

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



CENTRO DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis de Grado previa la obtención del Título de Magíster en:

VÍAS TERRESTRES

TÍTULO DE LA TESIS:

MODELO PARA LA DETERMINACIÓN DEL
NÚMERO ESTRUCTURAL EFECTIVO (S_{Neff}) EN
PAVIMENTOS EN SERVICIO, SIN CONOCER EL
ESPESOR DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

AUTOR:

Ing. Isaác E. Trujillo Jiménez

DIRECTOR:

Ing. M.Sc Máximo Ramón C.

Ambato – Ecuador

Julio, 2007

Al Consejo de Postgrado de la UTA

El Tribunal de Defensa de la Tesis: “MODELO PARA LA DETERMINACIÓN DEL NÚMERO ESTRUCTURAL EFECTIVO (S_{Neff}) EN PAVIMENTOS EN SERVICIO, SIN CONOCER EL ESPESOR DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO”, presentado por el Ing. Isaac E. Trujillo Jiménez; y conformado Por el Ing. Msc. Ivan Mariño, Ing. Msc. Francisco Mantilla, Ing. Msc. Dilon Moya, Director de Tesis Ing. Msc. Máximo Ramón C. y precedido por el Ing. Msc. Jorge León M. Una vez escuchada la defensa oral y revisada la tesis escrita en la cual se ha constatado el cumplimiento de las observaciones realizadas por el mismo, remite la presente tesis para su uso y custodia en la biblioteca de la UTA.

Ing. M.Sc Luis Velásquez
Director CEOPS - UTA

Ing. M.Sc Ivan Mariño
Director Académico y Administrativo

Ing. M.Sc Máximo Ramón C.
Director de Tesis

Ing. M.Sc Francisco Mantilla
Profesor

Ing. M.Sc Dilon Moya
Profesor

CERTIFICACIÓN

En mi calidad de Director de la Tesis “MODELO PARA LA DETERMINACIÓN DEL NÚMERO ESTRUCTURAL EFECTIVO (S_{Neff}) EN PAVIMENTOS EN SERVICIO, SIN CONOCER EL ESPESOR DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO”. Certifico que este trabajo ha sido elaborado por el Ing. Isaac Trujillo Jiménez

Ing. M.Sc Máximo Ramón C.

AUTORÍA

El contenido del presente trabajo investigado, así como sus ideas y opiniones son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ing. Isaac E. Trujillo Jiménez
CC: 10-0071821-1

DEDICATORIA

La consecución de objetivos esta siempre ligado al apoyo incondicional de la familia, en este caso dedico este trabajo a mi esposa Rosita Padilla U., mis hijos Santiago, Sebastián y Mauricio Trujillo Padilla

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento a todos los profesores de la Maestría en Vías Terrestres de la Universidad Técnica de Ambato que aportaron con sus valiosos conocimientos y experiencias en mi formación, de igual forma a todos los compañeros de la Maestría, con quienes compartimos y complementamos nuestros conocimientos.

ÍNDICE GENERAL

A. PÁGINAS PRELIMINARES

PORTADA	I
CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR	II
AUTORÍA	III
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTO	V
ÍNDICE GENERAL	VI-VII
ÍNDICE DE TABLAS Y GRÁFICOS	VIII
RESUMEN EJECUTIVO	IX

B. TEXTO

INTRODUCCIÓN	X-XI
A. PÁGINAS PRELIMINARES	VI
B. TEXTO	VI
CAPITULO 1	2
EL PROBLEMA	2
1.1.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1.1.- CONTEXTUALIZACIÓN	2
1.1.2.- ANTECEDENTES	3
1.1.3.- FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	4
1.1.3.1. - ANÁLISIS DEL PROBLEMA	4
1.1.3.2.- FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	5
1.1.4.- DELIMITACIÓN	6
1.1.4.1.- DELIMITACIÓN TEMPORAL	6
1.1.4.2.- DELIMITACION ESPACIAL	6
1.2.- JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	6
1.3.- OBJETIVOS GENERAL Y ESPECÍFICOS	7
1.3.1.- GENERAL	7
1.3.2.- ESPECÍFICOS	7
CAPITULO 2	10
MARCO TEÓRICO	10
2.1.- ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	10
2.2.- MARCO TEÓRICO	10
2.3.- HIPÓTESIS DE TRABAJO	20
2.4.- LAS VARIABLES DE LA HIPÓTESIS DE TRABAJO	21
CAPITULO 3	23
METODOLOGÍA	23

3.1.- ENFOQUE INVESTIGATIVO	23
3.2.- NIVEL Y TIPO	23
3.3.- POBLACIÓN Y MUESTRA	23
3.4.- TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	23
3.5.- OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	25
3.6.- PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN	25
ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	27
CAPITULO 4	28
ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	28
4.1.- EL ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	28
4.2.- COMPROBACIÓN DE LA HIPÓTESIS	31
CAPITULO 5	40
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	40
5.1.- CONCLUSIONES	40
5.2.- RECOMENDACIONES	41
CAPITULO 6	42
LA PROPUESTA	42
6.1.- ANTECEDENTES	43
6.2.- JUSTIFICACIÓN	43
6.3.- OBJETIVOS CUMPLIDOS	43
6.4.- APLICACIÓN DE LA PROPUESTA	45
BIBLIOGRAFÍA	50
ANEXOS	52
ANEXO A1	53
ANEXO A2	54
CURRICULUM VITAE	55

ÍNDICE DE TABLAS Y GRÁFICOS

Tabla N° 1:	Coeficientes para el cálculo de l_0	25
Tabla N° 2:	Coeficientes para el cálculo de E_{sg}	25
Tabla N° 3:	Valores y ecuaciones de correlación de la investigación	37
Tabla N° 4:	Valores de PRUEBA.F	39
Tabla N° 5:	Valores estadísticos de $S_{Neff_{HOGG}}$ y $S_{Neff_{AASHTO}}$	41
Tabla N° 6:	Significancia de la diferencia entre grupos de datos	42
Tabla N° 7:	Distribución de la Varianza RELACION.F	43
Gráfico N° 1:	Perforaciones destructivas en el pavimento	10
Gráfico N° 2:	Parámetros y definiciones en el Modelo de Hogg	20
Gráfico N° 3:	Variación de D_r/D_0 vs Longitud Elástica en el modelo de Hogg para $h/l_0 = 20$ y carga de FWD.	22
Gráfico N° 4:	Área del cuenco de deflexión vs Longitud elástica en el Modelo de Hogg para $h/l_0 = 10$ y carga de FWD.	22
Gráfico N° 5:	Máximo factor de deflexión FWD en el modelo de Hogg, para diferentes valores h/l_0	24
Gráfico N° 6:	Variación del Numero Estructural Efectivo con la Temperatura de la capa asfáltica para espesores mayores o iguales a 10 cm.	26
Gráfico N° 7:	Esquema del trailer de medición del FWD	31
Gráfico N° 8:	Distribución de Frecuencias de ΔS_{Neff}	35
Gráfico N° 9:	Ecuaciones y Correlaciones de 30 carreteras estudiadas_ 2246 km.....	38
Gráfico N° 10:	Distribución de S_{Neff} (AASHTO) y S_{Neff} (HOGG)	45
Gráfico N° 11:	Coeficiente Estructural a_1 para capa asfáltica.....	47
Gráfico N° 12:	Cálculo de refuerzo estructural por el Método (AASHTO).....	48

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
MAESTRÍA EN VÍAS TERRESTRES

TEMA: MODELO PARA LA DETERMINACIÓN DEL NÚMERO ESTRUCTURAL EFECTIVO (S_{Neff}) EN PAVIMENTOS EN SERVICIO, SIN CONOCER EL ESPESOR DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

AUTOR, Ing. Isaác E. Trujillo Jiménez

DIRECTOR DE TESIS, Ing. Msc. Máximo Ramón Carrión

Fecha: 6 de julio del 2007

RESUMEN EJECUTIVO

El modelo determina el Número Estructural Efectivo (S_{Neff}). Utiliza la propuesta del Dr. Mario Hoffman, que obtiene el Número Estructural Efectivo de la estructura del pavimento (S_{Neff}) en base a la interpretación de las medidas de las curvas de deflexión de la estructura del pavimento ante la acción de una carga estandarizada de tráfico y sin depender del conocimiento del espesor de la estructura del pavimento; así se evita el trabajo de realizar perforaciones, reduciendo los costos y el tiempo de los trabajos de evaluación estructural de pavimentos en servicio. Los resultados obtenidos son comparados con los determinados por la metodología AASHTO, misma que ha sido tradicionalmente utilizada en el Ecuador. En la Investigación se ha utilizado datos del Sistema de Administración de Pavimentos SAMI del Ministerio de Obras Públicas, que fue implementado en el año 2002. La magnitud de la muestra utilizada es la información de curvas de deflexión de 2246 km. (9976 mediciones), realizadas con Falling Weight Deflectometer, equipo de la más elevada tecnología hasta la actualidad. Los resultados de la investigación muestran que no hay una alta o perfecta correlación en la determinación de los Números Estructurales efectivos determinados con las dos metodologías; sin embargo, los estimadores estadísticos también indican que estos no son altamente diferentes, la prueba de ello es que la correlación obtenida ($R^2 = 0.79$) es satisfactoria; sin embargo, la investigación concluye y recomienda que los S_{Neff} obtenidos en base a la propuesta del Dr. Mario Hoffman, sean transformados a los S_{Neff} determinados por la metodología AASHTO, a través de las ecuaciones de correlación.

INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de la investigación es determinar el Número Estructural Efectivos (S_{Neff}) de las estructuras del pavimento sin conocer los espesores de las mismas. La Metodología propuesta se basa en el documento “A Direct Method for Evaluating the Structural Needs of Flexible Pavements Based on FWD Deflections”, presentado por el Dr. Mario Hoffman en la Reunión Anual de la Transportation Research Board, en el año 2003. Los resultados obtenidos son comparados con los S_{Neff} determinados por la metodología AASHTO, la cual requiere el conocimiento de estos espesores. La buena correlación de estos resultados permitirá paulatinamente no depender del conocimiento de los espesores de la estructura del pavimento para conocer la capacidad estructural de los pavimentos flexibles, lo cual será un aporte importante (disminución de costos y tiempo) en los trabajos de evaluación y reforzamiento estructural de pavimentos.

La Investigación consta de 6 capítulos organizados de la siguiente manera:

El Capítulo I, plantea el problema de la destrucción de las estructuras del pavimento cada vez que se requiere evaluar y reforzar las estructuras del pavimento, ya que no se conoce o no hay información almacenada y sistematizada (Planos As Built) que indique en seguimiento de la construcción y mantenimiento de estas estructuras. Se plantean los objetivos específicos y generales de la Investigación.

El Capítulo II, indica el Marco Teórico en el cual se basa la Investigación. Básicamente la descripción metodológica para obtener el S_{Neff} de acuerdo a la Guía AASHTO la cual asume que la capacidad estructural del pavimento esta en función de su espesor y la rigidez de su estructura y el S_{Neff} propuesto por el Dr. Mario Hoffman, el cual se basa en el Modelo de Hogg. El modelo se basa en el análisis de la curva de deflexión solamente para determinar su capacidad estructural. Sobre la base del conocimiento teórico del problema, se establecen las hipótesis de la investigación. La principal es la determinación del (S_{Neff}) sin conocer los espesores de la estructura del pavimento; la hipótesis supone que los (S_{Neff}) determinados por las dos alternativas no serán significativamente diferentes.

El Capítulo III muestra las técnicas de recolección de la información y el procesamiento de la información sobre la base del marco teórico de la Investigación, se menciona los Anexos en los cuales se incluye las tablas en Excel, del procesamiento de datos. Debido a la dificultad de imprimir gran cantidad de información procesada, los resultados se incluyen en medio magnético en el Anexo N°3

El Capítulo IV incluye el Análisis e Interpretación de resultados. En este capítulo se ha utilizado las herramientas estadísticas básicas, que permitan comprobar el grado de cumplimiento de las hipótesis presupuestas.

El Capítulo V contiene las conclusiones y recomendaciones de la investigación, las mismas que provienen del análisis global de la Investigación y principalmente del análisis de los resultados obtenidos.

El Capítulo VI finalmente presenta y justifica la propuesta, sobre la base de los objetivos cumplidos en la investigación.

CAPITULO 1
EL PROBLEMA

CAPITULO 1

EL PROBLEMA

1.1.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para calcular el Número Estructural Efectivo (SNeff) de pavimentos en servicio es necesario el conocimiento de sus espesores mediante calicatas o perforaciones y la medición de la curva de deflexión. La destrucción de la estructura del pavimento que generalmente se hace en tramos que varían entre 1 km a 5 km afecta la condición funcional del pavimento ya que quedan sitios debilitados estructuralmente, constituyéndose después en seguros hundimientos y baches en la vía; por otro lado, con la información de espesores entre 1 km y 5 km no se puede obtener la mejor precisión en la determinación del (SNeff).

1.1.1.- CONTEXTUALIZACIÓN

En el año 1991, el Ministerio de Obras Públicas, luego del *“Programa de Asistencia Técnica para el Fortalecimiento del Sistema de Mantenimiento Vial, incluyendo la Operación de Talleres y Bodegas y la Evaluación de Pavimentos”*, inicia en forma organizada la evaluación de pavimentos de toda la red vial nacional principal, que tiene una longitud aproximada de 6900 kilómetros de vías con capa de rodadura asfáltica. En toda esta longitud se realizó la evaluación no destructiva de pavimentos utilizando equipos con tecnología de punta, como el Falling Weight Deflectometer (FWD) para medir las curvas de deflexión ante la acción de una carga de 8180 kg, que corresponde a la del Eje Estándar Equivalente para diseño de pavimentos recomendada por la AASHTO. Así mismo se realizaron calicatas cada 3 kilómetros con el objeto de conocer los espesores de la estructura del pavimento, esto significa que se han realizado 2300 perforaciones en toda la red vial. Adicionalmente, cuando el Ministerio de Obras Públicas contrata estudios definitivos de rehabilitación de pavimentos, en los contratos incluye el rubro de perforación de las estructuras del pavimento cada kilómetro evaluado. Desde el año 1991, al menos al 30% de la red ha

sido rehabilitada, esto es aproximadamente 2070 km., lo que significa que se han realizado 2070 perforaciones adicionales.

