

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**DETERMINACIÓN DEL VALOR “C” PARA LA ESTIMACIÓN DEL  
MÓDULO RESILIENTE DE LA SUB-RASANTE OBTENIDO POR  
RETRO-CÁLCULO SEGÚN LA METODOLOGÍA AASHTO-93,  
USANDO EL EQUIPO FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER (FWD)**

**Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de  
Venezuela para optar al Título  
de Especialista en Diseño de Carreteras  
por el Ing. Urbáez P., Ernesto E.**

**Caracas, Mayo 2007**

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**DETERMINACIÓN DEL VALOR “C” PARA LA ESTIMACIÓN DEL  
MÓDULO RESILIENTE DE LA SUB-RASANTE OBTENIDO POR  
RETRO-CÁLCULO SEGÚN LA METODOLOGÍA AASHTO-93,  
USANDO EL EQUIPO FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER (FWD)**

**Tutor Académico: Prof. Ing. Augusto Jugo B. (Ph.D)**

**Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de  
Venezuela para optar al Título  
de Especialista en Diseño de Carreteras  
por el Ing. Urbáez P., Ernesto E.**

**Caracas, Mayo 2007**

© Ernesto Urbáez, 2007  
Hecho Depósito de Ley.  
Depósito Legal Ift4872007620207



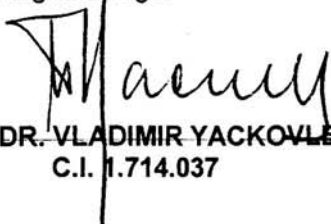
UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
COMISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

Quienes suscriben, Miembros del Jurado designado por el Consejo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, para examinar el Trabajo de Grado presentado por el Ingeniero **ERNESTO ENRIQUE URBÁEZ PEREZ**, portador de la Cédula de Identidad N° V- 6.264.331, bajo el título "**DETERMINACIÓN DEL VALOR "C" PARA LA ESTIMACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUB – RASANTE OBTENIDO POR RETRO-CALCULO SEGÚN LA METODOLOGÍA AASHTO-93, USANDO EL EQUIPO FWD**" a los fines de cumplir con el requisito legal para optar al Grado de "Especialista en Diseño de Carreteras", dejan constancia de lo siguiente:


1.- Leído como fue dicho trabajo por cada uno de los Miembros del Jurado, éste fijó el día 03 de Mayo de 2007, para que el autor lo defendiera en forma pública, lo que éste hizo en la Sala de Conferencias del Departamento de Ingeniería Vial, mediante un resumen oral de su contenido, luego de lo cual respondió **satisfactoriamente** a las preguntas que le fueron formuladas por el Jurado; todo conforme a lo dispuesto en los Artículos 44, 49, 50, 51 y 52 del Reglamento de Estudios de Postgrado.

2.-Finalizada la defensa pública del trabajo, el Jurado decidió **aprobarlo** por considerar, sin hacerse solidario de las ideas expuestas por el autor, que se ajusta a lo dispuesto y exigido en el Reglamento de Estudios de Postgrado.

En fe de lo cual se levanta la presente Acta a los 03 días del mes de Mayo de 2007. Dejándose también constancia de que, conforme a lo dispuesto en la normativa jurídica vigente, actuó como Coordinador del Jurado el Profesor Augusto Jugo.

  
DR. VLADIMIR YACKOVLEV  
C.I. 1.714.037

  
DR. JACOBO CARCIENTE  
C.I. 1.715.379

  
DR. AUGUSTO JUGO  
C.I. 2.458.067

## TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

***“DETERMINACIÓN DEL VALOR “C” PARA LA ESTIMACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUB-RASANTE OBTENIDO POR RETRO-CÁLCULO SEGÚN LA METODOLOGÍA AASHTO-93, USANDO EL EQUIPO FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER (FWD).”***

### TABLA DE CONTENIDO

#### RESUMEN

|   |    |
|---|----|
| 1. INTRODUCCIÓN .....   | 1  |
| 2. EL PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN.....                                 | 4  |
| 2.1 Formulación del Problema .....                                      | 4  |
| 3. OBJETIVO.....  | 8  |
| 3.1 Objetivo General .....  | 8  |
| 3.2 Objetivos Específicos.....  | 8  |
| 4. DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES.....                                  | 9  |
| 5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....                               | 14 |
| 6. MARCO TEÓRICO.....   | 16 |
| 6.1 Módulo Resiliente de Suelos.....                                    | 16 |
| 6.2 Módulo Resiliente de Sitio de la Sub-rasante (MRsitio-sr).....      | 22 |
| 6.3 Programa KENLAYER .....   | 24 |
| 6.4 Módulo Dinámico de Mezclas Asfálticas (MDin-ma) .....               | 29 |
| 6.5 Proceso de Retro-cálculo. Antecedentes .....                        | 31 |
| 6.6 Deflectómetro de Impacto (Falling Weight Deflectometer –FWD-) ..... | 34 |
| 6.7 Modelo de Retro-cálculo AASHTO-93 .....                             | 34 |
| 6.8 Factor de Ajuste “C” .....  | 38 |

|   |    |
|---|----|
| 7. MARCO METODOLÓGICO .....   | 42 |
| 7.1 Tipo de Estudio .....   | 42 |
| 7.2 Población y Muestra.....  | 43 |
| 7.3 Trabajo de Campo .....  | 47 |
| 7.3.1 Módulo Resiliente de Laboratorio de Suelos.....   | 51 |
| 7.3.2 Módulo Dinámico de Materiales Asfálticos.....   | 58 |
| 7.3.3 Método AASHTO-93. Retro-cálculo Modular Madiante el<br>Deflectógrafo de Impacto (FWD) ..... | 60 |
| 7.4 Análisis de los Resultados .....  | 62 |
| 7.5 Alcances y Limitaciones de la Investigación .....   | 65 |
| 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....   | 66 |
| 9. BIBLIOGRAFIA .....   | 68 |
| 10. GLOSARIO DE TÉRMINOS.....   | 70 |

ANEXOS:

A) BASE DE DATOS

B) PROGRAMA KENLAYER. ING. YANG HUANG. UNIVERSIDAD DE KENTUCKY. U.S.A, 1993.

C) PLANILLA RESUMEN RETRO-CÁLCULO MODULAR MÉTODO AASHTO-93.

Urbáez P., Ernesto

**DETERMINACIÓN DEL VALOR "C" PARA LA ESTIMACIÓN DEL  
MÓDULO RESILIENTE DE LA SUB-RASANTE OBTENIDO POR  
RETRO-CÁLCULO SEGÚN LA METODOLOGÍA AASHTO-93,  
USANDO EL EQUIPO FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER  
(FWD).**

**Tutor Académico: Prof. Ing. Augusto Jugo B. (Ph.D). Tesis. Caracas, U.C.V.  
Facultad de Ingeniería. Comisión de Estudios de Postgrado. Año 2007, 71 p.**

**Palabras Claves:** Valor de Ajuste "C", Módulo Resiliente, Retro-cálculo,  
Deflexiones, Falling Weight Deflectometer.

**Resumen.** El presente trabajo especial de grado tiene como objetivo estimar el valor de ajuste "C" usado en el Método AASHTO-93 para el retro-cálculo Modular de los materiales de sub-rasante, mediante la comparación de los Módulos Resilientes obtenidos en laboratorio en muestras de suelos extraídos en una vía existente, y los obtenidos aplicando el Modelo de retro-cálculo AASHTO-93, empleando la medición de deflexiones con el equipo Falling Weight Deflectometer (FWD).

La investigación utiliza una Base de Datos existente con información referente a la auscultación de suelos y pavimento recopilados durante la evaluación de 22.6 kilómetros de la Ruta Provincial No. 6, ubicada en la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

Es importante destacar que este trabajo se realizó con la colaboración de la Dirección de Vialidad de la Provincia de Buenos Aires, Laboratorio del Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (IMAE) de la Universidad Nacional del Rosario (Argentina), el Laboratorio de Pavimentos e Ingeniería Vial (LAPIV) de la Universidad Nacional de La Plata, (Argentina) y las Consultoras: Consulbaires, S.A. y Proyectos y Estudios Especiales, S.A. (PEESA), así como la Empresa Constructora José Cartellone Construcciones Civiles, S.A.

***"DETERMINACIÓN DEL VALOR "C" PARA LA ESTIMACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUB-RASANTE OBTENIDO POR RETRO-CÁLCULO SEGÚN LA METODOLOGÍA AASHTO-93, USANDO EL EQUIPO FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER (FWD)."***

## **1. INTRODUCCIÓN**

El presente trabajo especial de grado surge como una inquietud referente al procedimiento de retro-cálculo modular de la sub-rasante (MRrc-sr) incluido en el Método AASHTO-93<sup>1</sup>, basado en la medición de deflexiones con el equipo Falling Weight Deflectometer (FWD).

El Método AASHTO-93 es un resultado del Experimento Vial AASHTO, el cual se llevó a cabo en los Estados Unidos de América en la década de 1950, y corresponde a un experimento a escala real eligiéndose un tramo de la Ruta Interestatal 80 en las proximidades de la ciudad de Ottawa, Illinois.

Dicho experimento fue totalmente controlado, asegurándose que se colocaron los últimos 90 cm. de la fundación o sub-rasante de un suelo seleccionado tipo A-6, con Capacidad Soporte California (CBR) saturado de laboratorio entre 2 y 4%. Para este tipo de suelos se calculó un Módulo Resiliente de Laboratorio (MRlab-sr), de 3.000 psi (lbs./pulg.<sup>2</sup>), producto de la aplicación de un esfuerzo desviador de 6,0 psi.

---

<sup>1</sup> "AASHTO GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURES-1993". Publicada por la American Association of State Highway and Transportation Officials de los Estados Unidos de América.



Es importante destacar, que para suelos cohesivos similares a los del Experimento Vial AASHTO, el módulo de elasticidad se incrementa rápidamente para esfuerzos desviadores menores de 6,0 psi., en vista del comportamiento tenso-dependiente del suelo.

Este hecho produce que -en general- los módulos obtenidos por procesos de retro-cálculo usando la metodología AASHTO-93, sean superiores al esperado, ya que el procedimiento plantea estimar el módulo de la sub-rasante a una distancia lo suficientemente alejada del punto de aplicación de la carga, donde la deflexión del pavimento sea el producto de la deformación sólo de la sub-rasante, por lo que el esfuerzo desviador se reduce considerablemente.

Dentro de este último aspecto, el Método AASHTO-93, incorpora un valor "C" que permite ajustar el valor del  $MR_{rc-sr}$  para suelos finos similares a los del Experimento Vial y alerta acerca del uso de este valor de ajuste, en vista que el mismo responde a los resultados obtenidos en los suelos del experimento, por lo que recomienda estimar un valor "C" propio o característico para los suelos en cada proyecto en particular.

**En base a los aspectos discutidos, el presente trabajo persigue estimar el valor "C" usado en el Método AASHTO-93, mediante la comparación de los Módulos Resilientes obtenidos en laboratorio ( $MR_{lab-sr}$ ) en muestras de suelos extraídos en una vía existente, y los obtenidos aplicando el Modelo de Retro-cálculo AASHTO-93 ( $MR_{rc-sr}$ ) usando el equipo FWD.**

Cabe destacar, que para la ejecución de la presente investigación se tienen adelantados los trabajos de evaluación de campo y laboratorio en un tramo de 22.6 km. de la Ruta Provincial No. 06 entre la ciudad de Pavón y la ciudad de Campana, ubicada en la Provincia de Buenos Aires, Argentina, los cuales se encuentran agrupados en una Base de Datos.

## 2. EL PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

### 2.1 Formulación del Problema

Como se indicó, dentro de los procedimientos incluidos en la Guía AASHTO-93, se encuentra la determinación del **Módulo Resiliente de la sub-rasante (MR<sub>sr</sub>)**, el cual es una medida de las propiedades elásticas de los suelos de fundación del pavimento, considerando su comportamiento no lineal ante las sollicitaciones de carga, y puede ser determinado en base a ensayos de laboratorio, los cuales son complicados y costosos, en vista que requieren de una cámara triaxial que permita impartir esfuerzos repetidos a la muestra de suelos (esfuerzo desviador), similares a los que ocurren durante el paso de las cargas repetidas de tráfico. En el caso de pavimentos existentes se requiere tomar muestras de suelo en sitio y por lo tanto la ejecución de calicatas, con la necesaria afectación al tránsito y ejecución de ensayos destructivos. Sin embargo, este procedimiento de ensayo se considera como el más adecuado, por cuanto el Módulo Resiliente es una medida de las propiedades elásticas de los suelos y su valor está directamente relacionado con el esfuerzo desviador, densidad, humedad y en general con el estado de esfuerzos en que se encuentra sometido el suelo, características que pueden ser modeladas durante la ejecución del ensayo de laboratorio.

Cabe destacar que la correcta caracterización de este parámetro (Módulo Resiliente) es de suma importancia en cualquier proceso de diseño de pavimentos, ya que representa un insumo básico de diseño y permite la

caracterización del suelo para predecir su futuro comportamiento como fundación del pavimento.

La Guía AASHTO-93 incluye varios procedimientos para determinar el MR<sub>s</sub>, dentro de los que destaca su obtención por procedimientos de retro-cálculo a través de la medición de deflexiones por Ensayos No Destructivos (NDT).

Los procesos de retro-cálculo no son más que una aproximación del estado de esfuerzos de una estructura de pavimento en base a una deflexión medida durante la aplicación de una carga.

Dentro de este último aspecto, existen distintas metodologías y equipos para medir deflexiones en un pavimento, entre las más difundidas hoy en día se encuentra el Falling Weight Deflectometer (FWD), el cual es un equipo de medición de deflexiones basado en impulsos de carga. La transmisión de la carga a la estructura es similar a la que produce un eje de un vehículo circulando a una cierta velocidad sobre el pavimento.

Su principal ventaja la representa su rapidez para medir las deflexiones en forma continua, además de que no requiere la toma de muestras, lo cual lo convierte en uno de los NDT más usado a nivel mundial para la estimación de deflexiones e indirectamente el módulo de elasticidad de los materiales.

Debido a los costos involucrados en la adquisición de equipos de laboratorio que permitan estimar el MR<sub>s</sub>, la necesidad de tomar muestras de suelo en sitio, ejecución de ensayos destructivos (en el caso de los pavimentos en servicio), etc., hacen de los modelos de retro-cálculo basados en la medición de deflexiones con

FWD, una herramienta de gran utilidad dentro de la ingeniería de pavimento, especialmente para la evaluación de pavimentos existentes.

El Modelo AASHTO-93 permite estimar el MR<sub>sr</sub> en base a la carga aplicada por el equipo FWD y la deflexión ( $d_r$ ) medida a una distancia "r" del punto de deflexión máxima. Sin embargo, según las recomendaciones incluidas en la Guía de Diseño AASHTO-93, los resultados obtenidos de Módulo Resiliente para la sub-rasante deben ser corregidos por un factor de ajuste (C), en vista que los módulos retro-calculados resultaron superiores a aquellos obtenidos en el laboratorio, para los suelos característicos del Experimento Vial AASHTO.

El método recomienda un valor "C" de 0,33 para ajustar el valor del Módulo Resiliente por retro-cálculo, para suelos finos similares a los del Experimento Vial. Sin embargo, el Método alerta acerca del uso de este valor "C" de 0,33; en vista que el mismo responde a los resultados obtenidos en los suelos del Experimento Vial y en distintos proyectos con suelos similares, por lo que recomienda estimar un valor "C" propio o característico para los suelos de cada proyecto en particular.

**En base a los aspectos discutidos, se plantea como problema de esta investigación, estimar el MR<sub>sr</sub> haciendo uso de la metodología de retro-cálculo incluida en el Método AASHTO-93 y calcular el factor de ajuste "C" mediante la comparación de los resultados de MR<sub>lab-sr</sub> y el MR<sub>rc-sr</sub>, empleando para ello una base de datos de una vía existente.**

Esto permitiría aplicar el Modelo de retro-cálculo AASHTO-93, con un valor "C" propio para los suelos estudiados, aumentando la confiabilidad del modelo y

permitiendo el uso de una herramienta tan importante como el FWD para la medición de deflexiones en el pavimento.

### **3. OBJETIVO**

#### **3.1 Objetivo General**

Obtener un factor de ajuste "C" para la estimación del Módulo Resiliente de la sub-rasante por procedimientos de retro-cálculo, según la Metodología incluida en la Guía de Diseño AASHTO-93, haciendo uso de los resultados de campo y laboratorio de una Base de Datos existente.

#### **3.2 Objetivos Específicos**

- Analizar la metodología para la estimación del Módulo Resiliente de la sub-rasante por procedimientos de retro-cálculo, según el Método AASHTO-93.
- Plantear una metodología para estimar el Módulo Resiliente de Sitio de la sub-rasante (MRsitio-sr), que permita estimar el factor de ajuste "C" incluido en la metodología AASHTO-93, para el retro-cálculo modular de la sub-rasante.
- Iniciar la creación de una Base de Datos contentiva de factores de ajuste "C" que permita su utilización en vías con suelos de características similares a los evaluados en la presente investigación.

#### 4. DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES

Según algunos autores, entre los que destaca la Lic. Aura Marina Bavaresco, las variables representan las diferentes condiciones, cualidades, características o modalidades que asumen los objetos en estudio desde el inicio de la investigación. Según la autora, para que las variables permitan medir los conceptos teóricos, deben llevarse a sus referentes empíricos, es decir, expresarse en indicadores que cumplan tal función, por lo que se debe ir de lo más teórico a lo real empírico, al dato o lo que es lo mismo al hecho. Esto significa operativizar variables, para lo cual se requiere precisar su valor, traduciéndolas de conceptos teóricos a conceptos medibles.

Según Carlos Méndez, “Metodología”, año 1992, *“...Operacionalizar las hipótesis equivale a descender el nivel de abstracción de las variables y de esta forma hacer referencia empírica de las mismas, implica, desglosar la variable por medio de un proceso de deducción lógica en indicadores, los cuales se refieren a situaciones específicas de las variables...”*

Por otro lado, Nubia Ortiz y Carlos Méndez, “La Elaboración de un Proyecto de Investigación”, año 2005, definen cuatro tipos de Variables según el nivel de medición que representan, las cuales se describen a continuación:

- Variables Cualitativas: son aquellas que se refieren a cualidades o atributos no medibles en números. Por ejemplo: organización, personal y funciones.



- Variables Cuantitativas: son las susceptibles de medirse en términos numéricos.  
Se sub-dividen en: (a) Cuantitativas Continuas: pueden asumir cualquier valor y  
(b) Cuantitativas Discontinuas: asumen valores enteros.
- Variables Independientes: expresan las causas del fenómeno. Por ejemplo: el valor de la deflexión.
- Variables Dependientes: expresan las consecuencias del fenómeno. Por ejemplo: el Módulo Resiliente retro-calculado.

En base a los aspectos discutidos y definiciones presentadas, nuestra investigación enmarca sus variables dentro del tipo *Cuantitativo*, tanto dependientes como independientes, en vista que las mismas deben ser medidas y presentadas en forma objetiva.

El cuadro que se incluye a continuación presenta las principales Variables Cuantitativas consideradas, las cuales están definidas con su respectivo indicador, el cual se definió como Variable Operativa.

| VARIABLE CUANTITATIVA                                | TIPO DE VARIABLE | VARIABLE OPERATIVA  |
|--|------------------|---|
| Deflexión del Pavimento.                             | Independiente    | Medidas con el Equipo Falling Weight Deflectometer (FWD).   |
| Módulo Resiliente de Laboratorio de la Sub-rasante.  | Independiente    | Ensayo AASHTO, DESIGNATION: T 294-92. (1992). “Resilient Modulus of Unbound Granular Base/Subbase Materials and Subgrade Soils-SHRP Protocol P46. U.S.A.                            |
| Módulo Resiliente de Sitio de la Sub-rasante.        | Independiente    | Programa KENLAYER, Yang H. Huang. Universidad de Kentucky, 1993, U.S.A.   |
| Módulo Resiliente Retro-calculado de la Sub-rasante. | Dependiente      | Método “AASHTO GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURES-1993”. Publicada por la American Association of State Highway and Transportation Officials de los Estados Unidos de América. |
| Valor “C”  | Dependiente      | Cociente entre el Módulo Resiliente Retro-calculado de la Sub-rasante y Módulo Resiliente de Sitio de la Sub-rasante.   |

Es importante destacar, que la presente investigación es estrictamente experimental, por lo que involucra ensayos de laboratorio, y por lo tanto la necesidad de considerar una gran cantidad de variables, tanto dependientes como independientes, que requieren ser medidas. Es por ello que el cuadro de variables mostrado sólo presenta las que se consideran más importantes.

A continuación se discuten cada una de las variables indicadas y como intervienen dentro de la presente investigación:

a) Deflexión del Pavimento:

Esta variable corresponde a la variable independiente y representa el estímulo para el cual se estimará el Módulo Resiliente retro-calculado de la sub-rasante (MRrc-sr). Es una variable cuantitativa y es medida a través del Equipo Falling Weight Deflectometer (FWD).

b) Módulo Resiliente de Laboratorio de la Sub-rasante (MRlab-sr):

Dentro del contexto de esta investigación ésta variable es independiente y permitirá estimar el Módulo Resiliente de la sub-rasante considerando su comportamiento tenso-dependiente. Corresponde a un valor de ensayo de laboratorio cuya designación es la siguiente: T 294-92. (1992). "Resilient Modulus of Unbound Granular Base/Subbase Materials and Subgrade Soils-SHRP Protocol P46. U.S.A.

c) Módulo Resiliente de Sitio de la Sub-rasante (MRsitio-sr):

Esta variable es independiente y esta asociada directamente con el MRlab-sr, la misma es estimada en base al Programa KENLAYER, desarrollado por el Ing. Yang H. Huang de la Universidad de Kentucky, U.S.A. en 1993.

d) Módulo Resiliente Retro-calculado de la Sub-rasante (MRrc-sr):

Esta es una de las principales variables dependientes de la investigación, en vista que esta asociada al valor de la deflexión medida con el equipo FWD, y ésta varía en función de la deflexión. Esta variable es estimada en base al Método "AASHTO

GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURES-1993". Publicada por la American Association of State Highway and Transportation Officials de los Estados Unidos de América.

e) Valor "C":

Esta variable corresponde al objetivo de la investigación y es una variable dependiente del cociente entre el Módulo Resiliente de Sitio de la Sub-rasante y el Módulo Resiliente Retro-calculado de la Sub-rasante.

## **5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

El tema planteado en la presente investigación se enmarca específicamente dentro de los objetivos de las Asignaturas de Diseño de Pavimentos y Mantenimiento y Rehabilitación de Pavimentos, las cuales forman parte del Pensum de Estudios de la Especialización en Diseño de Carreteras.

En el estudio de las asignaturas indicadas se realizaron análisis estructurales de pavimentos para la determinación de los espesores de las capas de nuevos pavimentos o espesores de refuerzo en el caso de pavimentos existentes. Dichos análisis estructurales consideran la capacidad soporte de los diferentes materiales que conforman la estructura de pavimento, siendo la sub-rasante determinante en los diseños debido a su carácter de fundación del pavimento, razón por la cual su caracterización es fundamental.

La investigación planteada revisa una metodología para caracterizar de manera indirecta la capacidad soporte de la sub-rasante utilizando un equipo de medición de deflexiones de pavimento de última tecnología y alto rendimiento, empleando para ello el análisis de los resultados de campo y laboratorio de una vía en servicio, incluidos en una Base de Datos conformada para tal fin.

Es importante destacar, que las características de la vía evaluada son ideales para aplicar el procedimiento planteado, en vista que el tipo de estructura (pavimento flexible) y materiales que la conforman, corresponden a los empleados en el Experimento Vial AASHTO, así como para la construcción de pavimentos en nuestro país, por lo que los resultados obtenidos se consideran válidos y de gran

utilidad para ser empleados en la estimación por retro-cálculo del Módulo Resiliente de la Sub-rasante a través de la metodología AASHTO-93.

## 6. MARCO TEÓRICO

Dentro del marco teórico de la presente investigación es importante discutir los diferentes conceptos asociados a la misma, en especial el concepto de Módulo Resiliente de suelos y Módulo Dinámico de Mezclas Asfálticas, así como el de Retro-cálculo por el Método AASHTO-93 y sus antecedentes, con la finalidad de considerar la mayor cantidad de variables involucradas y hacer los procedimientos comparables.

### 6.1 Módulo Resiliente de Suelos

El Módulo Resiliente es una medida de la capacidad soporte de los suelos considerando su comportamiento no lineal, en definitiva el Módulo Resiliente considera la deformación recuperable de los suelos ante la aplicación de un esfuerzo, su formulación en general es la siguiente<sup>2</sup>:

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_a}$$

donde:

MR: Módulo Resiliente.

$\sigma_d$  : Esfuerzo desviador axial.

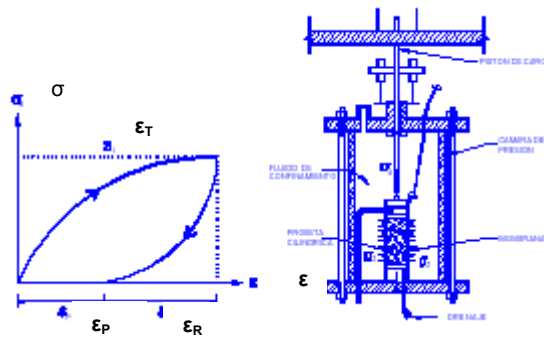
$\epsilon_a$  : Deformación axial unitaria recuperable.

El ensayo de Módulo Resiliente consiste básicamente en someter a una probeta de material a un estado de esfuerzos compuesto por una presión de confinamiento y un esfuerzo desviador dinámico, de tal manera de reproducir las mimas

---

<sup>2</sup> Yoder And Witczak, 1975. "Principles of Pavement Design, Second Edition, U.S.A.

condiciones en que se encuentra un suelo en un camino cuando es solicitado por una carga impartida por un vehículo circulando a cierta velocidad. La figura 1 muestra una respuesta típica durante la ejecución del ensayo, así como el esquema de la cámara triaxial.

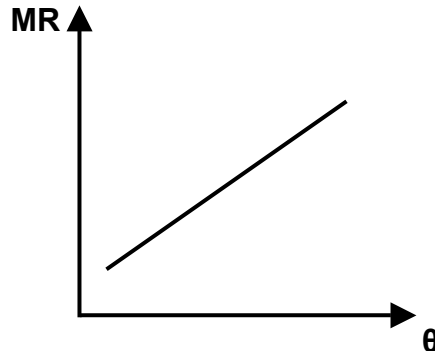


**FIGURA 1. ESQUEMA TÍPICO DEL CICLO DE CARGA Y DESCARGA.  
CÁMARA TRIAXIAL DE ENSAYO.**

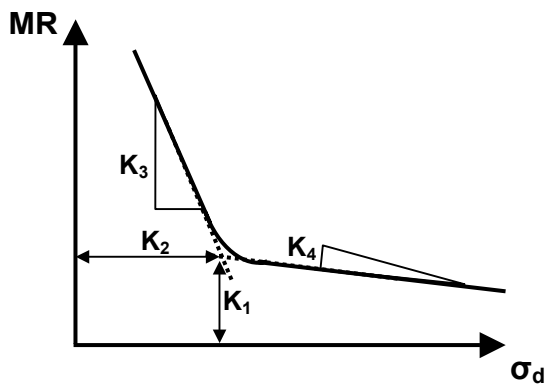
El ensayo puede ser ejecutado para cualquier tipo de material desde un suelo cohesivo hasta un estabilizado granular. Sin embargo, las condiciones de ensayo, por ejemplo: el estado de esfuerzos, condiciona la respuesta del Módulo Resiliente para distintos tipos de materiales. En base a esta consideración se han definido distintas formulaciones para estimar el Módulo Resiliente en suelos friccionales (granulares), los cuales pueden ser de bases, sub-bases o sub-rasantes y para suelos cohesivos (finos) generalmente de sub-rasante. A continuación se muestra un comportamiento típico, tanto de los materiales cohesivos como friccionales:



A.- Suelos Friccionales:



b.- Suelos Cohesivos:



Las características en el comportamiento de la variación del Módulo Resiliente con el estado de esfuerzos mostrado, ha permitido definir las siguientes ecuaciones para los distintos suelos<sup>3</sup>:

a.- Suelos Cohesivos:

$$MR = K_1 + K_3(K_2 - \sigma_d) \quad \text{para } \sigma_d < K_2 \quad (\text{Ec. 1.1})$$

$$MR = K_1 - K_4(\sigma_d - K_2) \quad \text{para } \sigma_d > K_2 \quad (\text{Ec. 1.2})$$

<sup>3</sup> Yang H. Huang, 1993. "Pavement Analysis and Design, University of Kentucky, U.S.A.

b.- Suelos Friccionales:

$$MR = K_1 \theta^{K_2} \quad (\text{Ec. 2})$$

donde:

MR: Módulo Resiliente.

$\sigma_d$  : Esfuerzo desviador axial.

$\Theta$  : Sumatoria de esfuerzos principales o primer invariante de esfuerzos.

$K_1$ ;  $K_2$ ;  $K_3$  y  $K_4$ : Constantes experimentales que dependen de las características del suelo, densidad y humedad.

Se han presentado otras correlaciones entre el Módulo Resiliente y el estado de esfuerzos en la masa del suelo, producto de ensayos de laboratorio, tales como las publicadas por el equipo de investigadores del Laboratorio del Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (IMAE) de la Universidad Nacional del Rosario (Argentina), las cuales relacionan, tanto el esfuerzo desviador ( $\sigma_d$ ) como la sumatoria de esfuerzos principales ( $\theta$ ), mediante constantes experimentales, únicas para el material de ensayo. A continuación se indican las ecuaciones desarrolladas:

a)  $MR = A(\theta)^B (\sigma_d)^C \quad (\text{Ec. 3})$

b)  $MR = D(\sigma_d)^E (\sigma_3)^F \quad (\text{Ec. 4})$

c)  $MR = G(\sigma_d)^H \quad (\text{Ec. 5})$

donde:

MR: Módulo Resiliente.

$\sigma_d$  : Esfuerzo desviador axial.

$\Theta$  : Sumatoria de esfuerzos principales o primer invariante de esfuerzos.

$\sigma_3$  : Esfuerzo de confinamiento lateral.

A; B; C; D; E; F y G: Constantes experimentales que dependen de las características del suelo, densidad y humedad.

Para la ejecución del Ensayo de Módulo Resiliente de Laboratorio se aplicó el ensayo: AASHTO, DESIGNATION: T 294-92. (1992). "Resilient Modulus of Unbound Granular Base/Subbase Materials and Subgrade Soils-SHRP Protocol P46", U.S.A. Este ensayo consiste principalmente, en aplicar un número determinado de repeticiones de un esfuerzo desviador dinámico ( $\sigma_d$ ), sobre la probeta sometida previamente a una presión de confinamiento estática ( $\sigma_3$ ), en una cámara de presión triaxial. Las secuencias de carga dependen del tipo de material a ensayar, por su parte el esfuerzo desviador corresponde a un pulso dinámico aplicado desde una celda de carga. Los materiales se clasifican en Tipo 1 (cohesivo) y Tipo 2 (friccional) de acuerdo al criterio definido en la misma norma AASHTO T294-92.

Durante el ensayo se miden y registran el esfuerzo desviador aplicado ( $\sigma_d$ ) y la deformación recuperable de los últimos 5 ciclos de cada secuencia. Con éstos datos se calcula el valor del Módulo Resiliente promedio de la secuencia, mediante las ecuaciones incluidas en el método, de esta forma, se obtiene para cada secuencia de ensayos un conjunto de valores promedio MR,  $\sigma_d$  y  $\sigma_3$ , que

permiten determinar el comportamiento resiliente del material ensayado, a partir del ajuste de regresiones sobre los resultados obtenidos.

Cabe destacar, que en el caso particular de los materiales encontrados en el tramo en estudio, no se reportaron suelos eminentemente friccionales (granulares), por lo que se ejecutó el ensayo de Módulo Resiliente Tipo 1, para suelos cohesivos.

En vista de la condición tenso-dependiente del módulo de elasticidad de los suelos, lo cual implica que el Módulo Resiliente no posea un valor único y por el contrario se requiera conocer los esfuerzos a que esta sometida la masa del suelo para conocerlo, el Método AASHTO-93 recomienda que el Módulo Resiliente de los suelos de fundación sea estimado para un esfuerzo desviador de 6.0 psi (0.0414 MPa) para suelos similares a los del Experimento Vial.

Sin embargo, estimar el Módulo Resiliente para un esfuerzo desviador constante de 6.0 psi (0.0414 MPa), puede producir discrepancias importantes con respecto al módulo de trabajo o de sitio del material, en vista que éste depende del estado de sollicitaciones en que se encuentre el suelo.

Con la finalidad de estimar un Módulo Resiliente de la sub-rasante, que responda a un estado de esfuerzos tal, que represente la condición en sitio y de esa forma compararlo con el obtenido por el procedimiento de retro-cálculo incluido en el Método AASHTO-93, el presente trabajo plantea definir un Módulo Resiliente de Sitio de la sub-rasante (MRsitio-sr), que permita considerar las ecuaciones constitutivas de los materiales, evaluados para un estado de esfuerzos impartido

por el paso de una carga estándar por la sección de pavimento en estudio. Este Módulo Resiliente de Sitio será comparado con los obtenidos para un esfuerzo desviador de 6.0 psi.

A continuación se discuten los aspectos más importantes del procedimiento planteado para estimar el MRsitio-sr.

## **6.2 Módulo Resiliente de Sitio de la Sub-rasante (MRsitio-sr)**

Como se indicó, el presente trabajo plantea definir un Módulo Resiliente de Sitio de la sub-rasante (MRsitio-sr) que permita considerar un estado de esfuerzos tal que represente la condición de trabajo del suelo durante el paso de las cargas. Este Módulo Resiliente se considera como el de **referencia o piloto** para ser comparado con el obtenido por el procedimiento de retro-cálculo, incluido en el Método AASHTO-93, y de ésta manera estimar el valor "C" incluido en el método.

Dentro de los aspectos mas importantes que debe considerar el MRsitio-sr, de tal manera que el mismo pueda representar las condiciones de trabajo del material, se encuentran los componentes de los esfuerzos en la masa del suelo.

El primero de ellos esta relacionado con el esfuerzo Geostático  $-P_o-$ , el cual se debe al peso propio del suelo (densidad  $-\gamma-$ ) y en definitiva de las distintas capas que conforma la estructura de pavimento (espesor del pavimento existente, profundidad  $-z-$ ).

En este sentido es de suma importancia conocer la profundidad a la cual se van a evaluar los esfuerzos en la masa del suelo para la determinación del MRsitio-sr,

en vista que el esfuerzo geostático ( $P_o$ ) tendrá un aporte diferente en función de la profundidad, debido al incremento del peso propio del suelo ( $\gamma z$ ).

En el caso particular de la presente investigación, el estado de esfuerzos para la determinación del Módulo Resiliente de los materiales de base y/o sub-rasante, se realizó en el punto medio de cada una de las capas.

En lo que respecta a la sub-rasante, el estado de esfuerzos se determinó a diferentes profundidades: 30 cm.; 50 cm.; 65 cm.; 85 cm. y 150 cm. y se consideró que el Módulo Resiliente de la sub-rasante mas representativo corresponde al obtenido a una profundidad de 50 cm., en vista que esta profundidad es la normalmente empleada para evaluar el comportamiento de este material.

El esfuerzo geostático ( $P_o$ ) tiene diferentes aportes para el esfuerzo de confinamiento  $\sigma_3$ ;  $\sigma_d$  y  $\theta$ , en función de la constante de empuje lateral ( $K_o$ ), la cual se estimó para los suelos finos en función del Módulo de Poisson ( $\nu$ ).

El segundo componente de esfuerzo considerado en esta investigación, lo representa la carga dinámica impartida por el paso de los vehículos sobre la estructura de pavimento.

En este caso, se estimaron los esfuerzos producidos por el paso de una carga patrón de 40 KN aplicado por un eje simple estándar, en vista que ésto es lo que consideran la mayoría de los métodos de diseño.

Tomando en cuenta los aspectos discutidos, se debe destacar que emplear un esfuerzo desviador constante de 6.0 psi, como lo plantea el Método AASHTO,

para evaluar las ecuaciones constitutivas obtenidas del ensayo de laboratorio, puede producir valores inconsistentes de Módulo Resiliente.

Existen distintos procedimientos y programas de computación que consideran los dos componentes de esfuerzos discutidos anteriormente, en el caso particular de la presente investigación se empleó como herramienta el Programa KENLAYER, desarrollado por el Ing. Yang Huang de la Universidad de Kentucky en 1993.

A continuación se discuten algunas características del programa.

### **6.3 Programa KENLAYER**

La característica principal del programa KENLAYER la representa su posibilidad de realizar el análisis de sistemas elásticos multicapas solicitados por una carga circular, considerando el comportamiento del pavimento tanto lineal como no lineal, lo cual lo convierte en un programa muy versátil en el momento de modelar la estructura del pavimento.

En definitiva el programa centra su análisis en la estimación del esfuerzo en la masa del suelo debido al paso de los vehículos y al peso propio de la estructura de pavimento, aspectos discutidos anteriormente. Esta información es muy importante, ya que el ensayo de laboratorio de Módulo Resiliente de suelos produce una curva, caracterizada por las ecuaciones constitutivas, de variación del módulo con respecto a los esfuerzos a que está sometido el material, por lo que la principal incógnita la representa el estado de esfuerzos a que esta sometido el suelo, con la finalidad de determinar el Módulo Resiliente.

KENLAYER emplea el análisis lineal multicapas, en el cual cada uno de los materiales que conforman la estructura de pavimento presentan un espesor finito en dirección vertical a excepción de la última capa (sub-rasante), la cual tiene un espesor infinito. Todos los materiales están caracterizados con un módulo de elasticidad ( $E_i$ ) y el coeficiente de poisson ( $\nu_i$ ). Por otra parte, todas las capas en dirección horizontal tienen un espesor infinito. Las principales características del programa, relacionadas con la estimación de los esfuerzos en la masa del suelo, son las siguientes:

- Análisis de Sistema Elástico Multicapas, lo cual permite analizar pavimentos constituidos por varias capas, con diferentes módulos de elasticidad, espesores y relación de poisson.
- Permite analizar los esfuerzos debido a la superposición de los bulbos de presión de cargas múltiples impartidas por vehículos con ejes simples, dobles y triples. Este caso es una generalización del análisis de sistemas multicapas solicitadas por cargas impartidas por un eje sencillo.
- Análisis del comportamiento de los suelos considerando la variación de los módulos de elasticidad con el estado de esfuerzos. Esta es una característica muy importante del programa, en vista que -en general- los suelos varían su módulo resiliente con el estado de esfuerzos a que están sometidos.



En este sentido el programa presenta diferentes relaciones para suelos friccionales y suelos cohesivos. En general los suelos friccionales muestran un incremento del Módulo Resiliente en la medida que se incrementa el primer invariante de esfuerzos ( $\Theta$ ), siendo el mismo igual a la sumatoria de los esfuerzos principales ( $\sigma_1$ ;  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ ), incluyendo el peso de cada una de las capas que conforman la estructura de pavimento:

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \gamma z(1 + 2K_0)$$

Cabe destacar que,  $\gamma$  corresponde al promedio del peso unitario de cada capa,  $z$  es la distancia debajo de la superficie en la cual se desea determinar el módulo y  $K_0$  es el coeficiente de presión lateral del suelo.

En lo que respecta a los suelos cohesivos, el Módulo Resiliente decrece en la medida que se incrementa el esfuerzo desviador ( $\sigma_d$ ). En el ensayo de laboratorio, por lo general,  $\sigma_2 = \sigma_3$ , por lo que el esfuerzo desviador se define como:

$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$$

En el ensayo de laboratorio es posible que  $\sigma_2$  no sea igual a  $\sigma_3$ , por lo que  $\sigma_3$  se considera como el promedio entre  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ .

En definitiva el esfuerzo desviador ( $\sigma_d$ ), considerando el peso de las diferentes capas que conforman la estructura del pavimento, queda expresado de la siguiente manera:

$$\sigma_d = \sigma_1 - 0.5(\sigma_2 + \sigma_3) + \gamma z(1-K_0)$$

- El punto para la determinación de los esfuerzos puede ser indicado en coordenadas radiales o en coordenadas cartesianas.

Para la estimación del estado de esfuerzos y en definitiva el Módulo Resiliente de los suelos, el programa opera con un proceso iterativo, en el cual se le introducen módulos iniciales de cada material (semillas) y los mismos son evaluados en la primera iteración, si existe una diferencia con la tolerancia previamente establecida, se cambian los módulos semillas por los anteriormente calculados y se repite nuevamente el procedimiento, hasta que el Módulo Resiliente converge con el valor anterior.

En el caso particular de la presente investigación, el programa fue empleado para estimar el Módulo Resiliente de Sitio de cada uno de los materiales que conforman la estructura del pavimento, incluyendo la sub-rasante, en las nueve (9) calicatas empleadas para la investigación. Para ello se consideró el comportamiento no lineal de los materiales a través de las ecuaciones constitutivas definidas en el ensayo de laboratorio realizado, las cuales definen la variación del Módulo Resiliente con respecto al estado de esfuerzos a que está sometido el suelo, y se empleó el programa KENLAYER con la finalidad de definir los esfuerzos producidos, tanto por el paso de los vehículos pesados, como por el peso propio de la estructura de pavimento.

La modalidad que se empleó en el programa presenta las siguientes características:

- Análisis No Lineal Multicapa, considerando las ecuaciones constitutivas de todos los materiales.
- Carga circular de 40 KN, impartida por un eje sencillo con ruedas dobles.
- El estado de esfuerzos para la determinación del Módulo Resiliente de los materiales de base y/o sub-rasante se realizó en el punto medio de cada una de las capas.
- En el caso particular de la sub-rasante, el estado de esfuerzos se determinó a diferentes profundidades: 30 cm.; 50 cm.; 65 cm.; 85 cm. y 150 cm. y se consideró que el Módulo Resiliente de la sub-rasante mas representativo corresponde al obtenido a una profundidad de 50 cm., en vista que esta profundidad es la normalmente empleada para evaluar el comportamiento de la sub-rasante.

Con la finalidad de mejorar la estimación del MRsitio-sr, se realizaron ensayos de Módulo Dinámico en Mezclas Asfálticas (MDin-ma), en vista que -por lo general- las mezclas asfálticas constituyen los materiales que mas absorben los esfuerzos impartidos por el tráfico y conocer su comportamiento ante las cargas permite reducir una variable importante en los procesos de retro-cálculo.

A continuación se discute el basamento teórico del MDin-ma, en el contexto de la presente investigación.

#### 6.4 Módulo Dinámico de Mezclas Asfálticas (MDin-ma)

Las capas asfálticas fueron ensayadas en el laboratorio, con la finalidad de conocer su Módulo Dinámico o de Elasticidad, lo cual permite estimar el comportamiento visco-elástico de las mezclas asfálticas, por medio de la variación de la frecuencia de aplicación de las cargas a distintas temperaturas. Para ello se ejecutó el ensayo de Tracción Indirecta sobre probetas cilíndricas desarrollado por la Comunidad Europea denominado: European Committee for Standardisation (Mayo 2003). "Indirect Tension Test on Cylindrical Specimens (IT-CY)". Dicho ensayo permite desarrollar una Curva Maestra que representa la variación del módulo de elasticidad de las mezclas en función de la temperatura y frecuencia de aplicación de las cargas. De esta manera, es posible evaluar su comportamiento ante cargas estáticas o a muy baja velocidad o cargas dinámicas (vehículos circulando a altas velocidades).

El Módulo Dinámico de las mezclas asfálticas, establece una relación funcional que vincula las tensiones aplicadas y las deformaciones resultantes para cada condición particular de temperatura y tiempo o frecuencia de aplicación de las cargas. La expresión matemática que rige dichas variables es la siguiente:

$$E_{din}(t,T) = \frac{\sigma}{\varepsilon},$$

donde:

$E_{din}(t,T)$ : Módulo Dinámico de la mezcla correspondiente a una temperatura "T" y un tiempo de aplicación de cargas de "t".

$\sigma$ : Estado de tensiones impuesto.

$\varepsilon$ : Deformación específica inducida en el material.

Cabe destacar, que el Módulo Dinámico de una mezcla asfáltica determinada, aumenta cuando se disminuye la temperatura de ensayo y se mantiene constante la frecuencia de solicitaciones, al igual que cuando se mantiene constante la temperatura de ensayo y se aumenta la frecuencia de la sollicitación. Por lo tanto, la temperatura y tiempo de aplicación de la carga son parámetros principales y complementarios en el comportamiento de una mezcla asfáltica.

Este comportamiento de las mezclas asfálticas es de suma importancia en los procesos de evaluación de Módulos Resilientes con ensayos no destructivos, en vista que –tal como se indicó- los materiales asfálticos son los que mas absorben los esfuerzos impartidos por el tráfico.

El ensayo de laboratorio se ejecutó bajo las siguientes características de ensayo:

- Temperaturas: 10°C; 25°C y 40°C.
- Frecuencia de aplicación de las cargas: 0.5 Hz; 1.0 Hz; 2.0 Hz. y 2.5 Hz.

Las probetas utilizadas para el ensayo corresponden a los núcleos de capas asfálticas extraídos en el tramo de vía en estudio y dichos núcleos fueron divididos en distintas capas.

Es importante destacar que los conceptos descritos hasta el momento permiten definir el  $MR_{sitio-sr}$ , el cual es uno de los principales parámetros para definir el factor de ajuste "C". En este mismo orden de ideas es necesario estimar el  $MR_{rc-sr}$ , en vista que el factor "C" corresponde al cociente entre el  $MR_{sitio-sr}$  y  $MR_{rc-sr}$ .

A continuación se presentan algunos antecedentes de los procesos de retro-cálculo, así como el modelo de retro-cálculo modular de la sub-rasante, recomendado por el Método AASHTO-93 y analizado en la presente investigación.

### **6.5 Proceso de Retro-cálculo. Antecedentes**

El procedimiento de retro-cálculo es una metodología para determinar el Módulo de Elasticidad de un material por medio de la medición de deflexiones superficiales del pavimento, haciendo uso de la teoría elástica lineal multicapa.

Los procedimientos de retro-cálculo son empleados hoy en día debido a tres grandes avances en la ingeniería de pavimentos<sup>4</sup>:

- a. El hecho de que los pavimentos mas fuertes (mayores espesores y/o materiales mas rígidos) tengan menores deflexiones y pavimentos con menor espesor o rigidez tengan mayores deflexiones, vinculan el comportamiento del pavimento con la deflexión medida (conceptos desarrollados entre 1935 y 1960 por Hveem).
- b. El desarrollo de teorías mecanicistas que relacionan propiedades fundamentales de los materiales tales como: esfuerzos, deformaciones y deflexiones en un sistema multicapas (1940 a 1970).
- c. El desarrollo de equipos de medición de deflexiones precisos, compactos, versátiles y transportables (1955 a 1980).

---

<sup>4</sup> Prof.: L.H. Irwin, Ph.D., P.E. "Backcalculation: An Overview and Perspective". Cornell University, Ithaca, NY, U.S.A.

Por su parte la teoría elástica lineal multicapa surge como una respuesta a un diseño racional de pavimento que considere los esfuerzos, las deformaciones y las deflexiones en los pavimentos flexibles.

En general, los pavimentos flexibles están constituidos por un sistema multicapa, cuyo propósito es absorber los esfuerzos impartidos por el tráfico a valores tolerables por la sub-rasante. Los materiales están distribuidos de tal manera, que en las capas superiores se encuentran los materiales de mejor calidad y la sub-rasante posee la menor capacidad soporte.

Los avances mas significativos en la definición de la relación entre esfuerzo, deformación y deflexión, en estructuras multicapas, los han realizado investigadores como Boussinesq (1885), el cual realizó estudios en estructuras de una sola capa. Luego, Burmister (1943 a 1962) se destacó en el análisis de sistemas bi-capa y tri-capa, con otros investigadores como: Fox y Acum. (1951), Johnes (1967), Pattie (1962), entre otros.

Para el desarrollo de los métodos racionales de análisis multicapas, se realizaron algunas simplificaciones e hipótesis, las cuales se indican a continuación:

- a. Las propiedades de los materiales de cada capa son homogéneas, esto significa que las mismas son iguales en cualquier punto.
- b. Cada capa tiene un espesor finito, excepto la última capa, adicionalmente todas son infinitas en el sentido lateral.
- c. Cada capa es isotrópica, esto significa que las propiedades en un punto son las mismas en todas las direcciones u orientaciones.

- d. Existe una fricción total entre las capas.
- e. No hay fuerzas de corte en la superficie.
- f. Las soluciones de los esfuerzos están caracterizadas por dos (2) propiedades de los materiales en cada capa. Dichas propiedades son: el Módulo Elástico (E) y el Coeficiente de Poisson ( $\nu$ ).

En base a las premisas indicadas, los modelos multicapas permiten estimar el estado de esfuerzos, definido por los esfuerzos principales, tangenciales, radiales y normales, así como las características propias de cada material, definidas por el Módulo Elástico (E) y el Coeficiente de Poisson ( $\nu$ ). Adicionalmente es posible estimar la deflexión en un cierto punto y a una cierta profundidad, para dicho estado de esfuerzos y características de los materiales.

Este es el concepto básico para las distintas metodologías de retro-cálculo, en la cual se incluye la del Método AASHTO-93, en vista que la misma parte del conocimiento de la deflexión del pavimento para una cierta carga sobre un área conocida y modela el estado de esfuerzos, así como el Módulo de Elasticidad de los distintos materiales que conforman la estructura de pavimento.

Dentro de este último aspecto, existen distintas metodologías y equipos para medir deflexiones en un pavimento, entre las más difundidas hoy en día se encuentra el Falling Weight Deflectometer (FWD). A continuación se discuten algunos aspectos generales de este equipo.



## **6.6 Deflectómetro de Impacto (Falling Weight Deflectometer –FWD-)**

El FWD es un equipo de medición de deflexiones de alto rendimiento, basado en impulsos de carga, las cuales son transmitidas al pavimento por una masa que golpea desde una cierta altura un plato de ensayo colocado sobre el pavimento. El equipo cuenta con geófonos que recogen los impulsos generados por la caída de la carga. Los geófonos están colocados tanto en el punto de máxima carga como a ciertas distancias de dicho punto, esto con la finalidad de modelar el "cuenco" de deflexiones generado por el impacto de la carga sobre el pavimento. La transmisión de la carga a la estructura es similar a la que produce un eje de un vehículo circulando a una cierta velocidad sobre el pavimento.

Es importante destacar, que debido a los costos involucrados en la adquisición de equipos de laboratorio que permitan estimar el Módulo Resiliente, la necesidad de tomar muestras de suelo en sitio, ejecución de ensayos destructivos (en el caso de los pavimentos en servicio), etc., hacen de los modelos de retro-cálculo basados en la medición de deflexiones con FWD, una herramienta de gran utilidad dentro de la ingeniería de pavimentos, especialmente para la evaluación de pavimentos existentes.

## **6.7 Modelo de Retro-cálculo AASHTO-93**

La metodología AASHTO-93, esta basada en la estimación del Módulo Resiliente mediante la medición de deflexiones con el equipo FWD.

La estimación del módulo de la sub-rasante se realiza en base a la ecuación que se indica a continuación:

$$MR = \frac{0.24P}{d_r r}$$

donde:

- MR: Módulo Resiliente de la sub-rasante, en psi.
- P: Carga aplicada, en libras.
- $d_r$ : Deflexión medida a una distancia "r" del punto de deflexión máxima, en pulgadas.
- r: Distancia a la que se mide " $d_r$ ", en pulgadas.

Esta ecuación de retro-cálculo del Módulo Resiliente de la sub-rasante, esta basada en el hecho que la deflexión en los puntos lo suficientemente alejados del centro de carga se debe prácticamente a la deformación de la sub-rasante y es independiente del radio de carga, el cual para el equipo FWD corresponde al radio del plato. Sin embargo, es importante determinar el radio límite de dicha deflexión para la cual la deformación se debe a la sub-rasante, en vista que es para ésta deformación y radio, que el procedimiento plantea retro-calcular el Módulo Resiliente de la sub-rasante.

La metodología AASHTO prevé una relación para establecer esta distancia "r" mínima, según la siguiente expresión:

$$r > 0,7 a_e$$

donde " $a_e$ " es el radio efectivo que viene definido por la expresión:

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

donde:

- a<sub>e</sub>: Radio del bulbo de esfuerzos en la interface entre la sub-rasante y la estructura de pavimento, en pulgadas.
- a: Radio circular del plato de contacto, en pulgadas.
- D: Espesor total de las capas de pavimento, sobre la sub-rasante, en pulgadas.
- E<sub>p</sub>: Módulo Efectivo del Pavimento de todas las capas sobre la fundación, en psi.
- MR: Módulo Resiliente de la sub-rasante, en psi.

Para conocer E<sub>p</sub> se requiere resolver por iteración la ecuación:

$$d_o = 1.5Pa \left[ \frac{1}{MR \sqrt{1 + \left( \frac{D}{a} \sqrt[3]{\frac{E_p}{MR}} \right)^2}} + \frac{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{D}{a} \right)^2}}}{E_p} \right]$$

donde:

- do: Deflexión en el punto de carga máxima, en pulgadas, ajustada a la temperatura normalizada de ensayo, 20°C (60 °F).
- p: Presión de inflado, en psi.
- a: Radio circular del plato de contacto, en pulgadas.
- D: Espesor total de las capas de pavimento, sobre la sub-rasante, en pulgadas.
- MR: Módulo Resiliente de la Sub-rasante, psi.
- Ep: Módulo Efectivo del pavimento de todas las capas del pavimento, en psi.

Esta ecuación puede ser resuelta por el nomograma incluido en el método, el cual permite, con el espesor total del pavimento y la relación  $MR \cdot do/P$ , obtener la proporción de  $Ep/MR$ , con lo cual se puede verificar si efectivamente  $r > 0,7 a_e$ , para el valor de  $a_e$  obtenido.

