



**DESARROLLO DE LEYES DE FATIGA PARA  
BASES ESTABILIZADAS CON CEMENTO  
(INFORME DE AVANCE)**

**Investigador principal:  
Ing. Fabricio Leiva**

**Investigador Asociado:  
Ing. Mario Arce**

**Colaboración hasta Febrero 2004:  
Ing. Pedro Castro**

Julio 2005

# **DESARROLLO DE LEYES DE FATIGA PARA BASES ESTABILIZADAS CON CEMENTO**

## **1. INFORMACIÓN DE REFERENCIA**

Bases tratadas con cemento han sido usadas en miles de kilómetros de carreteras de importancia estratégica, al igual que en calles de menor importancia, caminos de bajo volumen de tránsito y áreas de parqueo. Más recientemente, el tratamiento con cemento ha sido efectivo en reciclaje y reconstrucción de viejos pavimentos, o pavimentos que soportan cargas pesadas provenientes de vehículos industriales.

Muchos de los pavimentos con bases estabilizadas con cemento tienen capas de base con un espesor aproximado de 150 mm, el cual es adecuado para caminos secundarios y calles residenciales. En tanto que un de base estabilizada con cemento entre 175 a 200 mm suele ser aplicado en caminos primarios y caminos secundarios de alto tránsito. Espesores de 230 mm o mayores están siendo usados para soportar vehículos pesados.

### **1.1. TIPOS DE MEZCLAS QUE INCORPORAN CEMENTO**

Un material granular o suelo tratado con cemento es aquel al cual se le ha agregado cemento y agua para mejorar sus cualidades naturales y hacerlo más estable (mayor capacidad de soporte). Aunque hay varios tipos de materiales tratados con cemento, existen dos categorías principales asociadas con la construcción de carreteras:

- Material estabilizado con cemento.
- Material mejorado con cemento.

Una estabilización con cemento se refiere a una mezcla de suelo o agregado pulverizado, cemento Pórtland y agua, el cual, debido a la hidratación, se convierte en un material de pavimento fuerte y durable. Contiene suficiente cemento (usualmente mayor al 3% por peso de suelo) para pasar las pruebas de durabilidad y suficiente humedad para obtener una densidad seca máxima dando como resultado un incremento significativo en la resistencia mecánica. El suelo-cemento es ocasionalmente conocido como base tratada con cemento o agregado estabilizado con cemento.

El material mejorado con cemento contiene menos cantidad de cemento que la estabilización, dando como resultado mezclas menos resistentes. Típicamente hay un mejoramiento en las propiedades de la subrasante, como reducir el límite líquido o incrementar el límite plástico.

## **1.2. MATERIALES ADECUADOS PARA LA ESTABILIZACION CON CEMENTO**

Un amplio rango de tipos de suelos puede ser estabilizado con cemento. El tratamiento de materiales granulares, tal como arena o grava, sin embargo, es generalmente mas efectivo y económico, facilitando la pulverización, el mezclado y aplicación de cantidades menores de cemento. Materiales granulares finos, de baja a media plasticidad pueden ser estabilizados también, pero no de la forma tan efectiva como los materiales de grano grueso. Si el índice plástico excede alrededor de 30%, es difícil el mezclado del cemento con el agregado o suelo. Generalmente en este caso se agrega cal para reducir el Índice Plástico y mejorar la trabajabilidad antes de adicionar el cemento.

Un agregado o suelo puede ser ácido, neutral, o alcalino y responder bien al tratamiento con el cemento. Aunque ciertos tipos de materiales orgánicos pueden retardar la hidratación y reducir la resistencia. Si el pH de una mezcla en proporción 10:1 (por peso) de suelo y cemento, es de 12.1, 15 minutos después del mezclado, es probable que el material orgánico, si está presente, no interferirá con el proceso de endurecimiento normal.

Aunque la susceptibilidad al sulfato es conocida por tener un efecto adverso en la calidad del concreto endurecido, no es muy conocido su efecto en los materiales estabilizados con cemento. Si embargo, sí se sabe que los materiales granulares tratados con cemento no aparentan tener susceptibilidad al ataque del sulfato. También se sabe que el uso de cementos resistentes al ataque del sulfato pueden ser efectivos en materiales granulares tratados con cemento expuestos a suelos adyacentes y/o aguas subterráneas con altas concentraciones de sulfato.

## **1.3. PROPIEDADES TIPICAS DE LOS MATERIALES ESTABILIZADOS CON CEMENTO**

Las estabilizaciones con cemento han sido fácilmente divididas en dos grupos:

- Granular: materiales menos cohesivos y gruesos (AASHTO: A-1, A-2 y A-3).
- Grano fino: suelos cohesivos (AAHSTO: A-4, A-5, A-6 y A-7).

Las propiedades de materiales estabilizados con cemento dependen, en gran forma de la densidad, contenido de agua y presión de confinamiento.

### **1.3.1. Características de compactación:**

La adición de cemento generalmente causa un cambio en el contenido óptimo de agua y en la densidad máxima seca para un esfuerzo de compactación dado. La acción floculadora del cemento tiende a determinar un incremento en el contenido óptimo de agua y un decremento en la máxima densidad, al igual que la alta gravedad específica del cemento no hidratado tiende a producir densidades más altas.

### 1.3.2 Resistencia:

La resistencia de una estabilización con cemento puede variar desde menos de 10 psi a más de 2000 psi (de 1 a 15000 kPa), dependiendo de factores como tipo de material, contenido de cemento, y condiciones de curado. En general las mayores resistencias están asociadas con mezclas preparadas con agregados poco cohesivos; a menos plasticidad del suelo, menos es la deformación requerida para la falla.

### 1.3.3 Resistencia a la compresión:

La resistencia a la compresión inconfiada es probablemente la forma más viable para medir la efectividad de la estabilización con cemento. Esta puede ser tan baja como 200 psi (1400 kPa) para un material estabilizado con cemento de grano fino.

La resistencia a la compresión del material estabilizado con cemento, al igual que la del concreto hidráulico varía con el tiempo. Se ha encontrado una relación entre la resistencia y el tiempo de curado para el material estabilizado, de la siguiente forma:

$$UC_d = UC_{d_0} + K \cdot \text{Log} \left( \frac{d}{d_0} \right)$$

Donde:

- UC<sub>d</sub>: resistencia a la compresión inconfiada en "psi" en un tiempo de "d" días.
- UC<sub>d<sub>0</sub></sub>: resistencia a la compresión inconfiada en "psi" en un tiempo de "d<sub>0</sub>" días.
- K: 70 °C para suelos granulares y 10 °C para suelo fino.
- C: contenido de cemento en porcentaje por peso.

Se aplica por lo general un valor de 1.5 veces la resistencia a los 7 días para obtener la resistencia a los 28 días de un material estabilizado con cemento.

### 1.3.4 Resistencia a la flexotracción:

Ensayos de flexión de vigas (flexo-tracción) y ensayos de tensión indirecta han sido usados para evaluar la resistencia a la tensión. El resultado de varios estudios ha indicado que la resistencia a flexión es de 20 a 33 por ciento de la resistencia a la compresión inconfiada. Una buena aproximación para obtener la resistencia a la flexión es la siguiente:

$$f = 0.51 \cdot (UC)^{0.88}$$

Donde:

- f : resistencia a la flexión en "psi".
- UC: resistencia a la compresión inconfiada en "psi".

### 1.3.5 Relaciones de esfuerzo/deformación unitaria:

En general, la relación esfuerzo-deformación para materiales estabilizados con cemento es no lineal y depende del esfuerzo. Sin embargo, para muchos materiales y niveles de tratamiento, y dentro de limitados rangos de carga, el material puede ser considerado como una relación lineal elástica bajo cargas repetidas.

El módulo de deformación puede variar entre 10000psi (70000 kPa) hasta varios millones de "psi", dependiendo del tipo de material, nivel de tratamiento, tiempo de curado, contenido de agua y condiciones del ensayo.

Mas allá de un número grande de repeticiones de carga (comportamiento resiliente), en un rango de unos pocos cientos de "psi" a 10000 "psi", el módulo resiliente en compresión puede ser determinado con la expresión siguiente:

$$M_r = K_c \cdot (\sigma_1 - \sigma_3)^{-k_1} \cdot (\sigma_3)^{k_2} (UC)^n$$

Donde:

- $M_r$ : módulo resiliente, psi.
- UC: resistencia a la compresión inconfiada, psi.
- $(\sigma_1 - \sigma_3)$ : esfuerzo desviador, psi.
- $\sigma_3$ : presión de confinamiento, psi.
- $K_c$ : constante del material.
- $K_1$ : varia entre 0.2 a 0.6.
- $K_2$ : varia entre 0.25 a 0.7.
- $n$ :  $1.0 + 0.18C$
- C: contenido de cemento en porcentaje por peso.

Si la presión de confinamiento no ha tenido efecto, del ensayo de viga se tiene:

$$M_r = K_f \cdot (10)^{m \cdot UC}$$

Donde:

- $M_r$ : módulo resiliente, psi.
- UC: resistencia a la compresión inconfiada, psi.
- $K_f$ : constante del material obtenida por regresión.
- $m$ :  $0.04 \cdot (10)^{-0.186 \cdot C}$
- C: contenido de cemento en porcentaje por peso.

### 1.3.6 Razón de Poisson:

Para niveles de esfuerzo habituales de servicio en bases y sub-rasantes tratadas con cemento, la razón de Poisson se encuentra en un rango de 0.1 a 0.2 para materiales granulares, y en un rango típico de 0.15 a 0.35 para suelos de grano fino.

La Federación de carreteras de Estados Unidos establece en el manual de estructuras estabilizadas los siguientes rangos de valores para varios materiales estabilizados:

<u>Material</u>	<u>Razón de Poisson</u>
Grava-cemento	0.15 a 0.20
Suelo-Cemento	0.15 a 0.35

### 1.3.7 Fatiga:

Materiales estabilizados con cemento son susceptibles a la falla por fatiga dada una aplicación repetitiva de esfuerzo. Fatiga en flexión es de gran interés por la relevancia de dicho tipo de deterioro con la falla funcional y/o estructural del pavimento. Algunas observaciones concernientes a fatiga de materiales estabilizados con cemento son:

- La vida a la fatiga es más corta bajo esfuerzos de tensión directa que en compresión.
- La fatiga por flexión se ve reducida muy significativamente por niveles de esfuerzo menores al 50% de la resistencia a flexión.
- La fatiga por flexión puede relacionarse con el radio de curvatura de acuerdo a:

$$\frac{R_C}{R} = aN^{-b}; \quad a = \frac{h^{2/3}}{2.1h-1}; \quad R = \frac{a^2}{2 \times (y_1 - y_a)}$$

Donde:

$R_C$ : radio de curvatura crítico (bajo carga estática)  
 $R$ : radio de curvatura hacia la falla bajo  $N$  número de aplicaciones.  
 $h$ : espesor de la capa cementada.  
 $b$ : 0.025 para grava cemento y 0.050 para suelo cemento.  
 $N$ : número de aplicaciones para la falla.  
 $a$ : Radio del área cargada en mm.  
 $y_1$ : Deflexión en el centro del área cargada en mm.  
 $y_a$ : Deflexión en el borde del área cargada en mm.

- Una relación generalizada permite analizar el comportamiento de fatiga bajos repetidos cambios en los esfuerzos principales ( $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ ). El factor de esfuerzo  $F$  se define como:

$$F = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{8(\sigma_1 + \sigma_3)} \quad \text{Para } \sigma_1 + \sigma_3 > 0$$

$$F = -\sigma_3 \quad \text{Para } \sigma_1 + \sigma_3 < 0$$

Esfuerzos de tensión repetidos causan un progresivo decremento en la resistencia a la tensión inicial  $T_i$ . Cuando la resistencia tiende a  $F$ , se inicia el agrietamiento. Una relación entre  $F_{\max}/T_i$  y el número de repeticiones  $N$  para la falla a los 28 días.

$$\frac{F_{\max}}{T_i} = 1.0 - 0.0858 \log(N)$$

Cuando se utiliza el método mecanístico para el análisis y diseño de pavimentos, y se consideran las capas de una estructura semi-rígida adheridas, los criterios de falla por fatiga en la capa de rodamiento dejan de ser críticos y, en su lugar, los criterios de falla por fatiga en la capa estabilizada son los que dominan el diseño.

En lo que respecta a la falla por fatiga de materiales cementados, la teoría establece que, de cumplirse que la relación entre el esfuerzo a la tensión en la fibra inferior de la capa estabilizada y el esfuerzo de la ruptura por flexotracción del material tenga un valor entre 0.5 y 0.6 la capa puede soportar infinito número de pasadas de la carga que da origen a la tensión en la fibra inferior.

Lo anterior es resultado de la evaluación experimental en forma directa de la fatiga, en probetas de 10 x 10 x 40 cm, con carga en los tercios medios. Por otro lado esta evaluación ha dado como resultado leyes de fatiga que se aplican para cualquier relación de esfuerzos iguales o menores que 0.5 (en algunos casos inclusive igual o menor a 0.9 – 1.0).

Diversos autores han propuesto diversas leyes de fatiga para materiales cementados, entre los cuales se puede mencionar:

1. Guía de diseño de pavimentos australiana:

$$N = \left[ \frac{11266 / E^{0.804} + 190.7}{\varepsilon} \right]^{12}$$

Donde:

N: número de repeticiones de ejes equivalentes (8.2 Ton) para la falla.

E: módulo del material cementado, en MPa, a los 28 días.

$\varepsilon$ : Deformación tensional en la fibra inferior de la capa cementada.

2. Dirección General de carreteras de España:

Para suelo cemento:  $S_r = 1 - 0.0875 \log(N) \cdot R_f$

Para grava cemento:  $S_r = 1 - 0.0723 \log(N) \cdot R_f$

Donde:

N: número de repeticiones de ejes de 13 Ton.

$S_r$ : tensión de tracción en la fibra inferior a la capa cementada, en MPa.

$R_f$ : resistencia a la flexotracción del material, en MPa.

3. Centro Sur Africano de Investigaciones y desarrollo:

$$N = 10^A \left[ 1 - \frac{\varepsilon}{B \cdot \varepsilon_b} \right]$$

Donde:

N: número de repeticiones de ejes de 8.0 Ton.

$\varepsilon$ : Deformación tensional en la fibra inferior de la capa cementada.

$\varepsilon_b$ : deformación tensional de ruptura a la flexotracción del material.

A y B: son factores que dependen de la categoría de la carretera:

Autopistas y carreteras interurbanas: 95% de confianza, A = 6.72 y B = 7.49.

Colectores interurbanos y carreteras rurales principales: 90% de confianza, A = 6.84 y B = 7.63.

Carreteras rurales: 80% de confianza, A = 6.87 y B = 7.66.

Carreteras de bajo tránsito: 50% de confianza, A = 7.06 y B = 7.86.

## 4. Guía francesa para el dimensionamiento de pavimentos:

$$\frac{\sigma}{\sigma_o} = 1 - \frac{\log N}{a}$$

Donde:

N: número de repeticiones de ejes equivalentes (8.2 Ton) para la falla.

$\sigma$ : Tensión producida en la fibra inferior de la capa cementada producida por una carga de eje equivalente de 8.2 Ton.

$\sigma_o$ : Resistencia de ruptura por flexotracción a los 360 días.

a: coeficiente de ajuste, depende del material y varía entre 12 y 15.

## 5. Centro de estudio de carreteras CEDEX en España:

$$\sigma_r = 0.5446R_f \left( \frac{N}{10^6} \right)^{-1/12} \quad \text{Para suelo cemento.}$$

$$\sigma_r = 0.5144R_f \left( \frac{N}{10^6} \right)^{-1/12} \quad \text{Para grava cemento.}$$

Donde:

$\sigma_r$ : tensión radial en la fibra inferior de la capa cementada, en MPa.

Rf: resistencia a la flexotracción de base, a los 90 días (igual al 30% de la resistencia a la compresión confinada a los 7 días).

N: número de repeticiones de ejes de 13 Ton.

## 6. Metodología de la NCHRP (desarrollada en Illinois):

$$N = 10^{\frac{[(0.972\beta c1 - \sigma_r / Mr)]}{0.0825\beta c2}}$$

Donde:

N: número de repeticiones de ejes equivalentes (8.2 Ton) para la falla.

$\sigma_r$ : esfuerzo de tensión en la fibra inferior de la capa.

Mr: módulo de ruptura (esfuerzo a flexotracción) del material, a los 28 días.

$\beta c1$  y  $\beta c2$ : factores de calibración.

## 7. Método IECA para materiales reciclados con cemento:

$$\sigma_r = 0.55R_f (N/10^6)^{-1/12}$$

Donde:

$\sigma_r$ : esfuerzo de tensión en la fibra inferior de la capa, en MPa.

Rf: resistencia a la flexotracción a los 28 días.

N: número de ejes de 130 kN para producir la falla.