Para conocer los espesores de las estructuras del pavimento y las características físicas y mecánicas de los materiales se debe realizar perforaciones al menos de 1 m x 1m, con el objeto de que un laboratorista quepa en la calicata y realice los ensayos de campo correspondientes. El daño que se produce a la estructura del pavimento es irreversible ya que es el anticipo de un futuro hundimiento o bache. El gráfico que se indica a continuación evidencia con mejor objetividad lo antes indicado.

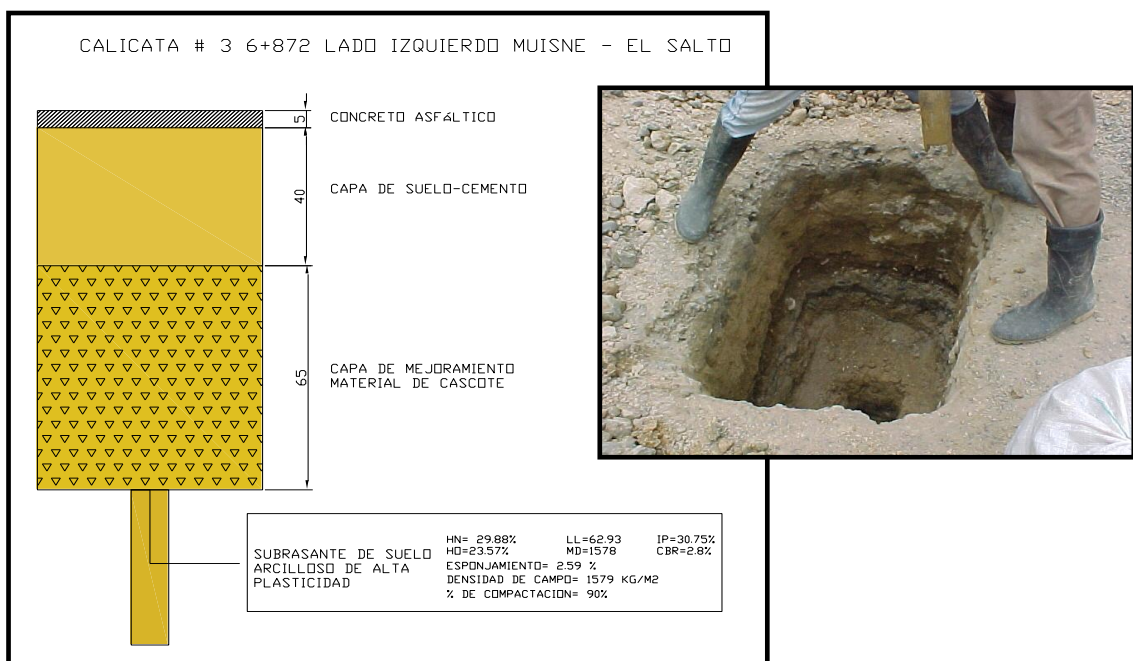


Gráfico N°1 : Perforaciones destructivas en el pavimento

1.1.2.- ANTECEDENTES

Desde el año 1952, la “*Western Association of State Highway Organizations*” (WASHO) de los Estados Unidos de América inició con el equipo denominado Viga Benkelman la evaluación de pavimentos, mediante la medición de curvas de deflexiones sobre pavimentos en servicio. Esta metodología de análisis con las curvas de deflexión permite determinar la capacidad estructural del pavimento siempre y cuando se conozca los espesores de las capas del mismo.

A esta metodología de evaluación se la denominaba “No destructiva”, comparada con las tradicionales “Destructivas”, que requerían el conocimiento de los espesores de la estructura del pavimento con mayor frecuencia. La primera, aunque se denomine “No destructiva”, requiere también el conocimiento de estos espesores, pero con menor frecuencia.

El avance en la investigación ha permitido no requerir ya del conocimiento de los espesores de la estructura del pavimento, sino solo en base al análisis de la curva de deflexión medida con equipos de alta precisión para determinar el Número Estructural Efectivo (SN_{eff}).

La determinación del (SN_{eff}) sin destruir la estructura del pavimento será un aporte valioso para los ingenieros evaluadores de pavimentos, ya que se ahorrarán recursos económicos y tiempo en la evaluación de pavimentos. Además, se evitará la incomodidad a los usuarios de la vía al evitar la presencia de cuadrillas de trabajo en las calzadas haciendo perforaciones de la estructura del pavimento para conocer sus espesores. Posteriormente, en estos sitios donde se realizaron perforaciones destructivas, se generarán baches y hundimientos, en razón de que no podrán volver a compactar adecuadamente las capas del pavimento destruidas, ni tampoco reponer adecuadamente la capa asfáltica de rodadura con las características con las que se construyó originalmente.

1.1.3.- FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.1.3.1. - ANÁLISIS DEL PROBLEMA

En el Ecuador no se guarda ni sistematiza la información de los espesores de la estructura del pavimento, cuando estos fueron construidos y/o rehabilitados, por lo tanto, cada vez que se requiere realizar el estudio de rehabilitación de una vía es necesario volver nuevamente a destruir la estructura del pavimento para conocer estos espesores, ya que con las metodologías actuales de la AASHTO, para determinar el Número Estructural Efectivo (SN_{eff}), el espesor de la estructura del pavimento es un parámetro fundamental. Esto constituye un problema, ya que el

pavimento frecuentemente es sometido a su destrucción y consecuente deterioro, por las calicatas y perforaciones que son necesarias realizar.

Por otro lado, para la determinación precisa del Número Estructural Efectivo (SN_{eff}), se requiere el conocimiento de los espesores de la estructura del pavimento en cada sitio donde se realiza un ensayo de medición de la curva de deflexión, generalmente cada 50 m, lo cual es impracticable. Por esta razón en la actualidad, para calcular el (SN_{eff}) en base a la medición de deflexiones y el conocimiento de espesores, se utilizan espesores representativos de la estructura del pavimento para secciones homogéneas de comportamiento estructural, que usualmente varían entre 1 km y 5 km de distancia, dentro de la cual puede haber una alta variabilidad entre los espesores reales en cada sitio de medición de la deflexión y el tomado como representativo para cada sección homogénea, por lo tanto, se afectaría la precisión en la determinación del (SN_{eff}).

1.1.3.2.- FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La red vial pavimentada del Ecuador ha sido inventariada en una longitud aproximada de 6900 kilómetros. En toda esta longitud se ha realizado perforaciones destructivas de control cada 3 km, para determinar el Número Estructural Efectivo (SN_{eff}), lo que significa que se realizaron 2300 perforaciones en toda la red vial inventariada.

El Modelo plantea determinar el mismo (SN_{eff}) sin destruir las estructuras del pavimento; esto es, sólo con el análisis de la curva de deflexión medida y comparar con los (SN_{eff}) ya determinados en base al análisis de la curva de deflexión medida y el conocimiento de los espesores de la estructura del pavimento.

Si se encuentra una buena relación entre la determinación del (SN_{eff}) determinados por el modelo y el (SN_{eff}) determinados destruyendo la estructura del pavimento para conocer sus espesores, se podrá en adelante, paulatinamente dejar de destruir las estructuras del pavimento para determinar su (SN_{eff}). Este es el principal objetivo que se plantea en la presente investigación; y que se lo desarrolla para entregar un

significativo aporte para los ingenieros y estudiantes que se interesen por los temas relacionados con la evaluación y rehabilitación de pavimentos. Los resultados que se obtengan de esta investigación de ninguna manera deben ser tomados como definitivos; al contrario, deben ser analizados, cuestionados y discutidos en los foros correspondientes en tal forma que se continúe en adelante la investigación sobre el tema.

1.1.4.- DELIMITACIÓN

1.1.4.1.- DELIMITACIÓN TEMPORAL

El trabajo de investigación se realizará entre junio del 2006 y marzo del 2007.

1.1.4.2.- DELIMITACION ESPACIAL

La investigación, para disponer de datos que permitirán diseñar el modelo se la realizará en la red vial con capa de rodadura asfáltica de la República del Ecuador.

1.2.- JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El modelo para demostrar que se puede obtener el (SNeff) evitando la destrucción de la estructura del pavimento, permitirá en lo futuro, eliminar la destrucción de las estructuras del pavimento.

La determinación del (SNeff) sin destruir la estructura del pavimento es realmente novedoso en el Ecuador, pues durante la última década, las estructuras de pavimento siempre han sido destruidas para conocer su espesor y determinar su capacidad estructural.

Los beneficiarios del modelo, que permita conocer (SNeff) sin destruir la estructura del pavimento, serán todos los ingenieros civiles que estén inmersos en el diseño, rehabilitación y mantenimiento de pavimentos, además las Instituciones Públicas que gestionan la vialidad del país también serán beneficiadas debido a que bajarán los presupuestos y el tiempo de ejecución de estudios de rehabilitación de pavimentos.

Finalmente los usuarios de la vía serán beneficiados, debido a que se eliminarán las molestias en la circulación vehicular, por la presencia de cuadrillas de trabajo en los trabajos de perforación de las estructuras del pavimento, como se lo hace en la actualidad.

La investigación es factible de realizarla puesto que se dispone de la información de deflexiones y espesores de la estructura del pavimento en toda la red vial nacional pavimentada.

1.3.- OBJETIVOS GENERAL Y ESPECÍFICOS

1.3.1.- GENERAL

Disponer de un modelo para determinar el número estructural efectivo (S_{Neff}) de las estructuras del pavimento flexible, sin conocer el espesor de la estructura del mismo.

1.3.2.- ESPECÍFICOS

- Investigar y analizar los resultados del Número Estructural Efectivo (S_{Neff}) aplicando la metodología de la AASHTO, conocida hasta hoy y que requiere la medición de las deflexiones y el conocimiento de los espesores de la estructura del pavimento. Se determinará las ventajas y desventajas de la utilización de esta metodología tradicional.
- Investigar y analizar los resultados del Número Estructural Efectivo (S_{Neff}) sin conocer los espesores de la estructura del pavimento, aplicando la metodología recomendada en el Paper N° TRB 2003-074, presentado en el Transport Research Board (TRB) de USA. Esta metodología requiere la medición de la deflexión y **“no”** requiere del conocimiento de los espesores de la estructura del pavimento. Se determinará las ventajas y desventajas de la utilización de esta metodología.

- Analizar las diferencias en la determinación del Número Estructural Efectivo (S_{Neff}) con las metodologías antes propuestas.
- Establecer la correlación entre (S_{Neff}) obtenido a través de deflexiones y espesores de estructura del pavimento y (S_{Neff}) obtenido solo a través de deflexiones.
- Diseñar el modelo de determinación del (S_{Neff}) basado sólo en la medición de deflexiones, sobre el marco teórico y fundamento científico investigado.
- Se establecerán las técnicas de su aplicación, identificando las limitaciones de aplicación y las recomendaciones para garantizar su efectividad.
- Del análisis de resultados de la aplicación del modelo se obtendrán las conclusiones y recomendaciones sobre el uso del mismo.

CAPITULO 2
MARCO TEÓRICO

CAPITULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1.- ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

El Dr. Mario S. Hoffman Ph.D¹ ha presentado en la Conferencia Anual del año 2003 del Transport Research Board (TRB) el tema “**A Direct Method for Evaluating the Structural Needs of Flexible Pavements Base on FWD Deflections**”. “**Un Método Directo para Evaluar la Necesidad Estructural de Pavimentos Flexibles con Deflexiones con Falling Weight Deflectometer (FWD)**”.

En el tema presentado por el Dr. Hofman se analiza la determinación del Número Estructural Efectivo (SN_{eff}), sin necesidad de conocer los espesores de la estructura del pavimento. El fundamento conceptual se lo indica más adelante

2.2.- MARCO TEÓRICO

La Guía AASHTO para diseño de estructura de pavimentos presenta tres métodos para determinar el Número Estructural Efectivo (SN_{eff}) de pavimentos de concreto asfáltico convencionales. Uno de los métodos, llamado “Non Destructive Test (NDT)” (Método no Destructivo) es basado sobre ensayos no destructivos mediante medición e interpretación de Deflexiones. Este método asume que la capacidad estructural del pavimento esta en función de su espesor total y su rigidez total. La relación entre (SN_{eff}), espesor y rigidez en la Guía AASHTO esta dada por:

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

Donde:

h_p = Espesor total de todas las capas del pavimento sobre la subrasante en pulgadas.

E_p = Módulo efectivo de todas las capas del pavimento sobre la subrasante en psi

¹ Technical Director and Partner, YONA, Engineering Consulting & Management Ltda., Haifa, ISRAEL

Previo el cálculo del Módulo efectivo de las capas del pavimento E_p , es necesario primero calcular el módulo de resiliencia de la subrasante M_R , valor que se calcula con la siguiente fórmula recomendada por la AASHTO

$$M_R = \frac{0.24p}{d_r r} \dots [2]$$

Donde:

M_R = Módulo de resiliencia de la subrasante retro calculado en psi

P = Carga aplicada en libras

d_r = Deflexión a una distancia “ r ” desde el centro del plato de carga

r = Distancia desde el centro de plato de carga en pulgadas (se recomienda tomar la lectura de deflexión a toma 180 cm. del centro del plato de carga)

El Módulo de la estructura de pavimento E_p se calcula con la fórmula de la AASHTO que se indica a continuación:

$$d_0 = 1.5pa \left\{ \frac{1}{M_R \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \sqrt{\frac{E_p}{M_R}} \right)^2}} + \frac{\left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^2}} \right]}{E_p} \right\} \dots [3]$$

Donde:

d_0 = Deflexión medida en el centro del plato de carga (Ajustada a una temperatura estándar de 68° F)

p = Presión del plato de carga en psi del FWD

a = Radio del plato de carga del FWD en pulgadas

D = Espesor total de las capas del pavimento sobre la subrasante, en pulgadas

M_R = Módulo de resiliencia de la subrasante en psi

E_p = Módulo efectivo de todas las capas del pavimento arriba de la subrasante en psi
Para la aplicación de la ecuación [3], las deflexiones medidas en el campo deben ser ajustadas a la temperatura de referencia de 68°F (20°C). La corrección la realizamos con la siguiente ecuación²:

$$factor(T) = \frac{1}{1 - 0.0008 * h_1 * (T - t)} \dots [4]$$

Donde:

h_1 = Espesor de la carpeta asfáltica existente, en centímetros

t = Temperatura de la capa Asfáltica en el momento de la medición, en grados centígrados.