Según las recomendaciones incluidas en la Guía de Diseño AASHTO-93, los resultados obtenidos de Módulo Resiliente para la sub-rasante, deben ser afectados por un factor de ajuste (C), en vista que según pruebas de laboratorio, los resultados de los módulos retro-calculados son superiores a aquellos obtenidos en el laboratorio. Esto se debe, a que el procedimiento de retro-cálculo incluido en la Guía AASHTO, estima el Módulo Resiliente de la sub-rasante a una distancia alejada del punto de carga, por lo que los esfuerzos generados son inferiores a los obtenidos debajo de la carga y por consiguiente el módulo obtenido es superior, esto ocurre –principalmente- en suelos cohesivos similares a los del Experimento Vial.

Cabe destacar que para el suelo de fundación del Experimento Vial AASHTO se calculó un  $MR_{lab-sr}$  de 3.000 psi (lbs./pulg.<sup>2</sup>), a través de ensayos de laboratorio, producto de la aplicación de un esfuerzo desviador de 6,0 psi.

## 6.8 Factor de Ajuste "C"

Dentro de los principales antecedentes a la presente investigación se encuentran los resultados incluidos en el Método AASHTO-93, los cuales fueron obtenidos mediante ensayos a los suelos de sub-rasante del Experimento Vial AASHTO, realizado en los Estados Unidos de América en la década de 1950.

Dicho experimento fue totalmente controlado, observándose que todas las distintas estructuras del pavimento a evaluar posean una sub-rasante uniforme, por lo que se colocaron los últimos 90 cm. de un suelo seleccionado, cuya clasificación HRB era de un suelo tipo A-6, con Capacidad Soporte California (CBR) saturado de laboratorio entre 2 y 4%<sup>5</sup>.

Para este tipo de suelos se calculó un MR<sub>sr</sub> de laboratorio igual a 3.000 psi (lbs./pulg.<sup>2</sup>), aplicando un esfuerzo desviador de 6,0 psi. Sin embargo, usando el procedimiento de retro-cálculo del Método AASHTO-93, el esfuerzo desviador a la distancia "r" para la sub-rasante es menor que 6,0 psi, por lo que el Módulo Resiliente determinado por retro-cálculo es mayor en comparación con el esperado de 3.000 psi.

Estos resultados fueron confirmados tanto por ensayos de laboratorio ejecutados en los suelos del Experimento Vial, como por la aplicación de técnicas de elementos finitos. Ambos procedimientos mostraron que los resultados de Módulo Resiliente de la sub-rasante obtenidos por el procedimiento de retro-cálculo son superiores a los obtenidos en laboratorio en tres a cinco veces su valor.

---

<sup>5</sup> Lockhart, J. y Lilli, F. El "AASHTO Road Test". Reunión del Asfalto, Mar del Plata, Argentina, Noviembre de 1962.

La figura 2 muestra los valores obtenidos en el Experimento Vial y las relaciones de 3:1; 4:1 y 5:1, entre los resultados de laboratorio y los obtenidos por retro-cálculo, siendo éstos últimos siempre superiores.

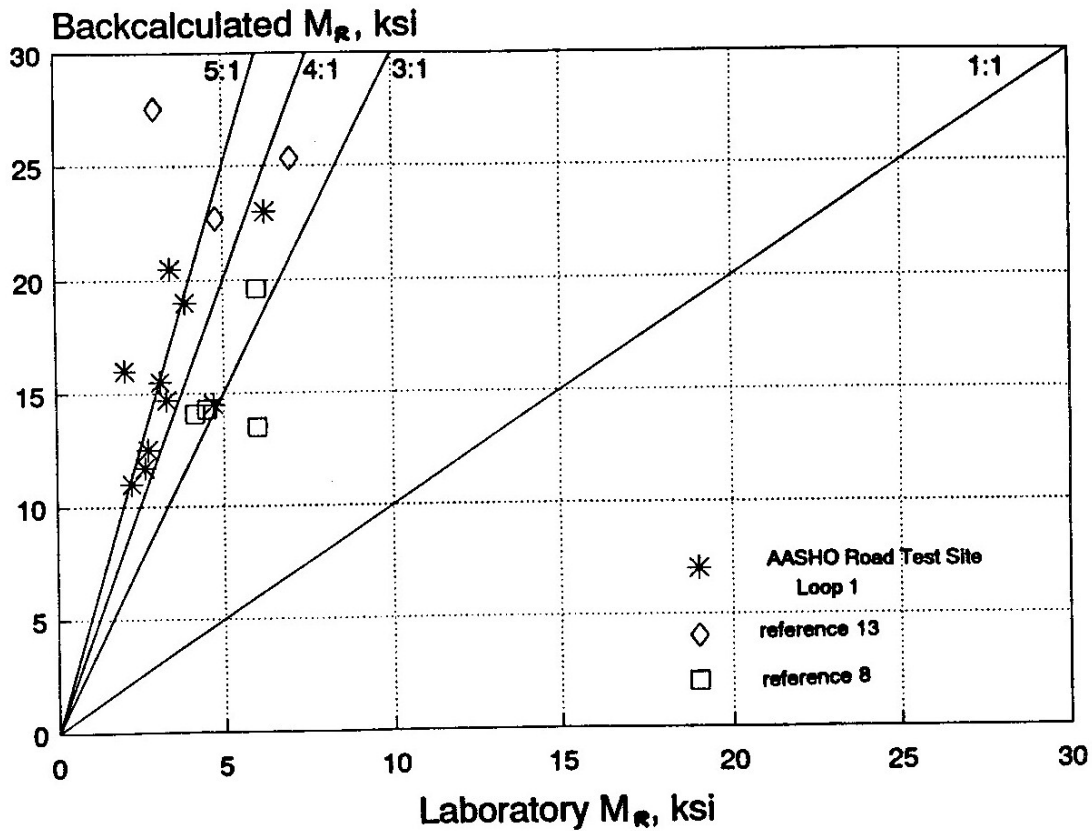


FIGURA 2. MÓDULO RESILIENTE RETROCALCULADO VERSUS MÓDULO RESILIENTE DE LABORATORIO. FUENTE: MÉTODO DE DISEÑO DE PAVIMENTO AASHTO-93.

Por otro lado, resultados de ensayos realizados en vías de otros estados de U.S.A. fueron publicados en la misma guía de diseño (AASHTO-93) y se llegaron a resultados similares con un valor "C" igual a 0,24.

En definitiva el método AASHTO-93 recomienda un valor "C" de 0,33 para ajustar el valor del Módulo Resiliente por retro-cálculo, con lo cual la ecuación de Módulo Resiliente de la sub-rasante estimado por el Método AASHTO-93, queda expresada como se indica a continuación:

$$MR = C \left( \frac{0.24P}{d_r r} \right)$$

donde:

C: 0.33, recomendado por el Método AASHTO-93.

Es importante destacar, que el factor de ajuste "C" se encuentra dentro de un rango de valores y el mismo es característico del suelo a evaluar, por lo que su obtención para suelos del mismo tipo, permitiría crear una base de datos de valor "C" que puede ser usada en distintas evaluaciones para el retro-cálculo del Módulo Resiliente de la sub-rasante empleando el Método AASHTO-93, lo cual corresponde al objetivo general de esta investigación.



## 7. MARCO METODOLÓGICO

### 7.1 Tipo de Estudio

Dadas las características en las cuales se desarrolla este trabajo especial de grado, la investigación es de tipo Descriptiva-Explicativa, ya que su propósito es obtener un factor de ajuste "C" para la estimación del Módulo Resiliente de la sub-rasante por procedimientos de retro-cálculo, según la Metodología incluida en la Guía de Diseño AASHTO-93, haciendo uso de los resultados de campo y laboratorio de una Base de Datos Existente.

Sustentado en el concepto de estudio descriptivo de los autores Seltiz y Jhoda (citado por Ramírez, 1993), los cuales explican que: "Los estudios descriptivos son aquellos cuyo objetivo es la descripción, con mayor precisión, de las características de un determinado individuo, situación o grupo, con o sin especificación de hipótesis iniciales acerca de la naturaleza de tales características", se consideró el caso del MRsr, el cual es una de las principales variables de esta investigación y la misma fue evaluada en todas sus dimensiones de tal manera de ser analizada y descrita en profundidad.

El concepto de estudio explicativo, además de describir el fenómeno trata de buscar la explicación del comportamiento de las variables. En este sentido se incorpora el factor de ajuste "C", el cual permite mejorar la correlación entre el MRsitio-sr y el MRrc-sr.

Para lograr la descripción del fenómeno se adoptará la modalidad de investigación documental, ya que se recopilaron fuentes secundarias para realizar el análisis,

tales como libros, material hemerográfico, documentos impresos y fuentes electrónicas. Por su parte Sabino (1992) dice que la recolección de los datos bibliográficos y documentales se fundamenta en “...el hecho de trabajar con materiales ya elaborados de tipo secundario...”.

Se trata de determinar las causas a través de las variables y sus relaciones, con la finalidad de estimar el factor de ajuste “C”, el cual es el principal objetivo de esta investigación. Por otra parte la misma es aplicada ya que trata de dar algunas soluciones a un problema específico.

## **7.2 Población y Muestra**

En lo que respecta a la población, la Lic. Bavaresco, precisa claramente que se debe plantear una limitación espacial al objeto investigado, en vista que podríamos caer en una espiral muy compleja y prácticamente infinita. Para ello se debe delimitar el Universo Operacional, la Población y por último la Muestra.

En definitiva el universo puede ser considerado como la población, en vista que no hay límites precisos entre éstos sino los que delimite el investigador. Por otro lado la población, según la Lic. Bavaresco, es la totalidad de los elementos que forman un conjunto, y puede ser considerada como la información o dato del problema.

Por su parte la muestra es la parte de la población que es observada y una vez analizada, los resultados obtenidos pueden ser extrapolados a toda la población.

En conclusión, con los resultados de la muestra se infieren los resultados de toda

la población, por ello, la escogencia de la muestra es muy importante para que la misma sea representativa.

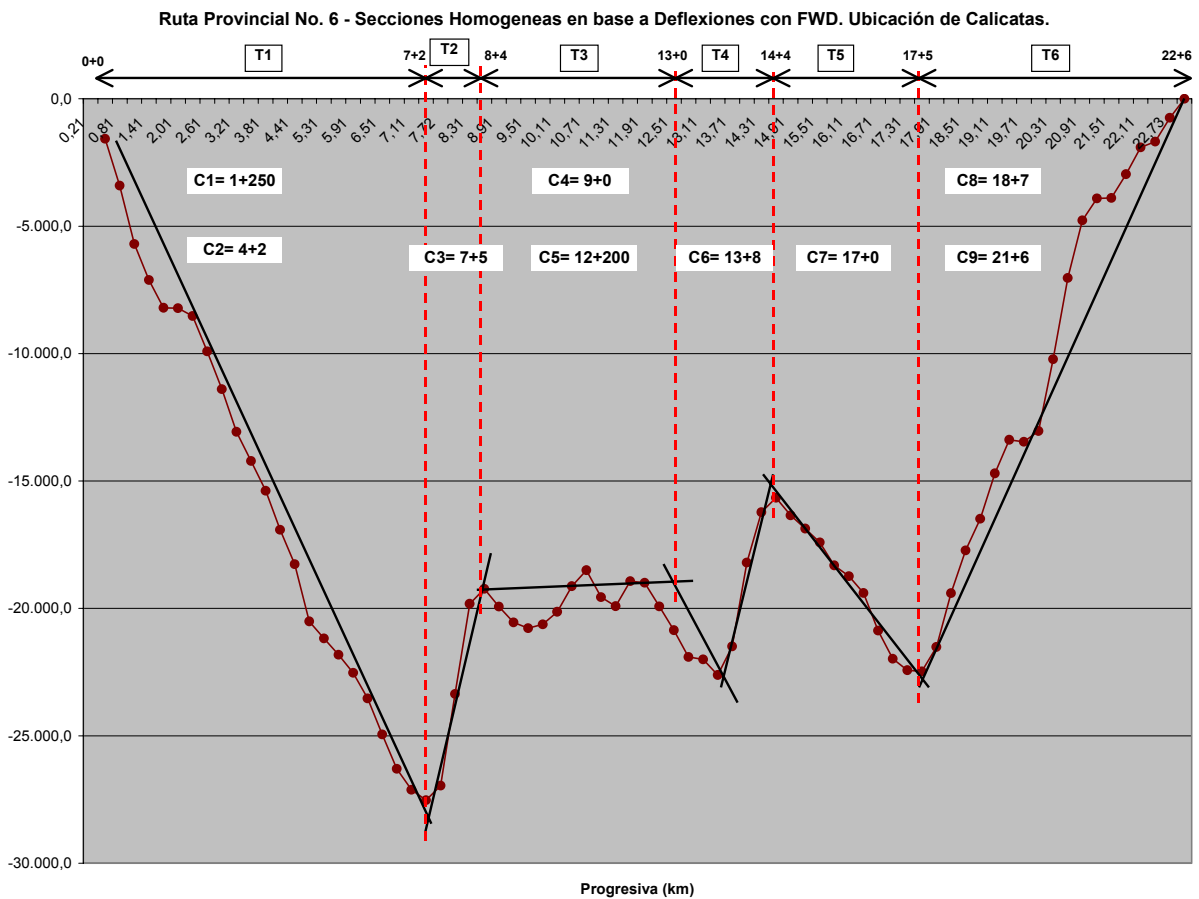
En concordancia con los aspectos discutidos, la presente investigación delimita el ámbito espacial de la población a un tramo de la Ruta Provincial N° 6 de 22.6 Km. de longitud, comprendido entre la ciudad de Pavón y la ciudad de Campana. El tramo carretero se encuentra localizado al Nor-Este de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

Dicha población se considera representativa, en vista que la vía presenta una capa de rodamiento constituida por una mezcla de concreto asfáltico en caliente, así como sectores con sub-base granular sobre un suelo de fundación fino tipo A-6 o A-7-6, cuyas características son típicas de las estructuras de pavimento analizadas durante el experimento Vial AASHTO, así como de las existentes en nuestro país.

Por otro lado la carretera tiene una sección transversal de un canal de circulación por sentido y un ancho de calzada de 7.50 m. aproximadamente, las cuales son características similares a las carreteras troncales de Venezuela.

En lo que respecta a la muestra, la misma se definió mediante un análisis estadístico en base a la medición de deflexiones cada 300 m. realizada a lo largo del tramo de vía en estudio. El método estadístico empleado se denomina *Analysis Unit Delineation by Cumulative Differences* (delineación de secciones homogéneas por diferencias acumuladas) que ofrece la *Guía de Diseño de Pavimentos AASHTO-93 (Guide for Design of Pavement Structures, 1993)*. La

figura 3 muestra la definición de las secciones homogéneas, así como la ubicación de las nueve (09) calicatas definidas como muestra de la presente investigación. Como se puede observar el tramo de vía presenta seis (6) secciones o tramos con valores de deflexiones característicos.



**FIGURA 3.**

En la figura mostrada el eje de las ordenadas corresponde a las diferencias acumuladas y el eje de las abcisas a las progresivas. Es importante destacar que la cantidad de calicatas por tramo se realizó en función de la longitud de cada uno

y la ubicación definitiva de las mismas, correspondió a la facilidad en campo para la ejecución de los ensayos necesarios para la investigación.

A continuación se resumen los tramos y sus respectivas calicatas, definidos como la población y muestra de la presente investigación.

| POBLACIÓN  |        |             | MUESTRA  |            |
|--|--------|-------------|----------|------------|
| Descripción  | Tramos | Progresiva  | Calicata | Progresiva |
| 22.6 Km. de la Ruta<br>Provincial No. 6, Pavón-<br>Campana. Provincia de<br>Buenos Aires. Argentina. | 1      | 0+0 - 7+2   | 1        | 1+250      |
|  |        |             | 2        | 4+200      |
|  | 2      | 7+2 - 8+4   | 3        | 7+500      |
|  | 3      | 8+4 - 13+0  | 4        | 9+000      |
|  |        |             | 5        | 12+200     |
|  | 4      | 13+0 - 14+4 | 6        | 13+800     |
|  | 5      | 14+4 - 17+5 | 7        | 17+000     |
|  | 6      | 17+5 - 22+6 | 8        | 18+700     |
|  |        |             | 9        | 21+600     |

Cabe destacar, que en cada una de las calicatas que conforman la muestra se realizaron una serie de ensayos que permitieron caracterizar la estructura de pavimento existente en los distintos tramos de la vía. Dichos ensayos permitieron conformar una Base de Datos, la cual corresponde al principal instrumento

utilizado en la presente investigación para el logro de los objetivos planteados.

Este aspecto es analizado en la siguiente sección.

### **7.3 Trabajo de Campo**

Como se indicó en la sección anterior, el principal instrumento utilizado en esta investigación corresponde a la Base de Datos que resume los ensayos de campo y laboratorio de las nueve (9) calicatas ejecutadas en un tramo de la Ruta Provincial N° 6, en la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

Los trabajos de campo, laboratorio y desarrollo de la Base de Datos fueron ejecutados por un equipo técnico, del cual autor de esta investigación formó parte, y los mismos se concluyeron en Noviembre de 2003. La información contenida en esta base de datos se resume a continuación:

- Espesores de todas las capas que conforman la estructura de pavimento.
- Ensayos de extracción y granulometría de mezclas asfálticas provenientes de los núcleos de pavimento.
- Clasificación HRB de suelos.
- Densidad en sitio y humedad natural de las capas de base, sub-base y sub-rasante.
- Ensayo de Cono Dinámico de Penetración (DCP) en materiales no cementados.
- Ensayo de Valor Soporte California (CBR) en las capas de base, sub-base y sub-rasante.
- Ensayo de Módulo Dinámico en Mezclas Asfálticas.

- Ensayo de Módulo Resiliente en Suelos.
- Medición de Deflexiones con Viga Benkelman.
- Medición de Deflexiones con Falling Weight Deflectometer.

Cada uno de los ensayos indicados fueron ejecutados en los distintos materiales que conforman las nueve (9) calicatas ejecutadas, sin embargo, los materiales obtenidos de la auscultación de pavimentos fueron inicialmente clasificados, con la finalidad de definir materiales similares y estructuras homogéneas a lo largo del tramo en estudio que permitan racionalizar los ensayos de laboratorio ejecutados, en especial los referentes a Módulo Resiliente de Suelos y Módulo Dinámico de Mezclas Asfálticas, en vista que éstos son ensayos especiales que requieren equipos sofisticados, los cuales estaban limitados.

El Anexo A presenta la Base de Datos desarrollada, la cual incluye toda la evaluación de campo y laboratorio realizada, así como una descripción detallada de los principales ensayos y su respectiva secuencia.

A continuación se muestra un resumen de las principales características de los materiales encontrados en las distintas calicatas:

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO:  
 "DETERMINACIÓN DEL VALOR "C" PARA LA ESTIMACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE  
 DE LA SUB-RASANTE OBTENIDO POR RETRO-CÁLCULO SEGÚN  
 LA METODOLOGÍA AASHTO-93, USANDO EL EQUIPO FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER (FWD)."  
 Mayo 2007

| CALICATA No. | MATERIAL | PERFIL     | ESP. (cm.) | CLASIF. (HRB) | HUM.(NAT) (%) | DENS. HUM. (gr./cm3) |
|--------------|----------|------------|------------|---------------|---------------|----------------------|
| 1            | C.A.     | ██████████ | 21.0       |               |               | 2.435                |
|              | T.A.A.   | ██████████ | 30.0       |               |               | 2.100                |
|              | M2       | ██████████ | 31.0       | A-4(2)        | 26.5          | 1.835                |
|              | SR       | ///////    |            | A-6(11)       | 17.2          | 1.870                |
| 2            | C.A.     | ██████████ | 20.5       |               |               | 2.435                |
|              | T.A.A.   | ██████████ | 24.0       |               |               | 2.100                |
|              | M2       | ██████████ | 20.0       | A-5(4)        | 28.0          | 1.617                |
|              | M3       | ██████████ | 20.0       | A-6(9)        | 23.2          | 1.837                |
|              | SR       | ///////    |            | A-7-6(19)     | 20.1          | 1.803                |
| 3            | C.A.     | ██████████ | 21.5       |               |               | 2.435                |
|              | T.A.A.   | ██████████ | 11.0       |               |               | 2.100                |
|              | M2       | ██████████ | 33.0       | A-4(1)        | 27.0          | 1.815                |
|              | SR       | ///////    |            | A-7-6(16)     | 24.0          | 1.813                |
| 4            | C.A.     | ██████████ | 25.7       |               |               | 2.435                |
|              | T.A.A.   | ██████████ | 10.0       |               |               | 2.100                |
|              | M2       | ██████████ | 13.0       | A-4(0)        | 22.0          | 1.564                |
|              | M3       | ██████████ | 44.0       | A-6(9)        | 23.3          | 1.938                |
|              | SR       | ///////    |            | A-7-6(16)     | 23.0          | 1.633                |
| 5            | C.A.     | ██████████ | 21.0       |               |               | 2.439                |
|              | T.A.A.   | ██████████ | 13.0       |               |               | 2.100                |
|              | M2       | ██████████ | 10.0       | A-4(0)        | 29.5          | 1.683                |
|              | M3       | ██████████ | 30.0       | A-6(10)       | 20.9          | 1.762                |
|              | SR       | ///////    |            | A-7-6(18)     | 23.0          | 1.579                |
| 6            | C.A.     | ██████████ | 17.8       |               |               | 2.433                |
|              | T.A.A.   | ██████████ | 11.0       |               |               | 2.100                |
|              | M2       | ██████████ | 12.0       | A-4(1)        | 29.5          | 1.594                |
|              | M3       | ██████████ | 25.0       | A-6(10)       | 26.0          | 1.967                |
|              | SR       | ///////    |            | A-7-6(19)     | 30.0          | 1.873                |
| 7            | C.A.     | ██████████ | 19.5       |               |               | 2.436                |
|              | T.A.A.   | ██████████ | 22.0       |               |               | 2.100                |
|              | M2       | ██████████ | 20.0       | A-4(5)        | 21.2          | 1.651                |
|              | SR       | ///////    |            | A-7-6(12)     | 26.6          | 1.832                |
| 8            | C.A.     | ██████████ | 17.6       |               |               | 2.436                |
|              | T.A.A.   | ██████████ | 12.0       |               |               | 2.100                |
|              | M2       | ██████████ | 16.0       | A-4(2)        | 28.5          | 1.993                |
|              | SR       | ///////    |            | A-6(6)        | 21.0          | 1.833                |
| 9            | C.A.     | ██████████ | 16.4       |               |               | 2.436                |
|              | T.A.A.   | ██████████ | 12.0       |               |               | 2.100                |
|              | SR       | ///////    |            | A-6(9)        | 27.4          | 1.727                |



donde:

C.A.: Material de Concreto Asfáltico en Caliente.

T.A.A.: Material de Tosca Arena Asfalto.

M: Material, capa de pavimento.

SR: Sub-rasante.

Como se puede observar, los suelos que conforman la sub-rasante son tipo A-6 y A-7-6, cohesivos con valores altos de índice de grupo, lo que indica el carácter cohesivo del material. Por su parte los suelos de base y sub-base, son tipo A-4, A-5 y A-6. Dichos suelos son principalmente cohesivos, con una alta dependencia del Módulo Resiliente con el estado de esfuerzos al que están sometidos.

Por otro lado, las estructuras de pavimento son –en general- tipo bi-capa o tri-capa, las cuales son comunes en nuestro país con excepción de la calicata 9, la cual presenta una estructura atípica, constituida por un pavimento tipo profundidad plena conformado sólo por una capa de mezcla asfáltica colocada sobre la fundación.

Con respecto a los materiales cementados, se encontraron Mezclas Asfálticas en Caliente (C.A.) y una base de Tosca Arena Asfalto (T.A.A.), la cual es un material constituido por un conglomerado calcáreo y cemento asfáltico, cuya calidad es inferior a la de un concreto asfáltico, pero superior a los materiales de suelo seleccionado predominantes en la zona, así como de los suelos finos que conforman el suelo natural, por lo que es considerado como un buen material de base previo a la colocación de las capas asfálticas. A continuación se muestran los principales resultados de la evaluación de campo realizada, la cual se encuentra detallada en el Anexo A, correspondiente a la Base de Datos.

### **7.3.1 Módulo Resiliente de Laboratorio de Suelos**

Haciendo uso de la metodología del Ensayo de Módulo Resiliente de Laboratorio AASHTO, DESIGNATION: T 294-92. (1992), discutida en el capítulo anterior, se procedió a determinar las constantes constitutivas K1; K2; K3 y K4, las cuales son el producto del análisis de regresión de los valores promedio de MR,  $\sigma_d$  y  $\sigma_3$ , obtenidos del ensayo de laboratorio.

Es importante destacar, que en el caso particular de la presente investigación, resultaba imposible realizar el ensayo de Módulo Resiliente a todos los materiales granulares que conformaban las estructuras de pavimento de las nueve (9) calicatas evaluadas. Por lo se decidió clasificar las distintas muestras de suelos obtenidas mediante el método HRB, con la finalidad de definir estructuras homogéneas y materiales similares a lo largo del tramo en estudio que permitan racionalizar los ensayos de laboratorio ejecutados.

En base a los ensayos de Módulo Resiliente de laboratorio realizados y la clasificación de materiales descrita, se definieron las constantes constitutivas indicadas en la tabla 1, las cuales para ciertos materiales provienen directamente de datos del ensayo de laboratorio y en otros casos fueron asumidas en base a características similares de los materiales.

El Anexo A de la Base de Datos, incluye todos los resultados de laboratorio que dan origen a las constantes indicadas.

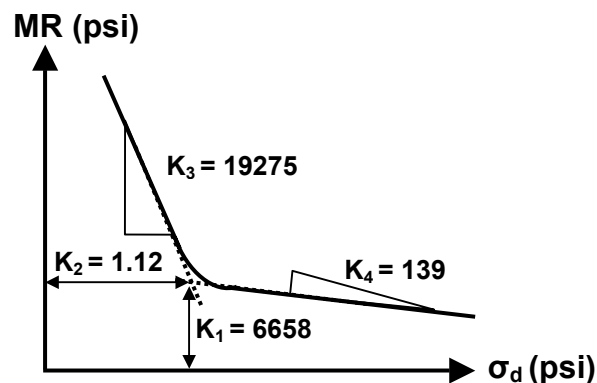
**TABLA 1. CONSTANTES CONSTITUTIVAS DE LABORATORIO DE LOS SUELOS.**

| CALICATA | MATERIAL | COEFICIENTES (psi) |      |        |     |
|----------|----------|--------------------|------|--------|-----|
|          |          | K1                 | K2   | K3     | K4  |
| 1        | M2       | 11.084             | 1,21 | 17.428 | 165 |
|          | SR       | 6.658              | 1,12 | 19.275 | 138 |
| 2        | M2       | 10.677             | 1,26 | 8.200  | 121 |
|          | M3       | 10.666             | 1,15 | 25.259 | 200 |
|          | SR       | 7.314              | 1.06 | 39.470 | 179 |
| 3        | M2       | 11.084             | 1,21 | 17.428 | 165 |
|          | SR       | 7.314              | 1,06 | 39.470 | 179 |
| 4        | M2       | 11.775             | 1,27 | 8.030  | 124 |
|          | M3       | 11.028             | 1,20 | 15.180 | 170 |
|          | SR       | 7.704              | 1,11 | 24.060 | 166 |
| 5        | M2       | 11.300             | 1,25 | 9.560  | 135 |
|          | M3       | 12.920             | 1,19 | 18.700 | 200 |
|          | SR       | 6.925              | 1.01 | 54.880 | 193 |
| 6        | M2       | 10.598             | 1,07 | 45.740 | 250 |
|          | M3       | 10.666             | 1,15 | 25.259 | 200 |
|          | SR       | 7.314              | 1,06 | 39.470 | 179 |
| 7        | M2       | 11.084             | 1,21 | 17.428 | 165 |
|          | SR       | 7.314              | 1,06 | 39.470 | 179 |
| 8        | M2       | 11.084             | 1,21 | 17.428 | 165 |
|          | SR       | 6.658              | 1,12 | 19.265 | 138 |
| 9        | SR       | 10.500             | 1,21 | 12.890 | 153 |

M: Material, capa de pavimento / SR: Sub-rasante

Las constantes indicadas en la tabla anterior corresponden a las requeridas por la ecuación 1, la cual es usada para evaluar el comportamiento no lineal de los suelos y aplicada en el presente trabajo par estimar el Módulo Resiliente de Sitio.

Cabe destacar que el valor del Módulo Resiliente en el "punto de quiebre" de la curva bilineal (en suelos cohesivos), indicado por la constante  $K_1$ , discutida en la sección 6.1 referente al Módulo Resiliente, es un buen indicador del comportamiento resiliente del suelo. En este sentido, en el caso de los suelos de las calicatas en estudio, el valor de la constante  $K_1$  se encuentra entre 6.600 y 10.500 psi (46 a 72 Mpa) para los suelos de fundación, y entre 10.600 y 13.000 psi (73 a 89 Mpa) para los suelos de base y sub-bases, lo cual se considera coherente. Sin embargo este "punto de quiebre" es una simplificación de la curva exponencial que modela el comportamiento del Módulo Resiliente vs. Esfuerzo Desviador y cuando los valores del esfuerzo desviador se encuentran muy cercanos (por exceso o por defecto) a la constante  $K_2$ , la resultante del Módulo Resiliente puede tener variaciones significativas debido al carácter exponencial de la curva. A continuación se presenta en forma esquemática para la calicata 1, lo discutido anteriormente:



Considerando que el procedimiento descrito en la Guía AASHTO-93 recomienda estimar el Módulo Resiliente de los suelos de fundación para un esfuerzo desviador de 6.0 psi (0.0414 MPa), para suelos de sub-rasante similares a los del Experimento Vial, en el presente trabajo se evaluaron las ecuaciones constitutivas de los suelos (ecuación 1) con un esfuerzo desviador de 6.0 psi y las constantes constitutivas de los suelos definidas en la tabla 1, con la finalidad de estimar el Módulo Resiliente de Laboratorio de la Sub-rasante (MRlab-sr). La tabla 2 muestra los resultados obtenidos:

**TABLA 2. MRlab-sr EN FUNCIÓN DE UN ESFUERZO DESVIADOR DE 6.0 psi.**

| CALICATA | MATERIAL | MÓDULO RESILIENTE PARA<br>ESFUERZO DESVIADOR ( $\sigma_d$ )=6.0 psi |       |
|----------|----------|---|-------|
|          |          | MPa   | psi   |
| 1        | SR       | 41  | 5.985 |
| 2        | SR       | 44  | 6.430 |
| 3        | SR       | 44  | 6.445 |
| 4        | SR       | 47  | 6.892 |
| 5        | SR       | 41  | 5.962 |
| 6        | SR       | 44  | 6.430 |
| 7        | SR       | 44  | 6.430 |
| 8        | SR       | 41  | 5.985 |
| 9        | SR       | 67  | 9.767 |

SR: Sub-rasante

Sin embargo se debe destacar, que tal como se ha discutido a lo largo de esta investigación, los suelos en general son tenso-dependientes, por lo que su módulo varía en función del estado de esfuerzos al que esta sometido, es por ello que la presente investigación plantea estimar el Módulo Resiliente de Sitio de la sub-rasante (MRsitio-sr) empleando el Programa KENLAYER, discutido en la sección 6.3, el cual permite modelar el estado de esfuerzos a que están sometidos los suelos de las distintas capas del pavimento, considerando las condiciones propias de trabajo.

El Anexo B incluye una descripción del Programa KENLAYER y los parámetros empleados para estimar el MRsitio-sr. Por su parte la tabla 3 resume los valores de los esfuerzos principales definidos por el Programa KENLAYER y la tabla 4 los respectivos MRsitio-sr, haciendo uso de la ecuación 1.

**TABLA 3. RESULTANTE ESTADO DE ESFUERZOS. PROGRAMA KENLAYER  
 –HUANG, 1993-**

|          |          | ESFUERZOS GEOSTÁTICOS MAS<br>DINÁMICOS –KENLAYER, HUANG, 1993- |       |            |       |            |       |          |        |            |       |
|----------|----------|--|-------|------------|-------|------------|-------|----------|--------|------------|-------|
|          |          | $\sigma_1$   |       | $\sigma_2$ |       | $\sigma_3$ |       | $\theta$ |        | $\sigma_d$ |       |
| CALICATA | MATERIAL | MPa  | psi   | MPa        | psi   | MPa        | psi   | MPa      | psi    | MPa        | psi   |
| 1        | SR       | 0,0304   | 4,414 | 0,0219     | 3,181 | 0,0219     | 3,184 | 0,0746   | 10,831 | 0,0085     | 1,232 |
| 2        | SR       | 0,0297   | 4,316 | 0,0212     | 3,073 | 0,0212     | 3,076 | 0,0725   | 10,516 | 0,0086     | 1,242 |
| 3        | SR       | 0,0295   | 4,286 | 0,0188     | 2,723 | 0,0188     | 2,731 | 0,0674   | 9,788  | 0,0107     | 1,559 |
| 4        | SR       | 0,0315   | 4,576 | 0,0220     | 3,193 | 0,0220     | 3,197 | 0,0759   | 11,020 | 0,0095     | 1,381 |
| 5        | SR       | 0,0283   | 4,110 | 0,0187     | 2,719 | 0,0188     | 2,725 | 0,0662   | 9,601  | 0,0096     | 1,388 |
| 6        | SR       | 0,0292   | 4,235 | 0,0189     | 2,750 | 0,0190     | 2,757 | 0,0675   | 9,790  | 0,0102     | 1,482 |
| 7        | SR       | 0,0272   | 3,944 | 0,0182     | 2,636 | 0,0182     | 2,641 | 0,0638   | 9,266  | 0,0090     | 1,306 |
| 8        | SR       | 0,0280   | 4,066 | 0,0165     | 2,393 | 0,0166     | 2,405 | 0,0614   | 8,909  | 0,0115     | 1,667 |
| 9        | SR       | 0,0288   | 4,175 | 0,0136     | 1,979 | 0,0138     | 2,009 | 0,0565   | 8,205  | 0,0150     | 2,181 |

SR: Sub-rasante /  $\sigma_x, y, z$ : esfuerzos principales /  $\theta$ : sumatoria de esfuerzos principales /  $\sigma_d$ : esfuerzo desviador.

Cabe destacar, que los valores obtenidos del esfuerzo desviador ( $\sigma_d$ ) son inferiores a 6.0 psi (valor recomendado por el Método AASHTO-93).

**TABLA 4. MRsitio-sr. PROGRAMA KENLAYER –HUANG, 1993-**

|                 |                 | <b>MÓDULO RESILIENTE EN SITIO<br/>–PROGRAMA KENLAYER–</b> |            |
|-----------------|-----------------|---|------------|
| <b>CALICATA</b> | <b>MATERIAL</b> | <b>MPa</b>  | <b>Psi</b> |
| <b>1</b>        | SR              | 46  | 6.643      |
| <b>2</b>        | SR              | 50  | 7.282      |
| <b>3</b>        | SR              | 50  | 7.225      |
| <b>4</b>        | SR              | 53  | 7.659      |
| <b>5</b>        | SR              | 47  | 6.852      |
| <b>6</b>        | SR              | 50  | 7.239      |
| <b>7</b>        | SR              | 50  | 7.270      |
| <b>8</b>        | SR              | 45  | 6.583      |
| <b>9</b>        | SR              | 71  | 10.351     |

donde:

M: Material, capa de pavimento.  
 SR: Sub-rasante

Como se puede observar, el Módulo Resiliente de la sub-rasante, varía entre 46 y 53 MPa, para las calicatas 1 a la 8, los cuales son valores esperados según las ecuaciones constitutivas obtenidas para este tipo de material. En lo que respecta a la calicata nueve (9), se obtuvo un valor de Módulo Resiliente de la sub-rasante de 71 Mpa., el cual se considera alto para el tipo de material, sin embargo esta calicata se considera atípica, en vista que su estructura es del tipo profundidad plena, conformada sólo por mezclas asfálticas.



Por otra parte, se obtuvo valores de Módulo Resiliente de la sub-rasante superiores a los obtenidos usando un esfuerzo desviador de 6.0 psi, lo cual era de esperarse, en vista que el esfuerzo desviador obtenido por el Programa KENLAYER, es menor.

### **7.3.2 Módulo Dinámico de Materiales Asfálticos**

Con respecto a las capas asfálticas, las mismas fueron ensayadas en el laboratorio, con la finalidad de conocer su Módulo Dinámico o de Elasticidad.

La tabla 5 muestra los valores de Módulo Dinámico, obtenidos de las curvas maestras desarrolladas para las mezclas asfálticas de tres calicatas ensayadas, las cuales corresponden a la 4; 5 y 6, las cuales se presentan en detalle en el Anexo A de la Base de Datos.

Es importante destacar, que los Módulos Dinámicos de las Mezclas Asfálticas indicados en la tabla 5 surgen como un promedio de los módulos de las distintas mezclas de rodamiento y bases, en que fue dividido el espesor total de la capa asfáltica de las tres calicatas ensayadas, considerando la variación de la temperatura de la mezcla a distintas profundidades, según el procedimiento del Instituto del Asfalto Americano, incluido en la serie de manuales No. 17.

**TABLA 5. MÓDULO DINÁMICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.**

| CALICATA | MATERIAL | TEMP ( °C) | MÓDULO DINÁMICO (MPa) |        |        |         |
|----------|----------|------------|-----------------------|--------|--------|---------|
|          |          |            | 0.05 Hz               | 0.5 Hz | 1.0 Hz | 10.0 Hz |
| 1        | C.A      | 33,17      | 358                   | 797    | 1.016  | 2.290   |
| 2        | C.A      | 30,06      | 444                   | 970    | 1.229  | 2.714   |
| 3        | C.A      | 32,22      | 256                   | 604    | 784    | 1.878   |
| 4        | C.A      | 32,39      | 317                   | 721    | 925    | 2.134   |
| 5        | C.A      | 33,83      | 317                   | 736    | 951    | 2.242   |
| 6        | C.A      | 34,78      | 392                   | 998    | 1.323  | 3.374   |
| 7        | C.A      | 34,31      | 325                   | 804    | 1.057  | 2.637   |
| 8        | C.A      | 34,31      | 330                   | 814    | 1.070  | 2.661   |
| 9        | C.A      | 34,31      | 298                   | 739    | 972    | 2.432   |

C.A.: Concreto Asfáltico en Caliente

Con respecto al material tipo Tosca Arena Asfalto, las mismas no fueron ensayadas en el laboratorio para estimar su Módulo Dinámico, por lo que se estimaron módulos inferiores al de las mezclas asfálticas en base a la experiencia en Argentina con éstos tipos de materiales. A continuación se indican los módulos empleados para el análisis:

**TABLA 5. MÓDULO DINÁMICO ESTIMADO PARA LA TOSCA ARENA  
 ASFALTO (T.A.A).**

| CALICATA | MATERIAL | MÓDULO DINÁMICO (MPa) |        |        |         |
|----------|----------|-----------------------|--------|--------|---------|
|          |          | 0.05 Hz               | 0.5 Hz | 1.0 Hz | 10.0 Hz |
| 1        | T.A.A    | 179                   | 399    | 508    | 1.145   |
| 2        | T.A.A    | 222                   | 485    | 615    | 1.357   |
| 3        | T.A.A    | 128                   | 302    | 392    | 939     |
| 4        | T.A.A    | 159                   | 361    | 463    | 1.067   |
| 5        | T.A.A    | 159                   | 368    | 476    | 1.121   |
| 6        | T.A.A    | 196                   | 499    | 662    | 1.667   |
| 7        | T.A.A    | 163                   | 402    | 529    | 1.319   |
| 8        | T.A.A    | 165                   | 407    | 535    | 1.331   |
| 9        | T.A.A    | 149                   | 370    | 487    | 1.216   |

T.A.A.: Tosca Arena Asfalto

### 7.3.3 Método AASHTO-93. Retro-cálculo Modular Mediante el Deflectógrafo de Impacto (FWD)

En base a la metodología AASHTO-93 discutida en el Capítulo anterior, se estimó el Módulo Resiliente por retro-cálculo de la sub-rasante (MR<sub>rc-sr</sub>), empleando las deflexiones medidas con el FWD.

En la presente investigación se midieron deflexiones superficiales de pavimento con el equipo FWD en tres sectores, el primero de ellos se ubicó 10 metros antes de la calicata, el segundo sector corresponde a la calicata y el tercero 10 metros después de la calicata, estas mediciones se realizaron con la finalidad de reducir

la dispersión de los valores obtenidos. La tabla 6 muestra los resultados del promedio del MRrc-sr obtenido en cada uno de los sectores de las calicatas. Por su parte, el Anexo C presenta una planilla resumen con los parámetros usados para el retro-cálculo modular con el Método AASHTO-93 y los chequeos necesarios, en los tres sectores evaluados de cada calicata y los valores promedio finalmente empleados.

**TABLA 6. MÓDULO RESILIENTE RETRO-CÁLCULADO. MÉTODO AASHTO-93**

|                 |                 | <b>MÓDULO RESILIENTE RETRO-<br/>CÁLCULADO –MÉTODO AASHTO-93-</b> |            |
|-----------------|-----------------|--|------------|
| <b>CALICATA</b> | <b>MATERIAL</b> | <b>MPa</b>   | <b>psi</b> |
| <b>1</b>        | SR              | 66   | 9.524      |
| <b>2</b>        | SR              | 71   | 10.282     |
| <b>3</b>        | SR              | 90   | 13.050     |
| <b>4</b>        | SR              | 69   | 10.030     |
| <b>5</b>        | SR              | 60   | 8.631      |
| <b>6</b>        | SR              | 46   | 6.613      |
| <b>7</b>        | SR              | 52   | 7.595      |
| <b>8</b>        | SR              | 62   | 8.985      |
| <b>9</b>        | SR              | 57   | 8.247      |

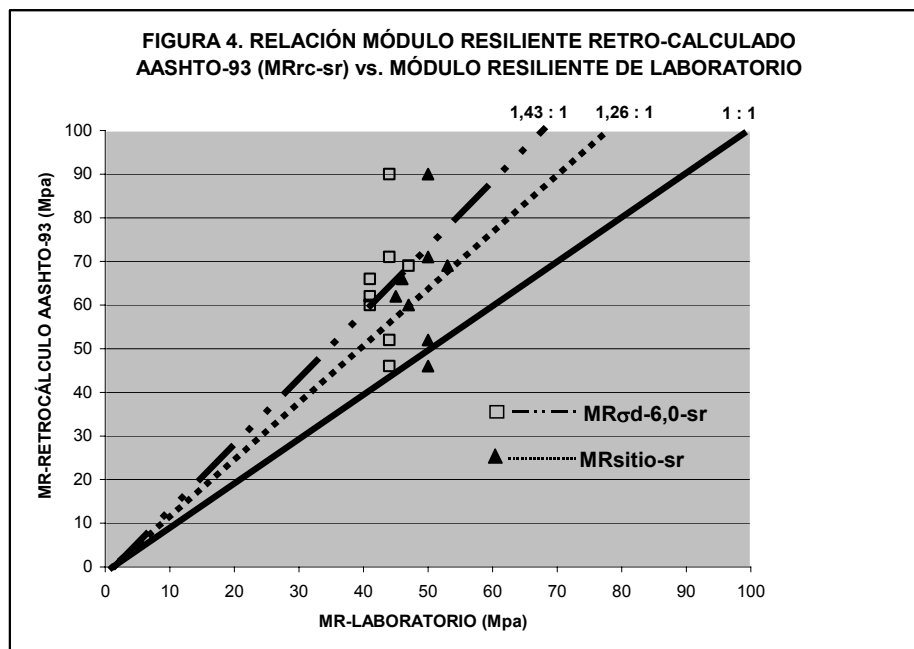
SR: SUB-RASANTE

Como se puede observar, se obtuvo valores de Módulo Resiliente de la sub-rasante entre 46 y 90 MPa, los cuales –en general- son superiores a los estimados por el Programa KENLAYER, en vista que los MRrc-sr, fueron estimados a una

distancia del punto de aplicación de la carga entre 60 cm y 150 cm., según la metodología AASHTO-93.

#### 7.4 Análisis de los Resultados

Con la finalidad de estimar el factor de ajuste "C" para los suelos de sub-rasante ensayados en el presente trabajo de investigación, se determinó el cociente entre el Módulo Resiliente de Sitio ( $MR_{sitio-sr}$ ) estimado por el Programa KENLAYER y los valores de módulos obtenidos por retro-cálculo usando la metodología AASHTO-93 ( $MR_{rc-sr}$ ). Adicionalmente, se compararon los módulos retro-calculados con los obtenidos para un esfuerzo desviador de 6.0 psi, éste último recomendado por el Método AASHTO-93. La figura 4, mostrada a continuación, presenta en forma esquemática los resultados obtenidos con los valores promedio. Por su parte la tabla 7 resume los parámetros estadísticos calculados.



**TABLA 7. VALOR "C" ESTIMADO. MÉTODO AASHTO-93**

| CALICATA                                  | MATERIAL | MRrc-sr<br>(Mpa) | MRsitio-sr<br>(Mpa) | MR $\sigma_d=6.0$<br>(Mpa) | CLASIF.<br>(HRB)  | VALOR "C" (MÉTODO AASHTO-93) |   |
|---|----------|------------------|---------------------|----------------------------|-------------------|------------------------------|---|
|   |          |                  |                     |                            |                   | EN FUNCIÓN:<br>MRsitio-sr    | EN FUNCIÓN: ESF.<br>DESV. ( $\sigma_d=6.0$ psi) |
| 1   | SR       | 66               | 46                  | 41                         | A-6(11)           | 0,70                         | 0,62  |
| 2   | SR       | 71               | 50                  | 44                         | A-7-6(19)         | 0,70                         | 0,62  |
| 3   | SR       | 90               | 50                  | 44                         | A-7-6(16)         | 0,56                         | 0,49  |
| 4   | SR       | 69               | 53                  | 47                         | A-7-6(16)         | 0,77                         | 0,68  |
| 5   | SR       | 60               | 47                  | 41                         | A-7-6(18)         | 0,78                         | 0,68  |
| 6   | SR       | 46               | 50                  | 44                         | A-7-6(19)         | 1,09                         | 0,96  |
| 7   | SR       | 52               | 50                  | 44                         | A-7-6(12)         | 0,96                         | 0,85  |
| 8   | SR       | 62               | 45                  | 41                         | A-6(6)            | 0,73                         | 0,66  |
| 9   | SR       | 57               | 71                  | 67                         | A-6(8)            | 1,25                         | 1,18  |
| <b>ESTADÍSTICOS SUELOS TIPO A-6 (*)</b>   |          |                  |                     |                            | <b>PROMEDIO</b>   | <b>0,72</b>                  | <b>0,64</b>                                     |
|   |          |                  |                     |                            | <b>DESV. EST.</b> | <b>0,02</b>                  | <b>0,028</b>                                    |
|   |          |                  |                     |                            | <b>RANGO</b>      | <b>0,70 – 0,73</b>           | <b>0,62 – 0,66</b>                              |
| <b>ESTADÍSTICOS SUELOS TIPO A-7-6 (*)</b> |          |                  |                     |                            | <b>PROMEDIO</b>   | <b>0,81</b>                  | <b>0,71</b>                                     |
|   |          |                  |                     |                            | <b>DESV. EST.</b> | <b>0,19</b>                  | <b>0,17</b>                                     |
|   |          |                  |                     |                            | <b>RANGO</b>      | <b>0,56 – 1,09</b>           | <b>0,49 – 0,96</b>                              |
| <b>ESTADÍSTICOS GENERAL (*)</b>           |          |                  |                     |                            | <b>PROMEDIO</b>   | <b>0,79</b>                  | <b>0,70</b>                                     |
|   |          |                  |                     |                            | <b>DESV. EST.</b> | <b>0,17</b>                  | <b>0,15</b>                                     |
|   |          |                  |                     |                            | <b>RANGO</b>      | <b>0,56 – 1,09</b>           | <b>0,49 – 0,96</b>                              |

SR: SUB-RASANTE

(\*) No considera el valor de la calicata 9.

Como se puede observar, el valor "C" estimado en función del Módulo Resiliente de Sitio, presenta valores entre 0,56 y 1,25, siendo el último valor el que corresponde a la calicata nueve (09), la cual es una estructura atípica y no fue considerada dentro del promedio general, el cual presenta un valor de 0,79. En lo que respecta al valor "C", en función de un esfuerzo desviador de 6,0 psi, el mismo varía entre 0,49 y 1,18, éste último correspondiente a la calicata nueve (09), con un promedio general de 0,70, sin considerar los resultados de la calicata nueve.

Es importante destacar, que dentro de los suelos evaluados en este estudio, existen tres (3) calicatas con suelos de fundación tipo A-6, similar al del Experimento Vial, sin embargo, el valor "C" promedio con los MRsitio-sr obtenidos en esta investigación fue de 0,72 (sin incluir la calicata 9), el cual es más del doble del valor recomendado por el método AASHTO.

Comparando el promedio general del valor "C", el resultado obtenido mediante la evaluación de un esfuerzo desviador de 6,0 psi. se encuentra en un 13% por debajo del resultado obtenido con el Módulo Resiliente de Sitio. Sin embargo, no debemos perder de vista que el valor "C" propuesto por el Método AASHTO, implica la estimación del módulo de sitio con un esfuerzo desviador constante de 6,0 psi.

Comparando los resultados obtenidos en la presente investigación para el valor de ajuste "C" con el recomendado de 0,33 por la metodología AASHTO, se obtienen incrementos en más del doble de dicho valor. Esto representa un alerta acerca de la aplicación del factor de ajuste, en vista que puede inducir a sub-diseñar o sobre-

diseñar estructuras de refuerzo en pavimentos existentes, cuando la misma es analizada a través del Método AASHTO-93 para el retro-cálculo modular de la sub-rasante.

### **7.5 Alcances y Limitaciones de la Investigación**

La presente investigación se limita al análisis de la información de suelos y pavimentos incluida en la Base de Datos desarrollada en un tramo de 22,6 km. de la Ruta Provincial No. 06 entre la ciudad de Pavón y la ciudad de Campana, ubicada en la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

El análisis realizado consistió en la estimación del Módulo Resiliente de Sitio de la sub-rasante y el Módulo Resiliente retro-calculado de la sub-rasante, con la finalidad de determinar el valor de ajuste "C" incluido en el procedimiento de retro-cálculo modular del Método AASHTO-93, lo cual corresponde al objetivo general de la investigación.

La metodología planteada por el Método AASHTO-93, sólo permite el retro-cálculo modular de la sub-rasante, por lo que los materiales de base o sub-base no deben ser analizados por esta metodología.

Considerando la información contenida en la Base de Datos, los resultados de la presente investigación permiten estimar valores de factor "C" para suelos finos cohesivos de sub-rasante, en vista que corresponden a los encontrados en la exploración de suelos realizada, para el caso particular de suelos friccionales, los resultados de esta investigación no deben ser extrapolados.



## 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación se presentan las principales conclusiones obtenidas del análisis de resultados del presente trabajo especial de grado:

- Los valores de ajuste "C", obtenidos en los suelos de fundación ensayados en la presente investigación, presentan un valor promedio de 0,79, cuando son estimados con el Módulo Resiliente de Sitio de la sub-rasante, según la metodología incluida en este trabajo, la cual se considera la mas adecuada, en vista que toma en cuenta las condiciones propias de trabajo del material. Dicho valor representa mas del doble del recomendado por el Método AASHTO-93 ( $C=0,33$ ), por lo que el mismo debe ser cuidadosamente evaluado.
- El empleo de un esfuerzo desviador constante de 6,0 psi, recomendado por el Método AASHTO-93 para estimar el Módulo Resiliente de la sub-rasante cuando se poseen las ecuaciones constitutivas del suelo, es una es una forma simplificada de obtener el módulo. Sin embargo, comparando el Módulo Resiliente de Sitio de sub-rasante (obtenido con el Programa KENLAYER) con el Módulo Resiliente de la sub-rasante estimado con un esfuerzo desviador de 6,0 psi, éste último puede inducir diferencias entre un 11 a 15% por defecto (sin incluir la calicata nueva), la cual puede ser despreciable si no se dispone de la información necesaria para estimar el Módulo Resiliente de Sitio recomendado en esta investigación.
- El valor "C" recomendado por el Método AASHTO-93 se considera bajo, por lo que su empleo incorpora un factor de seguridad adicional cuando se trabaja

con la metodología de retro-cálculo, en vista que reduce el Módulo Resiliente de Diseño. Esto implica diseño de espesores de refuerzo conservadores.

- El Procedimiento de retro-cálculo Modular del Método AASHTO-93 se considera una herramienta útil y sencilla para estimar el Módulo Resiliente de la sub-rasante, sin embargo, debe ser aplicado considerando un factor de ajuste "C" adecuado para el suelo en estudio, por lo que se recomienda se avalúen los suelos en sitio antes de generalizar el procedimiento.
- Es importante continuar con procedimientos como los descritos en este trabajo para estimar el valor de "C", con la finalidad de aumentar la cantidad de suelos evaluados, así como diferentes estructuras de pavimento.
- El comportamiento de los suelos friccionales, varía considerablemente con respecto a los suelos cohesivos evaluados en el presente trabajo, por lo que se recomienda su estudio en forma detallada.

