

MODULO RESILIENTE DE SUELOS Y MATERIALES NO TRATADOS. SU APLICACION AL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS EN ARGENTINA

Ings. Silvia ANGELONE, Fernando MARTINEZ y Jorge TOSTICARELLI
IMAE, Facultad de Ciencias Exactas e Ingeniería, Universidad Nacional de Rosario.

RESUMEN:

Dentro del marco del conocimiento de las características dinámicas de los materiales que componen el paquete estructural de los pavimentos se ha encarado la determinación experimental de módulos resilientes de materiales no tratados mediante el ensayo triaxial dinámico, con el objeto de aplicar dichos valores como datos de entrada en los métodos de diseño de pavimentos basados en el análisis racional de estructuras multicapas.

Si bien es posible aproximaciones al problema a partir de la adopción de valores característicos en base a fórmulas empíricas o relación con otros ensayos básicos sobre algunos materiales, no existía experiencia propia en la Argentina de determinaciones experimentales directas de Módulos Resilientes en este tipo de materiales. Se ha desarrollado, en consecuencia, un prototipo de equipo de ensayos triaxiales dinámicos, con vistas a obtener resultados válidos para su aplicación directa en la actividad vial.

A partir de la puesta a punto del equipo se tratan en este trabajo las determinaciones de valores de Modulo resiliente de suelos y de una mezcla suelo-arena típicos de la región litoral, bajo distintas condiciones de compactación y contenidos de humedad. Se analiza además la importante influencia del método de compactación utilizado para la confección de probetas.

Se presenta el fundamento del método, referencias sobre el comportamiento observado en otros estudios similares y los resultados obtenidos respecto de la variación de los distintos parámetros que afectan el valor del módulo resiliente, obteniéndose tendencias que se corresponden con las determinadas por otros autores.

I. INTRODUCCION:

Este trabajo trata sobre la determinación de módulos resilientes en suelos y materiales granulares no tratados mediante la aplicación del ensayo triaxial dinámico con cargas repetidas y tiene por objeto informar los primeros resultados experimentales obtenidos así como los fundamentos de la adopción de esa técnica de ensayos y analizar la influencia de los diversos factores puestos en juego en el comportamiento resiliente de este tipo de materiales.

A partir de la aplicación de métodos de diseño y verificación de estructuras de pavimentos basados en el análisis de sistemas multicapas elásticos, ha resultado indispensable caracterizar adecuadamente cada uno de los materiales componentes del pavimento definiendo sus módulos de deformabilidad (a través del módulo dinámico, stiffness o módulo resiliente según el caso) y sus relaciones de Poisson.

Estos parámetros de entrada deben complementarse con las leyes de falla propias de cada material que vinculan el número de sollicitaciones aplicadas y el nivel de falla resultante en el mismo según sea la rotura por fatiga o por excesiva acumulación de deformaciones permanentes.

En el caso de los materiales ligados, ya se ha informado en trabajos anteriores (I y II) sobre la determinación del módulo dinámico y de las leyes de fatiga de mezclas asfálticas utilizadas en pavimentos de la Región Litoral de la República Argentina, y a este Congreso sobre la utilización

de materiales ligados con cemento (III), por lo que esta presentación representa la continuidad de una línea de trabajo referida a la caracterización de materiales viales a través de parámetros útiles para el dimensionamiento y verificación de pavimentos mediante métodos basados en la teoría de los sistemas multicapas elásticos (IV).

II. MODULO RESILIENTE DE SUELOS Y MATERIALES GRANULARES. BASES TEORICO-EXPERIMENTALES:

Cuando una rueda cargada se desplaza en la superficie de un pavimento, un elemento diferencial de suelo ubicado en la sub-rasante resulta sometido a un sistema de tensiones variables según la posición de la carga. La Figura 1 muestra el estado de tensiones que se desarrollan sobre ese elemento diferencial ubicado a una profundidad Z desde la superficie del pavimento.

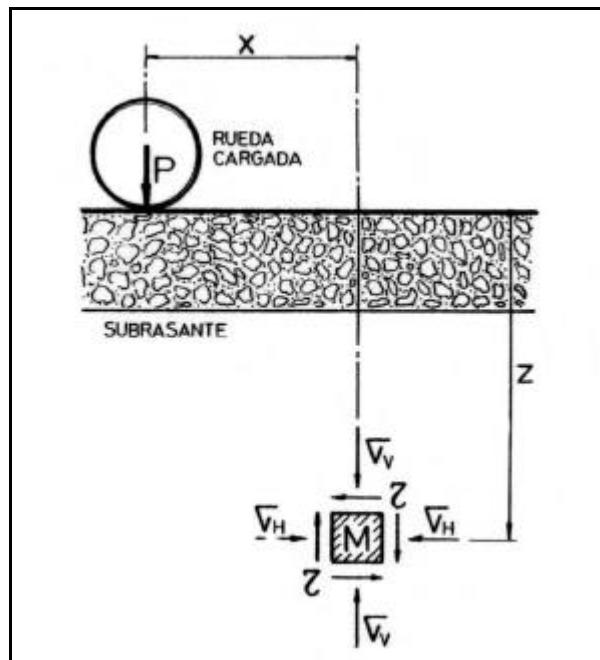


Fig. N° 1: Tensiones inducidas en un elemento de la subrasante donde σ_v : tensión vertical sobre la superficie del elemento; σ_h : tensión horizontal sobre la superficie del elemento; τ_{hv} y τ_{vh} tensiones de corte que toman valor nulo para $x = 0$

Sobre ese elemento de suelo, el estado de tensiones resultante induce un estado de deformaciones, de tal manera que si se considera al material de subrasante como elástico, isótropo y homogéneo, ambos estados se encuentran vinculados entre sí a través del módulo de elasticidad y la relación de Poisson propios del material considerado.

En la realidad, dadas las características propias de los materiales viales y donde las cargas impuestas por el tránsito tienen un carácter dinámico con muy cortos tiempos de aplicación, sólo una parte de la deformación total inducida se recupera al cesar la sollicitación aplicada implicando la no validez del concepto teórico de "elasticidad" e introduciéndose el de módulo resiliente como la relación que vincula las sollicitaciones aplicadas y las deformaciones recuperables al suprimirse ese estado de tensiones impuesto.

