

**IAG79-07-2013**  
**CLASIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR EL**  
**DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO PARA LA EVALUACIÓN**  
**ESTRUCTURAL DE LA RED VIAL CANTONAL DE COSTA RICA**  
**CLASSIFICAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PELO**  
**DEFLETÔMETRO DE IMPACTO PARA A AVALIAÇÃO ESTRUTURAL**  
**DA REDE RODOVIÁRIA CANTONAL DA COSTA RICA**

Ing. Eliécer Arias Barrantes  
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, LanammeUCR  
San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica  
eliecer.arias@ucr.ac.cr

Ing. Sharline López Ramírez  
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, LanammeUCR  
San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica  
sharline.lopezramirez@ucr.ac.cr

Ing. Jaime Allen Monge MSc  
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, LanammeUCR  
San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica  
jaime.allenmonge@ucr.ac.cr

## **Resumen**

La red vial cantonal representa en longitud el 80% de la totalidad de carreteras y caminos de Costa Rica. Actualmente, en Costa Rica se han definido categorías para la clasificación de la capacidad estructural con base en los resultados de la deflectometría de impacto para la Red Vial Nacional. Sin embargo, la realidad cantonal en cuanto a niveles de tránsito y estructuras de pavimentos es otra, por lo que es necesario generar nuevas categorías que reflejen las características de la red vial cantonal. En este estudio se presenta la metodología, análisis y resultados obtenidos en la determinación de las categorías para la clasificación de la capacidad estructural con base en las deflexiones obtenidas por el deflectómetro de impacto en rutas asfaltadas cantonales, las cuales se encuentran relacionadas con diferentes niveles de tránsito. Entre los datos que se analizan para obtener las categorías, se encuentran conteos vehiculares con la distribución vehicular correspondiente, así como los datos de deflectometría evaluada en diferentes rutas cantonales costarricenses. Además, se toma en consideración las capas, incluyendo espesores, que componen diferentes estructuras de pavimentos y los valores de CBR en sitio de la subrasante, información obtenida mediante sondeos a cielo abierto (calicatas) sobre diferentes sitios de la red. Con la aplicación de las nuevas categorías se obtienen estrategias de intervención acorde a los niveles de servicio esperados y presupuestos Municipales.

## **Resumo**

A rede rodoviária cantonal representa quase o 80% de todos os caminhos e estradas da Costa Rica. Hoje, na Costa Rica intervalos têm definido de classificação da capacidade estrutural com base nos resultados defletômetro de impacto para a Rede Rodoviária Nacional. No entanto, a realidade cantonal em relação aos níveis de tráfego e as estruturas de pavimento é diferente, por isso é necessário para gerar novos intervalos que refletem as características da rede rodoviária cantonal. Este estudo apresenta a metodologia, a análise e os resultados obtidos na determinação dos intervalos de classificação estrutural com base nas deflexões obtidas pelo defletômetro de impacto, as quais estão associadas com diferentes níveis de trânsito. Entre os dados que são analisados para obter os intervalos, estão a conta e distribuição dos veículos, também os dados da defletometria de cantonais rotas avaliadas na Costa Rica. Também se leva em conta as camadas, incluindo espessura, que compõem as diferentes estruturas de pavimento e valores do CBR in situ, as informações obtidas por meio de pits em diferentes sites da rede. Com a implantação dos novos intervalos são derivadas estratégias de intervenção de acordo com os níveis de serviço esperados e orçamentos municipais.

## **INTRODUCCION**

La red vial cantonal de Costa Rica abarca cerca de 32 000 km, una de las labores que ejecuta el Laboratorio Nacional de Materiales de la Universidad de Costa Rica es la evaluación de la red vial cantonal, para esto se ha utilizado el deflectómetro de impacto para estimar la capacidad estructural del pavimento, el perfilómetro inercial láser para medir la regularidad superficial, calicatas para realizar mediciones de CBR en la subrasante, y medir espesores así como conteos vehiculares y la auscultación visual.