T = Temperatura de referencia, en grados centígrados, igual a 20°C (68°F)

El procedimiento de cálculo de E_p es por procesos iterativos, se van dando valores al valor de E_p en la ecuación [3] hasta que se cumpla el valor “ d_0 ” conocido en la medición de la curva de deflexión. Nótese que en la ecuación [3] es necesario conocer también el espesor de toda la estructura del pavimento.

La Guía de la AASHTO recomienda retrocalcular “ E_p ” desde los datos de deflexiones en base al modelo elástico de dos capas también conocido como el modelo de Burmister, mismo que esta expresado en la formula [3]. El Dr. Mario S. Hoffman Ph.D. propone un método directo para determinar el Número Estructural Efectivo (SN_{eff}) y el Módulo de la subrasante a través de las curvas de deflexiones medidas con el Falling Weight Deflectometer (FWD), independiente del espesor de la estructura del pavimento h_p ; el método se basa en el Modelo de Hogg

El Modelo de Hogg analiza una capa delgada colocada sobre una fundación elástica de espesor finito o infinito. El gráfico No. 2 muestra los parámetros del modelo y sus definiciones.

² Universidad del Cauca - Colombia

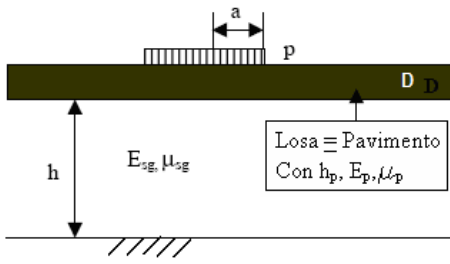
Modelo Geométrico		
Parámetros Básicos del Modelo	Rigidez de la Losa (Pavimento)	$D = \frac{E_p h_p^3}{12(1 - \mu_p^2)} \dots [5](T - m)$
	Longitud Característica	$l_0 = \sqrt[3]{\frac{D}{E_{sg}} * \frac{(1 + \mu_{sg})(3 - 4\mu_{sg})}{2(1 - \mu_{sg})}} \dots [6](cm)$
	Módulo de la subrasante y Relación de Poisson, E_{sg}, μ_{sg}	

Gráfico No. 2: Parámetros y definiciones en el Modelo de Hogg

Utilizando los parámetros del modelo con valores asignados de $\mu_p=0.25$ y $\mu_{sg}=0.5$ y la ecuación de la AASHTO, el investigador obtuvo la siguiente ecuación:

$$S_{Neff} = 0.0182 l_0 \sqrt[3]{E_{sg}} \dots [7]$$

Donde:

l_0 = Longitud característica, en cm,

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

Hasta ahora, se observa que aún no podemos liberarnos de la dependencia del espesor de la estructura de pavimento, ya que el valor l_0 depende de la rigidez del pavimento D en la fórmula [6], este valor a su vez, del espesor total de la estructura h_p .

La resolución teórica de este inconveniente, la solucionó el Dr. Mario Hoffman analizando la curva de deflexión en base a la teoría del Modelo de Hogg. La expresión matemática desarrollada por este modelo para el cálculo de las deformaciones en la superficie del sistema viene dada por una integral infinita de

funciones Bessel y funciones angulares hiperbólicas, la cuál, para el caso de una carga uniformemente distribuida circular de radio "a" tiene la siguiente forma:

$$\Delta_{(z=0,r)} = \left(\frac{(1 + \mu_{sg})(3 - 4\mu_{sg}) \cdot p \cdot a}{2(1 - \mu_{sg}) \cdot E_{sg}} \right) \int_0^{\infty} \frac{J_0\left(\frac{m \cdot r}{l_0}\right) \cdot J_1\left(\frac{m \cdot a}{l_0}\right)}{m^4 + m \phi\left(\frac{m \cdot h}{l_0}\right)} dm \dots [8]$$

Donde μ_0, E_0, p, L_0 , están definidos en el gráfico N°2, "r", es la distancia horizontal en la superficie de la placa desde el eje de carga y " ϕ " viene dada por la siguiente expresión:

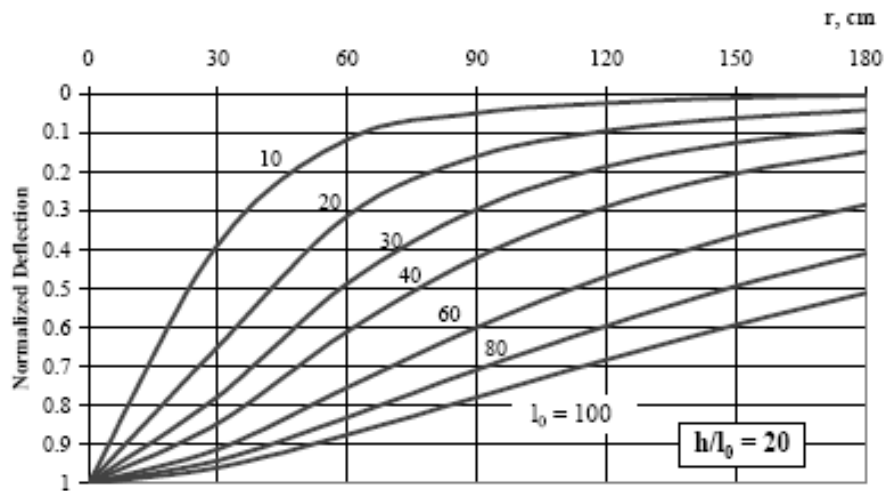
$$\phi = \frac{\text{sen } h m \cdot \text{cosh } m + \frac{m}{3 - 4\mu_{sg}}}{\text{sen } h^2 m - \frac{m^2}{(3 - 4\mu_{sg})^2}} \dots [9]$$

Siendo "m" la variable de integración

Hoffman en 1977 presentó la solución computarizada para la ecuación [8], lo que permitió la confección de nomogramas y tablas para el cálculo de deformaciones teóricas, en cualquier punto de la superficie del sistema.

En la gráfico N°3 se indica el cuenco de deflexión calculada cargando el modelo de Hogg con un radio de carga de 6 pulgadas, representando la geometría del plato de carga del FWD. La figura ilustra la variación de la relación de deflexiones D_r/D_0 a las distancias de ubicación de los geófonos del FWD, desde el centro del plato de carga, para diferentes valores de l_0 y para y para un espesor finito de la subrasante de 20 veces el espesor de la estructura del pavimento.

El gráfico N° 4 indica la variación del Área de la curva de deflexión como una función de la longitud característica en el modelo de Hogg, para una un espesor de la subrasante de 10 veces el espesor de la estructura del pavimento.



Fuente: Paper N° TRB 2003-074

Gráfico No. 3: Variación de D_r/D_0 vs Longitud Elástica en el modelo de Hogg para $h/l_0 = 20$ y carga de FWD.

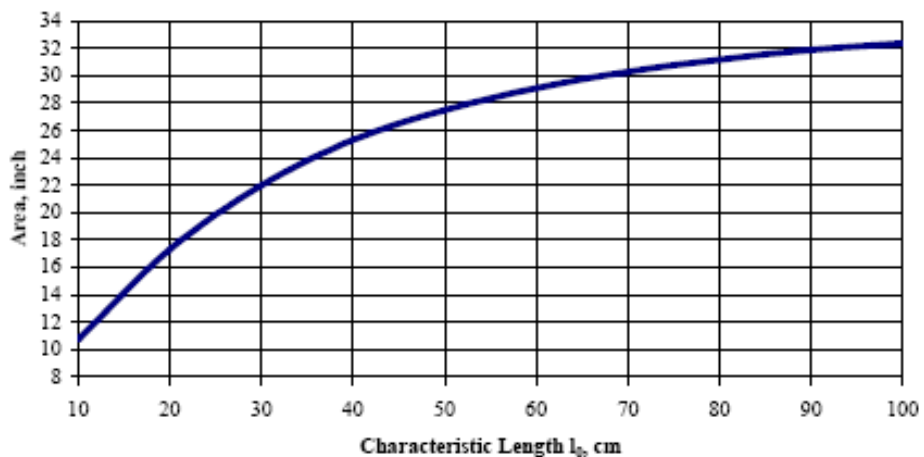
El área del cuenco de deflexión es calculada con la siguiente expresión:

$$Area = 6(1 + 2 \frac{D_{30}}{D_0} + 2 \frac{D_{60}}{D_0} + \frac{D_{90}}{D_0})...[10]$$

Donde:

Área = Área del cuenco de deflexión en pulgadas

$D_0, D_{30}, D_{60}, D_{90}$ = deflexiones FWD a: $r = 0, r = 30, r = 60$ y $r = 90$ cm respectivamente.



Fuente: Paper N° TRB 2003-074

Gráfico No. 4: Área del cuenco de deflexión vs Longitud elástica en el Modelo de Hogg para $h/l_0 = 10$ y carga de FWD.

En el gráfico anterior es visto que la longitud característica l_0 es determinada en base al área del cuenco de deflexión para un valor determinado de $h/l_0 = 10$; es también visto que la longitud característica es determinada independientemente del espesor de la estructura del pavimento

El gráfico N° 5 muestra la variación del “Máximo factor de deflexión” FWD en el modelo de Hogg, como una función de la longitud característica para diferentes valores de h/l_0 . El máximo factor de deflexión es determinado por la siguiente ecuación:

$$\text{MaximunDeflectionFactor} = \frac{D_0 E_{sg}}{pa} \dots [11]$$

Donde:

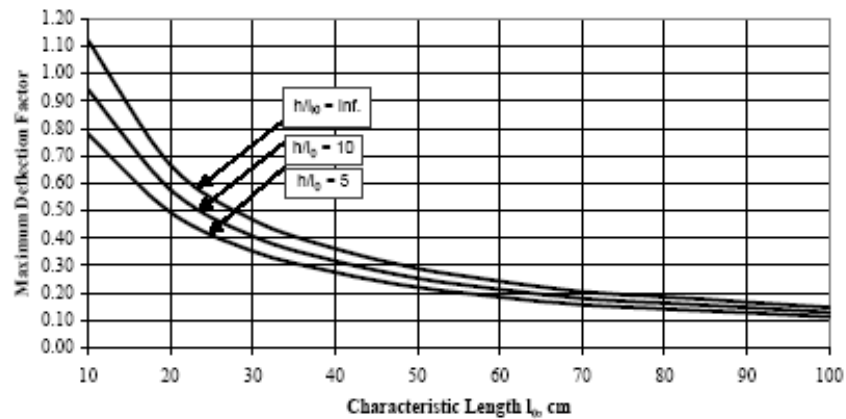
D_0 = Máxima deflexión bajo el plato de carga del FWD, para un diámetro de 12 pulgadas en unidades de longitud

E_{sg} = Módulo de elasticidad de la subrasante en carga/área unitaria

p = Presión del 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 escogido y l_0 ha sido determinado en la figura N° 4, el máximo factor de deflexión puede ser determinado a partir de la figura N° 5. El módulo de la subrasante es luego calculado a partir del Máximo Factor de Deflexión, multiplicado por la actual presión y radio del plato de carga del FWD y dividido por la máxima medida de deflexión. Habiendo determinado l_0 y E_{sg} , el Número Estructural efectivo del pavimento puede ser determinado usando la ecuación [7]



Fuente: Paper N° TRB 2003-074

Gráfico No. 5: Máximo factor de deflexión FWD en el modelo de Hogg, para diferentes valores h/l_0 .

En la ecuación [6] se observa que reemplazando el sistema pavimento-subrasante con el modelo de Hogg, permite simplificar la evaluación de Número Estructural efectivo (SN_{eff}) como lo propone la AASHTO utilizando la longitud característica y el módulo de elasticidad de la subrasante. Así, para determinar el Número Estructural efectivo (SN_{eff}) no es necesario conocer ni depender del espesor de la estructura del pavimento “ h_p ”.

Basados en numerosas comparaciones de módulos de subrasante determinados con la metodología propuesta por el Dr. Mario Hoffman con aquellos determinados utilizando el programa MODULUS, se encontró que las mejores correlaciones son obtenidas cuando la profundidad de la capa rocosa en el modelo de Hogg (h/l_0) es determinada como una función del área de la curva de deflexión. La relación encontrada se indica en la siguiente ecuación:

$$l_0 = A x e^{B \times \text{Area}} \dots [12]$$

L_0 = Longitud característica en cm.

Área = Área de la curva de deflexión en pulgadas

A,B = Coeficientes de la curva (Tabla N° 1)

Tabla N° 1: Coeficientes para el Cálculo de l_0

Rango de valores de Área de la curva de deflexión en pulgadas	h/l_0	A	B
Área \geq 23	5	3.275	0.1039
$21 \leq$ Área $<$ 23	10	3.691	0.0948
$19 \leq$ Área $<$ 21	20	2.800	0.1044
Área $<$ 19	40	2.371	0.1096

Fuente: Paper N° TRB 2003-074

En forma similar, se ha encontrado la siguiente correlación para determinar E_{sg} usando la siguiente expresión:

$$E_{sg} = mx \frac{p}{D_0} x l_0^n \dots [13]$$

Donde:

E_{sg} = Módulo de elasticidad de la subrasante en Mpa

p = Presión del plato del FWD en Kpa

D_0 = Deflexión bajo el plato de carga del FWD en micrones (μm)

m, n = Coeficientes de la curva (Tabla N°2)

Tabla N°2: Coeficientes para el cálculo de E_{sg}

h/l_0	m	n
5	926.9	-0.8595
10	1152.1	-0.8782
20	1277.1	-0.8867
40	1344.2	-0.8945

Fuente: Paper N° TRB 2003-074

Una vez que los valores de l_0 y E_{sg} han sido determinados como se indica antes, es posible calcular SN_{eff} utilizando la ecuación [7].