8. Metodología desarrollada por el Departamento de ingeniería de Transportes de Sao Paulo, Brazil (José T. Balbo).

$$\frac{\sigma_n}{\sigma_o} = 0.871 - 0.054 \log N$$

Donde:

$\sigma_n$ : esfuerzo de tensión en la fibra inferior de la capa, en MPa.

$\sigma_o$ : resistencia a la flexotracción a los 28 días.

N: número de ejes de 8.2 ton para producir la falla.

### 1.3.8 Contracción

Materiales estabilizados con cemento presentan contracción durante el curado y secado, dependiendo del contenido de cemento, tipo de material, contenido de agua, grado de compactación y condiciones de curado. Cierta agrietamiento por contracción debe ser considerado inevitable. Observaciones de campo indican que el agrietamiento puede ser apreciable en espaciamientos que van desde 3 a 6 m. Menores espaciamientos se deben usualmente al alto contenido de arcilla en el suelo.

### 1.3.10 Grietas por fatiga

Cuando se abre el paso de vehículos sobre la estructura de pavimento, se producen en las bases estabilizadas, esfuerzos de tensión interna repetitivos que, cuando se acumulan, pueden superar la resistencia del material con cemento y manifestarse como una fisura. Estas fisuras se producen inicialmente en la parte inferior de las bases estabilizadas o losas de concreto, y con el tiempo llegan a la parte superior.

La razón de agrietamiento es muy compleja, y depende del espesor de la capa, de su resistencia mecánica, que a su vez depende del contenido de cemento, de las características de los agregados, del proceso de curado, etc.

Un aspecto que parece crítico asociado con el tránsito del proyecto sobre las estructuras con cemento, es el reflejo de las grietas en las capas superiores. Se puede decir que para espesores de carpeta por debajo de los 5.0 cm, la propagación es más rápida y tiende a reflejar el patrón de agrietamiento de la capa tratado con cemento (bloques más o menos cuadrados de 2.5 a 4.5 m de lado). Para espesores gruesos de capa asfáltica, sean 15 a 20 cm, la propagación es muy lenta y el patrón es de grietas transversales separadas de 3 a 9 m de distancia. En Estados Unidos se recomienda espesores mínimos de carpeta de 11.5 cm, en España de 12 a 15 cm y en Francia de 15 a 22.5 cm.

## 1.4. SELECCION DEL CONTENIDO DE CEMENTO

En la Tabla 1 se listan los requerimientos de cemento para varios tipos de materiales clasificados de acuerdo con la AASHTO y el sistema unificado de suelos SUCS. Además se presenta el contenido de cemento al que se deben realizar los ensayos de laboratorio para suelos estabilizados.

**Tabla 1. Requerimientos de cemento para varios tipos de suelo.**

Clasificación AASHTO	Clasificación SUCS	Rango usual de cemento requerido		Contenido estimado de cemento en ensayo de humedad-densidad Porcentaje por peso (%)	Contenido de cemento para ensayo de humecido-secado, y congelamiento y descongelamiento Porcentaje por peso (%)
		Porcentaje por volumen (%)	Porcentaje por peso (%)		
A-1-a	GW, GP, GM, SW, SP, SM	5 a 7	3 a 5	5	3, 5, 7
A-1-b	GM, GP, SM, SP	7 a 9	5 a 8	6	4, 6, 8
A-2	GM, GC, SM, SC	7 a 10	5 a 9	7	5, 7, 9
A-3	SP	8 a 12	7 a 11	9	7, 9, 11
A-4	CL, ML	8 a 12	7 a 12	10	8, 10, 12
A-5	ML, MH, CH	8 a 12	8 a 13	10	8, 10, 12
A-6	CL, CH	10 a 14	9 a 15	12	10, 12, 14
A-7	OH, MH, CH	10 a 14	10 a 16	13	11, 13, 15

**Fuente:** US Department of Transportation; soil and base stabilization and associated drainage consideration; 1992.

Los procedimientos de diseño están dados en el manual de laboratorio para materiales estabilizados con cemento de la Asociación Nacional de Cemento Pórtland (PCA) y por los siguientes ensayos estandarizados ASTM:

- ASTM D 558-82: Ensayo para relación humedad-densidad para materiales estabilizados con cemento.
- ASTM D 559-89: Ensayo de humedecimiento y secado para materiales estabilizados con cemento.
- ASTM D 560-89: Ensayo de congelamiento y descongelamiento para materiales estabilizados con cemento.
- ASTM D 1632-87: Mezcla y curado de materiales estabilizados con cemento; ensayos de compresión y flexión para especímenes de Laboratorio.
- ASTM D 1633-84: Ensayo para resistencia a la compresión de cilindros moldeados de materiales estabilizados con cemento.
- ASTM D 2901-82: Ensayo para contenido de cemento de mezclas frescas de materiales estabilizados con cemento.

## **1.5. PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO PARA LA VALORACION DE MATERIALES ESTABILIZADOS**

### **Nota:**

Las pruebas y procedimientos que a continuación se describen se refieren a la técnica de estabilización en general (cal, cemento, emulsión asfáltica).

Los ensayos de laboratorio para materiales estabilizados son parte integral de los procedimientos de estabilización de suelos y bases (importancia fundamental de la etapa de diseño). Los ensayos son el primer requisito para mostrar si la estabilización es apropiada o no. Muchos de los métodos de diseño, teóricos o empíricos, toman en consideración las propiedades de durabilidad y resistencia de los materiales aplicados en el correspondiente paquete estructural. Las clases generales de ensayos que proveen información útil para la selección y cantidad de estabilizador incluyen:

- Determinación de humedad.
- Determinación de densidad.
- Ensayos de resistencia.
- Ensayos de durabilidad.

### **1.5.1 Determinación de límites de consistencia:**

Los ensayos de límites de humedad son usados para describir la influencia relativa de la humedad en el funcionamiento de un material. Estos son los comúnmente llamados límite líquido (LL), límite plástico (LP), y en índice de plasticidad (IP); descritos en los siguientes ensayos estandarizados:

- ASTM D 4318: límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad.
- AASTHO T 89: Determinación del límite líquido de suelos.
- AASTHO T 90: Determinación del límite plástico e índice de plasticidad de suelos.

### **1.5.2 Determinación de compactación y densidad máxima:**

La apropiada determinación de la densidad en el laboratorio y la habilidad para juzgar la compactación de campo son necesarias para determinar si el nivel apropiado de compactación está siendo alcanzado. La apropiada aplicación de un relevante criterio de compactación provee lo siguiente:

- Establecer el contenido óptimo de humedad y la densidad máxima del material no tratado, los cuales sirven como valores objetivo para la construcción de estabilizaciones.
- Establecer controles de laboratorio para muestras estabilizadas; proveyendo, para condiciones estandarizadas, un criterio para juzgar la efectividad del aditivo en la resistencia bajo condiciones similares.
- Establecer controles de campo para verificar la adecuada construcción y obtener muestras con condiciones apropiadas, permitiendo la estabilización como se planeó en la fase de diseño.

Procedimientos generales de compactación pueden ser encontrados en AASHTO T 99 o AASHTO T 180 (Relación humedad-densidad de suelos). Hay recomendaciones específicas

para la estimación de la densidad húmeda en suelos tratados con cemento en ASTM D 558 y AASHTO T 134 (Relación humedad-densidad de mezclas con cemento).

### **1.5.3 Ensayos para determinar la resistencia mecánica:**

Se cuenta con seis categorías de procedimientos de ensayo para medir la resistencia de suelos estabilizados:

- Ensayos de compresión
- Ensayos de tensión
- Ensayos de elasticidad
- Ensayos de fatiga

#### **1.5.3.1 Ensayos de compresión:**

##### **Triaxial rápido:**

Este ensayo es usado para determinar la resistencia al cortante de un material. Existen correlaciones entre la resistencia al cortante y parámetros de resistencia comúnmente usados, como CBR y el módulo de reacción (k), para uso en ecuaciones empíricas de diseño. La estabilización típicamente produce un substancial incremento en la cohesión, con solamente un menor incremento en el ángulo de fricción.

##### **Compresión inconfiada**

El ensayo de compresión inconfiada es similar al ensayo de compresión triaxial, con la excepción de que no se aplica presión de confinamiento. Los especímenes de ensayo miden típicamente 101.6 mm de diámetro y 203.2 mm de altura. La resistencia a la compresión inconfiada se obtiene dividiendo la máxima carga aplicada por el área de la sección transversal donde es aplicada la carga.

Ensayos de compresión inconfiada son típicamente desarrollados en un tiempo específico, dependiendo de la preparación de la muestra y el tiempo de curado, por lo que se tienen diferentes especificaciones, mencionadas a continuación.

- ASTM D 1633: Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo-cemento.
- ASTM D 2166: Resistencia a la compresión inconfiada de suelos cohesivos.
- AASHTO T 208: Resistencia a la compresión inconfiada de suelos cohesivos.

#### **1.5.3.2. Ensayos de Tensión:**

##### **Tensión indirecta:**

El ensayo de tensión indirecta es el método más comúnmente aplicado para determinar la resistencia a la tensión de materiales estabilizados. El ensayo consiste en la aplicación de carga de compresión de forma constante a lo largo del plano diametral del espécimen hasta que se fractura. La carga aplicada genera, un esfuerzo uniforme de tensión perpendicular a lo largo del plano diametral, donde generalmente ocurre la fractura. Las especificaciones para este ensayo están dadas en el ASTM C 496: Resistencia a la tensión indirecta de cilindros de concreto.

$$f_t = \frac{2P}{\pi DL}$$

Donde:

$f_t$ : resistencia a la tensión.

P: carga última para producir la falla

D: diámetro del cilindro

L: altura del cilindro.

### **Resistencia a la flexión:**

Este ensayo puede ser desarrollado aplicando el procedimiento de carga en los tercios medios (ASTM C 78: Resistencia a la flexión del concreto), o el procedimiento de el punto central de carga (ASTM C 293: Resistencia a la flexión del concreto).

Normalmente se usan vigas de 152 x 152 x 508 mm obtenidas a partir de una dosificación de diseño con un período de curado específico.

La técnica de carga preferida para ensayos de flexión es la de carga en los tercios medios, ya que se obtiene un momento puro, con cortante igual a cero en el tercio central de la viga. La falla ocurre en el punto más débil dentro de la sección media de la viga. En el procedimiento del punto central se obliga a la falla en la proximidad del punto de aplicación de la carga (punto de máximo momento flexor), dando como resultado mayores resistencias aparentes.

El resultado de varios estudios han indicado que la resistencia por flexión se encuentra entre 1/5 y 1/3 de la resistencia por compresión inconfiada. Una buena aproximación puede ser la siguiente ecuación:

$$f = 0.51 \cdot (UC)^{0.88}$$

Donde:

f : resistencia a la flexión en "psi".

UC: resistencia a la compresión inconfiada en "psi".

### **1.5.3.3. Ensayo de fatiga:**

Fatiga es el fenómeno de agrietamiento o fractura bajo esfuerzos repetitivos, con magnitudes menores a la resistencia por tensión del material. El ensayo de flexión de vigas es el más apropiado para examinar la resistencia al agrietamiento por fatiga.

### Ensayo de flexión de vigas:

Típicamente se preparan especímenes de 89 x 89 x 381 mm para ser colocados en el dispositivo, y ensayados tanto con cargas cíclicas en el punto central o en los tercios medios de la viga. Cargas cíclicas con función haversiana se aplican a la viga, con 0.1 segundos de duración y 0.4 segundos de reposo para completar el periodo. Una carga aproximada del 10% de la usada para deflectar el espécimen es aplicada para devolver la viga a su posición original. Debido al progresivo daño de la viga, su rigidez decrece con la aplicación de cargas, y la rigidez es calculada mediante la siguiente ecuación:

$$E_s = P \cdot a \cdot \left( \frac{3 \cdot L^2 - 4 \cdot a^2}{48 \cdot I \cdot \delta} \right)$$

Donde:

Es: rigidez por flexión, psi.

P: carga dinámica aplicada para deflectar la viga, lb.

a:  $0.5(L-4)$ , in.

L: distancia entre soportes (luz), in.

I: Momento de inercia, in<sup>4</sup>.

δ: Deflexión dinámica en el centro de la viga, in.

El espécimen es moldeado utilizando ASTM D 3202: Preparación de vigas de mezclas bituminosas por medio del compactador de California. El ensayo normalmente es desarrollado a 21.1 °C usando rangos de niveles de esfuerzo de 30 a 300 psi.

#### 1.5.3.4. Compresión triaxial (Módulo Resiliente):

En este ensayo se preparan especímenes de 101.6 mm de diámetro y 204 mm de espesor; y se ensayan bajo una presión de confinamiento constante y un esfuerzo vertical desviador aplicado en forma repetitiva. Materiales de rigidez media como mezclas asfálticas y agregados estabilizados con cemento son los más apropiados para este tipo de ensayo. Por medio de las deformaciones axiales resilientes y el esfuerzo vertical aplicado se puede calcular el módulo resiliente del espécimen.

#### 1.5.4 Ensayos de Durabilidad:

Los ensayos de durabilidad están estandarizados en ASTM 559-82 y AASHTO T 135, Humedecimiento y secado de materiales estabilizados cemento, y en ASTM D 560 y AASHTO T 136, congelamiento y descongelamiento de materiales estabilizados con cemento. Existen varios procedimientos para determinar la durabilidad de los materiales estabilizados, entre los cuales se encuentran: pérdida de masa, desnudamiento y esfuerzo residual.

##### 1.5.4.1 Pérdida de masa:

Especímenes de 102 mm de diámetro y 114.3 mm de espesor se compactan y moldean al contenido óptimo de humedad, se curan por 7 días en una cámara de humedad y se someten a

12 períodos de secado-humedecimiento, o congelamiento-descongelamiento, para al final calcular el porcentaje de pérdida de masa después del tratamiento.

#### 1.5.4.2 Esfuerzo residual:

En años recientes se ha convertido en algo deseable el conocer los efectos del congelamiento y descongelamiento (ciclos) de materiales tratados con cemento en términos de esfuerzos residuales. Los procedimientos de ensayo pueden ser encontrados en ASTM D 560 y ASTM C 593.

## 2. Modelación mecánica para estructuras de pavimento con base estabilizada con cemento.

Para la definición de la mecánica de falla en el equipo de vigas a flexo-tracción, se hizo una evaluación estructural por el método de multicapa elástica, para la estructura de pavimento definida en la Tabla 1.

Tabla 1: Escenarios de evaluación estructural.

Capa asfáltica		Base estabilizada con cemento (CTB)		Sub-base		Sub-rasante
Espesor (cm)	MR (psi)	Espesor (cm)	MR (psi)	Espesor (cm)	MR (psi)	MR (psi)
5.5	400000	12.5	550000	30.0	15000	4000
10.0		15.0				
14.5		17.5	750000			7000
	20.0					
	25.0					

Así, se estimó la respuesta mecánica de dichos paquetes estructurales, ante la sollicitación con cargas de 20000 N, 40000 N, 60000 N y 80000 N.

#### Análisis de respuesta mecánica por índices.

La Tabla A1 presenta los esfuerzos y deformaciones unitarias por tracción en la fibra inferior de la base estabilizada con cemento, considerando como base indexada el resultado con carga de 20000 N.

En general se aprecia:

- El crecimiento en función de la carga para esfuerzo de tracción y deformación unitaria es similar, en términos indexados, sin importar las combinaciones de factores de simulación. Es decir, el incremento de carga determina incrementos iguales para esfuerzos y deformaciones unitarias.
- El incremento en el módulo de rigidez de la sub-rasante determina una marginal reducción en los niveles de esfuerzo y deformación unitaria. Adicionalmente, dicha marginal reducción es la misma tanto para esfuerzo como para deformación unitaria.
- El incremento en el módulo de rigidez de la base estabilizada con cemento determina un marginal incremento en los niveles de esfuerzo y deformación unitaria. Igualmente, dicho marginal incremento es el mismo tanto para esfuerzo como para deformación unitaria.
- El incremento en el espesor de capa asfáltica determina un mayor efecto relativo del crecimiento en carga aplicada. Conforme mayor es el espesor de la capa asfáltica, mayor crecimiento en los niveles de esfuerzo y deformación unitaria al aumentar la carga aplicada.

La Tabla A2 presenta los esfuerzos y deformaciones unitarias por tracción en la fibra inferior de la base estabilizada con cemento, considerando como base indexada el resultado con carga de 20000 N para espesor de capa asfáltica de 5.5 cm.

En general se aprecia:

- El esfuerzo de tracción y deformación unitaria disminuye conforme el espesor de capa asfáltica se incrementa. Dicho efecto es similar tanto para esfuerzo como para deformación unitaria.
- La reducción en esfuerzo de tracción y deformación unitaria conforme el espesor de la capa asfáltica se incrementa es marginalmente menos acentuado cuando se incrementa el módulo de rigidez de la base estabilizada con cemento.
- La reducción en esfuerzo de tracción y deformación unitaria conforme el espesor de la capa asfáltica se incrementa es marginalmente más acentuado cuando se incrementa el módulo de rigidez de la sub-rasante.