Si bien existen numerosos métodos de estimación del módulo resiliente de suelos y materiales granulares no ligados, algunos de ellos establecidos sobre la base de relaciones empíricas con sus propiedades resistentes (por ejemplo con el Valor Soporte (V)) o sobre determinaciones in-situ en capas construídas a través de ensayos de placa, propagación de ondas o medición de deflexiones, el estudio en laboratorio exige el desarrollo de un equipo de ensayos capaz de

aplicar un estado de tensiones similar al que realmente se produce con una situación combinada de tensiones normales y de cizallamiento.

Como tal equipamiento es de muy difícil concepción y desarrollo, el estudio del comportamiento resiliente de los suelos y los materiales granulares no tratados se ha orientado hacia los ensayos triaxiales dinámicos con cargas repetidas cuyo fundamento consiste en someter a una probeta cilíndrica del material en análisis confeccionada en condiciones representativas de aquellas que cabría esperar en su condición in-situ, a una presión de confinamiento σ_3 y a la acción de un tensor desviador pulsante σ_d definiéndose entonces el módulo resiliente M_r como:

$$M_r = \frac{S_d}{e_r}$$

donde e_r es la deformación específica recuperable o resiliente axial medida sobre la probeta en ensayo para un número determinado de repeticiones de carga (VI, VII, VIII, IX).

Los resultados obtenidos son influenciados por distintos parámetros experimentales que genéricamente pueden ser clasificados como:

- Parámetros de carga
- Parámetros de servicio

Los primeros están referidos a las solicitaciones aplicadas, mientras que los segundos están vinculados con el procedimiento de confección de las muestras y las condiciones de moldeo relacionadas a su vez al comportamiento in-situ del material en su etapa de servicio.

III. FACTORES QUE INFLUENCIAN EL COMPORTAMIENTO RESILIENTE:

Los parámetros experimentales que afectan el comportamiento resiliente afectan en forma diferente según se trate de suelos cohesivos o materiales granulares no ligados.

Los suelos arenosos, presentan un comportamiento intermedio entre los suelos cohesivos y los materiales granulares no tratados, y la influencia de los distintos factores analizados es más o menos significativa según los mismos compartan propiedades más próximas a los suelos cohesivos o a los materiales granulares siendo ésta afinidad en general, resultante de la granulometría, plasticidad y forma de las partículas del suelo arenoso particularmente considerado.

III.1. FACTORES QUE AFECTAN EL COMPORTAMIENTO RESILIENTE DE LOS SUELOS COHESIVOS:

III.1.1. FACTORES DE CARGA:

1. Tipo de solicitación:

El valor del módulo resiliente varía sustancialmente si el mismo ha sido determinado a través de un ensayo triaxial dinámico con cargas repetidas o a partir de un ensayo triaxial estático convencional evaluando, por ejemplo, el módulo de deformación tangente al origen (VII).

Esa diferencia indica que una buena caracterización de la deformación resiliente sólo puede ser obtenida en condiciones que simulen lo más aproximadamente posible las condiciones in-situ, resultando más indicado el procedimiento de determinación con cargas repetidas debido a la naturaleza de las cargas que impone el tránsito.

2. Número de solicitaciones aplicadas:

Todos los suelos cohesivos sufren una variación del módulo resiliente en función del número de solicitaciones aplicadas. Con el aumento del número de repeticiones de carga, el módulo disminuye primero en el período comprendido entre 1 y 5.000 ciclos aproximadamente para aumentar después de las 10.000 repeticiones tal como se muestra en la Figura 2 (VII).

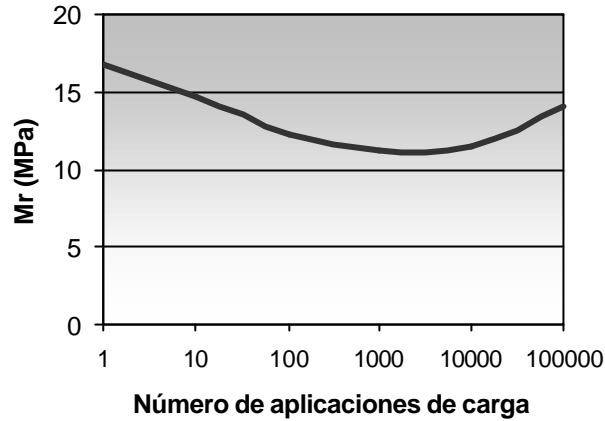


Fig. Nº 2: Variación del Mr con el número, de ciclos de carga

3. Intensidad de la solicitación aplicada:

Las propiedades resilientes de los suelos cohesivos no son afectadas significativamente por la presión de confinamiento σ_3 aplicada. Sin embargo, el valor del tensor desviador, o sea la carga pulsante que solicita a la muestra, afecta notablemente el comportamiento resiliente de estos suelos. La Figura 3 muestra la variación típica del módulo resiliente de un suelo arcilloso respecto al incremento del tensor desviador.

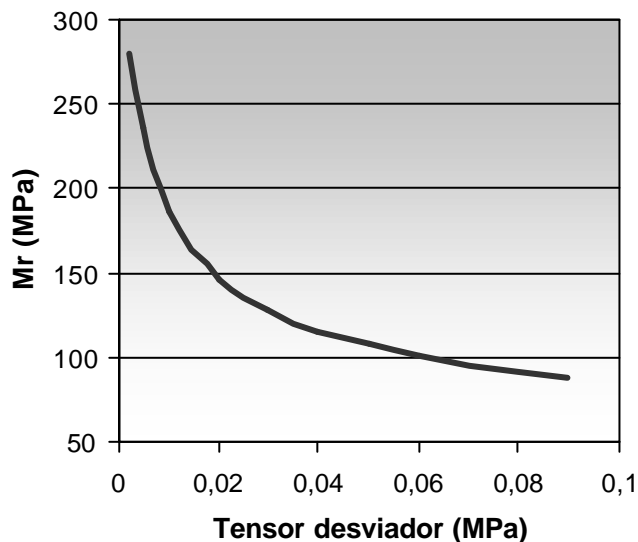


Fig. Nº 3: Variación del Mr en función del Tensor desviador

Esta variación plantea un inconveniente para seleccionar el valor más representativo del módulo resiliente con el objeto de su aplicación al cálculo de pavimentos haciendo uso por ejemplo, de la teoría de capas elásticas.

