



## JORNADAS DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA 2010

### IMPLEMENTACIÓN DEL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE EN BASES GRANULARES PARA PAVIMENTOS

**Ing. Mónica Jiménez Acuña**

*Unidad de Investigación en Infraestructura Vial (UI)  
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales  
Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio,  
San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica  
Tel: (506) 2511-4965  
E-mail: [monica.jimenez@ucr.ac.cr](mailto:monica.jimenez@ucr.ac.cr)*

#### RESUMEN:

En Costa Rica se utiliza un método empírico de diseño de pavimentos, donde se usa el resultado de CBR para los materiales granulares para predecir el módulo resiliente. Se ha encontrado que estos materiales presentan un comportamiento no lineal dentro de la capa base, y se han desarrollado varios modelos para la predicción del módulo, el cual depende de los esfuerzos y las deformaciones dentro de la capa de base. El propósito del proyecto fue implementar el ensayo triaxial AASHTO T 307 para determinar el módulo resiliente de materiales granulares. Se estudiaron cinco fuentes de materiales para obtener la rigidez bajo dos condiciones de densidad y humedad para cada material, se logró implementar con éxito el ensayo. Además, los resultados fueron analizados utilizando la técnica estadística de regresión lineal múltiple para obtener el modelo que mejor explica el comportamiento, se encontró que el modelo recomendado por la nueva Guía Mecánica-Empírica fue el que mostró la mejor correlación en el ajuste cuando se presenta mayor cantidad de agua mientras que, para la condición más seca y mayor compactación, el modelo que mejor se ajustó fue el modelo de Seed donde el módulo se ve solamente influenciado por los esfuerzos principales.

#### ABSTRACT:

In Costa Rica, the empirical design method is the most used, where the CBR result for unbound granular materials is used to predict the resilient modulus. In recent studies, these materials presented a non linear behavior in the base layer, different authors developed mechanistic models based on the stresses and deformations inside the pavement, to predict the stiffness and determine the thickness of the layers. The purpose of this project is to implement the triaxial test AASHTO T 307 to determine the resilient modulus on granular materials. Thus, five different aggregate sources were tested under two conditions of density and water content for each one. The tests were carried out successfully. As a result, the data was analyzed using multiple lineal regressions as a statistic technique, to obtain the best models. The Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (M-E PDG) model showed the best correlation in the adjustment for higher water contents, on the other hand, the Seed model correlated better for dryer conditions and higher compactions.

#### PALABRAS CLAVES:

Módulo resiliente, bases granulares, pavimentos.



## INTRODUCCIÓN

Debido al bajo costo de los materiales granulares en Costa Rica existen gran cantidad de caminos a lo largo y ancho del territorio construidos con estos materiales, que son tomados por facilidad, de zonas cercanas del sitio de compactación, dándose así gran variedad de fuentes de materiales, desde rocas quebradas de tajo como gravas de río hasta materiales tipo lastre de baja calidad.

Dentro del diseño estructural del pavimento es importante considerar los siguientes factores: tipo y calidad de materiales a ser utilizados, cargas a las cuales el pavimento será sometido en su vida útil, el clima tropical húmedo que impera en la mayoría del territorio, pues esto afecta las consideraciones ambientales a tomar en cuenta a la hora del diseño del pavimento, ya sea para la colocación de drenajes u otros sistemas para la evacuación del agua. Las condiciones de congelamiento no tienen que ser consideradas en el diseño pues el país no sufre esta condición tan crítica que se da en otros países.

A lo largo del tiempo, en Costa Rica se han adoptado métodos empíricos de diseño basados en los resultados de CBR (California Bearing Ratio) para los materiales granulares. Sin embargo, en años recientes se han dado cambios en la tecnología de pavimentos, donde se han aceptado métodos mecanísticos o estructurales debido a la introducción de nuevas técnicas de construcción, alternativas de materiales y procesos.

Lo que está conduciendo a cambiar el criterio de CBR de la subrasante por el criterio de esfuerzos-deformaciones que se podrían presentar dentro de las capas del pavimento. Esta transición ha sido difícil pues la contribución de las capas granulares al desempeño de todo el pavimento se ha asumido como un valor fijo y tampoco se han considerado las características de deformación permanente de las capas granulares.