La Tabla A3 presenta los esfuerzos y deformaciones unitarias por tracción en la fibra inferior de la base estabilizada con cemento, considerando como base indexada el resultado con carga de 20000 N para espesor de capa asfáltica de 5.5 cm y espesor de base estabilizada con cemento de 12.5 cm.

En general se aprecia:

- El esfuerzo de tracción y deformación unitaria disminuye conforme el espesor de base estabilizada con cemento se incrementa. Dicho efecto es el mismo para esfuerzo de tracción y deformación unitaria.
- La reducción en esfuerzo de tracción y deformación unitaria conforme el espesor de la base estabilizada se incrementa es marginalmente menos acentuada cuando se incrementa el módulo de rigidez de la base estabilizada con cemento.
- La reducción en esfuerzo de tracción y deformación unitaria conforme el espesor de la base estabilizada se incrementa es marginalmente más acentuada cuando se incrementa el módulo de rigidez de la sub-rasante.

La Tabla A4 presenta los esfuerzos y deformaciones unitarias por tracción en la fibra inferior de la base estabilizada con cemento, considerando como base indexada los resultados para espesor de capa asfáltica de 5.5 cm.



En general se aprecia:

- El esfuerzo de tracción y deformación unitaria disminuye conforme el espesor de capa asfáltica se incrementa. El efecto de crecimiento es similar, tanto para esfuerzo de tracción como para deformación unitaria.
- El nivel de reducción en esfuerzo y deformación unitaria es menor para mayores espesores de base estabilizada con cemento.
- Conforme se incrementa la carga sobre la estructura de pavimento, se da una menor reducción en el esfuerzo de tracción y deformación unitaria asociada con un incremento en el espesor de la capa asfáltica.
- El incremento en el módulo de rigidez de la sub-rasante y en el módulo de rigidez de la base estabilizada con cemento es marginal, en cuanto al efecto relativo de un cambio en espesor de capa asfáltica y de carga aplicada.

La Tabla A5 presenta los esfuerzos y deformaciones unitarias por tracción en la fibra inferior de la base estabilizada con cemento, considerando como base indexada los resultados para espesor de capa asfáltica de 5.5 cm y espesor de base estabilizada de 12.5 cm.

En general se aprecia:

- El esfuerzo de tracción y deformación unitaria disminuye conforme el espesor de base estabilizada con cemento se incrementa. El efecto de crecimiento es similar, tanto para esfuerzo de tracción como para deformación unitaria.
- El incremento en el espesor de capa asfáltica es más significativo, con respecto a la reducción en esfuerzo y deformación unitaria, que el incremento en el espesor de la base estabilizada con cemento.

### **Metodología de ensayo.**

Las siguientes conclusiones aplican al diseño experimental correspondiente.

- Es indiferente la aplicación de una condición de esfuerzo controlado o una condición de deformación unitaria controlada. Se usará, por facilidad de ejecución de ensayo, la condición de esfuerzo controlado.
- La capacidad de soporte para la sub-rasante es poco relevante en cuanto a la respuesta mecánica de una base estabilizada con cemento.
- El módulo de rigidez para la base estabilizada con cemento es poco relevante en cuanto a la respuesta mecánica de una base estabilizada con cemento.
- El aumento en el espesor de la capa asfáltica es el parámetro más relevante con respecto a la respuesta mecánica de una base estabilizada con cemento. En segundo término de relevancia está el espesor de la base estabilizada con cemento. Incrementos para ambos espesores disminuyen el nivel de esfuerzo y deformación unitaria correspondientes.
- Conforme aumenta el espesor de la capa asfáltica, más relevante es el efecto de un crecimiento en la carga aplicada.
- La Tabla 2 presenta los niveles de esfuerzo correspondientes a los escenarios de carga a aplicar.

Tabla 2: Niveles de esfuerzo a la flexo-tracción a aplicar.

Espesor de capa asfáltica (cm)	Espesor de base estabilizada con cemento (cm)	Carga aplicada (N)	Nivel de esfuerzo a la flexo-tracción
5.5	12.5	20000	846.8
		40000	1485.6
		60000	2006.6
		80000	2453.8
	15.0	20000	676.9
		40000	1214.8
		60000	1665.5
		80000	2058.4
	17.5	20000	551.9
		40000	1008.3
		60000	1399.7
		80000	1745.7
	20.0	20000	457.8
		40000	848.2
		60000	1189.7
		80000	1495.4
25.0	20000	363.7	
	40000	688.1	
	60000	979.7	
	80000	1245.1	
10.0	12.5	20000	603.5
		40000	1093.0
		60000	1506.3
		80000	1867.1
	15.0	20000	497.8
		40000	915.1
		60000	1276.4
		80000	1596.7
	17.5	20000	416.5
		40000	755.5
		60000	1092.3
		80000	1377.1
	20.0	20000	353.2
		40000	664.4
		60000	943.5
		80000	1197.3
25.0	20000	289.9	
	40000	573.3	
	60000	794.7	
	80000	1017.5	

**Tabla 2 (continuación): Niveles de esfuerzo a la flexo-tracción a aplicar.**

Espesor de capa asfáltica (cm)	Espesor de base estabilizada con cemento (cm)	Carga aplicada (N)	Nivel de esfuerzo a la flexo-tracción
14.5	12.5	20000	449.2
		40000	832.2
		60000	1166.6
		80000	1464.5
	15.0	20000	379.1
		40000	710.1
		60000	1004.6
		80000	1270.3
	17.5	20000	323.8
		40000	612.2
		60000	872.4
		80000	1110.0
	20.0	20000	279.6
		40000	532.5
		60000	763.6
		80000	976.8
	25.0	20000	235.4
		40000	452.8
		60000	654.8
		80000	843.6

Por medio de una comparación entre las ecuaciones de fatiga, mencionadas anteriormente, que consideran la aplicación de esfuerzo de flexo-tracción controlado, se observa (Figura 1) como el rango de aplicación de esfuerzos puede variar de 350 a 1200 kPa, dentro de un rango de repeticiones de carga para la falla de  $1 \times 10^3$  a  $1 \times 10^7$  tanto de cargas de ejes equivalentes de 8.2 ton como de 13.0 ton.

En la Figura 1 se presentan las ecuaciones desarrolladas por la Dirección General de Carreteras de España (DGC), la ecuación de la Guía Francesa para el dimensionamiento de pavimentos, la ecuación del Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX de España, la ecuación desarrollada por la IECA, la ecuación de la NCHRP o ecuación de Illinois y por último la fórmula de Balbao, se muestra una relación entre la razón de esfuerzos versus el número de cargas para la falla.

Como resultado de esta comparación y el análisis mecánico desarrollado se puede decir que para niveles de esfuerzo por encima de los 1200 kPa se contará con una falla prematura a la fatiga de las bases estabilizadas, lo cual se presenta para espesores de capa asfáltica bajas (por debajo de los 5.5cm), espesores de bases estabilizada bajas (por debajo de los 15 cm) y cargas aplicadas de medio a alto nivel (superiores a los 40000 kN).

A partir de este par de análisis se obtienen los niveles de esfuerzo por aplicar en el ensayo de fatiga, los cuales serán 900, 750, 600 y 400 kPa

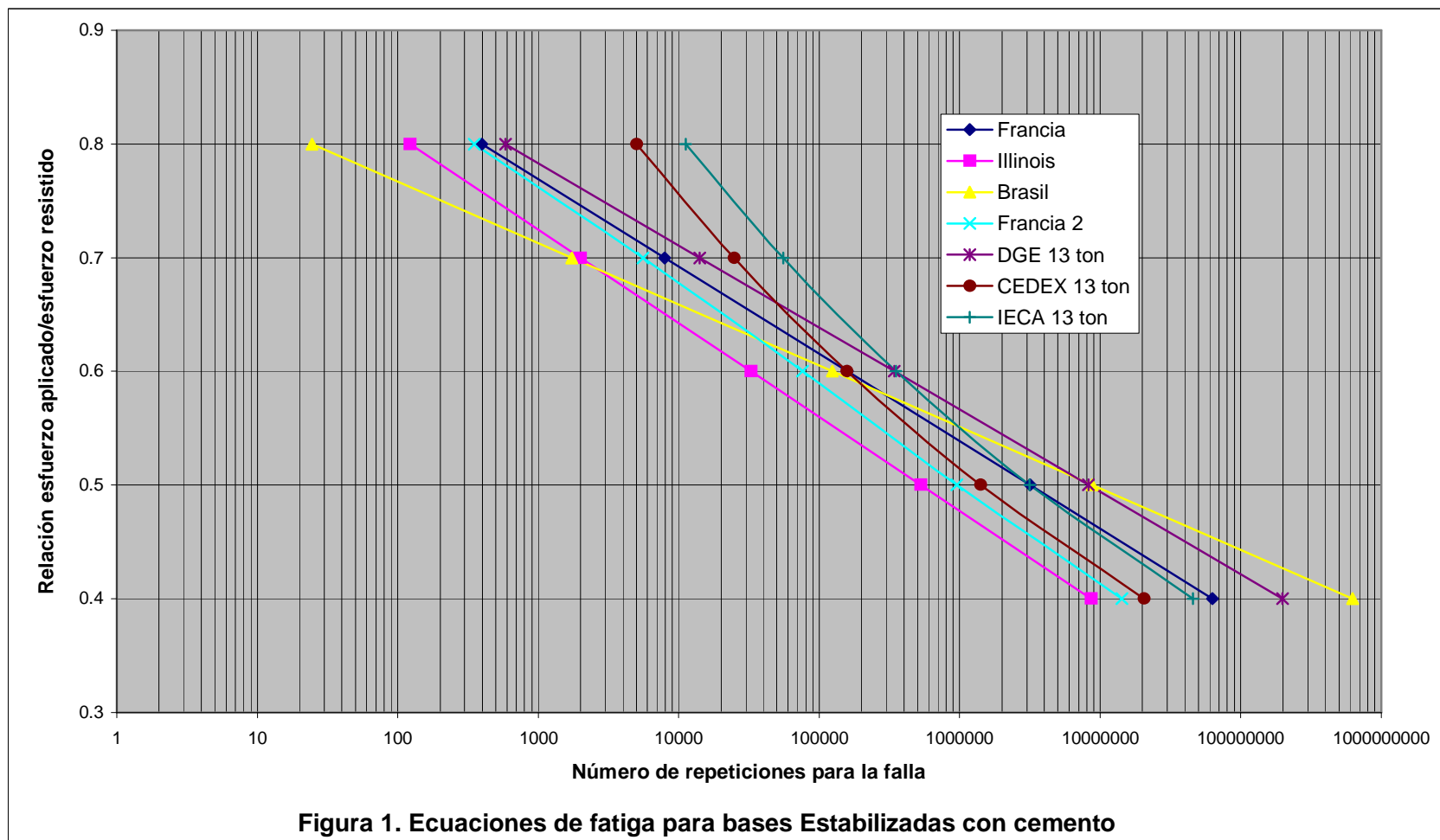
### **3. ENSAYOS DE LABORATORIO A PARTIR DE ESPECIMENES DE LABORATORIO.**

La Tabla 3 presenta la granulometría de la muestra de agregado disponible.

La Tabla 4 presenta las características de los diferentes materiales muestreados por apilamiento para las muestras de agregado disponibles.

La Tabla 5 presenta las propiedades correspondientes a las fracciones gruesa y fina combinadas.

La Tabla 6 presenta las principales propiedades consideradas para el estudio, del cemento utilizado (cemento Holcim Tipo I MP).



**Tabla 3: Granulometrías de agregado de apilamiento.**

Tamiz (*)	Lastre	Especificación CR 2002		
		A	B	C
50.8 mm		100	100	100
38.1 mm	100			
25.4 mm	94			
19.0 mm	86.0			
12.7 mm	x			
9.5 mm	68.3			
No. 4	54.3	40 a 70	40 a 80	50 a 100
No. 8	x			
No. 10	41.0			
No. 40	23.9	10 a 50	10 a 60	20 a 70
No. 200	12.5	0 a 15	5 a 20	5 a 35

**Tabla 4: Propiedades del agregado muestreado.**

Propiedad	Lastre	
	Grueso	Fino
Gsb	2.13	2.01
Absorción del agua (%)	7.71	11.82
Densidad máxima (kg/m <sup>3</sup> ) de Proctor Modificado	1881	
Contenido óptimo de humedad (%)	12.5	
Densidad máxima (kg/m <sup>3</sup> ) de Proctor Modificado, 3.5% de cemento	1837	
Contenido óptimo de humedad (%), 3.5% de cemento	13.4	
Densidad máxima (kg/m <sup>3</sup> ) de Proctor Modificado, 5.0% de cemento	1855	
Contenido óptimo de humedad (%), 5.0% de cemento	14.6	
Densidad máxima (kg/m <sup>3</sup> ) de Proctor Modificado, 6.5% de cemento	1850	
Contenido óptimo de humedad (%), 6.5% de cemento	13.95	
Comentarios	Agregado de tajo, color grisáceo con partículas rojizas, de forma cúbica, muy poroso y degradable. Prevalcen finos en aproximadamente un 65%. Contiene alto grado de combinación de impurezas orgánicas y suelo limoso.	

**Tabla 5: Propiedades del agregado.**

Propiedad	Lastre	
	Grueso	Fino
Abrasión	41.19	x
Límite Líquido	x	NP
Límite Plástico	x	NP
Índice de Plasticidad	x	NP
Equivalente de Arena	x	36
1 cara fracturada	100	x
2 caras fracturadas	86.6	x

**Tabla 6: Propiedades del cemento empleado**

Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Agua de Consistencia normal	Tiempo de fragua (minutos)		Resistencia a la compresión de cubos de mortero		
		Edad (días)	(kg/cm <sup>2</sup> )	(MPa)		
2.77	34.7 % (10 mm de penetración)	Inicial	205	7	172	16.9
		Final	239	14	231	22.6
				28	336	33.0

**Tabla 7: Diseño de base estabilizada**

Contenido de cemento	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )*
3.5%	4.3	39
5.0%	4.4	41
6.5%	4.9	45
8.0%	5.7	53

\*Valores corregidos por relación altura/diámetro según ASTM C-42

## 4. ENSAYOS DE LABORATORIO A PARTIR DE ESPECIMIENTES MUESTREADOS EN PROYECTOS.

### **Retrocálculo de módulos de rigidez.**

La Tabla 7 presenta los resultados de deflectometría de impacto para las diferentes secciones de evaluación en sitio seleccionadas para monitorear el estado de la capa de base estabilizada con cemento.

### **Determinación de módulos de rigidez en el laboratorio.**

La Tabla 8 presenta los resultados de módulo de rigidez para especímenes de capa asfáltica obtenidos en los puntos de muestreo seleccionados.

La Tabla 9 presenta los resultados de módulo de rigidez para especímenes de base estabilizada con cemento obtenidos en los puntos de muestreo seleccionados.

La Tabla 10 presenta los resultados de sondeos de capacidad de soporte en capas inferiores identificadas en los puntos de muestreo considerados.



La Figura 2 muestra la relación entre los valores de Resistencia por compresión, corregidos por forma, versus los valores de Resistencia por tensión de núcleos de bases estabilizadas, además una ecuación desarrollada para relacionar estas resistencias, con lo cual se evidencia la no aplicabilidad a nuestro medio. Por otro lado la Figura 3 muestra una buena relación de módulo resiliente por tensión diametral tanto con la resistencia por tensión diametral como por compresión uniaxial.