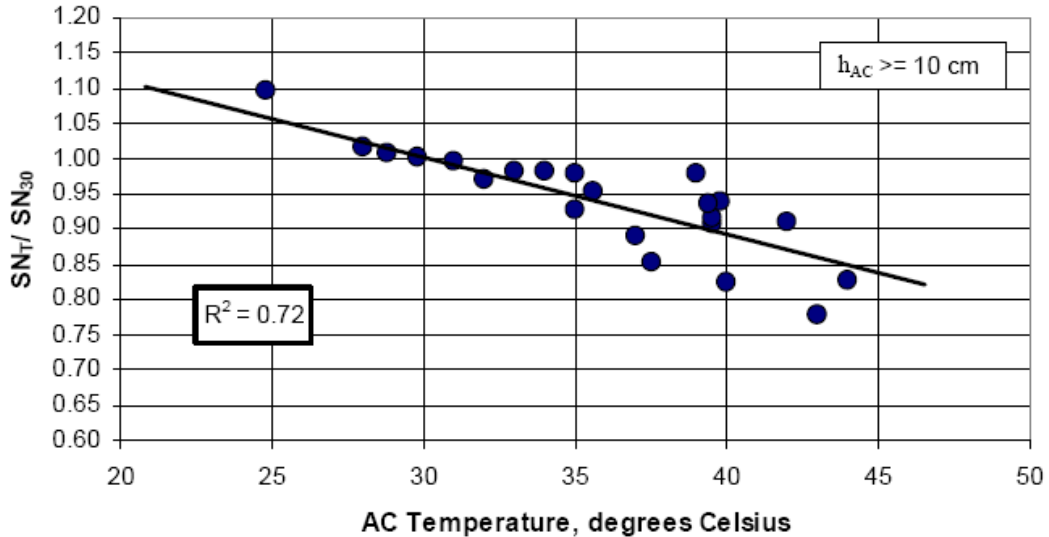
Debido a las características inherentes propias del modelo de Hogg, donde se modela a la estructura del pavimento como una placa o losa rígida delgada, donde no analiza la deflexión de la placa o la estructura del pavimento, los resultados de SN_{eff} tienden a ser subestimados; por esta razón el Dr. Mario Hoffman realizó comparaciones de los SN_{eff} determinados con el programa de retrocálculo MODULUS y el calculado

con la ecuación [7], y determinó la necesidad de realizar la siguiente corrección con la siguiente ecuación:

$$SN_{eff\text{ corregido}} = 2SN_{Ecuacion[7]} - 0.5...[14]$$

La temperatura tiene un efecto directo sobre el módulo de elasticidad de la capa asfáltica. Este efecto es reflejado en la curva de deflexión medida con el FWD a diferentes temperaturas. El grado de afectación del módulo de elasticidad y sus deflexiones que son afectados por la temperatura depende de la edad, grado de deterioro y espesor de la capa asfáltica; por lo tanto, las deflexiones determinadas con el FWD son también afectadas por el espesor de la capa asfáltica.

El Dr. Mario Hoffman, en su investigación determinó la afectación del Número Estructural Efectivo a cualquier temperatura medida en la capa asfáltica a 5 cm de profundidad, en relación a una temperatura base de 30°C . El gráfico N°6 muestra la variación del SN_{EFF} en relación a la temperatura.



Fuente: Paper N° TRB 2003-074

Gráfico No. 6: Variación del Numero Estructural Efectivo con la Temperatura de la capa asfáltica para espesores mayores o iguales a 10 cm.

La ecuación que describe la recta del gráfico anterior es la siguiente:

$$SN_T / SN_{30^{\circ}C} = 1.33 - 0.011T...[15]$$

Donde:

SN_T = Número Estructural Efectivo a cualquier temperatura

$SN_{30^\circ C}$ = Número Estructural Efectivo a la temperatura base de 30°C

T = Temperatura de la capa asfáltica a 5cm. de profundidad

La ecuación [15] es aplicable para espesores mayores o iguales a 10 cm. Para espesores menores los efectos de la temperatura, el Dr. Mario Hoffman ha determinado que son muy pequeños. A partir del gráfico N°6 o ecuación [15] es posible desarrollar la ecuación de corrección por temperatura para otras temperaturas diferentes de 30°C, en razón que la investigación ha sido realizada en un rango de 20°C a 45°C.

Para poder comparar los Números Estructurales Efectivos determinados por la Metodología AASHTO y el Modelo de Hogg ($SN_{\text{eff_AASHTO}}$ vs $SN_{\text{eff_HOGG}}$), la ecuación de corrección es la siguiente:

$$SN_T / SN_{20^\circ C} = 1.20 - 0.011T...[16]$$

Donde:

SN_T = Número Estructural Efectivo a cualquier temperatura

$SN_{20^\circ C}$ = Número Estructural Efectivo a la temperatura base de 20°C

T = Temperatura de la capa asfáltica a 5cm. de profundidad

2.3.- HIPÓTESIS DE TRABAJO

- El modelo propuesto permite determinar el (S_{Neff}) sin conocer los espesores de la estructura del pavimento; estos (S_{Neff}) no estarán alejados de los obtenidos conociendo los mismos.

- El modelo propuesto permitirá en adelante no depender, del conocimiento de los espesores de la estructura del pavimento, lo cual evitará todos los problemas causados por la destrucción de esta estructura.
- En la investigación se determinará si habrá diferencia en la determinación del Número Estructural efectivo (SNeff) dependiendo del espesor de la estructura “ h_p ” y la determinada sin depender de él.

2.4.- LAS VARIABLES DE LA HIPÓTESIS DE TRABAJO

La determinación del Número Estructural efectivo (SNeff) del pavimento tiene una relación directa con el módulo de elasticidad de la estructura del pavimento E_p y su espesor h_p , a mayor E_p y h_p mayor SNeff al ser determinados con la metodología AASHTO indicada en la ecuación [1]. Así mismo este Número Estructural efectivo (SNeff) tiene una relación directa con la longitud elástica característica “ l_o ” determinada con la metodología del Dr. Mario Hoffman indicada en la ecuación [7]; a mayor longitud elástica característica del pavimento, mayor será el Número Estructural efectivo (SNeff).

Los Números Estructurales efectivos (SNeff), no serán exactamente los mismos. En el modelo se establecerá las diferencias entre estas dos variables y se determinará alguna tendencia de comportamiento.

CAPITULO 3
METODOLOGÍA

CAPITULO 3

METODOLOGÍA

3.1.- ENFOQUE INVESTIGATIVO

La investigación comprendió la recopilación de toda la información existente de deflexiones de toda la red vial y la aplicación del cálculo del Número Estructural efectivo (SN_{eff}) utilizando los espesores de la estructura del pavimentos medida , y utilizando la longitud elástica característica del pavimento, utilizando la teoría de Hogg. Con los resultados obtenidos se realizarán las comparaciones correspondientes.

3.2.- NIVEL Y TIPO

El objetivo de la investigación es determinar cual es la relación entre el Número Estructural efectivo (SN_{eff}) determinado de la manera tradicional, esto es en base al análisis de la curva de deflexión y el conocimiento de los espesores de la estructura del pavimento, y la determinación de este mismo valor, sin conocer los espesores. La investigación es de Asociación de Variables, para medir el grado de relación entre las mismas y establecer la tendencia o modelo de comportamiento de las estructuras de pavimento en el Ecuador.

3.3.- POBLACIÓN Y MUESTRA

Se dispone de toda la información necesaria para realizar la correlación de las variables en 2246 km de la red vial del Ecuador (9976 mediciones, distribuidas en vías de la costa y sierra.

3.4.- TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Los datos de deflexiones con Falling Weight Deflectómetro (FWD) son propiedad del Ministerio de Obras Públicas. En la recolección de datos de deflexiones se ha utilizado las normas establecidas por los Institutos de Investigación AASHTO, ASTM.

Básicamente estas normas indican la magnitud de la carga, tipo de plato de carga usada en la medición, etc.

En la recolección de datos no fue necesaria la preparación de formularios, ya que se obvia la utilización de estos porque el registro es automático y directo sobre el computador.

En la información de toma de datos de deflexiones, se ha utilizado deflectógrafo de impacto (Falling Weight Deflectometer, FWD) empleado para medir las deflexiones producidas en la estructura del pavimento con el fin de evaluar la capacidad de soporte de las capas de la estructura de pavimento existente y subrasante.

Estas mediciones consisten en aplicar una carga dinámica en el pavimento causada por la caída de una masa sobre un plato circular cuya superficie de contacto se asemeja al de la rueda de un camión. Las deflexiones producidas son medidas por medio de un grupo de geófonos (sensores) ubicados a distancias de 0, 0.30, 0.60, 0.90, 1.20, 1.50 y 1.80 m del centro del disco de carga de diámetro 0.30 m (ver Gráfico N° 7) y registradas automáticamente en un computador portátil ubicado en el vehículo que arrastra y controla el trailer de medición.

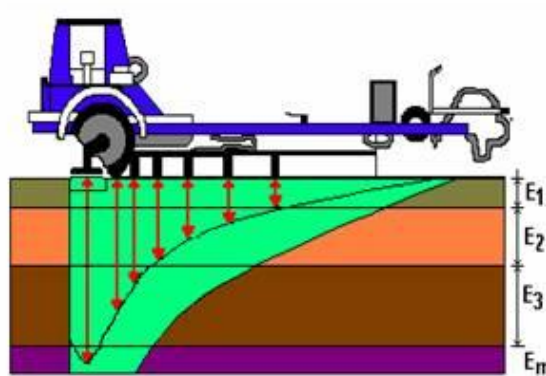


Gráfico N° 7 Esquema del trailer de medición del FWD

En la medición de la red vial del país se ha utilizado el equipo FWD 8000 (Falling Weight Deflectometer) de la compañía Dynatest. Las mediciones se realizaron en puntos distanciados 250 m a lo largo de las vías evaluadas.

Los espesores de la estructura del pavimento se midieron cada 3 km. igualmente a lo largo de todas las vías evaluadas.

3.5.- OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

La variable base de la investigación es la determinación del Número estructural Efectivo conociendo el espesor de la estructura del pavimento, la cual se determina sobre la base de la Metodologías AASHTO ($SN_{\text{eff}_{\text{AASHTO}}}$). Esta es la metodología más tradicionalmente utilizada por los diseñadores de pavimentos en el Ecuador.

La aplicación del Modelo Teórico con los datos recopilados en 2246 km (9976 mediciones) de la red vial del Ecuador dará como resultado la otra variable del Modelo, el Número Estructural Efectivo determinado sin conocer el espesor de la estructura del pavimento, por la Metodología propuesta por el Dr. Mario Hoffman, sobre la base conceptual del Modelo de HOGG ($SN_{\text{eff}_{\text{HOGG}}}$).

Los resultados de este procesamiento permitirán revisar la relación que existe entre estas dos variables y determinar la conveniencia de utilizar la variable dependiente ($SN_{\text{eff}_{\text{HOGG}}}$) en forma directa, o a través de correlaciones razonables con ($SN_{\text{eff}_{\text{AASHTO}}}$).

3.6.- PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN

En el estudio se ha procesado información de 2246 km de la red vial, en carreteras ubicadas principalmente en la red vial de la sierra y de la costa; se ha determinado los SN eff por las dos metodologías aproximadamente en 9976 puntos.

Los cálculos del Número Estructural efectivo (SN_{eff}) por las dos metodologías propuestas fueron realizados en una tabla Excel. En el Anexo N° 1 se incluye la

planilla de cálculo de una de las 30 carreteras utilizadas en la investigación, con todas las indicaciones y pasos seguidos en el proceso, el resto del procesamiento se incluye en Disco Compacto en el Anexo N° 3.

En el Anexo N° 2 se incluye el resultado gráfico de la investigación realizada en cada una de las 30 carreteras estudiadas. En cada Grafico se indica:

- La Distribución de los Números Estructurales determinados con la Metodología AASHTO y la determinada utilizando el criterio del Dr. Mario Hoffman, basado en la teoría de HOGG
- La nube de puntos de todos los valores de S_{Neff} determinados por las dos metodologías, su Ecuación de Relación y Coeficiente de Correlación
- La nube de puntos utilizando aproximadamente el 80% o más de todos los resultados obtenidos, no considerando los S_{Neff} que tienen mucha diferencia entre ellos y que se presentan con baja frecuencia.
- La tabla de criterios para definir el tipo de correlación obtenido.

CAPITULO 4

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

CAPITULO 4

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1.- EL ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los gráficos de la distribución de los S_{Neff} en cada una de las carreteras estudiadas muestran en la mayoría de los casos estudiados, una tendencia similar; más adelante se comprobará estadísticamente si la población o resultados obtenidos de $S_{Neff (AASHTO)}$ vs $S_{Neff (HOGG)}$ son o no diferentes.

Utilizando la información de todas las carreteras estudiadas, se analizó las frecuencias de las diferencias entre $S_{Neff (AASHTO)}$ vs $S_{Neff (HOGG)}$, este análisis muestra que las diferencias más frecuentes son menores de 1.5. En el Gráfico N° 8 se presenta la frecuencia de las diferencias encontradas en 9967 mediciones.