III.1.2. FACTORES DE SERVICIO:

1. Edad a la que se ensaya la probeta:

Algunos suelos cohesivos compactados, sufren un aumento de su resistencia y rigidez en el tiempo debido a las características tixotrópicas de los mismos relacionada a factores electroquímicos que implican una microcementación de los granos del suelo en sus superficies de contacto. Si se analizan probetas confeccionadas en iguales condiciones iniciales de densidad, humedad y método de elaboración ensayadas a distintas edades, resulta que a mayor tiempo de almacenamiento (intervalo de tiempo desde su confección hasta su ensayo) mayor será su resistencia y su módulo resiliente (Figura 4) (VII)

Esta aparente mayor resistencia inicial desaparece al cabo de aproximadamente 5.000 ciclos de carga donde todas las curvas tienden a un único valor del módulo resiliente, probablemente debido a que la acción de la carga repetida destruye la resistencia tixotrópica adquirida durante el almacenamiento.

2. Método de compactación empleado en la confección de las probetas:

Muchos investigadores han mostrado que según sea el método de compactación empleado para la confección de las muestras de ensayo, resultan cambios en su estructura y propiedades (VII).

Este efecto es menor cuando el grado de saturación del suelo cohesivo es relativamente bajo (menor del 80%) mientras que para aquellos donde el grado de saturación es elevado, una variación en el método de compactación puede causar grandes cambios en la estructura y propiedades resultantes.

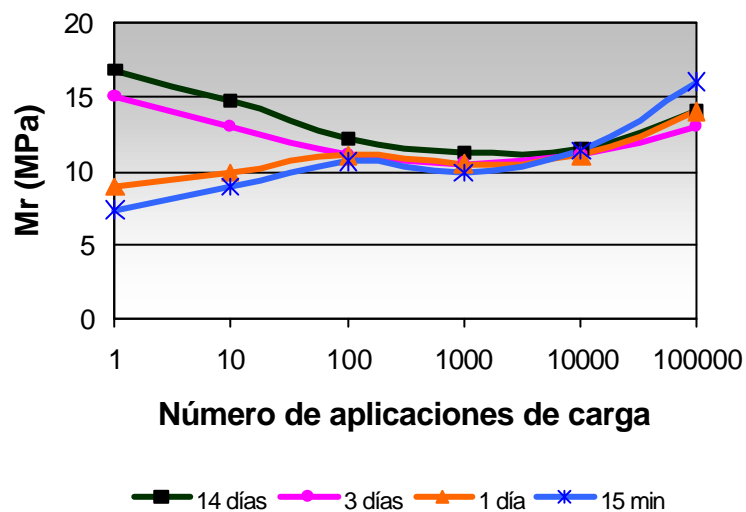


Fig. N° 4: Influencia de la edad de la probeta sobre el Módulo Resiliente

Los cambios en la estructura interparticular están dados por la deformación por corte inducida en el suelo durante el proceso de compactación. La forma en que se acomodan las partículas del suelo dan origen a dos estructuras diferentes: "floculada" y "dispersa". En el primer caso las partículas se ubican en forma aleatoria, tocándose bordes con caras, mientras que en el caso de la estructura dispersa, las partículas se acomodan paralelas unas a otras (Figura 5), resultando para ésta última situación una menor rigidez estructural.

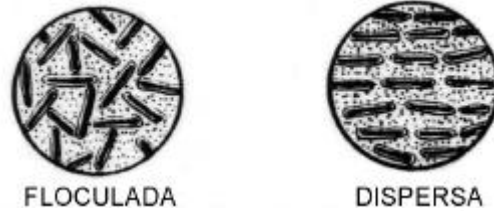


Fig. N° 5: Forma en que se acomodan las partículas del suelo

Los métodos de compactación por amasado ("kneading") o los de compactación por impacto provocan estructuras dispersas, cuando el grado de saturación es mayor del 80% ya que estos métodos logran la densificación mediante una deformación por corte del material.

Los métodos de compactación estáticos provocan casi siempre estructuras floculadas independientemente del grado de saturación alcanzado.

Ensayos realizados sobre suelos de la subrasante del AASHO Road Test con compactación estática y por "kneading" mostraron valores de la deformación resiliente parecidos para aquellos puntos preparados con humedades menores a la óptima de compactación, pero una vez superado este contenido de humedad los resultados comienzan a diferenciarse, discrepancia que se manifiesta también en el valor del módulo resiliente (Figuras 6 y 7).

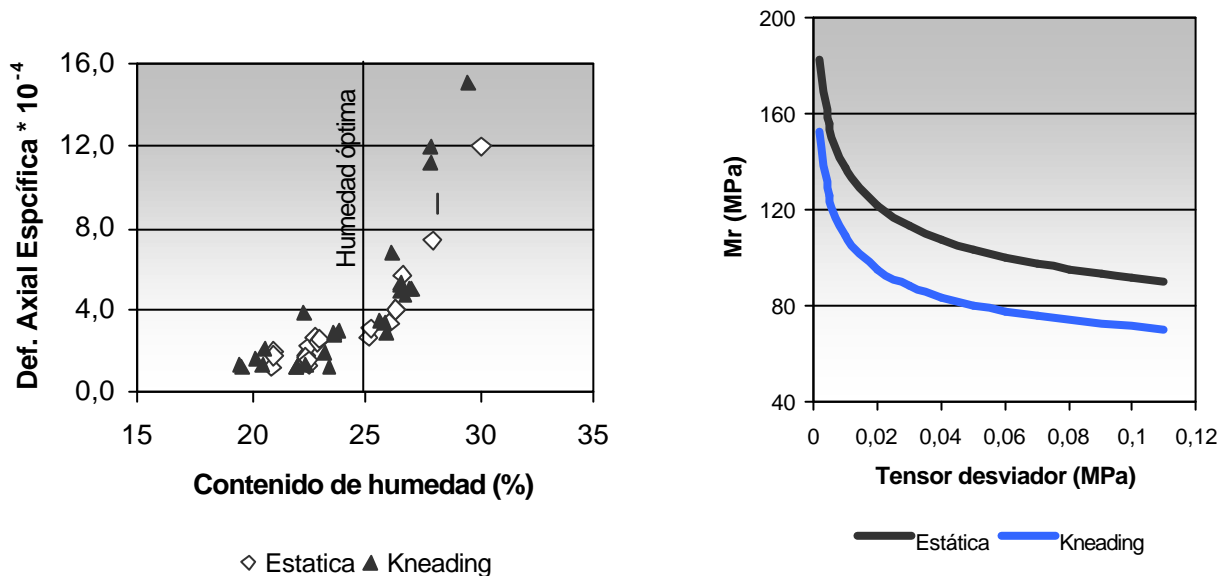


Fig. N° 6 y 7: Influencia del método de compactación sobre la deformación y el módulo resiliente de suelos cohesivos.