**Tabla 8: Resultados de ensayo para especímenes de concreto asfáltico.**

Tramo	Muestra	Especimen	% vacíos (*)	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Módulo resiliente a 25°C (MPa)	Resistencia a la tensión diametral (kPa)
						PI	
El Carmen - Jaboncillal	703-03	1	3.0	101.6	41.2	2127	688
		2	4.1	x	x	4257	x
		3	5.8	101.7	38.4	2347	728
		4	3.7	101.6	52.6	2301	626
		5	5.6	101.8	48.9	x	669
El Carmen - Jaboncillal	741-03	1	8.0	100.0	47.2	x	830
		2	7.3	100.1	47.5	x	719
		3	5.3	100.2	46.9	3097	x
		4	6.6	100.3	47.9	2285	x
El Carmen - Jaboncillal	744-03	1	4.8	100.3	47.5	x	616
		2	8.5	100.4	68.0	x	635
		3	6.9	100.2	72.8	1665	x
		4	8	100.5	71.8	1845	x
El Carmen - Jaboncillal	756-03	1	x	100.4	64.6	x	1079
		2	x	100.9	66.4	x	830
		3	3.1	100.9	72.2	2736	968
		4	2	100.8	65.9	2105	856
El Carmen - Jaboncillal	640-03	1	7.3	101.5	74.1	1783	x
		2	5.9	101.5	73.8	1957	x
		3	4.6	101.5	73.7	x	x
		4	x	x	76.5	x	x
		5	x	x	74.3	x	x
El Carmen - Jaboncillal	626-03	1	6.8	101.3	36.6	x	x
		2	6.5	101.4	39.7	x	x
		3	x	x	x	x	x
		4	x	x	x	x	x

**Tabla 8 (cont): Resultados de ensayo para especímenes de concreto asfáltico.**

Tramo	Muestra	Especimen	% vacíos (*)	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Módulo resiliente a 25°C (MPa)	
						PI	P2
Santa Ana-San Antonio de Belén	809-03	2	6.2	100.9	74.3	5811	5550
		3	6.1	100.7	74.6	6128	6034
		4	6.1	101.2	70.2	6022	5671
Santa Ana-San Antonio de Belén	811-03	6	1.4	101.0	70.3	4334	4030
		7	1.9	101.0	68.4	3990	3640
		8	2.1	101.5	68.9	4599	4406
Santa Ana-San Antonio de Belén	812-03	2	8.3	100.9	67.7	5289	5083
		3	8.3	101.1	74.6	6576	6242
		4A	8.1	101.0	74.4	4846	4509
		4B	5.4	101.0	74.4	1857	1752
Santa Ana-San Antonio de Belén	0814-03	5B	7.7	101.2	74.4	1754	1376
		6	6.7	101.4	73.8	7384	7151
		7	8.0	101.2	68.9	6323	5734
		8	7.8	101.0	73.3	4970	4541
Río Convento - Cajón	968-03	2A	3.8	101.1	40.2	8218	7758
		2B	4.1	101.0	55.3	11230	11479
		3A	3.9	101.5	54.6	8302	8116
		3B	5.9	101.3	55.3	12506	12798
		4A	4.9	101.4	56.0	11365	10837
		4B	5.5	101.1	55.0	14603	14772
Pérez Zeledón-Río Convento	0343-04	1	24.3	101.1	45.3	2450	2199
		2	18.2	101.1	53.2	2397	2284
		3	9.7	101.1	37.1	1890	1688
		4	8.3	101.1	57.8	2162	1918

(\*) Vacíos de sitio.

**Tabla 9: Resultados de ensayo para núcleos de base estabilizada con cemento.**

Tramo	Muestra	Especimen	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Módulo resiliente a 25°C (MPa)		Resistencia a la tensión diametral (kPa)	Resistencia a la compresión simple (kPa)
					P1	P2		
El Carmen-Jaboncillal	744-03	1	100	72	x	x	700	8028
		2	101	72	15490	16555	x	x
		3	101	102	x	x	2262	x
		4	x	x	x	x	x	x
El Carmen-Jaboncillal	640-03	1	101	70	10972	11267	661	x
		2	101	75	x	x	x	5494
		3	x	x	x	x	x	x
El Carmen-Jaboncillal	626-03	1	x	x	x	x	x	x
		2	101	74	x	x	393	7637
		3	101	54	5701	4847	545	x
		4	101	60	3294	3511	x	8741
		5	101	65	x	x	x	7652
Tárcoles-Jacó-Loma	775-03	1A	102	71	x	x	x	17285
		1B	102	72	x	x	x	9692
		2	102	122	x	x	843	x
		3	x	x	x	x	x	x
Tárcoles-Jacó-Loma	779-03	4	102	72	x	x	x	8760
		13A	102	70	x	x	x	9221
		13B	101	68	x	x	x	4944
		14	102	104	x	x	775	x
		15	101	69	x	x	x	6622
Santo Domingo-Heredia	756-03	16	101	72	x	x	x	8937
		1	101	111	x	x	x	17952
		2	101	71	21628	21558	x	17521
		3	101	102	x	x	2266	x
		4	101	70	28688	29281	2806	x

(\*) P1 se refiere a la menor carga axial (10% de la carga máxima resistida en tensión diametral); P2 se refiere a la mayor carga axial (20% de la carga máxima resistida en tensión diametral).

**Tabla 9 (cont): Resultados de ensayo para núcleos de base estabilizada con cemento.**

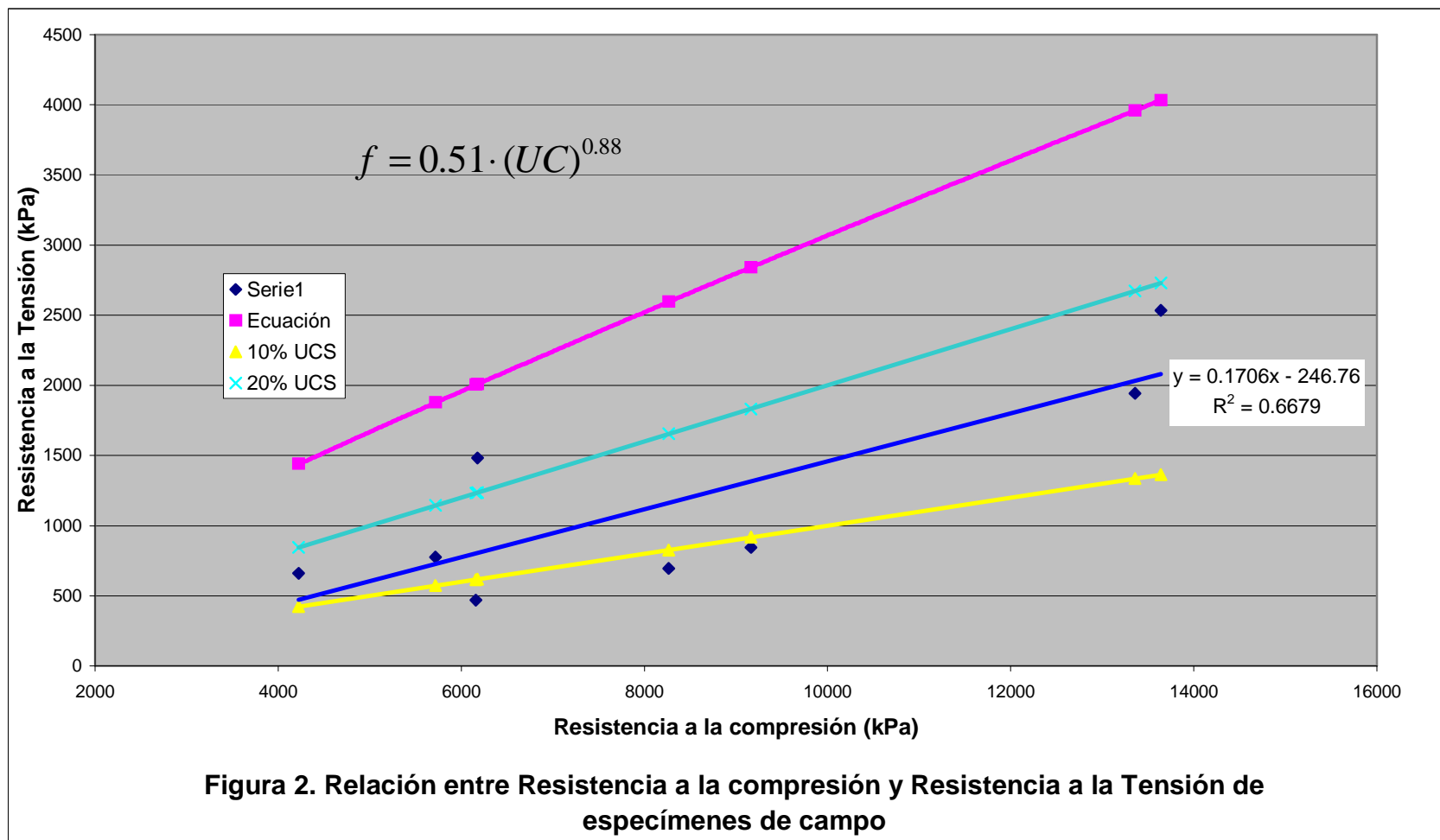
Heredia-La Valencia	760-03	1A	102	71	x	x	x	12213
		1B	102	73	x	x	x	5945
		2A	102	70	x	x	579	x
		2B	102	73	x	x	853	x
		3A	102	77	x	x	755	x
		3B	101	74	x	x	598	x
		4A	102	70	x	x	x	16245
		4B	102	70	x	x	x	8584
Santa Ana-San Antonio de Belén	809-03	3A	97	75	10846	11832	x	x
		3B	100	76	10261	9847	x	x
Santa Ana-San Antonio de Belén	811-03	6	101	70	3822	4042	x	x
		7	101	56	3267	3334	x	x
Santa Ana-San Antonio de Belén	814-03	5	101	74	10130	9578	x	x
Santa Ana-San Antonio de Belén	827-03	1A	101	74	17438	17255	x	x
		1B	101	70	11324	11305	x	x
Río Convento-Cajón	1002-03	1	101	53	x	x	804	x
Pérez Zeledón-Río Convento**	0343-04	1	101	74	26363	25698	x	15195
		2	101	75	36069	37140	x	21945
		3	101	75	x	x	755	x
	0344-04	1	101	75	x	x	2982	x
		13	101	52	4470	1343	x	9946
		16	101	76	26635	22277	x	16188
	0678-04	3	100	74	28342	27783	1275	x
		5	100	75	31654	30771	2354	x
		7	101	74	29241	29586	2354	x
		9	101	75	24618	24031	x	13055
		11	101	75	22269	20851	x	10489

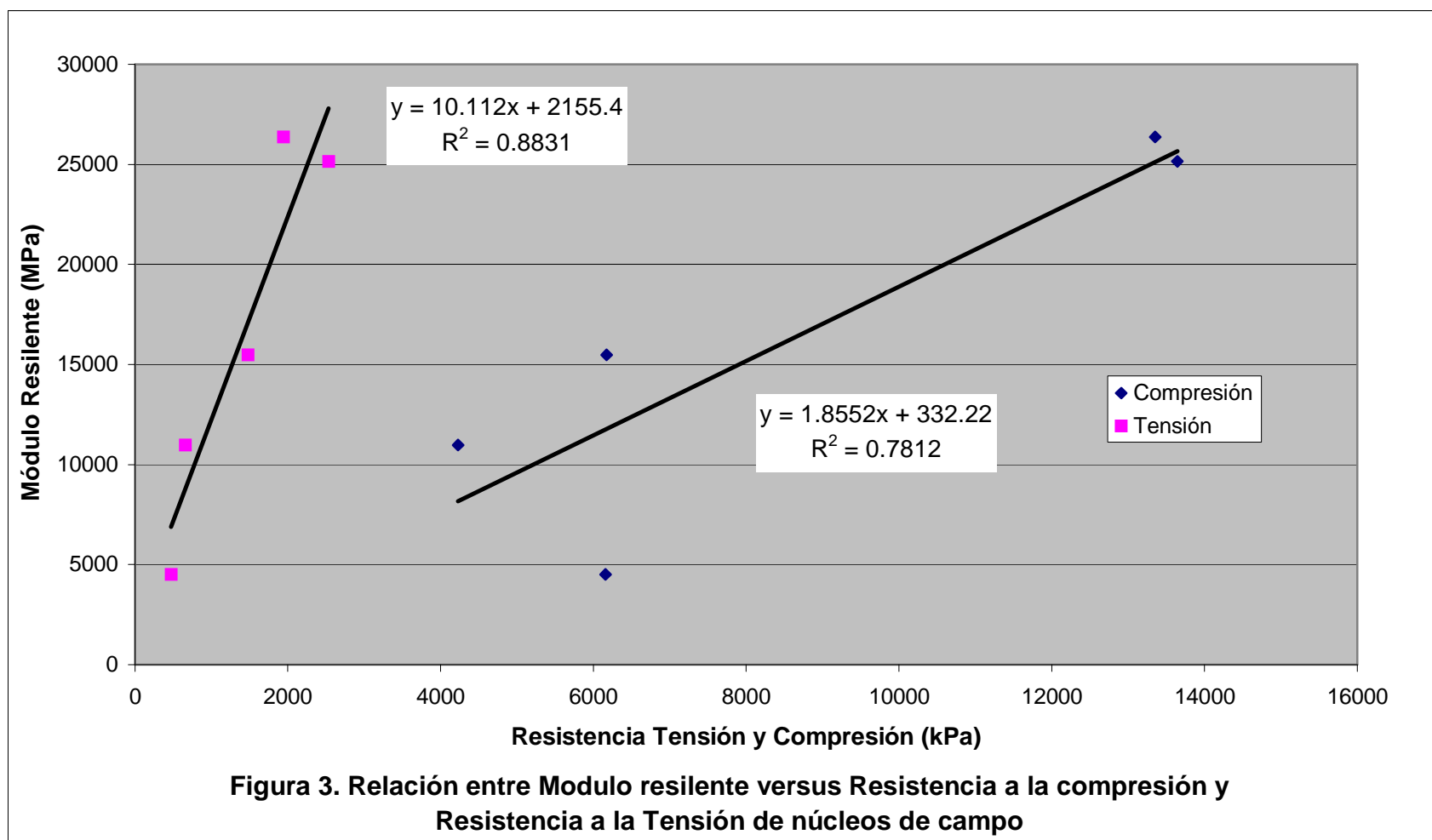
(\*) P1 se refiere a la menor carga axial (10% de la carga máxima resistida en tensión diametral); P2 se refiere a la mayor carga axial (20% de la carga máxima resistida en tensión diametral).

(\*\*) Valores de resistencia por compresión corregidos por relación altura diámetro

**Tabla 10: Resultados de ensayos en capas granulares y suelos. Sondeos destructivos.**

Tramo	Muestra	Tipo	Granulometría (% pasando)				Límite Líquido	Índice Plástico	Proctor		CBR			
			No. 4	No. 10	No. 40	No. 200			Dens. Máx. (kg/m <sup>3</sup> )	Humedad (%)	91%	93%	95%	97%
El Carmen - Jaboncilla	641-03 A	Sub-base	54	42	22	10	NP	NP	x	x	x	x	x	x
		Relleno No.1	45	36	23	11	NP	NP	x	x	x	x	x	x
	643-03 B	Relleno No.2	48	35	18	6	NP	NP	x	x	x	x	x	x
	643-03 C	Sub-rasante	100	97	92	58	34.8	7.0	1310	26.6	8	10	13	14







## 5. ENSAYOS DE CAMPO.

Para los proyectos seleccionados, se han realizado pruebas de deflectometría de impacto con el fin de conocer la condición estructural en el momento del muestreo; en otras palabras para obtener las propiedades físico-mecánicas de las capas que componen el pavimento (módulo resiliente y capacidad de soporte), esto a partir de la metodología de retrocálculo de módulos.

Hasta el momento no se cuenta con información de espesores de capa, por lo que se presenta, para cada proyecto, la deflexión bajo el plato de carga y el parámetro "Área" el cual considera cuatro deflexiones medidas a lo largo de la superficie del pavimento sobre una misma línea. El parámetro Área esta relacionado con la rigidez de la estructura completa, es decir, que a mayor Área mayor es la rigidez del pavimento.

Ambos parámetros (Área y deflexión) se ajustan por medio de factores de corrección por temperatura; debido a que la temperatura estandarizada para evaluar propiedades del pavimento es a 25°C.

Aplicando la metodología del Departamento de Transportes del Estado de Washington y la Guía de diseño AASHTO 1993, el Área se calcula de la siguiente forma:

$$Area = 150 \frac{(D_0 + 2D_{300} + 2D_{600} + 2D_{900})}{D_0} \text{ (mm)}$$

Donde  $D_i$  es la deflexión a la distancia  $i$  en mm.

La Tabla 5.1 muestra valores típicos para comparar con el valor de Área.

**Tabla 5.1. Valores típicos de Área.**

Tipo pavimento	Área (mm)
PCCP	610 – 840
Pavimento flexible CA > 100 mm espesor	530 – 760
Pavimento flexible CA < 100 mm espesor	410 – 530
TSB	380 – 430
TSB pobre	300 - 380

El valor de Área puede ser usado para estimar la condición del pavimento sin la necesidad de extracción de núcleos o un análisis extensivo. La Tabla 5.2 provee una idea general de la aplicación del parámetro Área.

LA Tabla 5.3 muestra la relación de deflexiones bajo el plato de carga con respecto a una clasificación de baja, media y alta, lo cual significa un estado bueno, regular y malo respectivamente de la condición estructural del pavimento.