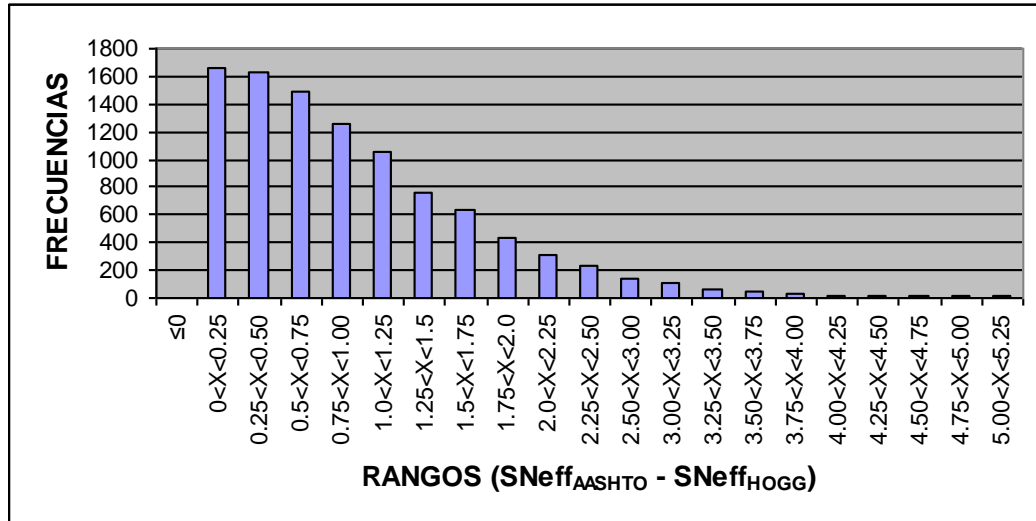


Gráfico N° 8 Distribución de Frecuencias de ΔS_{Neff}

La determinación de Números Estructurales Efectivos por las dos metodologías está sujeta a errores en su determinación. En la investigación se midió deflexiones cada 250 m, pero la información de espesores de la estructura del pavimento es cada 3000 m.; para determinar con precisión el S_{Neff} por la metodología AASHTO en todos los puntos se requiere la información de espesores también cada 250 m., lo cual es impracticable en la realidad; entonces la imprecisión puede deberse a que estamos

calculando un $S_{Neff_{AASHTO}}$ con deformadas del pavimentos que posiblemente no son correspondientes a los espesores reales. De la experiencia acumulada en más de 25 años de trabajos en rehabilitación de pavimentos en el país se ha determinado altas variabilidades en la distribución de espesores que pueden superar el 40%.

Por lo indicado arriba, es necesario depurar los resultados de S_{Neff} obtenidos con las dos metodologías, no considerando aquellos cuya diferencia entre $S_{Neff_{(AASHTO)}}$ vs $S_{Neff_{(HOGG)}}$ sea mayor de 1.5; esto significa que se considera aproximadamente el 80% o más de de los resultados obtenidos. Las correlaciones obtenidas bajo esta consideración mejoran notablemente llegando a ser muchas veces superiores a 0.70, lo cual indica una muy buena correlación. En la Tabla N° 3 se indica los resultados obtenidos.

La franja amarilla de la Tabla N°3 es el resultado de analizar toda la información recopilada de todas las carreteras. El coeficiente de correlación obtenido entre $S_{Neff_{(AASHTO)}}$ vs $S_{Neff_{(HOGG)}}$, utilizando el 100% de la información es de $R^2 = 0.6515$, valor que se lo puede considerar bueno o de moderada correlación. Tomando en cuenta el 80% de la información o aquellos valores cuyo $\Delta S_{Neff} \leq 1.5$, se obtiene un coeficiente de correlación $R^2 = 0.7854$, valor considerado muy bueno o de fuerte correlación. El Gráfico N°9, indica la distribución de los pares de valores, las correlaciones logradas y las ecuaciones que relacionan la variable dependiente en el eje de las ordenadas, denominada $S_{Neff_{HOGG}}$ y la variable independiente en el eje de las abscisas, denominada $S_{Neff_{ASHTOO}}$.

La franja verde de la Tabla N°3 indica una relación entre buena y excelente. Los coeficientes de correlación obtenidos $0.7 < R^2 < 0.85$. El 33.3% de la longitud de carreteras estudiadas se encuentra en este rango de correlación.

Tabla N°3 : Valores y Ecuaciones de Correlación

N°	CARRETERA	PUNTOS ANALIZADOS		R ²	ECUACIÓN		PUNTOS ANALIZADOS $\Delta(S_{neff}) < 1.5$		R ²	ECUACIÓN
		N°	(%)		N°	(%)				
	TODAS LAS VIAS	9987	100%	0.65	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 0.5965S_{neff_{(ASHTO)}} + 1.6413$	7856	78.9%	0.79	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 0.7894S_{neff_{(ASHTO)}} + 0.905$	
1	E1E5_T ESMERALDAS_SAN VICENTE L = 281.35 KM	1129	100%	0.81	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 1.1268S_{neff_{(ASHTO)}} - 0.3547$	965	85.9%	0.85	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 0.9515S_{neff_{(ASHTO)}} + 0.0205$	
2	E482 MONTECRISTI_NOROL L = 144.18 KM	568	100%	0.77	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 1.5681S_{neff_{(ASHTO)}} - 2.4018$	460	81.0%	0.83	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 1.3402S_{neff_{(ASHTO)}} - 1.5109$	
3	E28A QUITO_TAMBILLO L = 9.02 KM	38	100%	0.77	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 1.2055S_{neff_{(ASHTO)}} - 0.1086$	38	100.0%	0.77	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 1.2055S_{neff_{(ASHTO)}} - 0.1086$	
4	E1E5 MANTA_SAN JOSE L = 69.1 KM	278	100%	0.76	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 1.8182S_{neff_{(ASHTO)}} - 3.8423$	229	82.4%	0.88	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 0.691S_{neff_{(ASHTO)}} + 1.4201$	
5	E28C QUITO_PIFO L = 25 KM	89	100%	0.76	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 0.9274S_{neff_{(ASHTO)}} + 0.3273$	89	100.0%	0.76	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 0.9274S_{neff_{(ASHTO)}} + 0.3273$	
6	E40 PERIMETRAL LA PUNTILLA_DOS CALZADAS L = 50.5 KM	266	100%	0.75	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 1.2875S_{neff_{(ASHTO)}} - 0.7997$	266	100.0%	0.75	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 1.2875S_{neff_{(ASHTO)}} - 0.7997$	
7	E491 GUARANDA_BAHOYO L = 115 KM	462	100%	0.73	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 0.7681S_{neff_{(ASHTO)}} - 0.4447$	398	86.1%	0.87	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 0.9237S_{neff_{(ASHTO)}} - 0.9881$	
8	E381 MUISNE L = 14.26 KM	58	100%	0.72	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 1.4834S_{neff_{(ASHTO)}} - 1.0444$	45	77.8%	0.83	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 1.2822S_{neff_{(ASHTO)}} - 0.9485$	
9	E282 TABACON_CAJAS L = 10.7 KM	38	100%	0.72	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 0.6142S_{neff_{(ASHTO)}} + 0.9485$	38	100.0%	0.72	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 0.6142S_{neff_{(ASHTO)}} + 0.9485$	
10	E40 CHONGON_VIA GUAYAQUIL_DOS CALZADAS L = 28 KM	113	100%	0.72	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 1.1402S_{neff_{(ASHTO)}} - 1.1791$	105	92.9%	0.75	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 1.0796S_{neff_{(ASHTO)}} - 1.347$	
11	E28B QUITO_GUAYLLABAMBA L = 25.05 KM	94	100%	0.70	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 1.0374S_{neff_{(ASHTO)}} + 0.0912$	94	100.0%	0.70	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 1.0374S_{neff_{(ASHTO)}} + 0.0912$	
12	E25 SANTO DOMINGO_QUEVEDO L = 106.5 KM	427	100%	0.69	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 1.6097S_{neff_{(ASHTO)}} - 2.4259$	339	79.4%	0.80	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 1.4739S_{neff_{(ASHTO)}} - 1.4487$	
13	E40 SALINAS_STA ELENA_DOS CALZADAS L = 26 KM	84	100%	0.68	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 1.4237S_{neff_{(ASHTO)}} + 0.3188$	74	88.1%	0.58	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 1.1768S_{neff_{(ASHTO)}} - 0.8218$	
14	E25 QUEVEDO_VENTANAS L = 54.75 KM	220	100%	0.68	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 1.3996S_{neff_{(ASHTO)}} - 1.377$	202	91.8%	0.66	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 0.9912S_{neff_{(ASHTO)}} + 0.1214$	
15	E1E5 BAHIA_MANTA L = 84.5 KM	320	100%	0.68	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 1.0586S_{neff_{(ASHTO)}} + 0.8001$	293	91.6%	0.73	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 0.6872S_{neff_{(ASHTO)}} + 0.2362$	
16	E50 LA AVANZADA_Y DE SARACAY L = 22.53 KM	83	100%	0.63	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 0.931S_{neff_{(ASHTO)}} - 0.0092$	83	100.0%	0.63	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 0.931S_{neff_{(ASHTO)}} - 0.0092$	
17	E25 VENTANAS_MARANJAL L = 162.5 KM	647	100%	0.63	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 1.3221S_{neff_{(ASHTO)}} - 1.4191$	595	92.0%	0.66	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 1.0097S_{neff_{(ASHTO)}} - 0.7934$	
18	E1E5 SAN JOSE_SANTA ELENA L = 151.08 KM	606	100%	0.60	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 0.9863S_{neff_{(ASHTO)}} + 0.276$	519	85.6%	0.71	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 0.7347S_{neff_{(ASHTO)}} + 0.8679$	
19	E40 DURAN BOLICHE_DOS CALZADAS L = 48 KM	200	100%	0.54	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 1.0535S_{neff_{(ASHTO)}} - 0.5757$	161	80.5%	0.60	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 0.9572S_{neff_{(ASHTO)}} - 0.9091$	
20	E40 GUANGARCUCHO_MENDEZ L = 50.37 KM	203	100%	0.50	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 0.7882S_{neff_{(ASHTO)}} + 0.8423$	162	79.8%	0.64	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 0.6897S_{neff_{(ASHTO)}} + 0.782$	
21	E1E5 SAN LORENZO_SAN MATEO L = 161.1 KM	578	100%	0.48	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 0.9863S_{neff_{(ASHTO)}} + 0.276$	474	82.0%	0.77	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 0.7379S_{neff_{(ASHTO)}} + 0.6717$	
22	E382 PEDERNALES_EL CARMEN L = 68.4 KM	355	100%	0.48	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 0.6746S_{neff_{(ASHTO)}} + 0.1129$	315	88.7%	0.59	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 0.9137S_{neff_{(ASHTO)}} + 0.3294$	
23	E40 KM 27_ZHUA L = 117.38 KM	434	100%	0.41	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 1.2804S_{neff_{(ASHTO)}} - 1.2799$	401	92.4%	0.45	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 1.1296S_{neff_{(ASHTO)}} - 0.8998$	
24	E35 SANTA ROSA_ALOAG L = 77 KM	297	100%	0.41	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 0.349S_{neff_{(ASHTO)}} + 1.3418$	241	81.1%	0.52	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 0.4975S_{neff_{(ASHTO)}} + 1.0388$	
25	E489 PROGRESO_POSORJA L = 48.15 KM	194	100%	0.39	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 0.4395S_{neff_{(ASHTO)}} + 1.1684$	169	87.1%	0.50	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 0.579S_{neff_{(ASHTO)}} + 0.8075$	
26	E40 PERIMETRAL_AV. 28 DE JULIO_DOS CALZADAS L = 22 KM	80	100%	0.39	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 0.8043S_{neff_{(ASHTO)}} + 2.2092$	64	80.0%	0.64	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 0.8547S_{neff_{(ASHTO)}} + 1.3826$	
27	E30_MANTA_LATAJUNGA_TRAMO: MANTA_PICHINCHA L = 127,17 KM	490	100%	0.33	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 0.9659S_{neff_{(ASHTO)}} + 0.2304$	386	78.8%	0.59	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 0.8725S_{neff_{(ASHTO)}} + 0.0713$	
28	E885 MIALVAY Y DE SARACAY L = 48.6 KM	185	100%	0.32	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 0.6959S_{neff_{(ASHTO)}} + 0.6653$	152	82.4%	0.55	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 0.8664S_{neff_{(ASHTO)}} + 0.2009$	
29	E20 ESMERALDAS_ALOAG L = 269.7 KM	1081	100%	0.31	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 0.7417S_{neff_{(ASHTO)}} + 0.3547$	902	83.6%	0.50	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 0.8069S_{neff_{(ASHTO)}} + 0.9682$	
30	E368_CHONE_PIMPIGUASI L = 56.5 KM	207	100%	0.25	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 0.7259S_{neff_{(ASHTO)}} + 0.4868$	199	96.1%	0.35	$(S_{neff_{(HOC6)}} = 0.777S_{neff_{(ASHTO)}} + 0.3745$	

Elaboración Propia

- Todas la vías
- Vías con $R^2 > 0.7$; Muy Buena correlación
- Vías con $0.5 < R^2 < 0.7$; Buena o moderada correlación
- Vías con $R^2 < 0.5$; Mala o débil correlación

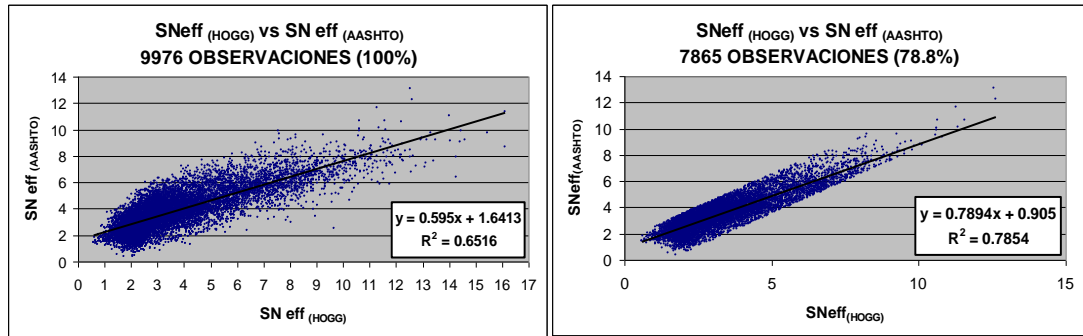


Gráfico N° 9 Ecuaciones y Correlaciones de 30 carreteras estudiadas_ 2246 km

La franja sin color de la Tabla N°3 indica una relación entre regular y buena, o moderada correlación. Los coeficientes de correlación obtenidos están entre $0.5 < R^2 < 0.70$. El 32.6% de la longitud de carreteras estudiadas se encuentra en este rango de correlación.