Es por lo expuesto anteriormente, que con este proyecto de implementación se pretende introducir al país dentro de las nuevas corrientes de diseño que tratan de explicar de una manera más realista el comportamiento de los pavimentos.

## OBJETIVO GENERAL

Implementar el ensayo AASHTO T 307 Método de ensayo estándar para determinar el módulo resiliente de suelos y materiales granulares en el Laboratorio de Ensayos Dinámicos como método alternativo para la caracterización por CBR de materiales granulares.

## OBJETIVO ESPECÍFICOS

- Implementar el método de ensayo desarrollado para materiales que se encuentran en nuestro medio.
- Obtener las propiedades ingenieriles fundamentales, incluyendo la rigidez, que depende del estado de esfuerzos para los materiales granulares.
- Desarrollar los modelos mecanísticos de comportamiento no lineal de los materiales granulares y permitir una predicción del módulo resiliente de estos materiales dentro del pavimento.



## MARCO TEÓRICO

El módulo resiliente se utiliza para el análisis multicapa, y es una variable muy importante para predecir los esfuerzos resilientes (recuperables), deformaciones y deflexiones dentro de un pavimento flexible. También se puede relacionar con la deformación permanente de materiales sin estabilizar.

Es utilizado actualmente en la Guía de Diseño AASHTO 93 aunque está basado en modelos estadísticos en lugar de los principios de diseño mecánicos. El uso extendido del módulo resiliente en el diseño del espesor de capa indica que es de suma importancia la obtención de valores confiables de esta variable de diseño.

El módulo resiliente es un índice que indica la capacidad de cualquier material para almacenar o absorber energía sin deformación permanente bajo la acción de carga dinámica. Es igual al esfuerzo axial pico repetido dividido entre la deformación axial recuperable que ocurre dentro del espécimen. La deformación axial resiliente es igual a la deformación recuperable a la cual el espécimen se ve sometido cuando es sometido a un pulso, dividida por la distancia axial donde la deformación es medida.

El módulo resiliente se designa como  $M_r$  y se calcula con la siguiente fórmula:

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad [1]$$

donde

$M_r$  = módulo resiliente

$\sigma_d$  = esfuerzo desviador

$\epsilon_r$  = deformación axial recuperable

El módulo resiliente de bases granulares o suelos se puede obtener a través de correlaciones con otras propiedades de los materiales como CBR, a través de valores típicos dependiendo de la clasificación del material, por medio de modelos mecánicos o por medio del ensayo de módulo resiliente en laboratorio.

Anteriormente se utilizaban modelos empíricos que no incluían la dependencia en el estado de esfuerzos, basados en el CBR (California Bearing Ratio). Estos modelos simplistas se han utilizado a lo largo del tiempo hasta que se lograron desarrollar equipos de laboratorio que pueden simular los estados de esfuerzos que se pueden presentar en las capas del pavimento. En la Tabla 1 se presenta un resumen de algunos de estos modelos empíricos.



**Tabla 1.** Modelos para encontrar el Mr a partir del dato de CBR.

Expresión matemática del modelo ( $M_r$ en MPa)	Referencia
$M_r = 10 \cdot CBR$	Método de diseño Shell Heukelom y Foster (1960)
$M_r = 38 \cdot CBR^{0,711}$	Cuerpo de Ingenieros de Los Estados Unidos Green y Hall (1975)
$M_r = 18 \cdot CBR^{0,64}$	TRRL Lister (1987)
$M_r = 21 \cdot CBR^{0,65}$	Consejo de Sudáfrica Ayres (1997)
$M_r = B \cdot CBR$	Guía de Diseño AASHTO 93 con $5,25 < B < 21$ ; $B = 10,5$ para $CBR < 10$
$M_r = 6,5 \cdot CBR^{0,625}$	Colombia Suelos de Bogotá

Fuente: (Recopilación de la autora, 2009).