**Tabla 5.2 Relación Área, D0 y condición de la estructura de pavimento**

Área	Deflexión $D_0$	Conclusiones generales
Bajo	Bajo	Estructura débil, subrasante rígida
Bajo	Alto	Estructura débil, subrasante débil
Alto	Bajo	Estructura fuerte, subrasante rígida
Alto	Alto	Estructura fuerte, subrasante débil

**Tabla 5.3. Clasificación condición estructural del pavimento según el valor de deflexión.**

Deformación D0	Clasificación	Valor de la deflexión
Baja	Bueno	0 a 25 mm <sup>-2</sup>
Media	Regular	25 a 45 mm <sup>-2</sup>
Alta	Malo	45 a 70 mm <sup>-2</sup>
Muy Alta	Muy malo	Mayor o igual que 70 mm <sup>-2</sup>

Los factores de corrección aplicados tanto a la deflexión bajo el plato de carga como para el parámetro Área, se tomaron del Departamento de Transportes del Estado de Washington, para secciones con espesor de capa de rodadura inferior a los 100 mm, dado las condiciones imperantes de pavimentos en nuestro país.

$$\text{Factor de corrección del Área} = 0.7865 + 1.4578 \times 10^{-4} (\text{Temperatura } ^\circ\text{F})^{1.68}$$

$$\text{Factor corrección de deflexión} = 1.5788 + 7.1439 \times 10^{-3} (\text{Temperatura } ^\circ\text{F})^{1.01}$$

En el Departamento de Transportes del Estado de Washington también han desarrollado ecuaciones para el cálculo de el módulo resiliente de la subrasante a partir de la información de deflectometría como la presente en la Guía de Diseño AASHTO 1993. Esta metodología tiene la limitante que fue desarrollado para estructuras de tres capas (una capa de rodadura, una capa granular y la subrasante), aunque correlaciona muy bien con los módulos calculados por el LTPP.

Tomando en cuenta las limitaciones anteriores se decidió aplicar la ecuación del Departamento de Transportes del Estado de Washington, para obtener un valor inicial de módulo resiliente de la subrasante y luego se aplicó la metodología de la Guía de Diseño AASHTO 1993 como se muestra a continuación:

$$M_R (\text{psi}) = 9000 \times \frac{0.00567}{(d_{48} / 1000)} - 198 \text{ (Ecuación de WSDoT)}$$

Donde:

$d_{48}$ : deflexión en mili pulgadas a una distancia de 48 pulgadas (aproximadamente 1200 mm) del plato de carga.

Escrita en unidades SI:

$$M_R (\text{MPa}) = \frac{8936.6}{d_{1200}} - 1.365$$

$d_{1200}$ : deflexión en microns a una distancia de 1200 mm del plato de carga.

$$M_R (\text{psi}) = \frac{0.24P}{d_r r} \text{ (Ecuación AASHTO)}$$

P: carga aplicada en lb.

$d_r$ : deflexión a una distancia r del centro de carga, en pulgadas.

r: distancia del centro de carga en pulgadas

La deflexión usada para retrocalcular el módulo de la subrasante debe ser medido lo suficientemente largo para proveer una buena estimación, a la vez debe cumplir con una distancia mínima  $r \geq 0.7a_e$

Donde

$$a_e = \sqrt{a^2 + \left( D \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_R}} \right)^2}$$

$a_e$ : radio del bulbo de esfuerzos en la interfase pavimento-subrasante, en pulgadas.

$a$ : radio del plato de carga, en pulgadas.

$D$ : espesor total del pavimento sobre la subrasante, en pulgadas.

$E_p$ : módulo efectivo de las capas de pavimento sobre la subrasante, en psi. Este puede ser calculado de la siguiente forma:

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

$d_0$ : deflexión (pulgadas) medida en el centro de carga (ajustada a una temperatura de 68 °F)

$p$ : presión bajo el plato de carga, psi.

$a$ : radio del plato de carga, en pulgadas.

$D$ : espesor total del pavimento sobre la subrasante, en pulgadas.

$M_R$ : módulo resiliente de la subrasante, psi.

La siguiente Tabla muestra un resumen de la condición estructural evaluada a partir de la deformación bajo el plato de carga, el factor área y la determinación de la capacidad de soporte (ver Anexos), para cada sección seleccionada

**Tabla 5.4. Condición estructural de las secciones analizadas**

Sección	Área	Deflexión $D_0$	Conclusiones generales
El Carmen - Jaboncillal	Media-alta	Alta	Estructura de mediana rigidez a fuerte, subrasante débil
Río Convento - Cajón	Alta	Baja	Estructura fuerte, subrasante firme
Sto Domingo – La Valencia	Alta	Baja	Estructura fuerte, subrasante firme
Santa Ana - San Antonio de Belén	Alta	Baja	Estructura fuerte, subrasante firme
Tárcoles - Jacó - Loma	Media-alta	Baja	Estructura de mediana rigidez a fuerte, subrasante firme

## 6. ENSAYOS DE LABORATORIO.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de los ensayos de tensión compresión y módulo resiliente para los tres contenidos de cemento considerados en el estudio de laboratorio, esto incluyendo las relaciones a 7 y 28 días para la falla.

**Tabla. Resultados de resistencia a compresión uniaxial, tensión y módulo resiliente para especímenes estabilizados (falla a 7 y 28 días).**

### Resultados a 7 días

Porcentaje de cemento (%)	Resistencia compresión a 7 días (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia a la tensión a 7 días (kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo resiliente a 7 días (MPa)	Relación Tensión / compresión (%)
3.5	43.5	5.2	8217	12.0
5	45.3	6.6	9168	14.6
6.5	55.9	8.9	10856	15.9

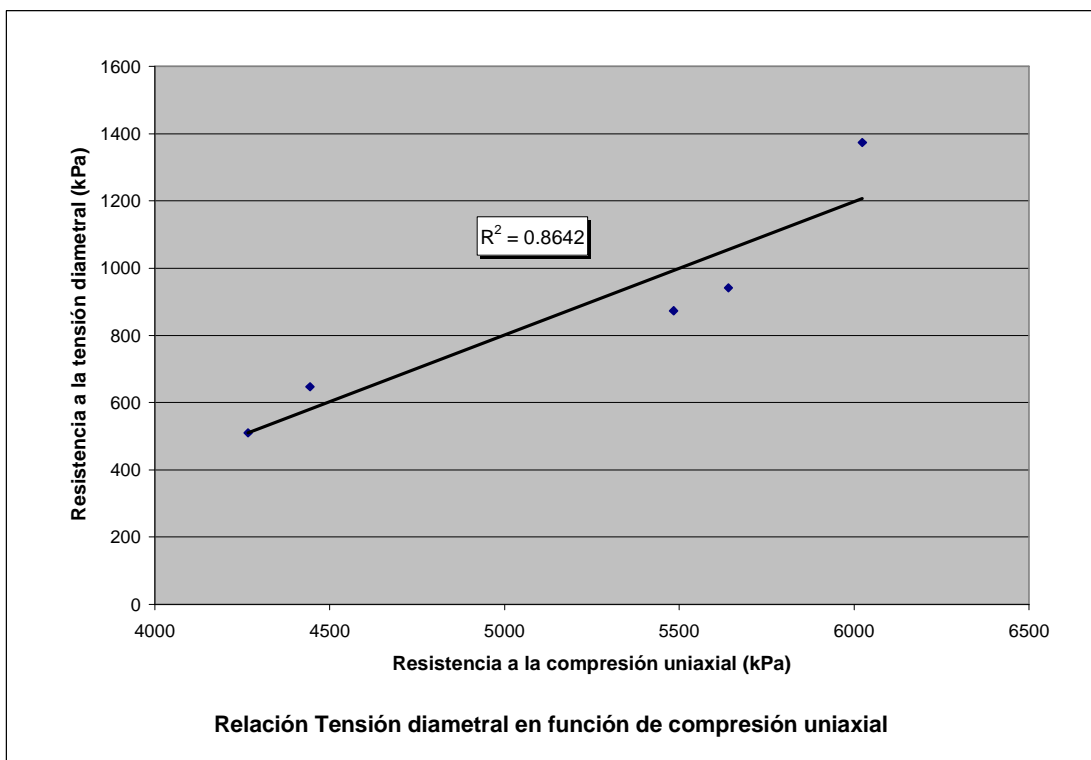
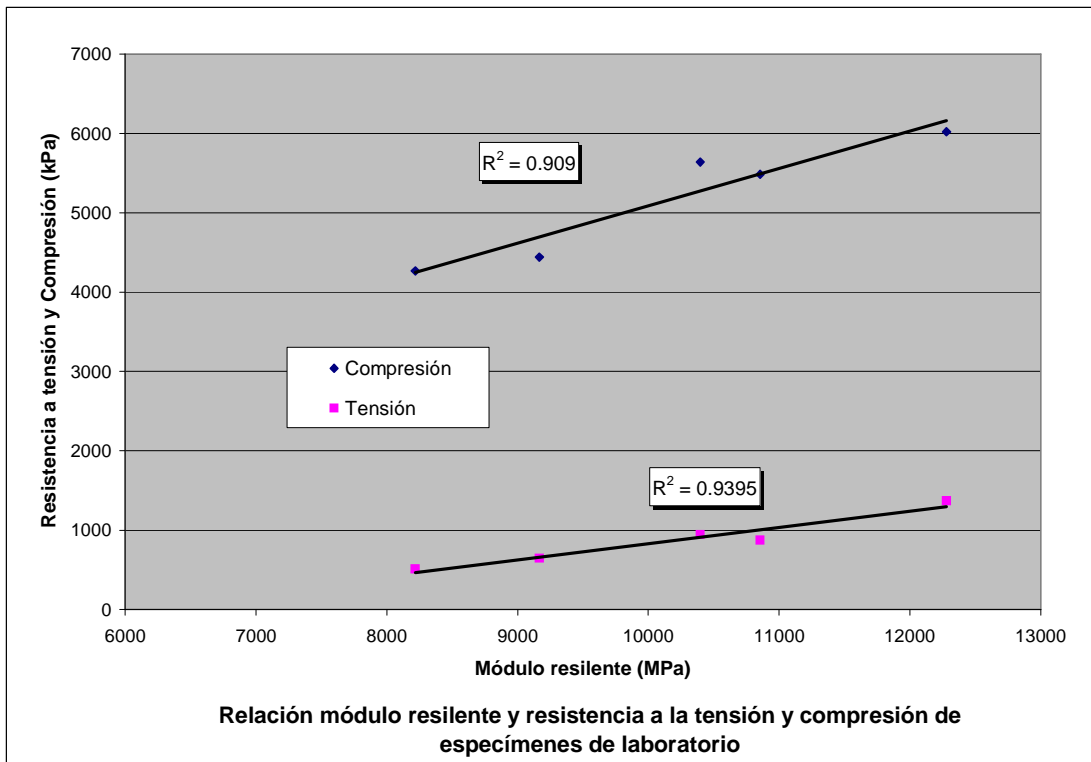
### Resultados a 28 días

Porcentaje de cemento (%)	Resistencia compresión a 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia a la tensión a 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo resiliente a 28 días (MPa)	Relación Tensión / compresión (%)
3.5				
5	57.5	9.6	10395	16.7
6.5	61.4	14	12279	22.8

### Relación 7/28 días

Porcentaje de cemento (%)	Resistencia compresión a 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia a la tensión a 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo resiliente a 28 días (MPa)
3.5			
5	78.8	68.8	88.2
6.5	91.0	63.6	88.4

En las siguientes figuras se presentan relaciones entre los resultados de compresión, tensión y módulo resiliente, obteniéndose mejores correlaciones que las encontradas con las muestras de campo, lo cual era de esperarse por ser, el proceso de compactación en laboratorio, más controlado que el de campo.





**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Asociación ACI Capítulo de Costa Rica. **Publicación Especial PE – 58**. Febrero del 2003.

Miranda Fonseca, Jorge. **Bases estabilizadas para pavimentos semi-rígidos**. Informe de proyecto final de graduación, 1986, UCR.

Pórtland Cement Asociation. **Soil-cement construction Handbook**. Engineering Bulletin, 1995.

US Department of Transportation. **Soil stabilization in pavement structures, A user's manual**. FHWA-IP-80-2, 1979.

## **ANEXO I**

# **TABLAS INDEXADAS RESPECTO A RESPUESTA MECANISTICA DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO CON BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO**



**TABLA A.1. TABLA INDEXADA PARA EVALUACION DE FATIGA EN BASES ESTABILIZADAS CON CEMENTO  
CONSIDERANDO CAMBIO EN CARGA APLICADA.**

MR de CTB	MR de SR	Espesor de carpeta cm	Espesor de CTB cm	Carga de 2000 N		Carga de 4000 N		Carga de 6000 N		Carga de 8000 N	
				Esfuerzo Tracción	Deformación unitaria	Esfuerzo Tracción	Deformación unitaria	Esfuerzo Tracción	Deformación unitaria	Esfuerzo Tracción	Deformación unitaria
550000 psi (3792 MPa)	4000 psi (28 MPa)	5.5	12.5	100.0	100.0	174.5	174.6	234.7	234.9	285.7	286.1
			15.0	100.0	100.0	178.7	178.8	244.0	243.4	300.5	300.8
			17.5	100.0	100.0	182.1	182.1	251.9	252.0	313.1	313.3
			20.0	100.0	100.0	184.5	184.6	258.1	258.2	323.5	323.7
		10.0	12.5	100.0	100.0	180.5	180.6	248.2	248.3	307.0	307.3
			15.0	100.0	100.0	183.5	183.5	255.5	255.6	319.1	319.2
			17.5	100.0	100.0	185.9	185.9	261.4	261.5	329.0	329.2
			20.0	100.0	100.0	187.8	187.9	266.3	266.4	337.5	337.6
		14.5	12.5	100.0	100.0	185.1	185.2	259.3	259.4	325.4	325.5
			15.0	100.0	100.0	187.2	187.2	264.6	264.7	334.4	334.5
			17.5	100.0	100.0	188.9	188.9	269.0	269.1	342.0	342.1
			20.0	100.0	100.0	190.3	190.3	272.7	272.7	348.5	348.6
	7000 psi (48 MPa)	5.5	12.5	100.0	100.0	173.2	173.3	231.1	231.5	279.6	280.2
			15.0	100.0	100.0	177.5	177.6	240.8	241.1	294.9	295.3
			17.5	100.0	100.0	181.0	181.1	249.0	249.2	308.0	308.4
			20.0	100.0	100.0	183.6	183.7	255.5	246.6	318.8	319.2
		10.0	12.5	100.0	100.0	179.6	179.7	245.7	246.0	302.4	302.8
			15.0	100.0	100.0	182.5	182.6	252.8	253.0	314.2	314.6
			17.5	100.0	100.0	185.0	185.1	259.0	259.2	324.6	325.0
			20.0	100.0	100.0	187.1	187.1	264.2	264.3	333.5	333.7
		14.5	12.5	100.0	100.0	184.2	184.3	256.9	257.1	320.9	321.2
			15.0	100.0	100.0	186.4	186.5	262.4	262.6	330.3	330.6
			17.5	100.0	100.0	188.2	188.2	267.2	267.2	338.3	338.6
			20.0	100.0	100.0	189.6	189.7	270.9	271.0	345.1	345.3