En el caso de la red vial asfaltada se ha utilizado la clasificación por deflexiones para determinar la condición estructural de las diferentes estructuras, una de las principales limitaciones es que dicha clasificación está enfocada a los flujos vehiculares de la red vial nacional de Costa Rica (LanammeUCR, 2008a,b), donde los flujos vehiculares distan mucho de lo observado y medido en la red vial cantonal.

Este estudio plantea la metodología para estimar una clasificación por deflexiones utilizando parámetros de entrada acordes a la red vial cantonal, como los datos que se han recolectado hasta la fecha de suelos, conteos vehiculares y mediciones con el deflectómetro de impacto. Esto con el fin de determinar los valores más representativos a nivel de deflexiones y poder realizar una mejor evaluación de la red vial cantonal de Costa Rica.

## **METODOLOGÍA PROPUESTA**

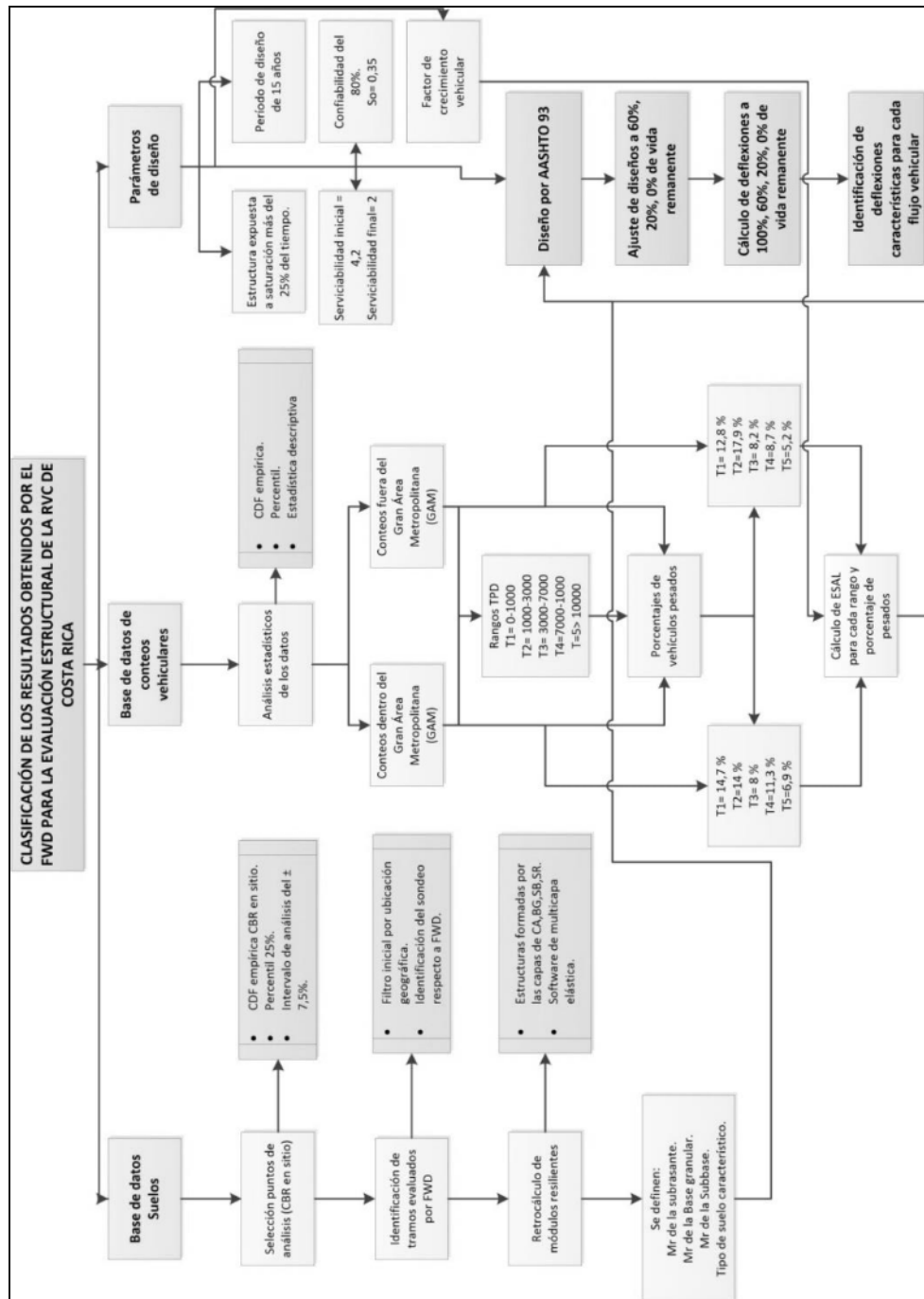
En este estudio se utilizan los datos de cielos abiertos procedentes de 250 puntos diferentes donde se conoce el tipo de suelo en la subrasante, espesores de las capas granulares y tipo de capas granulares además del CBR en sitio. Se utiliza la información de los conteos vehiculares para estimar los flujos vehiculares típicos y la cantidad de vehículos pesados, para este análisis se cuenta con 270 conteos vehiculares.