3. Humedad y densidad de compactación:

En general, en los suelos finos cohesivos, un incremento del contenido de humedad para una misma densidad de compactación prefijada se traduce en una disminución del módulo resiliente; la magnitud de esta variación depende del cambio del contenido de humedad y del método de compactación empleado.

La Figura 8 muestra la variación de la deformación resiliente axial (lo que puede ser interpretada como la inversa del módulo resiliente para un tensor desviador aplicado igual a la unidad) en función de la densidad seca de las probetas para distintos contenidos de humedad,

observándose inicialmente una leve disminución de la deformación resiliente axial respecto al aumento de la densidad seca seguida de un rápido incremento de la deformación resiliente axial para mayores valores de la densidad seca de las muestras (VII).

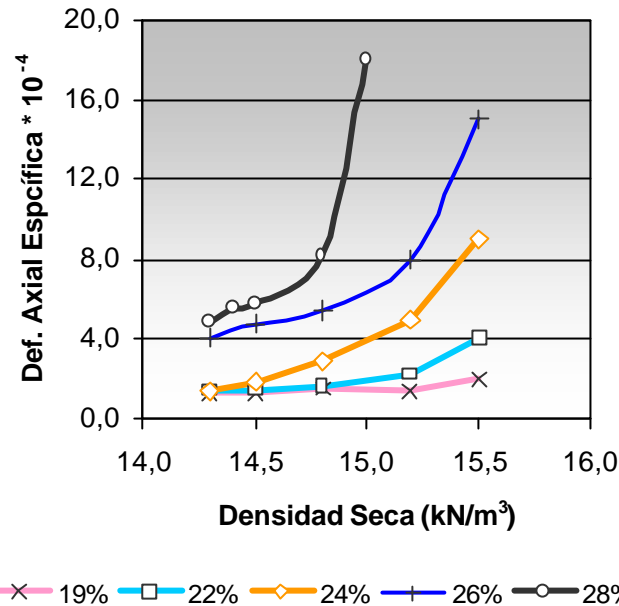


Fig. N° 8: Influencia de la densidad seca sobre la deformación resiliente para distintos contenidos de humedad

III.2. FACTORES QUE INFLUENCIAN EL COMPORTAMIENTO RESILIENTE DE MATERIALES GRANULARES NO TRATADOS (VI, X)

III.2.1. FACTORES DE CARGA:

1. Intensidad de la sollicitación aplicada:

Al igual que en los suelos cohesivos, una variación en las tensiones aplicadas producen un cambio en los resultados del módulo resiliente, pero en los materiales granulares es mayor la influencia de la presión de confinamiento σ_3 que la que ejerce la magnitud del tensor desviador pulsante (IX, X).

2. Duración del ciclo de carga:

La influencia de la duración del ciclo de carga sobre el módulo resiliente no está bien definida ya que en algunos casos se ha informado que el módulo resiliente aumenta alrededor del 20% cuando disminuye el tiempo de aplicación del tensor desviador pulsante para una magnitud constante del mismo, mientras que en otros casos no se han registrado diferencias sustanciales (VI, IX y X).

III.2.2. FACTORES DE SERVICIO:

1. Densidad y grado de saturación de la muestra:

un aumento en el grado de saturación o en la humedad de moldeo influyen notablemente en el valor del módulo resiliente. La Figura 9, que presenta un conjunto de resultados típicos obtenidos para distintos materiales granulares, muestra la variación del módulo resiliente para probetas compactadas con diferentes densidades y distintos porcentajes de humedad.(IX)

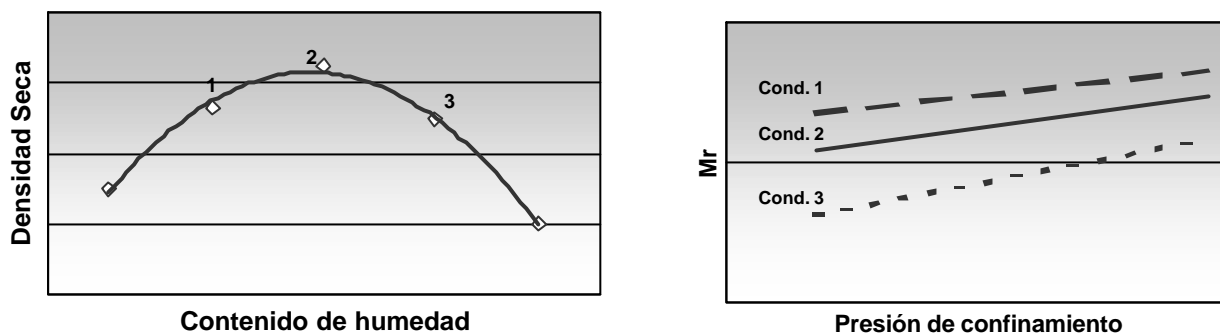


Fig. N° 9: Influencia de la humedad de moldeo y el grado de saturación sobre el Módulo Resiliente.

IV. DESARROLLO EXPERIMENTAL EFECTUADO

Con el objeto de llevar a cabo las determinaciones experimentales, se ha diseñado y construido en el Laboratorio Vial del IMAE un equipo de ensayos triaxiales dinámicos con cargas repetidas desarrollando los dispositivos de aplicación de solicitaciones y los sistemas de medición y registro de los parámetros experimentales. A partir de su etapa de puesta a punto, se ha analizado un suelo de la Región Litoral de la Argentina y una mezcla de este suelo con arena del Río Paraná habiéndose obtenido valores del módulo resiliente para condiciones variadas de confección de las muestras. Estos resultados experimentales son los primeros determinados en nuestro país con orientación al diseño estructural de pavimentos.

