

DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES A PARTIR DE MÓDULOS RESILIENTES DE MATERIALES GRANULARES NO TRATADOS MEDIANTE ENSAYOS TRIAXIALES

*Ing. Marco Aurelio Oliveros G.
Decano de la Facultad de Ingeniería Civil
Corporación Universitaria del Meta*

1. Introducción

Un pavimento flexible se puede considerar como una serie de capas de materiales (tratadas o no tratadas) superpuestas, soportadas por una fundación, teniendo cada una módulos resilientes elásticos diferentes. El diseño de un pavimento debe conducir a que esta estructura sea estable, tenga un alto nivel de confianza y esté capacitada para soportar el tránsito durante todo el período de análisis¹. La primera capa o superficial consiste en una capa asfáltica que además de absorber gran parte de la carga vehicular, impermeabiliza la superficie y permite al usuario de la vía un tránsito seguro. Las siguientes capas son generalmente la base y subbase granular (tratadas o no), con módulos resilientes de menor valor que la primera. Por lo tanto, el mejor conocimiento de este parámetro debe garantizar que los esfuerzos y deformaciones generados por las cargas vehiculares estén dentro de los valores admisibles de cada material. Este artículo destaca el Diseño Racional de Pavimentos, a partir de los módulos resilientes de capas granulares no tratadas mediante ensayos triaxiales, durante la ejecución de un Proyecto vial del Nordeste Antioqueño (sistema de Gerencia de Obra) donde el autor laboró.

2. Reseña histórica

En los Estados Unidos, antes de los años veinte, los diseños se hacían en base a la experiencia y al sentido común del proyectista; muchos de estos métodos estaban basados en principios Geotécnicos. El concepto era proteger la subrasante de tensiones excesivas, colocando un espesor suficiente de materiales por encima de ésta. La mecánica de suelos² fue aplicada a los pavimentos, cuyas características dependían de los tipos de suelos de fundación. Para los pavimentos construidos con materiales no ligados se utilizaba el método del CBR³ y los espesores estaban correlacionados con el tipo de suelo y el tráfico (métodos empíricos). A partir de la segunda guerra mundial algunos países desarrollaron procedimientos de diseño basados en principios

de la mecánica de los materiales (Burmister, 1943). Entre 1950 y 1960 se realizaron ensayos de cargas de tránsito sobre pistas de variada longitud en diferentes puntos del país. Los más importantes se realizaron en Ottawa, Illinois, que posea características de suelos uniformes y climatología típicas de gran parte de EE. UU., que aportaron bases importantes para cuantificar el efecto del tráfico y su acumulación. Los métodos modernos de diseño⁴ están basados en modelos matemáticos, que permiten estimar los esfuerzos y deformaciones en las capas granulares que constituyen el pavimento y el suelo de subrasante. Estos modelos permiten también tener en cuenta el comportamiento a la fatiga de los diferentes materiales. Los programas de computador tales como el Depav, utilizado en Colombia, y otros similares, se adaptan bien al estudio de estructuras de pavimento constituidas por capas relativamente rígidas –materiales granulares tratados con ligantes hidráulicos o asfálticos–; es decir, para los materiales cuyo comportamiento se asemeja al elástico lineal. En este caso los esfuerzos que debe soportar la subrasante son relativamente bajos. Por el contrario (Paute, 1983), cuando el pavimento está constituido por materiales granulares no ligados se nota una diferencia importante entre las deformaciones observadas y las calculadas. Esta diferencia se le atribuye al hecho de que en los materiales no ligados y los suelos de subrasante, el módulo de Young y la relación de Poisson dependen de los esfuerzos a los cuales se los someten. Las cargas cíclicas a las cuales están sometidos los pavimentos no producen el mismo efecto sobre los materiales granulares ligados o no ligados: en los materiales ligados la resistencia a la fatiga se traduce en una disminución de la resistencia a la rotura; por el contrario, en los materiales no ligados la fatiga produce deformaciones plásticas irreversibles, que a su vez producen ahuellamiento del pavimento. El ensayo triaxial bajo cargas cíclicas permite someter a los materiales que conforman las capas de pavimento a trayectorias de esfuerzos similares a las que produce el paso de los vehículos; de esa manera se pueden obtener las relaciones entre esfuerzos y deformaciones reversibles, y el comportamiento a la fatiga (deformaciones irreversibles).