Se identifican las características típicas de suelos costarricenses, CBR de la subrasante, módulos resilientes de las capas granulares mediante la metodología de retrocálculo de módulos (Porrás, 2009), además al conocer los flujos vehiculares típicos se estima con mayor precisión la

demanda actual de tránsito en la red vial cantonal. Además, los parámetros de diseño seleccionados en la metodología están acorde a las condiciones climáticas de Costa Rica y la realidad constructiva de nuestras municipalidades.

En la Figura 1 se observa un flujograma que resume la metodología que se utilizó en este estudio, además se pueden observar los tres grandes ejes de trabajo: el análisis de los conteos vehiculares, el análisis de la información extraída de los sondeos y ensayos de deflectometría de impacto y la definición de los diferentes parámetros de diseño por incorporar según la metodología de diseño AASHTO 1993.

**Figura 1: Resumen de metodología empleada en la investigación**

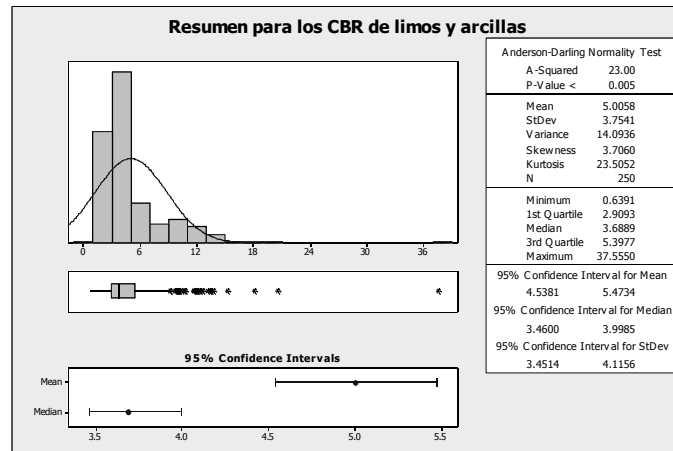


## Bases de Datos de Suelos

La base de datos de suelos fue elaborada a través de los ensayos realizados en 17 Municipalidades de Costa Rica, donde se cuenta con tipo de material, registro fotográfico, medición de espesores, tipos de suelo de la subrasante (Badilla e Rico, 2001), medición de CBR en sitio y la ubicación mediante sistemas de información geográficos (SIG), se utilizaron 250 puntos de muestreo donde el tipo de subrasante característico son suelos finos (CH, MH, ML,

CL), se identificó que el CBR en estos suelos no sigue una distribución normal y se da una gran concentración de valores para CBR menores a 5,5% (ver Figura 2).

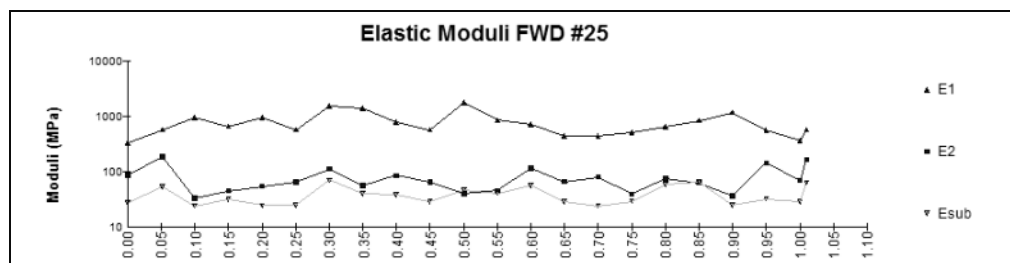
**Figura 2: Ejemplo de estadísticas básicas para los valores de CBR en sitio**