IV.1. DISPOSITIVOS EXPERIMENTALES

El prototipo desarrollado está constituido por:

- Un sistema de control y aplicación de cargas.
- Un sistema de procesamiento, medición y registro de las variables del ensayo.
- Una célula triaxial.

a. Sistema de control y aplicación de cargas

El sistema de carga que provoca el tensor desviador pulsante es del tipo neumático similar al utilizado para la determinación de la vida de fatiga y el módulo dinámico de mezclas asfálticas. (I, II)

El fluido utilizado para conseguir la presión de confinamiento en la célula triaxial es aire comprimido que permite ubicar los elementos de medición de cargas y deformaciones en el interior de la misma.

b. Sistema de procesamiento, medición y registro

La magnitud de la fuerza desviadora pulsante es medida por una celda de carga a gauges resistivos que emite una señal eléctrica proporcional a la solicitación aplicada. Esta señal, es derivada de 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. (Fotografía N° 1)

Los sensores de deformación emiten una señal eléctrica, la que es procesada por un puente extensométrico y derivada al registrador gráfico automático.

c. Célula triaxial

Esta célula es similar a las celdas standard excepto en lo que respecta a sus mayores dimensiones (diámetro externo 200 mm. y 450 mm. de altura) y a las conexiones externas para los transductores y la presión de confinamiento (Fotografía 2).



Fotografías 1 y 2: Detalles de la célula triaxial y los captore de deformación.

IV.2. MATERIALES UTILIZADOS Y ELABORACION DE MUESTRAS:

Los materiales empleados han sido un suelo de la zona próxima a la ciudad de Rosario (Pcia. de Santa Fe - Argentina) y una mezcla de 50% de este mismo material con 50% de arena de Río Paraná redondeada mediana.

Las características de estos materiales son:

	LL	LP	IP	CLAS. HRB	ENSAYO COMPACTACION		VALOR SOPORTE CBR.	
					DENS. SECA MAX.	H. OPT.	EMBEBIDO	SIN EMB.
SUELO SOLO	41.0 %	26.0 %	15.0 %	A-7-6 (10)	1.622 g/cm ³	22.5%	5%	27%
SUELO-ARENA 50%-50%	21.8 %	11.8 %	10.0 %	A-4 (3)	1.840 g/cm ³	14.4%	19%	21%

Las probetas utilizadas para llevar a cabo los ensayos triaxiales dinámicos han sido confeccionadas a densidad prefijada por compactación estática a doble pistón en tres capas para condiciones dadas de densidad seca y humedad de moldeo, resultando probetas de 72,2 mm de diámetro y alturas de 150 mm aproximadamente.

Las condiciones de densidad seca y humedad de moldeo han sido seleccionadas de manera de obtener muestras con contenidos de humedad menores, iguales y mayores a la humedad óptima

y densidades secas comprendidas entre el 96% y el 100% de la densidad seca máxima del ensayo de compactación de referencia, habiéndose confeccionado alrededor de 18 probetas de cada uno de los materiales analizados.

IV.3. PROGRAMA DE ENSAYOS:

Se ha seguido, en todo lo que fuera posible, la metodología de ensayos establecida por la Norma AASHTO N° T-274/82 "Método standard de ensayo para módulo resiliente de suelos de subrasante", la que en forma general establece un programa de cargas correspondientes a una etapa inicial de acondicionamiento seguida del ensayo propiamente dicho en el cual se determinan los valores del módulo resiliente del material considerado, para diferentes condiciones de tensores desviadores aplicados y presiones de confinamiento actuantes.

La etapa previa de acondicionamiento tiene por objeto estabilizar las deformaciones, corregir defectos de superficie en el contacto entre cabezales y muestra y eliminar los efectos que influyen en los resultados finales respecto al tiempo transcurrido entre la confección de la muestra y la aplicación del estado tensional vinculados a las propiedades tixotrópicas del material estudiado.

IV.4. RESULTADOS OBTENIDOS:

De acuerdo con los dispositivos de medición y registro de los parámetros experimentales y de la metodología de ensayos seguida, se obtienen los registros continuos de la variación de la fuerza desviadora aplicada y la deformación inducida, medida a través del desplazamiento relativo entre las abrazaderas que soportan los transductores de deformación respecto del tiempo.

A partir de ellos se calculan el tensor desviador aplicado σ_d y la deformación específica axial resiliente ϵ_r como:

$$s_d = \frac{F}{A} \quad e_r = \frac{\Delta h_r}{b} \quad \text{y luego:} \quad Mr = \frac{s_d}{e_r}$$

donde:

F: fuerza desviadora aplicada; A: sección transversal de la probeta; Δh_r : desplazamiento relativo resiliente o reversible de las abrazaderas que soportan los transductores de deformación; b: base de medida entre las abrazaderas-soportes; Mr: módulo resiliente del material considerado para una dada presión de confinamiento σ_3 aplicada.

En las tablas 1 y 2 del Anexo I se presentan la totalidad de los resultados experimentales obtenidos para ambos materiales analizados. En ellas se muestra:

- la identificación de la muestra
- la densidad seca y el contenido de humedad de la misma
- los diferentes valores del módulo resiliente para distintas condiciones de tensores desviadores aplicados y presiones de confinamiento actuantes.

Además, para la mezcla suelo-arena, se presentan los valores del primer invariante de tensiones θ el que puede ser considerado como una variable conjunta del tensor desviador y la presión de confinamiento aplicados en cada caso y que es definido como:

$$\begin{aligned} q &= s_1 + 2s_3 \\ s_d &= s_1 - s_3 \\ q &= s_d + 3s_3 \end{aligned}$$

V. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El siguiente análisis corresponde a los dos materiales utilizados, los que han sido identificados como SUELO SOLO y SUELO-ARENA 50%-50%.

V.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA EL SUELO SOLO

1. La totalidad de los valores de módulo resiliente determinados están comprendidos dentro de un rango que va desde los 100 a los 700 Mpa.

Estos resultados aparentemente elevados corresponden a probetas en condición no saturada.

2. Las curvas que muestran la variación del módulo resiliente en función del tensor desviador aplicado, presentan una tendencia única con una disminución inicial y un posterior aumento del módulo resiliente respecto al crecimiento del tensor desviador como se indica en la Figura N° 10. Esta tendencia se corresponde con la indicada en la bibliografía.