La franja anaranjada de la Tabla N°3 indica también las correlaciones bajas o débiles que se obtuvieron en la investigación. Los coeficientes de correlación obtenidos están entre $0.25 < R^2 < 0.50$. El 34.1% de la longitud de carreteras estudiadas se encuentra en este rango de correlación.

4.2.- COMPROBACIÓN DE LA HIPÓTESIS

La comprobación de las hipótesis debe ser determinada por medio de estimadores estadísticos. El estimador estadístico utilizado en la comprobación de la investigación es la “PRUEBA F” o relación de varianzas de 2 grupos de datos, en nuestro caso los SNeff determinados por la metodología AASHTO y por la metodología de HOGG propuesta por el Dr. Mario Hoffman.

La hipótesis presupone que los SNeff determinados por las dos metodologías no estarán alejados. El estimador estadístico utiliza la siguiente expresión:

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2} \dots [17]$$

Donde:

S_1^2 = Varianza del Grupo de Datos A; en el caso de la investigación los S_{Neff} (HOGG)

S_2^2 = Varianza del Grupo de Datos B; en el caso de la investigación los S_{Neff} (AASHTO)

Tabla N°4: Valores de PRUEBA.F

$\Delta S_{Neff} <$	N° OBSERVACIONES	% VALORES ANALIZADOS	VALOR PRUEBA "F"
-	9967	100%	1.84
1.5	7865	78.90%	1.26
0.75	4794	48.10%	1.09
0.7	4550	45.70%	1.08
0.65	4204	42.20%	1.07
0.5	3296	33.10%	1.04

Fuente: Elaboración Propia

Con los resultados de S_{Neff} obtenidos por las dos metodologías, calculamos el Estimador Estadístico para pares de datos, en un escenario considerando todos ellos, y en otros considerando aquellos cuyas diferencias sean menores a 1.5. Los resultados se indican en la Tabla N° 4

Los valores del valor PRUEBA.F de la anterior tabla, deben ser comparados con los determinados en las tablas estadísticas para los grados de libertad entre grupos de datos y entre datos del mismo grupo. Para el caso de nuestro análisis los grados de libertad son los siguientes:

$$v_1 = \# \text{ de datos del grupo 1 de análisis} - 1; v_1 = 9967 - 1 = \infty$$

$$v_2 = \# \text{ de datos del grupos 2 de análisis} - 1; v_2 = 9976 - 1 = \infty$$

Utilizando la Tabla N°7 obtenida del libro “Basical Statistical Methods for Engineers and Scientist”, el valor obtenido de $F=1$ para un nivel de significancia o posibilidad de error del 1%.

La regla de decisión indica que si $F_{\text{TABLA N}^\circ 4} < F_{\text{TABLA N}^\circ 7(\text{A-10 NEVILLE})}$, la diferencia entre el grupo de datos no es significativa; los resultados indicados en la Tabla N°4 muestran que hay diferencia en los grupos de datos especialmente cuando las diferencias entre $S_{\text{Neff}}(\text{AASHTO})$ y $S_{\text{Neff}}(\text{HOGG})$ son mayores o iguales a 1.5.

El estimador de la PRUEBA.F es determinado asumiendo de inicio que no habrá diferencia significativa entre los datos de los dos grupos analizados; sin embargo en muchos casos la condición de uniformidad de dos grupos no puede ser cumplida por muchas causas, en el caso de nuestro estudio: error en las mediciones de deflexiones, error en la medición de los espesores de la estructura del pavimento, error en ingreso de datos, alta variabilidad en los espesores de la estructura del pavimento, etc. En este caso, es conveniente determinar cuan significativamente diferentes son los grupos de datos analizados. La estadística indica que la diferencia entre las medias aritméticas de dos grupos de datos es considerada significativa si:

$$\frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{S_{\bar{X}_1}^2 + S_{\bar{X}_2}^2}} > d \dots [20]$$

Donde:

\bar{X}_1, \bar{X}_2 = Media aritmética de los grupos de datos

$S_{\bar{X}_1}^2, S_{\bar{X}_2}^2$ = Varianzas de los grupos de datos

d = Valor estadístico (TABLA N°6, o A-9, NEVILLE)

Para obtener el valor d de la TABLA N°6 (TABLA A-9 NEVILLE) es necesario obtener el valor del ángulo θ , a partir de la relación de desviaciones estándar, de acuerdo a la siguiente relación:

$$\frac{S_{\bar{X}_1}}{S_{\bar{X}_2}} = \tan \theta \dots [21]$$

Donde:

$S_{\bar{X}_1}, S_{\bar{X}_2}$ = Desviaciones estándar de los grupos de datos

En la tabla N°5 se indican algunos valores estadísticos de los dos grupos de datos analizados y el valor obtenido de la aplicación de la ecuación [20] y tabla N°6 (A-9 de NEVILLE)

Tabla N°5: Valores estadísticos de $S_{Neff_{HOGG}}$ y $S_{Neff_{AASHTO}}$

INDICADOR	$S_{Neff_{HOGG}}$	$S_{Neff_{AASHTO}}$
Desviación Estándar	2.12	1.57
Media Aritmética	3.84	3.93
Variabilidad (%)	0.55	0.40
Valor Mínimo	0.58	0.37
Valor Máximo	16.13	13.08
Mediana	3.17	3.67
Moda	3.10	4.14
Varianza	4.51	2.45
$d_{ECUACION [20]}$	0.03	
$d_{TABLA A-9 NEVILLE}$	2.58	

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados de la tabla anterior $d_{ECUACION [20]} < d_{TABLA A-9, NEVILLE}$ indican que la diferencia entre los dos grupos de datos no es altamente significativa, por lo tanto se continua en la investigación y se determinan las correlaciones entre los grupos de datos, como se indica en el numeral 4.1 anterior.

Tabla N°6: Significancia de la diferencia entre grupos de datos

1 percent level	V_1	θ						
		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
$V_2=6$	6	3.707	3.654	3.557	3.514	3.557	3.654	3.707
	8	3.707	3.643	3.495	3.363	3.307	3.328	3.355
	12	3.707	3.636	3.453	3.246	3.104	3.053	3.055
	24	3.707	3.631	3.424	3.158	2.938	2.822	2.797
	inf	3.707	3.626	3.402	3.093	2.804	2.627	2.576
$V_2=8$	6	3.355	3.328	3.307	3.363	3.495	3.643	3.707
	8	3.355	3.316	3.239	3.206	3.239	3.316	3.355
	12	3.355	3.307	3.192	3.083	3.032	3.039	3.055
	24	3.355	3.301	3.158	2.988	2.862	2.805	2.797
	inf	3.355	3.295	3.132	2.916	2.723	2.608	2.576
$V_2=12$	6	3.055	3.053	3.104	3.246	3.453	3.636	3.707
	8	3.055	3.039	3.032	3.083	3.192	3.307	3.355
	12	3.055	3.029	2.978	2.954	2.978	3.029	3.055
	24	3.055	3.02	2.938	2.853	2.803	2.793	2.797
	inf	3.055	3.014	2.909	2.775	2.661	2.595	2.576
$V_2=24$	6	2.797	2.822	2.938	3.158	3.424	3.631	3.707
	8	2.797	2.805	2.862	2.988	3.158	3.301	3.355
	12	2.797	2.793	2.803	2.853	2.938	3.02	3.055
	24	2.797	2.785	2.759	2.747	2.759	2.785	2.797
	inf	2.797	2.777	2.726	2.664	2.613	2.585	2.576
$V_2=\infty$	6	2.576	2.627	2.804	3.093	3.402	3.626	3.707
	8	2.576	2.608	2.723	2.916	3.132	3.295	3.355
	12	2.576	2.595	2.661	2.775	2.909	3.014	3.055
	24	2.576	2.585	2.613	2.664	2.726	2.777	2.797
	∞	2.576	2.576	2.576	2.576	2.576	2.576	2.576

This tables gives values of d for know values of V_1, V_2 and θ , where than $\theta = S_1/S_2$, and V_1 and V_2 are the corresponding numbers of degrees of freedom. If the diference of means exceeds $d = (S_1^2 + S_2^2)^{1/2}$, then it is significant at the specified level. This table corresponding to TABLE A-9 of "Basic Statistical Methods for Engineers and Scientist" NEVILLE (1964)

TABLA N°7: Distribución de la Variancia RELACION.F
1 Percent Level of Significance

$V_2 \backslash V_1$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	4052.4	4999.5	5403.3	5624.6	5763.7	5859	5928.3	5981.6	6022.5	6055.8	6106.3	6157.3	6208.7	6234.6	6260.7	6286.8	6313	6339.4	6366
2	98.50	99.00	99.17	99.25	99.30	99.33	99.36	99.37	99.39	99.40	99.42	99.43	99.45	99.46	99.47	99.48	99.49	99.50	99.50
3	34.12	30.82	29.46	28.71	28.24	27.91	27.67	27.49	27.34	27.23	27.05	26.87	26.69	26.60	26.50	26.41	26.32	26.22	26.12
4	21.20	18.00	16.69	15.98	15.52	15.21	14.98	14.80	14.66	14.55	14.37	14.20	14.02	13.93	13.84	13.74	13.65	13.56	13.46
5	16.26	13.27	12.06	11.39	10.97	10.67	10.46	10.29	10.16	10.05	9.89	9.72	9.55	9.47	9.38	9.29	9.20	9.11	9.02
6	13.74	10.92	9.78	9.15	8.75	8.46	8.26	8.10	7.98	7.87	7.72	7.56	7.40	7.31	7.23	7.14	7.06	6.97	6.88
7	12.25	9.55	8.45	7.85	7.46	7.19	6.99	6.84	6.72	6.62	6.47	6.31	6.16	6.07	5.99	5.91	5.82	5.74	5.65
8	11.26	8.65	7.59	7.01	6.63	6.37	6.18	6.03	5.91	5.81	5.67	5.52	5.36	5.28	5.20	5.12	5.03	4.95	4.86
9	10.56	8.02	6.99	6.42	6.06	5.80	5.61	5.47	5.35	5.26	5.11	4.96	4.81	4.73	4.65	4.57	4.48	4.40	4.31
10	10.04	7.56	6.55	5.99	5.64	5.39	5.20	5.06	4.94	4.85	4.71	4.56	4.41	4.33	4.25	4.17	4.08	4.00	3.91
11	9.65	7.21	6.22	5.67	5.32	5.07	4.89	4.74	4.63	4.54	4.40	4.25	4.10	4.02	3.94	3.86	3.78	3.69	3.60
12	9.33	6.93	5.95	5.41	5.06	4.82	4.64	4.50	4.39	4.30	4.16	4.01	3.86	3.78	3.70	3.62	3.54	3.45	3.36
13	9.07	6.70	5.74	5.21	4.86	4.62	4.44	4.30	4.19	4.10	3.96	3.82	3.66	3.59	3.51	3.43	3.34	3.25	3.17
14	8.86	6.51	5.56	5.04	4.70	4.46	4.28	4.14	4.03	3.94	3.80	3.66	3.51	3.43	3.35	3.27	3.18	3.09	3.00
15	8.68	6.36	5.42	4.89	4.56	4.32	4.14	4.00	3.89	3.80	3.67	3.52	3.37	3.29	3.21	3.12	3.05	2.96	2.87
16	8.53	6.23	5.29	4.77	4.44	4.20	4.03	3.89	3.78	3.69	3.55	3.41	3.26	3.18	3.10	3.01	2.93	2.84	2.75
17	8.40	6.11	5.18	4.67	4.34	4.10	3.93	3.79	3.68	3.59	3.46	3.31	3.16	3.08	3.00	2.92	2.83	2.75	2.65
18	8.29	6.01	5.09	4.58	4.25	4.01	3.84	3.71	3.60	3.51	3.37	3.23	3.08	3.00	2.92	2.84	2.75	2.66	2.57
19	8.18	5.93	5.01	4.50	4.17	3.94	3.77	3.63	3.52	3.46	3.30	3.15	3.00	2.92	2.84	2.76	2.67	2.58	2.49
20	8.10	5.85	4.94	4.43	4.10	3.87	3.70	3.56	3.46	3.37	3.23	3.09	2.94	2.86	2.78	2.69	2.61	2.52	2.42
21	8.02	5.78	4.87	4.37	4.04	3.81	3.64	3.51	3.40	3.31	3.17	3.03	2.88	2.80	2.72	2.64	2.55	2.46	2.32
22	7.95	5.72	4.82	4.31	3.99	3.76	3.59	3.45	3.35	3.26	3.12	2.98	2.83	2.75	2.67	2.58	2.50	2.40	2.31
23	7.88	5.66	4.76	4.26	3.94	3.71	3.54	3.41	3.30	3.21	3.07	2.93	2.78	2.70	2.62	2.54	2.45	2.35	2.26
24	7.82	5.61	4.72	4.22	3.90	3.67	3.50	3.36	3.26	3.17	3.03	2.89	2.74	2.66	2.58	2.49	2.40	2.31	2.21
25	7.77	5.57	4.68	4.18	3.86	3.63	3.46	3.32	3.22	3.13	2.99	2.85	2.70	2.62	2.54	2.45	2.36	2.27	2.17
26	7.72	5.53	4.64	4.14	3.82	3.59	3.42	3.29	3.18	3.09	2.96	2.82	2.66	2.58	2.50	2.42	2.33	2.23	2.13
27	7.68	5.49	4.60	4.11	3.78	3.56	3.39	3.26	3.15	3.06	2.93	2.78	2.63	2.55	2.47	2.38	2.29	2.20	2.10
28	7.64	5.45	4.57	4.07	3.75	3.53	3.36	3.23	3.12	3.03	2.90	2.75	2.60	2.52	2.44	2.35	2.26	2.17	2.06
29	7.60	5.42	4.54	4.04	3.73	3.50	3.33	3.20	3.09	3.00	2.87	2.73	2.57	2.49	2.41	2.33	2.23	2.14	2.03
30	7.56	5.39	4.51	4.02	3.70	3.47	3.30	3.17	3.07	2.98	2.84	2.70	2.55	2.47	2.39	2.30	2.21	2.11	2.01
31	7.51	5.18	4.31	3.83	3.51	3.29	3.12	2.99	2.89	2.80	2.66	2.52	2.37	2.29	2.20	2.11	2.02	1.92	1.80
32	7.08	4.98	4.13	3.65	3.34	3.12	2.95	2.82	2.72	2.63	2.50	2.35	2.20	2.12	2.03	1.94	1.84	1.73	1.60
33	6.85	4.79	3.95	3.48	3.17	2.95	2.79	2.66	2.56	2.47	2.34	2.19	2.03	1.95	1.86	1.76	1.66	1.53	1.38
∞	6.63	4.61	3.78	3.32	3.02	2.80	2.64	2.51	2.41	2.32	2.18	2.04	1.88	1.79	1.70	1.59	1.47	1.32	1.00

If the computed statistical $F = S_1^2/S_2^2$, with the larger s in the numerator, exceeds the tabulated value $og F$, at the specified level with V_1, V_2 degrees of freedom, we reject the null hypothesis that $\sigma_1 = \sigma_2$. This table corresponding to TABLE A-10 of "Basic Statistical Methods for Engineers and Scientist" NEVILLE(1964)

Bajo las consideraciones antes indicadas, la investigación permite determinar los números estructurales efectivos sin conocer la estructura del pavimento utilizando la metodología propuesta por el Dr. Mario Hoffman, basado en la teoría de Hogg. En el estricto rigor estadístico, para que dos grupos de datos estén entre fuertemente correspondientes a perfectas, las correlaciones deben estar en el rango $0.95 < R^2 < 1.00$; esta correlación se da cuando las diferencias entre $S_{Neff(AASHTO)} - S_{Neff(HOGG)} \leq 0.65$. En el análisis de resultados se da esta condición en el 42.2% de los datos observados, porcentaje que no es representativo del universo de datos utilizados en la investigación.