3. Diseño preliminar

La carretera mencionada se contrató de acuerdo al Diseño realizado por una empresa de Consultoría para el INVIAS, cuya sección típica (primer sector) se muestra en la siguiente tabla. La longitud total del proyecto fue de 17 Km.

| Capa | Descripción | v | Módulo Bares | Espesor cm. |
|------|---------------------|------|--------------|-------------|
| 1 | Capa de Rodadura | 0,35 | 7.061 | 7,5 |
| 2 | Base Granular | 0,40 | 1.961 | 25,0 |
| 3 | Subbase Granular | 0,40 | 981,0 | 30,0 |
| 4 | Estabiliza. Química | 0,45 | 412,0 | Superf. |

Debido a los altos costos de la estabilización química y la necesidad de iniciar las obras de explanación por el fuerte invierno reinante en la región, la Interventoría autorizó la colocación de material de OGA (residuo de la explotación aurífera de la

zona). La metodología del diseño original entregado a la Gerencia de la obra considero los siguientes parámetros y una tasa de incremento anual de tránsito del 2,6%:

- Número de repeticiones ejes de 8,2 Ton. = $7,68 \times 10^5$. En el diseño está aumentado en un 35% como margen de seguridad.
- Velocidad de diseño = 50 Km. / HR.
- La vida útil de diseño = 5 años.
- La relación de Poisson utilizada fue de 0,35 para la carpeta asfáltica, 0,40 para la Base y Subbase granular y de 0,45 para la Subrasante.
- La temperatura anual del ambiente en la zona del estudio se estimó en 27,5 °C.
- El módulo Resiliente de la subrasante se calculó con la fórmula propuesta por la Shell: $E_s = 100 \text{ CBR (Kg/cm}^2\text{)}$.
- Los módulos dinámicos de la Base y Subbase granular se calcularon mediante la expresión propuesta por la Shell: $E_i = 0,206 (h_i \text{ mm})^{0,45} E_{i-1}$, donde E_{i-1} es el módulo de la capa inferior.
- El módulo dinámico de la carpeta asfáltica se calculó mediante el método propuesto por la Shell. Se consideraron los asfaltos producidos por Barrancabermeja y el tipo de mezcla Shell fue el S1F1-50. El valor de dicho módulo se estimó en 7.200 Kg/cm².
- El esfuerzo vertical admisible de compresión aplicado sobre la subrasante se calculó con base en dos criterios:

$$O'_{adm} (\text{Kg/cm}^2) = 0,007 E_s / 1 + 0,7 \text{ Log } N_{8,2t}; E_s = \text{Módulo Resiliente Subrasante}$$

$$O'_{adm} (\text{Kg/cm}^2) = 0,9607 \text{ CBR}^{1,2} / N_{8,2t}^{0,229}; (\text{CRR de Bélgica})$$

- La deformación unitaria máxima admisible de tracción en la fibra inferior de las capas asfálticas se obtuvo con la siguiente fórmula:

$$\epsilon_{tadm} = 4,88 * 10^{-3} * N^{-0,1626}; N = \text{Número de repeticiones en laboratorio.}$$

$$N = N_{8,2t} / 10.$$

- Otro criterio que se tuvo en cuenta fue la deflexión admisible y el radio de curvatura. La deflexión admisible considerada fue de 1 mm. Para cada una de las alternativas diseñadas se verificó que las deformaciones y esfuerzos obtenidos no sobrepasaran los valores admisibles. Un criterio comúnmente aceptado dice que el radio de curvatura debe ser preferiblemente superior a 80 m. Este criterio no se cumple en el diseño. La manera de aumentar el radio de curvatura hasta mínimo dicho valor, sería aumentando el espesor de la carpeta de 7,5 cm hasta 10 cm, lo cual no se considera necesario en este caso.