Mediante un análisis de datos que incluía estadística descriptiva básica, análisis de cuartiles, percentiles y análisis de curva de probabilidad acumulada (Montgomery e Runger, 2006) se determinó que el CBR más representativo corresponde a un 2,9%, con este valor un 75% de los muestreos registran un CBR igual o menor. Definido este valor se pudo detectar la familia de datos correspondientes a un intervalo del 15% con datos cercanos al CBR de 2,9%, estos valores fueron ubicados geográficamente y se identificó el ensayo de deflectometría correspondiente y el tramo homogéneo asociado para poder realizar el retrocálculo de los módulos de la capas granulares colocadas sobre las subrasantes seleccionada como representativa para este análisis.

Para el retrocálculo de los módulos resilientes de la base granular, subbase y subrasante se utilizó un software de multicapa elástica, en la siguiente figura se muestra un ejemplo de la salida del software utilizado para el retrocálculo en uno de los tramos analizados, en total se analizaron 114 puntos de deflectometría y los valores promedio pueden observarse en la Tabla 1.

**Figura 2: Estadísticas básicas para los valores de CBR en sitio**



**Tabla 1: Valores promedio obtenidos para las capas del pavimento**

Material	Módulo retocáculado	Módulo para diseño	Especificación mínima CR-2010
Base granular	683 Mpa	423 Mpa	194 Mpa
Subbase granular	151 Mpa	98 Mpa	104 Mpa
Subrasante	58 Mpa	20 Mpa	

A partir de los datos de retrocálculo se determinó los módulos elásticos de los materiales que se han colocado sobre la subrasante típica en nuestro país y la capacidad al momento de la evaluación, estos datos brindan información valiosa para estimar el coeficiente estructural de la capa según la metodología AASHTO 1993. Es importante mencionar que estos valores fueron comparados con el Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes, CR-2010 y se determinó que los materiales colocados como subbase no cumplen especificación mínima debido a la degradación que tenían al momento de la evaluación o por el tipo de material colocado, por lo tanto se seleccionó el mínimo de la especificación para continuar con el análisis.

## Bases de Datos de Conteos Vehiculares

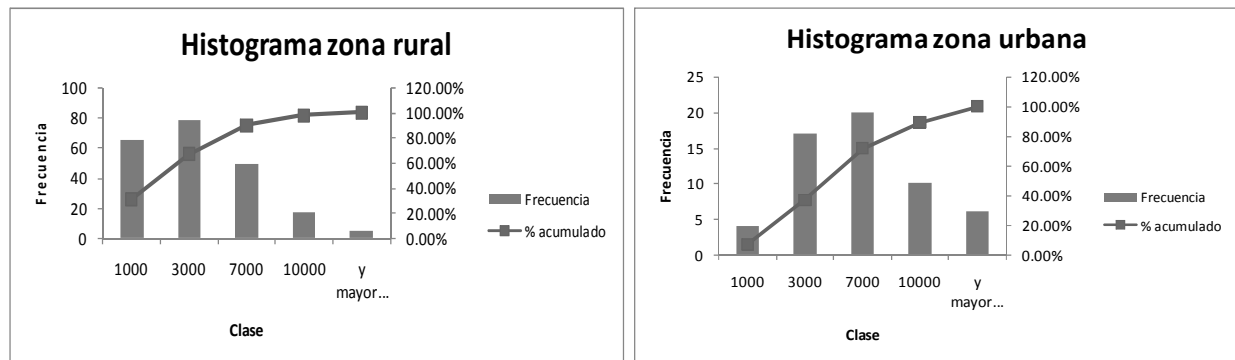
Para determinar los flujos vehiculares característicos se analizaron datos de 271 conteos vehiculares correspondientes a 15 municipios y que acumulan un total de 895 000 vehículos contados, con esto se determinó la existencia de diferencias entre los flujos vehiculares dentro del gran área metropolitana (zona urbana) y fuera de esta (zona rural), por lo que se identificaron cinco categorías de flujos vehiculares, el detalle de estos datos se puede observar en la Tabla 2, además para cada uno de estos flujos vehiculares se calculó el porcentaje de vehículos pesados para la zona rural y para la urbana.