Finalmente, los resultados presentados en este trabajo se consideran confiables, en función de los suelos y estructuras analizadas.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- 1) AASHTO, DESIGNATION: T 294-92. (1992). "Resilient Modulus of Unbound Granular Base/Subbase Materials and Subgrade Soils-SHRP Protocol P46. U.S.A.
- 2) "AASHTO GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURES-1993". Publicada por la American Association of State Highway and Transportation Officials de los Estados Unidos de América.
- 3) "ASPHALT OVERLAYS AND PAVEMENT REHABILITATION". Publicado por The Asphalt Institute de los Estados Unidos de América. Serie de Manual No. 17 (MS-17). Primera Edición, Noviembre 1969.
- 4) Bavaresco, A. de Prieto, "Proceso Metodológico en la Investigación", Cuarta Edición, Maracaibo, Venezuela, año 2001.
- 5) Chitrapu, S., Hossain, M. y Romanoschi, S. (October 2002). "Consideration of Stress Sensitivity in Backcalculation of Sub-grade Moduli". Dept. of Civil Engineering, Kansas State University, Manhattan, U.S.A.
- 6) European Committee for Standardisation (Mayo 2003). "Indirect Tension Test on Cylindrical Specimens (IT-CY)". Comunidad Europea.
- 7) Giovanon, O. y Pagola, M. (1992). "El Programa BACKMOD para el Cálculo de los Módulos Estructurales a partir de Mediciones de la Deformada en Superficie". Comisión Permanente del Asfalto. Vigésima Séptima Reunión del Asfalto (1992), Argentina.

- 8) Irwin, L.H., Ph.D., P.E. "Backcalculation: An Overview and Perspectiva". Cornell University, Ithaca, NY, U.S.A.
- 9) Lockhart, J. y Lilli, F. (Noviembre de 1962). El "AASHO Road Test". Trabajo presentado a la Reunión del Asfalto, Mar del Plata, Argentina.
- 10) Lytton, R., Germann, F., Chou, Y. y Stooffels, S. (June 1990). "Determining Asphaltic Concrete Pavement Structural Properties by Nondesctructive Testing". TRB, National Research Council, Highway Research Program Report, number 327, U.S.A.
- 11) Méndez A., Carlos. "Metodología", McGraw-Hill, México, año 1992.
- 12) Scullion y Michalak, C. (1990). "Modulus 4.0: User Manual", Texas Transportation Institute, Texas, U.S.A.
- 13) AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM), DESIGNATION: D 4694-96 (1996). "Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device". U.S.A.
- 14) Yang, H. (1993). "Pavement Analysis and Design", Universidad de Kentucky, U.S.A.
- 15) Yoder, E. And Witczak, M. (1975). "Principles of Pavement Design", Second Edition, U.S.A.

## 10. GLOSARIO DE TÉRMINOS

CBR (California Bearing Ratio): ensayo de laboratorio que caracteriza la capacidad soporte de los suelos granulares sueltos a través de la relación de penetración de un pistón normalizado a una cierta profundidad en un suelo de ensayo y la penetración del mismo pistón y a la misma profundidad en una muestra patrón de piedra picada.

Clasificación de Suelos HRB: clasificación de suelos desarrollada por la Highway Research Board (HRB) de los Estados Unidos de América, la cual define siete tipos de suelos desde tipo A-1 hasta tipo A-7, siendo los suelos A-1 de tipo granular y los A-7 suelos finos.

Coefficiente de Poisson: relación entre la deformación axial y la deformación vertical de un cuerpo sometido a esfuerzos verticales.

"Cuenco" de Deflexiones: deformación que ocurre en pavimentos flexibles cuando los mismos se encuentran solicitados por una carga aplicada en su superficie.

Ensayos No Destructivos (Non Destructive Test –NDT-): son procedimientos de ensayos que no requieren equipos de perforación o de remoción de los materiales existentes en una vía.

Falling Weight Deflectometer (FWD): equipo de medición de deflexiones basado en impulsos de carga, las cuales son transmitidas al pavimento por un mazo que golpea a una cierta altura y peso un plato de ensayo colocado sobre el pavimento y son registradas por medio de sensores colocados en el pavimento.

Módulo Resiliente (Módulo de Young o de Elasticidad): es una medida de las propiedades elásticas de los suelos de fundación del pavimento considerando su comportamiento no lineal ante las sollicitaciones de carga.

MRrc.-sr: Módulo Resiliente de la sub-rasante obtenido por retro-cálculo, según el Método AASHTO-93.

MRsitio-sr: Módulo Resiliente de la sub-rasante de sitio estimado con los esfuerzos obtenidos del Programa KENLAYER, empleando las ecuaciones constitutivas de los suelos y las condiciones de sitio del material.

MR  $\sigma_d=6.0$ : Módulo Resiliente de la sub-rasante estimado con las ecuaciones constitutivas de los suelos y un esfuerzo desviador constante de 6.0 psi.

Pavimentos Flexibles: es aquel tipo de pavimento constituido por una capa asfáltica sobre materiales granulares, estabilizados o no.

Pavimentos Rígidos: es aquel tipo de pavimento constituido por una losa de hormigón sobre materiales granulares, estabilizados o no.

Retro-cálculo: proceso mediante el cual se estima el Módulo de Young o de Elasticidad de un material por medio de la medición de deflexiones superficiales del pavimento, haciendo uso de la teoría elástica lineal multicapas.

**ANEXO A**

**BASE DE DATOS**

**La Base de Datos que se incluye en presente Anexo A, fue desarrollada por los Ingenieros Maylin Corros B. y Ernesto Urbáez P., compilando los trabajos de evaluación de pavimento, auscultación de suelos y ensayos de laboratorio, ejecutados por los mismos ingenieros, en 22,6 kilómetros de la Ruta Provincial No. 6, ubicada en la Provincia de Buenos Aires, Argentina y dichos trabajos fueron finalizados en Noviembre de 2003.**



# **TRABAJO DE CAMPO**

**MEDICIÓN DE DEFLEXIONES  
EMPLEANDO VIGA BENKELMAN**

**A DIFERENTES DISTANCIAS “r”**      **DEFLEXIONES (D) MEDIDAS CON VIGA BENKELMAN**

| <b>CALICATA</b> | <b>D0<br/>(mm/1000)</b> | <b>D30<br/>(mm/1000)</b> | <b>D60<br/>(mm/1000)</b> | <b>D90<br/>(mm/1000)</b> | <b>D120<br/>(mm/1000)</b> | <b>D150<br/>(mm/1000)</b> |
|-----------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| <b>1</b>        | 980                     | 780                      | 660                      | 540                      | 480                       | 440                       |
| <b>2</b>        | 860                     | 620                      | 480                      | 400                      | 300                       | 220                       |
| <b>3</b>        | 860                     | 760                      | 620                      | 440                      | 280                       | 220                       |
| <b>4</b>        | 860                     | 780                      | 500                      | 400                      | 260                       | 220                       |
| <b>5</b>        | 1040                    | 1020                     | 800                      | 720                      | 200                       | 160                       |
| <b>6</b>        | 1660                    | 1640                     | 1520                     | 980                      | 620                       | 320                       |
| <b>7</b>        | 840                     | 740                      | 640                      | 440                      | 320                       | 200                       |
| <b>8</b>        | 1200                    | 1140                     | 780                      | 320                      | 200                       | 140                       |
| <b>9</b>        | 1360                    | 1320                     | 880                      | 280                      | 140                       | 80                        |

Fuente:  
BASE DE DATOS

MAYER-2003

- D0: Deflexión en el punto de carga máxima
- D30: Deflexión a **r =30 cm.** del punto de carga máxima
- D60: Deflexión a **r =60 cm.** del punto de carga máxima
- D90: Deflexión a **r =90 cm.** del punto de carga máxima
- D120: Deflexión a **r =120 cm.** del punto de carga máxima
- D150: Deflexión a **r =150 cm.** del punto de carga máxima

**MEDICIÓN DE DEFLEXIONES**

**EMPLEANDO FALLING WEIGHT**

**DEFLECTOMETER**

## RESUMEN DE MEDICION DE DEFLEXIONES CON EQUIPO FWD-MODELO KUAB

| CALICATA   | Carga (Kg) |         |         |         | do (0.0) micrones |         |         |         | d1 (30) micrones |         |         |         | d2 (60) micrones |         |         |         |
|------------|------------|---------|---------|---------|-------------------|---------|---------|---------|------------------|---------|---------|---------|------------------|---------|---------|---------|
|            | CALICATA   | < 10 m. | > 10 m. | > 10 m. | CALICATA          | < 10 m. | > 10 m. | > 10 m. | CALICATA         | < 10 m. | > 10 m. | > 10 m. | CALICATA         | < 10 m. | > 10 m. | > 10 m. |
| 1 (1+250)  | 4047       | 4138    | 4120    | 4059    | 303               | 467     | 328     | 363     | 223              | 349     | 264     | 293     | 185              | 261     | 218     | 237     |
| 2 (4+200)  | 4014       | 4125    | 4168    |         | 393               | 399     | 371     |         | 290              | 281     | 275     |         | 231              | 227     | 202     |         |
| 3 (7+500)  | 4194       | 4064    | 3982    |         | 412               | 299     | 373     |         | 258              | 200     | 247     |         | 186              | 147     | 185     |         |
| 4 (9+000)  | 4201       | 3983    | 4066    |         | 403               | 428     | 376     |         | 317              | 332     | 274     |         | 243              | 260     | 207     |         |
| 5 (12+200) | 3937       | 4138    | 4004    |         | 399               | 467     | 670     |         | 298              | 349     | 516     |         | 228              | 261     | 360     |         |
| 6 (13+800) | 4057       | 4078    | 4251    |         | 743               | 903     | 454     |         | 589              | 652     | 360     |         | 412              | 432     | 288     |         |
| 7 (17+000) | 3955       | 3999    | 4010    |         | 545               | 411     | 738     |         | 431              | 322     | 495     |         | 345              | 258     | 308     |         |
| 8 (18+700) | 4064       | 4164    | 3921    |         | 653               | 536     | 813     |         | 453              | 366     | 475     |         | 281              | 236     | 249     |         |
| 9 (21+600) | 4145       | 3992    |         |         | 702               | 679     |         |         | 470              | 479     |         |         | 265              | 311     |         |         |

| CALICATA   | Carga (Kg) |         |         |         | do (0.0) cm. |         |         |         | d1 (30) cm. |         |         |         | d2 (60) cm. |         |         |         |
|------------|------------|---------|---------|---------|--------------|---------|---------|---------|-------------|---------|---------|---------|-------------|---------|---------|---------|
|            | CALICATA   | < 10 m. | > 10 m. | > 10 m. | CALICATA     | < 10 m. | > 10 m. | > 10 m. | CALICATA    | < 10 m. | > 10 m. | > 10 m. | CALICATA    | < 10 m. | > 10 m. | > 10 m. |
| 1 (1+250)  | 4047       | 4138    | 4120    | 4059    | 0,0303       | 0,0467  | 0,0328  | 0,0363  | 0,0223      | 0,0349  | 0,0264  | 0,0293  | 0,0185      | 0,0261  | 0,0218  | 0,0237  |
| 2 (4+200)  | 4014       | 4125    | 4168    |         | 0,0393       | 0,0399  | 0,0371  |         | 0,0290      | 0,0281  | 0,0275  |         | 0,0231      | 0,0227  | 0,0202  |         |
| 3 (7+500)  | 4194       | 4064    | 3982    |         | 0,0412       | 0,0299  | 0,0373  |         | 0,0258      | 0,0200  | 0,0247  |         | 0,0186      | 0,0147  | 0,0185  |         |
| 4 (9+000)  | 4201       | 3983    | 4066    |         | 0,0403       | 0,0428  | 0,0376  |         | 0,0317      | 0,0332  | 0,0274  |         | 0,0243      | 0,0260  | 0,0207  |         |
| 5 (12+200) | 3937       | 4138    | 4004    |         | 0,0399       | 0,0467  | 0,0670  |         | 0,0298      | 0,0349  | 0,0516  |         | 0,0228      | 0,0261  | 0,0360  |         |
| 6 (13+800) | 4057       | 4078    | 4251    |         | 0,0743       | 0,0903  | 0,0454  |         | 0,0589      | 0,0652  | 0,0360  |         | 0,0412      | 0,0432  | 0,0288  |         |
| 7 (17+000) | 3955       | 3999    | 4010    |         | 0,0545       | 0,0411  | 0,0738  |         | 0,0431      | 0,0322  | 0,0495  |         | 0,0345      | 0,0258  | 0,0308  |         |
| 8 (18+700) | 4064       | 4164    | 3921    |         | 0,0653       | 0,0536  | 0,0813  |         | 0,0453      | 0,0366  | 0,0475  |         | 0,0281      | 0,0236  | 0,0249  |         |
| 9 (21+600) | 4145       | 3992    |         |         | 0,0702       | 0,0679  |         |         | 0,0470      | 0,0479  |         |         | 0,0265      | 0,0311  |         |         |

| CALICATA   | Carga (Kg) |         |         |         | d3 (0.90) micrones |         |         |         | d5 (120) micrones |         |         |         | d6 (150) micrones |         |         |         | T. AIRE(C) | T. PAV.(C) | T.PAV.MED(C) |
|------------|------------|---------|---------|---------|--------------------|---------|---------|---------|-------------------|---------|---------|---------|-------------------|---------|---------|---------|------------|------------|--------------|
|            | CALICATA   | < 10 m. | > 10 m. | > 10 m. | CALICATA           | < 10 m. | > 10 m. | > 10 m. | CALICATA          | < 10 m. | > 10 m. | > 10 m. | CALICATA          | < 10 m. | > 10 m. | > 10 m. |            |            |              |
| 1 (1+250)  | 4047       | 4138    | 4120    | 4059    | 146                | 186     | 172     | 184     | 129               | 129     | 136     | 138     | 92                | 90      | 105     | 103     | 26         | 44         |              |
| 2 (4+200)  | 4014       | 4125    | 4168    |         | 174                | 172     | 138     |         | 129               | 129     | 96      |         | 94                | 97      | 64      |         | 25         | 43         |              |
| 3 (7+500)  | 4194       | 4064    | 3982    |         | 125                | 106     | 135     |         | 86                | 75      | 98      |         | 58                | 54      | 69      |         | 25         | 44         | 39,4         |
| 4 (9+000)  | 4201       | 3983    | 4066    |         | 184                | 195     | 153     |         | 136               | 146     | 112     |         | 97                | 106     | 83      |         | 25         | 43         |              |
| 5 (12+200) | 3937       | 4138    | 4004    |         | 170                | 186     | 241     |         | 125               | 129     | 155     |         | 91                | 90      | 97      |         | 25         | 46         |              |
| 6 (13+800) | 4057       | 4078    | 4251    |         | 275                | 268     | 220     |         | 182               | 172     | 164     |         | 119               | 108     | 118     |         | 25         | 46         |              |
| 7 (17+000) | 3955       | 3999    | 4010    |         | 258                | 195     | 183     |         | 184               | 143     | 106     |         | 125               | 102     | 68      |         | 25         | 47         |              |
| 8 (18+700) | 4064       | 4164    | 3921    |         | 175                | 150     | 124     |         | 107               | 97      | 64      |         | 73                | 65      | 39      |         | 26         | 47         |              |
| 9 (21+600) | 4145       | 3992    |         |         | 135                | 180     |         |         | 63                | 101     |         |         | 37                | 53      |         |         | 27         | 48         |              |

| CALICATA   | Carga (Kg) |         |         |         | d3 (0.90) cm. |         |         |         | d5 (120) cm. |         |         |         | d6 (150) cm. |         |         |         | T. AIRE(C) | T. PAV.(C) | T.PAV.MED(C) |
|------------|------------|---------|---------|---------|---------------|---------|---------|---------|--------------|---------|---------|---------|--------------|---------|---------|---------|------------|------------|--------------|
|            | CALICATA   | < 10 m. | > 10 m. | > 10 m. | CALICATA      | < 10 m. | > 10 m. | > 10 m. | CALICATA     | < 10 m. | > 10 m. | > 10 m. | CALICATA     | < 10 m. | > 10 m. | > 10 m. |            |            |              |
| 1 (1+250)  | 4047       | 4138    | 4120    | 4059    | 0,0146        | 0,0186  | 0,0172  | 0,0184  | 0,0129       | 0,0129  | 0,0136  | 0,0138  | 0,0092       | 0,0090  | 0,0105  | 0,0103  | 26         | 44         |              |
| 2 (4+200)  | 4014       | 4125    | 4168    |         | 0,0174        | 0,0172  | 0,0138  |         | 0,0129       | 0,0129  | 0,0096  |         | 0,0094       | 0,0097  | 0,0064  |         | 25         | 43         |              |
| 3 (7+500)  | 4194       | 4064    | 3982    |         | 0,0125        | 0,0106  | 0,0135  |         | 0,0086       | 0,0075  | 0,0098  |         | 0,0058       | 0,0054  | 0,0069  |         | 25         | 44         | 39,4         |
| 4 (9+000)  | 4201       | 3983    | 4066    |         | 0,0184        | 0,0195  | 0,0153  |         | 0,0136       | 0,0146  | 0,0112  |         | 0,0097       | 0,0106  | 0,0083  |         | 25         | 43         |              |
| 5 (12+200) | 3937       | 4138    | 4004    |         | 0,0170        | 0,0186  | 0,0241  |         | 0,0125       | 0,0129  | 0,0155  |         | 0,0091       | 0,0090  | 0,0097  |         | 25         | 46         |              |
| 6 (13+800) | 4057       | 4078    | 4251    |         | 0,0275        | 0,0268  | 0,0220  |         | 0,0182       | 0,0172  | 0,0164  |         | 0,0119       | 0,0108  | 0,0118  |         | 25         | 46         |              |
| 7 (17+000) | 3955       | 3999    | 4010    |         | 0,0258        | 0,0195  | 0,0183  |         | 0,0184       | 0,0143  | 0,0106  |         | 0,0125       | 0,0102  | 0,0068  |         | 25         | 47         |              |
| 8 (18+700) | 4064       | 4164    | 3921    |         | 0,0175        | 0,0150  | 0,0124  |         | 0,0107       | 0,0097  | 0,0064  |         | 0,0073       | 0,0065  | 0,0039  |         | 26         | 47         |              |
| 9 (21+600) | 4145       | 3992    |         |         | 0,0135        | 0,0180  |         |         | 0,0063       | 0,0101  |         |         | 0,0037       | 0,0053  |         |         | 27         | 48         |              |

**EXTRACCIÓN DE NÚCLEOS DE  
CAPAS ASFÁLTICAS  
(CORE-DRILL):  
ESPEORES Y DENSIDADES DE  
TESTIGOS**

**RESUMEN GENERAL DE ESPESORES. TESTIGOS DE CAPA ASFALTICA.**

| TRAMO | INICIO | FIN    | LONG. (m) | CALICATA | PROG.  | TESTIGOS DE CAPAS ASFALTICAS (cm) |          |       |          |            | TOSCA ARENA ASFALTO (cm) |      |      |
|-------|--------|--------|-----------|----------|--------|-----------------------------------|----------|-------|----------|------------|--------------------------|------|------|
|       |        |        |           |          |        | No. 1                             | PROMEDIO | No. 2 | PROMEDIO | PROM. GEN. |                          |      |      |
| 1     | 0+000  | 7+200  | 7200      | 1        | 1+250  | 21,0                              | 21,0     | 21,0  | 21,0     | 21,0       | 30,0                     |      |      |
|       |        |        |           |          |        | 21,0                              |          | 21,0  |          |            |                          |      |      |
|       |        |        |           |          |        | 21,0                              |          | 21,0  |          |            |                          |      |      |
|       |        |        |           | 2        | 4+200  | 20,5                              | 20,5     | 20,5  | 20,5     | 20,5       |                          | 20,5 | 20,5 |
|       |        |        |           |          |        | 20,5                              |          | 20,5  |          |            |                          |      |      |
|       |        |        |           |          |        | 20,5                              |          | 20,5  |          |            |                          |      |      |
| 2     | 7+200  | 8+400  | 1200      | 3        | 7+500  | 21,5                              | 21,5     | 21,5  | 21,4     | 21,5       |                          |      |      |
|       |        |        |           |          |        | 21,5                              |          | 21,5  |          |            |                          |      |      |
|       |        |        |           |          |        | 21,5                              |          | 21,3  |          |            |                          |      |      |
| 3     | 8+400  | 13+000 | 4600      | 4        | 9+000  | 25,7                              | 25,7     | 23,0  | 22,5     | 25,7       | 10,0                     |      |      |
|       |        |        |           |          |        | 25,7                              |          | 22,0  |          |            |                          |      |      |
|       |        |        |           |          |        | 25,7                              |          | 22,5  |          |            |                          |      |      |
|       |        |        |           | 5        | 12+200 | 21,0                              | 21,0     | 20,8  | 20,9     | 21,0       |                          | 21,0 | 21,0 |
|       |        |        |           |          |        | 21,0                              |          | 21,0  |          |            |                          |      |      |
|       |        |        |           |          |        | 21,0                              |          | 21,0  |          |            |                          |      |      |
| 4     | 13+000 | 14+400 | 1400      | 6        | 13+800 | 17,7                              | 17,7     | 18,0  | 17,9     | 17,8       |                          |      |      |
|       |        |        |           |          |        | 17,7                              |          | 17,8  |          |            |                          |      |      |
|       |        |        |           |          |        | 17,7                              |          | 17,8  |          |            |                          |      |      |
| 5     | 14+400 | 17+500 | 3100      | 7        | 17+000 | 19,4                              | 19,5     | 19,5  | 19,5     | 19,5       |                          |      |      |
|       |        |        |           |          |        | 19,6                              |          | 19,5  |          |            |                          |      |      |
|       |        |        |           |          |        | 19,4                              |          | 19,5  |          |            |                          |      |      |
| 6     | 17+500 | 22+600 | 5100      | 8        | 18+700 | 17,5                              | 17,6     | 17,4  | 17,6     | 17,6       |                          |      |      |
|       |        |        |           |          |        | 17,5                              |          | 17,7  |          |            |                          |      |      |
|       |        |        |           |          |        | 17,7                              |          | 17,8  |          |            |                          |      |      |
|       |        |        |           | 9        | 21+600 | 16,5                              | 16,4     | 15,7  | 15,7     | 16,4       | 16,4                     | 16,4 |      |
|       |        |        |           |          |        | 16,3                              |          |       |          |            |                          |      |      |
|       |        |        |           |          |        | 16,5                              |          |       |          |            |                          |      |      |

NO SE INCLUYO EN PROMEDIO (HUBO PERDIDA DE MATERIAL)

NO SE INCLUYO EN PROMEDIO (HUBO PERDIDA DE MATERIAL)

**DENSIDADES DE PROBETAS DE ASFALTO PARA ENSAYO DE MODULO**

| <b>PROBETA</b> | <b>PESO SECO</b> | <b>PESO (sss)</b> | <b>PESO (sumerg.)</b> | <b>VOLUMEN</b> | <b>DENSIDAD</b> | <b>PROMEDIO</b> | <b>PROM. GEN.</b> |
|----------------|------------------|-------------------|-----------------------|----------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| C-411          | 870,1            | 871,8             | 518,2                 | 353,6          | 2,461           | <b>2,435</b>    | <b>2,436</b>      |
| C-412          | 804,6            | 805,3             | 472,6                 | 332,7          | 2,418           |                 |                   |
| C-413          | 772,6            | 773,0             | 458,4                 | 314,6          | 2,456           |                 |                   |
| C-414          | 921,9            | 922,8             | 546,3                 | 376,5          | 2,449           |                 |                   |
| C-415          | 845,9            | 847,1             | 493,1                 | 354,0          | 2,390           |                 |                   |
| C-511          | 867,0            | 867,0             | 508,9                 | 358,1          | 2,421           | <b>2,439</b>    |                   |
| C-512          | 906,8            | 907,9             | 538,1                 | 369,8          | 2,452           |                 |                   |
| C-513          | 861,5            | 862,4             | 507,7                 | 354,7          | 2,429           |                 |                   |
| C-514          | 854,7            | 855,2             | 507,1                 | 348,1          | 2,455           |                 |                   |
| C-611          | 553,3            | 559,8             | 330,0                 | 229,8          | 2,408           | <b>2,433</b>    |                   |
| C-612          | 836,1            | 837,3             | 495,6                 | 341,7          | 2,447           |                 |                   |
| C-613          | 829,6            | 830,6             | 490,9                 | 339,7          | 2,442           |                 |                   |
| C-614          | 740,4            | 741,2             | 437,3                 | 303,9          | 2,436           |                 |                   |





**DETERMINACIÓN DE LA  
DENSIDAD DE SUELOS EN SITIO  
MEDIANTE EL EMPLEO DEL  
VOLUMENÓMETRO**

# ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE SUELOS EN SITIO MEDIANTE EL EMPLEO DEL VOLUMENÓMETRO

*El trabajo que se presenta fue realizado en campo en la Ruta 6 de la Provincia de Buenos Aires, Tramo: Pavón-Campana. Argentina*

## 1. Introducción

El presente anexo incluye los resultados de los Ensayos para la determinación de la Densidad en Sitio de los suelos que constituyen las capas de pavimento en cada una de las calicatas evaluadas. El Ensayo se basa en la determinación de volúmenes mediante el empleo del Volumenómetro.

La determinación de la densidad del suelo se basa en el peso conocido del suelo húmedo obtenido de una pequeña excavación realizada en la capa de suelo investigada. Conocido el volumen de la excavación, la Densidad Húmeda ( $D_{Húm}$ ) es computada como:

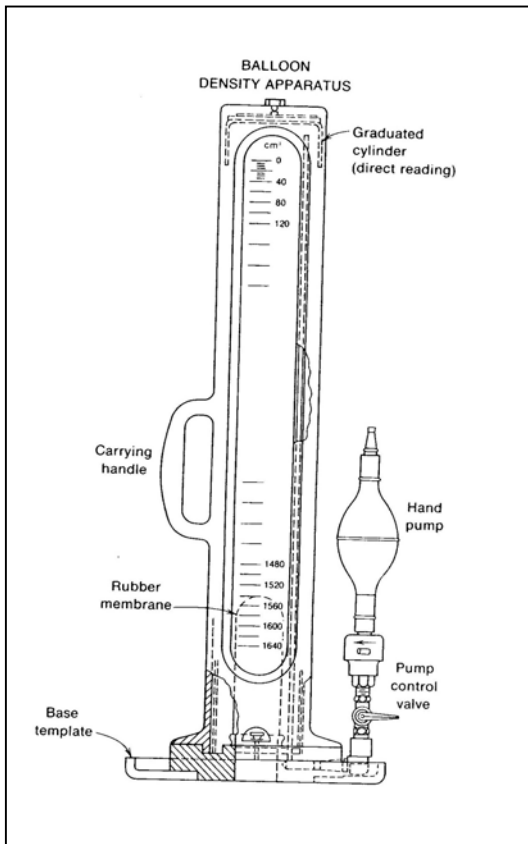
$$D_{Húm.} = \frac{\text{Peso del Suelo Húmedo}}{\text{Volumen de la excavación}}$$

Si se conoce el contenido de humedad ( $w$ ) del suelo obtenido de la excavación, entonces la Densidad Seca ( $D_{Seca}$ ) del material es:

$$D_{Seca} = \frac{D_{Húm.}}{1 + w}$$

En el presente trabajo, **el Volumen de la excavación fue determinado empleando el Método del Volumenómetro**, con el cual el volumen es encontrado como medida directa del volumen de agua bombeado en la excavación a través de una membrana de látex que se llena de agua y toma la forma de la excavación. El volumen es directamente medido del cilindro graduado del volumenómetro.

La figura siguiente muestra un esquema general del equipo empleado:



FUENTE: BOWLES, J. *ENGINEERING PROPERTIES OF SOLIDS AND THEIR MEASUREMENT*. McGRAW-HILL. SECOND EDITION.

En general el procedimiento de ensayo consiste en la colocación del plato que un agujero en el centro sobre el lugar donde se desea realizar la medición de la densidad, previo alisamiento de la superficie, a fin de asegurar el contacto del plato con el suelo. El volumenómetro es colocado sobre el agujero del plato, tomándose la Lectura Inicial del nivel de agua "L1", luego se abre la válvula de control y se presiona la bomba y la membrana que se halla en su interior sale junto con el agua hasta que ésta última alcance su nivel inferior por ingreso en el agujero, adhiriéndose de esta forma la

tiene

membrana a las paredes de la excavación, encontrándose completamente llena de agua. Esta situación representa la Lectura Final "L2".

Posteriormente se invierte la bomba conectándola en el lado opuesto, a fin que actúe como bomba de vacío; luego se presiona y por efecto del vacío que se origina la membrana regresa al interior del cilindro junto con el agua

El Volumen (V) del agujero es la diferencia entre las lecturas inicial y final:

$$V = L1 - L2$$

## **2. Programa Experimental**

En total fueron realizados veintidós (22) determinaciones de densidad de suelos en sitio de capas de bases, sub-bases y sub-rasantes de las nueve (09) calicatas en estudio.

## **3. Resultados**

A continuación se presentan los datos de campo y su procesamiento, a fin de determinar la densidad de sitio.



**DENSIDAD Y HUMEDAD EN SITIO (ENSAYO CON EQUIPO VOLUMENOMETRO)**

|        |        |        |           |          |        | ENSAYO DE DENSIDAD CON EQUIPO VOLUMENOMETRO |              |             |              |               |               |             |                |
|--------|--------|--------|-----------|----------|--------|---|--------------|-------------|--------------|---------------|---------------|-------------|----------------|
| TRAMO  | INICIO | FIN    | LONG. (m) | CALICATA | PROG.  | MUESTRA                                     | LEC.INI      | LEC.FIN     | VOL(cm3)     | PESO HUM.(gr) | D.HUM(gr/cm3) | HUM(%)      | D.SECA(gr/cm3) |
| 1      | 0+000  | 7+200  | 7200      | 1        | 1+250  | M2  | 320,0        | 580,0       | 260,0        | 477,0         | <b>1,835</b>  | <b>26,5</b> | <b>1,450</b>   |
|        |        |        |           |          |        | M3(SR)                                      | 310,0        | 640,0       | 330,0        | 617,0         | <b>1,870</b>  | <b>17,2</b> | <b>1,595</b>   |
|        |        |        |           | 2        | 4+200  | M2  | 320,0        | 440,0       | 120,0        | 194,0         | <b>1,617</b>  | <b>28,0</b> | <b>1,263</b>   |
|        |        |        |           |          |        | M3  | 310,0        | 580,0       | 270,0        | 496,0         | <b>1,837</b>  | <b>23,2</b> | <b>1,491</b>   |
|        |        |        |           |          |        | M4(SR)                                      | 320,0        | 610,0       | 290,0        | 523,0         | <b>1,803</b>  | <b>20,1</b> | <b>1,502</b>   |
| 2      | 7+200  | 8+400  | 1200      | 3        | 7+500  | M2  | 310,0        | 570,0       | 260,0        | 472,0         | <b>1,815</b>  | <b>27,0</b> | <b>1,429</b>   |
|        |        |        |           |          |        | M3(SR)                                      | 310,0        | 550,0       | 240,0        | 435,0         | <b>1,813</b>  | <b>24,0</b> | <b>1,462</b>   |
| 3      | 8+400  | 13+000 | 4600      | 4        | 9+000  | M2  | 330,0        | 550,0       | 220,0        | 344,0         | <b>1,564</b>  | <b>22,0</b> | <b>1,282</b>   |
|        |        |        |           |          |        | M3  | 310,0        | 700,0       | 390,0        | 756,0         | <b>1,938</b>  | <b>23,3</b> | <b>1,572</b>   |
|        |        |        |           |          |        | M4(SR)                                      | 310,0        | 740,0       | 430,0        | 702,0         | <b>1,633</b>  | <b>23,0</b> | <b>1,327</b>   |
|        |        |        |           | 5        | 12+200 | M2  | 310,0        | 670,0       | 360,0        | 606,0         | <b>1,683</b>  | <b>29,5</b> | <b>1,300</b>   |
| M3     | 330,0  | 720,0  | 390,0     |          |        | 687,0                                       | <b>1,762</b> | <b>20,9</b> | <b>1,457</b> |               |               |             |                |
| M4(SR) | 320,0  | 740,0  | 420,0     |          |        | 663,0                                       | <b>1,579</b> | <b>23,0</b> | <b>1,283</b> |               |               |             |                |
| 4      | 13+000 | 14+400 | 1400      | 6        | 13+800 | M2  | 320,0        | 500,0       | 180,0        | 287,0         | <b>1,594</b>  | <b>29,5</b> | <b>1,231</b>   |
|        |        |        |           |          |        | M3  | 310,0        | 850,0       | 540,0        | 1062,0        | <b>1,967</b>  | <b>26,0</b> | <b>1,561</b>   |
|        |        |        |           |          |        | M4(SR)                                      | 310,0        | 800,0       | 490,0        | 918,0         | <b>1,873</b>  | <b>30,0</b> | <b>1,441</b>   |
| 5      | 14+400 | 17+500 | 3100      | 7        | 17+000 | M2  |              |             |              |               |               |             |                |
|        |        |        |           |          |        | M3  | 320,0        | 1170,0      | 850,0        | 1403,0        | <b>1,651</b>  | <b>21,2</b> | <b>1,362</b>   |
|        |        |        |           |          |        | M4  |              |             | 0,0          |               |               |             |                |
|        |        |        |           |          |        | M5(SR)                                      | 320,0        | 1200,0      | 880,0        | 1612,0        | <b>1,832</b>  | <b>26,6</b> | <b>1,447</b>   |
| 6      | 17+500 | 22+600 | 5100      | 8        | 18+700 | M2  | 310,0        | 1030,0      | 720,0        | 1435,0        | <b>1,993</b>  | <b>28,5</b> | <b>1,551</b>   |
|        |        |        |           |          |        | M3  |              |             |              |               |               |             |                |
|        |        |        |           |          |        | M4(SR)                                      | 320,0        | 1130,0      | 810,0        | 1485,0        | <b>1,833</b>  | <b>21,0</b> | <b>1,515</b>   |
|        |        |        |           | 9        | 21+600 | M2  | 310,0        | 980,0       | 670,0        | 1157,0        | <b>1,727</b>  | <b>27,4</b> | <b>1,355</b>   |
| M3     |        |        |           |          |        |   |              |             |              |               |               |             |                |
| M4(SR) | 310,0  | 950,0  | 640,0     |          |        | 1239,0                                      | <b>1,936</b> | <b>20,5</b> | <b>1,607</b> |               |               |             |                |

# **TRABAJO DE LABORATORIO**



# **SUELOS**

# ENSAYOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES ÍNDICE DE LOS SUELOS. ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN

*El trabajo de laboratorio que se presenta fue realizado en el Laboratorio de Pavimentos e Ingeniería Vial -LAPIV- de la Universidad Nacional de la Plata, Argentina.*

## 1. Introducción

El presente anexo incluye los resultados de los ensayos de laboratorio de suelos destinados a la determinación de las Propiedades Índice de las muestras de suelo obtenidas de las diferentes calicatas ejecutadas dentro de los alcances de la presente investigación.

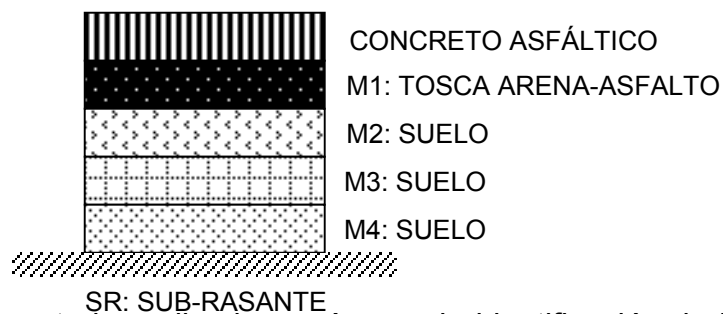
Los ensayos realizados fueron los siguientes:

- Determinación del Contenido de Humedad Natural
- Granulometría mediante tamizado vía húmeda
- Límites de Atterberg

Con la información procedente de los ensayos indicados se realizó la clasificación de los suelos en base al Método de la Highway Research Board (H.R.B.).

## 2. Programa Experimental

El perfil general de calicatas encontradas fue identificado en función del número de capas detectadas, de acuerdo a la siguiente nomenclatura:

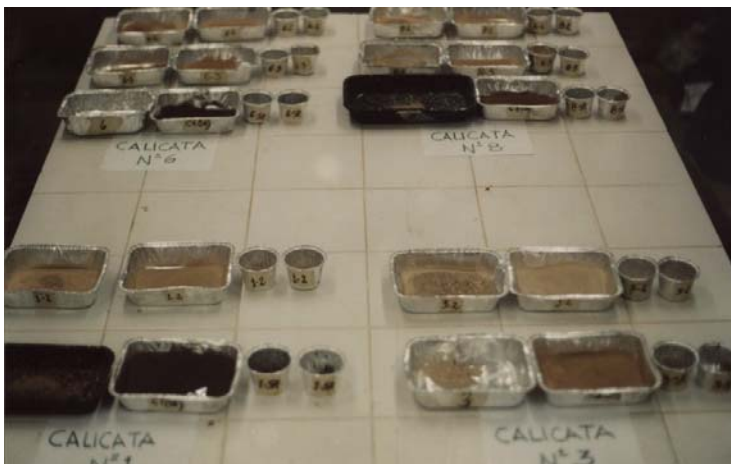


Los ensayos de laboratorio realizados, así como la identificación de las muestras estudiadas se indican a continuación:

| ENSAYO   | MUESTRA 2<br>(M2) | MUESTRA 3<br>(M3) | MUESTRA 4<br>(M4) | MUESTRA<br>SR | TOTAL<br>ENSAYOS<br>REALIZADOS |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|---------------|--------------------------------|
| Determinación del Contenido de Humedad Natural | 9                 | 7                 | 1                 | 9             | 26                             |
| Granulometría mediante tamizado vía húmeda     | 9                 | 7                 | 1                 | 9             | 26                             |
| Límites de Atterberg                           | 9                 | 7                 | 1                 | 9             | 26                             |
| Clasificación de Suelos (H.R.B.)               | 9                 | 7                 | 1                 | 9             | 26                             |



MUESTRAS PROCEDENTES DE LAS DIFERENTES CAPAS DE LAS CALICATAS



MUESTRAS PREPARADAS EN LABORATORIO PARA REALIZACIÓN DE ENSAYOS

### 3. Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos de cada uno de los ensayos indicados, para cada una las muestras evaluadas.

# ENSAYO DE GRANULOMETRIA Y LIMITES DE CONSISTENCIA

OBRA: TESIS-MAGISTER

FECHA:

MUESTRA: C1(M2)-CALICATA 1 CAPA PENULTIMA

LADO:

PROGRESIVA: 1+250

## GRANULOMETRIA

| PESO MOLDE (gr.)= 6,52             |           |       |              |        | GRANULOMETRIA VÍA HÚMEDA                                       |           |       |              |        |
|------------------------------------|-----------|-------|--------------|--------|--|-----------|-------|--------------|--------|
| PESO MUESTRA + MOLDE (gr.)= 256,75 |           |       |              |        | PESO MOLDE -PARA PESOS PARCIALES RETENIDOS- (gr.) = 6,71       |           |       |              |        |
| PESO MUESTRA HÚMEDA (gr.)= 250,23  |           |       |              |        | PESO SECO (DESPUES DE LAVADO) + MOLDE PESOS PARCIALES = 137,94 |           |       |              |        |
| HUMEDAD NATURAL (%)= 26,51         |           |       |              |        | PESO SECO (MUESTRA DESPUES DE LAVADO) = 131,23                 |           |       |              |        |
| PESO MUESTRA SECA (gr.)= 197,79    |           |       |              |        |  |           |       |              |        |
| CEDAZOS                            | PESO RET. | % RET | % RET. ACUM. | % PASA | CEDAZOS  | PESO RET. | % RET | % RET. ACUM. | % PASA |
| 3"                                 |           |       | 0,0          | 100,0  | #4   | 4,78 (*)  | 2,4   |              | 97,6   |
| 2"                                 |           |       | 0,0          | 100,0  | #10  | 7,47      | 3,8   |              | 93,8   |
| 1 1/2"                             |           |       | 0,0          | 100,0  | #40  | 41,72     | 21,1  |              | 72,7   |
| 3/4"                               |           |       | 0,0          | 100,0  | #100   | 23,74     | 12,0  |              | 60,7   |
| 3/8"                               |           |       | 0,0          | 100,0  | #200   | 27,38     | 13,8  |              | 46,9   |
|                                    |           |       |              |        | Σ =  | 105,09    |       |              |        |

## LÍMITES DE CONSISTENCIA

### LÍMITE LÍQUIDO

| Nº GOLPES PLATILLO | Nº DE CAPSULA | PESO CAPSULA<br>g | PESO CAPSULA+ SUELO HUM<br>g | PESO CAPSULA+ SUELO SECO<br>g | PESO SUELO SECO<br>g | PESO AGUA<br>g | HUMEDAD<br>% | LÍMITE LÍQUIDO | LÍMITE LÍQUIDO A 25 GOLPES |
|--------------------|---------------|-------------------|------------------------------|-------------------------------|----------------------|----------------|--------------|----------------|----------------------------|
| 24                 | 1-2           | 2,65              | 15,36                        | 12,01                         | 9,36                 | 3,35           | 35,79        | 35,79          | 35,61                      |
|                    |               |                   |                              |                               |                      |                |              |                |                            |
|                    |               |                   |                              |                               |                      |                |              |                |                            |

### LÍMITE PLÁSTICO

|  |     |      |      |      |      |      |       |
|--|-----|------|------|------|------|------|-------|
|  | 1-2 | 2,70 | 9,36 | 7,93 | 5,23 | 1,43 | 27,34 |
|  |     |      |      |      |      |      |       |
|  |     |      |      |      |      |      |       |

### HUMEDAD NATURAL

|                          |         |
|--------------------------|---------|
| Nº ENVASE                | 1-2     |
| PESO DEL ENVASE          | g 2,71  |
| PESO ENVASE+SUELO HUMEDO | g 81,35 |
| PESO ENVASE+SUELO SECO   | g 64,87 |
| PESO DEL AGUA            | g 16,48 |
| PESO DEL SUELO SECO      | g 62,16 |
| HUMEDAD                  | % 26,51 |

### COMPOSICION GRANULOMETRICA

| CEDAZOS             | % PART. | MATERIAL       |
|---------------------|---------|----------------|
| RETENIDO # 4        | 2,4     | GRAVA          |
| PASA # 4 RET. # 200 | 50,7    | ARENA          |
| PASANTE # 200       | 46,9    | LIMO Y ARCILLA |
| TOTAL               | 100,0   |                |

## RESUMEN DEL SUELO

| HUMEDAD NATURAL<br>% | LÍMITE LÍQUIDO | LÍMITE PLÁSTICO | ÍNDICE DE PLASTICIDAD | CLASIFICACIÓN<br>H.R.B. | CLASIFICACIÓN<br>UNIFICADA |
|----------------------|----------------|-----------------|-----------------------|-------------------------|----------------------------|
| 26,51                | 35,61          | 27,34           | 8,27                  | A-4(2)                  |                            |

OBSERVACIONES:

(\*) TOSCA

# ENSAYO DE GRANULOMETRIA Y LIMITES DE CONSISTENCIA

OBRA: TESIS-MAGISTER

FECHA: FEB-2004

MUESTRA: C1 (SR) - CALICATA 1 SUB-RASANTE

LADO:

PROGRESIVA: 1+250

## GRANULOMETRIA

|                                    |   |        |  |  |  |
|------------------------------------|---|--------|--|--|--|
| PESO MOLDE (gr.)= 229,10           | GRANULOMETRÍA VÍA HÚMEDA                                |        |  |  |  |
| PESO MUESTRA + MOLDE (gr.)= 500,14 | PESO MOLDE -PARA PESOS PARCIALES RETENIDOS- (gr.) =     | 6,71   |  |  |  |
| PESO MUESTRA HÚMEDA (gr.)= 271,04  | PESO SECO (DESPUES DE LAVADO) + MOLDE PESOS PARCIALES = | 239,94 |  |  |  |
| HUMEDAD NATURAL (%)= 17,21         | PESO SECO (MUESTRA DESPUES DE LAVADO) =                 | 233,23 |  |  |  |
| PESO MUESTRA SECA (gr.)= 231,24    |   |        |  |  |  |

| CEDAZOS | PESO RET. | % RET | % RET. ACUM. | % PASA | CEDAZOS | PESO RET. | % RET | % RET. ACUM. | % PASA |
|---------|-----------|-------|--------------|--------|---------|-----------|-------|--------------|--------|
| 3"      |           |       | 0,0          | 100,0  | #4      | 0,74      | 0,3   |              | 99,7   |
| 2"      |           |       | 0,0          | 100,0  | #10     | 3,07      | 1,3   |              | 98,4   |
| 1 1/2"  |           |       | 0,0          | 100,0  | #40     | 2,04      | 0,9   |              | 97,5   |
| 3/4"    |           |       | 0,0          | 100,0  | #100    | 1,12      | 0,5   |              | 97,0   |
| 3/8"    |           |       | 0,0          | 100,0  | #200    | 3,80      | 1,6   |              | 95,3   |
|         |           |       |              |        | Σ =     | 10,77     |       |              |        |

## LÍMITES DE CONSISTENCIA

### LÍMITE LÍQUIDO

| Nº GOLPES PLATILLO | Nº DE CAPSULA | PESO CAPSULA<br>g | PESO CAPSULA+ SUELO HUM<br>g | PESO CAPSULA+ SUELO SECO<br>g | PESO SUELO SECO<br>g | PESO AGUA<br>g | HUMEDAD<br>% | LÍMITE LÍQUIDO | LÍMITE LÍQUIDO A 25 GOLPES |
|--------------------|---------------|-------------------|------------------------------|-------------------------------|----------------------|----------------|--------------|----------------|----------------------------|
| 30                 |               | 2,59              | 9,00                         | 7,28                          | 4,69                 | 1,72           | 36,67        | 36,67          | 37,49                      |
|                    |               |                   |                              |                               |                      |                |              |                |                            |
|                    |               |                   |                              |                               |                      |                |              |                |                            |

### LÍMITE PLÁSTICO

|  |  |      |       |       |      |      |       |
|--|--|------|-------|-------|------|------|-------|
|  |  | 2,62 | 13,56 | 11,78 | 9,16 | 1,78 | 19,43 |
|  |  |      |       |       |      |      |       |
|  |  |      |       |       |      |      |       |

### HUMEDAD NATURAL

|                          |   |        |
|--------------------------|---|--------|
| Nº ENVASE                |   |        |
| PESO DEL ENVASE          | g | 2,54   |
| PESO ENVASE+SUELO HUMEDO | g | 111,23 |
| PESO ENVASE+SUELO SECO   | g | 95,27  |
| PESO DEL AGUA            | g | 15,96  |
| PESO DEL SUELO SECO      | g | 92,73  |
| HUMEDAD                  | % | 17,21  |

### COMPOSICION GRANULOMETRICA

| CEDAZOS             | % PART. | MATERIAL       |
|---------------------|---------|----------------|
| RETENIDO # 4        | 0,3     | GRAVA          |
| PASA # 4 RET. # 200 | 4,3     | ARENA          |
| PASANTE # 200       | 95,3    | LIMO Y ARCILLA |
| TOTAL               | 100,0   |                |

## RESUMEN DEL SUELO

| HUMEDAD NATURAL<br>% | LÍMITE LÍQUIDO | LÍMITE PLÁSTICO | ÍNDICE DE PLASTICIDAD | CLASIFICACIÓN<br>H.R.B. | CLASIFICACIÓN<br>UNIFICADA |
|----------------------|----------------|-----------------|-----------------------|-------------------------|----------------------------|
| 17,21                | 37,49          | 19,43           | 18,06                 | A-6(11)                 |                            |

OBSERVACIONES:

---



---



---

# ENSAYO DE GRANULOMETRIA Y LIMITES DE CONSISTENCIA

OBRA: TESIS-MAGISTER

FECHA: FEB-2004

MUESTRA: C2(M2)-CALICATA 2 CAPA ANTE-PEN

LADO:

PROGRESIVA: 4+200

## GRANULOMETRIA

| PESO MOLDE (gr.)= 6,55             |           |       |              |        | GRANULOMETRÍA VÍA HÚMEDA                                       |           |       |              |        |
|------------------------------------|-----------|-------|--------------|--------|--|-----------|-------|--------------|--------|
| PESO MUESTRA + MOLDE (gr.)= 505,27 |           |       |              |        | PESO MOLDE -PARA PESOS PARCIALES RETENIDOS- (gr.) = 6,55       |           |       |              |        |
| PESO MUESTRA HÚMEDA (gr.)= 498,72  |           |       |              |        | PESO SECO (DESPUES DE LAVADO) + MOLDE PESOS PARCIALES = 186,47 |           |       |              |        |
| HUMEDAD NATURAL (%)= 27,94         |           |       |              |        | PESO SECO (MUESTRA DESPUES DE LAVADO) = 179,92                 |           |       |              |        |
| PESO MUESTRA SECA (gr.)= 389,79    |           |       |              |        |  |           |       |              |        |
| CEDAZOS                            | PESO RET. | % RET | % RET. ACUM. | % PASA | CEDAZOS  | PESO RET. | % RET | % RET. ACUM. | % PASA |
| 3"                                 |           |       | 0,0          | 100,0  | #4   | 27,62 (*) | 7,1   |              | 92,9   |
| 2"                                 |           |       | 0,0          | 100,0  | #10  | 52,12     | 13,4  |              | 79,5   |
| 1 1/2"                             |           |       | 0,0          | 100,0  | #40  | 63,94     | 16,4  |              | 63,1   |
| 3/4"                               |           |       | 0,0          | 100,0  | #100   | 18,35     | 4,7   |              | 58,4   |
| 3/8"                               |           |       | 0,0          | 100,0  | #200   | 10,65     | 2,7   |              | 55,7   |
|                                    |           |       |              |        | Σ =  | 172,68    |       |              |        |

## LÍMITES DE CONSISTENCIA

### LÍMITE LÍQUIDO

| Nº GOLPES PLATILLO | Nº DE CAPSULA | PESO CAPSULA | PESO CAPSULA+ SUELO HUM | PESO CAPSULA+ SUELO SECC | PESO SUELO SECO | PESO AGUA | HUMEDAD | LÍMITE LÍQUIDO | LÍMITE LÍQUIDO A 25 GOLPES |
|--------------------|---------------|--------------|-------------------------|--------------------------|-----------------|-----------|---------|----------------|----------------------------|
|                    |               | g            | g                       | g                        | g               | g         | %       |                |                            |
| 23                 | 2-2           | 2,61         | 9,88                    | 7,66                     | 5,05            | 2,22      | 43,96   | 43,96          | 43,52                      |
|                    |               |              |                         |                          |                 |           |         |                |                            |
|                    |               |              |                         |                          |                 |           |         |                |                            |

### LÍMITE PLÁSTICO

|  |     |       |       |       |      |      |       |
|--|-----|-------|-------|-------|------|------|-------|
|  | 2-2 | 20,52 | 28,70 | 26,48 | 5,96 | 2,22 | 37,25 |
|  |     |       |       |       |      |      |       |
|  |     |       |       |       |      |      |       |

### HUMEDAD NATURAL

|                          |         |
|--------------------------|---------|
| Nº ENVASE                | 2-2     |
| PESO DEL ENVASE          | g 20,52 |
| PESO ENVASE+SUELO HUMEDO | g 92,86 |
| PESO ENVASE+SUELO SECO   | g 77,06 |
| PESO DEL AGUA            | g 15,8  |
| PESO DEL SUELO SECO      | g 56,54 |
| HUMEDAD                  | % 27,94 |

### COMPOSICION GRANULOMETRICA

| CEDAZOS             | % PART. | MATERIAL       |
|---------------------|---------|----------------|
| RETENIDO # 4        | 7,1     | GRAVA          |
| PASA # 4 RET. # 200 | 37,2    | ARENA          |
| PASANTE # 200       | 55,7    | LIMO Y ARCILLA |
| TOTAL               | 100,0   |                |

## RESUMEN DEL SUELO

| HUMEDAD NATURAL % | LÍMITE LÍQUIDO | LÍMITE PLÁSTICO | ÍNDICE DE PLASTICIDAD | CLASIFICACIÓN    | CLASIFICACIÓN |
|-------------------|----------------|-----------------|-----------------------|------------------|---------------|
| 27,94             | 43,52          | 37,25           | 6,27                  | H.R.B.<br>A-5(4) | UNIFICADA     |

