseño seleccionado (10 á 20 años dependiendo de los presupuestos existentes u otros criterios de rehabilitación).
2. Usando el módulo de la subrasante  $E_{SG}$  obtenido por medio de YONAPAVE y la demanda futura de tráfico determinada en el numeral anterior, determine el número estructural requerido de acuerdo a la Guía AASHTO de 1993 (1).
3. Compare el número estructural requerido ( $SN_{REQ}$ ) con el efectivo ( $SN_{EF}$ ) evaluado con YONAPAVE para establecer la capacidad estructural y estimar las necesidades de refuerzo. La capacidad estructural puede expresarse por medio del Índice de Capacidad Estructural (ICE) definido como:

$$ICE (\%) = (SN_{EF}/SN_{REQ}) \times 100 \dots [11]$$

4. Si el ICE es igual o mayor al 100% el pavimento no adolece de deficiencia estructural. Si el ICE en cambio es menor al 100% existe una carencia estructural. Es posible expresar el espesor de carpeta asfáltica requerido para satisfacer el deficit estructural del pavimento de acuerdo a la siguiente expresión:

$$H_{AC} = (SN_{Req} - SN_{ef}) / \alpha \dots [12]$$

Donde:

$H_{AC}$  = Espesor del refuerzo asfáltico, en pulgadas.

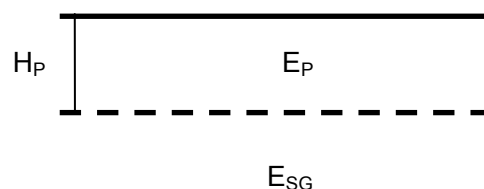
$\alpha$  = coeficiente de capa asfáltica (0.44 según AASHTO u otros valores)

### **Verificación de la Resistencia a la Fatiga en las Capas Asfálticas.**

La Guía AASHTO 1993 no considera en forma directa la fatiga de la carpeta asfáltica como mecanismo de falla estructural en pavimentos flexibles. Otros métodos de diseño desarrollados en los años 70 y 80 del siglo pasado, entre los que se cuentan el método Shell (15) y el método del Instituto del Asfalto (16), sí han establecido relaciones entre la deformación unitaria de tracción en la base de la carpeta asfáltica y el desarrollo de fisuras de fatiga, las cuales han sido incorporadas como criterios de diseño estructural.

Para incorporar los criterios de fatiga de la carpeta asfáltica en la evaluación estructural de un pavimento existente, es necesario realizar calicatas superficiales para determinar el espesor de la carpeta existente y el grado de adherencia entre sus subcapas. Además hay que evaluar el grado de fisuramiento, desprendimiento, desintegración y oxidación de la carpeta existente para determinar su valor estructural residual en el cálculo del refuerzo total requerido. YONAPAVE propone incorporar el análisis de fatiga de la carpeta asfáltica según se explica a continuación.

Volviendo al sistema bicapa elástico considerado en la guía AASHTO (ver Ecuación [1]), YONAPAVE caracteriza al pavimento-subrasante evaluados como un sistema bicapa elástico efectivo o equivalente representado en la Figura 7. En el sistema representado en la figura, el espesor y el módulo del pavimento ( $h_P$  y  $E_P$ ) son valores efectivos que se obtienen directamente del cuenco de deflexiones medido con el FWD usando las siguientes simplificaciones y supuestos.



**FIGURA 7: Sistema Bicapa Equivalente del Pavimento-Subrasante**

Si se aplica al modelo bicapa elástico de la figura 7 la geometría de carga del FWD, se verifica que para un rango de espesores de la capa del pavimento,  $h_P$ , de 25 á 75 cm, la relación entre el cociente modular  $E_P/E_{SG}$  y el AREA del cuenco de deflexiones es prácticamente independiente del espesor del pavimento, de manera que es posible expresar la siguiente aproximación:

$$E_P/E_{SG} = 0.1256 e^{0.2095 \text{ AREA}} \dots [13]$$

Donde:

$E_P$  = Módulo efectivo o equivalente del pavimento.

$E_{SG}$  = Módulo de la subrasante.

AREA = Area del cuenco de deflexiones de acuerdo a la Ecuación [5].

Como el valor de  $E_{SG}$  ya ha sido determinado por medio de la Ecuación [8], la Ecuación [13] permite estimar el módulo efectivo del pavimento  $E_P$ . Como también ya se conoce al valor de  $SN_{ef}$ , el espesor equivalente o efectivo del pavimento,  $h_P$ , puede calcularse por medio de la Ecuación [1].