## MODELOS MECANÍSTICOS

Los materiales granulares sin estabilizar utilizados como bases y subbases en pavimentos flexibles exhiben una dependencia direccional de su rigidez bajo un estado de esfuerzos en particular al cual el material es sometido. Esta dependencia direccional del comportamiento resiliente puede ser representado adecuadamente con funciones exponenciales dependientes del estado de esfuerzos en la capa granular. En la Tabla 2 se resumen los distintos modelos desarrollados por distintos autores.

**Tabla 2.** Modelos para encontrar el Mr de ecuaciones mecanísticas.

Expresión matemática del modelo

Referencia

$$M_r = k_1 \times \left( \frac{\sigma_3}{Pa} \right)^{k_2}$$

*Modelo presión de confinamiento.* Dunlap (1963). Para arenas y gravas en estado seco y saturado bajo carga triaxial dinámica.

$$M_r = k_1 \times \left( \frac{\theta}{Pa} \right)^{k_2}$$

*Modelo K- $\theta$ .* Seed y otros (1967). El módulo resiliente está expresado como una función de los esfuerzos principales. El *primer invariante de esfuerzos*  $\theta$  es igual a la suma de los esfuerzos principales ( $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ ) que actúan en el espécimen. La relación entre  $M_r$  y  $\theta$  es una recta en un gráfico log-log. La desventaja de este modelo es que no toma en cuenta los efectos del esfuerzo cortante.

$$M_r = k_1 \times \left( \frac{\sigma_d}{Pa} \right)^{k_2}$$

*Modelo K- $\sigma_d$ .* Moossazadeh y Witczak (1981). Es un modelo para los suelos cohesivos. Se introduce el esfuerzo desviador  $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ .

$$M_r = k_3 \times \left( \frac{\theta}{Pa} \right)^{k_4} \times \left( \frac{\sigma_d}{Pa} \right)^{k_5}$$

*Modelo May-Witczak.* (1981). Considera al primer invariante de esfuerzos  $\theta$  y el esfuerzo desviador  $\sigma_d$ . El esfuerzo desviador está relacionado directamente con el máximo esfuerzo cortante  $\tau_m$  aplicado al espécimen. ( $\tau_m = \sigma_d / 2$ ).

$$M_r = k_1 \times Pa \times \left( \frac{\theta}{Pa} \right)^{k_2} \times \left( \frac{\tau_{oct}}{Pa} \right)^{k_3}$$

*Modelo esfuerzo cortante octaédrico.* Witczak y Uzan (1985). Considera un cambio en el esfuerzo desviador por el esfuerzo cortante octaédrico. Los esfuerzos fueron normalizados utilizando la presión atmosférica.  $k_1$ ,  $k_2$  y  $k_3$  = constantes propias de cada material  
 $\theta = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ ; Pa = presión atmosférica, y  
 $\tau_{oct}$  = esfuerzo cortante octaédrico que se calcula con la siguiente ecuación

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \times \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

$$M_r = k_1 \times Pa \times \left( \frac{\theta}{Pa} \right)^{k_2} \times \left( \frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{k_3}$$

*Modelo de la Guía de Diseño MEPDG.* (2002) Proyecto 1-28 A NCHRP, aplicable para todos los tipos de materiales no ligados para pavimentos, desde las arcillas más plásticas hasta las bases granulares más limpias, también dentro del software hace una corrección por saturación ligado al módulo de clima.

$$\log\left(\frac{M_r}{Pa}\right) = k_1 + k_2 \log\left(\frac{\theta}{Pa}\right) + k_3 \log\left(\frac{\tau_{oct}}{Pa}\right) + k_4 \left( \log\left(\frac{\tau_{oct}}{Pa}\right) \right)^2$$

*Modelo del Programa de Desempeño a largo plazo de pavimentos (LTPP).* (2002). Es una versión modificada del modelo universal constitutivo.

Fuente: (Recopilación de la autora, 2009).



## IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE ENSAYO AASHTO T 307

### Resumen del Método de Ensayo

En el presente, el único método de ensayo de laboratorio recomendado y disponible para determinar el módulo resiliente de materiales granulares es el método triaxial de carga repetida. El material se somete a una serie de pulsos de carga generados por el paso de los vehículos en el pavimento. El ensayo triaxial se usa para simular estas condiciones que se presentan en el pavimento.

En este ensayo, el material sin estabilizar se somete a una serie de cargas axiales por un periodo muy corto de tiempo y entre cargas se da un periodo de reposo, esto con el fin de simular el paso del tránsito por el pavimento. Al mismo tiempo se aplica una presión de confinamiento constante, que simula los esfuerzos laterales causados por el peso del material que está por encima más las cargas de tránsito. En el laboratorio esta presión de confinamiento se simula a través de aire comprimido dentro de la cámara triaxial.

Actualmente, el método de ensayo para determinar el módulo resiliente en materiales granulares y suelos es el método estándar AASHTO T 307. Las muestras pueden ser especímenes sin estabilizar que pueden tener la densidad natural (extraídos del sitio de compactación) o con la densidad obtenida en el laboratorio (recompactados). En este estudio, primero se compactó un espécimen por cada fuente con la granulometría propia y a un contenido de agua, en el molde de 152 mm de diámetro. Luego se tamizó el material en la malla de 19,0 mm (Nº ¾) y se compactaron 3 especímenes por cada fuente en el molde de 101,6 mm de diámetro.

Una vez compactada la muestra se coloca en la cámara triaxial y el espécimen es sometido a 15 combinaciones distintas de esfuerzos desviadores y presiones de confinamiento, que dan como resultado 15 diferentes valores de módulo para cada muestra. La secuencia de ensayos tiene dos fases, la primera fase es la aplicación de 500 - 1000 ciclos de acondicionamiento al inicio del ensayo con un esfuerzo de confinamiento  $\sigma_3$  de 103 kPa y un esfuerzo desviador de  $\sigma_d$  de 103 kPa. Si la altura del espécimen se sigue reduciendo hay que continuar hasta los 1000 ciclos antes del ensayo. La segunda fase es la aplicación de 100 ciclos de cada una de las 15 secuencias de la Tabla 3.

**Tabla 3.** Secuencia del estado de esfuerzos en el ensayo para materiales de base y subbase.

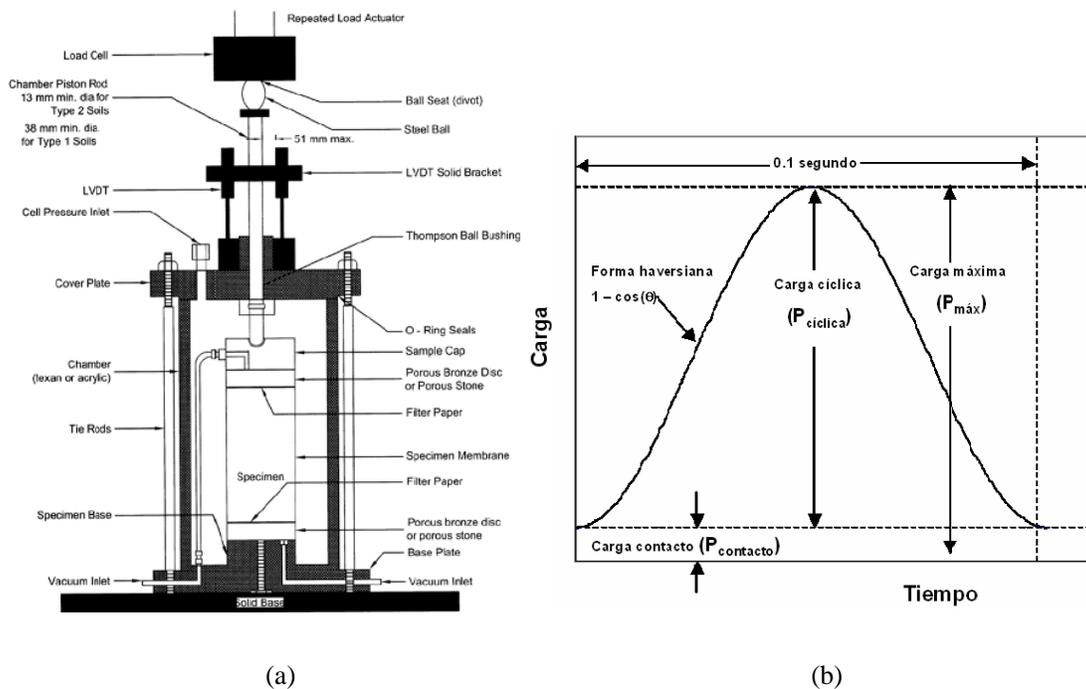
	Esfuerzo confinamiento $\sigma_3$ (kPa)				
	21	35	69	103	138
Esfuerzo desviador $\sigma_d$ (kPa)	21 <sup>1</sup>	35 <sup>4</sup>	69 <sup>7</sup>	69 <sup>10</sup>	103 <sup>13</sup>
	41 <sup>2</sup>	69 <sup>5</sup>	138 <sup>8</sup>	103 <sup>11</sup>	138 <sup>14</sup>
	62 <sup>3</sup>	103 <sup>6</sup>	207 <sup>9</sup>	207 <sup>12</sup>	276 <sup>15</sup>
<sup>i=1-15</sup> Secuencia de ensayo (100 ciclos)					