OBSERVACIONES: (\*) TOSCA

|  |                 |                |                         |                          |   |               |                          |                 |                            |
|--|-----------------|----------------|-------------------------|--------------------------|---|---------------|--------------------------|-----------------|----------------------------|
| <b>OBRA:</b> TESIS-MAGISTER                      |                 |                |                         |                          | <b>FECHA:</b> FEB-2004  |               |                          |                 |                            |
| <b>MUESTRA:</b> C2(M3)-CALICATA 2 CAPA PENULTIMA |                 |                |                         |                          | <b>LADO:</b>  |               | <b>PROGRESIVA:</b> 4+200 |                 |                            |
| <b>GRANULOMETRIA</b>                             |                 |                |                         |                          |   |               |                          |                 |                            |
| PESO MOLDE (gr.)= 6,55                           |                 |                |                         |                          | <b>GRANULOMETRÍA VÍA HÚMEDA</b>                               |               |                          |                 |                            |
| PESO MUESTRA + MOLDE (gr.)= 272,34               |                 |                |                         |                          | PESO MOLDE -PARA PESOS PARCIALES RETENIDOS- (gr.) = 6,55      |               |                          |                 |                            |
| PESO MUESTRA HÚMEDA (gr.)= 265,79                |                 |                |                         |                          | PESO SECO (DESPUES DE LAVADO) + MOLDE PESOS PARCIALES = 61,27 |               |                          |                 |                            |
| HUMEDAD NATURAL (%)= 23,18                       |                 |                |                         |                          | PESO SECO (MUESTRA DESPUES DE LAVADO) = 54,72                 |               |                          |                 |                            |
| PESO MUESTRA SECA (gr.)= 215,77                  |                 |                |                         |                          |   |               |                          |                 |                            |
| CEDAZOS  | PESO RET.       | % RET          | % RET. ACUM.            | % PASA                   | CEDAZOS   | PESO RET.     | % RET                    | % RET. ACUM.    | % PASA                     |
| 3"   |                 | 0              | 0,0                     | 100,0                    | #4  | 4,50 (*)      | 2,1                      |                 | 97,9                       |
| 2"   |                 |                | 0,0                     | 100,0                    | #10   | 1,42          | 0,7                      |                 | 97,3                       |
| 1 1/2"   |                 |                | 0,0                     | 100,0                    | #40   | 17,68         | 8,2                      |                 | 89,1                       |
| 3/4"   |                 |                | 0,0                     | 100,0                    | #100  | 16,26         | 7,5                      |                 | 81,5                       |
| 3/8"   |                 |                | 0,0                     | 100,0                    | #200  | 7,46          | 3,5                      |                 | 78,1                       |
|  |                 |                |                         |                          | Σ =   | 47,32         |                          |                 |                            |
| <b>LIMITES DE CONSISTENCIA</b>                   |                 |                |                         |                          |   |               |                          |                 |                            |
| <b>LIMITE LÍQUIDO</b>                            |                 |                |                         |                          |   |               |                          |                 |                            |
| Nº GOLPES PLATILLO                               | Nº DE CAPSULA   | PESO CAPSULA   | PESO CAPSULA+ SUELO HUM | PESO CAPSULA+ SUELO SECO | PESO SUELO SECO   | PESO AGUA     | HUMEDAD                  | LIMITE LÍQUIDO  | LIMITE LÍQUIDO A 25 GOLPES |
|  |                 | g              | g                       | g                        | g   | g             | %                        |                 |                            |
| 22   | 2-3             | 2,62           | 15,10                   | 11,86                    | 9,24  | 3,24          | 35,06                    | 35,06           | 34,53                      |
|  |                 |                |                         |                          |   |               |                          |                 |                            |
|  |                 |                |                         |                          |   |               |                          |                 |                            |
| <b>LIMITE PLÁSTICO</b>                           |                 |                |                         |                          |   |               |                          |                 |                            |
|  | 2-3             | 2,68           | 7,83                    | 6,9                      | 4,22  | 0,93          | 22,04                    |                 |                            |
|  |                 |                |                         |                          |   |               |                          |                 |                            |
|  |                 |                |                         |                          |   |               |                          |                 |                            |
| <b>HUMEDAD NATURAL</b>                           |                 |                |                         |                          | <b>COMPOSICION GRANULOMETRICA</b>                             |               |                          |                 |                            |
| Nº ENVASE  |                 |                |                         | 2-3                      | <b>CEDAZOS</b>  |               | <b>% PART.</b>           | <b>MATERIAL</b> |                            |
| PESO DEL ENVASE                                  | g               |                |                         | 2,69                     | RETENIDO # 4  |               | 2,1                      | GRAVA           |                            |
| PESO ENVASE+SUELO HUMEDO                         | g               |                |                         | 66,14                    | PASA # 4 RET. # 200   |               | 19,8                     | ARENA           |                            |
| PESO ENVASE+SUELO SECO                           | g               |                |                         | 54,2                     | PASANTE # 200   |               | 78,1                     | LIMO Y ARCILLA  |                            |
| PESO DEL AGUA                                    | g               |                |                         | 11,94                    | TOTAL   |               | 100,0                    |                 |                            |
| PESO DEL SUELO SECO                              | g               |                |                         | 51,51                    |   |               |                          |                 |                            |
| HUMEDAD  | %               |                |                         | 23,18                    |   |               |                          |                 |                            |
| <b>RESUMEN DEL SUELO</b>                         |                 |                |                         |                          |   |               |                          |                 |                            |
|  | HUMEDAD NATURAL | LÍMITE LÍQUIDO | LÍMITE PLÁSTICO         | ÍNDICE DE PLASTICIDAD    | CLASIFICACIÓN   | CLASIFICACIÓN |                          |                 |                            |
|  | %               |                |                         |                          | H.R.B.  | UNIFICADA     |                          |                 |                            |
|  | 23,18           | 34,53          | 22,04                   | 12,49                    | A-6(9)  |               |                          |                 |                            |
| OBSERVACIONES: (*) TOSCA                         |                 |                |                         |                          |   |               |                          |                 |                            |
| _____  |                 |                |                         |                          |   |               |                          |                 |                            |
| _____  |                 |                |                         |                          |   |               |                          |                 |                            |
| _____  |                 |                |                         |                          |   |               |                          |                 |                            |



# ENSAYO DE GRANULOMETRIA Y LIMITES DE CONSISTENCIA

**OBRA:** TESIS-MAGISTER

**FECHA:** FEB-2004

**MUESTRA:** C2(SR)-CALICATA 2 SUB-RASANTE

**LADO:**

**PROGRESIVA:** 4+200

## GRANULOMETRIA

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| PESO MOLDE (gr.)= 223,05           | <b>GRANULOMETRÍA VÍA HÚMEDA</b>                                |
| PESO MUESTRA + MOLDE (gr.)= 442,55 | PESO MOLDE -PARA PESOS PARCIALES RETENIDOS- (gr.) = 6,71       |
| PESO MUESTRA HÚMEDA (gr.)= 219,50  | PESO SECO (DESPUES DE LAVADO) + MOLDE PESOS PARCIALES = 229,02 |
| HUMEDAD NATURAL (%)= 20,11         | PESO SECO (MUESTRA DESPUES DE LAVADO) = 222,31                 |
| PESO MUESTRA SECA (gr.)= 182,75    |  |

| CEDAZOS | PESO RET. | % RET | % RET. ACUM. | % PASA | CEDAZOS     | PESO RET. | % RET | % RET. ACUM. | % PASA |
|---------|-----------|-------|--------------|--------|-------------|-----------|-------|--------------|--------|
| 3"      |           |       | 0,0          | 100,0  | <b>#4</b>   | 0,00      | 0,00  |              | 100,00 |
| 2"      |           |       | 0,0          | 100,0  | <b>#10</b>  | 0,00      | 0,00  |              | 100,00 |
| 1 1/2"  |           |       | 0,0          | 100,0  | <b>#40</b>  | 1,42      | 0,78  |              | 99,22  |
| 3/4"    |           |       | 0,0          | 100,0  | <b>#100</b> | 1,81      | 0,99  |              | 98,23  |
| 3/8"    |           |       | 0,0          | 100,0  | <b>#200</b> | 1,95      | 1,07  |              | 97,17  |
|         |           |       |              |        | <b>Σ =</b>  | 5,18      |       |              |        |

## LIMITES DE CONSISTENCIA

### LÍMITE LÍQUIDO

| Nº GOLPES PLATILLO | Nº DE CAPSULA | PESO CAPSULA<br>g | PESO CAPSULA+ SUELO HUM<br>g | PESO CAPSULA+ SUELO SECO<br>g | PESO SUELO SECO<br>g | PESO AGUA<br>g | HUMEDAD<br>% | LÍMITE LÍQUIDO | LÍMITE LÍQUIDO A 25 GOLPES |
|--------------------|---------------|-------------------|------------------------------|-------------------------------|----------------------|----------------|--------------|----------------|----------------------------|
| 21                 | 2-SR          | 2,61              | 10,81                        | 7,94                          | 5,33                 | 2,87           | 53,85        | 53,85          | 52,72                      |
|                    |               |                   |                              |                               |                      |                |              |                |                            |
|                    |               |                   |                              |                               |                      |                |              |                |                            |

### LÍMITE PLÁSTICO

|  |      |      |       |      |      |     |       |
|--|------|------|-------|------|------|-----|-------|
|  | 2-SR | 2,60 | 10,63 | 9,23 | 6,63 | 1,4 | 21,12 |
|  |      |      |       |      |      |     |       |
|  |      |      |       |      |      |     |       |

### HUMEDAD NATURAL

|                          |         |
|--------------------------|---------|
| Nº ENVASE                | 2-SR    |
| PESO DEL ENVASE          | g 2,51  |
| PESO ENVASE+SUELO HUMEDO | g 95,04 |
| PESO ENVASE+SUELO SECO   | g 79,55 |
| PESO DEL AGUA            | g 15,49 |
| PESO DEL SUELO SECO      | g 77,04 |
| HUMEDAD                  | % 20,11 |

### COMPOSICION GRANULOMETRICA

| CEDAZOS             | % PART. | MATERIAL       |
|---------------------|---------|----------------|
| RETENIDO # 4        | 0,0     | GRAVA          |
| PASA # 4 RET. # 200 | 2,8     | ARENA          |
| PASANTE # 200       | 97,2    | LIMO Y ARCILLA |
| TOTAL               | 100,0   |                |

## RESUMEN DEL SUELO

| HUMEDAD NATURAL<br>% | LÍMITE LÍQUIDO | LÍMITE PLÁSTICO | ÍNDICE DE PLASTICIDAD | CLASIFICACIÓN<br>H.R.B. | CLASIFICACIÓN UNIFICADA |
|----------------------|----------------|-----------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| <b>20,11</b>         | <b>52,72</b>   | <b>21,12</b>    | <b>31,61</b>          | <b>A-7-6(19)</b>        |                         |

OBSERVACIONES:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

# **CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)**

## ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR) PARA DETERMINACIÓN DE CAPACIDAD SOPORTE DE SUELOS

*El trabajo de laboratorio que se presenta a continuación fue realizado en el Laboratorio de Pavimentos e Ingeniería Vial -LAPIV- de la Universidad Nacional de la Plata, Argentina.*

### 1. Introducción

El presente anexo describe el método empleado para la determinación del Valor Soporte de muestras de suelos procedentes de las Calicatas que sirvieron de base a la investigación. El parámetro de caracterización estudiado corresponde al *California Bearing Ratio "CBR"*, propuesto en el año 1929 por el Departamento de Carreteras de Estado de California con el objeto de obtener un parámetro que representara las características físicas del suelo de sub-rasante, el cual pudiera ser utilizado como variable dentro de los procedimientos de diseño de pavimentos. La Capacidad Soporte de un suelo o valor CBR, *"es la relación existente entre la resistencia a la penetración de un suelo y la de un material patrón (piedra triturada) cuya resistencia a la penetración se ha asignado un valor igual al 100%.* La resistencia a la penetración se mide mediante la fuerza necesaria para hacer hincar un pistón de acero de sección transversal y velocidad de desplazamiento normalizados, hasta una cierta profundidad...El valor CBR de un suelo compactado será igual a la carga total correspondiente a 0,1" ó 0,2" de penetración, expresada como porcentaje del respectivo valor del material patrón..."<sup>1</sup>

| <b>MATEIRIAL PATRÓN<br/>PIEDRA TRIRURADA</b> |                             |  |
|--|-----------------------------|--|
| <b>PENETRACIÓN</b><br>(Pulg.)                | <b>CARGA TOTAL</b><br>(Kg.) | <b>RESISTENCIA</b><br>A LA<br>PENETRACIÓN<br>UNITARIA<br>(Kg/cm <sup>2</sup> ) |
| <b>0,1</b>                                   | <b>1,355</b>                | <b>70</b>  |
| <b>0,2</b>                                   | <b>2,032</b>                | <b>105</b>   |
| 0,3  | 2,574                       | 133  |
| 0,4  | 3,116                       | 161  |
| 0,5  | 3,523                       | 182  |

En general,

el método

<sup>1</sup> UGAS, C. ENSAYOS DE LABORATORIO EN MECÁNICA DE SUELOS. DISCUSIÓN-EVALUACIÓN Y PROCEDIMIENTO. ISBN 980-00-0003-8. CARACAS-VENEZUELA (1985)

para la determinación del valor CBR comprende la ejecución de los siguientes ensayos:

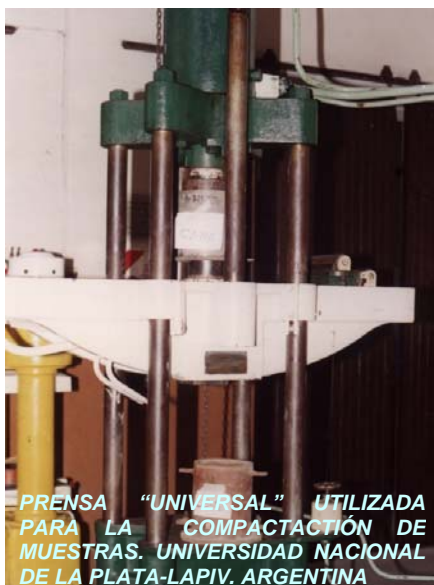
1. Compactación (determinación de la relación humedad óptima-densidad máxima seca).
2. Hinchamiento, es decir, el aumento porcentual de altura, referido a la altura inicial, que experimenta la probeta de suelo por incremento de su humedad luego del período de inmersión.
3. Resistencia a la Penetración.

De acuerdo con la Norma de Vialidad Nacional-Argentina N°VN-E6-84 existen cuatro posibles variantes para la ejecución del Ensayo CBR:

- Método Estático a Carga Fija Pre-Establecida.
- Método Estático a Densidad Pre-Fijada.
- Método Dinámico N°1 (Simplificado). Utiliza
- Método Dinámico N°2 (Completo).

Al final del presente anexo se incluye la Norma Argentina que regula las condiciones de ensayo para cada una de las variantes indicadas.

## 2. Programa Experimental



Se realizaron **Ensayos CBR a Densidad Prefijada** a trece (13) muestras procedentes de las Calicatas 2; 4; 5; 6; 8 y 9. Las densidades de compactación utilizadas en la preparación de las probetas corresponden a las *Densidades Secas* obtenidas en sitio para cada una de las capas correspondientes a las calicatas estudiadas. Esta circunstancia obedece a que interesa conocer la capacidad soporte del suelo en las condiciones de servicio bajo las cuales igualmente fueron ejecutadas las mediciones de deflexiones de

pavimento, que sirven para estimar módulos resilientes de suelos mediante procedimientos de retro-cálculo o retro-ajuste modular como los que sustentan los

objetivos específicos de la presente investigación. El proceso de compactación se realiza en forma estática, utilizando una prensa con velocidad de avance del plato igual a 1,25 mm/minuto, hasta lograr una presión total de 140 Kg/cm<sup>2</sup> (hasta la carga de 70 Kg/cm<sup>2</sup> la velocidad de avance puede ser mayor).

## 2.1 Datos Experimentales

- a) Diámetro Molde = 15,2 cm. / Radio Molde = 7,60 cm.
- b) Área Molde =  $\Pi \times r^2 = 181,37 \text{ cm}^2$
- c) Velocidad de penetración del pistón = 1,27 mm/minuto
- d) Área del Pistón = 19,3471 cm<sup>2</sup>
- e) Factor Dial = 5,43 Kg. / División
- f) Sobre-Cargas Utilizadas en los Ensayo: pesas de 5 lbs. cada una.
- g) Número de Pesas: la selección del número de pesas a emplear en los ensayos, fue realizada tomado en cuenta el peso que representa el espesor total de capas que constituyen la estructura de pavimentos, de acuerdo a lo detectado en las calicatas. Para ello fue empleada la siguiente relación:

$$\text{Sobre-Carga Requerida (P)} = \text{Área del Molde (Am)} \times \sum e_i \times (d_i) \text{ capa}_i$$

donde:

- P: sobre-carga requerida (pesas), en Kg.
- Am: Área del molde, en m<sup>2</sup>.
- e<sub>i</sub>: espesor de la capa "i"
- d<sub>i</sub>: densidad de la capa "i"

- h) Las lecturas fueron realizadas bajo las siguientes condiciones:



| TIEMPO  |          | PENETRACIÓN<br>Velocidad Pistón = 1,27 mm / minuto |      |
|---------|----------|--|------|
| Minutos | Segundos | Pulgadas   | mm.  |
| 0       | 30       | 0,025  | 0,64 |
| 1       | 0        | 0,050  | 1,27 |
| 1       | 30       | 0,075  | 1,91 |
| 2       | 0        | 0,100  | 2,54 |
| 2       | 30       | 0,200  | 3,17 |
| 3       | 0        | 0,300  | 3,81 |
| 3       | 30       | 0,400  | 4,44 |
| 4       | 0        | 0,500  | 5,08 |

## 2.2 Cálculos

El valor Soporte ó CBR es determinado mediante la expresión:

$$\text{CBR (\%)} = \frac{\text{Lectura Dial} \times \text{Factor Dial} \times 100}{\text{Área del Pistón} \times \text{Resist. Penet. Mat. Patrón (0,1''/0,2'')}}}$$

Por convención el CBR se reporta en base a las penetraciones de 0,1" y 0,2". De esta forma se tienen las siguientes expresiones:

$$\text{CBR(\%) 0,1''} = \frac{\text{Lectura Dial (Divisiones)} \times 5,43 \text{ Kg./División} \times 100}{19,3471 \text{ cm}^2 \times 70 \text{ Kg/cm}^2}$$

$$\text{CBR(\%) 0,2''} = \frac{\text{Lectura Dial (Divisiones)} \times 5,43 \text{ Kg./División} \times 100}{19,3471 \text{ cm}^2 \times 105 \text{ Kg/cm}^2}$$

## 3. Resultados

La tabla siguiente resume los resultados obtenidos y seguidamente se presentan los resultados completos de los ensayos de penetración practicados a cada una de las muestras, así como algunos cálculos preparatorios de las muestras.

| CALICATA | MUESTRA     | TIPO SUELO | LECTURA (0,1'') | CBR 0,1'' (%) |
|----------|-------------|------------|-----------------|---------------|
| C2       | M2          | A-5(4)     | 167             | 70,0          |
| C4       | M2          | A-2-5(0)   | 93              | 37,1          |
|          | M3          | A-6(9)     | 52              | 21,4          |
|          | SUB-RASANTE | A-7-6(16)  | 25              | 10,0          |
| C5       | M2          | A-2-5(0)   | 126             | 54,3          |
|          | M3          | A-6(10)    | 49              | 20,0          |
|          | SUB-RASANTE | A-7-6(18)  | 24              | 10,0          |
| C6       | M2          | A-2-7(1)   | 50              | 20,0          |
|          | M3          | A-6(10)    | 18              | 7,22          |
|          | SUB-RASANTE | A-7-6(19)  | 28              | 11,2          |
| C8       | M2          | A-4(2)     | 167             | 67            |
|          | SUB-RASANTE | A-6(10)    | 27              | 10,8          |
| C9       | SUB-RASANTE | A-6(9)     | 28              | 11,2          |

## ENSAYO C.B.R.

PROCEDENCIA DE LA MUESTRA.....: TESIS-MAGISTER

FECHA...: ABRIL-2004

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA.....: C2-M2

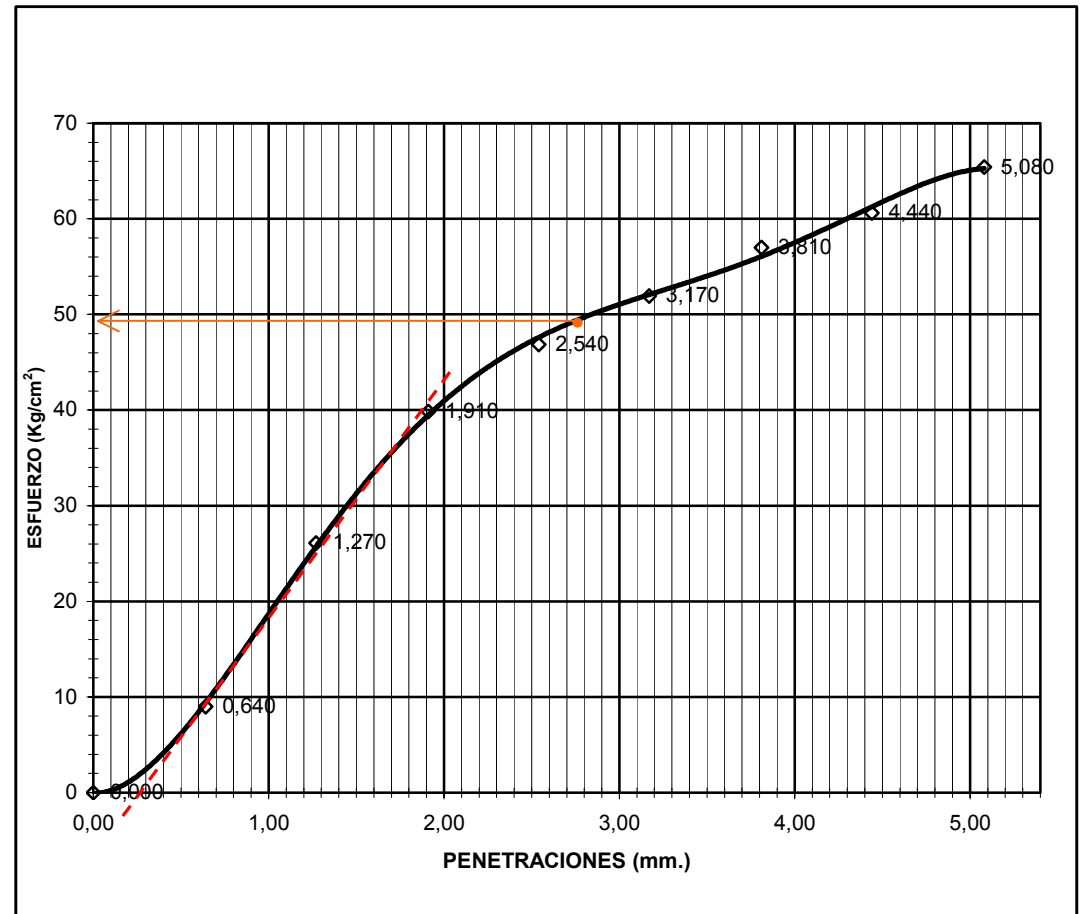
PROGRESIVA: 4+200

### DESCRIPCION DEL MATERIAL

| LL    | LP    | IP   | CLASIFICACION |
|-------|-------|------|---------------|
| 43,52 | 37,25 | 6,27 | <b>A-5(4)</b> |

| FACTOR ANILLO<br>Kg/div                  | AREA PISTON<br>cm <sup>2</sup> | TIEMPO<br>MIN/SEG | PENETRAC.<br>mm. | MOLDE N° C2-M2 |                   |
|--|--------------------------------|-------------------|------------------|----------------|-------------------|
|  |                                |                   |                  | LECTURA        | PRESION<br>Kg/cm2 |
| <b>5,430</b>                             | <b>19,3471</b>                 | 0 m.; 0 seg.      | 0,000            | 0              | 0                 |
|  |                                | 0 m.; 30 seg.     | 0,640            | 32             | 9                 |
|  |                                | 1 m.; 0 seg.      | 1,270            | 93             | 26                |
| FACTOR ANILLO<br>Kg/cm <sup>2</sup> /div |                                | 1 m.; 30 seg.     | 1,910            | 142            | 40                |
|  |                                | 2 m.; 0 seg.      | 2,540            | 167            | 47                |
| <b>0,2807</b>                            |                                | 2 m.; 30 seg.     | 3,170            | 185            | 52                |
|  |                                | 3 m.; 0 seg.      | 3,810            | 203            | 57                |
|  |                                | 3 m.; 30 seg.     | 4,440            | 216            | 61                |
|  |                                | 4 m.; 0 seg.      | 5,080            | 233            | 65                |

| PRESIÓN CORREGIDA (Kg/cm2) | CBR <sub>2,54 mm.</sub> (%) |
|----------------------------|-----------------------------|
| 49                         | <b>70,0</b>                 |



OBSERVACIONES: - - - - - TANGENTE DE CORRECCIÓN  
← ESFUERZO CORREGIDO

## ENSAYO C.B.R.

PROCEDENCIA DE LA MUESTRA.....: TESIS-MAGISTER

FECHA...: ABRIL-2004

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA.....: C4-M2

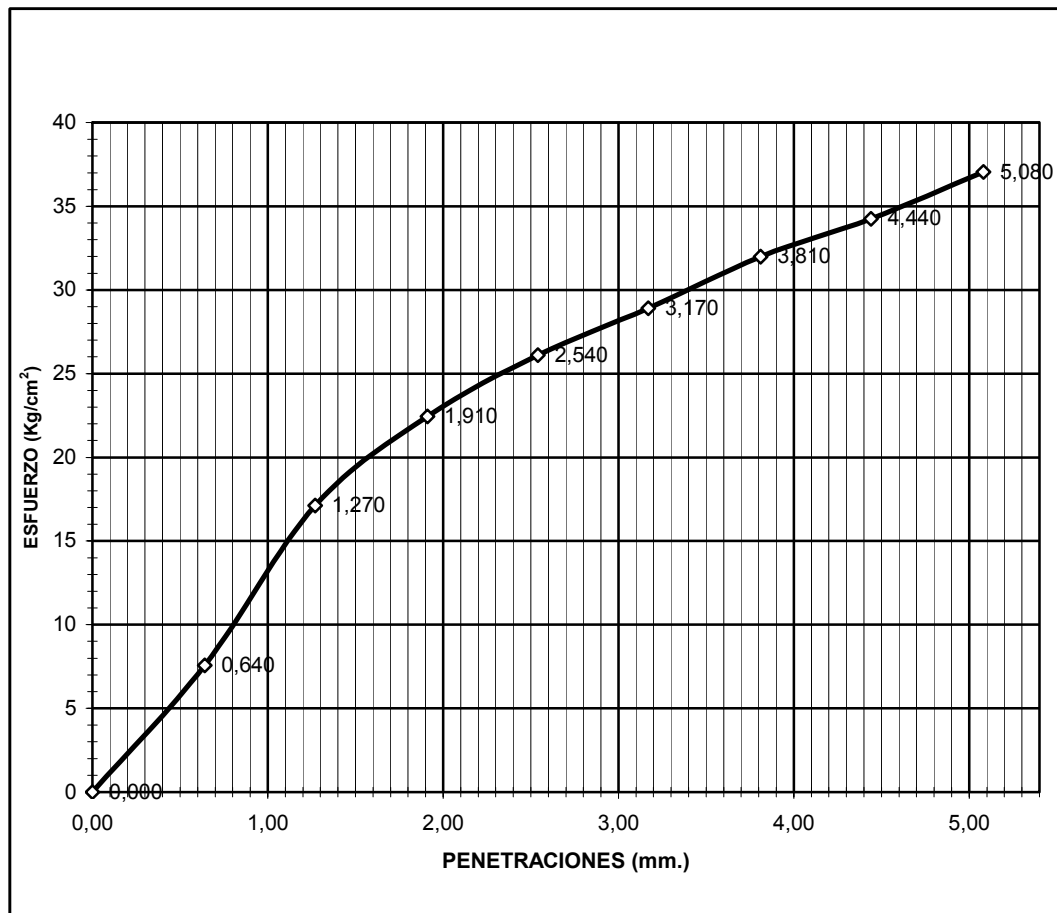
PROGRESIVA: 9+000

### DESCRIPCION DEL MATERIAL

| LL    | LP    | IP   | CLASIFICACION   |
|-------|-------|------|-----------------|
| 42,03 | 34,88 | 7,15 | <b>A-2-5(0)</b> |

| FACTOR ANILLO<br>Kg/div                  | AREA PISTON<br>cm <sup>2</sup> | TIEMPO<br>MIN/SEG | PENETRAC.<br>mm. | MOLDE N° C4-M2 |                   |
|--|--------------------------------|-------------------|------------------|----------------|-------------------|
|  |                                |                   |                  | LECTURA        | PRESION<br>Kg/cm2 |
| <b>5,430</b>                             | <b>19,3471</b>                 | 0 m.; 0 seg.      | 0,000            | 0              | 0                 |
|  |                                | 0 m.; 30 seg.     | 0,640            | 27             | 8                 |
|  |                                | 1 m.; 0 seg.      | 1,270            | 61             | 17                |
| FACTOR ANILLO<br>Kg/cm <sup>2</sup> /div |                                | 1 m.; 30 seg.     | 1,910            | 80             | 22                |
|  |                                | 2 m.; 0 seg.      | 2,540            | 93             | 26                |
| <b>0,2807</b>                            |                                | 2 m.; 30 seg.     | 3,170            | 103            | 29                |
|  |                                | 3 m.; 0 seg.      | 3,810            | 114            | 32                |
|  |                                | 3 m.; 30 seg.     | 4,440            | 122            | 34                |
|  |                                | 4 m.; 0 seg.      | 5,080            | 132            | 37                |

| PRESIÓN CORREGIDA (Kg/cm2) | CBR <sub>2,54 mm.</sub> (%) |
|----------------------------|-----------------------------|
| 26                         | <b>37,1</b>                 |





## ENSAYO C.B.R.

PROCEDENCIA DE LA MUESTRA.....: TESIS-MAGISTER

FECHA...: ABRIL-2004

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA.....: C4-M3

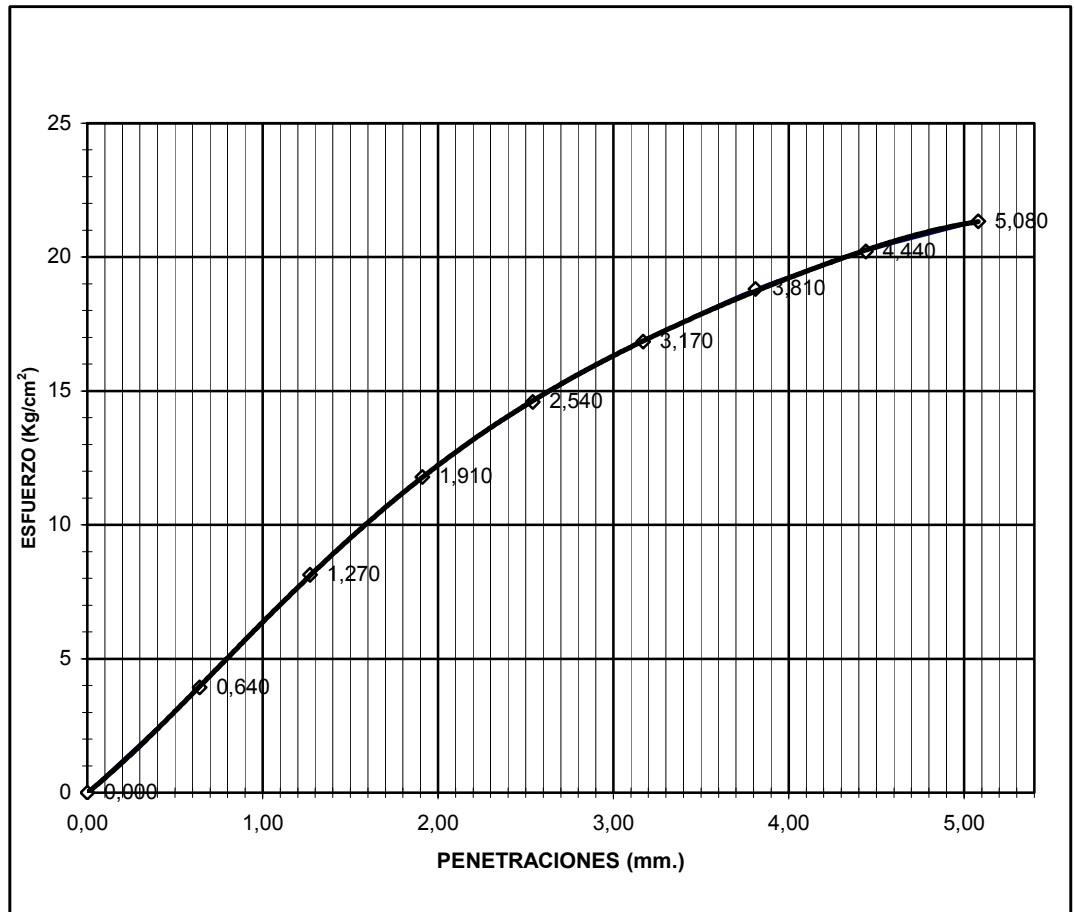
PROGRESIVA: 9+000

### DESCRIPCION DEL MATERIAL

| LL    | LP    | IP   | CLASIFICACION |
|-------|-------|------|---------------|
| 34,37 | 21,26 | 13,1 | <b>A-6(9)</b> |

| FACTOR ANILLO<br>Kg/div                  | AREA PISTON<br>cm <sup>2</sup> | TIEMPO<br>MIN/SEG | PENETRAC.<br>mm. | MOLDE N° C4-M3 |                   |
|--|--------------------------------|-------------------|------------------|----------------|-------------------|
|  |                                |                   |                  | LECTURA        | PRESION<br>Kg/cm2 |
| <b>5,430</b>                             | <b>19,3471</b>                 | 0 m.; 0 seg.      | 0,000            | 0              | 0                 |
|  |                                | 0 m.; 30 seg.     | 0,640            | 14             | 4                 |
|  |                                | 1 m.; 0 seg.      | 1,270            | 29             | 8                 |
| FACTOR ANILLO<br>Kg/cm <sup>2</sup> /div |                                | 1 m.; 30 seg.     | 1,910            | 42             | 12                |
|  |                                | 2 m.; 0 seg.      | 2,540            | 52             | 15                |
| <b>0,2807</b>                            |                                | 2 m.; 30 seg.     | 3,170            | 60             | 17                |
|  |                                | 3 m.; 0 seg.      | 3,810            | 67             | 19                |
|  |                                | 3 m.; 30 seg.     | 4,440            | 72             | 20                |
|  |                                | 4 m.; 0 seg.      | 5,080            | 76             | 21                |

| PRESIÓN CORREGIDA (Kg/cm2) | CBR <sub>2,54 mm.</sub> (%) |
|----------------------------|-----------------------------|
| 15,0                       | <b>21,4</b>                 |



## ENSAYO C.B.R.

PROCEDENCIA DE LA MUESTRA.....: TESIS-MAGISTER

FECHA...: ABRIL-2004

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA.....: C4-SR

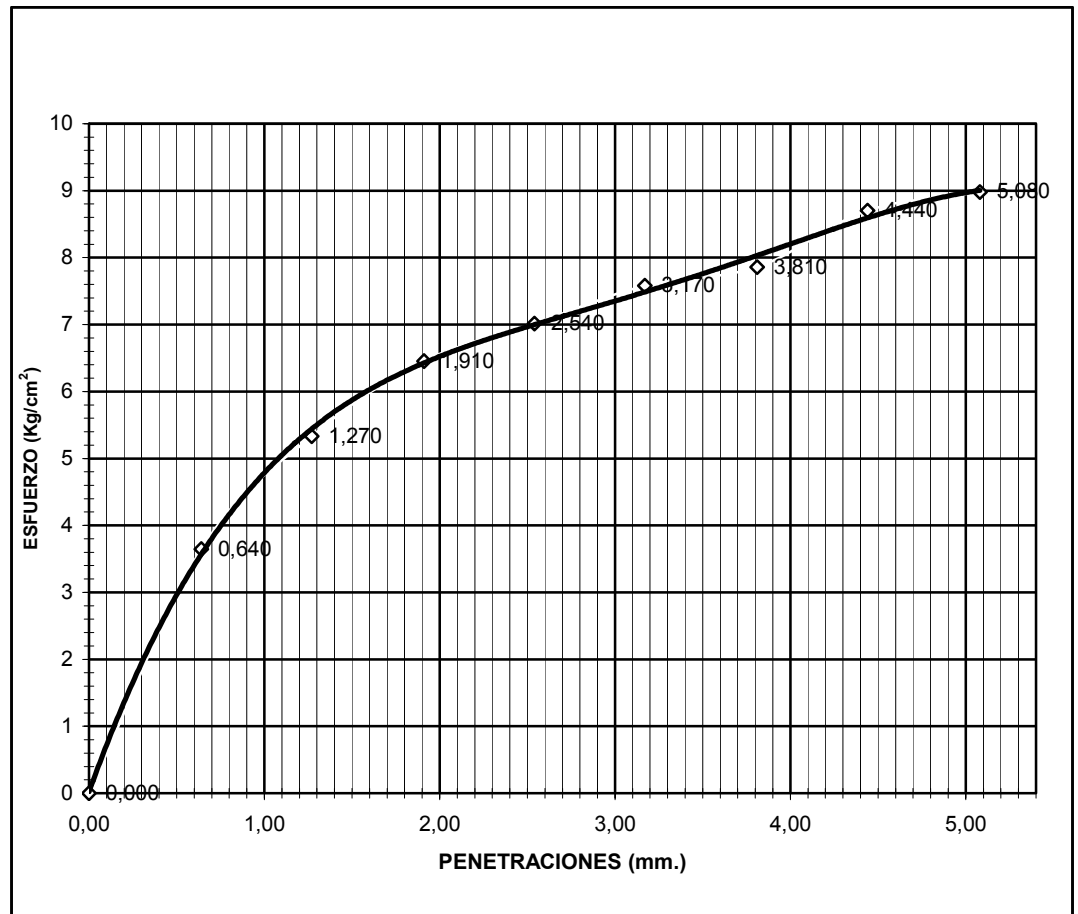
PROGRESIVA: 9+000

### DESCRIPCION DEL MATERIAL

| LL    | LP    | IP    | CLASIFICACION    |
|-------|-------|-------|------------------|
| 51,35 | 22,39 | 28,96 | <b>A-7-6(16)</b> |

| FACTOR ANILLO<br>Kg/div                  | AREA PISTON<br>cm <sup>2</sup> | TIEMPO<br>MIN/SEG | PENETRAC.<br>mm. | MOLDE N° C4-SR |                   |
|--|--------------------------------|-------------------|------------------|----------------|-------------------|
|  |                                |                   |                  | LECTURA        | PRESION<br>Kg/cm2 |
| <b>5,430</b>                             | <b>19,3471</b>                 | 0 m.; 0 seg.      | 0,000            | 0              | 0                 |
|  |                                | 0 m.; 30 seg.     | 0,640            | 13             | 4                 |
|  |                                | 1 m.; 0 seg.      | 1,270            | 19             | 5                 |
| FACTOR ANILLO<br>Kg/cm <sup>2</sup> /div |                                | 1 m.; 30 seg.     | 1,910            | 23             | 6                 |
|  |                                | 2 m.; 0 seg.      | 2,540            | 25             | 7                 |
| <b>0,2807</b>                            |                                | 2 m.; 30 seg.     | 3,170            | 27             | 8                 |
|  |                                | 3 m.; 0 seg.      | 3,810            | 28             | 8                 |
|  |                                | 3 m.; 30 seg.     | 4,440            | 31             | 9                 |
|  |                                | 4 m.; 0 seg.      | 5,080            | 32             | 9                 |

| PRESIÓN CORREGIDA (Kg/cm2) | CBR <sub>2,54 mm.</sub> (%) |
|----------------------------|-----------------------------|
| 7                          | <b>10,0</b>                 |



**ENSAYO PARA LA  
DETERMINACIÓN DEL  
MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS**

# MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS

*El trabajo de laboratorio que se presenta a continuación fue realizado en el Laboratorio Vial del Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE) de la Universidad del Rosario, Argentina.*

## 1. Introducción

El presente anexo describe el método empleado para la determinación del Módulo Resiliente de los suelos que constituyen las diferentes capas de pavimentos detectadas en las calicatas ejecutadas en la Ruta 6 entre las Ciudades de Pavón y Campana, de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

El ensayo empleado para la determinación del Módulo Resiliente se basa en lo establecido en la Norma AASHTO, DESIGNATION: T 294-92. (1992). *“Resilient Modulus of Unbound Granular Base/Subbase Materials and Subgrade Soils-SHRP Protocol P46. U.S.A.*, la cual se adjunta al final del anexo.

El Módulo Resiliente es una medida de la capacidad soporte de los suelos considerando su comportamiento no lineal y la deformación axial recuperable de los mismos ante la aplicación de un esfuerzo. Su formulación en general es la siguiente<sup>1</sup>:

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_a}$$

donde:

MR: Módulo Resiliente.

$\sigma_d$  : esfuerzo desviador axial.

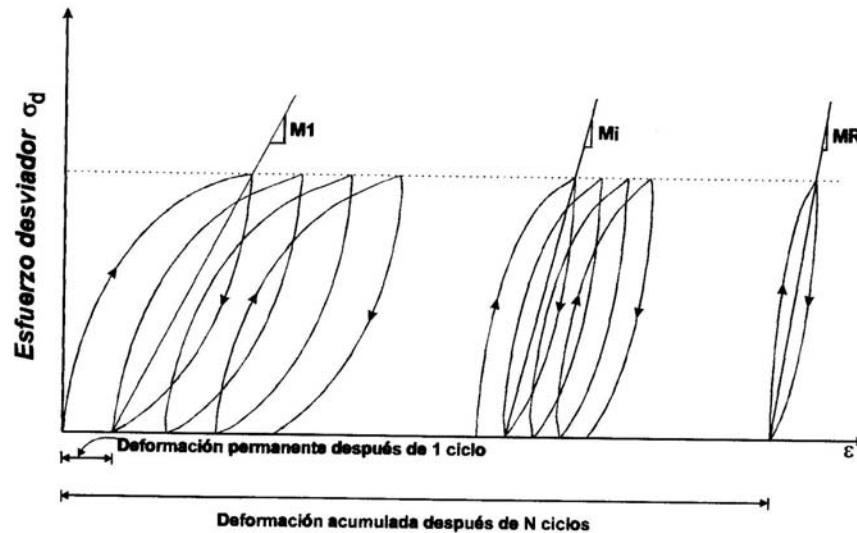
$\epsilon_a$  : deformación axial recuperable.

El ensayo de Módulo Resiliente consiste básicamente en someter a una probeta de material a un estado de esfuerzos compuesto por una presión de confinamiento y un esfuerzo desviador dinámico, de tal manera de reproducir las condiciones a las que se encuentra un suelo en un camino cuando es solicitado por la carga

---

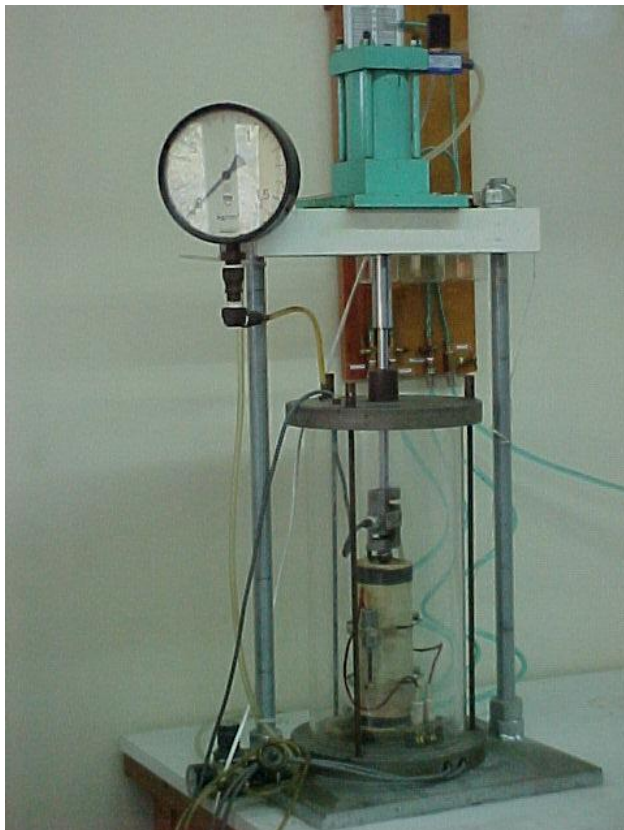
<sup>1</sup> Yoder And Witczac, 1975. "Principles of Pavement Design, Second Edition, U.S.A.

impartida por un vehículo circulando a cierta velocidad. La siguiente figura muestra una respuesta típica durante la ejecución del ensayo y una vista general del equipo de ensayo:



FUENTE: INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE. MODULOS DE RESILIENCIA EN SUELOS FINOS Y MATERIALES GRANULARES. PUBLICACIÓN TÉCNICA N°142. SANFANDILA, QRO. 2001

La figura muestra el mecanismo por el cual se acumula la deformación permanente, observándose que en los ciclos intermedios la deformación permanente disminuye hasta que desaparece en los ciclos finales,



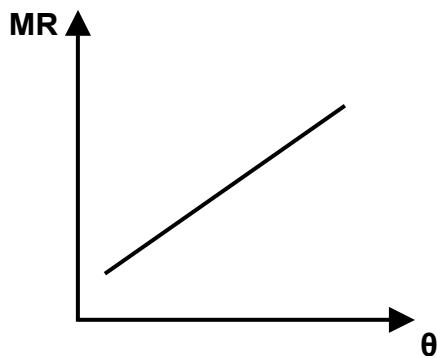
llegando así la muestra a un estado tal que toda la deformación es recuperable, momento éste en que el suelo tiene un comportamiento eminentemente resiliente y cuya deformación es objeto de medición en el ensayo.

### **CÁMARA DE ENSAYO.**

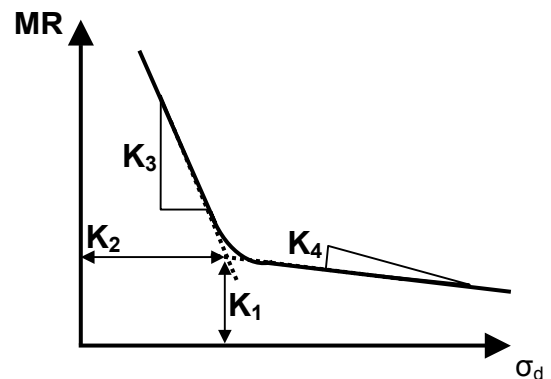
FUENTE: IMAE, UNIVERSIDAD DEL ROSARIO, ARGENTINA.

El ensayo puede ser ejecutado para cualquier tipo de material, desde un suelo cohesivo hasta un estabilizado granular, sin embargo, cambian las condiciones de ensayo, ya que el estado de esfuerzos condiciona la respuesta del Módulo Resiliente para distintos tipos de materiales. En base a ésta consideración se han definido distintas formulaciones para estimar el Módulo Resiliente en suelos friccionales (granulares), los cuales pueden ser de bases, sub-bases o sub-rasantes y para suelos cohesivos (finos) generalmente de sub-rasante. A continuación se muestra un comportamiento típico, tanto de los materiales cohesivos como friccionales:

#### SUELOS FRICCIONALES



#### SUELOS COHESIVOS



Las características en el comportamiento de la variación del Módulo Resiliente con el estado de esfuerzos mostrado, ha permitido definir las siguientes ecuaciones para los distintos suelos<sup>2</sup>:

#### a.- Suelos Cohesivos:

$$MR = K_1 + K_3(K_2 - \sigma_d) \quad \text{para } \sigma_d < K_2 \quad (\text{Ec. 1.1})$$

$$MR = K_1 - K_4(\sigma_d - K_2) \quad \text{para } \sigma_d > K_2 \quad (\text{Ec. 1.2})$$

#### b.- Suelos Friccionales:

$$MR = K_1 \theta^{K_2} \quad (\text{Ec. 2})$$

<sup>2</sup> Yang H. Huang, 1993. "Pavement Analysis and Design, University of Kentucky, U.S.A.

donde:

MR: Módulo Resiliente.  
 $\sigma_d$ : Esfuerzo desviador axial.  
 $\theta$ : Sumatoria de esfuerzos principales o primer invariante de esfuerzos.  
 $K_1; K_2; K_3$  y  $K_4$ : Constantes experimentales que dependen de las características del suelo, densidad y humedad.

Se han presentado otras correlaciones entre el Módulo Resiliente y el estado de esfuerzos en la masa del suelo, producto de ensayos de laboratorio, tal como las publicadas por el equipo de investigadores del Laboratorio del Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (IMAE) de la Universidad Nacional del Rosario (Argentina), las cuales relacionan, tanto el esfuerzo desviador ( $\sigma_d$ ) como la sumatoria de esfuerzos principales ( $\theta$ ), mediante constantes experimentales (A; B; C; D; E; F; G; H) únicas para el material ensayado. A continuación se indican las ecuaciones desarrolladas:

$$a) \quad MR = A(\theta)^B(\sigma_d)^C \quad (\text{Ec. 3})$$

$$b) \quad MR = D(\sigma_d)^E(\sigma_3)^F \quad (\text{Ec. 4})$$

$$c) \quad MR = G(\sigma_d)^H \quad (\text{Ec. 5})$$

donde:

MR: Módulo Resiliente.  
 $\sigma_d$ : Esfuerzo desviador axial.  
 $\theta$ : Sumatoria de esfuerzos principales o primer invariante de esfuerzos.  
 $\sigma_3$ : Esfuerzo de confinamiento lateral.  
A; B; C; D; E; F y G: Constantes experimentales (dependen del tipo suelo, densidad y Humedad)

Según algunos autores se tiene que el valor del Módulo Resiliente en el punto de quiebre de la curva bilineal (suelos cohesivos), representado por la constante  $K_1$ , es un buen indicador del comportamiento resiliente del suelo, mientras que las

otras constantes (K2, K3 y K4), muestran menos variabilidad e influyen en menor grado en la respuesta del pavimento.

### **1.1 Descripción General de Ensayo**

El ensayo consiste principalmente en aplicar un número determinado de repeticiones de un esfuerzo desviador dinámico ( $\sigma_d$ ) sobre la probeta sometida previamente en una cámara de presión triaxial a una presión de confinamiento estática ( $\sigma_3$ ). Las secuencias de carga dependen del tipo de material a ensayar, por su parte el esfuerzo desviador corresponde a un pulso dinámico aplicado desde una celda de carga.

Durante la ejecución del ensayo se miden y registran el esfuerzo desviador aplicado ( $\sigma_d$ ) y la deformación axial recuperable de los últimos 5 ciclos de cada secuencia. Con éstos datos se calcula el valor del Módulo Resiliente promedio de la secuencia, mediante las ecuaciones incluidas en el método, de esta forma se obtiene para cada secuencia de ensayos un conjunto de valores promedio MR,  $\sigma_d$  y  $\sigma_3$ , que permiten determinar el comportamiento resiliente del material ensayado, a partir del ajuste de regresiones sobre los resultados obtenidos.

Existen dos procedimientos de ensayo según el Tipo de Material (cohesivo o friccional) a estudiar cuyas características se describen a continuación:

Material Tipo 1: Incluye materiales granulares empleados como base y sub-base de pavimentos, así como suelos de sub-rasante con menos del 70% pasante el tamiz N° 10 y máximo 20% de material pasante el tamiz N°200. Esta categoría siempre incluye los suelos A-1-a y podría incluir A-1-B; A-2 ó A-3.

Material Tipo 2: incluye los suelos de sub-rasante que no satisfacen lo indicado en el punto relativo a Material Tipo 1. Esta categoría siempre incluye los suelos tipo A-4; A-5; A-6 y A-7 y podría incluir A-1-b; A-2 y A-3.



## **1.2 Preparación de las Muestras y Secuencia de Ensayo**

Dependiendo del Tipo de Material (Tipo 1 ó Tipo 2) la norma presenta un procedimiento para la compactación de las muestras en moldes cilíndricos. Una de las principales diferencias entre ambos procedimientos -además de las dimensiones del molde- estriba en que los suelos Tipo 1 deben ser compactados mediante vibración, mientras que los suelos Tipo 2 requieren compactación estática.



COMPACTACIÓN ESTÁTICA DE MUESTRAS



La secuencia de ensayo para los suelos Tipo 2 se resume en la siguiente tabla:

| SECUENCIA<br>Nº | PRESIÓN DE<br>CONFINAMIENTO<br>$\sigma_3$ (psi) | ESFUERZO<br>DESVIADOR<br>$\sigma_d$ (psi) | Nº APLICACIONES<br>DE CARGA |
|-----------------|---|---|-----------------------------|
| 0 (*)           | 6   | 4   | 1000                        |
| 1               | 6   | 2   | 100                         |
| 2               | 6   | 4   | 100                         |
| 3               | 6   | 6   | 100                         |

|    |   |    |     |
|----|---|----|-----|
| 4  | 6 | 8  | 100 |
| 5  | 6 | 10 | 100 |
| 6  | 3 | 2  | 100 |
| 7  | 3 | 4  | 100 |
| 8  | 3 | 6  | 100 |
| 9  | 3 | 8  | 100 |
| 10 | 3 | 10 | 100 |
| 11 | 0 | 2  | 100 |
| 12 | 0 | 4  | 100 |
| 13 | 0 | 6  | 100 |
| 14 | 0 | 8  | 100 |
| 15 | 0 | 10 | 100 |

(\*) : PRE-ACONDICIONAMIENTO

## 2. Descripción del Equipo de Ensayo

El equipo de ensayo utilizado para la determinación del Módulo Resiliente de los suelos corresponde al desarrollado por el Laboratorio Vial de Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE) de la Universidad del Rosario, Argentina, el cual está compuesto por<sup>1</sup>:

[1] **Un Sistema de Control y Aplicación de Carga**, encargado de generar el esfuerzo tensor desviador pulsante de tipo neumático. El fluido utilizado para lograr la presión de confinamiento en la célula triaxial es aire comprimido.

---

<sup>1</sup> ANGELONE, S., MARTÍNEZ, F. Y TOSTICARELLI, J. MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y MATERIALES NO TRATADOS. SU APLICACIÓN AL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS EN ARGENTINA. IMAE. UNIVERSIDAD DEL ROSARIO, ARGENTINA.

**[2] Un Sistema de Procesamiento, Medición y Registro de los Parámetros Principales (cargas, números de ciclos, deformaciones).** La magnitud de la



fuerza desviadora pulsante es medida por una celda de carga que emite una señal eléctrica proporcional a la sollicitación aplicada. La señal es derivada a un registrador gráfico automático de manera de obtener un registro continuo de la variación de la fuerza desviadora respecto al tiempo. Las deformaciones producidas en la probeta son medidas a través de dos transductores eléctricos del tipo LVDT colocados diametralmente opuestos y vinculados a la probeta mediante un par de soportes



de acrílico que la abrazan firmemente en los tercios medios de su altura. Los sensores de deformación emiten una señal eléctrica que es procesada por un puente extensómetro y derivada al registrador gráfico automático.

**[3] Una Célula Triaxial**, similar a las celdas empleadas en el ensayo estándar, siendo mayores sus dimensiones (diámetro externo 200 mm. y 450 mm. de altura). La célula triaxial empleada cuenta además con conexiones externas para los transductores y la presión de confinamiento.



### **3. Programa Experimental.**

Todas las muestras ensayadas dentro del marco de la presente investigación corresponden a la categoría de Materiales Tipo 2.

En total fueron ejecutados veintiún (21) ensayos para la determinación de Módulos resilientes de suelos.