El análisis de los resultados muestra que no hay una estrecha correspondencia o cercanía en los resultados obtenidos, pero tampoco son altamente diferentes, los Números Estructurales Efectivos (S_{Neff}) determinado por las dos metodologías así lo indican (Ver también Anexo N°2). El gráfico N°10 muestra como referencia, la distribución de 3 carreteras representativas de los 3 grupos de correlaciones mostradas en la Tabla N°3.

En el Ecuador, el modelo propuesto muestra que el Numero Estructural Efectivo $S_{Neff_{HOGG}}$ determinado por la metodología basada en la teoría de Hogg, no tiene una relación fuerte o perfecta con los valores $S_{Neff_{AASHTO}}$ determinados en base a la metodología AAASHTO; sin embargo, utilizando las ecuaciones de correlación entre las dos metodologías (Ver Anexo N°2), se puede obtener el $S_{Neff_{AASHTO}}$ sin conocer el espesor de la estructura del pavimento.

Mientras no se obtenga una alta correlación ($R^2 \geq 0.7$) entre los S_{Neff} determinadas por las dos metodologías en todas las carreteras del país, no se puede afirmar que en adelante ya nos será necesario en el Ecuador, no depender del conocimiento de los espesores de la estructura del pavimento, para determinar los S_{Neff} de las estructuras de pavimento flexible.

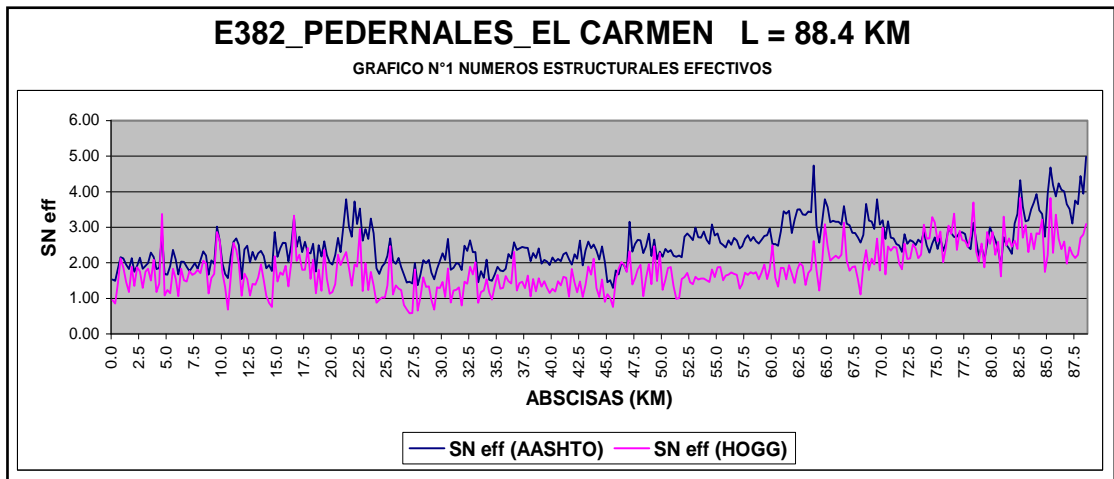
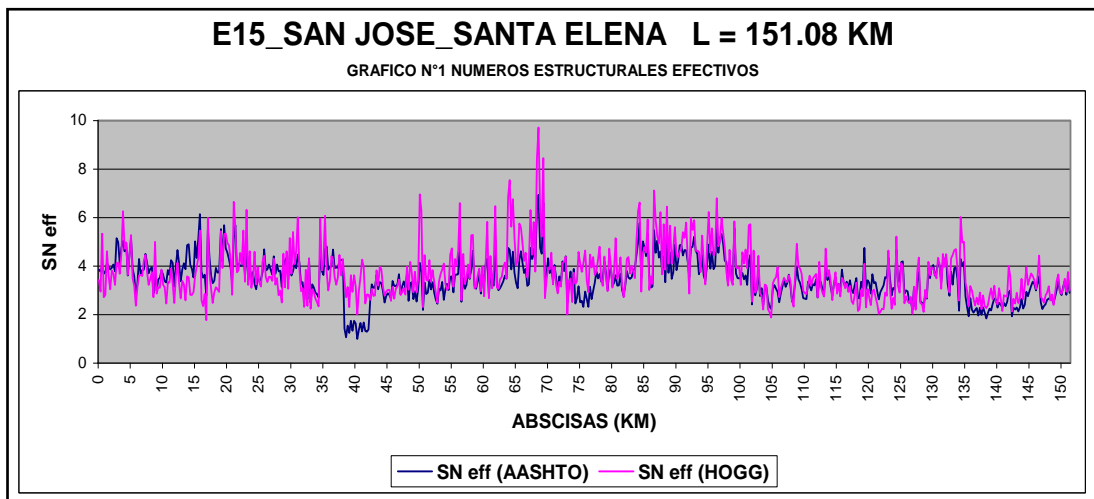
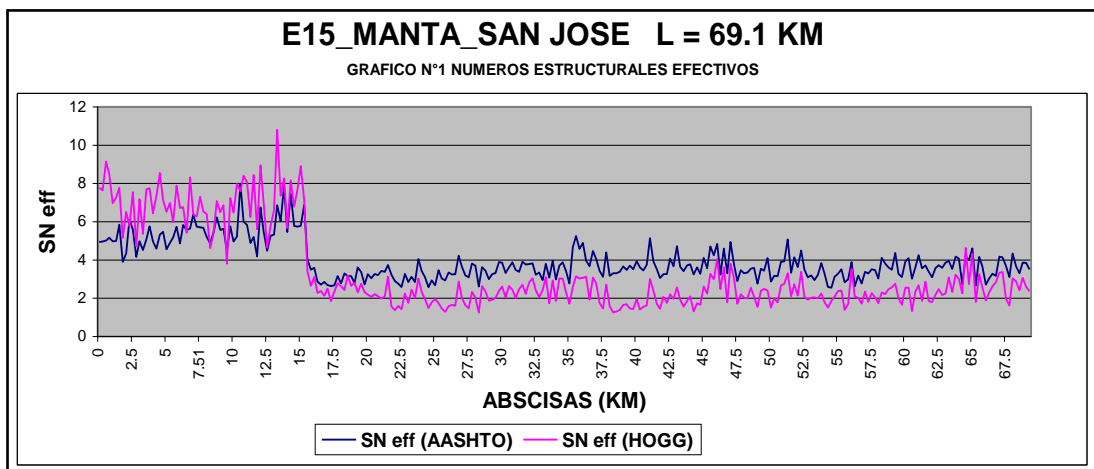


Gráfico N°10: Distribución de S_Neff (AASHTO) y S_Neff (HOGG)

CAPITULO 5
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.- CONCLUSIONES

El análisis del procesamiento de la información sobre la base del marco teórico indicado en la presente investigación permite llegar a las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- Los Estimadores Estadísticos indican que los Número Estructurales Efectivos determinados con la Metodología propuesta por el Dr. Mario Hoffman, en base a la teoría de HOGG, no tienen muy alta o perfecta correlación con los determinados sobre la base de la metodología tradicional de la AASHTO.
- Sin embargo de lo anterior; igualmente, los Estimadores Estadísticos también muestran que el los $S_{Neff\ HOGG}$ no son significativamente diferentes de los $S_{Neff\ AASHTO}$. Esto permite que se puedan correlacionar los dos grupos de resultados $S_{Neff\ HOGG}$ VS $S_{Neff\ AASHTO}$
- El análisis estadístico muestra que el 42% de los pares de resultados $S_{Neff\ HOGG} - S_{Neff\ AASHTO}$ son altamente cercanos ($\Delta SN < 0.65$), sin embargo este porcentaje no es representativo del universo de resultados obtenidos como para afirmar la hipótesis de que los S_{Neff} determinados por las dos metodologías **no son diferentes**.
- Los espesores de las estructuras de pavimento nuevas o rehabilitadas son altamente relacionadas con el Número Estructural, por lo tanto no es aceptable un rango de variación mas allá de $0 < SN < 1.5$; por esta razón, en esta investigación se depura la información para los pares de valores $S_{Neff\ HOGG} - S_{Neff\ AASHTO} > 1.5$. Los resultados obtenidos en la correlación R^2 en general mejoran.
- Tomando en cuenta la anterior conclusión y utilizando toda la información de S_{Neff} determinados por las dos metodologías, se tiene un valor de correlación $R^2 = 0.79$, considerado altamente satisfactoria en

esta investigación; sin embargo, es necesario indicar que no todas las carreteras estudiadas tienen valores de correlación altamente satisfactorios. Los interesados en la presente investigación o los que tengan interés en continuarla deben tomar sus propias precauciones en las carreteras que tengan valores de $R^2 \leq 0.50$

5.2.- RECOMENDACIONES

- No utilizar directamente los S_{Neff} determinados por la metodología propuesta por el Dr. Mario Hoffman que se basa en el modelo teórico de Hogg, para diseñar reforzamientos estructurales en pavimentos flexibles, los resultados podrían ser sobre o sub dimensionados.
- Si se quiere obtener el $S_{Neff_{AASHTO}}$ sin conocer la estructura del pavimento, **este debe ser necesariamente determinado** a través de las ecuaciones de correlación entre $S_{Neff_{HOGG}}$ vs $S_{Neff_{AASHTO}}$
- Los resultados de la investigación no permiten recomendar la aplicación del modelo en la determinación de reforzamientos estructurales en estudios definitivos; **pero si se recomienda** utilizarlos cuando se requiera preparar planes de mantenimiento periódico en forma regular o emergente, recuérdese que la mayor dificultad en las campañas de trabajos de campo es la determinación a nivel de red, de los espesores de la estructura del pavimento.
- Los resultados de esta investigación indican una fuerte correlación de los S_{Neff} determinado por las dos metodologías, en un porcentaje no despreciable del universo de datos utilizados (42.2%), **por lo tanto se recomienda continuar con la presente investigación**, alimentando información al modelo presentado, especialmente cuando se evalúe carreteras en las que se conozca con alta precisión los espesores existentes de las estructuras evaluadas; recuérdese que la presente investigación se basa en información de espesores de estructuras de pavimento medidas cada 3 km., lo cual puede ser la fuente de las diferencias que no han permitido obtener mejores valores de correlación en la determinación de los S_{Neff} por las dos metodologías mencionadas.

CAPITULO 6

LA PROPUESTA

CAPITULO 6

LA PROPUESTA

6.1.- ANTECEDENTES

En el Ecuador nunca antes se ha propuesto la determinación de Números Estructurales Efectivos sin conocer el espesor de la estructura del pavimento. En toda evaluación de estructuras de pavimento a nivel de proyecto y a nivel de red, siempre se ha tenido que volver a investigar estos espesores, principalmente por la falta de implementación Sistemas de Administración de Pavimentos que permitan guardar y sistematizar dicha información. Solo a partir del año 2002, el Ministerio de Obras Públicas implementa un Sistema de Administración de Pavimentos Integral (SAMI), con el que fue necesario realizar más de 2000 perforaciones para conocer el espesor de las estructuras de pavimento de toda la red vial del Ecuador.

6.2.- JUSTIFICACIÓN

Los resultados obtenidos en la investigación justifican la propuesta de determinar los S_{Neff} sin depender del conocimiento de los espesores de la estructura del pavimento para programas de mantenimiento periódico y evaluación de estructuras de pavimentos a nivel de red. Estos mismos resultados aun no son lo suficientemente seguros como para definitivamente dejar de depender del conocimiento de los espesores para diseños de reforzamientos importantes en estudios a nivel definitivo, especialmente en vías con alto crecimiento de tráfico pesado.

6.3.- OBJETIVOS CUMPLIDOS

Los resultados de la investigación muestran que se ha cumplido sino totalmente los objetivos planteados, gran parte de lo propuesto en la misma.

Queda determinado que es una ventaja la determinación de los Números Estructurales Efectivos utilizando la metodología de la AASHTO, ya que es la más

conocida a nivel mundial y la más utilizada por los diseñadores del Ecuador. La desventaja es tener que depender del conocimiento de los espesores de la estructura del pavimento, ya que esto implica elevados costos en la investigación, demoras importantes en la planificación de los programas de mantenimiento, molestias a los usuarios de las vías mientras se ejecuta esta investigación, inicio de daños en las estructuras del pavimento, ya que hay mínimo o nulo control de la reparación de las perforaciones realizadas en la determinación de espesores de las estructuras del pavimento.