Fuente: (Tutumluer, 2003).

La cámara triaxial para introducir el espécimen y confinarlo con aire y que sea de policarbonato para poder observar el espécimen durante el ensayo como se muestra en la Figura 1a. La cámara del equipo además posee las extensiones para poder introducir el espécimen de 152 mm de diámetro. Además se tiene un tanque neumático para almacenar aire comprimido y tiene una servoválvula para controlar la presión de aire que tiene que haber en la cámara triaxial. Se necesitan dos transductores de deformación, los cuales se colocan fuera de la cámara triaxial.

El equipo de carga es de carga en la parte superior, de circuito cerrado, electrohidráulico o electropneumático con un generador de funciones capaz de aplicar ciclos de carga repetida con pulsos de forma haversiana con periodos muy cortos de tiempo, 0,1 segundos de carga y 0,9 segundos de reposo como se muestra en la Figura 1b.

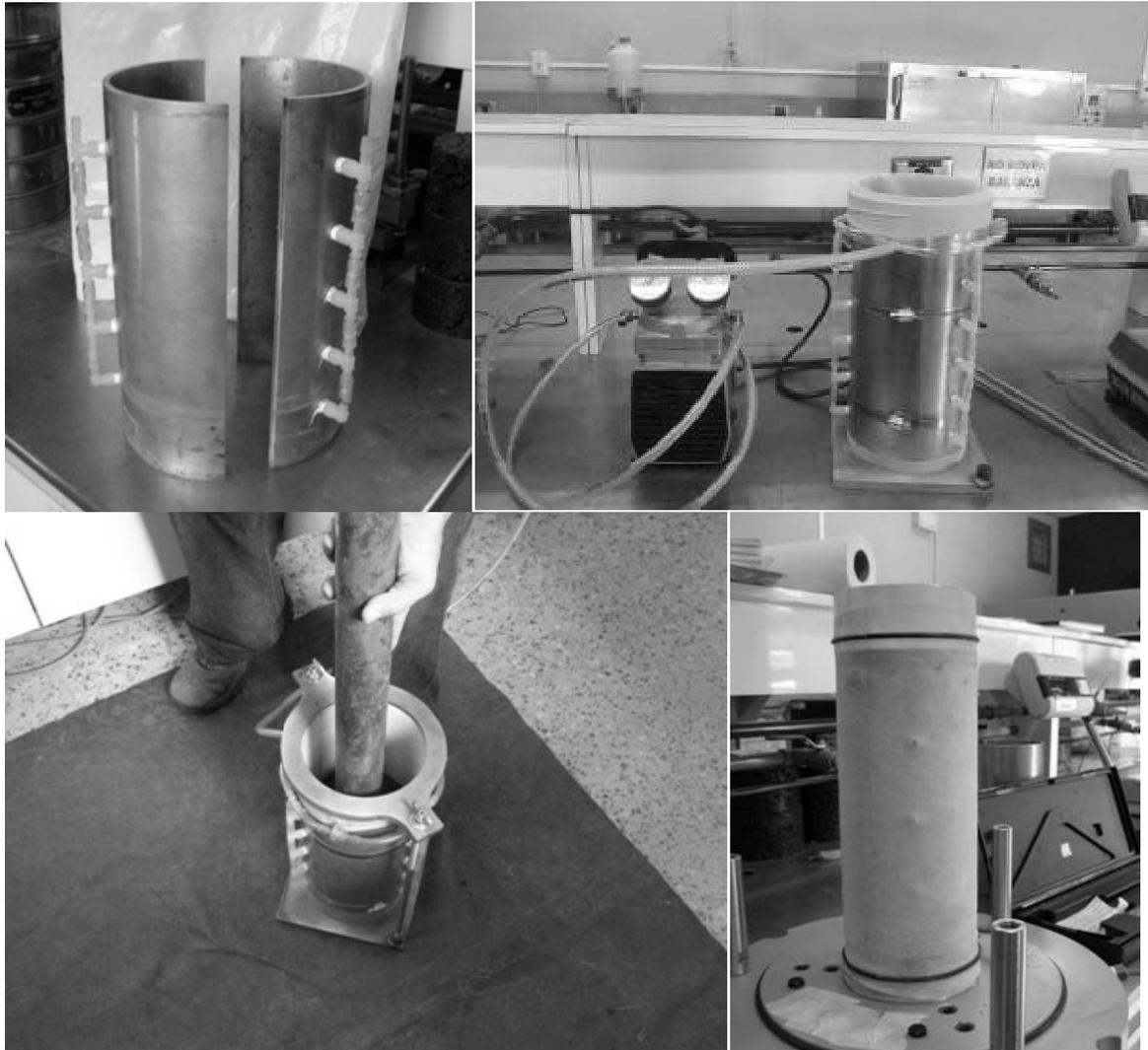
El método AASHTO T 307 define dos tipos de material en los cuales se puede realizar el ensayo. El material Tipo 1 es todo aquel material sin estabilizar que cumpla los siguientes criterios: menos del 70% debe pasar el tamiz de 2,0 mm (N° 10), menos del 20% debe pasar el tamiz de 0,075 mm (N° 200) y un índice de plasticidad de 10 o menos. Este material se debe compactar en el molde de 152 mm de diámetro. El material Tipo 2 es todo aquel material que no cumple con los criterios anteriores y se pueden compactar en moldes de 71 ó 86 mm de diámetro.



**Figura 1.** Configuración del espécimen y carga del método de ensayo AASHTO T 307.

Fuente: (AASHTO T 307, 2003)

*Moldes para la compactación de los especímenes.* Con respecto a este punto, se hicieron dos moldes de 101,6 mm y 152 mm de diámetro con aditamentos para poder compactar las bases dentro de los mismos con membrana por medio de la aplicación de vacío para asegurar que la membrana tiene un contacto total con las paredes del molde. Las dimensiones anteriores se escogieron pues se debe cumplir con el criterio de que el diámetro mínimo debe ser igual a 5 veces el tamaño máximo de partícula. Si el tamaño máximo de las partículas excede en un 25% el tamaño del molde disponible estas partículas deben ser descartadas. La altura del espécimen debe ser 2 veces el diámetro. Estos moldes están separados en el centro para desmoldar los especímenes evitando que se dañen en el proceso de sacar el espécimen del molde (Ver Figura 2).