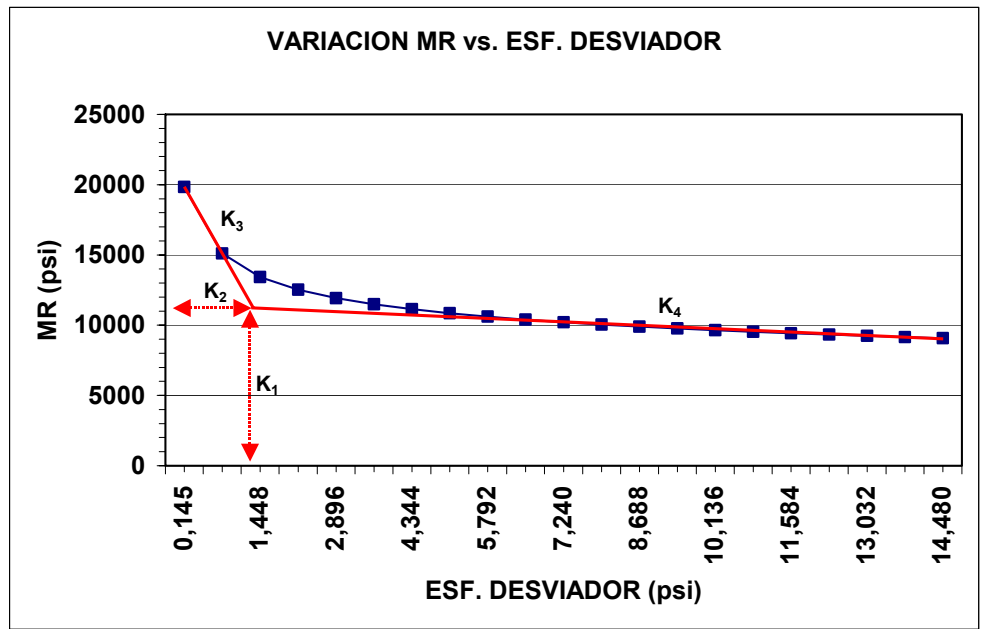
### **4. Resultados**

A continuación se presentan los resultados de los ensayos realizados para la determinación de los Módulos Resilientes de los suelos procedentes de las diferentes capas que componen las estructuras de pavimentos detectadas en la calicatas realizadas. Se presentan los valores de las constantes A; B y C

obtenidas de los ensayos propiamente dichos, así como las constantes  $K_1$ ;  $K_2$ ;  $K_3$  y  $K_4$  obtenidas de los gráficos generados.

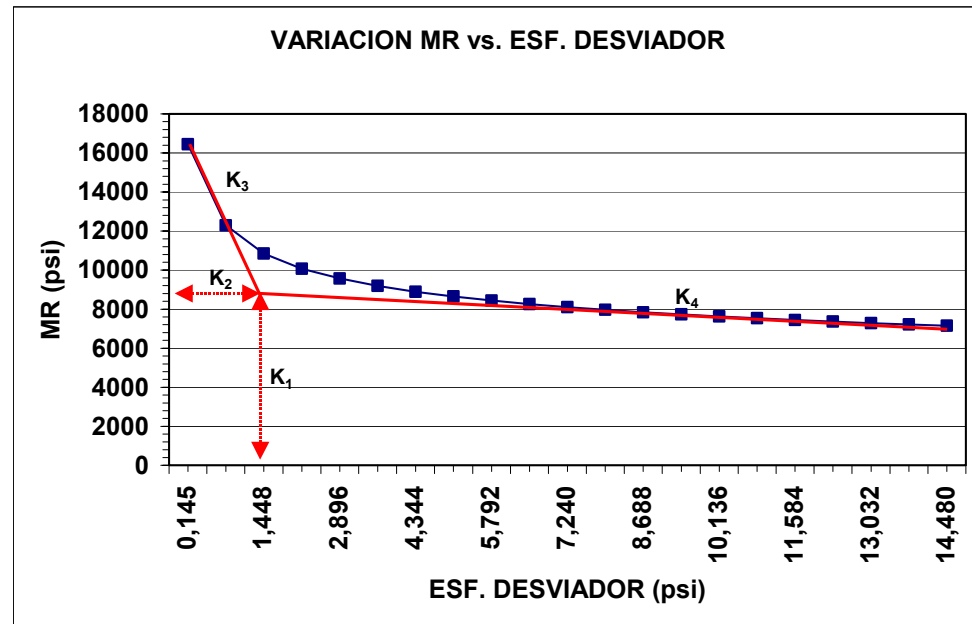
|                   |   |                  |                      |                      |          |  |                               |  |                               |  |                               |               |
|-------------------|---|------------------|----------------------|----------------------|----------|--|-------------------------------|--|-------------------------------|--|-------------------------------|---------------|
| <b>CALICATA 2</b> | <b>PROBETA No.</b>                                      | <b>C2M21</b>     |                      |                      |          | <b>ECUACION No.01:</b>   |                               | <b>ECUACION No.02:</b>   |                               | <b>ECUACION No.03:</b>                           |                               |               |
|                   | TIPO SUELO (H.R.B)                                      | A-5(4)           |                      |                      |          | <b>Mr = A .(σ<sub>d</sub>)<sup>B</sup> . (θ)<sup>C</sup> (Mpa)</b> |                               | <b>Mr = D .(σ<sub>d</sub>)<sup>E</sup> . (σ<sub>3</sub>)<sup>F</sup> (Mpa)</b> |                               | <b>Mr = G .(σ<sub>d</sub>)<sup>H</sup> (Mpa)</b> |                               |               |
|                   | DIÁMETRO (mm.)  | 70,17            |                      |                      |          | <b>A</b>   | 63,61                         | <b>D</b>   | 103,29                        | <b>G</b>   | 42,39                         |               |
|                   | ALTURA (mm.)  | 153,43           |                      |                      |          | <b>B</b>   | -0,29                         | <b>E</b>   | -0,17                         | <b>H</b>   | -0,17                         |               |
|                   | DENSIDAD CAMPO (gr/cm <sup>3</sup> )                    | 1,263            |                      |                      |          | <b>C</b>   | 0,36                          | <b>F</b>   | 0,23                          | -  | -                             |               |
|                   | HUMEDAD NATURAL (%)                                     | 28,00            |                      |                      |          | <b>Coef. Correl. Múltip.</b>                                       | 0,9783                        | <b>Coef. Correl. Múltip.</b>   | 0,9763                        | <b>Coef. Correl. Múltip.</b>                     | 0,5883                        |               |
|                   | HUMEDAD MOLDEO (%)                                      | 27,89            |                      |                      |          | <b>Coef. Determin. R<sup>2</sup></b>                               | 0,9570                        | <b>Coef. Determin. R<sup>2</sup></b>   | 0,9532                        | <b>Coef. Determin. R<sup>2</sup></b>             | 0,3461                        |               |
|                   | <b>ENSAYO AASHTO: T 294-92 / Material Tipo 2</b>        |                  |                      |                      |          |  | <b>r<sup>2</sup> Ajustado</b> | <b>0,9498</b>  | <b>r<sup>2</sup> Ajustado</b> | <b>0,9454</b>                                    | <b>r<sup>2</sup> Ajustado</b> | <b>0,2958</b> |
|                   |   |                  |                      |                      |          |  | <b>Error típico</b>           | 0,0172   | <b>Error típico</b>           | 0,0179   | <b>Error típico</b>           | 0,0643        |
|                   |   |                  |                      |                      |          |  | <b>No. Observaciones</b>      | 15   | <b>No. Observaciones</b>      | 15   | <b>No. Observaciones</b>      | 15            |
|                   | <b>DATOS DEL ENSAYO (Presión Atmosfér. (Mpa) = 0,1)</b> |                  |                      |                      |          | <b>Mr ESTIMADO</b>   |                               |  |                               |  |                               |               |
|                   | <b>PASO</b>   | <b>Mr MEDIDO</b> | <b>σ<sub>d</sub></b> | <b>σ<sub>3</sub></b> | <b>θ</b> | <b>ECUACION No.01:</b>   |                               | <b>ECUACION No.02:</b>   |                               | <b>ECUACION No.03:</b>                           |                               |               |
|                   |   |                  | (Mpa)                |                      |          | (Mpa)  |                               | (Mpa)  |                               |  |                               |               |
|                   | 2   | 105              | 0,013                | 0,042                | 0,139    | 111  |                               | 104  |                               | 89   |                               |               |
|                   | 3   | 93               | 0,026                | 0,042                | 0,152    | 93   |                               | 92   |                               | 79   |                               |               |
|                   | 4   | 89               | 0,041                | 0,042                | 0,167    | 85   |                               | 86   |                               | 73   |                               |               |
|                   | 5   | 83               | 0,056                | 0,042                | 0,182    | 80   |                               | 81   |                               | 69   |                               |               |
|                   | 6   | 79               | 0,071                | 0,042                | 0,197    | 76   |                               | 78   |                               | 66   |                               |               |
|                   | 7   | 89               | 0,014                | 0,021                | 0,077    | 88   |                               | 88   |                               | 88   |                               |               |
|                   | 8   | 75               | 0,027                | 0,021                | 0,090    | 77   |                               | 79   |                               | 78   |                               |               |
| 9                 | 67  | 0,041            | 0,021                | 0,104                | 71       |  | 73                            |  | 73                            |  |                               |               |
| 10                | 67  | 0,055            | 0,021                | 0,118                | 69       |  | 70                            |  | 69                            |  |                               |               |
| 11                | 67  | 0,070            | 0,021                | 0,133                | 67       |  | 67                            |  | 67                            |  |                               |               |
| 12                | 77  | 0,013            | 0,010                | 0,043                | 72       |  | 75                            |  | 88                            |  |                               |               |
| 13                | 65  | 0,027            | 0,010                | 0,057                | 65       |  | 66                            |  | 78                            |  |                               |               |
| 14                | 60  | 0,043            | 0,010                | 0,073                | 62       |  | 62                            |  | 72                            |  |                               |               |
| 15                | 60  | 0,057            | 0,010                | 0,087                | 61       |  | 59                            |  | 69                            |  |                               |               |
| 16                | 60  | 0,071            | 0,010                | 0,101                | 60       |  | 56                            |  | 66                            |  |                               |               |

| Mr ESTIMADO          | σ <sub>d</sub> | Mr ESTIMADO          | σ <sub>d</sub> |
|----------------------|----------------|----------------------|----------------|
| ECUACION No. 3 (Mpa) |                | ECUACION No. 3 (psi) |                |
| 137                  | 0,001          | 19840                | 0,145          |
| 104                  | 0,005          | 15095                | 0,724          |
| 93                   | 0,010          | 13418                | 1,448          |
| 87                   | 0,015          | 12525                | 2,172          |
| 82                   | 0,020          | 11928                | 2,896          |
| 79                   | 0,025          | 11485                | 3,620          |
| 77                   | 0,030          | 11134                | 4,344          |
| 75                   | 0,035          | 10847                | 5,068          |
| 73                   | 0,040          | 10603                | 5,792          |
| 72                   | 0,045          | 10393                | 6,516          |
| 71                   | 0,050          | 10209                | 7,240          |
| 69                   | 0,055          | 10045                | 7,964          |
| 68                   | 0,060          | 9898                 | 8,688          |
| 67                   | 0,065          | 9764                 | 9,412          |
| 67                   | 0,070          | 9642                 | 10,136         |
| 66                   | 0,075          | 9530                 | 10,860         |
| 65                   | 0,080          | 9426                 | 11,584         |
| 64                   | 0,085          | 9329                 | 12,308         |
| 64                   | 0,090          | 9239                 | 13,032         |
| 63                   | 0,095          | 9155                 | 13,756         |
| 63                   | 0,100          | 9075                 | 14,480         |



|                   |   |                  |                      |                      |  |  |                                      |                        |                                      |        |
|-------------------|---|------------------|----------------------|----------------------|--|--|--------------------------------------|------------------------|--------------------------------------|--------|
| <b>CALICATA 2</b> | <b>PROBETA No.</b>                                    | <b>C2M22</b>     |                      |                      | <b>ECUACION No.01:</b>                             | <b>ECUACION No.02:</b>                               | <b>ECUACION No.03:</b>               |                        |                                      |        |
|                   | TIPO SUELO (H.R.B)                                    | A-5(4)           |                      |                      | $Mr = A \cdot (\sigma_d)^B \cdot (\theta)^C$ (Mpa) | $Mr = D \cdot (\sigma_d)^E \cdot (\sigma_3)^F$ (Mpa) | $Mr = G \cdot (\sigma_d)^H$ (Mpa)    |                        |                                      |        |
|                   | DIÁMETRO (mm.)  | 70,03            |                      |                      | <b>A</b>   | 56,75  | <b>D</b>                             | 110,28                 | <b>G</b>                             | 32,56  |
|                   | ALTURA (mm.)  | 153,9            |                      |                      | <b>B</b>   | -0,35  | <b>E</b>                             | -0,18                  | <b>H</b>                             | -0,18  |
|                   | DENSIDAD CAMPO (gr/cm <sup>3</sup> )                  | 1,263            |                      |                      | <b>C</b>   | 0,50   | <b>F</b>                             | 0,31                   | -                                    | -      |
|                   | HUMEDAD NATURAL (%)                                   | 28,00            |                      |                      | <b>Coef. Correl. Múltip.</b>                       | 0,9745   | <b>Coef. Correl. Múltip.</b>         | 0,9698                 | <b>Coef. Correl. Múltip.</b>         | 0,4850 |
|                   | HUMEDAD MOLDEO (%)                                    | 28,23            |                      |                      | <b>Coef. Determin. R<sup>2</sup></b>               | 0,9497   | <b>Coef. Determin. R<sup>2</sup></b> | 0,9405                 | <b>Coef. Determin. R<sup>2</sup></b> | 0,2353 |
|                   | <b>ENSAYO AASHTO: T 294-92 / Material Tipo 2</b>      |                  |                      |                      | <b>r<sup>2</sup> Ajustado</b>                      | 0,9413   | <b>r<sup>2</sup> Ajustado</b>        | 0,9306                 | <b>r<sup>2</sup> Ajustado</b>        | 0,1764 |
|                   | <b>DATOS DEL ENSAYO (Presión Atmosf. (Mpa) = 0,1)</b> |                  |                      |                      | <b>Mr ESTIMADO</b>                                 |  |                                      |                        |                                      |        |
|                   | <b>PASO</b>   | <b>Mr MEDIDO</b> | <b>σ<sub>d</sub></b> | <b>σ<sub>3</sub></b> | <b>θ</b>   | <b>ECUACION No.01:</b>                               | <b>ECUACION No.02:</b>               | <b>ECUACION No.03:</b> |                                      |        |
|                   |   |                  | <b>(Mpa)</b>         |                      |  | <b>(Mpa)</b>   |                                      |                        |                                      |        |
|                   | 2   | 91               | 0,014                | 0,042                | 0,140  | 96   | 88                                   | 71                     |                                      |        |
|                   | 3   | 84               | 0,027                | 0,042                | 0,153  | 79   | 78                                   | 63                     |                                      |        |
|                   | 4   | 74               | 0,042                | 0,042                | 0,168  | 71   | 72                                   | 58                     |                                      |        |
|                   | 5   | 69               | 0,055                | 0,042                | 0,181  | 67   | 69                                   | 55                     |                                      |        |
|                   | 6   | 66               | 0,072                | 0,042                | 0,198  | 64   | 66                                   | 52                     |                                      |        |
|                   | 7   | 68               | 0,014                | 0,021                | 0,077  | 71   | 71                                   | 71                     |                                      |        |
|                   | 8   | 57               | 0,027                | 0,021                | 0,090  | 61   | 63                                   | 63                     |                                      |        |
|                   | 9   | 54               | 0,043                | 0,021                | 0,106  | 56   | 58                                   | 57                     |                                      |        |
|                   | 10  | 52               | 0,055                | 0,021                | 0,118  | 54   | 55                                   | 55                     |                                      |        |
| 11                | 52  | 0,071            | 0,021                | 0,134                | 53   | 53   | 53                                   |                        |                                      |        |
| 12                | 60  | 0,014            | 0,010                | 0,044                | 54   | 56   | 71                                   |                        |                                      |        |
| 13                | 48  | 0,028            | 0,010                | 0,058                | 48   | 49   | 62                                   |                        |                                      |        |
| 14                | 44  | 0,042            | 0,010                | 0,072                | 46   | 46   | 58                                   |                        |                                      |        |
| 15                | 46  | 0,057            | 0,010                | 0,087                | 46   | 44   | 55                                   |                        |                                      |        |
| 16                | 46  | 0,070            | 0,010                | 0,100                | 46   | 42   | 53                                   |                        |                                      |        |

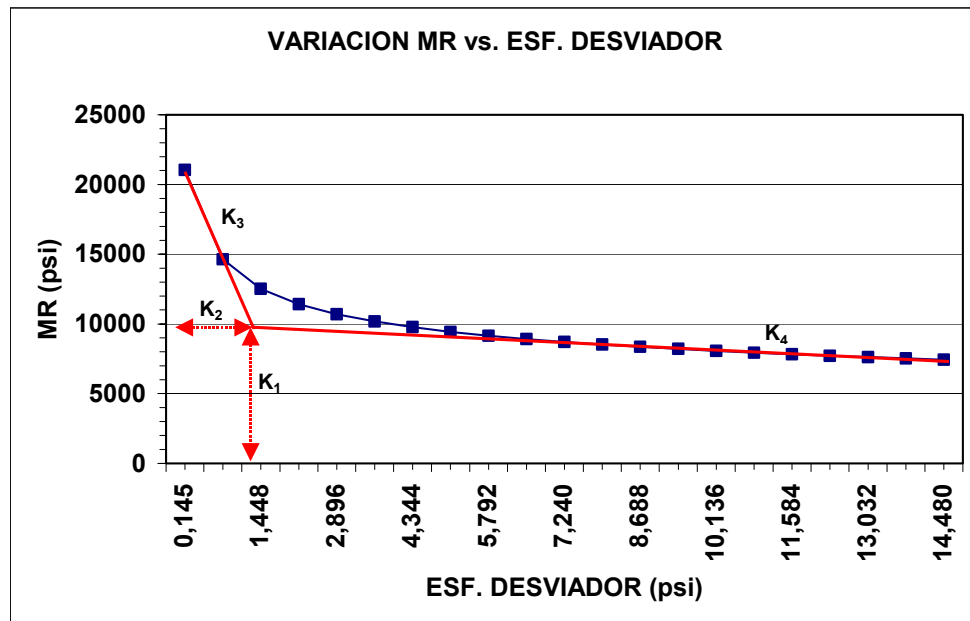
| Mr ESTIMADO          | σ <sub>d</sub> | Mr ESTIMADO          | σ <sub>d</sub> |
|----------------------|----------------|----------------------|----------------|
| ECUACION No. 3 (Mpa) |                | ECUACION No. 3 (psi) |                |
| 114                  | 0,001          | 16448                | 0,145          |
| 85                   | 0,005          | 12294                | 0,724          |
| 75                   | 0,010          | 10845                | 1,448          |
| 70                   | 0,015          | 10078                | 2,172          |
| 66                   | 0,020          | 9567                 | 2,896          |
| 63                   | 0,025          | 9188                 | 3,620          |
| 61                   | 0,030          | 8890                 | 4,344          |
| 60                   | 0,035          | 8646                 | 5,068          |
| 58                   | 0,040          | 8439                 | 5,792          |
| 57                   | 0,045          | 8262                 | 6,516          |
| 56                   | 0,050          | 8106                 | 7,240          |
| 55                   | 0,055          | 7967                 | 7,964          |
| 54                   | 0,060          | 7843                 | 8,688          |
| 53                   | 0,065          | 7730                 | 9,412          |
| 53                   | 0,070          | 7627                 | 10,136         |
| 52                   | 0,075          | 7532                 | 10,860         |
| 51                   | 0,080          | 7445                 | 11,584         |
| 51                   | 0,085          | 7364                 | 12,308         |
| 50                   | 0,090          | 7288                 | 13,032         |
| 50                   | 0,095          | 7217                 | 13,756         |
| 49                   | 0,100          | 7150                 | 14,480         |





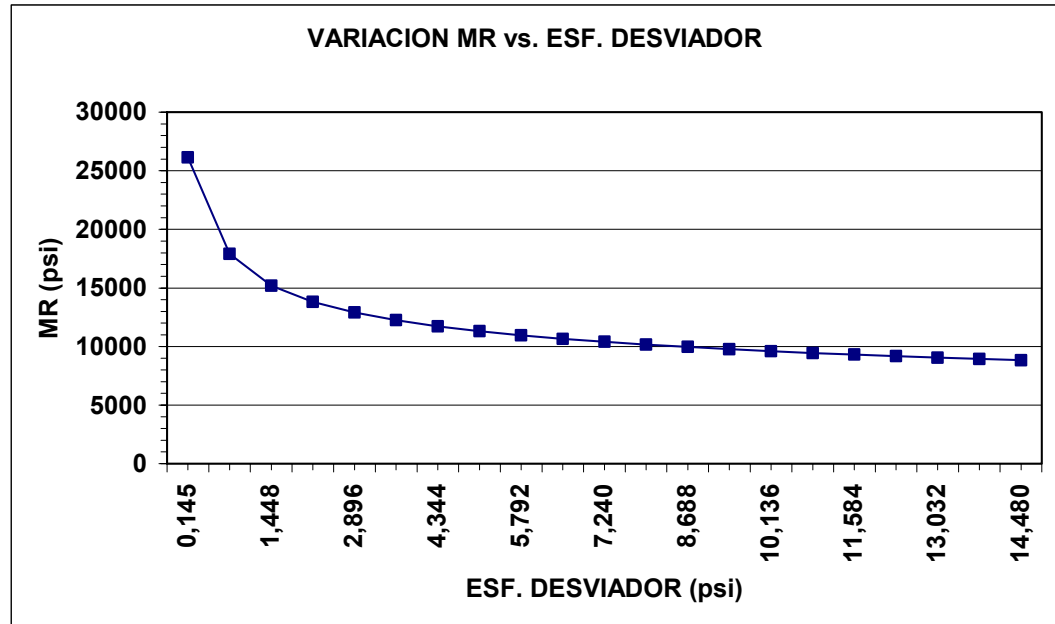
|                   |   |                  |                      |                      |          |  |                        |  |        |                                   |        |  |
|-------------------|---|------------------|----------------------|----------------------|----------|--|------------------------|--|--------|-----------------------------------|--------|--|
| <b>CALICATA 2</b> | <b>PROBETA No.</b>                                      | <b>C2M23</b>     |                      |                      |          | <b>ECUACIÓN No.01:</b>                             |                        | <b>ECUACIÓN No.02:</b>                               |        | <b>ECUACIÓN No.03:</b>            |        |  |
|                   | TIPO SUELO (H.R.B)                                      | A-5(4)           |                      |                      |          | $Mr = A \cdot (\sigma_d)^B \cdot (\theta)^C$ (Mpa) |                        | $Mr = D \cdot (\sigma_d)^E \cdot (\sigma_3)^F$ (Mpa) |        | $Mr = G \cdot (\sigma_d)^H$ (Mpa) |        |  |
|                   | DIÁMETRO (mm.)  | 70,3             |                      |                      |          | A  | 44,66                  | D  | 71,90  | G                                 | 30,57  |  |
|                   | ALTURA (mm.)  | 153,17           |                      |                      |          | B  | -0,35                  | E  | -0,23  | H                                 | -0,23  |  |
|                   | DENSIDAD CAMPO (gr/cm <sup>3</sup> )                    | 1,263            |                      |                      |          | C  | 0,35                   | F  | 0,22   | -                                 | -      |  |
|                   | HUMEDAD NATURAL (%)                                     | 28,00            |                      |                      |          | Coef. Correl. Múltip.                              | 0,9635                 | Coef. Correl. Múltip.                                | 0,9651 | Coef. Correl. Múltip.             | 0,6890 |  |
|                   | HUMEDAD MOLDEO (%)                                      | 28,11            |                      |                      |          | Coef. Determin. R <sup>2</sup>                     | 0,9284                 | Coef. Determin. R <sup>2</sup>                       | 0,9314 | Coef. Determin. R <sup>2</sup>    | 0,4748 |  |
|                   | <b>ENSAYO AASHTO: T 294-92 / Material Tipo 2</b>        |                  |                      |                      |          | r <sup>2</sup> Ajustado                            | 0,9165                 | r <sup>2</sup> Ajustado                              | 0,9199 | r <sup>2</sup> Ajustado           | 0,4343 |  |
|                   | <b>DATOS DEL ENSAYO (Presión Atmosfér. (Mpa) = 0,1)</b> |                  |                      |                      |          | Error típico                                       | 0,0251                 | Error típico   | 0,0246 | Error típico                      | 0,0652 |  |
|                   |   |                  |                      |                      |          | No. Observaciones                                  | 15                     | No. Observaciones                                    | 15     | No. Observaciones                 | 15     |  |
|                   |   |                  |                      |                      |          | <b>Mr ESTIMADO</b>                                 |                        |  |        |                                   |        |  |
|                   | <b>PASO</b>   | <b>Mr MEDIDO</b> | <b>σ<sub>d</sub></b> | <b>σ<sub>3</sub></b> | <b>θ</b> | <b>ECUACIÓN No.01:</b>                             | <b>ECUACIÓN No.02:</b> | <b>ECUACIÓN No.03:</b>                               |        |                                   |        |  |
|                   |   |                  | (Mpa)                |                      |          |  | (Mpa)                  |  |        |                                   |        |  |
|                   | 2   | 93               | 0,013                | 0,042                | 0,139    | 101  | 95                     | 81   |        |                                   |        |  |
|                   | 3   | 83               | 0,028                | 0,042                | 0,154    | 81   | 80                     | 69   |        |                                   |        |  |
| 4                 | 76  | 0,043            | 0,042                | 0,169                | 72       | 73   | 62                     |  |        |                                   |        |  |
| 5                 | 70  | 0,056            | 0,042                | 0,182                | 67       | 69   | 59                     |  |        |                                   |        |  |
| 6                 | 64  | 0,072            | 0,042                | 0,198                | 63       | 65   | 55                     |  |        |                                   |        |  |
| 7                 | 83  | 0,014            | 0,021                | 0,077                | 81       | 81   | 81                     |  |        |                                   |        |  |
| 8                 | 64  | 0,027            | 0,021                | 0,090                | 68       | 70   | 69                     |  |        |                                   |        |  |
| 9                 | 58  | 0,041            | 0,021                | 0,104                | 62       | 63   | 63                     |  |        |                                   |        |  |
| 10                | 58  | 0,056            | 0,021                | 0,119                | 58       | 59   | 59                     |  |        |                                   |        |  |
| 11                | 57  | 0,071            | 0,021                | 0,134                | 56       | 56   | 56                     |  |        |                                   |        |  |
| 12                | 75  | 0,013            | 0,010                | 0,043                | 67       | 69   | 81                     |  |        |                                   |        |  |
| 13                | 56  | 0,027            | 0,010                | 0,057                | 57       | 59   | 69                     |  |        |                                   |        |  |
| 14                | 50  | 0,042            | 0,010                | 0,072                | 54       | 53   | 62                     |  |        |                                   |        |  |
| 15                | 50  | 0,055            | 0,010                | 0,085                | 52       | 50   | 59                     |  |        |                                   |        |  |
| 16                | 51  | 0,070            | 0,010                | 0,100                | 50       | 47   | 56                     |  |        |                                   |        |  |

| Mr ESTIMADO          | σ <sub>d</sub> | Mr ESTIMADO          | σ <sub>d</sub> |
|----------------------|----------------|----------------------|----------------|
| ECUACION No. 3 (Mpa) |                | ECUACION No. 3 (psi) |                |
| 145                  | 0,001          | 21049                | 0,145          |
| 101                  | 0,005          | 14637                | 0,724          |
| 86                   | 0,010          | 12517                | 1,448          |
| 79                   | 0,015          | 11423                | 2,172          |
| 74                   | 0,020          | 10704                | 2,896          |
| 70                   | 0,025          | 10179                | 3,620          |
| 67                   | 0,030          | 9768                 | 4,344          |
| 65                   | 0,035          | 9434                 | 5,068          |
| 63                   | 0,040          | 9154                 | 5,792          |
| 62                   | 0,045          | 8914                 | 6,516          |
| 60                   | 0,050          | 8704                 | 7,240          |
| 59                   | 0,055          | 8519                 | 7,964          |
| 58                   | 0,060          | 8353                 | 8,688          |
| 57                   | 0,065          | 8204                 | 9,412          |
| 56                   | 0,070          | 8068                 | 10,136         |
| 55                   | 0,075          | 7943                 | 10,860         |
| 54                   | 0,080          | 7828                 | 11,584         |
| 53                   | 0,085          | 7722                 | 12,308         |
| 53                   | 0,090          | 7623                 | 13,032         |
| 52                   | 0,095          | 7530                 | 13,756         |
| 51                   | 0,100          | 7444                 | 14,480         |



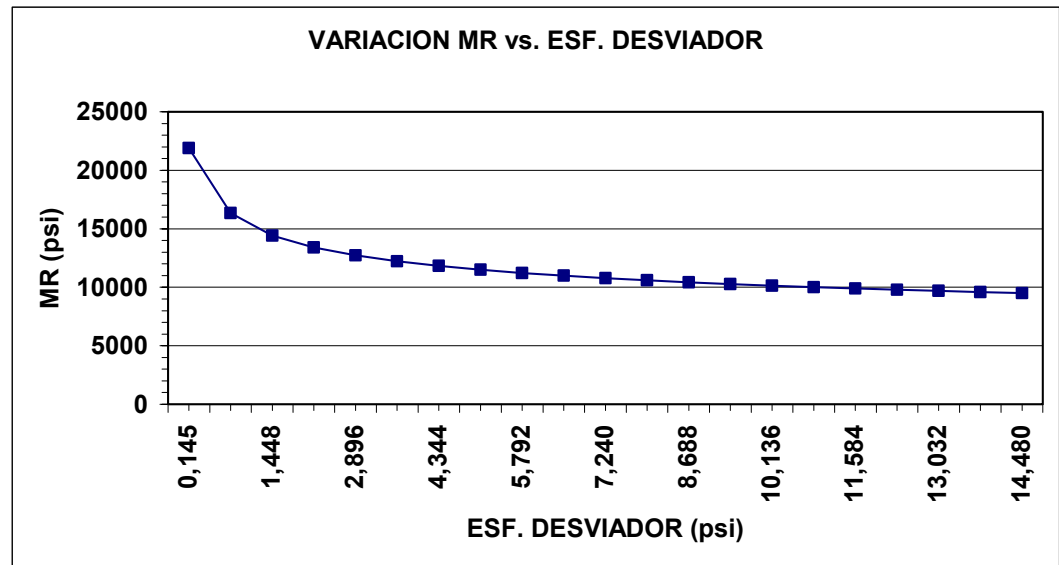
|                   |   |                  |                      |                      |  |                        |  |                        |                                      |        |  |
|-------------------|---|------------------|----------------------|----------------------|--|------------------------|--|------------------------|--------------------------------------|--------|--|
| <b>CALICATA 5</b> | <b>PROBETA No.</b>                                      | <b>C5M21</b>     |                      |                      | <b>ECUACION No.01:</b>                             |                        | <b>ECUACION No.02:</b>                               |                        | <b>ECUACION No.03:</b>               |        |  |
|                   | TIPO SUELO (H.R.B)                                      | A-2-5(0)         |                      |                      | $Mr = A \cdot (\sigma_d)^B \cdot (\theta)^C$ (Mpa) |                        | $Mr = D \cdot (\sigma_d)^E \cdot (\sigma_3)^F$ (Mpa) |                        | $Mr = G \cdot (\sigma_d)^H$ (Mpa)    |        |  |
|                   | DIÁMETRO (mm.)  | 70,13            |                      |                      | <b>A</b>   | 54,54                  | <b>D</b>   | 94,44                  | <b>G</b>                             | 35,44  |  |
|                   | ALTURA (mm.)  | 153,63           |                      |                      | <b>B</b>   | -0,38                  | <b>E</b>   | -0,24                  | <b>H</b>                             | -0,24  |  |
|                   | DENSIDAD CAMPO (gr/cm <sup>3</sup> )                    | 1,300            |                      |                      | <b>C</b>   | 0,40                   | <b>F</b>   | 0,26                   | -                                    | -      |  |
|                   | HUMEDAD NATURAL (%)                                     | 29,50            |                      |                      | <b>Coef. Correl. Múltip.</b>                       | 0,9755                 | <b>Coef. Correl. Múltip.</b>                         | 0,9767                 | <b>Coef. Correl. Múltip.</b>         | 0,6537 |  |
|                   | HUMEDAD MOLDEO (%)                                      | 27,29            |                      |                      | <b>Coef. Determin. R<sup>2</sup></b>               | 0,9517                 | <b>Coef. Determin. R<sup>2</sup></b>                 | 0,9539                 | <b>Coef. Determin. R<sup>2</sup></b> | 0,4273 |  |
|                   | <b>ENSAYO AASHTO: T 294-92 / Material Tipo 2</b>        |                  |                      |                      | <b>r<sup>2</sup> Ajustado</b>                      | 0,9436                 | <b>r<sup>2</sup> Ajustado</b>                        | 0,9462                 | <b>r<sup>2</sup> Ajustado</b>        | 0,3832 |  |
|                   |   |                  |                      |                      | <b>Error típico</b>                                | 0,0220                 | <b>Error típico</b>                                  | 0,0215                 | <b>Error típico</b>                  | 0,0729 |  |
|                   |   |                  |                      |                      | <b>No. Observaciones</b>                           | 15                     | <b>No. Observaciones</b>                             | 15                     | <b>No. Observaciones</b>             | 15     |  |
|                   | <b>DATOS DEL ENSAYO (Presión Atmosfér. (Mpa) = 0,1)</b> |                  |                      |                      | <b>Mr ESTIMADO</b>                                 |                        |  |                        |                                      |        |  |
|                   | <b>PASO</b>   | <b>Mr MEDIDO</b> | <b>σ<sub>d</sub></b> | <b>σ<sub>3</sub></b> | <b>θ</b>   | <b>ECUACION No.01:</b> | <b>ECUACION No.02:</b>                               | <b>ECUACION No.03:</b> |                                      |        |  |
|                   |   |                  |                      |                      |  | (Mpa)                  |  |                        |                                      |        |  |
|                   | 2   | 115              | 0,013                | 0,042                | 0,139  | 126                    | 118  | 98                     |                                      |        |  |
|                   | 3   | 105              | 0,028                | 0,042                | 0,154  | 99                     | 99   | 82                     |                                      |        |  |
|                   | 4   | 92               | 0,042                | 0,042                | 0,168  | 88                     | 90   | 75                     |                                      |        |  |
| 5                 | 85  | 0,057            | 0,042                | 0,183                | 82   | 83                     | 70   |                        |                                      |        |  |
| 6                 | 79  | 0,071            | 0,042                | 0,197                | 77   | 79                     | 66   |                        |                                      |        |  |
| 7                 | 99  | 0,014            | 0,021                | 0,077                | 97   | 97                     | 96   |                        |                                      |        |  |
| 8                 | 79  | 0,028            | 0,021                | 0,091                | 81   | 83                     | 83   |                        |                                      |        |  |
| 9                 | 70  | 0,042            | 0,021                | 0,105                | 73   | 75                     | 75   |                        |                                      |        |  |
| 10                | 67  | 0,055            | 0,021                | 0,118                | 69   | 70                     | 70   |                        |                                      |        |  |
| 11                | 66  | 0,070            | 0,021                | 0,133                | 66   | 66                     | 66   |                        |                                      |        |  |
| 12                | 86  | 0,014            | 0,010                | 0,044                | 78   | 81                     | 97   |                        |                                      |        |  |
| 13                | 66  | 0,027            | 0,010                | 0,057                | 68   | 69                     | 83   |                        |                                      |        |  |
| 14                | 60  | 0,042            | 0,010                | 0,072                | 63   | 62                     | 75   |                        |                                      |        |  |
| 15                | 60  | 0,053            | 0,010                | 0,083                | 61   | 59                     | 71   |                        |                                      |        |  |
| 16                | 59  | 0,071            | 0,010                | 0,101                | 59   | 55                     | 66   |                        |                                      |        |  |

| Mr ESTIMADO          | σ <sub>d</sub> | Mr ESTIMADO          | σ <sub>d</sub> |
|----------------------|----------------|----------------------|----------------|
| ECUACION No. 3 (Mpa) |                | ECUACION No. 3 (psi) |                |
| 181                  | 0,001          | 26150                | 0,145          |
| 124                  | 0,005          | 17894                | 0,724          |
| 105                  | 0,010          | 15197                | 1,448          |
| 95                   | 0,015          | 13812                | 2,172          |
| 89                   | 0,020          | 12906                | 2,896          |
| 85                   | 0,025          | 12245                | 3,620          |
| 81                   | 0,030          | 11730                | 4,344          |
| 78                   | 0,035          | 11311                | 5,068          |
| 76                   | 0,040          | 10961                | 5,792          |
| 74                   | 0,045          | 10661                | 6,516          |
| 72                   | 0,050          | 10399                | 7,240          |
| 70                   | 0,055          | 10168                | 7,964          |
| 69                   | 0,060          | 9962                 | 8,688          |
| 68                   | 0,065          | 9775                 | 9,412          |
| 66                   | 0,070          | 9606                 | 10,136         |
| 65                   | 0,075          | 9451                 | 10,860         |
| 64                   | 0,080          | 9309                 | 11,584         |
| 63                   | 0,085          | 9176                 | 12,308         |
| 63                   | 0,090          | 9054                 | 13,032         |
| 62                   | 0,095          | 8939                 | 13,756         |
| 61                   | 0,100          | 8832                 | 14,480         |



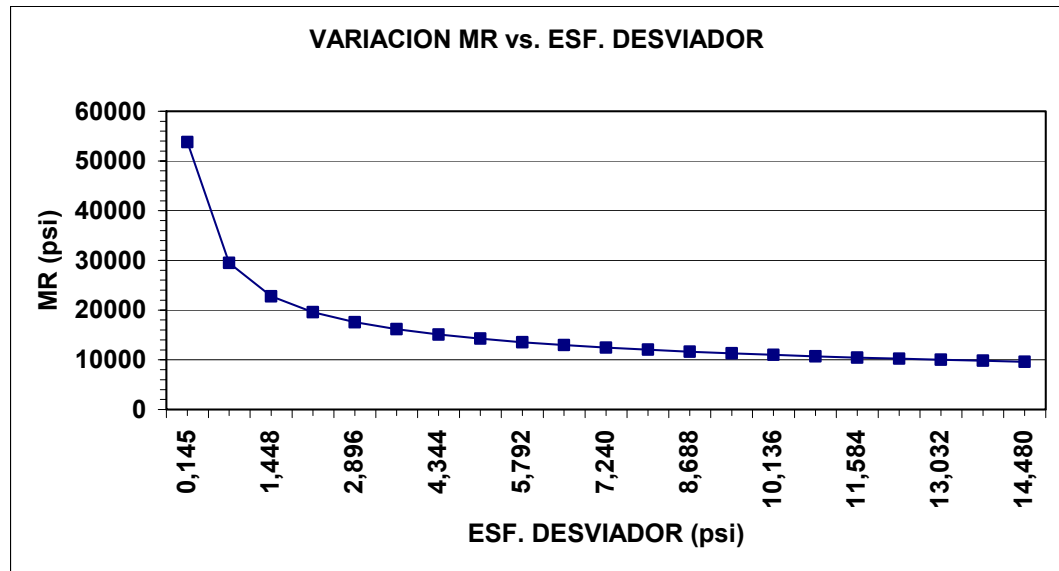
|                   |   |                  |                      |                      |  |  |  |                               |                                      |                               |        |
|-------------------|---|------------------|----------------------|----------------------|--|--|--|-------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|--------|
| <b>CALICATA 5</b> | <b>PROBETA No.</b>                                      | <b>C5M23</b>     |                      |                      | <b>ECUACIÓN No.01:</b>   | <b>ECUACIÓN No.02:</b>   | <b>ECUACIÓN No.03:</b>                           |                               |                                      |                               |        |
|                   | TIPO SUELO (H.R.B)                                      | A-2-5(0)         |                      |                      | <b>Mr = A .(σ<sub>d</sub>)<sup>B</sup> . (θ)<sup>C</sup> (Mpa)</b> | <b>Mr = D .(σ<sub>d</sub>)<sup>E</sup> . (σ<sub>3</sub>)<sup>F</sup> (Mpa)</b> | <b>Mr = G .(σ<sub>d</sub>)<sup>H</sup> (Mpa)</b> |                               |                                      |                               |        |
|                   | DIÁMETRO (mm.)  | 69,95            |                      |                      | <b>A</b>   | 69,75  | <b>D</b>   | 126,47                        | <b>G</b>                             | 43,29                         |        |
|                   | ALTURA (mm.)  | 153,51           |                      |                      | <b>B</b>   | -0,34  | <b>E</b>   | -0,18                         | <b>H</b>                             | -0,18                         |        |
|                   | DENSIDAD CAMPO (gr/cm <sup>3</sup> )                    | 1,300            |                      |                      | <b>C</b>   | 0,44   | <b>F</b>   | 0,28                          | -                                    | -                             |        |
|                   | HUMEDAD NATURAL (%)                                     | 29,50            |                      |                      | <b>Coef. Correl. Múltip.</b>                                       | 0,9800   | <b>Coef. Correl. Múltip.</b>                     | 0,9816                        | <b>Coef. Correl. Múltip.</b>         | 0,5302                        |        |
|                   | HUMEDAD MOLDEO (%)                                      | 27,12            |                      |                      | <b>Coef. Determin. R<sup>2</sup></b>                               | 0,9605   | <b>Coef. Determin. R<sup>2</sup></b>             | 0,9635                        | <b>Coef. Determin. R<sup>2</sup></b> | 0,2812                        |        |
|                   | <b>ENSAYO AASHTO: T 294-92 / Material Tipo 2</b>        |                  |                      |                      |  | <b>r<sup>2</sup> Ajustado</b>  | 0,9539   | <b>r<sup>2</sup> Ajustado</b> | 0,9575                               | <b>r<sup>2</sup> Ajustado</b> | 0,2259 |
|                   | <b>DATOS DEL ENSAYO (Presión Atmosfér. (Mpa) = 0,1)</b> |                  |                      |                      |  | <b>Error típico</b>  | 0,0191   | <b>Error típico</b>           | 0,0184                               | <b>Error típico</b>           | 0,0783 |
|                   |   |                  |                      |                      |  | <b>No. Observaciones</b>   | 15   | <b>No. Observaciones</b>      | 15                                   | <b>No. Observaciones</b>      | 15     |
|                   |   |                  |                      |                      |  | <b>Mr ESTIMADO</b>   |  |                               |                                      |                               |        |
|                   | <b>PASO</b>   | <b>Mr MEDIDO</b> | <b>σ<sub>d</sub></b> | <b>σ<sub>3</sub></b> | <b>θ</b>   | <b>ECUACIÓN No.01:</b>   | <b>ECUACIÓN No.02:</b>                           | <b>ECUACIÓN No.03:</b>        |                                      |                               |        |
|                   |   |                  |                      |                      |  | <b>(Mpa)</b>   |  |                               |                                      |                               |        |
|                   | 2   | 117              | 0,014                | 0,042                | 0,140  | 124  | 115  | 94                            |                                      |                               |        |
|                   | 3   | 104              | 0,027                | 0,042                | 0,153  | 103  | 102  | 83                            |                                      |                               |        |
|                   | 4   | 94               | 0,042                | 0,042                | 0,168  | 92   | 94   | 77                            |                                      |                               |        |
| 5                 | 91  | 0,057            | 0,042                | 0,183                | 86   | 88   | 73   |                               |                                      |                               |        |
| 6                 | 86  | 0,069            | 0,042                | 0,195                | 83   | 86   | 70   |                               |                                      |                               |        |
| 7                 | 95  | 0,013            | 0,021                | 0,076                | 96   | 95   | 95   |                               |                                      |                               |        |
| 8                 | 78  | 0,028            | 0,021                | 0,091                | 81   | 83   | 83   |                               |                                      |                               |        |
| 9                 | 72  | 0,043            | 0,021                | 0,106                | 75   | 77   | 77   |                               |                                      |                               |        |
| 10                | 71  | 0,055            | 0,021                | 0,118                | 72   | 73   | 73   |                               |                                      |                               |        |
| 11                | 71  | 0,069            | 0,021                | 0,132                | 70   | 70   | 70   |                               |                                      |                               |        |
| 12                | 82  | 0,013            | 0,010                | 0,043                | 75   | 78   | 95   |                               |                                      |                               |        |
| 13                | 67  | 0,027            | 0,010                | 0,057                | 66   | 68   | 83   |                               |                                      |                               |        |
| 14                | 61  | 0,041            | 0,010                | 0,071                | 64   | 63   | 77   |                               |                                      |                               |        |
| 15                | 60  | 0,055            | 0,010                | 0,085                | 62   | 60   | 73   |                               |                                      |                               |        |
| 16                | 61  | 0,069            | 0,010                | 0,099                | 62   | 57   | 70   |                               |                                      |                               |        |

| Mr ESTIMADO          | σ <sub>d</sub> | Mr ESTIMADO          | σ <sub>d</sub> |
|----------------------|----------------|----------------------|----------------|
| ECUACION No. 3 (Mpa) |                | ECUACION No. 3 (psi) |                |
| 151                  | 0,001          | 21895                | 0,145          |
| 113                  | 0,005          | 16360                | 0,724          |
| 100                  | 0,010          | 14430                | 1,448          |
| 93                   | 0,015          | 13409                | 2,172          |
| 88                   | 0,020          | 12728                | 2,896          |
| 84                   | 0,025          | 12224                | 3,620          |
| 82                   | 0,030          | 11827                | 4,344          |
| 79                   | 0,035          | 11502                | 5,068          |
| 78                   | 0,040          | 11227                | 5,792          |
| 76                   | 0,045          | 10990                | 6,516          |
| 74                   | 0,050          | 10782                | 7,240          |
| 73                   | 0,055          | 10598                | 7,964          |
| 72                   | 0,060          | 10432                | 8,688          |
| 71                   | 0,065          | 10282                | 9,412          |
| 70                   | 0,070          | 10145                | 10,136         |
| 69                   | 0,075          | 10019                | 10,860         |
| 68                   | 0,080          | 9903                 | 11,584         |
| 68                   | 0,085          | 9795                 | 12,308         |
| 67                   | 0,090          | 9694                 | 13,032         |
| 66                   | 0,095          | 9599                 | 13,756         |
| 66                   | 0,100          | 9511                 | 14,480         |



|                   |   |                  |                              |                              |  |  |                                      |                               |
|-------------------|---|------------------|------------------------------|------------------------------|--|--|--------------------------------------|-------------------------------|
| <b>CALICATA 5</b> | <b>PROBETA No.</b>                                      | <b>C5M31</b>     |                              |                              | <b>ECUACIÓN No.01:</b>                             | <b>ECUACIÓN No.02:</b>                               | <b>ECUACIÓN No.03:</b>               |                               |
|                   | TIPO SUELO (H.R.B)                                      | A-6(10)          |                              |                              | $Mr = A \cdot (\sigma_d)^B \cdot (\theta)^C$ (Mpa) | $Mr = D \cdot (\sigma_d)^E \cdot (\sigma_3)^F$ (Mpa) | $Mr = G \cdot (\sigma_d)^H$ (Mpa)    |                               |
|                   | DIÁMETRO (mm.)  | 69,80            |                              |                              | <b>A</b>   | <b>D</b>   | <b>G</b>                             |                               |
|                   | ALTURA (mm.)  | 151,1            |                              |                              | <b>B</b>   | <b>E</b>   | <b>H</b>                             |                               |
|                   | DENSIDAD CAMPO (gr/cm <sup>3</sup> )                    | 1,457            |                              |                              | <b>C</b>   | <b>F</b>   | -                                    |                               |
|                   | HUMEDAD NATURAL (%)                                     | 20,90            |                              |                              | <b>Coef. Correl. Múltip.</b>                       | <b>Coef. Correl. Múltip.</b>                         | <b>Coef. Correl. Múltip.</b>         |                               |
|                   | HUMEDAD MOLDEO (%)                                      | 21,35            |                              |                              | <b>Coef. Determin. R<sup>2</sup></b>               | <b>Coef. Determin. R<sup>2</sup></b>                 | <b>Coef. Determin. R<sup>2</sup></b> |                               |
|                   | <b>ENSAYO AASHTO: T 294-92 / Material Tipo 2</b>        |                  |                              |                              |  | <b>r<sup>2</sup> Ajustado</b>                        | <b>r<sup>2</sup> Ajustado</b>        | <b>r<sup>2</sup> Ajustado</b> |
|                   | <b>DATOS DEL ENSAYO (Presión Atmosfér. (Mpa) = 0,1)</b> |                  |                              |                              |  | <b>Error típico</b>                                  | <b>Error típico</b>                  | <b>Error típico</b>           |
|                   |   |                  |                              |                              |  | <b>No. Observaciones</b>                             | <b>No. Observaciones</b>             | <b>No. Observaciones</b>      |
|                   |   |                  |                              |                              | <b>Mr ESTIMADO</b>                                 |  |                                      |                               |
|                   | <b>PASO</b>   | <b>Mr MEDIDO</b> | <b><math>\sigma_d</math></b> | <b><math>\sigma_3</math></b> | <b><math>\theta</math></b>                         | <b>ECUACIÓN No.01:</b>                               | <b>ECUACIÓN No.02:</b>               | <b>ECUACIÓN No.03:</b>        |
|                   |   |                  | <b>(Mpa)</b>                 |                              |  | <b>(Mpa)</b>   |                                      |                               |
|                   | 2   | 151              | 0,014                        | 0,042                        | 0,140  | 166  | 158                                  | 138                           |
|                   | 3   | 125              | 0,028                        | 0,042                        | 0,154  | 123  | 123                                  | 107                           |
|                   | 4   | 108              | 0,043                        | 0,042                        | 0,169  | 103  | 104                                  | 91                            |
| 5                 | 96  | 0,055            | 0,042                        | 0,181                        | 93   | 95   | 83                                   |                               |
| 6                 | 86  | 0,070            | 0,042                        | 0,196                        | 85   | 86   | 76                                   |                               |
| 7                 | 154   | 0,014            | 0,021                        | 0,077                        | 139  | 139  | 138                                  |                               |
| 8                 | 100   | 0,028            | 0,021                        | 0,091                        | 105  | 107  | 107                                  |                               |
| 9                 | 87  | 0,042            | 0,021                        | 0,105                        | 91   | 92   | 92                                   |                               |
| 10                | 81  | 0,055            | 0,021                        | 0,118                        | 82   | 83   | 83                                   |                               |
| 11                | 76  | 0,069            | 0,021                        | 0,132                        | 76   | 76   | 76                                   |                               |
| 12                | 124   | 0,013            | 0,010                        | 0,043                        | 122  | 125  | 142                                  |                               |
| 13                | 96  | 0,025            | 0,010                        | 0,055                        | 95   | 97   | 111                                  |                               |
| 14                | 77  | 0,042            | 0,010                        | 0,072                        | 81   | 80   | 92                                   |                               |
| 15                | 73  | 0,055            | 0,010                        | 0,085                        | 74   | 72   | 83                                   |                               |
| 16                | 70  | 0,069            | 0,010                        | 0,099                        | 70   | 66   | 76                                   |                               |

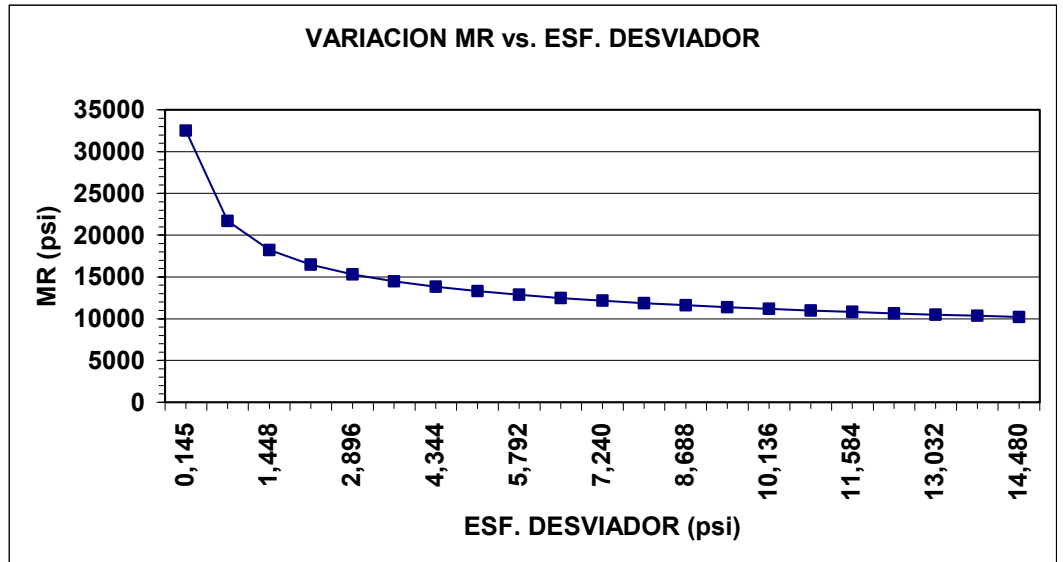
| <b>Mr ESTIMADO</b>          | <b><math>\sigma_d</math></b> | <b>Mr ESTIMADO</b>          | <b><math>\sigma_d</math></b> |
|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| <b>ECUACION No. 3 (Mpa)</b> |                              | <b>ECUACION No. 3 (psi)</b> |                              |
| 372                         | 0,001                        | 53821                       | 0,145                        |
| 204                         | 0,005                        | 29484                       | 0,724                        |
| 157                         | 0,010                        | 22753                       | 1,448                        |
| 135                         | 0,015                        | 19552                       | 2,172                        |
| 121                         | 0,020                        | 17558                       | 2,896                        |
| 112                         | 0,025                        | 16152                       | 3,620                        |
| 104                         | 0,030                        | 15088                       | 4,344                        |
| 98                          | 0,035                        | 14243                       | 5,068                        |
| 94                          | 0,040                        | 13549                       | 5,792                        |
| 90                          | 0,045                        | 12965                       | 6,516                        |
| 86                          | 0,050                        | 12465                       | 7,240                        |
| 83                          | 0,055                        | 12028                       | 7,964                        |
| 80                          | 0,060                        | 11643                       | 8,688                        |
| 78                          | 0,065                        | 11300                       | 9,412                        |
| 76                          | 0,070                        | 10991                       | 10,136                       |
| 74                          | 0,075                        | 10711                       | 10,860                       |
| 72                          | 0,080                        | 10456                       | 11,584                       |
| 71                          | 0,085                        | 10221                       | 12,308                       |
| 69                          | 0,090                        | 10005                       | 13,032                       |
| 68                          | 0,095                        | 9805                        | 13,756                       |
| 66                          | 0,100                        | 9619                        | 14,480                       |