Para la planificación de programas de mantenimiento a Nivel de Red, donde muchas veces es necesario conocer con emergencia la situación de la red vial, es una ventaja la utilización de la determinación del Numero Estructural Efectivo ($S_{Neff_{AASHTO}}$) a través de las ecuaciones de correlación que relacionan este valor con el determinado sin conocer el espesor de la estructura del pavimento ($S_{Neff_{HOGG}}$). Los resultados de la investigación no aseguran aun la utilización en proyectos de reforzamiento estructural a nivel de proyecto y por lo tanto no se puede dejar de depender completamente del conocimiento del espesor de la estructura del pavimento, **por eso la propuesta es seguir con la investigación y alimentar continuamente el modelo para dejar de depender definitivamente de este parámetro en el futuro inmediato.**

La propuesta determina estadísticamente que hay diferencias en la obtención del S_{Neff} por las dos metodologías; sin embargo estas no son altamente significantes como para no poder establecer algún grado de correlación entre los resultados obtenidos. El resultado del valor $R^2 = 0.79$ obtenido en la comparación entre ($S_{Neff_{HOGG}}$) vs ($S_{Neff_{AASHTO}}$) avala la propuesta de utilizar la metodología de obtener S_{Neff} sin conocer el espesor de la estructura del pavimento, aunque solo sea en la planificación de reforzamientos estructurales a Nivel de Red.

6.4.- APLICACIÓN DE LA PROPUESTA

El Número Estructural Efectivo (S_{Neff}) determinado por cualquier metodología revisada en la presente tesis, sirve para determinar la capacidad estructural de un pavimento en servicio.

Los pavimentos en servicio van perdiendo con el tiempo, su capacidad estructural, de manera que el Número Estructural Efectivo (S_{Neff}) será menor que el Número Estructural de diseño original (SN). Si queremos recuperar o superar el SN original, debemos reforzar las estructuras del pavimento. Este reforzamiento estructural es lo que se denomina Actividades de Mantenimiento Periódico o rehabilitación de las estructuras del pavimento.

El procedimiento para los trabajos de reforzamiento estructural se describe a continuación:

a) Determinación de la capacidad portante de la subrasante

Hemos visto en el desarrollo teórico de la tesis, la forma de obtener por medio de las deflexiones el Módulo de Resiliencia de la subrasante M_R .

b) Determinación del refuerzo necesario por falta estructural AASHTO

Este método fue desarrollado por la American Association of State Highways and Transportation Officials en base de la información empírica obtenida durante las continuas pruebas efectuadas en Illinois entre los años 1958 - 1960 denominadas AASHO Road Test. Este método ha sido actualizado y mejorado a través del tiempo en 1972, 1973, 1986 y 1993.

Para la determinación del refuerzo por falta estructural, se determina inicialmente el número estructural necesario o requerido que debe tener la estructura del pavimento para soportar las solicitaciones del tráfico con las condiciones particulares de la

subrasante, por la ecuación básica empleada para el diseño de pavimentos flexibles, derivada de la información obtenida empíricamente por la AASHTO ROAD TEST:

$$\log W_{18} = Z_R - S_0 + 9.36 \times \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log\left[\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right]}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \times \log M_R - 8.07 \dots [22]$$

Donde:

W_{18} = Número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas acumulado para el período de diseño.

Z_R = Desviación estándar normal, igual a -1.645, correspondiente a una confiabilidad del 95% por tratarse de una vía rural importante.

S_0 = Error estándar combinado de la predicción del tránsito y de la predicción del comportamiento, igual a 0.49.

ΔPSI = Diferencia entre el índice de servicio inicial (P_0) y el final (P_t), donde:

Nivel de servicio inicial (PSI Inicial) = 4.2, una vez rehabilitado.

Nivel de servicio final (PSI final) = 2.5 para que antes de la intervención el pavimento no presente mayor grado de deterioro y que los trabajos de rehabilitación salgan adelante con un sello de fisuras, parcheo y refuerzo en concreto asfáltico.

M_R = Módulo resiliente de la subrasante promedio, correspondiente al calculado por retrocálculo.

SN = Número estructural requerido.

Posteriormente se calculó la falta estructural (ΔSN) como la diferencia entre el número estructural requerido y el número estructural efectivo

$$\Delta SN = SN_{\text{REQUERIDO}} - SN_{\text{EFECTIVO}}$$

Esta falta estructural es la que debe asumir el refuerzo a colocar para soportar las solicitaciones de tráfico.

Finalmente se calcula el espesor de refuerzo necesario por falta estructural, a partir de la ecuación por componentes de la AASHTO:

$$H_{CA_AASHTO} = \frac{\Delta SN}{a_1} \dots [22]$$

Donde:

H_{CA_AASHTO} = es el espesor de refuerzo necesario por falta estructural en pulgadas

ΔSN = es la falta estructural

a_1 = es el coeficiente estructural de la carpeta asfáltica nueva (Ver Grafico N° 11)

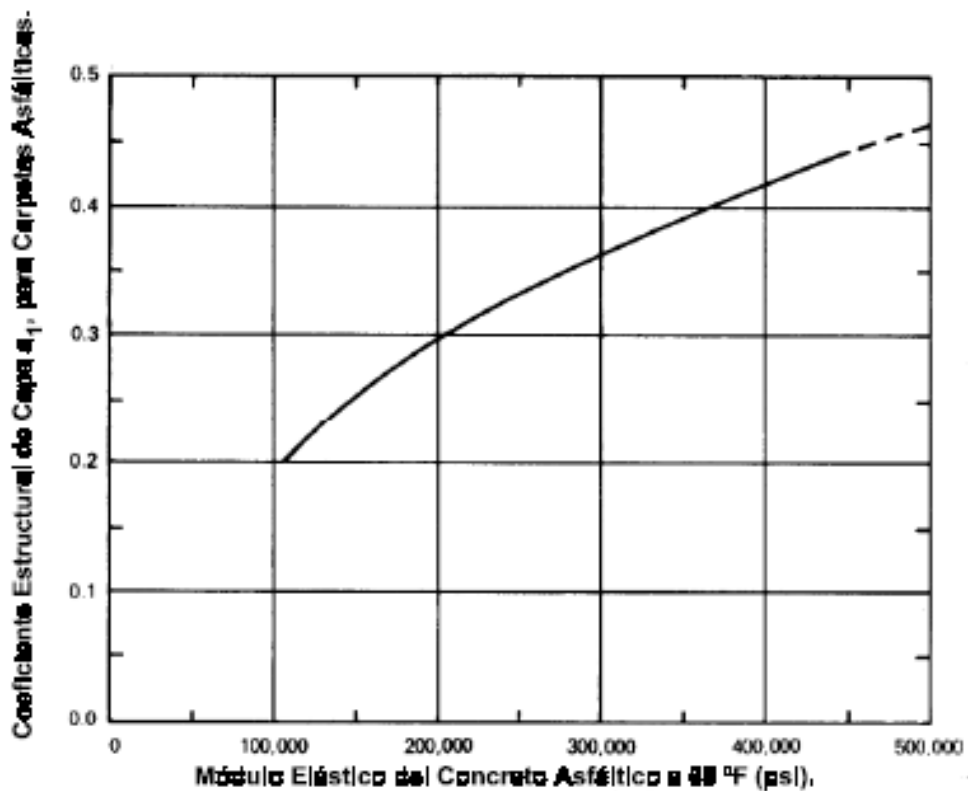


Gráfico N°11: Coeficiente Estructural a_1 para capa asfáltica

Actualmente hay muchos software que ayudan en el rápido cálculo de los refuerzos estructurales de pavimentos. A continuación se indica los resultados de un procesamiento considerado como ejemplo para la presente tesis.

AASHTO 93 y Modelo a Fatiga

Descripcion: TESIS DE GRADO ING. ISAAC TRUJILLO J.

Ingeniero(a): Ing. Isaac Trujillo J.

Ubicacion del Programa MOD: C:\Archivos de programa\AASHTO Rehab Bet

Parametros de diseno metodo AASHTO

Valor R %: 95 Valor So: 0.45

Valor MR: 1000

Seviciabilidad (PSI) Inicial: 4.2 Final: 2 ZR: -1.645 ΔPSI: 2.2

Ejes Equivs. Diseño (W18): 3000000 **Calc. SNdis**: 3.00e+06

Coef. Mat.

Capa: 0.006

Base: 0.003

Sub base: 0.002

Falta estructural segun metodo del Instituto del Asfalto

Df Medida (& + 2STD): 800 Df Renuerida: 662 Refuerzo ΓA: 3.29 Cm

Falta estructural segun AASHTO

Delta SN = SNdis - SNrhode = 0.47 Refuerzo ΓA: 1.34 (3.41)

Coeficiente a1 = 0.35 **Calcular**

Estructura de Pavimento Existente

Material	Espesor	
Conc. Asfalto	D1 10	Cm
Base granular	D2 20	Cm
Subbase gran	D3 30	Cm
Relleno	D4 0	Cm

Factor Condicion C.A.: 0.5

Modelaje de la Estructura final rehabilitada y calculo a Fatiga

	Espesor	Modulos	Estructural	Drenaje	Poisson	Fricc.
Capa asfáltica nueva	5	19990	a1 0.35	m1 1	0.35	1
Capa asfáltica antigua	10	10000	a2 0.18	m2 1	0.35	1
Base granular	20	2560	a3 0.135	m3 0.9	0.35	1
Sub base granular	30	1600	a4 0.11	m4 0.9	0.35	1
SG	1000				0.4	1

Calculo a Fatiga

Daño Acumulado Miner: 0.01 **Calcular Miner**

Metodo AASHTO

Numero Estructural Diseño (SNdis): 3.32

Numero Estructural Efectivo Rhode (SNrhode): 2.85

SN de Estructura final rehabilitada (SNrehab): 3.52

Recomendaciones

Gráfico N°12: Cálculo de refuerzo estructural por el Método (AASHTO)

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

1. AASHTO (1993) *Guide for Design of Pavement Structures, Published by the American Association of State Highway and Transportation Officials*, Washington DC.
2. ROHDE, Gustavo. (1994), "*Determining Pavement Structural Number from FWD Testing*", TRR 1448, Transportation Research Board, Washington DC,
3. HALL, K. D., and ELLIOT, R. P., (1992). "*Roadhog – A Flexible Pavement Overlay Design Procedure*", TRR 1374, Transportation Research Board, Washington DC.
4. ROMANOSCHI, S, and METCALF, J. B.(1999), "*Simple Approach to Estimation of Pavement Structural Capacity*", TRR 1652, Transportation Research Board, Washington DC.
5. IOANNIDES, A. M.(1991) "*Theoretical Implications of the AASHTO 1986 Nondestructive Testing Method 2 for Pavement Evaluation*", TRR 1307, Transportation Research Board, Washington, DC.
6. HEUKELOM, W., KLOMP, A.J.G. (1962) "*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.
7. MICHALAK, C. H., and SCULLION, T. (1995) "*Modulus 5.0: User's Manual*", Texas Transportation Institute, College Station, Texas.
8. ELMOD4, Dynatest International, Denmark, <http://www.dynatest.com>.

9. UZAN, Jacob. (1998) *"Estimation of Subgrade Thickness from Deflection Basin Analysis"*, Fifth International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields, Trondheim.
10. HOGG, A. H. A., (1938) *"Equilibrium of a Thin Plate, Symmetrically Loaded, Resting on an Elastic Foundation of Infinite Depth"*. Philosophical Magazine, Volume 25 (168), pp 576- 582.
11. HOGG, A. H. A. (1944). *"Equilibrium of a Thin Slab on an Elastic Foundation of Finite Depth"*, Philosophical Magazine, Volume 35 (243), pp 265-276.
12. WISEMAN, G., UZAN, Jacob., HOFFMAN, Mario , ISHAI, I., and LIVNEH, M. (1977), *"Simple Elastic Models for Pavement Evaluation Using Measured Deflection Bowls"*, Proceedings, Fourth International Conference – Structural Design of Asphalt Pavements, Volume II, Ann Arbor, Michigan.
13. HOFFMAN, M. S. and THOMPSON M. R. (1982) *"Comparative Study of Selected Nondestructive Testing Devices"*, TRR 852, Transportation Research Board, Washington DC.
14. HERNANDEZ, Roberto, FERNANDEZ, Carlos y BAPTISTA, Pilar. (1998) *"Metodología de la Investigación científica"* Mexico DF.
15. HERRERA,Luis, MEDINA, Arnaldo, NARANJO, Galo. (2004) *"Tutoría de la Investigación Científica"* Quito-Ecuador
16. NEVILLE, Adam, KENNEDY,Jhon (1964) *"Basical Statical Methods for Engineers and Scientist"*, Ontario-Canada

ANEXOS

ANEXO A1

PROCESO DETALLADO DE CÁLCULO

ANEXO A2

RESULTADOS GRÁFICOS DE LA INVESTIGACIÓN

CURRICULUM VITAE

Ing. Isaác E. Trujillo Jiménez, nacido en Catamayo – Loja año 1951.- Estudios Secundarios, Colegio Teodoro Gómez de la Torre, Ibarra 1971.- Estudios Superiores Universidad Central del Ecuador, Ingeniero Civil 1980.- Ingeniero del Departamento de Geotecnia del Ministerio de Obras Públicas del Ecuador, 1980 – 2000.- Curso de Evaluación de Pavimentos, MOP-ISRAMAJON 1990 – 1991.- Consultor Internacional en varios proyectos de Evaluación de Pavimentos y Programas de mantenimiento vial en: Nicaragua, El Salvador, Panamá, Republica Dominicana, Colombia y Perú.- Representante Legal de Technology and Management (TNM) de Israel desde el año 2000.- Gerente de la Consultora HIDROPAVER CIA LTDA. Desde el año 2000 – 2006.- Director de Control de Calidad en fiscalización de la construcción del Nuevo Aeropuerto de Quito (NQIA) con la consultora Louis Berger Internacional Inc de USA. Desde junio 2006 a la fecha.