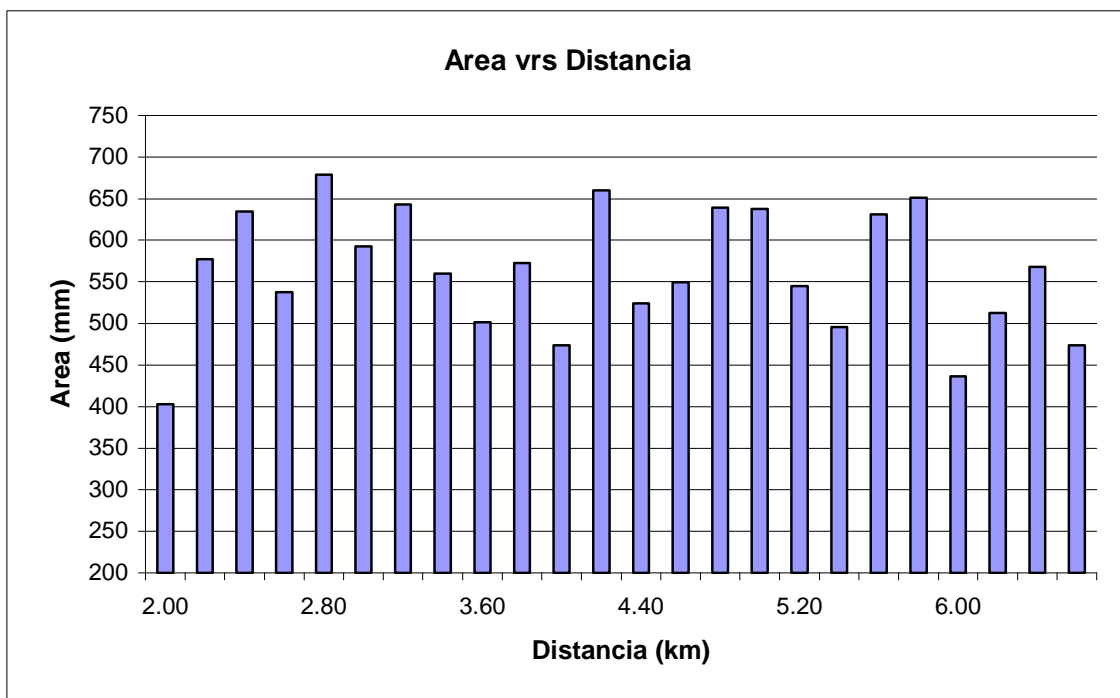
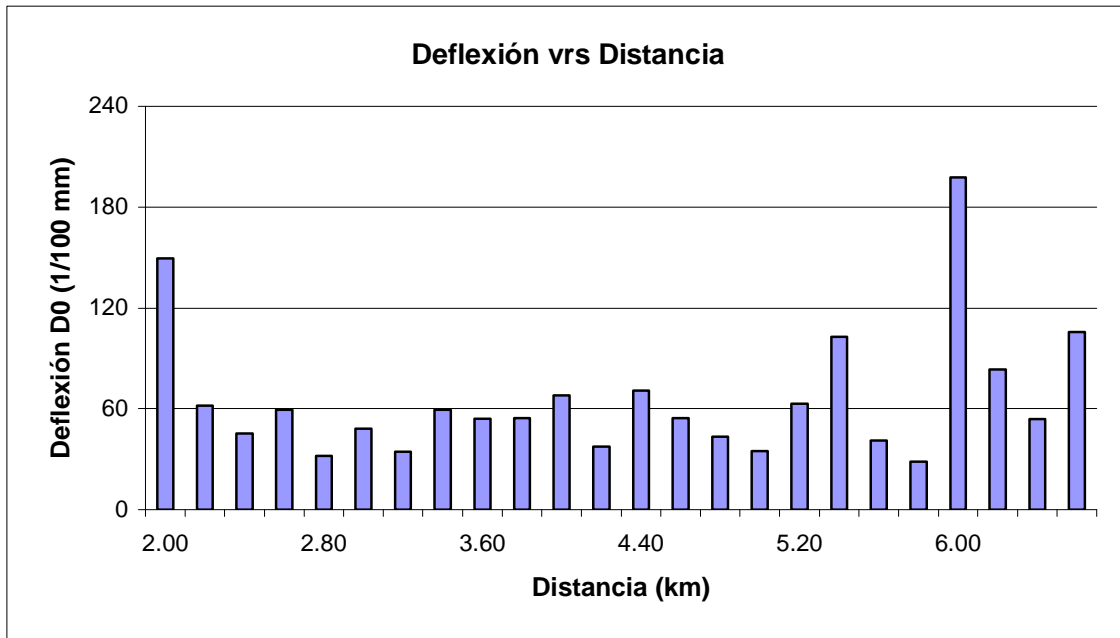
Nota: Módulo de rigidez de carpeta de 400000 psi.

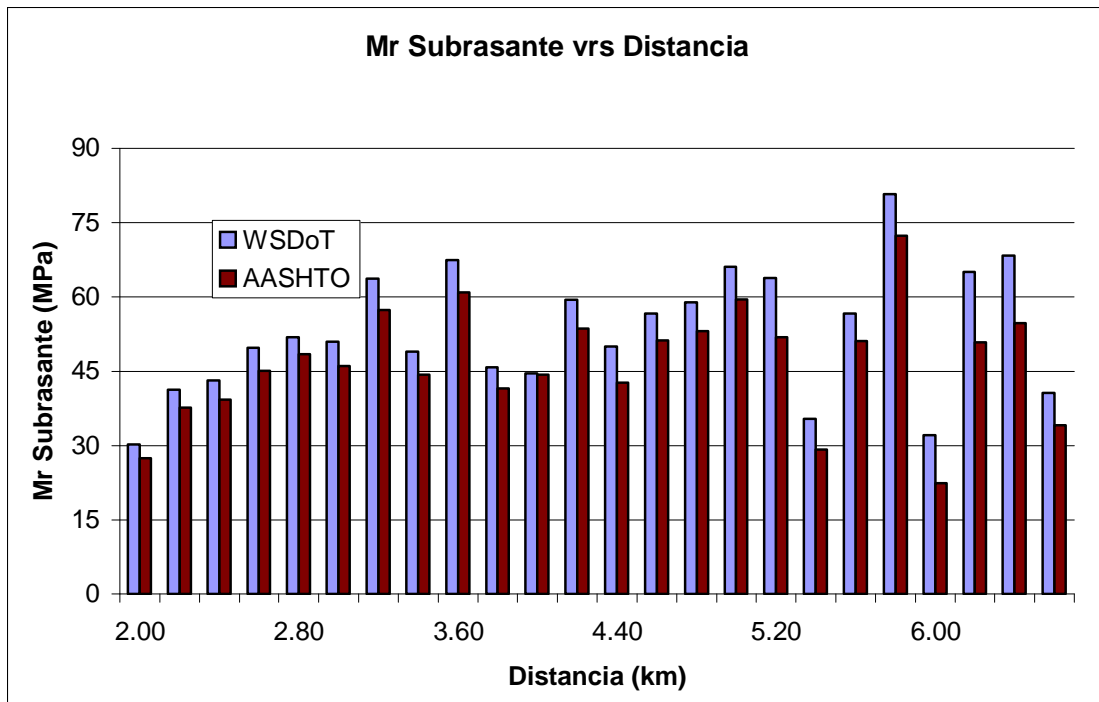
**TABLA A.1. (CONT). TABLA INDEXADA PARA EVALUACION DE FATIGA EN BASES ESTABILIZADAS CON CEMENTO  
CONSIDERANDO CAMBIO EN CARGA APLICADA.**

MR de CTB	MR de SR	Espesor de carpeta cm	Espesor de CTB cm	Carga de 2000 N		Carga de 4000 N		Carga de 6000 N		Carga de 8000 N	
				Esfuerzo Tracción	Deformación unitaria	Esfuerzo Tracción	Deformación unitaria	Esfuerzo Tracción	Deformación unitaria	Esfuerzo Tracción	Deformación unitaria
750000 psi (5171 MPa)	4000 psi (28 MPa)	5.5	12.5	100.0	100.0	175.4	175.5	237.0	237.1	289.8	290.1
			15.0	100.0	100.0	179.5	179.5	246.1	246.2	304.1	304.3
			17.5	100.0	100.0	182.7	182.7	253.6	253.7	316.3	316.5
			20.0	100.0	100.0	185.3	185.3	259.9	260.0	326.7	326.8
		10.0	12.5	100.0	100.0	181.1	181.2	249.6	249.7	309.4	309.6
			15.0	100.0	100.0	183.8	183.9	256.4	256.5	320.8	320.9
			17.5	100.0	100.0	181.4	186.2	262.3	262.3	330.7	330.8
			20.0	100.0	100.0	188.1	188.1	267.1	267.2	339.0	339.1
		14.5	12.5	100.0	100.0	185.2	179.8	259.7	252.1	326.0	316.5
			15.0	100.0	100.0	187.3	187.3	265.0	265.1	335.1	335.2
			17.5	100.0	100.0	189.0	189.1	269.4	269.5	342.8	342.9
			20.0	100.0	100.0	190.4	190.5	273.1	273.2	349.3	349.4
	7000 psi (48 MPa)	5.5	12.5	100.0	100.0	174.0	174.2	233.4	233.7	283.7	284.2
			15.0	100.0	100.0	178.3	178.3	242.9	243.1	298.5	298.9
			17.5	100.0	100.0	181.6	181.7	250.8	251.0	311.2	311.5
			20.0	100.0	100.0	184.3	184.4	257.3	257.5	322.1	322.4
		10.0	12.5	100.0	100.0	180.0	180.1	246.7	246.9	304.2	304.5
			15.0	100.0	100.0	182.9	182.9	253.8	253.9	316.0	316.3
			17.5	100.0	100.0	185.3	185.4	259.9	260.0	326.3	326.6
			20.0	100.0	100.0	187.3	187.4	265.0	265.1	335.0	335.3
		14.5	12.5	100.0	100.0	184.4	184.4	257.3	257.4	321.6	321.9
			15.0	100.0	100.0	186.6	186.6	262.8	263.0	331.1	331.4
			17.5	100.0	100.0	188.3	188.4	267.5	267.6	339.2	339.4
			20.0	100.0	100.0	189.8	189.9	271.3	271.4	346.0	346.2

**ANEXO II**  
**Resultados de Análisis de condición estructural**  
**de los tramos seleccionados**

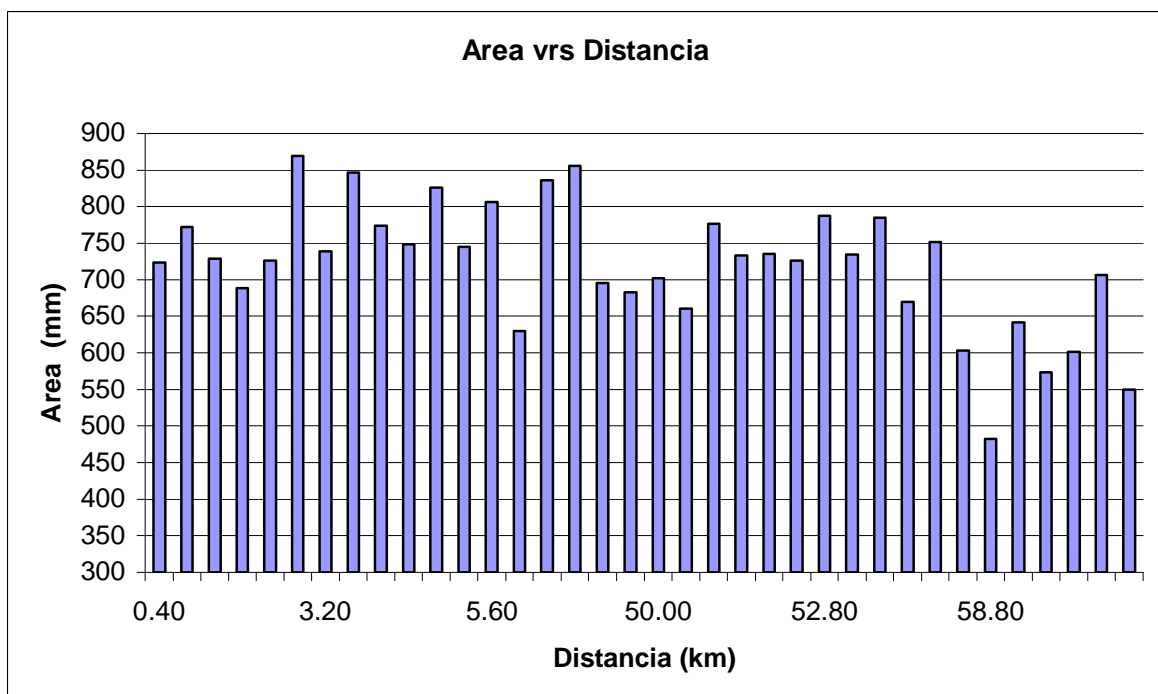
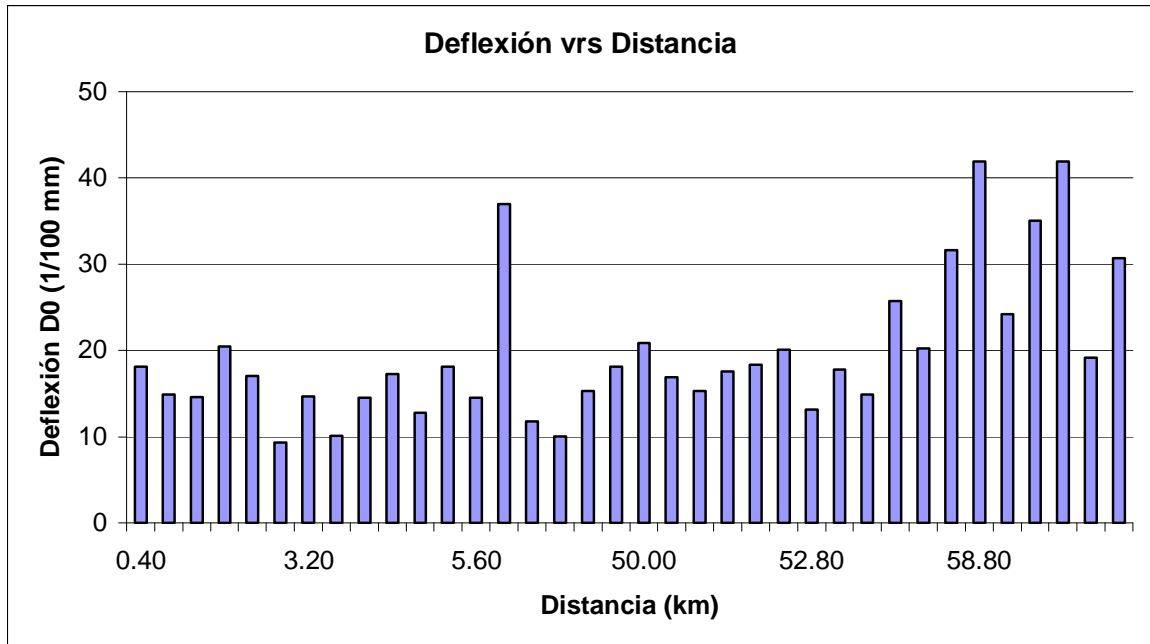
### Tramo El Carmen – Jaboncilla