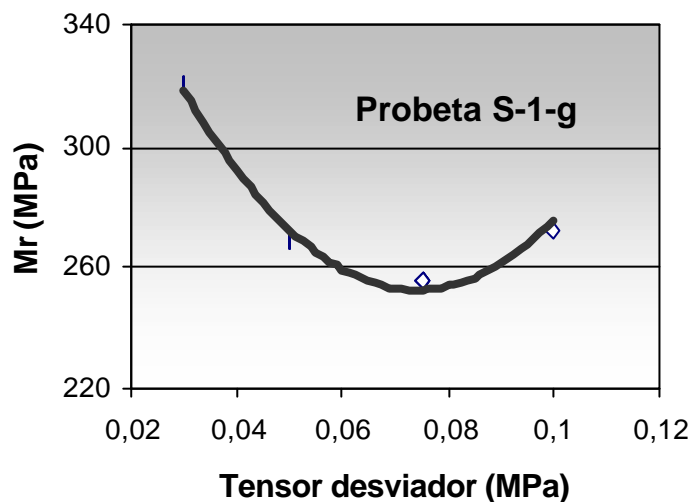


Fig. N° 10: Variación del Mr respecto al tensor desviador aplicado.

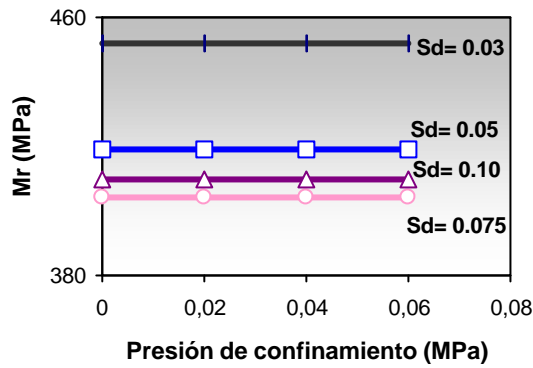
Dentro del rango de tensores desviadores empleados, se observan los valores del módulo resiliente más altos para la condición de tensor desviador aplicado de 0.03 MPa, mientras que los valores mínimos corresponden a valores de σ_d comprendidos entre 0.050 y 0.075 MPa. El valor mínimo del Mr es aproximadamente el 90% del valor máximo.

3. Los valores del módulo resiliente determinados no son en general dependientes de la presión de confinamiento σ_3 como se muestra en la Figura N°11 donde los gráficos de variación del Mr respecto de la presión de confinamiento resultan rectas paralelas al eje de las abscisas.

4. El contenido de humedad de las probetas ejerce una influencia apreciable sobre los resultados del módulo resiliente, observándose menores valores de éste para contenidos mayores de humedad. Adoptando como ley de variación una función lineal del tipo:

$$Mr = A' + B' \cdot \text{Humedad (\%)}$$

los coeficientes de regresión R son vecinos al 85%.



Probeta S-7-b

Fig. N° 11: Variación del Mr en función de la presión de confinamiento.

Los coeficientes A' y B' se mantienen aproximadamente constantes respecto a la variación de los tensores desviadores pudiéndose adoptar como valores medios los siguientes:

$$Mr = 2,6 \cdot 10^4 - 1,1 \cdot 10^3 \cdot \text{Humedad (\%)}$$

5. La variación del Mr en función de la densidad seca de las probetas no corresponde a una tendencia única definida.

En el caso de algunas probetas compactadas con contenidos de humedad muy próximos al óptimo de compactación pero para diferentes densidades secas, se observa que el módulo resiliente aumenta primero respecto al aumento de la densidad seca para disminuir luego para densidades del orden de la máxima del ensayo de compactación de referencia para los tensores desviadores iguales a 0.030 y 0.075 MPa.

6. La Figura N° 12 muestra como ejemplo la variación del módulo resiliente, para el tensor desviador aplicado igual a 0.030 MPa, en función del Grado de Saturación Sr de las probetas ensayadas.

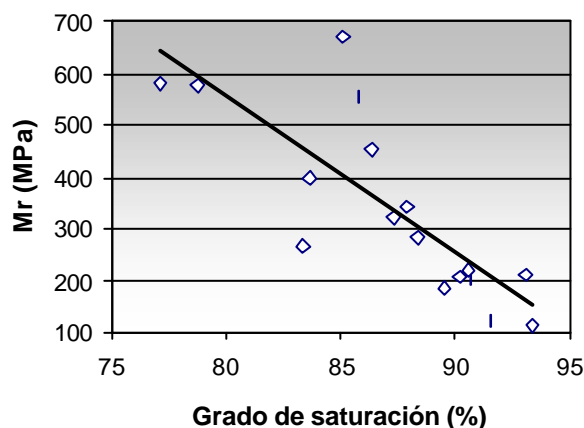


Fig. N° 12: Variación del Mr respecto al Grado de Saturación de las muestras

El Grado de Saturación Sr es una variable simultánea del contenido de humedad y la densidad seca, resultando si se adopta como ley de variación una función lineal del tipo:

$$Mr = A'' + B'' \cdot Sr (\%)$$

coeficientes de regresión R del orden del 80% mostrando una disminución del módulo resiliente para grados de saturación crecientes.

Casi todas las probetas ensayadas presentan grados de saturación superiores al 80% para las cuales el método apropiado de compactación establecido por la Norma AASHTO N° 274/82 sería el de amasado por "Kneading" por lo que se ha efectuado recientemente su implementación en nuestro Laboratorio. No obstante en los ensayos aquí comentados se ha utilizado como método de compactación el estático a doble pistón debido a que era el único disponible.

7- El valor del módulo resiliente es a veces estimado mediante un método empírico e indirecto a partir del Valor Soporte in-situ del material en estudio y los resultados provenientes de ensayos dinámicos también in-situ mediante la relación:

$$Mr = 5 \text{ a } 20 \text{ VSR}$$

Cuando no es posible disponer de determinaciones in-situ del Valor Soporte, la estimación puede ser hecha a partir de resultados de laboratorio sobre probetas compactadas a la humedad y densidad apropiada.