Por otra lado, la resistencia a la fatiga de la carpeta asfáltica es calculada de acuerdo a la ecuación propuesta por Finn et al (17) modificada por Uzan (18) para tomar en cuenta la fase de propagación de las fisuras. La ecuación resultante es:

$$\log W_{80} = -3.13 + \frac{h}{380} - 3.291 \log \varepsilon_t - 0.854 \log E_{AC} \dots [14]$$

Donde:

$W_{80}$  = Número de ejes equivalentes de 80 KN (8.2 ton)

$h$  = espesor de la carpeta asfáltica en mm.

$\varepsilon_t$  = Máxima deformación unitaria de tracción en la base de la carpeta asfáltica.

$E_{AC}$  = Módulo de elasticidad del asfalto a la temperatura de diseño, en Mpa.

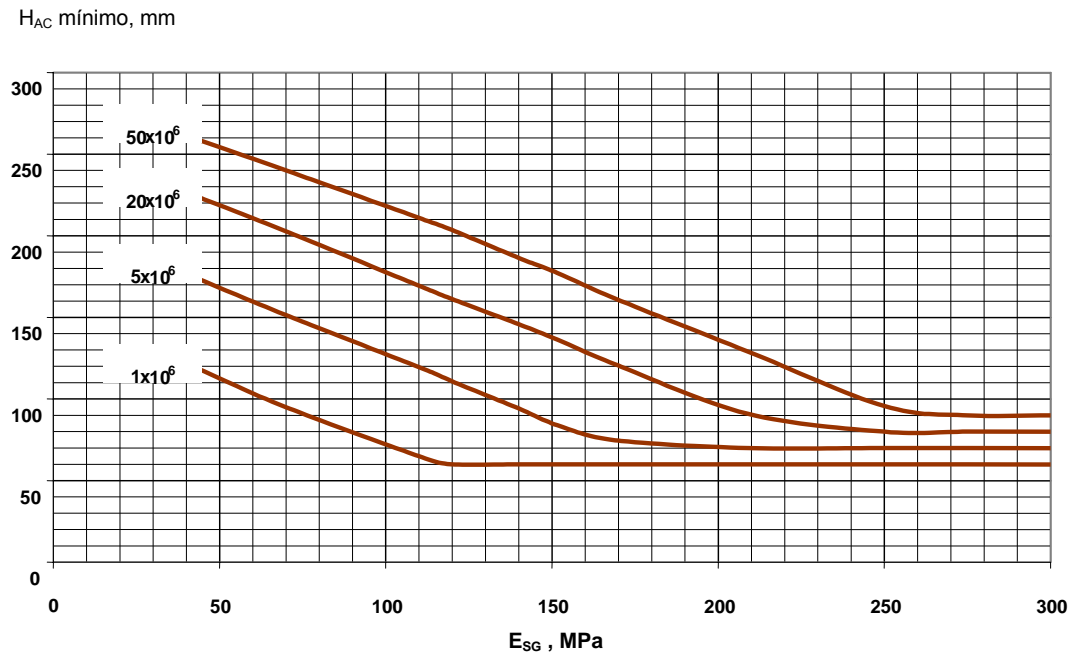
El primer paso en la verificación de la fatiga en el método YONAPAVE consiste en determinar cuál es el espesor mínimo de carpeta asfáltica requerido en el caso extremo (conservativo) en el que se supone que todo el espesor  $h_P$  está compuesto solamente de material granular. El espesor mínimo de la carpeta depende del módulo de elasticidad de la subrasante,  $E_{SG}$ , del espesor  $h_P$ , y de los niveles de tráfico expresados por el valor de  $W_{80}$ , y es calculado por intermedio del programa JULEA [19]. En el cálculo de la fatiga se ha adoptado un módulo de elasticidad para la capa asfáltica de 3,000 Mpa. El módulo de la capa granular de espesor  $h_P$  (expresado en mm) se determina de acuerdo a la relación:

$$E_{GR} = E_{SG} (1 + 0.003 h_P) \dots [15]$$

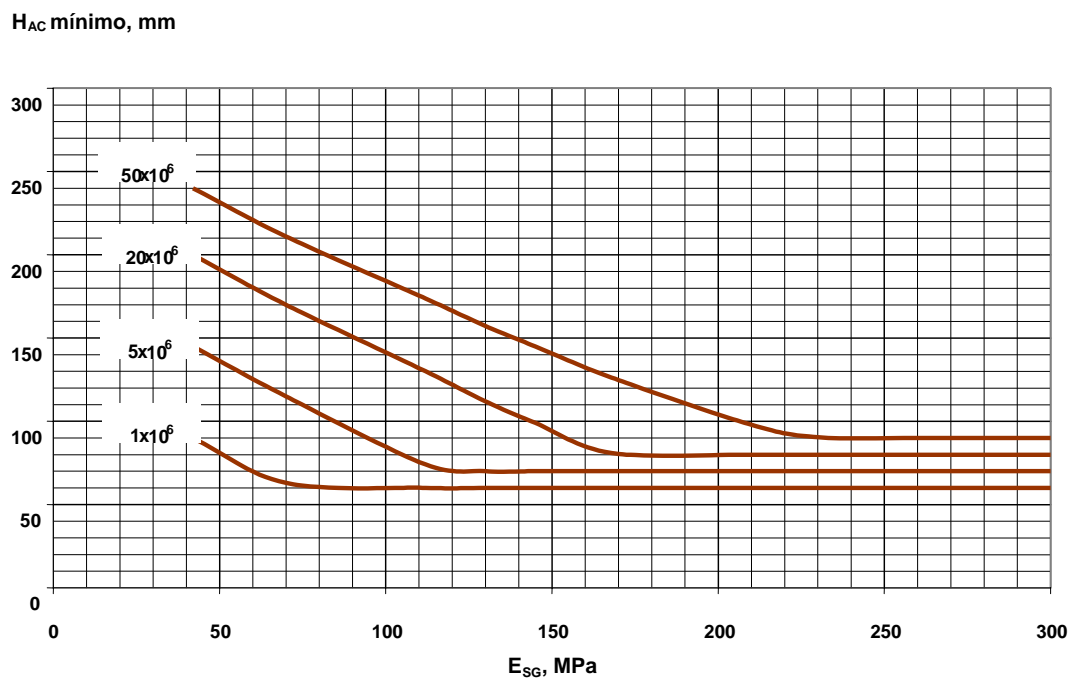
Donde  $E_{SG}$  es el módulo de elasticidad de la subrasante obtenido en la primera fase de evaluación.

En base a numerosos cálculos realizados de acuerdo al esquema arriba indicado, y después de aplicar el método en diversos proyectos de evaluación estructural, se concluye que desde el punto de vista práctico, es posible dividir a los pavimentos flexibles en 2 grupos: a) Pavimentos con  $h_P$  evaluado menor de 30 cm, y b) Pavimentos con  $h_P$  evaluado mayor de 30 cm. Para el primer grupo el cálculo de la fatiga se efectúa con un espesor granular representativo de 20 cm, y para el segundo grupo el cálculo de la fatiga en la carpeta asfáltica se efectúa con un espesor granular de 40 cm. Las Figuras 8 y 9 muestran el

espesor mínimo de carpeta asfáltica requerido para satisfacer los criterios de fatiga en los 2 grupos adoptados.



**Figura 8: Espesor Mínimo de Carpeta Asfáltica para  $h_p$  Menor de 30 cm.**



**Figura 9: Espesor Mínimo de Carpeta Asfáltica para  $h_p$  Mayor de 30 cm.**

El espesor de refuerzo asfáltico final necesario para satisfacer los criterios de fatiga se determina tomando en cuenta el espesor mínimo obtenido por medio

de las figuras 8 y 9 y el espesor de la carpeta existente. En este proceso, hay que considerar los niveles y severidad de fallas en la carpeta existente, el nivel de adherencia entre sus subcapas, y las limitaciones geométricas o constructivas del proyecto.

Si bien no es posible proponer una solución para todos y cada uno de los casos particulares que pueden presentarse en diferentes proyectos, la tabla 5 presenta lineamientos generales para tomar en cuenta el espesor existente en el proceso de determinar el espesor asfáltico de refuerzo.

**TABLA 5: Recomendaciones Generales para Considerar el Espesor de la Carpeta Asfáltica Existente**

<b>Caso No.</b>	<b>Nivel y Severidad de Fallas en la Carpeta Existente</b>	<b>Valor Residual de la Carpeta Existente</b>
1	Fisuramiento en más del 25% del pavimento	0 %
2	Fisuramiento menor a 25% con escasa a mediana desintegración y/u oxidación	25%
3	Escaso o nulo fisuramiento u otras fallas	50%

En el caso 1 de la tabla 5 no se asigna ningún valor estructural a la carpeta existente y ésta actúa como material granular. Por cuestiones constructivas puede contemplarse el escarificado de toda la carpeta existente a fin de evitar la reflexión de las fallas en las capas de refuerzo, y la construcción de una carpeta monolítica nueva de espesor según se determina en las figuras 8 ó 9 según sea el caso.