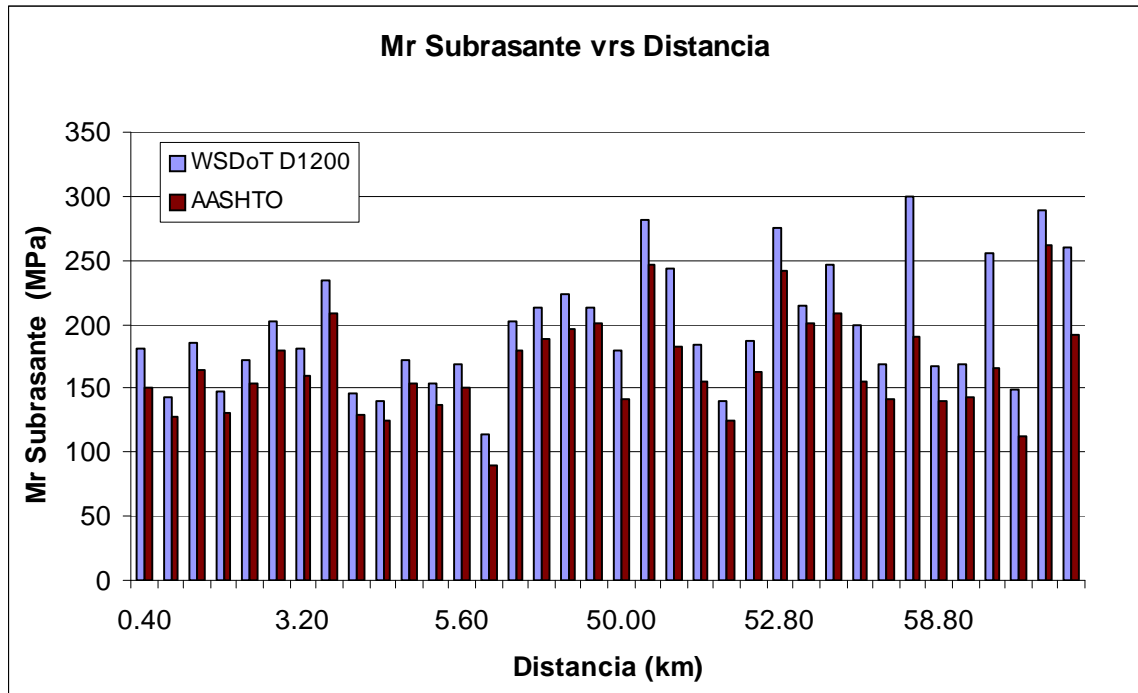




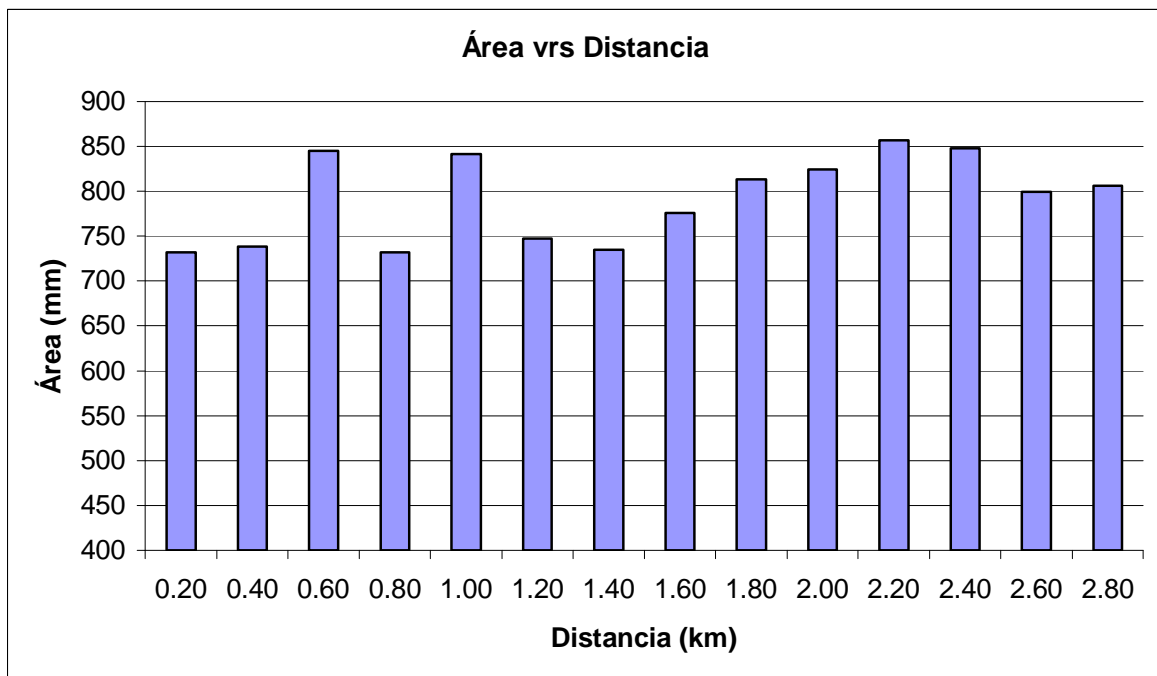
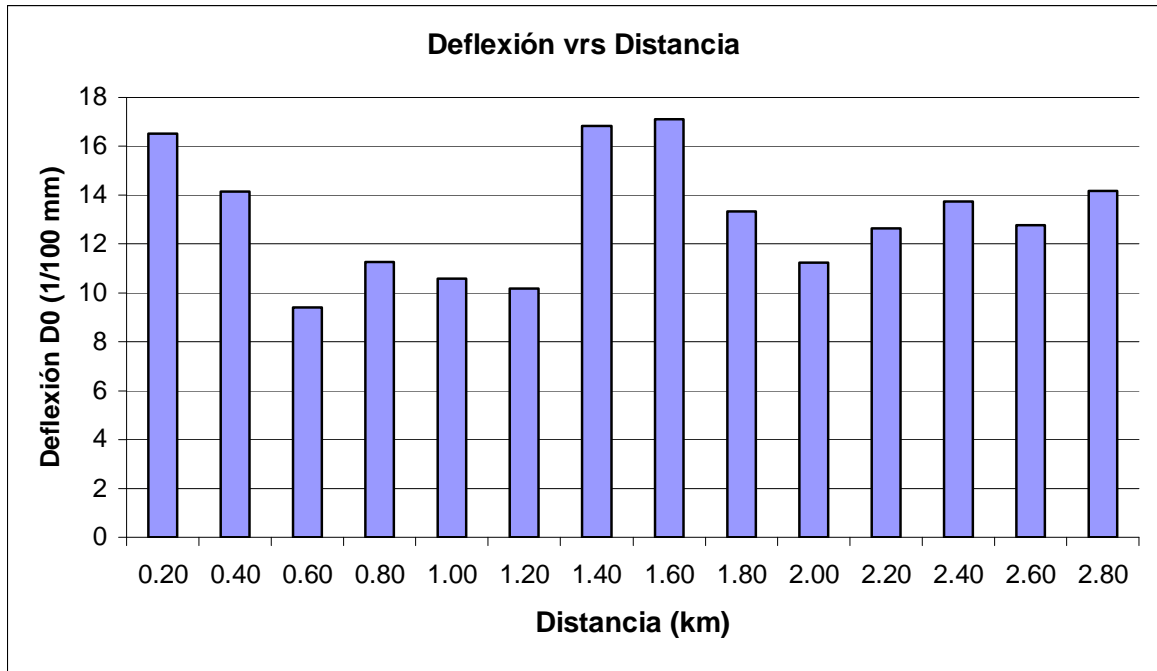


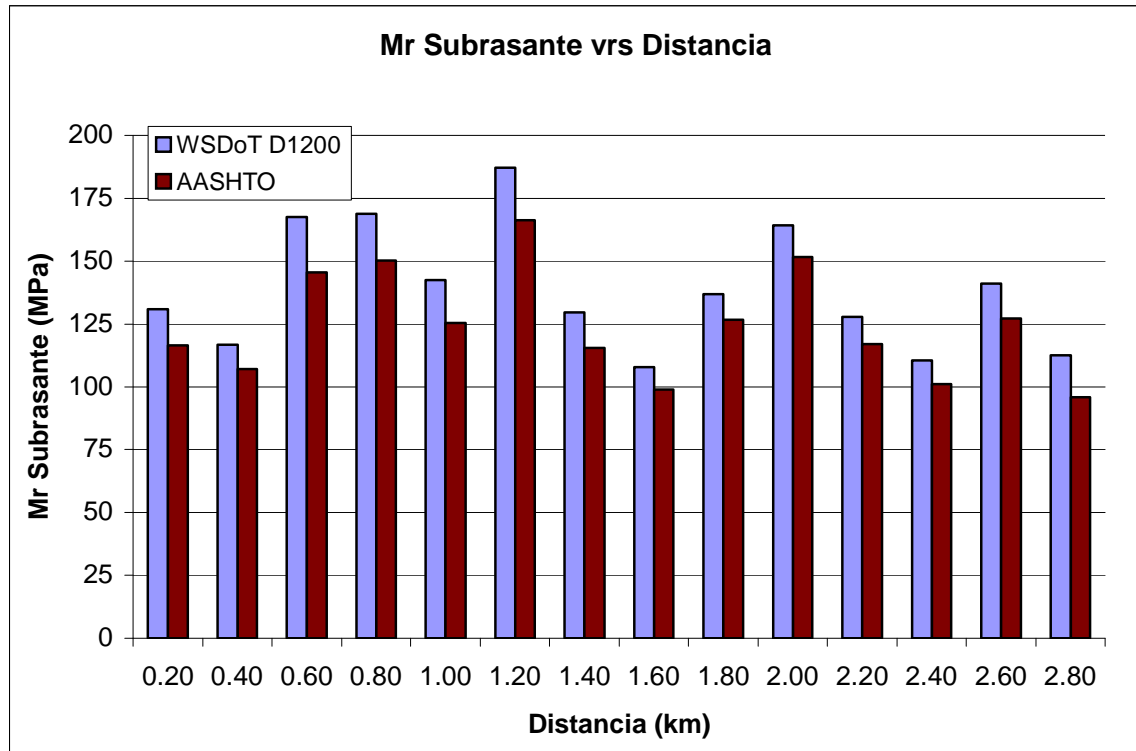
### Tramo Río Convento – Cajón



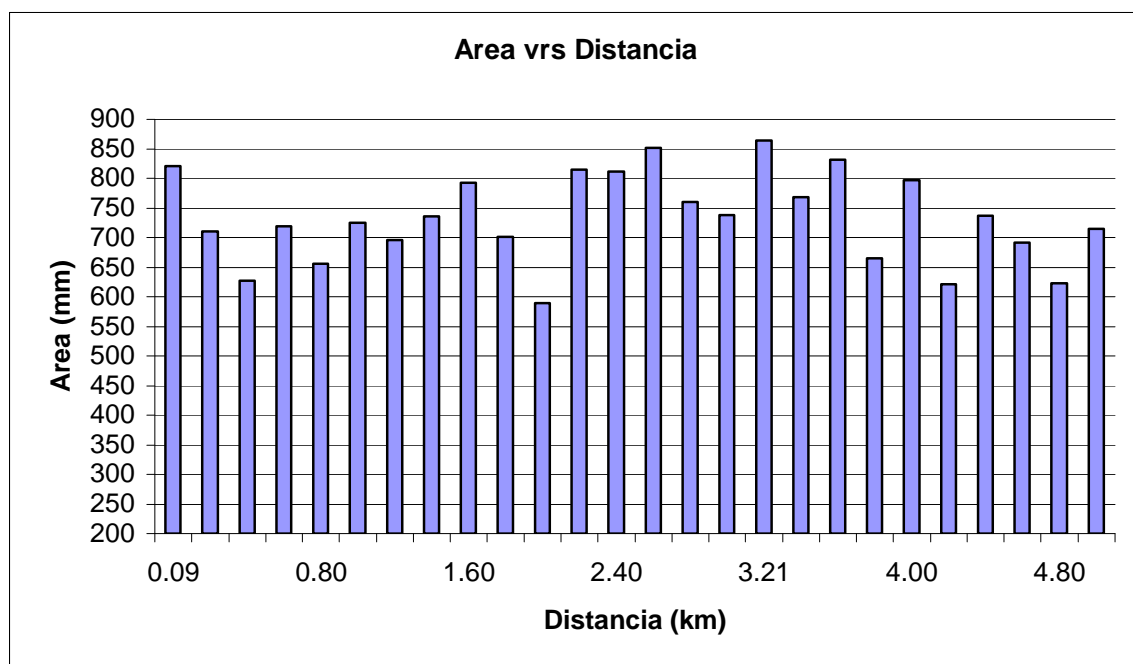
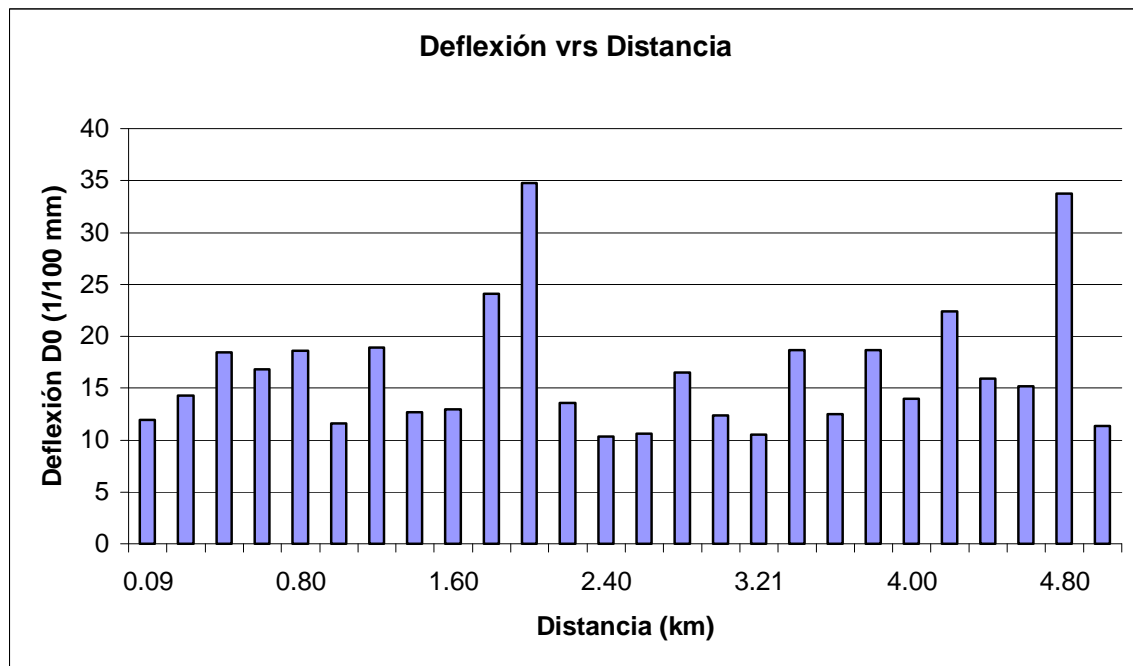


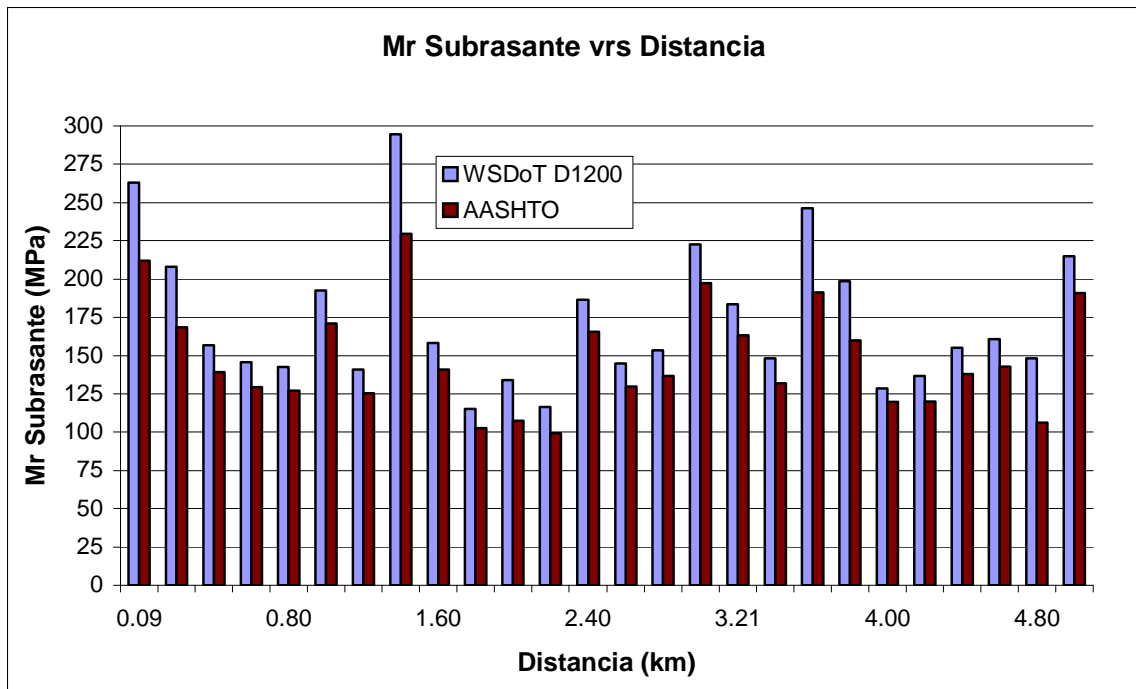


**Tramo Santo Domingo – La Valencia**

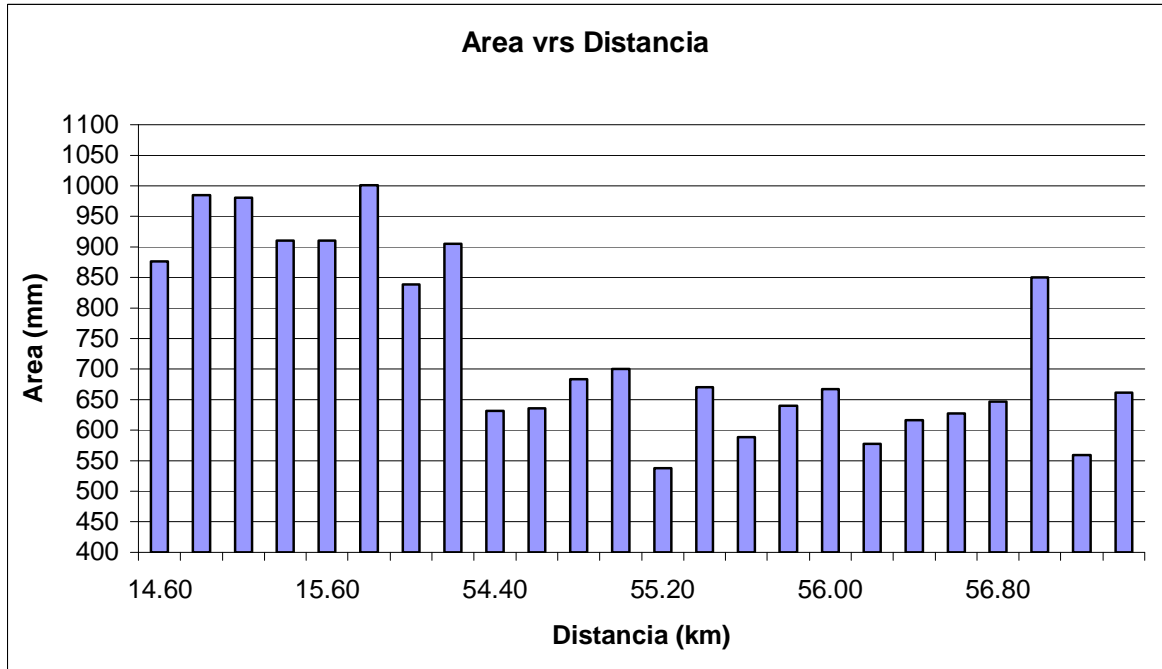
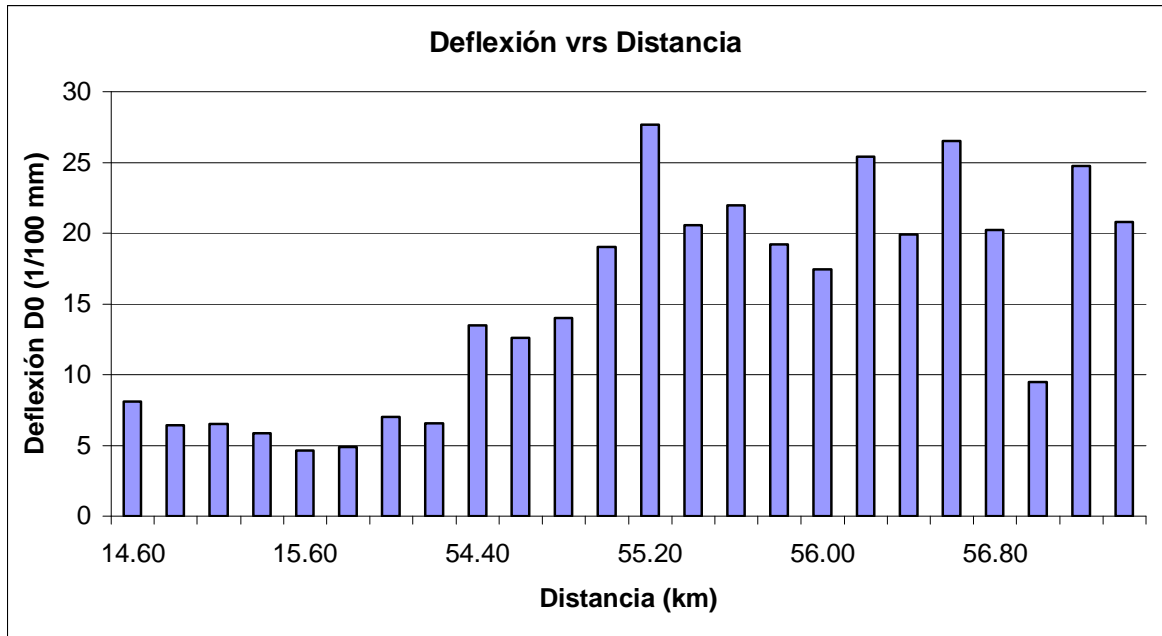