**Tabla 2: Clases y porcentaje de vehículos pesados**

Flujo vehicular		Porcentaje de pesados	
Símbolo	Intervalo TPD	Urbano	Rural
<b>T1</b>	0-1000	14.7%	12.8%
<b>T2</b>	1000-3000	14.0%	17.9%
<b>T3</b>	3000-7000	8.0%	8.2%
<b>T4</b>	7000-10000	11.3%	8.7%
<b>T5</b>	<10000	6.9%	5.2%

En la Figura 4 puede observarse la distribución de los conteos vehiculares en las clases determinadas y cuantos conteos acumula cada clase.

**Figura 4: Histogramas para las clases determinadas y porcentajes acumulados**



#### *Estimación de los Ejes equivalentes*

Para estimar la cantidad de ejes equivalentes según cada categoría de flujo vehicular (T1, T2, T3, T4, T5) se utilizaron las ecuaciones 1, 2 y 3.

$$ESAL_{día} = \%pesados * TPDA * FC \quad (1)$$

$$ESAL_{diseño} = ESAL_{día} * 365 * GF * DS * LDF \quad (2)$$

$$GF = \frac{|(1 + r)^n - 1|}{r} \quad (3)$$

Donde

$ESAL_{día}$ =Cantidad de ejes de 8,2 toneladas en un día.

TPDA= Tránsito promedio diario anual.

FC= Factor camión.

$ESAL_{diseño}$ =Cantidad de ejes de 8,2 toneladas al final del período de diseño.

DS= Porcentaje de vehículos por carril.

LDF= Porcentaje de distribución por carril.

GF= Factor de crecimiento para una determinada cantidad de años.

r= Porcentaje de crecimiento anual.

n= cantidad de años (período de diseño).

Según encuestas de carga realizadas en Costa Rica (LanammeUCR, 2007) en las principales rutas nacionales se determinó que el factor camión promedio para vehículos pesados es de 2,05 (Ver Tabla 3) además se considera un DS=100% y un LDF=80% según las tendencias de circulación en las diferentes redes viales cantonales.

**Tabla 3: Factores camión promedio para vehículos pesados**

Tipo de vehículo Ruta	Factor Camión (TF)	
	Pick up	Pesados
Prospero Fernandez ruta 27	0.011	1.77
Florencio del Castillo Ruta 2	0.015	1.84
General Cañas ruta 1	0.011	1.31
Braulio Carrillo ruta 32	0.011	3.05
Naranjo Bernardo Soto ruta 1	0.011	2.44
Esparza Bernardo Soto ruta 1	0.011	3.19
San Carlos ruta 140	0.012	1.50
Perez Zeledon ruta 2	0.012	1.31
<b>Promedio</b>	<b>0.012</b>	<b>2.05</b>
<b>Desviación estándar</b>	<b>0.001</b>	<b>0.75</b>

## Parámetros de Diseño

### *Factor de crecimiento vehicular*

Para estimar el factor de crecimiento vehicular se analizaron los flujos vehiculares de las rutas más importantes de Costa Rica, producto de encuestas de cargas y datos de las estaciones de peaje, el resumen de los datos se puede observar en la Tabla 4, el factor de crecimiento determinado para el análisis es de 7,3% anual.

**Tabla 4: Porcentaje de crecimiento en las principales rutas de Costa Rica**

Porcentaje de crecimiento		
Ruta	Años	Porcentaje de Crecimiento
Bernardo Soto, Ruta 1	9	6.4%
Florencio del Castillo, Ruta 2	16	5.9%
Próspero Fernández, Ruta 27	12	10.9%
Braulio Carrillo, Ruta 32	12	5.9%

Factor de crecimiento promedio                      7.3%

### *Índice de serviciabilidad*

En este caso se debe asumir un valor inicial y final, en el caso del valor inicial se asumió un PSI de 4,2, en el caso del PSI final se debería suponer una valor de 2, para seguir la metodología de Vida Remanente de la AASHTO, donde al 0% de vida remanente se pierde toda la serviciabilidad se seleccionó el valor de PSI= 1,5.