CALICATA 5

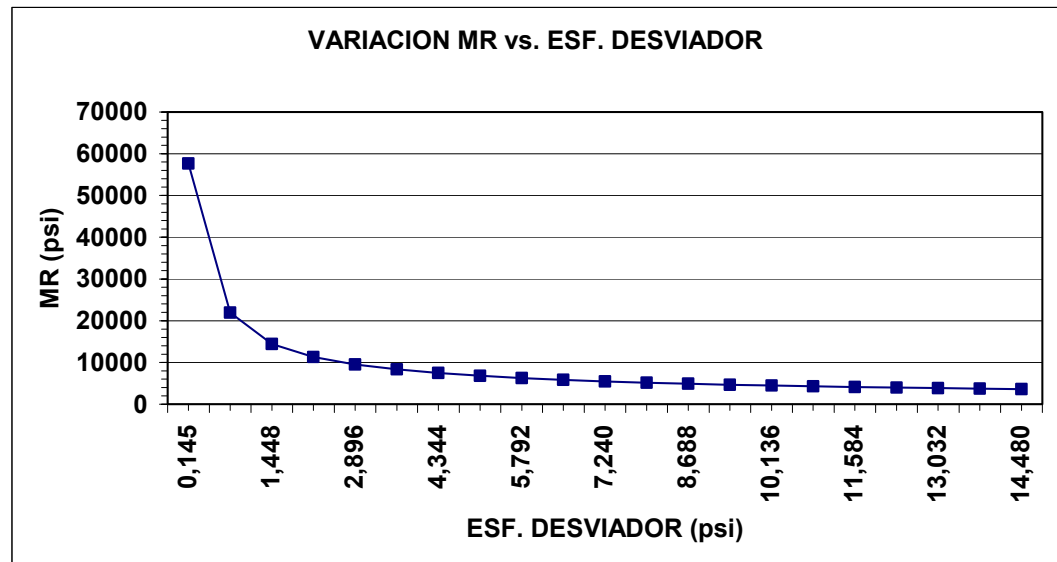
| PROBETA No.                                    |           | C5M32      |            |                                | ECUACIÓN No.01:                                    |                                | ECUACIÓN No.02:                                      |                                | ECUACIÓN No.03:                   |        |  |
|--|-----------|------------|------------|--------------------------------|--|--------------------------------|--|--------------------------------|-----------------------------------|--------|--|
| TIPO SUELO (H.R.B)                             |           | A-6(10)    |            |                                | $Mr = A \cdot (\sigma_d)^B \cdot (\theta)^C$ (Mpa) |                                | $Mr = D \cdot (\sigma_d)^E \cdot (\sigma_3)^F$ (Mpa) |                                | $Mr = G \cdot (\sigma_d)^H$ (Mpa) |        |  |
| DIÁMETRO (mm.)                                 | 69,87     |            |            | A                              | 51,29  | D                              | 72,14  | G                              | 39,54                             |        |  |
| ALTURA (mm.)                                   | 150,97    |            |            | B                              | -0,33  | E                              | -0,25  | H                              | -0,25                             |        |  |
| DENSIDAD CAMPO (gr/cm <sup>3</sup> )           | 1,457     |            |            | C                              | 0,24   | F                              | 0,15   | -                              | -                                 |        |  |
| HUMEDAD NATURAL (%)                            | 20,90     |            |            | Coef. Correl. Múltip.          | 0,9649   | Coef. Correl. Múltip.          | 0,9751   | Coef. Correl. Múltip.          | 0,8282                            |        |  |
| HUMEDAD MOLDEO (%)                             | 20,97     |            |            | Coef. Determin. R <sup>2</sup> | 0,9311   | Coef. Determin. R <sup>2</sup> | 0,9508   | Coef. Determin. R <sup>2</sup> | 0,6859                            |        |  |
| ENSAYO AASHTO: T 294-92 / Material Tipo 2      |           |            |            |                                | r <sup>2</sup> Ajustado                            | 0,9196                         | r <sup>2</sup> Ajustado                              | 0,9426                         | r <sup>2</sup> Ajustado           | 0,6617 |  |
|  |           |            |            |                                | Error típico                                       | 0,0225                         | Error típico   | 0,0190                         | Error típico                      | 0,0461 |  |
|  |           |            |            |                                | No. Observaciones                                  | 15                             | No. Observaciones                                    | 15                             | No. Observaciones                 | 15     |  |
| DATOS DEL ENSAYO (Presión Atmosf. (Mpa) = 0,1) |           |            |            |                                | Mr ESTIMADO  |                                |  |                                |                                   |        |  |
| PASO   | Mr MEDIDO | $\sigma_d$ | $\sigma_3$ | $\theta$                       | ECUACIÓN No.01:                                    | ECUACIÓN No.02:                | ECUACIÓN No.03:                                      |                                |                                   |        |  |
|  |           | (Mpa)      |            |                                | (Mpa)  |                                |  |                                |                                   |        |  |
| 2  | 120       | 0,013      | 0,042      | 0,139                          | 135  | 131                            | 117  |                                |                                   |        |  |
| 3  | 116       | 0,027      | 0,042      | 0,153                          | 109  | 109                            | 98   |                                |                                   |        |  |
| 4  | 104       | 0,040      | 0,042      | 0,166                          | 98   | 99                             | 89   |                                |                                   |        |  |
| 5  | 93        | 0,058      | 0,042      | 0,184                          | 89   | 90                             | 81   |                                |                                   |        |  |
| 6  | 86        | 0,069      | 0,042      | 0,195                          | 85   | 87                             | 78   |                                |                                   |        |  |
| 7  | 121       | 0,014      | 0,021      | 0,077                          | 117  | 116                            | 116  |                                |                                   |        |  |
| 8  | 96        | 0,027      | 0,021      | 0,090                          | 96   | 98                             | 98   |                                |                                   |        |  |
| 9  | 84        | 0,043      | 0,021      | 0,106                          | 86   | 87                             | 87   |                                |                                   |        |  |
| 10   | 78        | 0,056      | 0,021      | 0,119                          | 81   | 82                             | 82   |                                |                                   |        |  |
| 11   | 76        | 0,070      | 0,021      | 0,133                          | 77   | 77                             | 77   |                                |                                   |        |  |
| 12   | 107       | 0,014      | 0,010      | 0,044                          | 103  | 104                            | 117  |                                |                                   |        |  |
| 13   | 89        | 0,027      | 0,010      | 0,057                          | 87   | 88                             | 98   |                                |                                   |        |  |
| 14   | 75        | 0,042      | 0,010      | 0,072                          | 79   | 79                             | 88   |                                |                                   |        |  |
| 15   | 74        | 0,056      | 0,010      | 0,086                          | 75   | 73                             | 82   |                                |                                   |        |  |
| 16   | 71        | 0,069      | 0,010      | 0,099                          | 72   | 69                             | 77   |                                |                                   |        |  |

| Mr ESTIMADO          | $\sigma_d$ | Mr ESTIMADO          | $\sigma_d$ |
|----------------------|------------|----------------------|------------|
| ECUACION No. 3 (Mpa) |            | ECUACION No. 3 (psi) |            |
| 225                  | 0,001      | 32513                | 0,145      |
| 150                  | 0,005      | 21693                | 0,724      |
| 126                  | 0,010      | 18223                | 1,448      |
| 114                  | 0,015      | 16457                | 2,172      |
| 106                  | 0,020      | 15309                | 2,896      |
| 100                  | 0,025      | 14473                | 3,620      |
| 95                   | 0,030      | 13825                | 4,344      |
| 92                   | 0,035      | 13299                | 5,068      |
| 89                   | 0,040      | 12860                | 5,792      |
| 86                   | 0,045      | 12485                | 6,516      |
| 84                   | 0,050      | 12159                | 7,240      |
| 82                   | 0,055      | 11871                | 7,964      |
| 80                   | 0,060      | 11614                | 8,688      |
| 79                   | 0,065      | 11382                | 9,412      |
| 77                   | 0,070      | 11172                | 10,136     |
| 76                   | 0,075      | 10980                | 10,860     |
| 75                   | 0,080      | 10803                | 11,584     |
| 73                   | 0,085      | 10640                | 12,308     |
| 72                   | 0,090      | 10488                | 13,032     |
| 71                   | 0,095      | 10347                | 13,756     |
| 71                   | 0,100      | 10214                | 14,480     |



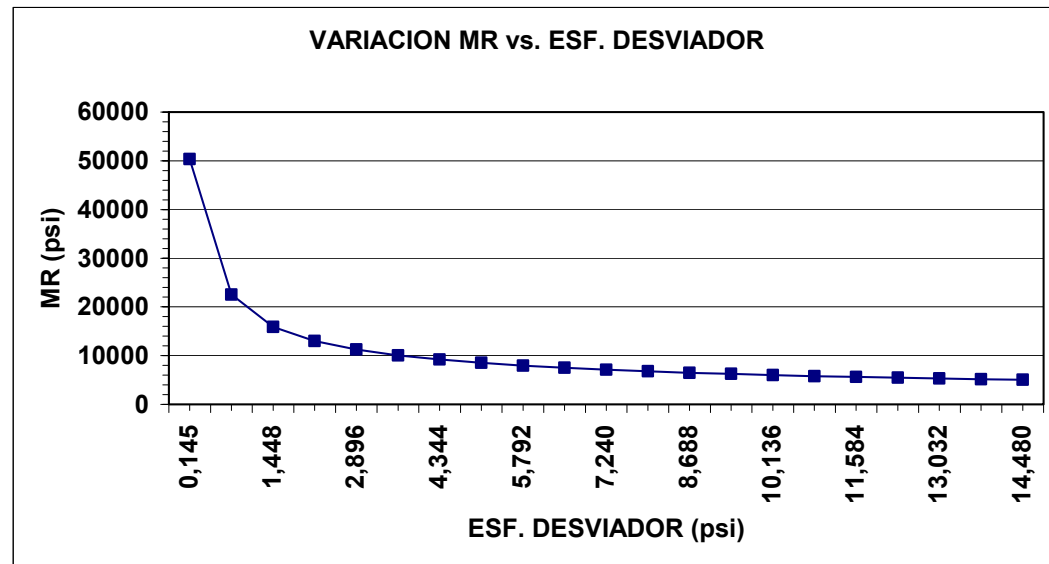
|                   |   |                  |                              |                              |                            |  |                               |  |                               |                                      |                               |               |
|-------------------|---|------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|--|-------------------------------|--|-------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|---------------|
| <b>CALICATA 5</b> | <b>PROBETA No.</b>                                      | <b>C5SR1</b>     |                              |                              |                            | <b>ECUACIÓN No.01:</b>                             |                               | <b>ECUACIÓN No.02:</b>                               |                               | <b>ECUACIÓN No.03:</b>               |                               |               |
|                   | TIPO SUELO (H.R.B)                                      | A-7-6(18)        |                              |                              |                            | $Mr = A \cdot (\sigma_d)^B \cdot (\theta)^C$ (Mpa) |                               | $Mr = D \cdot (\sigma_d)^E \cdot (\sigma_3)^F$ (Mpa) |                               | $Mr = G \cdot (\sigma_d)^H$ (Mpa)    |                               |               |
|                   | DIÁMETRO (mm.)  | 69,80            |                              |                              |                            | <b>A</b>   | 11,53                         | <b>D</b>   | 23,91                         | <b>G</b>                             | 6,28                          |               |
|                   | ALTURA (mm.)  | 151,3            |                              |                              |                            | <b>B</b>   | -0,81                         | <b>E</b>   | -0,60                         | <b>H</b>                             | -0,60                         |               |
|                   | DENSIDAD CAMPO (gr/cm <sup>3</sup> )                    | 1,283            |                              |                              |                            | <b>C</b>   | 0,57                          | <b>F</b>   | 0,35                          | -                                    | -                             |               |
|                   | HUMEDAD NATURAL (%)                                     | 23,00            |                              |                              |                            | <b>Coef. Correl. Múltip.</b>                       | 0,9982                        | <b>Coef. Correl. Múltip.</b>                         | 0,9891                        | <b>Coef. Correl. Múltip.</b>         | 0,8492                        |               |
|                   | HUMEDAD MOLDEO (%)                                      | 22,63            |                              |                              |                            | <b>Coef. Determin. R<sup>2</sup></b>               | 0,9964                        | <b>Coef. Determin. R<sup>2</sup></b>                 | 0,9783                        | <b>Coef. Determin. R<sup>2</sup></b> | 0,7211                        |               |
|                   | <b>ENSAYO AASHTO: T 294-92 / Material Tipo 2</b>        |                  |                              |                              |                            |  | <b>r<sup>2</sup> Ajustado</b> | <b>0,9958</b>  | <b>r<sup>2</sup> Ajustado</b> | <b>0,9747</b>                        | <b>r<sup>2</sup> Ajustado</b> | <b>0,6996</b> |
|                   | <b>DATOS DEL ENSAYO (Presión Atmosfér. (Mpa) = 0,1)</b> |                  |                              |                              |                            |  | <b>Error típico</b>           | 0,0116   | <b>Error típico</b>           | 0,0286                               | <b>Error típico</b>           | 0,0985        |
|                   |   |                  |                              |                              |                            |  | <b>No. Observaciones</b>      | 15   | <b>No. Observaciones</b>      | 15                                   | <b>No. Observaciones</b>      | 15            |
|                   |   |                  |                              |                              |                            |  | <b>Mr ESTIMADO</b>            |  |                               |                                      |                               |               |
|                   | <b>PASO</b>   | <b>Mr MEDIDO</b> | <b><math>\sigma_d</math></b> | <b><math>\sigma_3</math></b> | <b><math>\theta</math></b> | <b>ECUACIÓN No.01:</b>                             |                               | <b>ECUACIÓN No.02:</b>                               |                               | <b>ECUACIÓN No.03:</b>               |                               |               |
|                   |   |                  |                              |                              |                            | (Mpa)  |                               | (Mpa)  |                               |                                      |                               |               |
|                   | <b>2</b>  | 119              | 0,014                        | 0,042                        | 0,140                      | 115  |                               | 103  |                               | 81                                   |                               |               |
|                   | <b>3</b>  | 70               | 0,030                        | 0,042                        | 0,156                      | 67   |                               | 66   |                               | 52                                   |                               |               |
|                   | <b>4</b>  | 55               | 0,039                        | 0,042                        | 0,165                      | 56   |                               | 56   |                               | 44                                   |                               |               |
| <b>5</b>          | 44  | 0,056            | 0,042                        | 0,182                        | 44                         |  | 45                            |  | 35                            |                                      |                               |               |
| <b>6</b>          | 39  | 0,070            | 0,042                        | 0,196                        | 39                         |  | 40                            |  | 31                            |                                      |                               |               |
| <b>7</b>          | 76  | 0,015            | 0,021                        | 0,078                        | 81                         |  | 80                            |  | 80                            |                                      |                               |               |
| <b>8</b>          | 50  | 0,028            | 0,021                        | 0,091                        | 51                         |  | 54                            |  | 53                            |                                      |                               |               |
| <b>9</b>          | 41  | 0,042            | 0,021                        | 0,105                        | 41                         |  | 42                            |  | 42                            |                                      |                               |               |
| <b>10</b>         | 35  | 0,055            | 0,021                        | 0,118                        | 35                         |  | 36                            |  | 36                            |                                      |                               |               |
| <b>11</b>         | 31  | 0,070            | 0,021                        | 0,133                        | 31                         |  | 31                            |  | 31                            |                                      |                               |               |
| <b>12</b>         | 64  | 0,013            | 0,010                        | 0,043                        | 62                         |  | 66                            |  | 84                            |                                      |                               |               |
| <b>13</b>         | 40  | 0,028            | 0,010                        | 0,058                        | 40                         |  | 42                            |  | 54                            |                                      |                               |               |
| <b>14</b>         | 32  | 0,043            | 0,010                        | 0,073                        | 32                         |  | 32                            |  | 41                            |                                      |                               |               |
| <b>15</b>         | 29  | 0,057            | 0,010                        | 0,087                        | 29                         |  | 27                            |  | 35                            |                                      |                               |               |
| <b>16</b>         | 27  | 0,070            | 0,010                        | 0,100                        | 26                         |  | 24                            |  | 31                            |                                      |                               |               |

| <b>Mr ESTIMADO</b>          | <b><math>\sigma_d</math></b> | <b>Mr ESTIMADO</b>          | <b><math>\sigma_d</math></b> |
|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| <b>ECUACION No. 3 (Mpa)</b> |                              | <b>ECUACION No. 3 (psi)</b> |                              |
| 398                         | 0,001                        | 57633                       | 0,145                        |
| 151                         | 0,005                        | 21920                       | 0,724                        |
| 100                         | 0,010                        | 14456                       | 1,448                        |
| 78                          | 0,015                        | 11331                       | 2,172                        |
| 66                          | 0,020                        | 9533                        | 2,896                        |
| 58                          | 0,025                        | 8337                        | 3,620                        |
| 52                          | 0,030                        | 7472                        | 4,344                        |
| 47                          | 0,035                        | 6812                        | 5,068                        |
| 43                          | 0,040                        | 6287                        | 5,792                        |
| 40                          | 0,045                        | 5857                        | 6,516                        |
| 38                          | 0,050                        | 5498                        | 7,240                        |
| 36                          | 0,055                        | 5192                        | 7,964                        |
| 34                          | 0,060                        | 4928                        | 8,688                        |
| 32                          | 0,065                        | 4696                        | 9,412                        |
| 31                          | 0,070                        | 4492                        | 10,136                       |
| 30                          | 0,075                        | 4310                        | 10,860                       |
| 29                          | 0,080                        | 4146                        | 11,584                       |
| 28                          | 0,085                        | 3998                        | 12,308                       |
| 27                          | 0,090                        | 3863                        | 13,032                       |
| 26                          | 0,095                        | 3739                        | 13,756                       |
| 25                          | 0,100                        | 3626                        | 14,480                       |



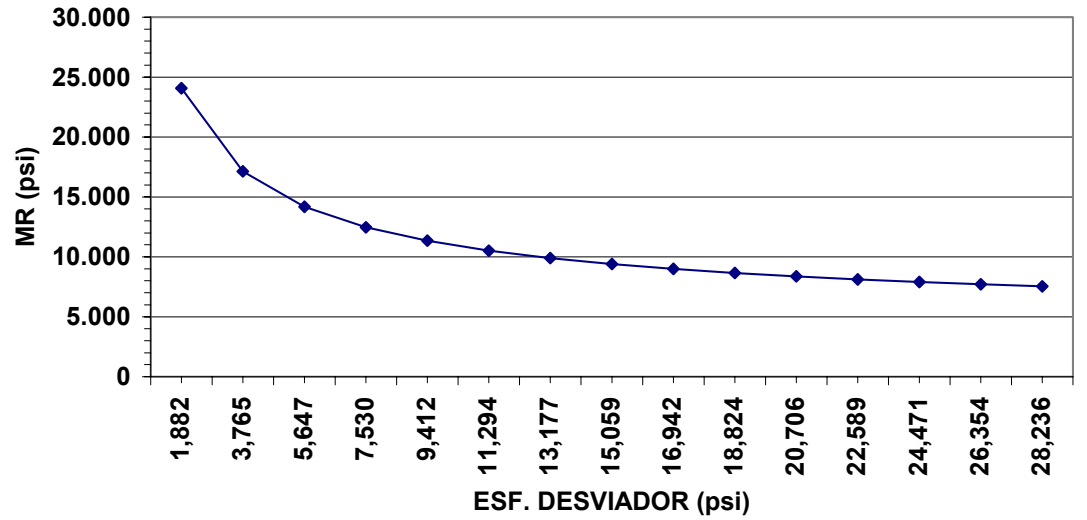
|                   |   |                  |                      |                      |  |  |                                   |                        |
|-------------------|---|------------------|----------------------|----------------------|--|--|-----------------------------------|------------------------|
| <b>CALICATA 5</b> | <b>PROBETA No.</b>                                      | <b>C5SR2</b>     |                      |                      | <b>ECUACIÓN No.01:</b>                             | <b>ECUACIÓN No.02:</b>                               | <b>ECUACIÓN No.03:</b>            |                        |
|                   | TIPO SUELO (H.R.B)                                      | A-7-6(18)        |                      |                      | $Mr = A \cdot (\sigma_d)^B \cdot (\theta)^C$ (Mpa) | $Mr = D \cdot (\sigma_d)^E \cdot (\sigma_3)^F$ (Mpa) | $Mr = G \cdot (\sigma_d)^H$ (Mpa) |                        |
|                   | DIÁMETRO (mm.)  | 69,6             |                      |                      | A  | D  | G                                 |                        |
|                   | ALTURA (mm.)  | 151,4            |                      |                      | B  | E  | H                                 |                        |
|                   | DENSIDAD CAMPO (gr/cm <sup>3</sup> )                    | 1,283            |                      |                      | C  | F  | -                                 |                        |
|                   | HUMEDAD NATURAL (%)                                     | 23,00            |                      |                      | Coef. Correl. Múltip.                              | Coef. Correl. Múltip.                                | Coef. Correl. Múltip.             |                        |
|                   | HUMEDAD MOLDEO (%)                                      | 21,95            |                      |                      | Coef. Determin. R <sup>2</sup>                     | Coef. Determin. R <sup>2</sup>                       | Coef. Determin. R <sup>2</sup>    |                        |
|                   | ENSAYO AASHTO: T 294-92 / Material <u>Tipo 2</u>        |                  |                      |                      | r <sup>2</sup> Ajustado                            | r <sup>2</sup> Ajustado                              | r <sup>2</sup> Ajustado           |                        |
|                   | <b>DATOS DEL ENSAYO (Presión Atmosfér. (Mpa) = 0,1)</b> |                  |                      |                      | Error típico                                       | Error típico   | Error típico                      |                        |
|                   |   |                  |                      |                      | No. Observaciones                                  | No. Observaciones                                    | No. Observaciones                 |                        |
|                   |   |                  |                      |                      | <b>Mr ESTIMADO</b>                                 |  |                                   |                        |
|                   | <b>PASO</b>   | <b>Mr MEDIDO</b> | <b>σ<sub>d</sub></b> | <b>σ<sub>3</sub></b> | <b>θ</b>   | <b>ECUACIÓN No.01:</b>                               | <b>ECUACIÓN No.02:</b>            | <b>ECUACIÓN No.03:</b> |
|                   |   |                  |                      |                      |  | (Mpa)  |                                   |                        |
|                   | 2   | 117              | 0,014                | 0,042                | 0,140  | 117  | 110                               | 94                     |
|                   | 3   | 84               | 0,028                | 0,042                | 0,154  | 77   | 76                                | 66                     |
|                   | 4   | 64               | 0,043                | 0,042                | 0,169  | 61   | 62                                | 53                     |
|                   | 5   | 52               | 0,057                | 0,042                | 0,183  | 53   | 54                                | 46                     |
|                   | 6   | 47               | 0,070                | 0,042                | 0,196  | 48   | 48                                | 42                     |
|                   | 7   | 78               | 0,015                | 0,021                | 0,078  | 91   | 91                                | 91                     |
|                   | 8   | 64               | 0,029                | 0,021                | 0,092  | 64   | 65                                | 65                     |
| 9                 | 52  | 0,041            | 0,021                | 0,104                | 53   | 55   | 55                                |                        |
| 10                | 46  | 0,056            | 0,021                | 0,119                | 46   | 47   | 46                                |                        |
| 11                | 41  | 0,071            | 0,021                | 0,134                | 41   | 42   | 41                                |                        |
| 12                | 82  | 0,014            | 0,010                | 0,044                | 77   | 79   | 93                                |                        |
| 13                | 58  | 0,028            | 0,010                | 0,058                | 55   | 57   | 66                                |                        |
| 14                | 46  | 0,045            | 0,010                | 0,075                | 45   | 45   | 52                                |                        |
| 15                | 40  | 0,056            | 0,010                | 0,086                | 41   | 40   | 47                                |                        |
| 16                | 37  | 0,069            | 0,010                | 0,099                | 38   | 36   | 42                                |                        |

| Mr ESTIMADO          | σ <sub>d</sub> | Mr ESTIMADO          | σ <sub>d</sub> |
|----------------------|----------------|----------------------|----------------|
| ECUACION No. 3 (Mpa) |                | ECUACION No. 3 (psi) |                |
| 348                  | 0,001          | 50352                | 0,145          |
| 156                  | 0,005          | 22525                | 0,724          |
| 110                  | 0,010          | 15929                | 1,448          |
| 90                   | 0,015          | 13007                | 2,172          |
| 78                   | 0,020          | 11265                | 2,896          |
| 70                   | 0,025          | 10076                | 3,620          |
| 64                   | 0,030          | 9199                 | 4,344          |
| 59                   | 0,035          | 8516                 | 5,068          |
| 55                   | 0,040          | 7967                 | 5,792          |
| 52                   | 0,045          | 7511                 | 6,516          |
| 49                   | 0,050          | 7126                 | 7,240          |
| 47                   | 0,055          | 6794                 | 7,964          |
| 45                   | 0,060          | 6505                 | 8,688          |
| 43                   | 0,065          | 6250                 | 9,412          |
| 42                   | 0,070          | 6023                 | 10,136         |
| 40                   | 0,075          | 5819                 | 10,860         |
| 39                   | 0,080          | 5634                 | 11,584         |
| 38                   | 0,085          | 5466                 | 12,308         |
| 37                   | 0,090          | 5312                 | 13,032         |
| 36                   | 0,095          | 5170                 | 13,756         |
| 35                   | 0,100          | 5039                 | 14,480         |

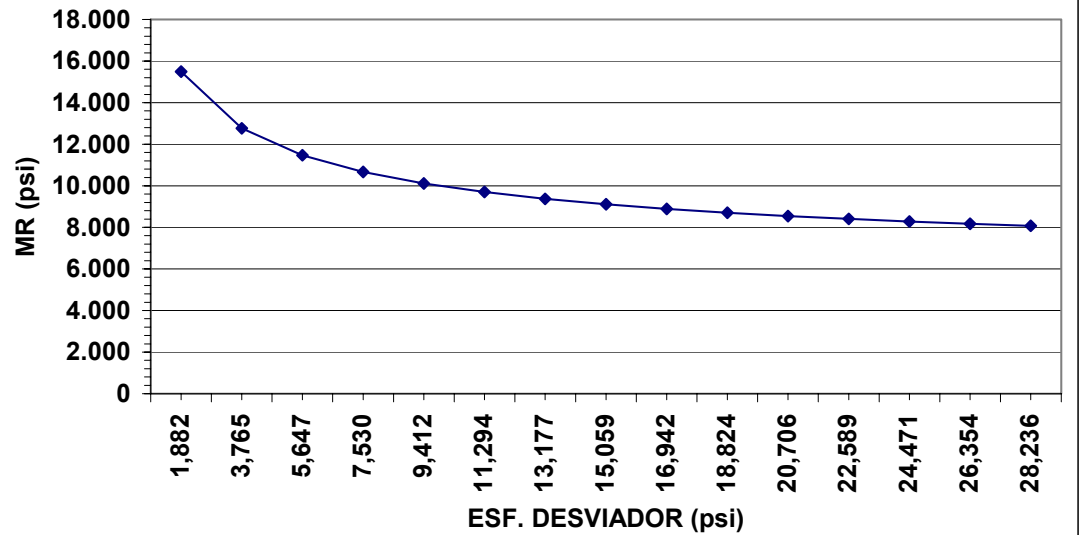


**PROBETA No.****C5M31**

| $\theta$ | $\sigma_d$ | Mr ESTIMADO |            |
|----------|------------|-------------|------------|
|          |            | Ecuación 1  | Ecuación 1 |
| Mpa      | Mpa        | Mpa         | psi        |
| 0,139    | 0,013      | 173         | 1,882      |
| 0,152    | 0,026      | 127         | 3,765      |
| 0,165    | 0,039      | 107         | 5,647      |
| 0,178    | 0,052      | 95          | 7,530      |
| 0,191    | 0,065      | 87          | 9,412      |
| 0,204    | 0,078      | 81          | 11,294     |
| 0,217    | 0,091      | 77          | 13,177     |
| 0,230    | 0,104      | 73          | 15,059     |
| 0,243    | 0,117      | 71          | 16,942     |
| 0,256    | 0,130      | 68          | 18,824     |
| 0,269    | 0,143      | 66          | 20,706     |
| 0,282    | 0,156      | 64          | 22,589     |
| 0,295    | 0,169      | 63          | 24,471     |
| 0,308    | 0,182      | 61          | 26,354     |
| 0,321    | 0,195      | 60          | 28,236     |

**VARIACION MR vs. ESF. DESVIADOR****PROBETA No.****C5M32**

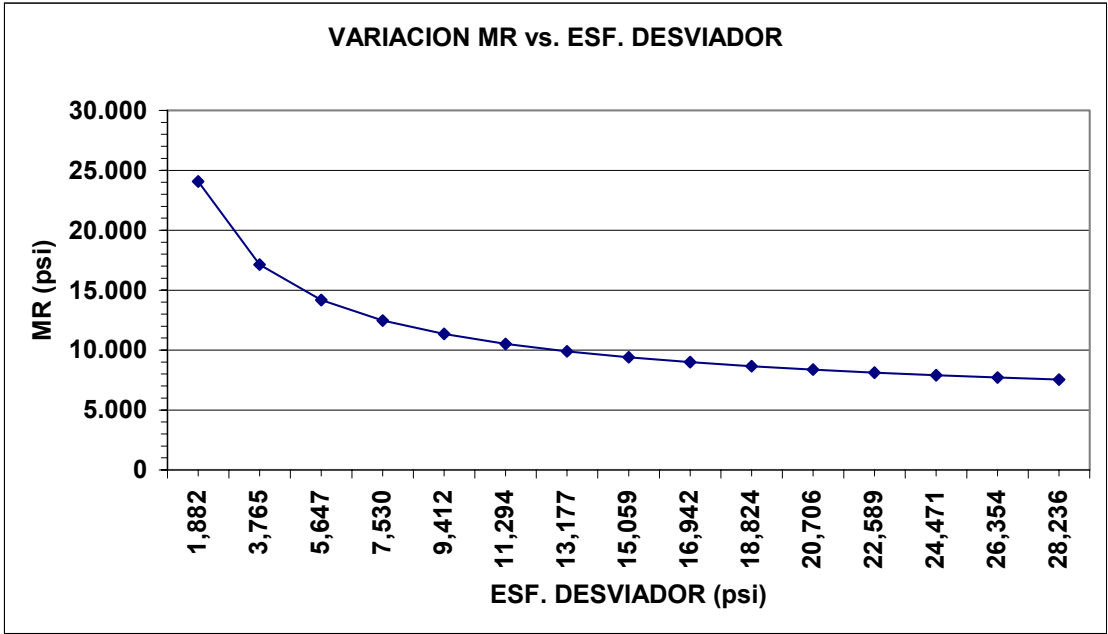
| $\theta$ | $\sigma_d$ | Mr ESTIMADO |            |
|----------|------------|-------------|------------|
|          |            | Ecuación 1  | Ecuación 1 |
| Mpa      | Mpa        | Mpa         | psi        |
| 0,139    | 0,013      | 137         | 1,882      |
| 0,152    | 0,026      | 111         | 3,765      |
| 0,165    | 0,039      | 99          | 5,647      |
| 0,178    | 0,052      | 91          | 7,530      |
| 0,191    | 0,065      | 86          | 9,412      |
| 0,204    | 0,078      | 82          | 11,294     |
| 0,217    | 0,091      | 79          | 13,177     |
| 0,230    | 0,104      | 77          | 15,059     |
| 0,243    | 0,117      | 75          | 16,942     |
| 0,256    | 0,130      | 73          | 18,824     |
| 0,269    | 0,143      | 72          | 20,706     |
| 0,282    | 0,156      | 71          | 22,589     |
| 0,295    | 0,169      | 69          | 24,471     |
| 0,308    | 0,182      | 68          | 26,354     |
| 0,321    | 0,195      | 68          | 28,236     |

**VARIACION MR vs. ESF. DESVIADOR**



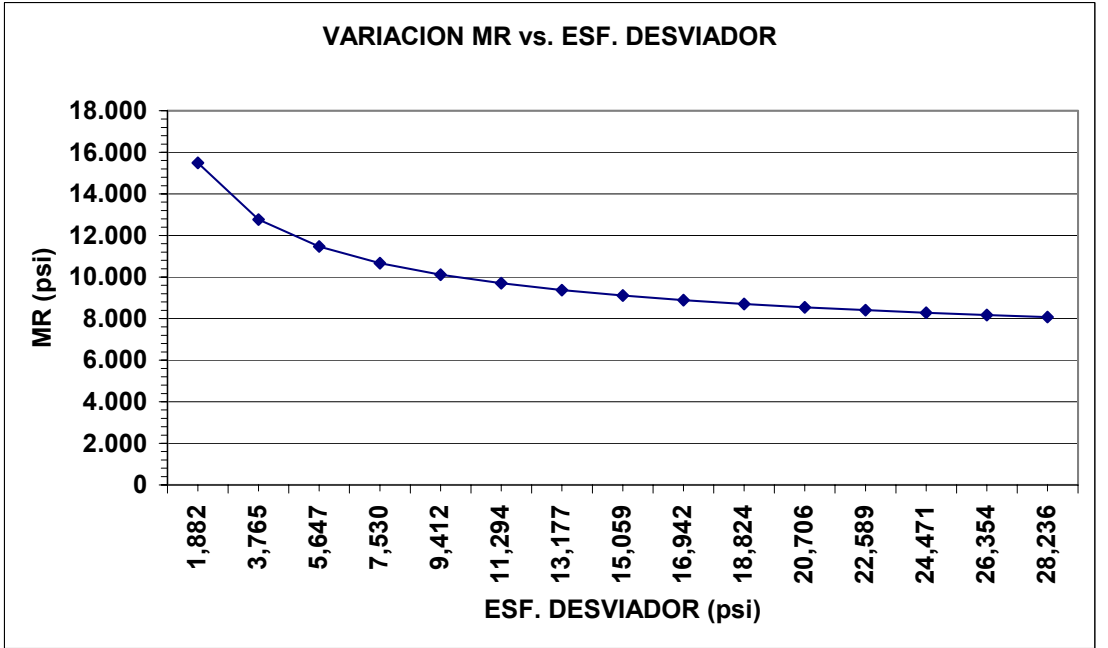
**PROBETA No. C5SR1**

| $\theta$ | $\sigma_d$ | Mr ESTIMADO | $\sigma_d$ | Mr ESTIMADO |
|----------|------------|-------------|------------|-------------|
|          |            | Ecuación 1  |            | Ecuación 1  |
| Mpa      | Mpa        | Mpa         | psi        | psi         |
| 0,139    | 0,013      | 123         | 1,882      | 17.831      |
| 0,152    | 0,026      | 74          | 3,765      | 10.737      |
| 0,165    | 0,039      | 56          | 5,647      | 8.117       |
| 0,178    | 0,052      | 46          | 7,530      | 6.724       |
| 0,191    | 0,065      | 40          | 9,412      | 5.849       |
| 0,204    | 0,078      | 36          | 11,294     | 5.244       |
| 0,217    | 0,091      | 33          | 13,177     | 4.798       |
| 0,230    | 0,104      | 31          | 15,059     | 4.455       |
| 0,243    | 0,117      | 29          | 16,942     | 4.181       |
| 0,256    | 0,130      | 27          | 18,824     | 3.958       |
| 0,269    | 0,143      | 26          | 20,706     | 3.771       |
| 0,282    | 0,156      | 25          | 22,589     | 3.612       |
| 0,295    | 0,169      | 24          | 24,471     | 3.475       |
| 0,308    | 0,182      | 23          | 26,354     | 3.355       |
| 0,321    | 0,195      | 22          | 28,236     | 3.250       |



**PROBETA No. C5SR2**

| $\theta$ | $\sigma_d$ | Mr ESTIMADO | $\sigma_d$ | Mr ESTIMADO |
|----------|------------|-------------|------------|-------------|
|          |            | Ecuación 1  |            | Ecuación 1  |
| Mpa      | Mpa        | Mpa         | psi        | psi         |
| 0,139    | 0,013      | 120         | 1,882      | 17.329      |
| 0,152    | 0,026      | 80          | 3,765      | 11.640      |
| 0,165    | 0,039      | 64          | 5,647      | 9.317       |
| 0,178    | 0,052      | 55          | 7,530      | 8.004       |
| 0,191    | 0,065      | 49          | 9,412      | 7.143       |
| 0,204    | 0,078      | 45          | 11,294     | 6.527       |
| 0,217    | 0,091      | 42          | 13,177     | 6.060       |
| 0,230    | 0,104      | 39          | 15,059     | 5.693       |
| 0,243    | 0,117      | 37          | 16,942     | 5.393       |
| 0,256    | 0,130      | 36          | 18,824     | 5.144       |
| 0,269    | 0,143      | 34          | 20,706     | 4.933       |
| 0,282    | 0,156      | 33          | 22,589     | 4.751       |
| 0,295    | 0,169      | 32          | 24,471     | 4.592       |
| 0,308    | 0,182      | 31          | 26,354     | 4.451       |
| 0,321    | 0,195      | 30          | 28,236     | 4.326       |



# **MEZCLAS ASFÁLTICAS**

**ENSAYO PARA LA  
DETERMINACIÓN DEL MÓDULO  
DINÁMICO DE MEZCLAS  
ASFÁLTICAS**

# MÓDULO DINÁMICO O RESILIENTE DE MEZCLAS MEDIANTE ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

*El trabajo de laboratorio que se presenta a continuación fue realizado en el Laboratorio Vial del Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE) de la Universidad del Rosario, Argentina.*

## 1. Introducción

El presente anexo describe el método empleado para la determinación del Módulo de Dinámico o Resiliente de las muestras de mezclas asfálticas obtenidas a través de la toma de núcleos de pavimento (core-drill) procedentes de la Ruta 6 de Argentina. El método se basa en la técnica de Tensión Controlada.

El procedimiento consiste en el Ensayo de Tracción Indirecta, el cual permite caracterizar la resistencia a la fatiga de las mezclas asfálticas. El método tiene la ventaja que es aplicable a muestras cilíndricas elaboradas en laboratorio o extraídas de capas asfálticas existentes (core-drill) como es el caso que se presenta.

La resistencia a la fatiga, a un cierto nivel de tensiones o de deformaciones, se define como el número de repeticiones de aplicación de carga necesario para reducir el desempeño estructural de la mezcla hasta un nivel preestablecido convencionalmente, el cual puede ser definido en base a diferentes criterios como por ejemplo, la aparición de la primera fisura o la reducción del módulo de rigidez hasta un porcentaje del inicial.

El Módulo Dinámico de las mezclas asfálticas establece una relación funcional que vincula las tensiones aplicadas y las deformaciones resultantes para cada condición particular de temperatura y tiempo o frecuencia de aplicación de las cargas. La expresión matemática que rige dichas variables es la siguiente:

$$Edin(t,T) = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

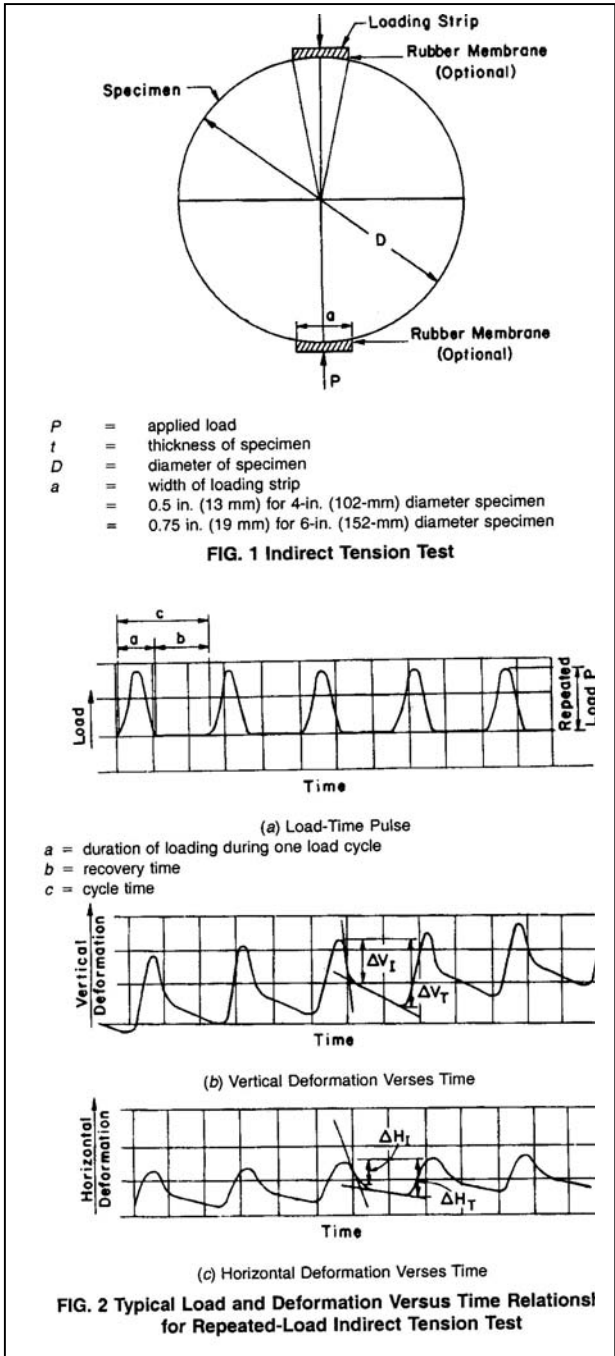
donde:

$Edin(t,T)$ : Módulo Dinámico de la mezcla correspondiente a una temperatura "T" y un tiempo de aplicación de cargas de "t".

$\sigma$ : Estado de tensiones impuesto

$\varepsilon$ : Deformación específica inducida en el material.

El ensayo para la determinación del Módulo de Dinámico de mezclas asfálticas basado en el Ensayo de Tracción Indirecta consiste en aplicar sobre una probeta cilíndrica, una sollicitación de compresión repetida con onda sinusoidal distribuida a lo largo de dos generatrices opuestas diametralmente. La deformación horizontal resultante de la muestra es medida y utilizada en la determinación del módulo resiliente de la mezcla. Del mismo modo, la Relación de Poisson puede ser determinada en base a las deformaciones horizontal y vertical recuperables. Las figuras siguientes presentan el esquema general de sollicitación de la muestra, así como la variación de la carga en el tiempo y las deformaciones vertical y horizontal durante el tiempo de carga.



Fuente: ASTM. STANDARD TEST METHOD FOR INDIRECT TENSION TEST FOR RESILIENT MODULUS OF BITUMINOUS MIXTURES. DESIGNATION: D 4123-82 (REAPPROVED 1995).

El ensayo permite conocer el comportamiento visco-elástico de las mezclas asfálticas por medio de la variación de la frecuencia de aplicación de las cargas a distintas temperaturas, por lo que realizando extrapolaciones es posible obtener la Curva Maestra que representa la variación del Módulo Dinámico con la temperatura a una frecuencia de carga fija o la variación del Módulo Dinámico con la frecuencia a una temperatura fija.

En el presente trabajo fueron desarrolladas Curvas Maestras que representan la variación del Módulo de Elasticidad de las mezclas en función de la temperatura para frecuencias de aplicación de las cargas constantes. De esta manera es posible evaluar el comportamiento de las mezclas ante cargas estáticas o a muy baja velocidad o cargas dinámicas (vehículos circulando a altas velocidades).

Cabe destacar que el Módulo Dinámico de una mezcla asfáltica determinada aumenta cuando se disminuye la temperatura de ensayo y se mantiene constante la frecuencia de solicitaciones. Del mismo modo el módulo aumenta cuando se mantiene constante la temperatura de ensayo y se aumenta la frecuencia de sollicitación. Por lo tanto la temperatura y tiempo de aplicación de la carga son parámetros principales y complementarios en el comportamiento de una mezcla asfáltica.

## **2. Descripción del Equipo de Ensayo**

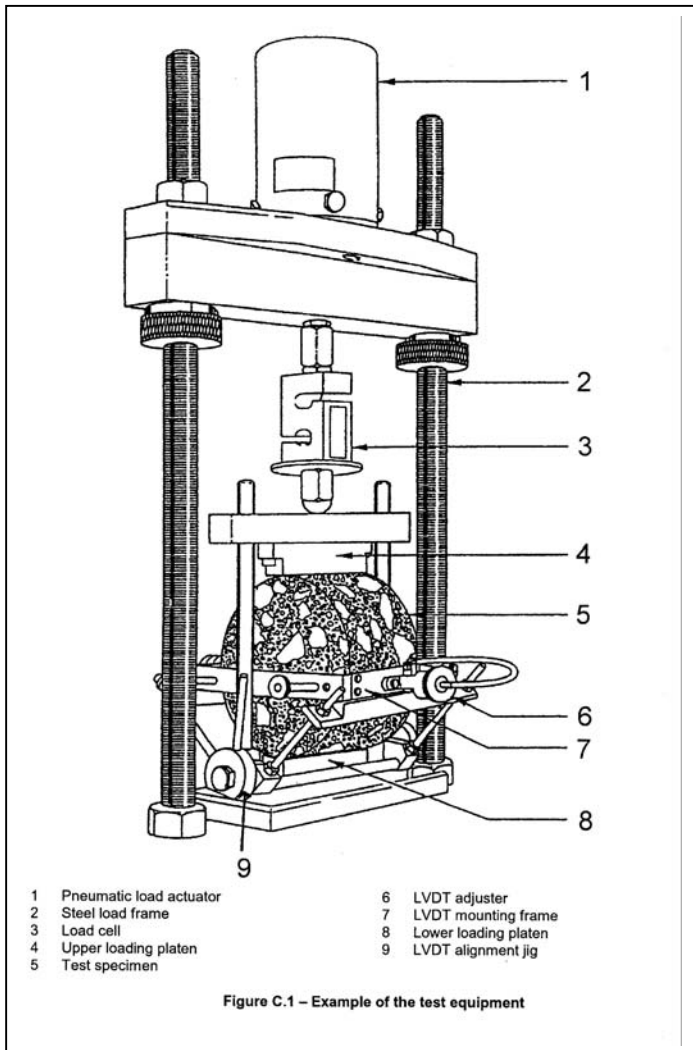
El equipo de ensayo utilizado para la determinación del Módulo Dinámico de las mezclas asfálticas corresponde al desarrollado por el Laboratorio Vial de Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE) de la Universidad del Rosario, Argentina, el cual está compuesto por<sup>1</sup>:

**[1] Un Sistema de Control y Aplicación de Carga**, constituido por un cilindro neumático alimentado por aire comprimido que funciona con un temporizador electrónico (timer) que permite seleccionar tiempos de carga-descarga variables desde 0,2 hasta 10 segundos. Dicho cilindro se está unido a un

---

<sup>1</sup> TOSTICARELLI, J.; MARTÍNEZ, F.; ANGELONE, S. RESISTENCIA A FATIGA DE MEZCLAS EN ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA. IMAE. UNIVERSIDAD DEL ROSARIO. ARGENTINA.

pórtico formado por perfiles metálicos en “U” anclado a una base de concreto tipo Portland (hormigón) que tiene fijado un pedestal de altura regulable.



La transmisión de carga se realiza a través de un vástago de acero que cuenta en un extremo con una celda electrónica de carga y un cabezal superior de carga. De igual forma el sistema cuenta con un cabezal inferior unido al pedestal de altura regulable mencionado anteriormente. La muestra o probeta se coloca perfectamente centrada entre ambos cabezales.

Fuente:: EUROPEAN COMITÉ FOR STANDARDISATION. CEN/TC 227 N 1009. ROAD MATERIALS BITUMINOUS MIXTURES. TEST METHODS FOR HOT MIX ASPHALT. PART 26: STIFFNESS. ANEXO C. INDIRECT TENSION TEST ON CYLINDRICAL SPECIMENS (IT-CY). (2003).

El tiempo de aplicación de la carga es controlado por un temporizador electrónico y el número de ciclos aplicados es registrado por un contador electrónico digital con capacidad de conteo de 10 millones de ciclos, el cual es capaz de retener en memoria, durante 48 horas, el número de ciclos para el cual se produce la falla.



EQUIPO LABORATORIO IMAE.  
UNIVERSIDAD DEL ROSARIO.

**[2] Un Sistema de Control y Registro de la Temperatura con Cámara de Ambiente Controlado**, necesario para mantener la temperatura constante durante todo el ensayo en el valor predeterminado, con variación no mayor de 1°C. La cámara se encuentra unida a un registrador de temperatura y a un sistema de regulación y control de temperatura o unidad frío-calor. El sistema cuenta con un sistema refrigerador -con el que se logran temperaturas menores que la temperatura ambiente- y con un sistema de calefacción con el que se aumenta la temperatura.

El sensor de temperatura es una termo-resistencia instalada en el interior de la cámara , la cual se encuentra conectada a un sistema de control y al registrador o potenciómetro.



**[3] Un Sistema de Procesamiento, Medición y Registro de los Parámetros Principales (cargas, números de ciclos, deformaciones).**



**EQUIPO LABORATORIO IMAE. UNIVERSIDAD DEL ROSARIO. ARGENTINA**

La señal enviada por la celda de carga es procesada por un puente extensométrico que permite derivarla a un registrador gráfico automático, con lo cual se logra el registro continuo

de la variación de la fuerza con respecto al tiempo.

Las deformaciones producidas en la muestra son medidas a través de dos transformadores diferenciales variables lineales (LVDT), que emite una señal eléctrica proporcional al desplazamiento el núcleo del transformador respecto al cuerpo del mismo (bobinas). La señal es procesada por el puente de medida que permite lecturas digitales o la derivación a un registrador gráfico, obteniéndose un registro continuo de la deformación respecto al tiempo.

Para precisar el comienzo de la fisuración, a la muestra se le aplica sobre ambas caras, una capa delgada de pintura conductora, a través de la cual se conecta el circuito de control de ciclos, así cuando aparece la primera fisura, el conteo de ciclos se interrumpe, conservándose en memoria el número de ciclos aplicados hasta ese momento.

### 3. Programa Experimental.

El tipo de ensayo empleado se basó en la técnica de Tensión Controlada, con un pulso de carga de 0,2 segundos para el período de carga-descarga y de 0,8 segundos para el período de reposo, resultando una frecuencia de 1 ciclo por segundo.

Fueron ensayados núcleos de pavimentos (core-drills) correspondientes a mezclas de concreto asfáltico procedentes de las Calicatas 04; 05 y 06. Cada uno de los testigos fue cortado con sierra y dividido en cada una de las carpetas que lo constituyen, denominándose “Rodamiento” a la carpeta superior, cuya superficie

externa sirve de rodamiento de los vehículos. Las carpetas por debajo de la de rodamiento fueron denominadas Base 1; Base 2; Base 3, estando la Base N°1 inmediatamente por debajo de la Capa de Rodamiento, la Base 2 por debajo de la Base 1 y así sucesivamente. Cada una de las carpetas que constituyen un core-drill fueron ensayadas.

TESTIGOS COMPLETOS CON CARPETAS ASFÁLTICAS IDENTIFICADAS CON LÍNEA BLANCA



CORTE CON SIERRA PARA SEPARACIÓN DE CARPETAS ASFÁLTICAS

En total fueron ejecutados trece (13) ensayos para la determinación de Módulos dinámicos de Mezclas asfálticas. Las muestras fueron identificadas como se indica a continuación:

TESTIGOS DIVIDIDOS EN LAS DIFERENTES CARPETAS ASFÁLTICAS QUE LOS COMPONEN



| UBICACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE MUESTRAS ENSAYADAS |                       |        |                       |   |                       |        |  |                       |        |
|--|-----------------------|--------|-----------------------|---|-----------------------|--------|--|-----------------------|--------|
| TESTIGO (CORE-DRILL) CERCANO A CALICATA 4        |                       |        |                       | TESTIGO (CORE-DRILL) CERCANO A CALICATA 5 |                       |        | TESTIGO (CORE-DRILL) CERCANO ACALICATA 6 |                       |        |
| RODAM.   | BASE 1 <sup>(1)</sup> | BASE 2 | BASE 3 <sup>(2)</sup> | RODAM                                     | BASE 1 <sup>(1)</sup> | BASE 2 | RODAM                                    | BASE 1 <sup>(1)</sup> | BASE 2 |
| C411   | C412 / C413           | C414   | C415                  | C511                                      | C512 / C513           | C514   | C611                                     | C612 / C613           | C614   |

RODAM.: CARPETA DE RODAMIENTO.

(1): LAS CAPAS *BASE 1* FUERON DIVIDIDAS EN DOS PARTES (MITADES) DEBIDO A SUS ALTURAS ENTRE 9 Y 10 CM.

(2) EL CORE-DRILL CERCANO A LA CALICATA 4 ES EL ÚNIC QUE PRESENTA *BASE 3*.

En el presente trabajo el Ensayo de Módulo Dinámico fue determinado bajo diferentes condiciones de temperatura asociadas a diferentes y frecuencias de carga, según se indica a continuación:

| TEMPERATURA<br>(°C) | FRECUENCIA DE<br>CARGA<br>(Hz.) |
|---------------------|---------------------------------|
| 10                  | 2,50                            |
|                     | 2,00                            |
|                     | 1,00                            |
|                     | 0,50                            |
|                     | 0,25                            |
| 25                  | 2,50                            |
|                     | 2,00                            |
|                     | 1,00                            |
|                     | 0,50                            |
|                     | 0,25                            |
| 40                  | 2,50                            |
|                     | 2,00                            |
|                     | 1,00                            |
|                     | 0,50                            |
|                     | 0,25                            |

En base a las diferentes condiciones de ensayo indicadas, fueron generadas Curvas Maestras para cada una de las carpetas que constituyen el core-drill, es decir, se obtuvieron las curvas que muestran la variación del Módulo Dinámico en Función de la Temperatura para frecuencias constantes de 0,05 Hz., 0,5 Hz.; 1 Hz. y 10 Hz. respectivamente.