En el caso 2 se le asigna un valor de 25% al espesor existente. Es decir, una carpeta de 100 mm aporta 25 mm estructurales en el cálculo del refuerzo por fatiga. En el caso 3 el valor residual es del 50%, es decir, 100 mm de carpeta existente contribuyen 50 mm estructurales.

Resumiendo, la verificación de la resistencia a la fatiga en las capas asfálticas se compone de los siguientes pasos:

1. La determinación de  $E_P$  y  $h_P$  equivalentes del pavimento mediante las ecuaciones [13] y [1] y el valor de  $SN_{ef}$  determinado en la primera fase de la evaluación.
2. La estimación de la demanda futura de tráfico en términos del número de repeticiones del eje equivalente de 80 KN.
3. La determinación del espesor mínimo de carpeta asfáltica requerido para satisfacer los criterios de fatiga usando las figuras 8 ó 9 según el valor de  $E_{SG}$  evaluado en la fase anterior, el nivel de tráfico, y el valor de  $h_P$ .
4. La asignación de un valor residual estructural a la carpeta existente de acuerdo a las recomendaciones de la tabla 5.

5. La adopción del espesor de refuerzo asfáltico recomendado tomando en cuenta el espesor mínimo requerido, el espesor residual existente y otras consideraciones de orden estructural, constructivo, económico, etc.

### Ejemplos de Uso de YONAPAVE

La Tabla 6 exhibe los resultados de la evaluación estructural total de los pavimentos de la Tabla 1 utilizando la primera fase de análisis de YONAPAVE.

**TABLA 6: Ejemplos de YONAPAVE de Evaluación Estructural Total**

Carretera No.	D <sub>0</sub> Promedio micrón	AREA Promedio pulgada	Percentil 30 E <sub>SG</sub> , Mpa	Percentil 10/30 Corregido SN <sub>ef</sub>	80 KN Ejes 10 años ESAL's	Rango de SN <sub>REQ</sub>	ICE, %	Refuerzo Estructural Asfáltico (mm)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
4	290	20.3	245	3.9	33.1x10 <sup>6</sup>	3.3-3.6	108-118	0
90	390	19.0	164	3.1	13.8x10 <sup>6</sup>	3.4-3.6	86-91	20-30
60	455	24.1	82	4.7	11.0x10 <sup>6</sup>	4.1-4.5	104-115	0
2	340	20.3	186	3.4	49.6x10 <sup>6</sup>	3.9-4.3	79-87	30-50
73	330	23.7	110	5.2	7.4x10 <sup>6</sup>	3.5-4.2	124-149	0
767	665	21.1	86	3.6	3.7x10 <sup>6</sup>	3.4-3.7	97-106	0-10
MB	640	20.7	92	3.2	16.5x10 <sup>6</sup>	4.2-4.6	70-76	60-80

En la tabla 6 el rango del número estructural requerido (columna 7) ha sido calculado de acuerdo con la guía AASHTO 1993 para una confiabilidad del 90%, un módulo de subrasante según la columna 4, el tráfico de la columna 6, y una reducción del nivel de servicio de 2.0 ó 1.5 dependiendo del nivel de la carretera. El refuerzo estructural asfáltico ha sido calculado asignando un coeficiente estructural de 0.44 (en pulgadas) a la carpeta asfáltica para satisfacer la demanda de SN en carreteras con ICE menor del 100%.

Según puede verse en la tabla 6, las carreteras No. 4, 60, y 73 no sufren de deficiencia estructural según los valores de ICE mayores al 100%. La carretera No. 767 requiere un refuerzo estructural mínimo, y las carreteras No. 90, 2 y MB manifiestan una deficiencia estructural que varía entre los 20 y los 80 mm de refuerzo asfáltico. Los resultados de la tabla 6 son similares a los obtenidos usando los métodos de análisis basados en MODULUS o la guía AASHTO, de acuerdo al método no-destrucciono.

La tabla 7 muestra los resultados de la verificación de la fatiga en la carpeta asfáltica para las mismas carreteras de la tabla 6.