4. Diseño propuesto

Debido a que el alineamiento del Proyecto al momento de iniciar la construcción se modificó, la necesidad de obras de drenaje, hidráulicas, etc. no contempladas se aumentó. Esta situación afectó el cumplimiento de las metas físicas del contrato al modificarse considerablemente las cantidades de obra. Con el fin de balancear en lo posible, la Gerencia de la obra realizó una revisión al diseño preliminar con el fin de proponer una estructura más económica a partir del conocimiento racional de las características mecánicas de los materiales granulares no tratados. Para el nuevo diseño, la Supervisión del Proyecto autorizó la realización de ensayos específicos, que se relacionan a continuación:

- Los módulos resilientes de la Subrasante (OGA), Base y Subbase granular, así como el material de OGA (afirmado), se calcularon en laboratorio mediante ensayos en cámara triaxial y aplicación de desviadores con confinamiento constante y variable (ECV), norma I.N.V.E.-156. La humedad utilizada en el ensayo es similar a la calculada en el Proctor Modificado al porcentaje de compactación requerido. La expresión para el Módulo Resiliente en suelos granulares se presenta de la siguiente forma:

$M_r = K_1 * \theta^{K_2}$; siendo θ = suma de los esfuerzos principales, suministrados por el Depav a partir de espesores aplicados en la estructura. Como es conocido, el comportamiento de los materiales no tratados presenta una relación esfuerzo-deformación no-lineal. Por tal motivo se utilizó para el cálculo de los Módulos elásticos, el modelo $K\theta$, (Brown & Pell-1967; Hicks & Monismith-1971). El ensayo sobre la OGA se realizó con confinamiento constante.

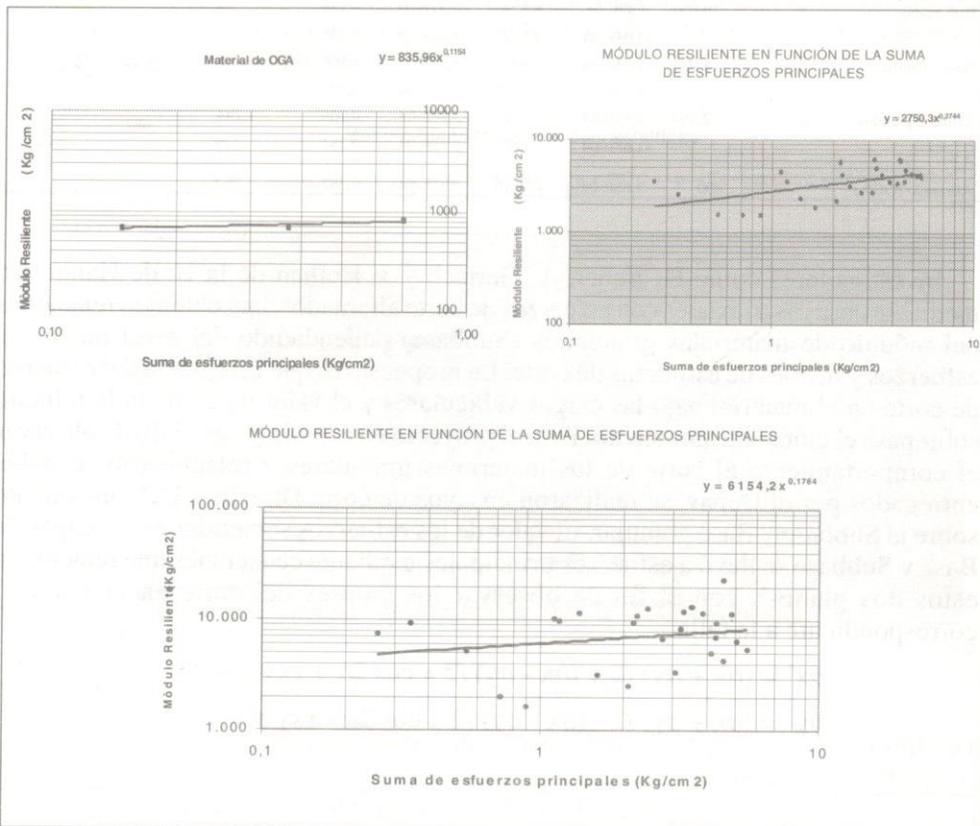
- El Módulo Dinámico de la carpeta asfáltica se realizó en laboratorio, mediante ensayos cíclicos, utilizando las frecuencias y temperaturas definidas en la norma INV E-754. Igualmente se realizó el ensayo de Fatiga a la mezcla asfáltica con probetas prismáticas mediante norma NFP-98-260.