### *Confiabilidad*

Por la naturaleza de la rutas a diseñar se seleccionó un nivel de confianza del 80%, correspondiente a rutas locales, con esto se tiene un valor de  $Z_r = -0,841$  y para la desviación promedio ( $S_o$ ) se consideró un valor de 0,35; debido a que el objetivo es obtener las deflexiones de un pavimento bien construido y compararlo con las deflexiones obtenidas en los pavimentos en sitio.

### *Período de diseño*



Según recomienda la AASHTO el período de diseño para estas rutas debe estar entre 10 a 20 años, en el caso de las rutas cantonales de Costa Rica se ha seleccionado un período de 15 años, donde se espera que se alcance la falla al final del período seleccionado.

### *Drenajes*

Debido a las condiciones climáticas de Costa Rica, las prácticas constructivas y la incertidumbre que se genera alrededor de esta variable se seleccionó un  $C_d=0,6$  considerando que el pavimento estará expuesto a niveles de humedad cercanos a la saturación más del 25% del tiempo y bajo condiciones de drenaje pobre.

### **Diseño por AASHTO 93 (Etapla actual)**

Para estimar el número estructural del pavimento nuevo se resolverá el modelo matemático de AASHTO 1993 (ecuación 4), cuyas variables de entrada han sido descritas previamente. A partir del número estructural (SN) se estimarán los espesores para las diferentes estructuras que se mantendrán constantes durante el análisis.

$$\log_{10} W_{18} = Z_r * S_o + 9.36 * \log_{10} (SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left( \frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right)}{\frac{0.40 + 1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 * \log_{10} M_r - 8.07 \quad (4)$$

$W_{18}$ = Cantidad de ejes equivalentes de 8,2 toneladas.

$Z_r$ = Desviación normal estándar para un nivel de confianza dado.

$S_o$ = Desviación estándar promedio.

SN= Número estructural.

$\Delta PSI$ =Diferencia entre el PSI inicial y final.

$M_r$ =Módulo de la subrasante en psi.

### *Ajuste de los números estructurales bajo la metodología de Vida Remanente.*

La metodología de “Vida Remanente” sigue el concepto de daño por fatiga en las diferentes capas que componen el pavimento y depende directamente de la cantidad de repeticiones de carga que han pasado en un determinado momento, estas repeticiones degradan la estructura del pavimento limitando su capacidad para soportar las diferentes cargas solicitadas. El concepto de “Vida remanente” se denota según la siguiente ecuación y puede observarse en la Figura 5 (AASHTO, 1993).

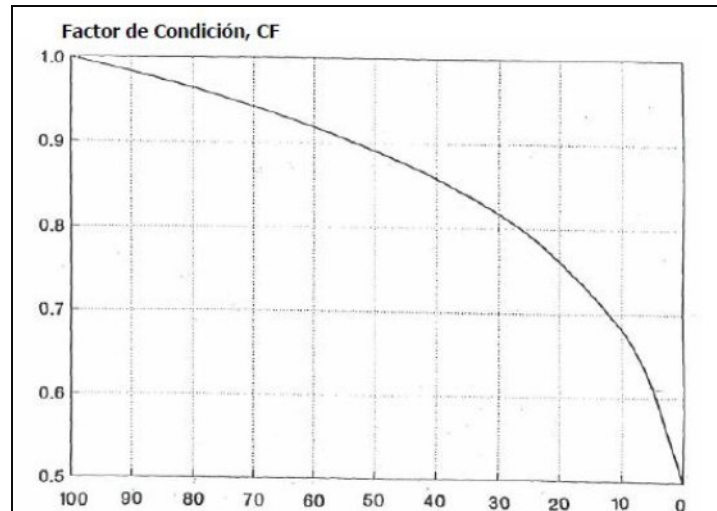
$$RL = 100 * \left( 1 - \frac{N_p}{N_{1,5}} \right) \quad (5)$$

RL= Vida remanente (0-100).