#### **4. Resultados**

A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los casos descritos, pudiéndose apreciar para cada uno de los testigos de las capas asfálticas, sus respectivas Curvas Maestras representativas -que como se indicó- representan la variación del Módulo Dinámico con la temperatura para frecuencias de aplicación de cargas constantes de 0,05 Hz.; 0,5 Hz.; 1,0 Hz. y 10 Hz.

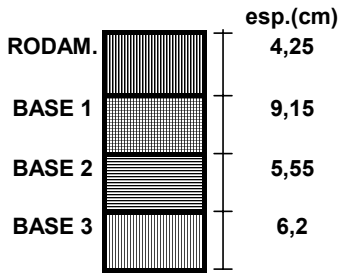
Las tablas incluida al final de este Anexo, presenta la estimación de los Módulos Dinámicos de las Mezclas Asfálticas de todas las calicatas, empleando las curvas maestras desarrolladas en la presente investigación y considerando un promedio de los módulos de las distintas mezclas de rodamiento y bases, en que fue dividido el espesor total de la capa asfáltica ensayada, considerando la variación de la temperatura de la mezcla a distintas profundidades, según el procedimiento del Instituto del Asfalto Americano, incluido en la serie de manuales No. 17.



## MODULO DINAMICO DE MEZCLA ASFALTICA. TESTIGO CALICATA No. 4

### PERFIL DEL TESTIGO C4

Fecha: 04-15-2004



|                                | RODAMIENTO | BASE 1  |         |         | BASE 2  | BASE 3 |
|--------------------------------|------------|---------|---------|---------|---------|--------|
|                                | C4-T1-1    | C4-T1-2 | C4-T1-3 | C4-T1-4 | C4-T1-5 |        |
| Densidad (gr/cm <sup>3</sup> ) | 2,461      | 2,418   | 2,456   | 2,449   | 2,390   |        |
| Altura(mm)                     | 46,50      | 42,50   | 40,50   | 48,25   | 46,00   |        |

TABLA 1

$$T(\text{frec. Cte.}) = (1/((1/Te)-k*\text{Ln}(10/(\text{Frecuencia-Hz}))))-273$$

$$E(\text{regres.}) = 10^{(c+b*\text{LOG}(\text{Frecuencia-Hz})+a*1/\text{Temp.}(\text{°K}))}$$

MODULOS DE LAS DISTINTAS PROBETAS (Mpa)

| TEMP. | FRECUENCIA | c411 | c412 | c413 | c414 | c415 |
|-------|------------|------|------|------|------|------|
| 10    | 2,50       | 6295 | 5696 | 7472 | 7199 | 7379 |
| 10    | 2,00       | 5471 | 5001 | 6743 | 6432 | 6947 |
| 10    | 1,00       | 4532 | 3908 | 5118 | 4793 | 5851 |
| 10    | 0,50       | 3392 | 2840 | -    | 3394 | 4685 |
| 10    | 0,25       | 2454 | 2009 | 2711 | 2364 | 3727 |
| 25    | 2,50       | 2099 | 1181 | 1084 | 1109 | 2913 |
| 25    | 2,00       | 1796 | 1003 | 970  | 1040 | 2710 |
| 25    | 1,00       | 1328 | 670  | 778  | 873  | 2180 |
| 25    | 0,50       | 948  | 544  | 572  | 658  | 1676 |
| 25    | 0,25       | 663  | 359  | 390  | 490  | 1363 |
| 40    | 2,50       | 618  | 322  | 497  | 428  | 1883 |
| 40    | 2,00       | 540  | 294  | 437  | 414  | 1768 |
| 40    | 1,00       | 400  | 284  | 321  | 329  | 1339 |
| 40    | 0,50       | 319  | 220  | 250  | 255  | 1147 |
| 40    | 0,25       | 283  | 172  | 184  | 195  | 871  |

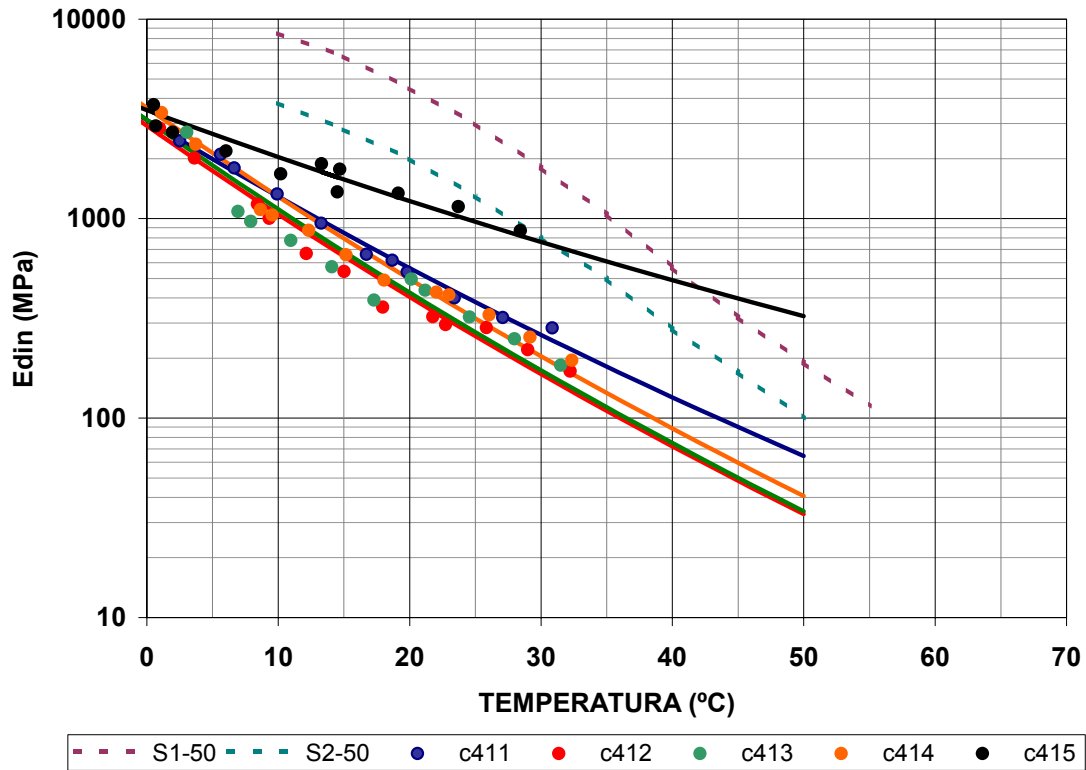
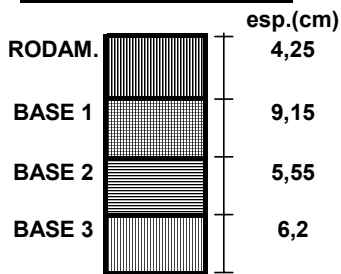


FIGURA 1. CURVA MAESTRA PARA UNA FRECUENCIA DE 0,05 Hz.

## MODULO DINAMICO DE MEZCLA ASFALTICA. TESTIGO CALICATA No. 4

### PERFIL DEL TESTIGO C4

Fecha: 04-15-2004



|                                | RODAMIENTO | BASE 1  |         |         | BASE 2  | BASE 3 |
|--------------------------------|------------|---------|---------|---------|---------|--------|
|                                | C4-T1-1    | C4-T1-2 | C4-T1-3 | C4-T1-4 | C4-T1-5 |        |
| Densidad (gr/cm <sup>3</sup> ) | 2,461      | 2,418   | 2,456   | 2,449   | 2,390   |        |
| Altura(mm)                     | 46,50      | 42,50   | 40,50   | 48,25   | 46,00   |        |

TABLA 1

$$T(\text{frec. Cte.}) = (1/((1/Te)-k*\text{Ln}(10/(\text{Frecuencia-Hz}))))-273$$

$$E(\text{regres.}) = 10^{(c+b*\text{LOG}(\text{Frecuencia-Hz})+a*1/\text{Temp.}(\text{°K}))}$$

MODULOS DE LAS DISTINTAS PROBETAS (Mpa)

| TEMP. | FRECUENCIA | c411 | c412 | c413 | c414 | c415 |
|-------|------------|------|------|------|------|------|
| 10    | 2,50       | 6295 | 5696 | 7472 | 7199 | 7379 |
| 10    | 2,00       | 5471 | 5001 | 6743 | 6432 | 6947 |
| 10    | 1,00       | 4532 | 3908 | 5118 | 4793 | 5851 |
| 10    | 0,50       | 3392 | 2840 | -    | 3394 | 4685 |
| 10    | 0,25       | 2454 | 2009 | 2711 | 2364 | 3727 |
| 25    | 2,50       | 2099 | 1181 | 1084 | 1109 | 2913 |
| 25    | 2,00       | 1796 | 1003 | 970  | 1040 | 2710 |
| 25    | 1,00       | 1328 | 670  | 778  | 873  | 2180 |
| 25    | 0,50       | 948  | 544  | 572  | 658  | 1676 |
| 25    | 0,25       | 663  | 359  | 390  | 490  | 1363 |
| 40    | 2,50       | 618  | 322  | 497  | 428  | 1883 |
| 40    | 2,00       | 540  | 294  | 437  | 414  | 1768 |
| 40    | 1,00       | 400  | 284  | 321  | 329  | 1339 |
| 40    | 0,50       | 319  | 220  | 250  | 255  | 1147 |
| 40    | 0,25       | 283  | 172  | 184  | 195  | 871  |

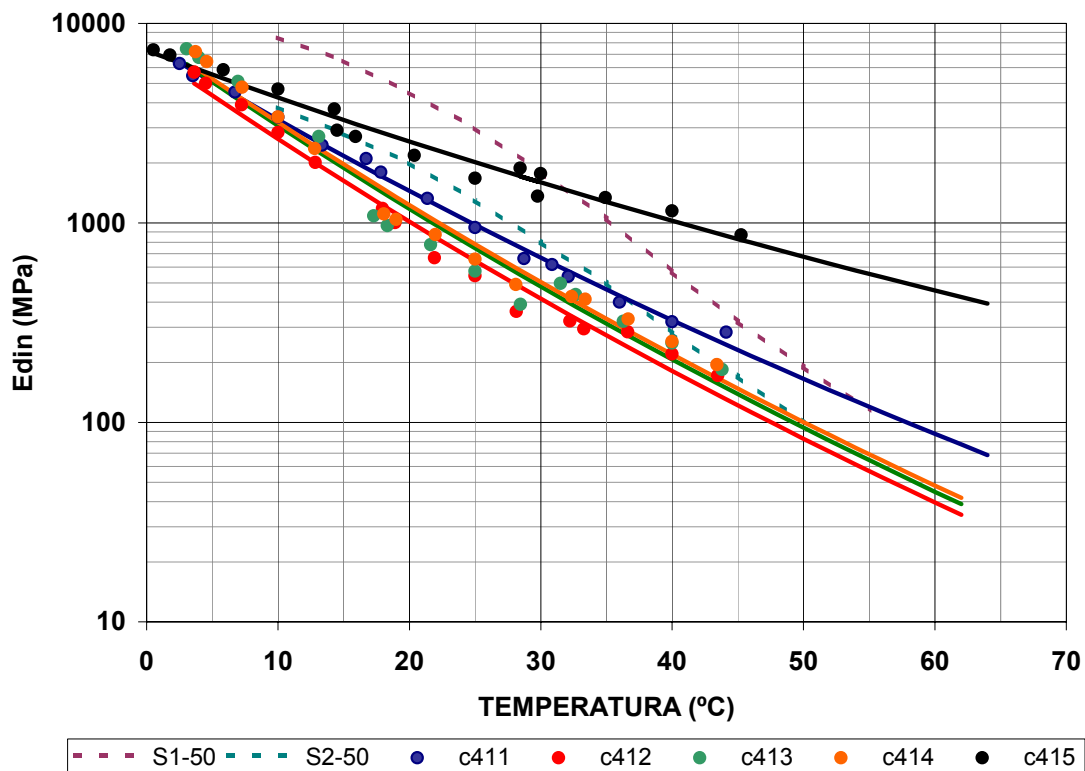


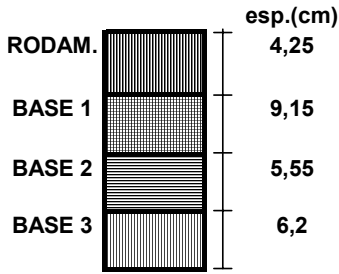
FIGURA 1. CURVA MAESTRA PARA UNA FRECUENCIA DE 0,5 Hz.



## MODULO DINAMICO DE MEZCLA ASFALTICA. TESTIGO CALICATA No. 4

### PERFIL DEL TESTIGO C4

Fecha: 04-15-2004



|                                | RODAMIENTO | BASE 1  |         |         | BASE 2  | BASE 3 |
|--------------------------------|------------|---------|---------|---------|---------|--------|
|                                | C4-T1-1    | C4-T1-2 | C4-T1-3 | C4-T1-4 | C4-T1-5 |        |
| Densidad (gr/cm <sup>3</sup> ) | 2,461      | 2,418   | 2,456   | 2,449   | 2,390   |        |
| Altura(mm)                     | 46,50      | 42,50   | 40,50   | 48,25   | 46,00   |        |

TABLA 1

$$T(\text{frec. Cte.}) = (1/((1/Te)-k*\ln(10/(\text{Frecuencia-Hz}))))-273$$

$$E(\text{regres.}) = 10^{(c+b*\text{LOG}(\text{Frecuencia-Hz})+a*1/\text{Temp.} (^{\circ}\text{K}))}$$

| MODULOS DE LAS DISTINTAS PROBETAS (Mpa) |            |      |      |      |      |      |
|---|------------|------|------|------|------|------|
| TEMP.                                   | FRECUENCIA | c411 | c412 | c413 | c414 | c415 |
| 10                                      | 2,50       | 6295 | 5696 | 7472 | 7199 | 7379 |
| 10                                      | 2,00       | 5471 | 5001 | 6743 | 6432 | 6947 |
| 10                                      | 1,00       | 4532 | 3908 | 5118 | 4793 | 5851 |
| 10                                      | 0,50       | 3392 | 2840 | -    | 3394 | 4685 |
| 10                                      | 0,25       | 2454 | 2009 | 2711 | 2364 | 3727 |
| 25                                      | 2,50       | 2099 | 1181 | 1084 | 1109 | 2913 |
| 25                                      | 2,00       | 1796 | 1003 | 970  | 1040 | 2710 |
| 25                                      | 1,00       | 1328 | 670  | 778  | 873  | 2180 |
| 25                                      | 0,50       | 948  | 544  | 572  | 658  | 1676 |
| 25                                      | 0,25       | 663  | 359  | 390  | 490  | 1363 |
| 40                                      | 2,50       | 618  | 322  | 497  | 428  | 1883 |
| 40                                      | 2,00       | 540  | 294  | 437  | 414  | 1768 |
| 40                                      | 1,00       | 400  | 284  | 321  | 329  | 1339 |
| 40                                      | 0,50       | 319  | 220  | 250  | 255  | 1147 |
| 40                                      | 0,25       | 283  | 172  | 184  | 195  | 871  |

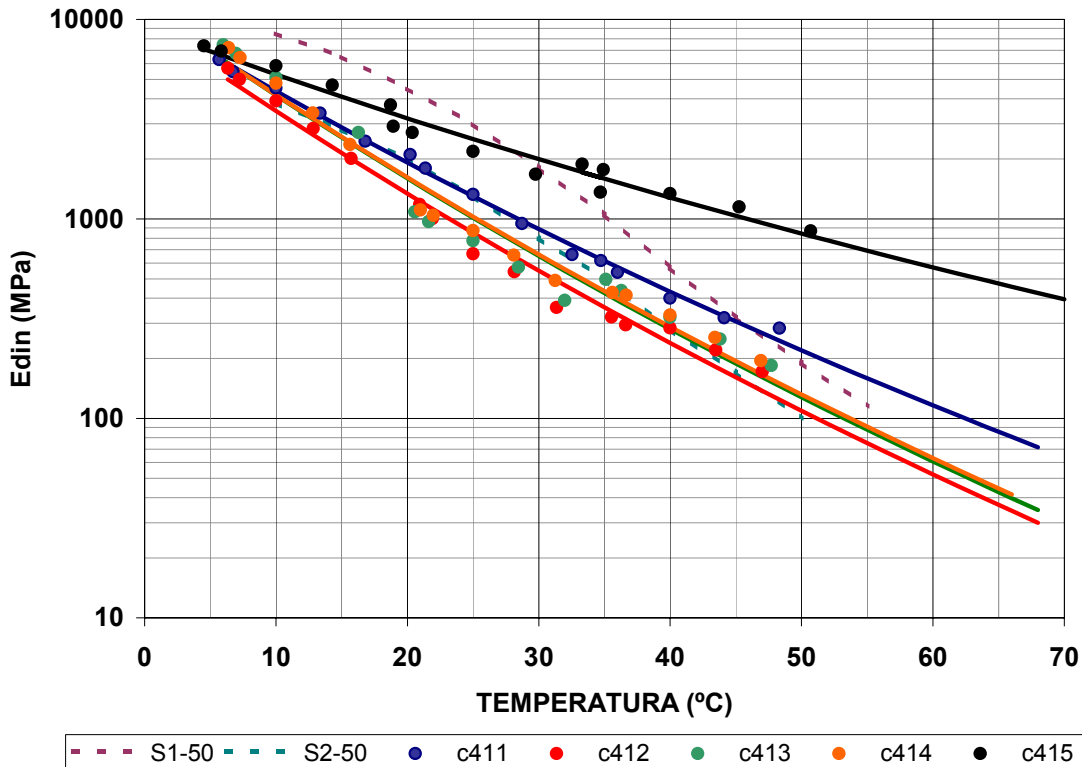


FIGURA 1. CURVA MAESTRA PARA UNA FRECUENCIA DE 1 Hz.

ESTIMACION DE MÓDULOS DINÁMICOS

| CALICATA | CORE-DRILL            |           |          | PROF. "21" DESDE LA SUP. HASTA 1/2 ESPESOR DE CADA CARPETA |        | PROF. "22" DESDE LA SUP. HASTA EL FONDO DE CADA CARPETA |        | CORRECCIÓN A 20°C (Temp. y Espesor según FIBRETE. VER GENERAL INSTRUC. FIBROSA.2017) |               |                            |                            | TESTIGO | DE             | E (Mpa)    |                    |            |            |     |          |          |            |     |          |          |            |      |          |          |       |      |          |          |      |      |  |
|----------|-----------------------|-----------|----------|--|--------|---|--------|--|---------------|----------------------------|----------------------------|---------|----------------|------------|--------------------|------------|------------|-----|----------|----------|------------|-----|----------|----------|------------|------|----------|----------|-------|------|----------|----------|------|------|--|
|          | ESPELOR CARPETA (cm.) |           |          | cm.  | P.V.C. | cm.   | P.V.C. | TEMPERATURA (°C)   |               |                            |                            |         |                | FRECUENCIA | PROMEDIO           |            | FRECUENCIA |     | PROMEDIO |          | FRECUENCIA |     | PROMEDIO |          | FRECUENCIA |      | PROMEDIO |          |       |      |          |          |      |      |  |
|          | TESTIGO 1             | TESTIGO 2 | PROMEDIO |  |        |   |        | ARIZ (°)   | ± SUP. P.V.C. | CORRECC. A 20°C FONDO "21" | CORRECC. A 20°C FONDO "22" |         |                |            | PROMEDIO DE 4 P.P. | REFERENCIA | 0,05       |     | TESTIGOS | PONERADO | 0,50       |     | TESTIGOS | PONERADO | 1,00       |      | TESTIGOS | PONERADO | 10,00 |      | TESTIGOS | PONERADO |      |      |  |
|          |                       |           |          |  |        |   |        |  |               |                            |                            |         |                |            |                    |            |            |     |          |          |            |     |          |          |            |      |          |          |       |      |          |          |      |      |  |
| 1 (*)    | 6,00                  | 5,70      | 5,85     | 2,93   | 1,15   | 5,85  | 2,30   |  |               |                            |                            |         |                |            |                    |            |            |     |          |          |            |     |          |          |            |      |          |          |       |      |          |          |      |      |  |
|          | 7,50                  | 7,50      | 7,50     | 9,80   | 3,78   | 13,35   | 5,20   | 26   | 44            | 32,50                      | 30,00                      | 35,50   | e411           |            |                    |            |            |     |          |          |            |     |          |          |            |      |          |          |       |      |          |          |      |      |  |
|          | 7,50                  | 7,80      | 7,65     | 17,10  | 6,76   | 21,00   | 0,27   |  |               | 28,00                      | 25,00                      | 32,33   | c412 c413 c414 | 137        | 142                | 171        | 150        | 358 | 343      | 391      | 419        | 305 | 797      | 453      | 530        | 549  | 511      | 1016     | 1130  | 1400 | 1349     | 1316     | 2290 |      |  |
| 2 (*)    | 4,20                  | 4,00      | 4,10     | 2,05   | 0,81   | 4,10  | 1,81   |  |               | 30,80                      | 28,00                      | 33,67   | e411           |            |                    |            |            |     |          |          |            |     |          |          |            |      |          |          |       |      |          |          |      |      |  |
|          | 6,70                  | 6,80      | 6,75     | 7,40   | 2,94   | 10,85   | 4,27   | 25   | 43            | 29,00                      | 25,00                      | 32,33   | c412 c413 c414 | 137        | 142                | 171        | 150        | 444 | 343      | 391      | 419        | 305 | 970      | 453      | 530        | 549  | 511      | 1229     | 1130  | 1400 | 1349     | 1316     | 2714 |      |  |
|          | 9,60                  | 9,70      | 9,65     | 15,80  | 6,17   | 20,50   | 0,07   |  |               | 25,00                      | 22,50                      | 30,17   | e415           |            |                    |            |            |     |          |          |            |     |          |          |            |      |          |          |       |      |          |          |      |      |  |
| 3 (*)    | 4,80                  | 5,00      | 4,90     | 2,45   | 0,96   | 4,90  | 1,93   |  |               | 32,50                      | 30,00                      | 35,50   | e411           |            |                    |            |            |     |          |          |            |     |          |          |            |      |          |          |       |      |          |          |      |      |  |
|          | 12,90                 | 13,90     | 13,40    | 11,80  | 4,57   | 10,30   | 7,20   | 26   | 44            | 26,00                      | 22,50                      | 30,83   | c412 c413 c414 | 155        | 161                | 194        | 170        | 256 | 390      | 445      | 470        | 437 | 604      | 515      | 603        | 624  | 591      | 784      | 1294  | 1691 | 1532     | 1496     | 1878 |      |  |
|          | 3,80                  | 2,50      | 3,15     | 19,80  | 7,82   | 21,45   | 8,44   |  |               | 25,00                      | 22,00                      | 30,33   | e415           |            |                    |            |            |     |          |          |            |     |          |          |            |      |          |          |       |      |          |          |      |      |  |
| 4        | 4,25                  | 3,80      | 3,93     | 1,96   | 0,77   | 3,93  | 1,55   |  |               | 32,50                      | 30,00                      | 35,17   | e411           |            |                    |            |            |     |          |          |            |     |          |          |            |      |          |          |       |      |          |          |      |      |  |
|          | 14,70                 | 15,00     | 14,85    | 11,25  | 4,47   | 10,70   | 7,39   | 26   | 43            | 26,00                      | 25,00                      | 31,33   | c412 c413 c414 | 149        | 155                | 188        | 163        | 317 | 374      | 426      | 456        | 419 | 721      | 493      | 570        | 590  | 556      | 925      | 1240  | 1591 | 1460     | 1433     | 2134 |      |  |
|          | 6,75                  | 6,75      | 6,75     | 22,15  | 8,72   | 25,53   | 10,05  |  |               | 25,00                      | 24,00                      | 30,67   | e415           |            |                    |            |            |     |          |          |            |     |          |          |            |      |          |          |       |      |          |          |      |      |  |
| 5        | 4,95                  | 5,30      | 5,13     | 2,56   | 1,01   | 5,13  | 2,02   |  |               | 34,00                      | 27,50                      | 35,83   | e511           |            |                    |            |            |     |          |          |            |     |          |          |            |      |          |          |       |      |          |          |      |      |  |
|          | 9,65                  | 9,60      | 9,63     | 9,94   | 3,91   | 14,75   | 5,81   | 25   | 46            | 29,00                      | 25,00                      | 33,33   | c512 c513      | -          | 239                | 171        | -          | 205 | 317      | 560      | 429        | -   | 494      | 736      | 724        | 568  | -        | 645      | 951   | 1697 | 1421     | -        | 1559 | 2242 |  |
|          | 6,40                  | 6,00      | 6,20     | 17,85  | 7,83   | 20,95   | 8,25   |  |               | 26,00                      | 25,00                      | 32,33   | e514           |            |                    |            |            |     |          |          |            |     |          |          |            |      |          |          |       |      |          |          |      |      |  |
| 6        | 2,90                  | 2,80      | 2,85     | 1,43   | 0,56   | 2,85  | 1,12   |  |               | 34,00                      | 30,00                      | 36,67   | e611           |            |                    |            |            |     |          |          |            |     |          |          |            |      |          |          |       |      |          |          |      |      |  |
|          | 9,75                  | 11,00     | 10,30    | 8,04   | 3,16   | 13,23   | 5,21   | 25   | 46            | 30,00                      | 26,00                      | 34,00   | c612 c613      | -          | 400                | 400        | -          | 400 | 392      | 1020     | 960        | -   | 994      | 998      | 1305       | 1249 | -        | 1307     | 1323  | 3509 | 2997     | -        | 3253 | 3374 |  |
|          | 5,05                  | 4,10      | 4,50     | 15,51  | 6,11   | 17,80   | 7,01   |  |               | 29,00                      | 26,00                      | 33,67   | e614           |            |                    |            |            |     |          |          |            |     |          |          |            |      |          |          |       |      |          |          |      |      |  |
| 7 (**)   | 3,20                  | 3,60      | 3,40     | 1,70   | 0,67   | 3,40  | 1,34   |  |               | 35,00                      | 34,00                      | 38,67   | e511           |            |                    |            |            |     |          |          |            |     |          |          |            |      |          |          |       |      |          |          |      |      |  |
|          | 11,20                 | 10,90     | 11,05    | 8,93   | 3,51   | 14,45   | 5,69   | 26   | 47            | 29,00                      | 26,00                      | 34,00   | c512 c513      | -          | 220                | 161        | -          | 195 | 260      | 525      | 405        | -   | 470      | 615      | 691        | 534  | -        | 613      | 799   | 1620 | 1341     | -        | 1491 | 1916 |  |
|          | 5,10                  | 5,00      | 5,05     | 16,90  | 6,68   | 19,50   | 7,88   |  |               | 26,00                      | 25,50                      | 32,83   | e514           |            |                    |            |            |     |          |          |            |     |          |          |            |      |          |          |       |      |          |          |      |      |  |
| 8 (**)   | 3,60                  | 4,00      | 3,80     | 1,90   | 0,75   | 3,80  | 1,50   |  |               | 35,00                      | 34,00                      | 38,67   | e511           |            |                    |            |            |     |          |          |            |     |          |          |            |      |          |          |       |      |          |          |      |      |  |
|          | 10,90                 | 9,30      | 10,10    | 8,85   | 3,48   | 13,90   | 5,47   | 26   | 47            | 29,00                      | 26,00                      | 34,00   | c512 c513      | -          | 228                | 161        | -          | 195 | 260      | 525      | 405        | -   | 470      | 632      | 691        | 534  | -        | 613      | 819   | 1620 | 1341     | -        | 1491 | 1949 |  |
|          | 5,00                  | 4,30      | 4,65     | 16,23  | 6,39   | 18,55   | 7,30   |  |               | 26,00                      | 25,50                      | 32,83   | e514           |            |                    |            |            |     |          |          |            |     |          |          |            |      |          |          |       |      |          |          |      |      |  |
| 9 (**)   | 4,20                  | 3,20      | 3,70     | 1,85   | 0,73   | 3,70  | 1,46   |  |               | 35,00                      | 34,00                      | 38,00   | e511           |            |                    |            |            |     |          |          |            |     |          |          |            |      |          |          |       |      |          |          |      |      |  |
|          | 6,70                  | 7,60      | 7,15     | 7,20   | 2,86   | 10,85   | 4,27   | 27   | 48            | 34,00                      | 30,00                      | 37,33   | c512 c513      | -          | 102                | 121        | -          | 151 | 251      | 426      | 304        | -   | 365      | 588      | 550        | 402  | -        | 476      | 762   | 1290 | 1009     | -        | 1149 | 1817 |  |
|          | 5,50                  | 5,50      | 5,50     | 13,00  | 5,35   | 16,35   | 6,44   |  |               | 29,00                      | 25,00                      | 34,00   | e514           |            |                    |            |            |     |          |          |            |     |          |          |            |      |          |          |       |      |          |          |      |      |  |
| 7 (***)  | 3,20                  | 3,60      | 3,40     | 1,70   | 0,67   | 3,40  | 1,34   |  |               | 35,00                      | 34,00                      | 38,67   | e611           |            |                    |            |            |     |          |          |            |     |          |          |            |      |          |          |       |      |          |          |      |      |  |
|          | 11,20                 | 10,90     | 11,05    | 8,93   | 3,51   | 11,05   | 4,35   | 26   | 47            | 29,00                      | 26,00                      | 34,00   | c612 c613      | -          | 400                | 400        | -          | 400 | 389      | 1020     | 960        | -   | 994      | 992      | 1305       | 1249 | -        | 1307     | 1315  | 3509 | 2997     | -        | 3253 | 3358 |  |
|          | 5,10                  | 5,00      | 5,05     | 16,90  | 6,68   | 19,50   | 7,99   |  |               | 26,00                      | 25,50                      | 32,83   | e614           |            |                    |            |            |     |          |          |            |     |          |          |            |      |          |          |       |      |          |          |      |      |  |
| 8 (***)  | 3,60                  | 4,00      | 3,80     | 1,90   | 0,75   | 3,80  | 1,50   |  |               | 35,00                      | 34,00                      | 38,67   | e611           |            |                    |            |            |     |          |          |            |     |          |          |            |      |          |          |       |      |          |          |      |      |  |
|          | 10,90                 | 9,30      | 10,10    | 8,85   | 3,48   | 10,10   | 3,90   | 26   | 47            | 29,00                      | 26,00                      | 34,00   | c612 c613      | -          | 400                | 400        | -          | 400 | 391      | 1020     | 960        | -   | 994      | 996      | 1305       | 1249 | -        | 1307     | 1321  | 3509 | 2997     | -        | 3253 | 3373 |  |
|          | 5,00                  | 4,30      | 4,65     | 16,23  | 6,39   | 18,55   | 7,83   |  |               | 26,00                      | 25,50                      | 32,83   | e614           |            |                    |            |            |     |          |          |            |     |          |          |            |      |          |          |       |      |          |          |      |      |  |
| 9 (***)  | 4,20                  | 3,20      | 3,70     | 1,85   | 0,73   | 3,70  | 1,46   |  |               | 35,00                      | 34,00                      | 38,00   | e611           |            |                    |            |            |     |          |          |            |     |          |          |            |      |          |          |       |      |          |          |      |      |  |
|          | 6,70                  | 7,60      | 7,15     | 7,20   | 2,86   | 7,15  | 2,81   | 27   | 48            | 34,00                      | 30,00                      | 37,33   | c612 c613      | -          | 320                | 330        | -          | 329 | 346      | 943      | 791        | -   | 817      | 889      | 1120       | 1029 | -        | 1074     | 1182  | 2079 | 2460     | -        | 2674 | 3047 |  |
|          | 5,50                  | 5,50      | 5,50     | 13,60  | 5,35   | 15,50   | 2,17   |  |               | 29,00                      | 25,00                      | 34,00   | e614           |            |                    |            |            |     |          |          |            |     |          |          |            |      |          |          |       |      |          |          |      |      |  |

(\*) "E" ESTIMADO EN BASE A ENSAYO DE CALICATA 4 (\*\*) "E" ESTIMADO EN BASE A ENSAYO DE CALICATA 5 (\*\*\*) "E" ESTIMADO EN BASE A ENSAYO DE CALICATA 6 (1) SE UTILIZO LA TEMPERATURA DEL AIRE CORRESPONDIENTE AL DIA DE TRABAJO (NO SE USO EL PROMEDIO DE 5 DIAS ANTES DEL DIA DE LA MEDICION DE DEFLACIONES)

| MÓDULOS DINÁMICOS "E" (Mpa) - RESUMEN C1, C2 Y C3 |          |         |        |       |      |
|---|----------|---------|--------|-------|------|
| CALICATA  | REF.     | 0,05 Hz | 0,5 Hz | 10 Hz |      |
| 7   | C5       | 280     | 815    | 789   | 1916 |
|   | C6       | 380     | 992    | 1315  | 3358 |
|   | PROMEDIO | 325     | 804    | 1057  | 2637 |
| 8   | C5       | 309     | 632    | 819   | 1949 |
|   | C6       | 391     | 898    | 1321  | 3373 |
|   | PROMEDIO | 330     | 814    | 1070  | 2661 |
| 9   | C5       | 251     | 588    | 762   | 1817 |
|   | C6       | 346     | 889    | 1102  | 3047 |
|   | PROMEDIO | 298     | 739    | 972   | 2432 |

| core-drill |                               |
|------------|-------------------------------|
| o          | Z1 (carpeta 1) Z2 (carpeta 1) |
| o          | Z1 (carpeta 2) Z2 (carpeta 2) |
| o          | Z1 (carpeta 3) Z2 (carpeta 3) |

**ENSAYO DE EXTRACCIÓN PARA  
LA DETERMINACIÓN DEL  
CONTENIDO DE LIGANTE Y  
GRANULOMETRÍA**

# **ENSAYOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE LIGANTE ASFÁLTICO EN MEZCLAS DE PAVIMENTACIÓN POR MEDIO DE LA CENTRÍFUGA (ENSAYO DE EXTRACCIÓN) Y GRANULOMETRÍA DESPUÉS DE ELIMINAR EL LIGANTE ASFÁLTICO**

*El trabajo de laboratorio que se presenta a continuación fue realizado en el Laboratorio de Pavimentos e Ingeniería Vial -LAPIV- de la Universidad Nacional de la Plata, Argentina.*

## **1. Introducción**

El presente anexo incluye los resultados del Ensayo para la determinación de del Contenido de Ligante asfáltico en mezclas de pavimentación por medio de centrífuga, utilizando un solvente frío. Del mismo modo se incluyen las granulometrías de las muestras una vez retirado el ligante asfáltico de las mismas.

## **2. Programa Experimental**

Las muestras ensayadas corresponden a testigos de las capas asfálticas (core-drills) procedentes de la Ruta 6 de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

El ligante asfáltico fue removido con rotovapor (centrífuga) utilizando como solvente Diclorometano analítico.

Fueron realizados nueve (09) ensayos de extracción de ligante y sus respectivas granulometrías una vez retirado el ligante de las muestras.

La tabla 1 identifica las muestras analizadas y las asocia con la calicata mas cercana.

## **3. Resultados**

A continuación se presentan los resultados obtenidos mediante la ejecución del ensayo de extracción de ligante y granulometría de los testigos de capas asfálticas.

**TABLA 1.**  
**UBICACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE MUESTRAS ENSAYADAS**

| <b>TESTIGO (CORE-DRILL) CERCANO A CALICATA 4</b> |                                    |               | <b>TESTIGO (CORE-DRILL) CERCANO A CALICATA 5</b> |                 |                                    | <b>TESTIGO (CORE-DRILL) CERCANO A CALICATA 6</b> |               |                             |               |
|--|------------------------------------|---------------|--|-----------------|------------------------------------|--|---------------|-----------------------------|---------------|
| <b>RODAM.</b>                                    | <b>BASE 1<sup>(1)</sup></b>        | <b>BASE 2</b> | <b>BASE 3<sup>(2)</sup></b>                      | <b>RODAM.</b>   | <b>BASE 1<sup>(1)</sup></b>        | <b>BASE 2</b>                                    | <b>RODAM.</b> | <b>BASE 1<sup>(1)</sup></b> | <b>BASE 2</b> |
| NO FUE ENSAYADO                                  | C413<br>(SÓLO SE ENSAYO UNA MITAD) | C414          | C415   | NO FUE ENSAYADO | C513<br>(SÓLO SE ENSAYO UNA MITAD) | C514   | C611          | C612 / C613                 | C614          |

RODAM.: CARPETA DE RODAMIENTO.  
(1): LAS CAPAS *BASE 1* FUERON DIVIDIDAS EN DOS PARTES (SUB-MUESTRAS) DEBIDO A SUS ALTURAS ENTRE 9 Y 10 CM.  
(2) EL CORE-DRILL CERCANO A LA CALICATA 4 ES EL ÚNIC QUE PRESENTA *BASE 3*.

Granulometría de las muestras analizadas

|      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| C413 | C414 | C415 | C513 | C514 | C611 | C612 | C613 | C614 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|

|       |        |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-------|--------|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Tamíz | % Pasa |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-------|--------|--|--|--|--|--|--|--|--|

|       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1"    | 94,8 | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| 3/4"  | 73,9 | 100  | 95,9 | 90,2 | 100  | 100  | 96,7 | 84,5 | 100  |
| 1/2"  | 58,4 | 89,6 | 86,5 | 72,1 | 94,4 | 86,3 | 81   | 75,3 | 94,3 |
| 3/8"  | 52,6 | 70,8 | 68,6 | 65,5 | 83,7 | 74,5 | 72,7 | 70,8 | 83,2 |
| Nº4   | 44   | 54,7 | 58   | 54,9 | 65,2 | 59,5 | 54,8 | 56,5 | 65,7 |
| Nº8   | 34,7 | 44,8 | 41,8 | 44,7 | 53,2 | 45,6 | 43,2 | 44,7 | 52,9 |
| Nº30  | 22,5 | 28,9 | 32,3 | 28,7 | 35,4 | 27,8 | 27,8 | 30,1 | 35,1 |
| Nº50  | 16   | 22,2 | 15,9 | 21,3 | 26,6 | 21,3 | 20,6 | 21   | 25,5 |
| Nº100 | 7,8  | 11,5 | 12,3 | 12,8 | 17,3 | 13,5 | 11,7 | 11,3 | 16,5 |
| Nº200 | 5,1  | 7,7  | 10,7 | 9,6  | 12,8 | 9,2  | 7,9  | 7,7  | 12,4 |

|        |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| % C.A. | 4,2 | 5,6 | 5,4 | 4,9 | 5,1 | 5,1 | 4,8 | 4,9 | 5,3 |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|

## **ANEXO B**

**PROGRAMA KENLAYER.  
ING. YANG HUANG. UNIVERSIDAD  
DE KENTUCKY.  
U.S.A, 1993**

## **PROGRAMA KENLAYER. UNIVERSIDAD DE KENTUCKY.**

**ING. YANG H. HUANG. U.S.A. 1993.**

### **1. Introducción**

El programa KENLAYER fue desarrollado por el Ing. Yang H. Huang de la Universidad de Kentucky de Estados Unidos en el año 1993. El mismo es un programa de computadora que puede ser aplicado para el análisis estructural de pavimentos flexibles.

La característica principal del programa KENLAYER la representa su posibilidad de realizar el análisis de sistemas elásticos multicapas solicitados por una carga circular. Dicho análisis puede ser ejecutado considerando ejes de vehículos sencillos, dobles o triples, tanto en forma individual como superpuestas, y el comportamiento estructural del pavimento puede ser analizado en cada una de las capas que conforman la estructura de pavimento.

Por otro lado el programa permite realizar el análisis considerando el comportamiento del pavimento, tanto lineal como no lineal, lo cual lo convierte en un programa muy versátil en el momento de modelar el comportamiento del pavimento.

En definitiva el programa centra su análisis en la estimación del esfuerzo en la masa del suelo debido al paso de los vehículos y al peso propio de la estructura de pavimento. Esta información es muy valiosa al momento de estimar el Módulo Resiliente del material, ya que el ensayo de Módulo Resiliente de suelos produce una curva, caracterizada por las ecuaciones constitutivas, de variación del módulo con respecto a los esfuerzos a que está sometido el material.

A continuación se describen las principales características del programa.

### **2. Características Generales del Programa**

KENLAYER emplea el análisis lineal multicapas, en el cual cada uno de los materiales que conforman la estructura de pavimento presentan un espesor finito en dirección vertical a excepción de la última capa (sub-rasante), la cual tiene un espesor infinito y están caracterizados con un módulo de elasticidad ( $E_i$ ) y el

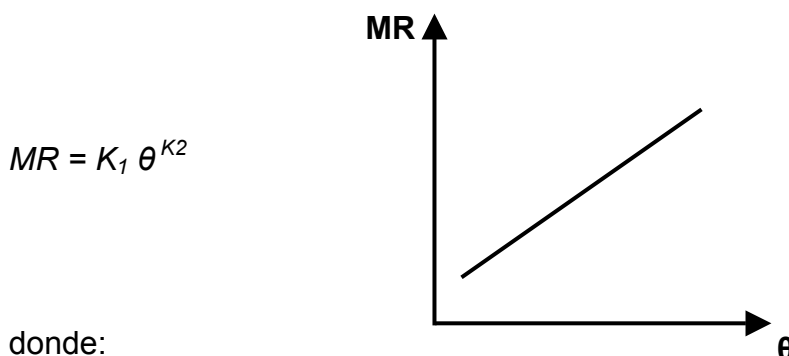


coeficiente de poisson ( $\nu$ ). Todas las capas en dirección horizontal tienen un espesor infinito. Las principales características del programa, relacionadas con la estimación de los esfuerzos en la masa del suelo, son las siguientes:

- Análisis de Sistema Elástico Multicapas, lo cual permite analizar pavimentos constituidos por varias capas, con diferentes módulos de elasticidad, espesores y relación de poisson.
- Permite analizar los esfuerzos debido a la superposición de los bulbos de presión de cargas múltiples impartidas por vehículos con ejes simples, dobles y triples. Este caso es una generalización del análisis de sistemas multicapas solicitadas por cargas impartidas por un eje sencillo.
- Análisis del comportamiento de los suelos considerando la variación de los módulos de elasticidad con el estado de esfuerzos. Esta es una característica muy importante del programa, en vista que -en general- los suelos varían su módulo resiliente con el estado de esfuerzos a que están sometidos.

En este sentido el programa presenta diferentes relaciones para suelos friccionales y suelos cohesivos. A continuación se indican las principales ecuaciones usadas en el programa:

A.- Suelos Friccionales:



MR: Módulo Resiliente.

$\Theta$  : Sumatoria de esfuerzos principales o primer invariante de esfuerzos.

$K_1$ ;  $K_2$ : Constantes experimentales que dependen de las características del suelo, densidad y humedad.

Como se puede observar los suelos friccionales muestran una variación del Módulo Resiliente en función del primer invariante de esfuerzos ( $\Theta$ ), siendo el mismo igual a la sumatoria de los esfuerzos principales ( $\sigma_1$ ;  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ ), incluyendo el peso de cada una de las capas que conforman la estructura de pavimento:

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \gamma z(1 + 2K_0)$$

Cabe destacar que,  $\gamma$  corresponde al promedio del peso unitario de cada capa,  $z$  es la distancia debajo de la superficie en la cual se desea determinar el módulo y  $K_0$  es el coeficiente de la presión lateral del suelo.

b.- Suelos Cohesivos:

$$MR = K_1 + K_3(K_2 - \sigma_d) \quad \text{para } \sigma_d < K_2$$

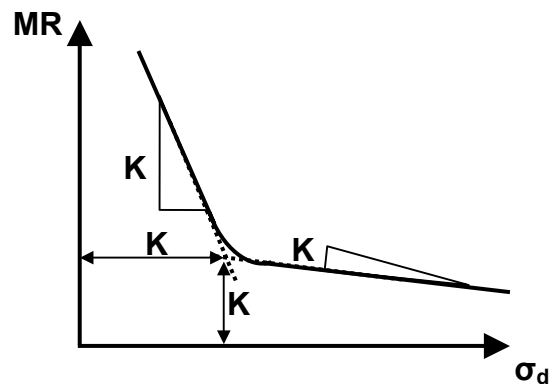
$$MR = K_1 - K_4(\sigma_d - K_2) \quad \text{para } \sigma_d > K_2$$

donde:

MR: Módulo Resiliente.

$\sigma_d$  : Esfuerzo desviador axial.

$K_1$ ;  $K_2$  ;  $K_3$  y  $K_4$ : Constantes experimentales que dependen de las características del suelo, densidad y humedad.



En lo que respecta a los suelos cohesivos, el Módulo Resiliente decrece en la medida que se incrementa el esfuerzo desviador ( $\sigma_d$ ). En el ensayo de laboratorio, por lo general,  $\sigma_2 = \sigma_3$ , por lo que el esfuerzo desviador se define como:

$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$$

En el ensayo de laboratorio es posible que  $\sigma_2$  no sea igual a  $\sigma_3$ , por lo que  $\sigma_3$  se considera como el promedio entre  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ .

En definitiva el esfuerzo desviador ( $\sigma_d$ ), considerando el peso de las diferentes capas que conforman la estructura del pavimento, queda expresado de la siguiente manera:

$$\sigma_d = \sigma_1 - 0.5(\sigma_2 + \sigma_3) + \gamma z(1-K_0)$$

- El programa estima el Módulo Resiliente de los distintos materiales, tanto friccionales como cohesivos, considerando las ecuaciones indicadas, calculando los esfuerzos en la masa del suelo para las distintas profundidades que desee el usuario. El punto para la determinación de los esfuerzos puede ser indicado en coordenadas radiales o en coordenadas cartesianas.
- Para la estimación del estado de esfuerzos y en definitiva el Módulo Resiliente, el programa opera con un proceso iterativo, en el cual se le introducen módulos iniciales de cada material (semillas) y los mismos son evaluados en la primera iteración, si existe una diferencia con la tolerancia previamente establecida, se cambian los módulos semillas por los anteriormente calculados y se repite nuevamente el procedimiento, hasta que el Módulo Resiliente converge con el valor anterior.

### **3. Aplicación del Programa KENLAYER para Estimar el Módulo de Sitio**

El programa fue empleado para estimar el Módulo Resiliente de Sitio de cada uno de los materiales que conforman la estructura del pavimento, incluyendo la subrasante, en las nueve (9) calicatas empleadas para la investigación. Dicho Módulo de Sitio se considera como el Módulo Resiliente Piloto o de Referencia.

Para ello se consideró el comportamiento no lineal de los materiales a través de las ecuaciones constitutivas definidas en el ensayo de laboratorio realizado, las cuales definen la variación del Módulo Resiliente con respecto al estado de esfuerzos a que está sometido el suelo y se empleó el programa KENLAYER con

al finalidad de definir los esfuerzos producidos tanto por el paso de los vehículos pesados como por el peso propio de la estructura de pavimento.

La modalidad que se empleó en el programa presenta las siguientes características:

- Análisis No Lineal Multicapa, considerando las ecuaciones constitutivas de todos los materiales.
- Carga circular de 40 KN, impartida por un eje sencillo con ruedas dobles.
- El estado de esfuerzos para la determinación del Módulo Resiliente de los materiales de base y/o sub-rasante se realizó en el punto medio de cada una de las capas.
- En el caso particular de la sub-rasante, el estado de esfuerzos se determinó a diferentes profundidades: 30 cm.; 50 cm.; 65 cm.; 85 cm. y 150 cm. y se consideró que el Módulo Resiliente de la sub-rasante mas representativo corresponde al obtenido a una profundidad de 50 cm., en vista que esta profundidad es la normalmente empleada para evaluar el comportamiento de la sub-rasante y propuesta por el Método AASHTO-93.
- En lo que respecta al Módulo Dinámico de las mezclas asfálticas, el mismo entró como un dato al programa KENLAYER, empleando el Módulo Dinámico obtenido de laboratorio para una frecuencia de aplicación de la carga de 10.0 Hz y una temperatura promedio de la capa asfáltica a distintas profundidades obtenidas por el procedimiento incluido en el Método de Diseño de Refuerzos desarrollado por el Instituto del Asfalto Americano.

La tabla que se incluye a continuación presenta un resumen de los parámetros de entrada empleados en el Programa KENLAYER.