5. Metodología Racional para el ajuste al diseño preliminar

Los criterios verificados para pavimentos flexibles con materiales granulares no tratados fueron:

- Deformación relativa vertical e_z en la parte superior de la plataforma soporte del pavimento.
- Deformación relativa de tracción por flexión en la base de las capas de materiales tratados con ligantes asfálticos e_t .
- En la actualización de la normativa técnica y las especificaciones generales de construcción del INVIAS, Resolución 2662/2002, consideran conveniente comparar la resistencia de cada capa afectada (s_z) con el esfuerzo máximo vertical impuesto por las cargas de tránsito a la misma profundidad.

Se enviaron al laboratorio de la Universidad de los Andes, muestras de material granular tanto de OGA, de Subbase, Base granular y mezcla asfáltica. Los resultados de los ensayos a los diferentes materiales granulares no tratados se muestran a continuación.



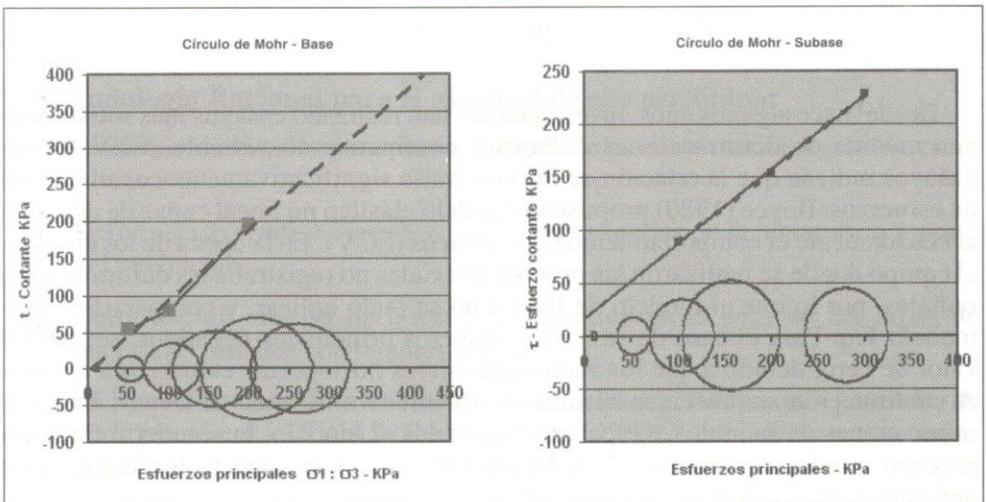
Desde⁵ hace algunos años, investigadores han realizado ensayos más sofisticados con medida de deformaciones radiales y confinamiento variable (ECV). Estos ensayos indican que la relación de Poisson varía significativamente con el camino de esfuerzos. Boyce (1980) propuso un modelo elástico no lineal capaz de describir adecuadamente el comportamiento bajo ensayos (ECV). En la época de los ensayos, el equipo donde se realizaron las pruebas triaxiales no registraba las deformaciones radiales, por lo que el modelo de Boyce no se pudo aplicar, y compararlo con el modelo **Kq**. Para el caso de suma de esfuerzos principales negativos, se toma el valor de cero, debido a que los suelos granulares no soportan esfuerzos a tensión. A continuación se presentan resultados obtenidos utilizando el Depav, luego de reiteraciones de módulos y espesores aplicados al modelo, buscando al final qué proceso conduzca a una sección típica confiable que soporte los esfuerzos y deformaciones finales.

| | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|---------|--------------------|-----------|----------------|-----------|-------------------|-------------------------------------|----------|----------|
| Radio de Carga = | 10,7 | cm | | | | | | | |
| Presión de contacto = | 5,56 | Kg/cm ² | | | | deflexión= | 36,01 | mm/100 | |
| Distancia entre ejes de llantas = | 37,50 | cm | | | | Radio Curvatura = | 278,97 | m. | |
| | (cm) | (Kg/cm2) | | | | (Kg/cm2) | (Kg/cm2) | Y | (Kg/cm2) |
| CAPAS | Espesor | E | εt | σ _t | εz | σ _z | Y=σ _t + 2*σ _z | Promedio | Mr |
| Pavimento | 7 | 10.000 | 2,49E-04 | 6,628 | -9,21E-05 | 5,598 | | | |
| | | | -1,04E-04 | 1,081 | -5,99E-05 | 4,507 | | | |
| Base granular | 20 | 8.000 | -1,04E-04 | 1,835 | -8,20E-05 | 4,507 | 10,849 | 5,425 | 8,261 |
| | | | -1,69E-04 | -1,519 | 2,23E-04 | 0,705 | ,0 | | |
| Subbase granular | 20 | 2.500 | -1,69E-04 | -0,166 | 3,14E-04 | 0,705 | 1,244 | ,682 | |
| | | | -1,68E-04 | -0,455 | 2,49E-04 | 0,287 | ,119 | | 2,449 |
| Afirmado (OGA) | | 800 | -1,68E-04 | -0,0110 | 3,32E-04 | 0,287 | ,563 | | |

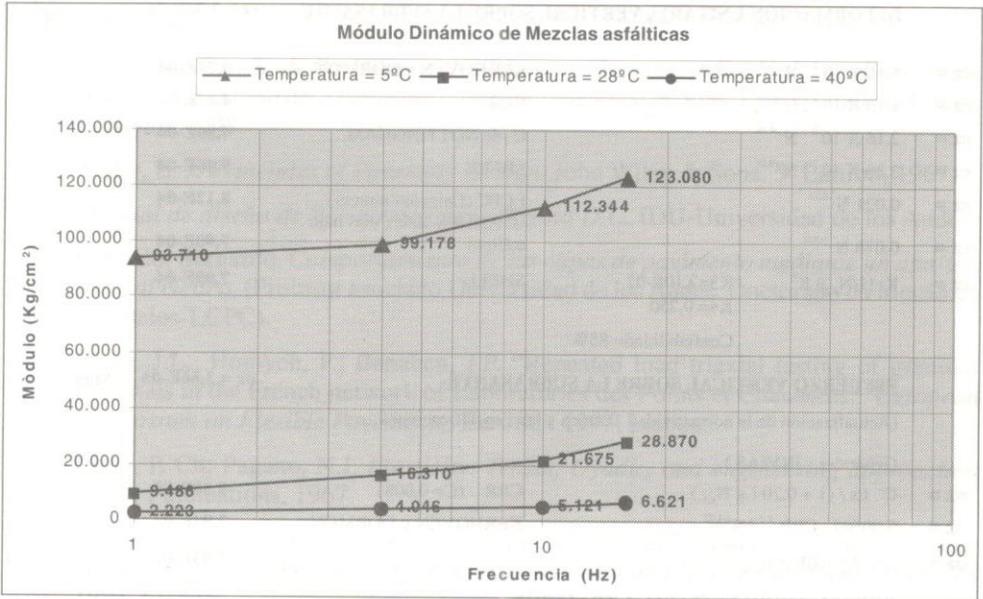
Investigadores como H. Beber, A. Gerlach y J. Hothan de la U. de Hannover, mediante ensayos triaxiales con esfuerzos de corte alternados, han obtenido relaciones del módulo de materiales granulares (Subbase) dependiendo del nivel medio de esfuerzos y niveles de esfuerzos de corte. La propuesta es que la relación del esfuerzo de corte en el material bajo las cargas vehiculares y el valor de corte en la falla no sobrepase el cincuenta por ciento. Para el proyecto en estudio y con el fin de observar el comportamiento al corte de los materiales granulares y relacionarlos con los entregados por el Depav, se realizaron ensayos de corte Directo – UU únicamente sobre la Subbase y Base granular. El valor de los esfuerzos sometidos de las capas de Base y Subbase se llevó a esfuerzos principales mediante ecuaciones que relacionan estos dos planos⁶, con el fin de observar los valores del corte en la vía y el correspondiente a la falla.