$N_p$ = cantidad de ejes de 8,2 toneladas en un momento determinado.

$N_{1,5}$ = cantidad de ejes para la falla del pavimento ( $PSI=1,5$ ).

**Figura 5: Relación entre el factor de condición y la vida remanente del pavimento**



Con el factor de condición se obtendrá la capacidad estructural del pavimento después de  $N_p$  repeticiones como un porcentaje de la capacidad original.

$$CF = \frac{SN_n}{SN_0} \quad (6)$$

$SN_n$  = Capacidad estructural después de  $N_p$  repeticiones.

$SN_0$  = Capacidad estructural inicial, 100 % de vida remanente.

Para este estudio el criterio que se utilizará para evaluar las variaciones en el número estructural serán al 60%, 20% y 0% de vida remanente, esto debido a que se ha demostrado que el PSI en la mayoría de pavimentos disminuye lentamente en los primeros años y disminuye de forma acelerada al final del período de diseño, por lo tanto las deflexiones determinadas antes del 60% de vida remanente serán representativas de un pavimento en buen estado, las obtenidas en un pavimento con menos del 20% de vida remanente corresponderán un pavimento deteriorado y al 0% un pavimento destruido.

#### *Cálculo de deflexiones para cada paquete estructural*

Se utilizará un software de análisis de multicapa elástica para determinar las deflexiones en la superficie del pavimento para cada paquete estructural, en las condiciones de 100%, 60%, 20% y 0% de vida remanente, se introdujeron los espesores obtenidos así como las diferentes características de los materiales correspondientes a cada número estructural original y ajustado por vida remanente. Además para simular el ensayo con el deflectómetro de impacto se utilizó un radio de carga de 15 cm, correspondientes a plato de carga del equipo, con una carga de 40 000 N lo que nos da una presión de contacto de 566 kPa.

## **Resultados Esperados**

Para las condiciones descritas previamente se agruparán los datos estadísticamente con el fin de determinar las deflexiones típicas para diferentes estructuras de pavimento, bajo las condiciones de carga descritas anteriormente, esto debido a que para cada condición de flujo vehicular se cuenta con un porcentaje de vehículos pesados característico y esto brinda diferentes paquetes estructurales con una respuesta diferente ante la acción de las cargas.

Además estos valores serán comparados con los valores obtenidos para la red vial nacional de Costa Rica y así obtener la diferencia real respecto a los nuevos valores. Los nuevos intervalos serán utilizados para clasificar la red vial cantonal de Costa a partir de ensayos con el deflectómetro de impacto y serán de mucha utilidad en evaluación de pavimentos asfaltados en la red vial cantonal.

## REFERENCIAS

- Ministerio de Obras Públicas y Transportes. Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes, San José Costa Rica. 2010.
- Porras, J. (2009). Determinación de Rangos de Módulos Resilientes para Materiales Constituyentes de la Estructura de Pavimentos Existentes en Costa Rica, Mediante el Procedimiento de retrocálculo de Módulos y Ensayos Dinámicos. Tesis para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Proyecto N° UI-PC-04-08, Desarrollo de herramientas de gestión con base en la determinación de índices de red vial nacional, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), San José Costa Rica. Noviembre, 2008a.
- Proyecto N° UI-PC-03-08, Variaciones a los Rangos para la Clasificación Estructural de la Red Vial Nacional de Costa Rica. Unidad de Investigación en Infraestructura Vial (UIIVI), Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), San José Costa Rica. Agosto, 2008b.
- Proyecto N° PI-01-PIIVI-2007, Encuesta de Carga. Programa de Investigación en Infraestructura Vial, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), San José Costa Rica. Julio, 2007.
- Montgomery, D., Runger, G. (2006). Probabilidad y Estadísticas aplicadas a la Ingeniería. México: Limusa.
- Badilla, J., Rico, R. (2001). Mecánica de suelos Tomo 1: Fundamentos de la Mecánica de Suelos. México, D.F: Limusa.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. Guide for Design of Pavement Structures. Washington, D.C, 1993