**TABLA 7: Ejemplos de YONAPAVE para la Verificación de la Fatiga en la Carpeta Asfáltica**

Carretera No.	AREA Promedio pulgada	Percentil 30 E <sub>SG</sub> , Mpa	Espesor Equivalente, h <sub>P</sub> , cm	80 KN Ejes 10 años ESAL's	Refuerzo Asfáltico Mínimo por Fatiga (mm)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
4	20.3	245	32	33.1x10 <sup>6</sup>	90
90	19.0	164	32	13.8x10 <sup>6</sup>	80
60	24.1	82	43	11.0x10 <sup>6</sup>	140
2	20.3	186	31	49.6x10 <sup>6</sup>	120
73	23.7	110	45	7.4x10 <sup>6</sup>	80
767	21.1	86	40	3.7x10 <sup>6</sup>	100
MB	20.7	92	36	16.5x10 <sup>6</sup>	130

El refuerzo asfáltico por fatiga (columna 6) ha sido determinado por medio de la Figura 9 (espesor equivalente mayor de 30 cm en todas las secciones) para el módulo de subrasante (columna 3) y el tráfico (columna 5) de cada sección.

La fase final comprende la combinación de los resultados de la evaluación estructural total (tabla 6) con los de la verificación de la fatiga en la carpeta asfáltica (tabla 7), y estos con el espesor existente de carpeta y el tipo y nivel de fallas que afectan a la sección evaluada para determinar el espesor de refuerzo final recomendado.

Por ejemplo la carretera No. 2 tiene una carpeta existente de 90 á 130 mm de espesor (ver Tabla 1), con un espesor representativo para el diseño del refuerzo de 100 mm. El estado de fallas corresponde al caso 3 de la Tabla 5, es decir "escaso o nulo fisuramiento u otras fallas" y el valor residual de esta carpeta es del 50%. Por razones constructivas se ha optado por escarificar 40 mm, dejando una carpeta de espesor nominal de 60 mm con un valor estructural residual del 50%, es decir 30 mm. Para satisfacer la demanda de fatiga de 120 mm (ver Tabla 7) se requiere entonces de un refuerzo adicional de 90 mm en dos capas de 50 y 40 mm. Debido a la importancia y al tráfico de esta carretera, se ha recomendado para la capa superior de 40 mm el uso de mezcla de tipo SMA con agregado máximo de 8 mm. La solución propuesta satisface además el refuerzo estructural de 30 á 50 mm determinado en la primera fase de la evaluación (ver Tabla 6).

## Resumen y Conclusiones

Este trabajo ha presentado un método sencillo y práctico (YONAPAVE) para la evaluación de las necesidades de refuerzo estructural de pavimentos flexibles. Los algoritmos de YONAPAVE se sustentan en el esquema no-destructivo recomendado en la guía AASHTO 1993 para estimar el número estructural efectivo (SN<sub>EF</sub>) y el módulo de Elasticidad de la subrasante, y se complementan con el análisis de fatiga en la capa asfáltica.

La fase de evaluación estructural total de YONAPAVE se basa en la interpretación del cuenco de deflexiones medido con el FWD usando el modelo de HOGG consistente de una losa de espesor pequeño sobre una subrasante elástica. El uso de este modelo permite sortear la dependencia que existe en otros métodos con respecto a los espesores de las capas o del pavimento. Esta independencia de YONAPAVE con respecto a los espesores constituye la mayor innovación en relación a otros métodos en uso. El módulo de la subrasante evaluada con YONAPAVE coincide razonablemente bien con el módulo determinado por medio de modelos más rigurosos como MODULUS.

La fase de verificación de la fatiga en la carpeta asfáltica de refuerzo incorpora conceptos analíticos usados en métodos de diseño "mecánicos" como el método Shell o el método del Instituto del Asfalto. YONAPAVE caracteriza al pavimento evaluado como un modelo bicapa elástico equivalente con parámetros elásticos efectivos derivados directamente del cuenco de deflexiones medido.

Este trabajo presenta también un algoritmo para corregir el valor de  $SN_{EF}$  evaluado a una temperatura base de la carpeta asfáltica de 30 °C, y muestra ejemplos ilustrativos de cómo calcular el espesor de refuerzo asfáltico cuando el valor de  $SN_{EF}$  es menor que el SN requerido para satisfacer demandas futuras de tráfico. De la misma manera, este trabajo muestra ejemplos de cálculo tomando en cuenta además la fatiga de la carpeta asfáltica y el valor estructural residual de la carpeta existente en función de los niveles y la severidad de las fallas existentes.