$$\sigma' = (\sigma + \sigma_y) / 2 + (\sigma - \sigma_y) / 2 \times \cos 2\alpha + \tau xy \operatorname{sen} 2\alpha$$

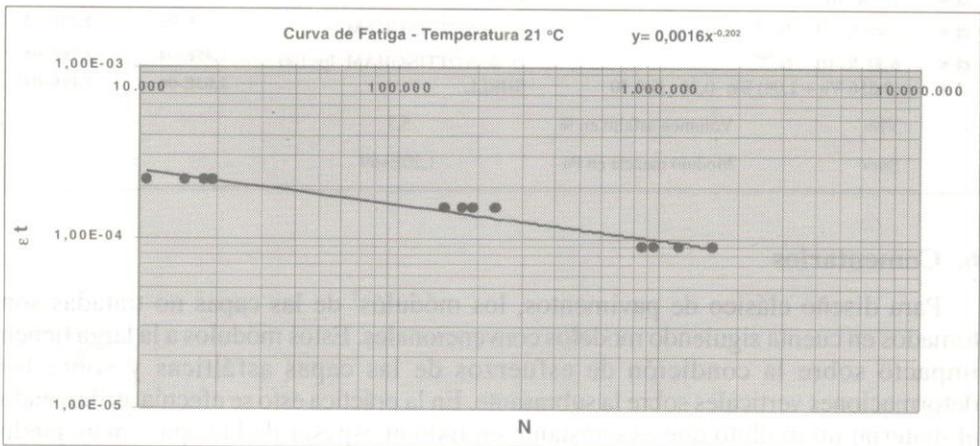
$$\sigma_y' = (\sigma + \sigma_y) / 2 - (\sigma - \sigma_y) / 2 \times \cos 2\alpha - \tau xy \operatorname{sen} 2\alpha$$



Los resultados del módulo dinámico sobre la mezcla asfáltica mostraron que el valor del módulo a 30°C y una frecuencia de 10Hz es de 10.000 Kg/cm². Esta mezcla no cumplió el ensayo de inmersión-compresión. Una vez propuesta una nueva mezcla (no se le realizó ensayo de módulo dinámico) se incluyó dentro del Depav un valor similar. Además se realizó el ensayo de fatiga para una mezcla con las mismas condiciones de la mezcla asfáltica bajo deformaciones controladas. Se relacionan los valores en la siguiente tabla:



Por último se dibuja la curva de Fatiga para el mismo tipo de material utilizado para el módulo dinámico, ensayo realizado sobre doce probetas prismáticas, de acuerdo a la norma técnica de referencia: NFP-98-260.



La curva de fatiga corresponde a un material cuyo ensayo de inmersión-compresión no cumplió. El Contratista rediseño la mezcla, pero no fueron realizados ensayos adicionales para verificar módulo y fatiga. A continuación se presenta un resumen sobre las admisibilidades tanto de los esfuerzos como de las deformaciones indicadas en el punto 5 para el nuevo diseño.