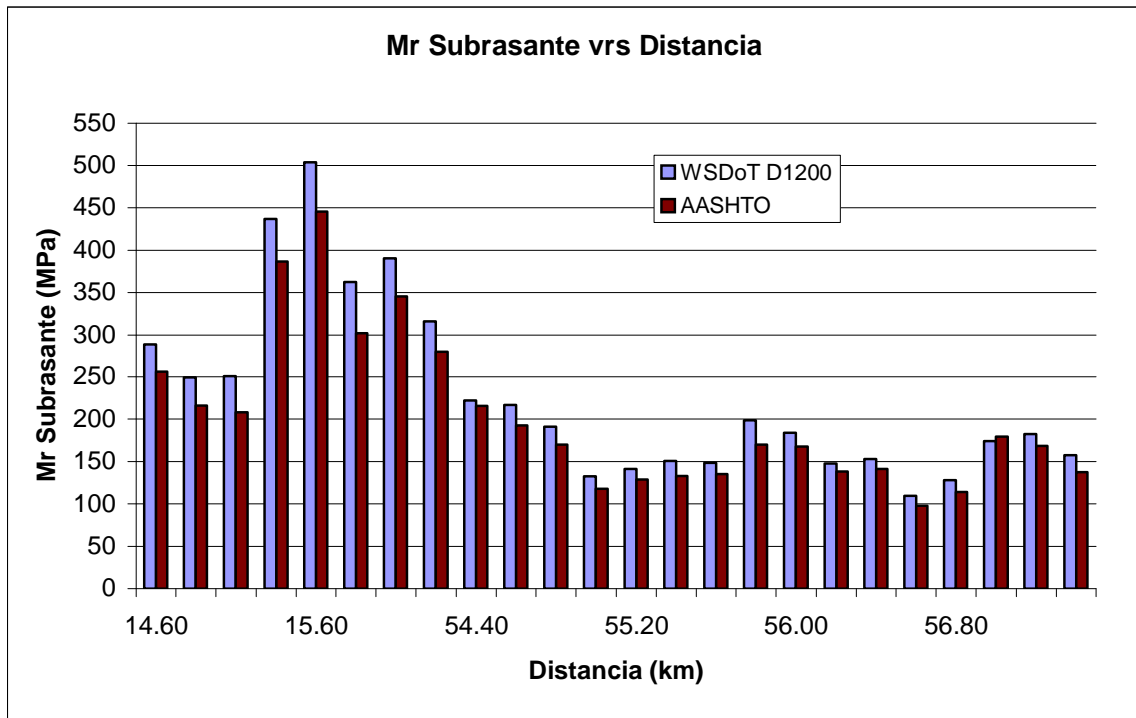
### Tramo Santana - Belén





### Tramo Tárcoles – Jacó – Lomas





**ANEXO III**

**ESQUEMA EXPERIMENTAL**

# **DESARROLLO DE LEYES DE FATIGA PARA BASES ESTABILIZADAS CON CEMENTO DE APLICACIÓN EN COSTA RICA**

## **ESQUEMA EXPERIMENTAL**

### **1. OBJETIVOS**

Desarrollar leyes de fatiga (relaciones de repeticiones de carga vs esfuerzo/deformación unitaria) para bases estabilizadas con cemento; de manera que, dada una estructura de pavimento particular (tipos de materiales y espesores), sea factible, con el soporte de estudios de laboratorio en materiales dosificados según el diseño de la estabilización, determinar la capacidad de carga estimada (en ejes equivalentes o repeticiones por tipo de vehículo).

### **2. COMPONENTES**

#### **Estudio teórico / bibliográfico.**

- Ensayos de caracterización en el laboratorio.
- Leyes de fatiga.
- Modelación multi – capa elástica.
- Modelación con Elemento Finito.

#### **Estudio de proyectos ya construidos.**

- Selección de tramos de observación (8).
- Valoración del paquete estructural existente para cada tramo de observación. Se proponen tramos de análisis de 500 m, con sondeos aleatorios en cada segmento de 100 m.
  - Determinación de materiales y espesores.
  - Determinación de módulos de rigidez por deflectometría y retrocálculo.
  - Historia de cargas: pasadas por tipo de vehículo por año.
  - Información de control de calidad para la base estabilizada con cemento: tipo, resistencia, características de curado.
  - Condiciones climáticas: precipitación y temperatura.
  - Deterioro superficial. Existencia de grietas transversales, nivel de severidad y espaciamiento. Otros tipos de deterioros.
- Muestreo y falla de especímenes de ensayo.
  - Extracción de bloques, vigas y/o núcleos.
  - Falla por compresión simple (bloques o núcleos)



- Falla por flexo – tracción (vigas) Se realizará una modelación multi-capa elástica para definir el tipo de mecanismo de análisis característico para la base estabilizada con cemento: esfuerzo controlado o deformación unitaria controlada. En cada tramo de análisis se muestrearán al menos cuatro especímenes (dos réplicas para dos niveles de esfuerzo controlado o deformación unitaria controlada).

Proyectos para selección de tramos de observación:

- Radial Santa Ana.
- Tárcoles – Jacó – Loma.
- Interamericana Sur.
- Tarbaca – San Ignacio de Acosta.
- El Carmen – Jaboncillal.
- La Valencia – Santo Domingo.

### **Estudio de laboratorio.**

Seleccionando tres fuentes de agregado para estabilización.

Caracterización del agregado:

- Granulometría.
- Límites de Atterberg.
- Gravedad específica y absorción.
- Abrasión en máquina de Los Ángeles.
- Sanidad.

Caracterización del cemento:

- Composición química.
- Gravedad específica.
- Otras propiedades a sugerir por Alejandro y/o don Edgar.

Diseño de estabilización:

Para cada fuente de agregado, se diseñará una base estabilizada BE25 y una base estabilizada BE35.

- Determinación de tres contenidos de cemento. De acuerdo con la clasificación AASHTO y sugerencia de referencias.
- Determinación de gráfica de contenido de humedad vs. resistencia a la compresión simple a los 7 días de curado y a los 28 días de curado.
- Selección de contenidos óptimos de humedad para cada contenido de cemento.

Nota: la cantidad de tratamientos experimentales es 18 (tres fuentes de agregado con tres contenidos de cemento y dos tipos de bases estabilizadas con cemento)

#### Ensayo de resistencia a la flexo – tracción:

- Una vez determinado el modo de ensayo más apropiado (considerando las opciones de esfuerzo controlado y deformación unitaria controlada), se prepararán dos especímenes por tratamiento experimental, para cada uno de tres niveles de esfuerzo controlado o deformación unitaria controlada (seis especímenes por tratamiento). El ensayo se realiza a los 28 días de curados los respectivos especímenes.

#### Modelación:

- A partir de los ensayos de resistencia a la flexo – tracción se define la relación de esfuerzo controlado o deformación unitaria controlada respecto a la cantidad de repeticiones para la falla.
- A partir de la modelación multi – capa elástica y/o por medio de un programa de Elemento Finito, se determinan las cantidades de repeticiones para la falla, para diferentes escenarios de paquete estructural (espesores de capa) y material de base estabilizada (18 tratamientos experimentales).

#### Correlaciones:

- Propiedades del agregado vs. resistencia a la compresión simple.
- Propiedades del agregado vs. resistencia a la flexo – tracción.
- Resistencia a la compresión simple vs. resistencia a la flexo – tracción.
- Espesor de capa de base estabilizada con cemento vs repeticiones para la falla.

### **3. Productos finales.**

- Análisis de varianza para resistencia a la flexotracción considerando los factores: contenido de cemento, contenido de agua y el efecto de bloque de fuente de agregado.
- Repeticiones de carga para la falla vs esfuerzo / deformación unitaria para 18 tratamientos experimentales.
- Repeticiones de carga para la falla vs espesor de capa para 18 tratamientos experimentales.

#### **Nota:**

Posteriores estudios pueden referirse a la comparación de bases estabilizadas con cal y con cemento; así como factores de forma para la falla de bloques a la compresión vs la falla de cilindros (núcleos).

#### 4. Programación de actividades.

**Tabla 1: Programa de actividades original.**

Actividad	Plazo
Análisis de referencias y bibliografía	Abril de 2003.
Selección de tramos	Abril a Mayo de 2003.
Muestreos en tramos de estudio	Mayo a Julio de 2003.
Muestreo en tajos	Mayo a Junio de 2003.
Ensayos de Laboratorio	Junio a Septiembre de 2003.
Análisis estadístico y redacción final	Agosto a Octubre de 2003.

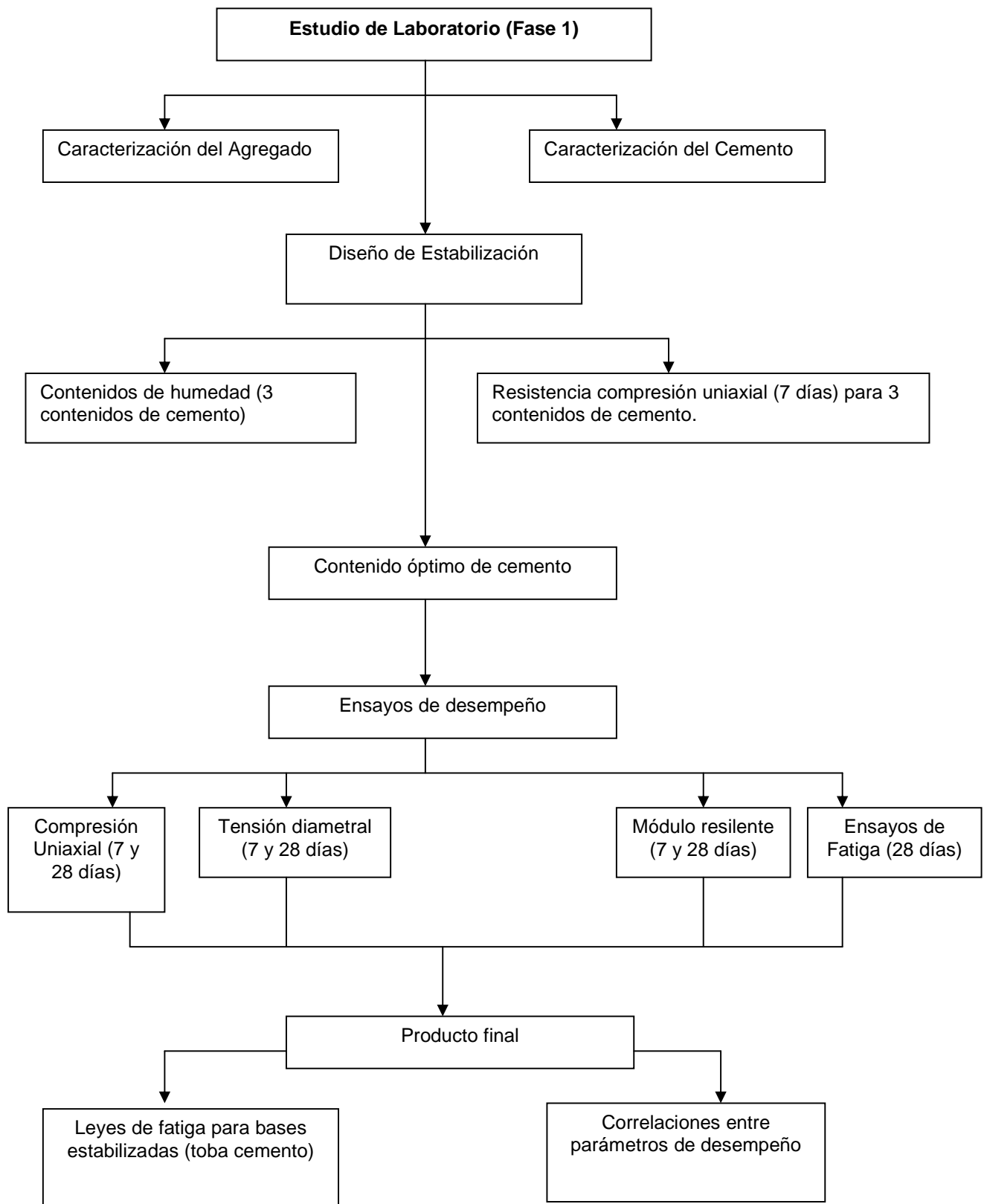
El cronograma sufrió nuevas modificaciones para el período del I semestre del 2004 debido a problemas con el agregado muestreado originalmente, el cual fue completamente descartado dado que era, en primer lugar agregado para mezcla asfáltica con poca cantidad de finos y uno de ellos resultó degradable, actualmente se encuentra en proceso de selección de el nuevo material y se optó por un lastre, para retomar luego agregado granular y finalmente suelo.

Además hay que agregarle el hecho de reasignación del proyecto.

Este cronograma está diseñado para concluir uno de los tres tipos de base estabilizada conocidas en nuestro medio, ya sea, grava-cemento, toba-cemento o suelo-cemento.

**Tabla 2: Programa de actividades actualizado.**

Actividad	Plazo
Análisis de referencias y bibliografía	En proceso de ampliación con referencias del TRB y Universidad de Illinois.
Selección de tramos	Concluido.
Muestreos en tramos de estudio	Realizado en un 40 %.
Muestreo en tajos	reiniciado
Ensayos de Laboratorio	Octubre 2004 a mayo de 2005.
Análisis estadístico y redacción final (fase 1)	junio2005 a julio de 2005.



### Cantidad de especímenes para etapa de laboratorio.

Ensayo	Contenido de cemento	Réplicas	Total especímenes
Compresión inconfiada	3	6 (*)	18
Módulo Ruptura (vigas)	3	6 (*)	18
Tensión diametral	3	6 (*)	18
Módulo resiliente	3	6 (*)	18
Fatiga (vigas)	3	8 (**)	24

(\*) 3 réplicas se fallan a los 7 días y 3 a los 28.

(\*\*) se consideran 2 replicas para 4 niveles de esfuerzo (600, 500, 400 y 300 kPa).

### Complemento de estudio de laboratorio: Ensayo de módulo dinámico

Este ensayo queda sujeto a la disponibilidad del equipo y al tiempo que tome el aprendizaje e implementación de la metodología de ensato. Por lo que se considerará en las siguientes fases.

### Estudio de campo

- Valoración del paquete estructural existente para cada tramo de observación. Se proponen tramos de análisis de 500 m, con sondeos aleatorios en cada segmento de 100 m.
  - Determinación de materiales y espesores.
  - Determinación de módulos de rigidez por deflectometría y retrocálculo.
  - Determinación del patrón de agrietamiento.
  
- Muestreo y falla de especímenes de ensayo.
  - Falla por compresión simple
  - Módulo resiliente
  - Tensión Diametral

### Fases 2 y 3

Se aplicará la misma metodología de estudio de laboratorio para materiales granulares y suelos, una vez concluida esta primera etapa, además se presentará el respectivo cronograma.