Las soluciones de YONAPAVE han sido reducidas a ecuaciones simples que pueden resolverse con una calculadora de bolsillo, de manera que el método es cómodo para evaluar el valor de  $SN_{EF}$  y del módulo de la subrasante en el campo. La simplicidad del método, conjuntamente con su independencia de los espesores de capas y del pavimento, tornan a YONAPAVE en una herramienta útil para analizar cuencos de deflexiones del FWD medidos en forma periódica o rutinaria a lo largo de una red vial, como componente de un sistema de gestión del mantenimiento, por ejemplo. Los resultados de la evaluación estructural obtenidos por medio de YONAPAVE y los costos estimados de los refuerzos requeridos pasan a constituir datos de insumo básico para planificar inversiones prioritizadas en la red vial. Con el aumento de la experiencia en el uso, y con calibraciones locales en relación a otros métodos acostumbrados, YONAPAVE se puede constituir en la base para el diseño estructural y el cálculo de refuerzos de pavimentos a nivel de proyecto ejecutivo.

## Referencias Bibliográficas

1. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993, Published by the American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC, 1993.
2. Rohde, G. T., "Determining Pavement Structural Number from FWD Testing", TRR 1448, Transportation Research Board, Washington DC, 1994.

3. Hall, K. D., and Elliot, R. P., "ROADHOG – A Flexible Pavement Overlay Design Procedure", TRR 1374, Transportation Research Board, Washington DC, 1992.
4. Romanoschi, S, and Metcalf, J. B., "Simple Approach to Estimation of Pavement Structural Capacity", TRR 1652, Transportation Research Board, Washington DC, 1999.
5. Ioannides, A. M., "Theoretical Implications of the AASHTO 1986 Nondestructive Testing Method 2 for Pavement Evaluation", TRR 1307, Transportation Research Board, Washington, DC, 1991.
6. Heukelom, W., Klomp, A.J.G., "Dynamic Testing as a Means of Controlling Pavements During and After Construction", Proceedings of the First International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan, 1962.
7. Michalak, C. H., and Scullion, T., "Modulus 5.0: User's Manual", Texas Transportation Institute, College Station, Texas, November 1995.
8. ELMOD4, Dynatest International, Denmark, <http://www.dynatest.com>.
9. Uzan, J., "Estimation of Subgrade Thickness from Deflection Basin Analysis", Fifth International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields, Trondheim, 1998.
10. Hogg, A. H. A., "Equilibrium of a Thin Plate, Symmetrically Loaded, Resting on an Elastic Foundation of Infinite Depth". Philosophical Magazine, Volume 25 (168), pp 576-582, 1938.
11. Hogg, A. H. A., "Equilibrium of a Thin Slab on an Elastic Foundation of Finite Depth", Philosophical Magazine, Volume 35 (243), pp 265-276, 1944.
12. Wiseman, G., Uzan, J., Hoffman, M. S., Ishai, I., and Livneh, M., "Simple Elastic Models for Pavement Evaluation Using Measured Deflection Bowls", Proceedings, Fourth International Conference – Structural Design of Asphalt Pavements, Volume II, Ann Arbor, Michigan, 1977.
13. Hoffman, M. S., "Application of Elasticity Models for Evaluation of Flexible Pavements", Thesis submitted in partial fulfillment for the M. Sc. Degree, Technion, Israel Institute of Technology, 1977 (In Hebrew).
14. Hoffman, M. S. and Thompson M. R., "Comparative Study of Selected Nondestructive Testing Devices", TRR 852, Transportation Research Board, Washington DC, 1982.
15. Shell Pavement Design Manual – Asphalt Pavements and Overlays for Road Traffic, Shell International Petroleum Company Limited, London, United Kingdom, 1978.
16. Shook, J. F., Finn, F. N., Witczak, M. W., and Monismith, C. L., "Thickness Design of Asphalt Pavements – The Asphalt Institute Method". Proceedings 5<sup>th</sup> International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Vol. 1, Delft, Netherlands, 1982.

17. Finn, F., Saraf, C., Kulkarni, K., Nair, K., Smith, W., and Abdullah, A., "The Use of Distress Prediction Subsystems for the Design of Pavement Structures", Proceedings 4<sup>th</sup> International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Vol. 1, Ann Arbor, Michigan, 1977.
18. Uzan, J., "A Pavement Design and Rehabilitation System", Transportation Research Record 1539, TRB, Washington DC., 1996.
19. Uzan, J., "Influence of the Interface Condition on Stress Distribution in a Layered System", Transportation Research Record 616, TRB, Washington DC, 1976.