| <u>DEFORMACIÓN UNITARIA VERTICAL SOBRE LA SUBRASANTE</u> | | | $\epsilon z = 3,32E-04$ | |
|---|--|-----------------------------------|---------------------------|----------|
| $\epsilon z =$ | $1,16 \times 10^{-2} \cdot N^{-0,21}$ | KERHOVEN y DORMON | 6,74E-04 | |
| $\epsilon z =$ | $1,10 \times 10^{-2} \cdot N^{-0,23}$ | CRR | 4,87E-04 | |
| $\epsilon z =$ | $2,16 \times 10^{-2} \cdot N^{-0,28}$ | U. de NOTTINGHAM | 4,86E-04 | |
| $\epsilon z =$ | $2,80 \times 10^{-2} \cdot N^{-0,25}$ | SHELL | 9,46E-04 | |
| $\epsilon z =$ | $0,021 N^{-0,24}$ | LCPC (Calzadas nuevas) | 8,12E-04 | |
| $\epsilon z =$ | $0,016 N^{-0,222}$ | U. ANDES-IDU (Vías bajo tráfico) | 7,90E-04 | |
| $\epsilon z =$ | $K_1 (1/N_{k,2}) K^4$ | K3=2,10E-02 K4= 0,250 SHELL | 7,09E-04 | |
| Confiabilidad= 85% | | | | |
| <u>ESFUERZO VERTICAL SOBRE LA SUBRASANTE</u> | | | $\sigma z = 2,86E-03$ Mpa | |
| (Actualización de la normatividad Técnica y las Especificaciones Generales - INVIAS) | | | | |
| $\sigma z =$ | $C \cdot Es / (1 + 0,70 L_g N_{k,2,1})$ | CRR (C= 0,008) | 9,38E-02 | |
| $\sigma z =$ | $0,09607 \cdot CBR^{1,2} / N^{0,35}$ | KERHOVEN y DORMON | 2,94E-02 | |
| $\sigma z =$ | $0,077 * CBR * N_{k,2}^{-0,138}$ | | 5,93E-02 | |
| <u>DEFORMACIÓN UNITARIA A TRACCIÓN</u> | | | | |
| Ley de Fatiga: $\epsilon t = 0,0016 \cdot N^{-0,2023}$ | | ϵt DEPAV= 1,65 E-04 | | |
| | | $N = 7,68E+04$ | $N = 7,43E+05$ | |
| $\epsilon t =$ | $1,6 \times 10^{-3} \cdot N^{-0,21}$ | CRR | 9,36E-05 | 1,51E-04 |
| $\epsilon t =$ | $3,48 \times 10^{-3} \cdot N^{-0,04}$ | U. de NOTTINGHAM | 2,03E-03 | 2,22E-03 |
| $\epsilon t =$ | $6,81 \times 10^{-3} \cdot N^{-0,285}$ | U. de NOTTINGHAM $I_p=100$ | 1,45E-04 | 2,76E-04 |
| $\epsilon t =$ | $(0,856 V_b + 1,08) S_m^{-0,36} \cdot N^{-0,20}$ | SHELL | 2,03E-04 | 3,19E-04 |
| $V_b =$ | Volumen asfalto en % | 5,3 | | |
| $S_m =$ | Módulo mezcla en Pa | 1,20E+09 | | |

6. Comentarios

Para diseño clásico de pavimentos, los módulos⁷ de las capas no tratadas son tomados en cuenta siguiendo modelos convencionales. Estos módulos a la larga tienen impacto sobre la condición de esfuerzos de las capas asfálticas y sobre las deformaciones verticales sobre la subrasante. En la práctica esto se efectúa atribuyendo al material un módulo que es constante en todo el espesor de la capa o manejando

relaciones de rigideces que dependen del suelo de fundación. Como se comentó anteriormente, estudios de laboratorio han mostrado un comportamiento no lineal; por lo tanto, cualquier modelo estructural que incluya estos materiales debería ser desarrollado a través de diferentes modelos. Los materiales a través de los ensayos anotados muestran su comportamiento esfuerzo-deformación ante cargas vehiculares. Al tomar parámetros de diseño con base en fórmulas preestablecidas a lo largo de una o varias capas, podrían llegar a estructuras sub o sobre dimensionadas.

7. Referencias

1. *Manual de Diseño de Pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito*. Ministerio del Transporte – Instituto Nacional de Vías, Universidad del Cauca. Popayán, 1998.
2. Yoder, E. J. *Principles of Pavement Design*. John Wiley & Sons. 5ª Edition, 1967.
3. *Manual de diseño de Pavimentos para Bogotá D.C.* IDU-Universidad de los Andes.
4. Caicedo, Bernardo. *Comportamiento de las capas de pavimento mediante un aparato triaxial cíclico*. (Profesor asociado Universidad de los Andes. Doctorado en Mecánica de Suelos-LCPC).
5. Paute, J.L.; Homych, P.; Benaben, J.P. “Repeated load triaxial testing of granular materials in the French network of Laboratories des Points et Chaussées”. *European Symposium on Flexible Pavements*. Euroflex 1993, Lisboa.
6. Chou, P. Ch; Pagano, N.J. *Elasticity: Tensor, Dyadic, and engineering approaches*. Dover Publications, 1967.
7. Boissoudy, A. de. “Introducing the nonlinearity of the granular material in routine analytical pavement design”. *European Symposium on Flexible Pavements*. Euroflex 1993, Lisboa.