La aplicación del método indirecto a partir de los valores soportes determina dos permite estimar:

$$Mr = 135 \text{ a } 540 \text{ MPa}$$

según se haya considerado la condición embebida o sin embeber.

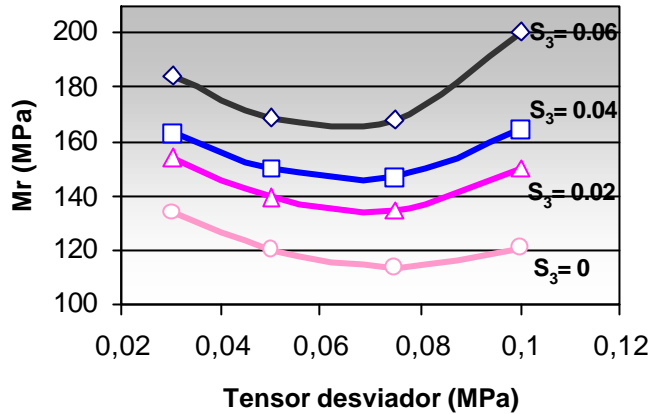
Los valores del módulo resiliente determinados directamente quedan comprendidos dentro de este entorno por cuanto se ha obtenido un valor medio de:

$$Mr = 210 \text{ MPa}$$

para probetas compactadas en condiciones similares a las utilizadas para la muestra destinada al ensayo de Valor Soporte.

V.2. ANALISIS DE RESULTADOS PARA EL SUELO-ARENA 50%-50%

1. Todos los valores determinados del módulo resiliente quedan comprendidos en un rango que va de los 30 a 300 MPa.
2. Las curvas que muestran la variación del módulo resiliente en función del tensor desviador aplicado, presentan en general una disminución inicial y un posterior aumento del Mr respecto al crecimiento del tensor desviador para todas las presiones de confinamiento. El valor mínimo del módulo resiliente es aproximadamente el 80% del valor máximo dentro del rango de tensores desviadores aplicados y para todas las presiones de confinamiento. (Figura N° 13)
3. Para todas las probetas ensayadas y para todos los σ_d utilizados, la presión de confinamiento ejerce influencia sobre los resultados del módulo resiliente, obteniéndose en casi todos los casos, mayores valores de este último en correspondencia con las mayores presiones de confinamiento.



Probeta SA-3

Fig. N° 13: Variación del Mr respecto al tensor desviador aplicado para las distintas presiones de confinamiento.

La variación del Mr en función de la presión de confinamiento responde a funciones lineales del tipo:

$$Mr = A_1 + B_1 \cdot \sigma_3$$

donde la pendiente B_1 resulta aproximadamente constante para todos los casos pudiéndose considerar un valor medio $B_1 = 750$.

4. El contenido de humedad de las probetas ejerce influencia sobre los resultados del módulo resiliente observándose una disminución de éste respecto al aumento de la humedad de las muestras.

Si se consideran leyes lineales de variación del tipo:

$$Mr = A_2 + B_2 \cdot \text{Humedad (\%)}$$

se obtienen coeficientes de correlación vecinos al 80% para todos los tensores desviadores y presiones de confinamiento aplicadas.

5. Para la mezcla SUELO-ARENA 50%-50%, los resultados del módulo resiliente pueden ser definidos en función del primer invariante de tensiones θ según la relación:

$$Mr = A_3 \cdot \theta^{B_3}$$

Un análisis de regresión de acuerdo a la expresión propuesta para los resultados de módulo resiliente y los valores del primer invariante de tensiones, permite obtener coeficientes de correlación comprendidos entre el 60 y 96%.

La Figura N° 14 presenta la variación del coeficiente B_3 respecto al contenido de humedad de las muestras ensayadas. El incremento de este coeficiente respecto al incremento de la humedad muestra que las probetas confeccionadas con más altos contenidos de humedad presentan módulos resilientes que son más influenciados por el estado de tensiones considerado como una variable simultánea del tensor desviador aplicado y la presión de confinamiento.

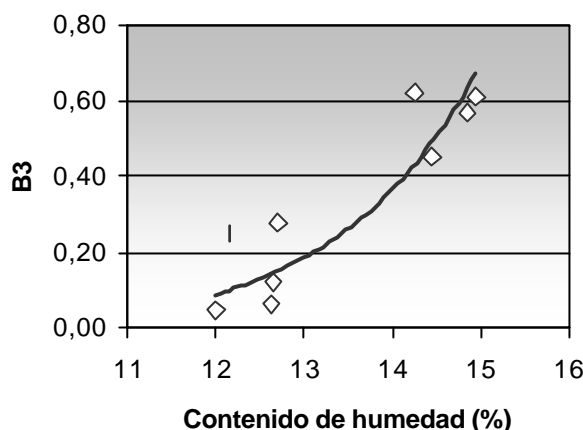


Fig. N° 14: Variación del coeficiente B_3 respecto al contenido de humedad

6. Al igual que para suelos cohesivos, el valor soporte relativo permite una estimación indirecta del módulo resiliente considerando que:

$$Mr = 5 \text{ a } 20 \text{ VSR}$$

A partir de los Valores Soportes Relativos obtenidos para la mezcla SUELO-ARENA en condición embebida y sin embeber, es posible estimar:

$$Mr = 100 \text{ a } 400 \text{ MPa}$$

Para el caso de probetas elaboradas en condiciones similares a las correspondientes a la muestra destinada al ensayo de Valor Soporte, se han obtenido mediante el ensayo triaxial dinámico, valores comprendidos entre 34 y 75 MPa por lo que en este caso el método indirecto de estimación sobrevalora las propiedades resilientes del SUELO-ARENA.

7. El análisis de la variación del Mr respecto a la densidad seca de las muestras analizadas no permite establecer tendencias definidas.

VI. CONCLUSIONES:

1. Se ha desarrollado y puesto a punto un equipo de ensayos triaxiales dinámicos con cargas repetidas, apto para la determinación de módulos resilientes de suelos con buena sensibilidad para detectar variaciones en las características de moldeo de las muestras y en el estado de sollicitaciones aplicado traducida en resultados diferentes en cada caso.
2. Los valores obtenidos son los primeros que se han determinado en Argentina orientados al diseño estructural de pavimentos, habiéndose analizado un suelo de la Región Litoral de nuestro país y una mezcla de éste con arena del Río Paraná.
3. Se ha continuado en la línea de trabajo tendiente a caracterizar dinámicamente materiales viales con el objeto de establecer parámetros útiles para el diseño de pavimentos sobre la base de la teoría de sistemas multicapas elásticos.
4. Los resultados obtenidos, correspondientes a variadas condiciones de tensores desviadores y presiones de confinamiento aplicadas pueden ser aplicados también en métodos de resolución basados en sistemas elásticos no lineales o el método de los elementos finitos.