**RESUMEN DE PARÁMETROS DE ENTRADA AL PROGRAMA KENLAYER**

| CAL.Nº  | CAPA    | ESP.(pulg.)-(cm) |      | Z (Pulg.) | DENS. (pci) | MÓDULOS (psi)  | CONSTANTES EN psi |                |                |                |                |
|---------|---------|------------------|------|-----------|-------------|----------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|         |         |                  |      |           |             | C(MOD.ASF-T2-) | K <sub>0</sub>    | K <sub>1</sub> | K <sub>2</sub> | K <sub>3</sub> | K <sub>4</sub> |
| 1       | C.A     | 8,3              | 21,0 | -         | 0,088       | 331.584        |                   |                |                |                |                |
|         | T.A.A   | 11,8             | 30,0 | -         | 0,076       | 165.792        |                   |                |                |                |                |
|         | M2      | 12,2             | 31,0 | 26,2      | 0,066       | 12.308         | 0,667             | 11.084         | 1,21           | 17.428         | 165            |
|         | SUB-RAS | 11,8             | 30,0 | 44,1      | 0,068       | 10.860         | 0,818             | 6.658          | 1,12           | 19.275         | 138            |
|         | SUB-RAS | 7,9              | 20,1 | 52,0      | 0,068       | 10.860         | 0,818             | 10.666         | 1,15           | 25.259         | 200            |
|         | SUB-RAS | 5,9              | 15,0 | 57,9      | 0,068       | 10.860         | 0,818             | 10.666         | 1,15           | 25.259         | 200            |
|         | SUB-RAS | 7,9              | 20,1 | 65,7      | 0,068       | 10.860         | 0,818             | 10.666         | 1,15           | 25.259         | 200            |
| SUB-RAS | 25,6    | 65,0             | 91,3 | 0,068     | 10.860      | 0,818          | 10.666            | 1,15           | 25.259         | 200            |                |
| 2       | C.A     | 8,1              | 20,5 | -         | 0,088       | 392.977        |                   |                |                |                |                |
|         | T.A.A   | 9,4              | 24,0 | -         | 0,076       | 196.489        |                   |                |                |                |                |
|         | M2      | 7,9              | 20,0 | 21,5      | 0,058       | 12.308         | 0,667             | 10.677         | 1,26           | 8.200          | 121            |
|         | M3      | 7,9              | 20,0 | 29,3      | 0,066       | 10.860         | 0,667             | 10.666         | 1,15           | 25.259         | 200            |
|         | SUB-RAS | 11,8             | 30,0 | 45,0      | 0,065       | 7.964          | 0,818             | 7.314          | 1,06           | 39.470         | 179            |
|         | SUB-RAS | 7,9              | 20,1 | 52,9      | 0,065       | 7.964          | 0,818             | 7.314          | 1,06           | 39.470         | 179            |
|         | SUB-RAS | 5,9              | 15,0 | 58,8      | 0,065       | 7.964          | 0,818             | 7.314          | 1,06           | 39.470         | 179            |
| SUB-RAS | 7,9     | 20,1             | 66,7 | 0,065     | 7.964       | 0,818          | 7.314             | 1,06           | 39.470         | 179            |                |
| SUB-RAS | 25,6    | 65,0             | 92,3 | 0,065     | 7.964       | 0,818          | 7.314             | 1,06           | 39.470         | 179            |                |
| 3       | C.A     | 8,5              | 21,5 | -         | 0,088       | 271.928        |                   |                |                |                |                |
|         | T.A.A   | 4,3              | 11,0 | -         | 0,076       | 135.964        |                   |                |                |                |                |
|         | M2      | 13,0             | 33,0 | 19,3      | 0,066       | 12.308         | 0,667             | 11.084         | 1,21           | 17.428         | 165            |
|         | SUB-RAS | 11,8             | 30,0 | 37,6      | 0,066       | 7.964          | 0,818             | 7.314          | 1,06           | 39.470         | 179            |
|         | SUB-RAS | 7,9              | 20,1 | 45,5      | 0,066       | 7.964          | 0,818             | 7.314          | 1,06           | 39.470         | 179            |
|         | SUB-RAS | 5,9              | 15,0 | 51,4      | 0,066       | 7.964          | 0,818             | 7.314          | 1,06           | 39.470         | 179            |
|         | SUB-RAS | 7,9              | 20,1 | 59,3      | 0,066       | 7.964          | 0,818             | 7.314          | 1,06           | 39.470         | 179            |
| SUB-RAS | 25,6    | 65,0             | 84,9 | 0,066     | 7.964       | 0,818          | 7.314             | 1,06           | 39.470         | 179            |                |
| 4       | C.A     | 10,1             | 25,7 | -         | 0,088       | 308.995        |                   |                |                |                |                |
|         | T.A.A   | 3,9              | 10,0 | -         | 0,076       | 154.498        |                   |                |                |                |                |
|         | M2      | 5,1              | 13,0 | 16,6      | 0,056       | 12.308         | 0,667             | 11.775         | 1,27           | 8.030          | 124            |
|         | M3      | 17,3             | 44,0 | 27,8      | 0,070       | 10.860         | 0,667             | 11.028         | 1,20           | 15.180         | 170            |
|         | SUB-RAS | 11,8             | 30,0 | 48,3      | 0,059       | 7.964          | 0,818             | 7.704          | 1,11           | 24.060         | 166            |
|         | SUB-RAS | 7,9              | 20,1 | 56,2      | 0,059       | 7.964          | 0,818             | 7.704          | 1,11           | 24.060         | 166            |
|         | SUB-RAS | 5,9              | 15,0 | 62,1      | 0,059       | 7.964          | 0,818             | 7.704          | 1,11           | 24.060         | 166            |
| SUB-RAS | 7,9     | 20,1             | 70,0 | 0,059     | 7.964       | 0,818          | 7.704             | 1,11           | 24.060         | 166            |                |
| SUB-RAS | 25,6    | 65,0             | 95,6 | 0,059     | 7.964       | 0,818          | 7.704             | 1,11           | 24.060         | 166            |                |
| 5       | C.A     | 8,3              | 21,0 | -         | 0,088       | 324.633        |                   |                |                |                |                |
|         | T.A.A   | 5,1              | 13,0 | -         | 0,076       | 162.317        |                   |                |                |                |                |
|         | M2      | 3,9              | 10,0 | 15,4      | 0,061       | 12.308         | 0,667             | 11.300         | 1,25           | 9.560          | 135            |
|         | M3      | 11,8             | 30,0 | 23,3      | 0,064       | 10.860         | 0,667             | 12.920         | 1,19           | 18.700         | 200            |
|         | SUB-RAS | 11,8             | 30,0 | 41,0      | 0,057       | 7.964          | 0,818             | 6.925          | 1,01           | 54.880         | 193            |
|         | SUB-RAS | 7,9              | 20,1 | 48,9      | 0,057       | 7.964          | 0,818             | 6.925          | 1,01           | 54.880         | 193            |
|         | SUB-RAS | 5,9              | 15,0 | 54,8      | 0,057       | 7.964          | 0,818             | 6.925          | 1,01           | 54.880         | 193            |
| SUB-RAS | 7,9     | 20,1             | 62,7 | 0,057     | 7.964       | 0,818          | 6.925             | 1,01           | 54.880         | 193            |                |
| SUB-RAS | 25,6    | 65,0             | 88,3 | 0,057     | 7.964       | 0,818          | 6.925             | 1,01           | 54.880         | 193            |                |
| 6       | C.A     | 7,0              | 17,8 | -         | 0,088       | 488.543        |                   |                |                |                |                |
|         | T.A.A   | 4,3              | 11,0 | -         | 0,076       | 244.272        |                   |                |                |                |                |
|         | M2      | 4,7              | 12,0 | 13,7      | 0,058       | 12.308         | 0,667             | 10.598         | 1,07           | 45.740         | 250            |
|         | M3      | 9,8              | 25,0 | 21,0      | 0,071       | 10.860         | 0,667             | 10.666         | 1,15           | 25.259         | 200            |
|         | SUB-RAS | 11,8             | 30,0 | 37,7      | 0,068       | 7.964          | 0,818             | 7.314          | 1,06           | 39.470         | 179            |
|         | SUB-RAS | 7,9              | 20,1 | 45,6      | 0,068       | 7.964          | 0,818             | 7.314          | 1,06           | 39.470         | 179            |
|         | SUB-RAS | 5,9              | 15,0 | 51,5      | 0,068       | 7.964          | 0,818             | 7.314          | 1,06           | 39.470         | 179            |
| SUB-RAS | 7,9     | 20,1             | 59,4 | 0,068     | 7.964       | 0,818          | 7.314             | 1,06           | 39.470         | 179            |                |
| SUB-RAS | 25,6    | 65,0             | 85,0 | 0,068     | 7.964       | 0,818          | 7.314             | 1,06           | 39.470         | 179            |                |

**RESUMEN DE PARÁMETROS DE ENTRADA AL PROGRAMA KENLAYER (CONTINUACIÓN)**

| CAL. Nº | CAPA    | ESP.(pulg.)-(cm) |      | Z (Pulg.) | DENS. (pci) | MÓDULOS (psi)  | CONSTANTES EN psi |                |                |                |                |
|---------|---------|------------------|------|-----------|-------------|----------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|         |         |                  |      |           |             | C(MOD.ASF-T2-) | K <sub>0</sub>    | K <sub>1</sub> | K <sub>2</sub> | K <sub>3</sub> | K <sub>4</sub> |
| 7       | C.A     | 7,7              | 19,5 | -         | 0,088       | 381.828        |                   |                |                |                |                |
|         | T.A.A   | 8,7              | 22,0 | -         | 0,076       | 190.914        |                   |                |                |                |                |
|         | M2      | 7,9              | 20,0 | 20,1      | 0,060       | 12.308         | 0,667             | 11.084         | 1,21           | 17.428         | 165            |
|         | SUB-RAS | 11,8             | 30,0 | 36,0      | 0,066       | 7.964          | 0,818             | 7.314          | 1,06           | 39.470         | 179            |
|         | SUB-RAS | 7,9              | 20,1 | 43,9      | 0,066       | 7.964          | 0,818             | 7.314          | 1,06           | 39.470         | 179            |
|         | SUB-RAS | 5,9              | 15,0 | 49,8      | 0,066       | 7.964          | 0,818             | 7.314          | 1,06           | 39.470         | 179            |
|         | SUB-RAS | 7,9              | 20,1 | 57,7      | 0,066       | 7.964          | 0,818             | 7.314          | 1,06           | 39.470         | 179            |
| SUB-RAS | 25,6    | 65,0             | 83,3 | 0,066     | 7.964       | 0,818          | 7.314             | 1,06           | 39.470         | 179            |                |
| 8       | C.A     | 6,9              | 17,6 | -         | 0,088       | 385.303        |                   |                |                |                |                |
|         | T.A.A   | 4,7              | 12,0 | -         | 0,076       | 159.280        |                   |                |                |                |                |
|         | M2      | 6,3              | 16,0 | 14,8      | 0,072       | 12.308         | 0,667             | 11.084         | 1,21           | 17.428         | 165            |
|         | SUB-RAS | 11,8             | 30,0 | 29,8      | 0,066       | 10.860         | 0,818             | 6.658          | 1,12           | 19.265         | 138            |
|         | SUB-RAS | 7,9              | 20,1 | 37,6      | 0,066       | 10.860         | 0,818             | 6.658          | 1,12           | 19.265         | 138            |
|         | SUB-RAS | 5,9              | 15,0 | 43,5      | 0,066       | 10.860         | 0,818             | 6.658          | 1,12           | 19.265         | 138            |
|         | SUB-RAS | 7,9              | 20,1 | 51,4      | 0,066       | 10.860         | 0,818             | 6.658          | 1,12           | 19.265         | 138            |
| SUB-RAS | 25,6    | 65,0             | 77,0 | 0,066     | 10.860      | 0,818          | 6.658             | 1,12           | 19.265         | 138            |                |
| 9       | C.A     | 6,5              | 16,4 | -         | 0,088       | 352.145        |                   |                |                |                |                |
|         | T.A.A   | 4,7              | 12,0 | -         | 0,076       | 176.073        |                   |                |                |                |                |
|         | SUB-RAS | 11,8             | 30,0 | 23,0      | 0,062       | 10.860         | 0,818             | 10.500         | 1,21           | 12.890         | 153            |
|         | SUB-RAS | 7,9              | 20,1 | 30,9      | 0,062       | 10.860         | 0,818             | 10.500         | 1,21           | 12.890         | 153            |
|         | SUB-RAS | 5,9              | 15,0 | 36,8      | 0,062       | 10.860         | 0,818             | 10.500         | 1,21           | 12.890         | 153            |
|         | SUB-RAS | 7,9              | 20,1 | 44,6      | 0,062       | 10.860         | 0,818             | 10.500         | 1,21           | 12.890         | 153            |
|         | SUB-RAS | 25,6             | 65,0 | 70,2      | 0,062       | 10.860         | 0,818             | 10.500         | 1,21           | 12.890         | 153            |

C.A: CONCRETO ASFALTICO T.A.A: TOSCA ARENA-ASFALTO MX: MATERIAL CAPA "X" SUB-RAS: SUB-RASANTE

Como se puede observar, se incluyen los espesores de cada una de las capas que conforman la estructura del pavimento, así como las profundidades (z), en la cual se estimó el Módulo Resiliente de los materiales, las densidades y el Módulo Resiliente inicial (semilla) de cada material, además de las constantes constitutivas de todos los materiales.

A continuación se indica el Módulo Resiliente de Sitio obtenido con el Programa KENLAYER, para los distintos materiales que conforman la estructura del pavimento en las nueve (09) calicatas analizadas, los cuales servirán como piloto o de referencia para las comparaciones a realizar.

Por otra parte se incluyen las salidas de Programa KENLAYER de cada una de las calicatas ejecutadas.

**ESTIMACIÓN DE MÓDULO RESILIENTE DE SITIO. PROGRAMA KENLAYER  
MODULO DEL ASFALTO: INSTITUTO DEL ASFALTO (TAI-2)**

| CALICATA | MAT | K1     | K2   | K3     | K4  | $\sigma_1$ |        | $\sigma_2$ |        | $\sigma_3$ |        | prom( $\sigma_2-\sigma_3$ ) |        | $\theta$ |        | $\sigma_d$ |        | MODULO SITIO  |           |
|----------|-----|--------|------|--------|-----|------------|--------|------------|--------|------------|--------|-----------------------------|--------|----------|--------|------------|--------|---------------|-----------|
|          |     |        |      |        |     | psi        | MPa    | psi        | MPa    | psi        | MPa    | psi                         | MPa    | psi      | MPa    | psi        | MPa    | psi           | Mpa       |
| 1        | M2  | 11.084 | 1,21 | 17.428 | 165 | 3,337      | 0,0230 | 1,138      | 0,0078 | 1,175      | 0,0081 | 1,157                       | 0,0080 | 5,681    | 0,0391 | 2,181      | 0,0150 | <b>10.924</b> | <b>75</b> |
|          | SR  | 6.658  | 1,12 | 19.275 | 139 | 4,414      | 0,0304 | 3,181      | 0,0219 | 3,184      | 0,0219 | 3,183                       | 0,0219 | 10,831   | 0,0746 | 1,232      | 0,0085 | <b>6.643</b>  | <b>46</b> |
| 2        | M2  | 10.677 | 1,26 | 8.200  | 121 | 3,342      | 0,0230 | 1,028      | 0,0071 | 1,089      | 0,0075 | 1,059                       | 0,0073 | 5,489    | 0,0378 | 2,284      | 0,0157 | <b>10.553</b> | <b>73</b> |
|          | M3  | 10.666 | 1,15 | 25.259 | 200 | 3,326      | 0,0229 | 1,252      | 0,0086 | 1,276      | 0,0088 | 1,264                       | 0,0087 | 5,886    | 0,0406 | 2,062      | 0,0142 | <b>10.484</b> | <b>72</b> |
|          | SR  | 7.314  | 1,06 | 39.470 | 179 | 4,316      | 0,0297 | 3,073      | 0,0212 | 3,076      | 0,0212 | 3,075                       | 0,0212 | 10,516   | 0,0725 | 1,242      | 0,0086 | <b>7.282</b>  | <b>50</b> |
| 3        | M2  | 11.084 | 1,21 | 17.428 | 165 | 4,232      | 0,0292 | 0,729      | 0,0050 | 0,847      | 0,0058 | 0,788                       | 0,0054 | 5,842    | 0,0403 | 3,444      | 0,0237 | <b>10.715</b> | <b>74</b> |
|          | SR  | 7.314  | 1,06 | 39.470 | 179 | 4,286      | 0,0295 | 2,723      | 0,0188 | 2,731      | 0,0188 | 2,727                       | 0,0188 | 9,788    | 0,0674 | 1,559      | 0,0107 | <b>7.225</b>  | <b>50</b> |
| 4        | M2  | 11.775 | 1,27 | 8.030  | 124 | 4,248      | 0,0293 | 0,788      | 0,0054 | 0,957      | 0,0066 | 0,873                       | 0,0060 | 6,028    | 0,0415 | 3,376      | 0,0233 | <b>11.514</b> | <b>80</b> |
|          | M3  | 11.028 | 1,20 | 15.180 | 170 | 3,746      | 0,0258 | 1,262      | 0,0087 | 1,295      | 0,0089 | 1,279                       | 0,0088 | 6,338    | 0,0437 | 2,468      | 0,0170 | <b>10.813</b> | <b>75</b> |
|          | SR  | 7.704  | 1,11 | 24.060 | 166 | 4,576      | 0,0315 | 3,193      | 0,0220 | 3,197      | 0,0220 | 3,195                       | 0,0220 | 11,020   | 0,0759 | 1,381      | 0,0095 | <b>7.659</b>  | <b>53</b> |
| 5        | M2  | 11.300 | 1,25 | 9.560  | 135 | 4,466      | 0,0308 | 0,850      | 0,0059 | 1,053      | 0,0073 | 0,952                       | 0,0066 | 6,406    | 0,0441 | 3,515      | 0,0242 | <b>10.994</b> | <b>76</b> |
|          | M3  | 12.920 | 1,19 | 18.700 | 200 | 3,749      | 0,0258 | 0,727      | 0,0050 | 0,791      | 0,0054 | 0,759                       | 0,0052 | 5,298    | 0,0365 | 2,990      | 0,0206 | <b>12.560</b> | <b>87</b> |
|          | SR  | 6.925  | 1,01 | 54.880 | 193 | 4,110      | 0,0283 | 2,719      | 0,0187 | 2,725      | 0,0188 | 2,722                       | 0,0188 | 9,601    | 0,0662 | 1,388      | 0,0096 | <b>6.852</b>  | <b>47</b> |
| 6        | M2  | 10.598 | 1,07 | 45.740 | 250 | 4,207      | 0,0290 | 0,847      | 0,0058 | 1,040      | 0,0072 | 0,944                       | 0,0065 | 6,129    | 0,0422 | 3,264      | 0,0225 | <b>10.050</b> | <b>69</b> |
|          | M3  | 10.666 | 1,15 | 25.259 | 200 | 3,700      | 0,0255 | 0,885      | 0,0061 | 0,946      | 0,0065 | 0,916                       | 0,0063 | 5,563    | 0,0383 | 2,785      | 0,0192 | <b>10.339</b> | <b>71</b> |
|          | SR  | 7.314  | 1,06 | 39.470 | 179 | 4,235      | 0,0292 | 2,750      | 0,0189 | 2,757      | 0,0190 | 2,754                       | 0,0190 | 9,790    | 0,0675 | 1,482      | 0,0102 | <b>7.239</b>  | <b>50</b> |
| 7        | M2  | 11.084 | 1,21 | 17.428 | 165 | 3,392      | 0,0234 | 0,766      | 0,0053 | 0,847      | 0,0058 | 0,807                       | 0,0056 | 5,034    | 0,0347 | 2,586      | 0,0178 | <b>10.857</b> | <b>75</b> |
|          | SR  | 7.314  | 1,06 | 39.470 | 179 | 3,944      | 0,0272 | 2,636      | 0,0182 | 2,641      | 0,0182 | 2,639                       | 0,0182 | 9,266    | 0,0638 | 1,306      | 0,0090 | <b>7.270</b>  | <b>50</b> |
| 8        | M2  | 11.084 | 1,21 | 17.428 | 165 | 4,318      | 0,0298 | 0,233      | 0,0016 | 0,452      | 0,0031 | 0,343                       | 0,0024 | 5,034    | 0,0347 | 3,976      | 0,0274 | <b>10.628</b> | <b>73</b> |
|          | SR  | 6.658  | 1,12 | 19.265 | 138 | 4,066      | 0,0280 | 2,393      | 0,0165 | 2,405      | 0,0166 | 2,399                       | 0,0165 | 8,909    | 0,0614 | 1,667      | 0,0115 | <b>6.583</b>  | <b>45</b> |
| 9        | SR  | 10.500 | 1,21 | 12.890 | 153 | 4,175      | 0,0288 | 1,979      | 0,0136 | 2,009      | 0,0138 | 1,994                       | 0,0137 | 8,205    | 0,0565 | 2,181      | 0,0150 | <b>10.351</b> | <b>71</b> |

**CALICATA 1**

**SALIDA PROGRAMA KENLAYER**



Lunes, 26 de Febrero de 2007

NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1

\*\*\*\*\*  
\*  
\* CALICATA 1. MODULO TAI-2 K REAJUSTADO \*  
\*  
\*\*\*\*\*

MATL = 2 FOR NONLINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM

NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED

NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 1

NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1

TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = .00100  
NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 9  
NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 6  
LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- = 80  
COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9  
THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 8.30000 11.80000 12.20000 11.80000 7.90000  
5.90000 7.90000 25.60000  
POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : .35000 .40000 .40000 .45000 .45000  
.45000 .45000 .45000  
VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 26.20000 44.10000 52.00000 57.90000 65.70000  
91.30000

ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED

FOR PERIOD NO. 1 ELASTIC MODULI OF LAYERS ARE: .331600E+06 .165800E+06 .123100E+05 .108600E+05  
.108600E+05 .108600E+05 .108600E+05 .108600E+05 .108600E+05

LOAD GROUP NO. 1 HAS 2 CONTACT AREAS  
CONTACT RADIUS (CR)----- = 4.10000  
CONTACT PRESSURE (CP)----- = 87.00000  
NO. OF POINTS AT WHICH RESULTS ARE DESIRED (NPT)-- = 1  
WHEEL SPACING ALONG X-AXIS (XW)----- = .00000  
WHEEL SPACING ALONG Y-AXIS (YW)----- = 12.40000  
POINT NO. AND X AND Y COORDINATES ARE :  
1 .00000 6.20000

NUMBER OF NONLINEAR LAYERS (NOLAY)----- = 6

MAXIMUM NUMBER OF ITERATIONS FOR NONLINEAR ANALYSIS (ITENOL) = 10

LAYER NUMBER (LAYNO) AND SOIL TYPE (NCLAY) OF NONLINEAR LAYERS ARE: 3 1 4 1 5 1  
6 1 7 1 8 1

Z COORDINATES (ZCNOL) FOR COMPUTING ELASTIC MODULUS ----- = 26.20000 44.10000 52.00000 57.90000  
65.70000 91.30000

R COORDINATE (RCNOL) FOR COMPUTING ELASTIC MODULUS ----- = .00000

X COORDINATE (XPTNOL) FOR COMPUTING ELASTIC MODULUS ----- = .00000

Y COORDINATE (YPTNOL) FOR COMPUTING ELASTIC MODULUS ----- = 6.20000

SLOPE OF LOAD DISTRIBUTION (SLD) ----- = .00000

TOLERANCE (DELNOL) FOR NONLINEAR ANALYSIS ----- = .01000

RELAXATION FACTORS (RELAX) FOR NONLINEAR ANALYSIS OF EACH PERIOD ARE: .50000

UNIT WEIGHT OF LAYERS (GAM) ARE : .08800 .07600 .06600 .06800 .06800 .06800  
.06800 .06800

LAYER NO.= 3 NCLAY= 1 K2= 1.21000 K3= 17430.00000 K4= 165.00000 K0= .66700

LAYER NO.= 4 NCLAY= 1 K2= 1.12000 K3= 19280.00000 K4= 139.00000 K0= .81800

LAYER NO.= 5 NCLAY= 1 K2= 1.12000 K3= 19280.00000 K4= 139.00000 K0= .81800

LAYER NO.= 6 NCLAY= 1 K2= 1.12000 K3= 19280.00000 K4= 139.00000 K0= .81800

Página 1

Lunes, 26 de Febrero de 2007

LAYER NO.= 7 NCLAY= 1 K2= 1.12000 K3= 19280.00000 K4= 139.00000 K0= .81800  
LAYER NO.= 8 NCLAY= 1 K2= 1.12000 K3= 19280.00000 K4= 139.00000 K0= .81800

7 4.70360 LAYER NUMBER AND GEOSTATIC STRESS (GEOS) ARE: 3 2.02980 4 3.23480 5 3.77200 6 4.17320  
8 6.44440

FOR PERIOD 1 LAYER NO.= 3 NCLAY= 1 EMIN= .0000E+00 EMAX= .3500E+05 K1= .1108E+05  
FOR PERIOD 1 LAYER NO.= 4 NCLAY= 1 EMIN= .0000E+00 EMAX= .3500E+05 K1= .6658E+04  
FOR PERIOD 1 LAYER NO.= 5 NCLAY= 1 EMIN= .0000E+00 EMAX= .3500E+05 K1= .6658E+04  
FOR PERIOD 1 LAYER NO.= 6 NCLAY= 1 EMIN= .0000E+00 EMAX= .3500E+05 K1= .6658E+04  
FOR PERIOD 1 LAYER NO.= 7 NCLAY= 1 EMIN= .0000E+00 EMAX= .3500E+05 K1= .6658E+04  
FOR PERIOD 1 LAYER NO.= 8 NCLAY= 1 EMIN= .0000E+00 EMAX= .3500E+05 K1= .6658E+04

FOR LOAD GROUP 1 LAYER NUMBER AND X COORDINATE FOR COMPUTING ELASTIC MODULUS ARE:  
3 .00000 4 .00000 5 .00000 6 .00000 7 .00000 8 .00000

FOR LOAD GROUP 1 LAYER NUMBER AND Y COORDINATE FOR COMPUTING ELASTIC MODULUS ARE:  
3 6.20000 4 6.20000 5 6.20000 6 6.20000 7 6.20000 8 6.20000

PERIOD NO. 1 LOAD GROUP NO. 1

.1086E+05 AT ITERATION 1 LAYER NO. AND ELASTIC MODULUS ARE : 3 .1231E+05 4 .1086E+05 5 .1086E+05 6  
7 .1086E+05 8 .1086E+05

.8744E+04 AT ITERATION 2 LAYER NO. AND ELASTIC MODULUS ARE : 3 .1161E+05 4 .8741E+04 5 .8743E+04 6  
7 .8742E+04 8 .8732E+04

.7688E+04 AT ITERATION 3 LAYER NO. AND ELASTIC MODULUS ARE : 3 .1126E+05 4 .7686E+04 5 .7689E+04 6  
7 .7686E+04 8 .7672E+04

.7163E+04 AT ITERATION 4 LAYER NO. AND ELASTIC MODULUS ARE : 3 .1109E+05 4 .7162E+04 5 .7164E+04 6  
7 .7160E+04 8 .7144E+04

.6901E+04 AT ITERATION 5 LAYER NO. AND ELASTIC MODULUS ARE : 3 .1100E+05 4 .6901E+04 5 .6902E+04 6  
7 .6897E+04 8 .6881E+04

.6770E+04 AT ITERATION 6 LAYER NO. AND ELASTIC MODULUS ARE : 3 .1096E+05 4 .6771E+04 5 .6772E+04 6  
7 .6767E+04 8 .6749E+04

.6706E+04 AT ITERATION 7 LAYER NO. AND ELASTIC MODULUS ARE : 3 .1094E+05 4 .6707E+04 5 .6707E+04 6  
7 .6701E+04 8 .6684E+04

3.507 LAYER NUMBER AND THREE NORMAL STRESSES INCLUDING GEOSTATIC STRESSES FOR COMPUTING ELASTIC MODULUS ARE:  
3 3.337 1.138 1.175 4 3.988 2.753 2.758 5 4.414 3.181 3.184 6 4.751 3.505  
7 5.214 3.937 3.939 8 6.800 5.398 5.399

| POINT HORIZONTAL | VERTICAL   | VERTICAL  | VERTICAL  | MAJOR     | INTERMEDIATE | MINOR      | VERTICAL  | MAJOR     | MINOR      |
|------------------|------------|-----------|-----------|-----------|--------------|------------|-----------|-----------|------------|
| PRINCIPAL NO.    | COORDINATE | DISP.     | STRESS    | STRESS    | STRESS       | STRESS     | STRAIN    | STRAIN    | STRAIN     |
| 1                | 26.20000   | .8981E-02 | .1302E+01 | .1302E+01 | -.1828E+00   | -.2201E+00 | .1337E-03 | .1337E-03 | -.6102E-04 |
| 1                | 44.10000   | .6882E-02 | .7511E+00 | .7511E+00 | .1123E+00    | .1070E+00  | .9728E-04 | .9728E-04 | -.4197E-04 |
| 1                | 52.00000   | .6176E-02 | .6403E+00 | .6403E+00 | .9961E-01    | .9641E-01  | .8231E-04 | .8231E-04 | -.3527E-04 |
| 1                | 57.90000   | .5717E-02 | .5768E+00 | .5768E+00 | .9415E-01    | .9182E-01  | .7354E-04 | .7354E-04 | -.3133E-04 |
| 1                | 65.70000   | .5182E-02 | .5094E+00 | .5094E+00 | .9196E-01    | .9032E-01  | .6378E-04 | .6378E-04 | -.2690E-04 |
| 1                | 91.30000   | .3905E-02 | .3560E+00 | .3560E+00 | .1289E+00    | .1285E+00  | .3594E-04 | .3594E-04 | -.1343E-04 |

**CALICATA 2**

**SALIDA PROGRAMA KENLAYER**

Lunes, 26 de Febrero de 2007

NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1

\*\*\*\*\*  
\* CALICATA 2. MODULO TAI-2 K AJUSTADO \*  
\* \*\*\*\*\*

MATL = 2 FOR NONLINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM

NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED

NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 1

NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1

TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = .00100  
NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 10  
NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 7  
LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- = 80  
COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9  
THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 8.10000 9.40000 7.90000 7.90000 11.80000  
7.90000 5.90000 7.90000 25.60000  
POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : .35000 .40000 .40000 .40000 .45000  
.45000 .45000 .45000 .45000  
VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 21.50000 29.30000 45.00000 52.90000 58.80000  
66.70000 92.30000  
ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED  
FOR PERIOD NO. 1 ELASTIC MODULI OF LAYERS ARE: .393000E+06 .196500E+06 .123100E+05 .108600E+05  
.796400E+04 .796400E+04 .796400E+04 .796400E+04 .796400E+04  
LOAD GROUP NO. 1 HAS 2 CONTACT AREAS  
CONTACT RADIUS (CR)----- = 4.10000  
CONTACT PRESSURE (CP)----- = 87.00000  
NO. OF POINTS AT WHICH RESULTS ARE DESIRED (NPT)-- = 1  
WHEEL SPACING ALONG X-AXIS (XW)----- = .00000  
WHEEL SPACING ALONG Y-AXIS (YW)----- = 12.40000  
POINT NO. AND X AND Y COORDINATES ARE :  
1 .00000 6.20000  
NUMBER OF NONLINEAR LAYERS (NOLAY)----- = 7  
MAXIMUM NUMBER OF ITERATIONS FOR NONLINEAR ANALYSIS (ITENOL) = 10  
LAYER NUMBER (LAYNO) AND SOIL TYPE (NCLAY) OF NONLINEAR LAYERS ARE: 3 1 4 1 5 1  
6 1 7 1 8 1 9 1  
Z COORDINATES (ZCNOL) FOR COMPUTING ELASTIC MODULUS ----- = 21.50000 29.30000 45.00000 52.90000  
58.80000 66.70000 92.30000  
R COORDINATE (RCNOL) FOR COMPUTING ELASTIC MODULUS ----- = .00000  
X COORDINATE (XPTNOL) FOR COMPUTING ELASTIC MODULUS ----- = .00000  
Y COORDINATE (YPTNOL) FOR COMPUTING ELASTIC MODULUS ----- = 6.20000  
SLOPE OF LOAD DISTRIBUTION (SLD) ----- = .00000  
TOLERANCE (DELNOL) FOR NONLINEAR ANALYSIS ----- = .01000  
RELAXATION FACTORS (RELAX) FOR NONLINEAR ANALYSIS OF EACH PERIOD ARE: .50000  
UNIT WEIGHT OF LAYERS (GAM) ARE : .08800 .07600 .05800 .06600 .06500 .06500  
.06500 .06500 .06500  
LAYER NO.= 3 NCLAY= 1 K2= 1.26000 K3= 8200.00000 K4= 121.00000 K0= .66700  
LAYER NO.= 4 NCLAY= 1 K2= 1.15000 K3= 25260.00000 K4= 200.00000 K0= .66700  
LAYER NO.= 5 NCLAY= 1 K2= 1.06000 K3= 39470.00000 K4= 179.00000 K0= .81800  
LAYER NO.= 6 NCLAY= 1 K2= 1.06000 K3= 39470.00000 K4= 179.00000 K0= .81800

Lunes, 26 de Febrero de 2007

LAYER NO.= 7 NCLAY= 1 K2= 1.06000 K3= 39470.00000 K4= 179.00000 K0= .81800  
 LAYER NO.= 8 NCLAY= 1 K2= 1.06000 K3= 39470.00000 K4= 179.00000 K0= .81800  
 LAYER NO.= 9 NCLAY= 1 K2= 1.06000 K3= 39470.00000 K4= 179.00000 K0= .81800

LAYER NUMBER AND GEOSTATIC STRESS (GEOS) ARE: 3 1.65920 4 2.14280 5 3.16730 6 3.68080  
 7 4.06430 8 4.57780 9 6.24180

FOR PERIOD 1 LAYER NO.= 3 NCLAY= 1 EMIN= .0000E+00 EMAX= .3500E+05 K1= .1067E+05  
 FOR PERIOD 1 LAYER NO.= 4 NCLAY= 1 EMIN= .0000E+00 EMAX= .3500E+05 K1= .1067E+05  
 FOR PERIOD 1 LAYER NO.= 5 NCLAY= 1 EMIN= .0000E+00 EMAX= .3500E+05 K1= .7314E+04  
 FOR PERIOD 1 LAYER NO.= 6 NCLAY= 1 EMIN= .0000E+00 EMAX= .3500E+05 K1= .7314E+04  
 FOR PERIOD 1 LAYER NO.= 7 NCLAY= 1 EMIN= .0000E+00 EMAX= .3500E+05 K1= .7314E+04  
 FOR PERIOD 1 LAYER NO.= 8 NCLAY= 1 EMIN= .0000E+00 EMAX= .3500E+05 K1= .7314E+04  
 FOR PERIOD 1 LAYER NO.= 9 NCLAY= 1 EMIN= .0000E+00 EMAX= .3500E+05 K1= .7314E+04

FOR LOAD GROUP 1 LAYER NUMBER AND X COORDINATE FOR COMPUTING ELASTIC MODULUS ARE:  
 3 .00000 4 .00000 5 .00000 6 .00000 7 .00000 8 .00000 9 .00000

FOR LOAD GROUP 1 LAYER NUMBER AND Y COORDINATE FOR COMPUTING ELASTIC MODULUS ARE:  
 3 6.20000 4 6.20000 5 6.20000 6 6.20000 7 6.20000 8 6.20000 9 6.20000

PERIOD NO. 1 LOAD GROUP NO. 1

AT ITERATION 1 LAYER NO. AND ELASTIC MODULUS ARE : 3 .1231E+05 4 .1086E+05 5 .7964E+04 6  
 .7964E+04 7 .7964E+04 8 .7964E+04 9 .7964E+04  
 AT ITERATION 2 LAYER NO. AND ELASTIC MODULUS ARE : 3 .1142E+05 4 .1067E+05 5 .7620E+04 6  
 .7621E+04 7 .7621E+04 8 .7619E+04 9 .7605E+04  
 AT ITERATION 3 LAYER NO. AND ELASTIC MODULUS ARE : 3 .1098E+05 4 .1058E+05 5 .7449E+04 6  
 .7451E+04 7 .7450E+04 8 .7446E+04 9 .7426E+04  
 AT ITERATION 4 LAYER NO. AND ELASTIC MODULUS ARE : 3 .1076E+05 4 .1053E+05 5 .7364E+04 6  
 .7366E+04 7 .7365E+04 8 .7361E+04 9 .7337E+04  
 AT ITERATION 5 LAYER NO. AND ELASTIC MODULUS ARE : 3 .1065E+05 4 .1051E+05 5 .7322E+04 6  
 .7324E+04 7 .7322E+04 8 .7318E+04 9 .7293E+04  
 AT ITERATION 6 LAYER NO. AND ELASTIC MODULUS ARE : 3 .1060E+05 4 .1050E+05 5 .7301E+04 6  
 .7303E+04 7 .7301E+04 8 .7297E+04 9 .7271E+04

LAYER NUMBER AND THREE NORMAL STRESSES INCLUDING GEOSTATIC STRESSES FOR COMPUTING ELASTIC MODULUS ARE:  
 3 3.342 1.028 1.089 4 3.326 1.252 1.276 5 3.924 2.670 2.676 6 4.316 3.073  
 7 4.629 3.377 3.380 8 5.066 3.788 3.790 9 6.566 5.142 5.143

| POINT HORIZONTAL | VERTICAL | VERTICAL  | VERTICAL  | MAJOR PRINCIPAL | INTERMEDIATE PRINCIPAL | MINOR PRINCIPAL | VERTICAL STRAIN | MAJOR PRINCIPAL STRAIN | MINOR PRINCIPAL STRAIN |
|------------------|----------|-----------|-----------|-----------------|------------------------|-----------------|-----------------|------------------------|------------------------|
| 1                | 21.50000 | .1074E-01 | .1680E+01 | .1680E+01       | -.1477E-01             | -.7478E-01      | .1619E-03       | .1619E-03              | -.6990E-04             |
| 1                | 29.30000 | .9639E-02 | .1182E+01 | .1182E+01       | -.1539E+00             | -.1771E+00      | .1252E-03       | .1252E-03              | -.5604E-04             |
| 1                | 45.00000 | .7891E-02 | .7562E+00 | .7562E+00       | .8510E-01              | .7996E-01       | .9341E-04       | .9341E-04              | -.4090E-04             |
| 1                | 52.90000 | .7212E-02 | .6353E+00 | .6353E+00       | .6581E-01              | .6256E-01       | .7909E-04       | .7909E-04              | -.3464E-04             |
| 1                | 58.80000 | .6771E-02 | .5646E+00 | .5646E+00       | .5542E-01              | .5299E-01       | .7065E-04       | .7065E-04              | -.3096E-04             |
| 1                | 66.70000 | .6251E-02 | .4880E+00 | .4880E+00       | .4560E-01              | .4389E-01       | .6137E-04       | .6137E-04              | -.2690E-04             |
| 1                | 92.30000 | .4974E-02 | .3239E+00 | .3239E+00       | .3813E-01              | .3747E-01       | .3987E-04       | .3987E-04              | -.1725E-04             |

# **ANEXO C**

PLANILLA RESUMEN RETRO-CÁLCULO  
MODULAR MÉTODO AASHTO-93.

## MÉTODO AASHTO-93. ESTIMACIÓN DE MR DE SUB-RASANTE Y Ep

### A. DEFLEXIONES MEDIDAS EN LA CALICATA.

| CALICATA No. | P (kg.) | do (cm.) | FAC. CORR.               |                | MODULO RESILENTE |          |                       | a <sub>e</sub> (cm.) | 0,7 x a <sub>e</sub> (cm.) | r > 0,7 x a <sub>e</sub> ? | D (cm.) | a (cm.) |       |       |
|--------------|---------|----------|--------------------------|----------------|------------------|----------|-----------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|---------|---------|-------|-------|
|              |         |          | (TEMP. 21,7°C -71,15°F-) | do Corr. (cm.) | r (cm.)          | dr (cm.) | (kg/cm <sup>2</sup> ) |                      |                            |                            |         |         | (MPa) | (psi) |
| 1 (1+250)    | 4047    | 0,0303   | 0,97                     | 0,0294         | 150              | 0,0092   | 704                   | 70                   | 10.191                     | 179,26                     | 125,48  | SI      | 82,00 | 15,00 |
| 2 (4+200)    | 4014    | 0,0393   |                          | 0,0381         | 120              | 0,0129   | 622                   | 62                   | 9.011                      | 171,06                     | 119,74  | SI      | 84,50 | 15,00 |
| 3 (7+500)    | 4194    | 0,0412   |                          | 0,0400         | 90               | 0,0125   | 895                   | 89                   | 12.956                     | 116,39                     | 81,47   | SI      | 65,50 | 15,00 |
| 4 (9+000)    | 4201    | 0,0403   |                          | 0,0391         | 150              | 0,0097   | 693                   | 69                   | 10.034                     | 177,55                     | 124,29  | SI      | 92,70 | 15,00 |
| 5 (12+200)   | 3937    | 0,0399   |                          | 0,0387         | 120              | 0,0125   | 630                   | 63                   | 9.121                      | 150,18                     | 105,13  | SI      | 74,00 | 15,00 |
| 6 (13+800)   | 4057    | 0,0743   |                          | 0,0721         | 120              | 0,0182   | 446                   | 45                   | 6.456                      | 121,06                     | 84,74   | SI      | 65,80 | 15,00 |
| 7 (17+000)   | 3955    | 0,0545   |                          | 0,0529         | 120              | 0,0184   | 430                   | 43                   | 6.225                      | 135,66                     | 94,96   | SI      | 61,50 | 15,00 |
| 8 (18+700)   | 4064    | 0,0653   |                          | 0,0633         | 60               | 0,0281   | 579                   | 58                   | 8.377                      | 85,26                      | 59,68   | SI      | 45,60 | 15,00 |
| 9 (21+600)   | 4145    | 0,0702   |                          | 0,0681         | 60               | 0,0265   | 626                   | 63                   | 9.060                      | 58,27                      | 40,79   | SI      | 28,40 | 15,00 |

### B. DEFLEXIONES MEDIDAS 10 m. ANTES DE LA CALICATA.

| CALICATA No. | P (kg.) | do (cm.) | FAC. CORR.               |                | MODULO RESILENTE |          |                       | a <sub>e</sub> (cm.) | 0,7 x a <sub>e</sub> (cm.) | r > 0,7 x a <sub>e</sub> ? | D (cm.) | a (cm.) |       |       |
|--------------|---------|----------|--------------------------|----------------|------------------|----------|-----------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|---------|---------|-------|-------|
|              |         |          | (TEMP. 21,7°C -71,15°F-) | do Corr. (cm.) | r (cm.)          | dr (cm.) | (kg/cm <sup>2</sup> ) |                      |                            |                            |         |         | (MPa) | (psi) |
| 1 (<10 m.)   | 4138    | 0,0467   | 0,97                     | 0,0453         | 120              | 0,0129   | 642                   | 64                   | 9.290                      | 153,84                     | 107,68  | SI      | 82,00 | 15,00 |
| 2 (<10 m.)   | 4125    | 0,0399   |                          | 0,0387         | 120              | 0,0129   | 640                   | 64                   | 9.260                      | 169,83                     | 118,88  | SI      | 84,50 | 15,00 |
| 3 (<10 m.)   | 4064    | 0,0299   |                          | 0,0290         | 90               | 0,0106   | 1.022                 | 102                  | 14.804                     | 125,59                     | 87,91   | SI      | 65,50 | 15,00 |
| 4 (<10 m.)   | 3983    | 0,0428   |                          | 0,0415         | 150              | 0,0106   | 601                   | 60                   | 8.705                      | 179,87                     | 125,91  | SI      | 92,70 | 15,00 |
| 5 (< 10 m.)  | 4138    | 0,0467   |                          | 0,0453         | 120              | 0,0129   | 642                   | 64                   | 9.290                      | 141,23                     | 98,86   | SI      | 74,00 | 15,00 |
| 6 (< 10 m.)  | 4078    | 0,0903   |                          | 0,0876         | 90               | 0,0268   | 406                   | 41                   | 5.876                      | 115,61                     | 80,93   | SI      | 65,80 | 15,00 |
| 7 (< 10 m.)  | 3999    | 0,0411   |                          | 0,0399         | 120              | 0,0143   | 559                   | 56                   | 8.099                      | 137,93                     | 96,55   | SI      | 61,50 | 15,00 |
| 8 (< 10 m.)  | 4164    | 0,0536   |                          | 0,0520         | 90               | 0,0150   | 740                   | 74                   | 10.719                     | 83,91                      | 58,74   | SI      | 45,60 | 15,00 |
| 9 (< 10 m.)  | 3992    | 0,0679   |                          | 0,0659         | 60               | 0,0311   | 513                   | 51                   | 7.435                      | 66,79                      | 46,75   | SI      | 28,40 | 15,00 |

### C. DEFLEXIONES MEDIDAS 10 m. DESPUES DE LA CALICATA.

| CALICATA No. | P (kg.) | do (cm.) | FAC. CORR.               |                | MODULO RESILENTE |          |                       | a <sub>e</sub> (cm.) | 0,7 x a <sub>e</sub> (cm.) | r > 0,7 x a <sub>e</sub> ? | D (cm.) | a (cm.) |       |       |
|--------------|---------|----------|--------------------------|----------------|------------------|----------|-----------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|---------|---------|-------|-------|
|              |         |          | (TEMP. 21,7°C -71,15°F-) | do Corr. (cm.) | r (cm.)          | dr (cm.) | (kg/cm <sup>2</sup> ) |                      |                            |                            |         |         | (MPa) | (psi) |
| 1 (> 10 m.)  | 4120    | 0,0328   | 0,97                     | 0,0318         | 150              | 0,0105   | 628                   | 63                   | 9.091                      | 184,11                     | 128,88  | SI      | 82,00 | 15,00 |
| 2 (> 10 m.)  | 4168    | 0,0371   |                          | 0,0360         | 120              | 0,0096   | 868                   | 87                   | 12.573                     | 153,18                     | 107,22  | SI      | 84,50 | 15,00 |
| 3 (> 10 m.)  | 3982    | 0,0373   |                          | 0,0362         | 90               | 0,0135   | 787                   | 79                   | 11.390                     | 126,89                     | 88,82   | SI      | 65,50 | 15,00 |
| 4 (> 10 m.)  | 4066    | 0,0376   |                          | 0,0365         | 150              | 0,0083   | 784                   | 78                   | 11.350                     | 170,78                     | 119,55  | SI      | 92,70 | 15,00 |
| 5 (> 10 m.)  | 4004    | 0,0670   |                          | 0,0650         | 120              | 0,0155   | 517                   | 52                   | 7.481                      | 129,93                     | 90,95   | SI      | 74,00 | 15,00 |
| 6 (> 10 m.)  | 4251    | 0,0454   |                          | 0,0440         | 120              | 0,0164   | 518                   | 52                   | 7.507                      | 147,83                     | 103,48  | SI      | 65,80 | 15,00 |
| 7 (> 10 m.)  | 4010    | 0,0738   |                          | 0,0716         | 90               | 0,0183   | 584                   | 58                   | 8.461                      | 100,39                     | 70,28   | SI      | 61,50 | 15,00 |
| 8 (> 10 m.)  | 3921    | 0,0813   |                          | 0,0789         | 60               | 0,0289   | 543                   | 54                   | 7.858                      | 77,02                      | 53,91   | SI      | 45,60 | 15,00 |
| 9 (> 10 m.)  | -       | -        |                          | -              | -                | -        | -                     | -                    | -                          | -                          | -       | -       | -     | -     |

| CALICATA No. | MODULO RESILENTE PROMEDIO |            |          |            |          |            |
|--------------|---------------------------|------------|----------|------------|----------|------------|
|              | (kg/cm <sup>2</sup> )     |            | (MPa)    |            | (psi)    |            |
|              | Promedio                  | Desv. Est. | Promedio | Desv. Est. | Promedio | Desv. Est. |
| 1 (1+250)    | 658                       | 41         | 66       | 4          | 9524     | 587        |
| 2 (4+200)    | 710                       | 137        | 71       | 14         | 10282    | 1989       |
| 3 (7+500)    | 901                       | 118        | 90       | 12         | 13050    | 1709       |
| 4 (9+000)    | 693                       | 91         | 69       | 9          | 10030    | 1322       |
| 5 (12+200)   | 596                       | 69         | 60       | 7          | 8631     | 999        |
| 6 (13+800)   | 457                       | 57         | 46       | 6          | 6613     | 827        |
| 7 (17+000)   | 525                       | 83         | 52       | 8          | 7595     | 1200       |
| 8 (18+700)   | 620                       | 105        | 62       | 11         | 8985     | 1524       |
| 9 (21+600)   | 570                       | 79         | 57       | 8          | 8247     | 1149       |

## RESUMEN DE MEDICION DE DEFLEXIONES CON EQUIPO FWD-MODELO KUAB

| CALICATA   | Carga (Kg) |         |         |         | d0 (0.0) micrones |         |         |         | d1 (30) micrones |         |         |         | d2 (60) micrones |         |         |         |
|------------|------------|---------|---------|---------|-------------------|---------|---------|---------|------------------|---------|---------|---------|------------------|---------|---------|---------|
|            | CALICATA   | < 10 m. | > 10 m. | > 10 m. | CALICATA          | < 10 m. | > 10 m. | > 10 m. | CALICATA         | < 10 m. | > 10 m. | > 10 m. | CALICATA         | < 10 m. | > 10 m. | > 10 m. |
| 1 (1+250)  | 4047       | 4138    | 4120    | 4059    | 303               | 467     | 328     | 363     | 223              | 349     | 264     | 293     | 185              | 261     | 218     | 237     |
| 2 (4+200)  | 4014       | 4125    | 4168    |         | 393               | 399     | 371     |         | 290              | 281     | 275     |         | 231              | 227     | 202     |         |
| 3 (7+500)  | 4194       | 4064    | 3982    |         | 412               | 299     | 373     |         | 258              | 200     | 247     |         | 186              | 147     | 185     |         |
| 4 (9+000)  | 4201       | 3983    | 4066    |         | 403               | 428     | 376     |         | 317              | 332     | 274     |         | 243              | 260     | 207     |         |
| 5 (12+200) | 3937       | 4138    | 4004    |         | 399               | 467     | 670     |         | 298              | 349     | 516     |         | 228              | 261     | 360     |         |
| 6 (13+800) | 4057       | 4078    | 4251    |         | 743               | 903     | 454     |         | 589              | 652     | 360     |         | 412              | 432     | 288     |         |
| 7 (17+000) | 3955       | 3999    | 4010    |         | 545               | 411     | 738     |         | 431              | 322     | 495     |         | 345              | 258     | 308     |         |
| 8 (18+700) | 4064       | 4164    | 3921    |         | 653               | 536     | 813     |         | 453              | 366     | 475     |         | 281              | 236     | 249     |         |
| 9 (21+600) | 4145       | 3992    |         |         | 702               | 679     |         |         | 470              | 479     |         |         | 265              | 311     |         |         |

| CALICATA   | Carga (Kg) |         |         |         | d0 (0.0) cm. |         |         |         | d1 (30) cm. |         |         |         | d2 (60) cm. |         |         |         |
|------------|------------|---------|---------|---------|--------------|---------|---------|---------|-------------|---------|---------|---------|-------------|---------|---------|---------|
|            | CALICATA   | < 10 m. | > 10 m. | > 10 m. | CALICATA     | < 10 m. | > 10 m. | > 10 m. | CALICATA    | < 10 m. | > 10 m. | > 10 m. | CALICATA    | < 10 m. | > 10 m. | > 10 m. |
| 1 (1+250)  | 4047       | 4138    | 4120    | 4059    | 0,0303       | 0,0467  | 0,0328  | 0,0363  | 0,0223      | 0,0349  | 0,0264  | 0,0293  | 0,0185      | 0,0261  | 0,0218  | 0,0237  |
| 2 (4+200)  | 4014       | 4125    | 4168    |         | 0,0393       | 0,0399  | 0,0371  |         | 0,0290      | 0,0281  | 0,0275  |         | 0,0231      | 0,0227  | 0,0202  |         |
| 3 (7+500)  | 4194       | 4064    | 3982    |         | 0,0412       | 0,0299  | 0,0373  |         | 0,0258      | 0,0200  | 0,0247  |         | 0,0186      | 0,0147  | 0,0185  |         |
| 4 (9+000)  | 4201       | 3983    | 4066    |         | 0,0403       | 0,0428  | 0,0376  |         | 0,0317      | 0,0332  | 0,0274  |         | 0,0243      | 0,0260  | 0,0207  |         |
| 5 (12+200) | 3937       | 4138    | 4004    |         | 0,0399       | 0,0467  | 0,0670  |         | 0,0298      | 0,0349  | 0,0516  |         | 0,0228      | 0,0261  | 0,0360  |         |
| 6 (13+800) | 4057       | 4078    | 4251    |         | 0,0743       | 0,0903  | 0,0454  |         | 0,0589      | 0,0652  | 0,0360  |         | 0,0412      | 0,0432  | 0,0288  |         |
| 7 (17+000) | 3955       | 3999    | 4010    |         | 0,0545       | 0,0411  | 0,0738  |         | 0,0431      | 0,0322  | 0,0495  |         | 0,0345      | 0,0258  | 0,0308  |         |
| 8 (18+700) | 4064       | 4164    | 3921    |         | 0,0653       | 0,0536  | 0,0813  |         | 0,0453      | 0,0366  | 0,0475  |         | 0,0281      | 0,0236  | 0,0249  |         |
| 9 (21+600) | 4145       | 3992    |         |         | 0,0702       | 0,0679  |         |         | 0,0470      | 0,0479  |         |         | 0,0265      | 0,0311  |         |         |

| CALICATA   | Carga (Kg) |         |         |         | d3 (0.90) micrones |         |         |         | d5 (120) micrones |         |         |         | d6 (150) micrones |         |         |         | T. AIRE(C) | T. PAV.(C) | T.PAV.MED(C) |
|------------|------------|---------|---------|---------|--------------------|---------|---------|---------|-------------------|---------|---------|---------|-------------------|---------|---------|---------|------------|------------|--------------|
|            | CALICATA   | < 10 m. | > 10 m. | > 10 m. | CALICATA           | < 10 m. | > 10 m. | > 10 m. | CALICATA          | < 10 m. | > 10 m. | > 10 m. | CALICATA          | < 10 m. | > 10 m. | > 10 m. |            |            |              |
| 1 (1+250)  | 4047       | 4138    | 4120    | 4059    | 146                | 186     | 172     | 184     | 129               | 129     | 136     | 138     | 92                | 90      | 105     | 103     | 26         | 44         |              |
| 2 (4+200)  | 4014       | 4125    | 4168    |         | 174                | 172     | 138     |         | 129               | 129     | 96      |         | 94                | 97      | 64      |         | 25         | 43         |              |
| 3 (7+500)  | 4194       | 4064    | 3982    |         | 125                | 106     | 135     |         | 86                | 75      | 98      |         | 58                | 54      | 69      |         | 25         | 44         | 39,4         |
| 4 (9+000)  | 4201       | 3983    | 4066    |         | 184                | 195     | 153     |         | 136               | 146     | 112     |         | 97                | 106     | 83      |         | 25         | 43         |              |
| 5 (12+200) | 3937       | 4138    | 4004    |         | 170                | 186     | 241     |         | 125               | 129     | 155     |         | 91                | 90      | 97      |         | 25         | 46         |              |
| 6 (13+800) | 4057       | 4078    | 4251    |         | 275                | 268     | 220     |         | 182               | 172     | 164     |         | 119               | 108     | 118     |         | 25         | 46         |              |
| 7 (17+000) | 3955       | 3999    | 4010    |         | 258                | 195     | 183     |         | 184               | 143     | 106     |         | 125               | 102     | 68      |         | 25         | 47         |              |
| 8 (18+700) | 4064       | 4164    | 3921    |         | 175                | 150     | 124     |         | 107               | 97      | 64      |         | 73                | 65      | 39      |         | 26         | 47         |              |
| 9 (21+600) | 4145       | 3992    |         |         | 135                | 180     |         |         | 63                | 101     |         |         | 37                | 53      |         |         | 27         | 48         |              |

| CALICATA   | Carga (Kg) |         |         |         | d3 (0.90) cm. |         |         |         | d5 (120) cm. |         |         |         | d6 (150) cm. |         |         |         | T. AIRE(C) | T. PAV.(C) | T.PAV.MED(C) |
|------------|------------|---------|---------|---------|---------------|---------|---------|---------|--------------|---------|---------|---------|--------------|---------|---------|---------|------------|------------|--------------|
|            | CALICATA   | < 10 m. | > 10 m. | > 10 m. | CALICATA      | < 10 m. | > 10 m. | > 10 m. | CALICATA     | < 10 m. | > 10 m. | > 10 m. | CALICATA     | < 10 m. | > 10 m. | > 10 m. |            |            |              |
| 1 (1+250)  | 4047       | 4138    | 4120    | 4059    | 0,0146        | 0,0186  | 0,0172  | 0,0184  | 0,0129       | 0,0129  | 0,0136  | 0,0138  | 0,0092       | 0,0090  | 0,0105  | 0,0103  | 26         | 44         |              |
| 2 (4+200)  | 4014       | 4125    | 4168    |         | 0,0174        | 0,0172  | 0,0138  |         | 0,0129       | 0,0129  | 0,0096  |         | 0,0094       | 0,0097  | 0,0064  |         | 25         | 43         |              |
| 3 (7+500)  | 4194       | 4064    | 3982    |         | 0,0125        | 0,0106  | 0,0135  |         | 0,0086       | 0,0075  | 0,0098  |         | 0,0058       | 0,0054  | 0,0069  |         | 25         | 44         | 39,4         |
| 4 (9+000)  | 4201       | 3983    | 4066    |         | 0,0184        | 0,0195  | 0,0153  |         | 0,0136       | 0,0146  | 0,0112  |         | 0,0097       | 0,0106  | 0,0083  |         | 25         | 43         |              |
| 5 (12+200) | 3937       | 4138    | 4004    |         | 0,0170        | 0,0186  | 0,0241  |         | 0,0125       | 0,0129  | 0,0155  |         | 0,0091       | 0,0090  | 0,0097  |         | 25         | 46         |              |
| 6 (13+800) | 4057       | 4078    | 4251    |         | 0,0275        | 0,0268  | 0,0220  |         | 0,0182       | 0,0172  | 0,0164  |         | 0,0119       | 0,0108  | 0,0118  |         | 25         | 46         |              |
| 7 (17+000) | 3955       | 3999    | 4010    |         | 0,0258        | 0,0195  | 0,0183  |         | 0,0184       | 0,0143  | 0,0106  |         | 0,0125       | 0,0102  | 0,0068  |         | 25         | 47         |              |
| 8 (18+700) | 4064       | 4164    | 3921    |         | 0,0175        | 0,0150  | 0,0124  |         | 0,0107       | 0,0097  | 0,0064  |         | 0,0073       | 0,0065  | 0,0039  |         | 26         | 47         |              |
| 9 (21+600) | 4145       | 3992    |         |         | 0,0135        | 0,0180  |         |         | 0,0063       | 0,0101  |         |         | 0,0037       | 0,0053  |         |         | 27         | 48         |              |