5. Los valores determinados observan en general una buena correlación con tendencias similares a las citadas por la bibliografía en estudios sobre materiales de parecidas características.

6. Los dispositivos y técnicas desarrolladas permitirán efectuar estudios tendientes a valorar la influencia del método de compactación, la posible saturación de las muestras y la relación entre el módulo resiliente determinado directamente y otros medios de caracterización de suelos comúnmente utilizados tales como su clasificación y la determinación del valor soporte relativo VSR.

BIBLIOGRAFIA:

I. "Resistencia a la fatiga de mezclas asfálticas en ensayo de tracción indirecta". J. Tosticarelli, F. Martínez y S. Angelone. Segundo Congreso Latinoamericano del Asfalto. 1983. Mar del Plata, Argentina.

II. "Determinación del módulo dinámico (stiffness) de mezclas asfálticas utilizadas en pavimentos de la Región Litoral". J. Tosticarelli, F. Martínez y S. Angelone. Tercer Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. Cartagena, Colombia. 1985.

III. "Caracterización de materiales tratados con ligantes hidráulicos. Su aplicación al dimensionamiento de pavimentos flexibles". H. Poncino, G. Coirini y R. Cassan. IV Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. México. 1987.

IV. "Aplicación de minicomputadoras al análisis de estructuras multicapas. Modelización y ajuste a condiciones regionales. O. Giovanon, M. Pagola y J. Tosticarelli. Tercer Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto" Cartagena, Colombia. 1985.

V. "Shell pavements design manual 1978".

VI. "Prediction of pavements deflections from laboratory test". Monismith, Seed, Mitry and Chan. Proceeding Univ. Michigan 1967. International Conference of the structural design of asphalt pavements.

VII. "Resilience characteristics of subgrades soils and their relation to fatigue failures in asphalt pavements". Seed, Chan and Lee. Univ. of Michigan. Proceeding of the International Conference of the structural design of asphalt pavements. 1962.

VIII. "Resilience testing of unstabilized soils". Special report 162.

IX. "Características resilientes de solos em estudos de pavimentos". Jacques de Medina, Ernesto Preussler. Solos e rochas, Vol. 3 N° 1. 1980.

X. "Resilient response of granular materials subjeti to time dependent lateral stresses. Allen a M. Thompson. TRR 510. Soil Mechanics. TRB 1974.

Anexo I

PROBETAS	ω	σ_3 γ_d	$\sigma_d = 0.030$				$\sigma_d = 0.050$				$\sigma_d = 0.075$				$\sigma_d = 0.10$			
			0.00	0.02	0.04	0.06	0.00	0.02	0.04	0.06	0.00	0.02	0.04	0.06	0.00	0.02	0.04	0.06
			S-1-f	21.34	1.616		282				252				241			
S-1-g	21.08	1.616		320				269				256				272		
S-1-d	22.33	1.620		212				205				201				208		
S-1-e	22.20	1.607		202				195				191				198		
S-2-a	22.37	1.549		265				254				245				243		
S-2-b	22.32	1.584		344				338				333				332		
S-2-c	22.05	1.586		397				397				398				403		
S-7-b	21.19	1.606		452				419				404				410		
S-7-a	21.45	1.628		220				221				225				236		
S-5-a	20.83	1.612		556				547				546				623		
S-5-b	20.74	1.610		672				604				551				593		
S-3-a	19.51	1.600		578				542				513				540		
S-3-b	19.34	1.592		582				568				561				573		
S-6-a	24.00	1.576		112				107				106				110		
S-6-c	23.70	1.572		122				112				105				102		
S-4-a	23.16	1.577		206				210			215	220	224	224	230	243	250	256
S-4-b	23.24	1.570		184				168				159				169		

Tabla N°1: Resultados experimentales para el SUELO SOLO (Mpa)

PROBETAS	ω	σ_3 θ γ_d	$\sigma_d = 0.030$				$\sigma_d = 0.050$				$\sigma_d = 0.075$				$\sigma_d = 0.10$			
			0.00	0.02	0.04	0.06	0.00	0.02	0.04	0.06	0.00	0.02	0.04	0.06	0.00	0.02	0.04	0.06
			0.030	0.090	0.150	0.210	0.050	0.110	0.170	0.230	0.075	0.135	0.195	0.255	0.100	0.160	0.220	0.280
SA-4-a	12.63	1.802	212	210	210	203	168	174	174	190	132	146	150	179	124	150	157	180
SA-4-b	12.64	1.811	164	182	182	177	137	157	165	166	122	140	153	162	135	147	165	177
SA-1-b	14.45	1.843	36	48	62	72	34	45	56	68	38	47	58	68	46	53	63	75
SA-5-c	14.24	1.825	33	44	62	77	30	43	59	72	33	47	60	75	40	55	66	85
SA-1-a	14.94	1.813	35	61	86	94	38	49	68	85	70	80	114	160	-	-	-	-
SA-5-a	15.63	1.812	37	54	66	90	33	48	66	88	36	52	75	96	53	76	104	136
SA-5-b	15.15	1.788	30	50	69	87	30	46	68	86	42	57	78	95	62	77	94	110
SA-1-c	12.69	1.842	77	94	113	120	69	81	96	104	64	73	84	92	72	80	87	98
SA-3	12.16	1.781	134	154	163	184	120	140	150	169	114	135	147	168	121	150	165	200
SA-3-b	12.00	1.780	278	315	276	294	258	281	268	280	240	255	262	273	247	253	268	280
SA-2-a	14.96	1.774	45	73	90	108	42	75	85	104	42	60	83	104	49	66	90	113
SA-2-b	14.86	1.771	48	74	101	116	45	65	89	103	43	60	79	94	48	66	80	102

Tabla N° 2: Resultados experimentales para el SUELO-ARENA 50%-50% (Mpa)