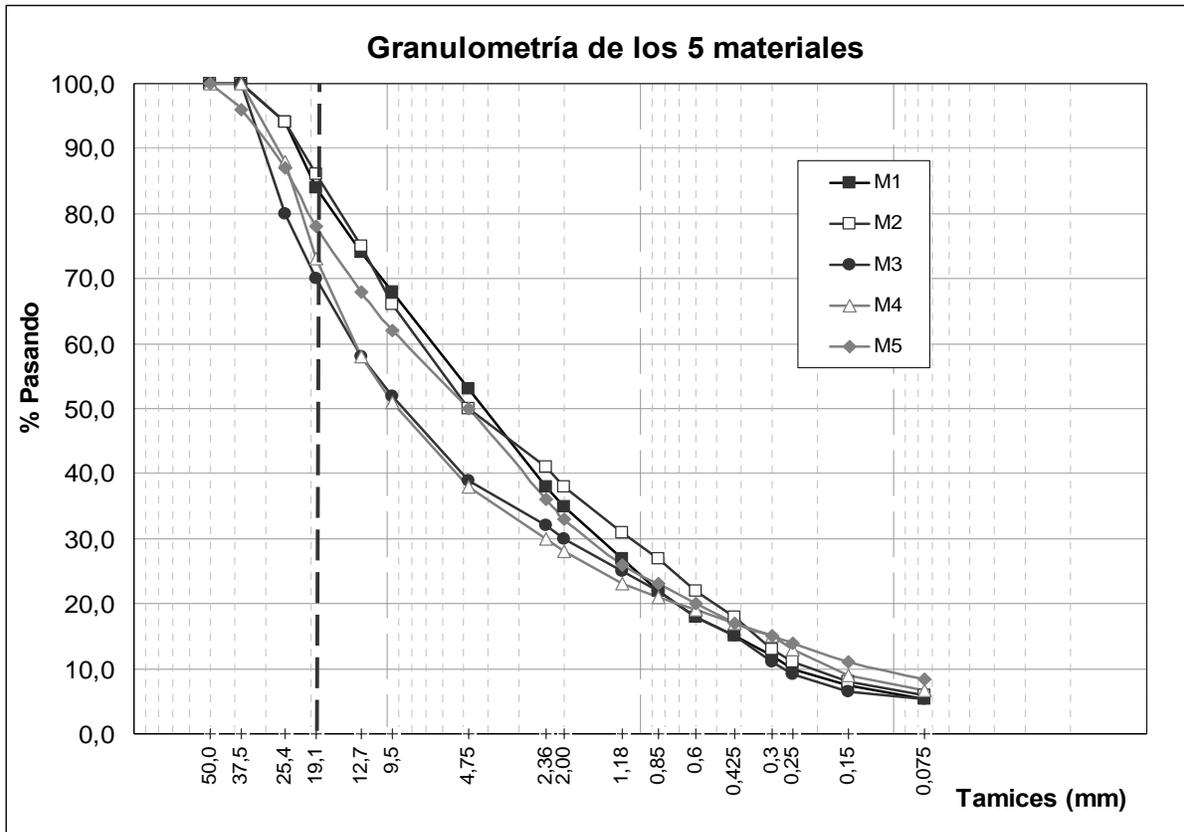


**Figura 2.** Molde para la fabricación de los especímenes de ensayo y espécimen listo para ensayar.  
Fuente: (La autora, 2008)

## RESULTADOS OBTENIDOS

### Granulometrías de los 5 materiales

En cuanto a la caracterización de los materiales los 5 se clasifican como A-3 según la clasificación AASHTO. Todos los materiales cumplen con las especificaciones de calidad para una base granular. Según las granulometrías obtenidas para cada material (Figura 3), cada uno clasifica como material Tipo 1 según el método de ensayo AASHTO T 307. Como clasificaron Tipo 1, los materiales se compactaron en un molde de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura. Además se utilizó el mazo de Próctor modificado para compactar las 5 capas con 56 golpes, esperando con esto alcanzar una buena compactación y que el espécimen no se desmoronara a la hora de desmoldarlo.



**Figura 3.** Granulometrías de los materiales.  
Fuente: (La autora, 2009)

### Densidad y contenidos de agua

Inicialmente, se compactaron especímenes de 150 mm de diámetro para todos los materiales. Se le añadió un contenido de agua a cada uno para alcanzar una buena densidad. Luego de la compactación, los especímenes se sometieron al ensayo de módulo pero ninguno soportó el periodo de acondicionamiento inicial, todos sufrieron una deformación permanente reflejando la poca cohesión de los materiales.

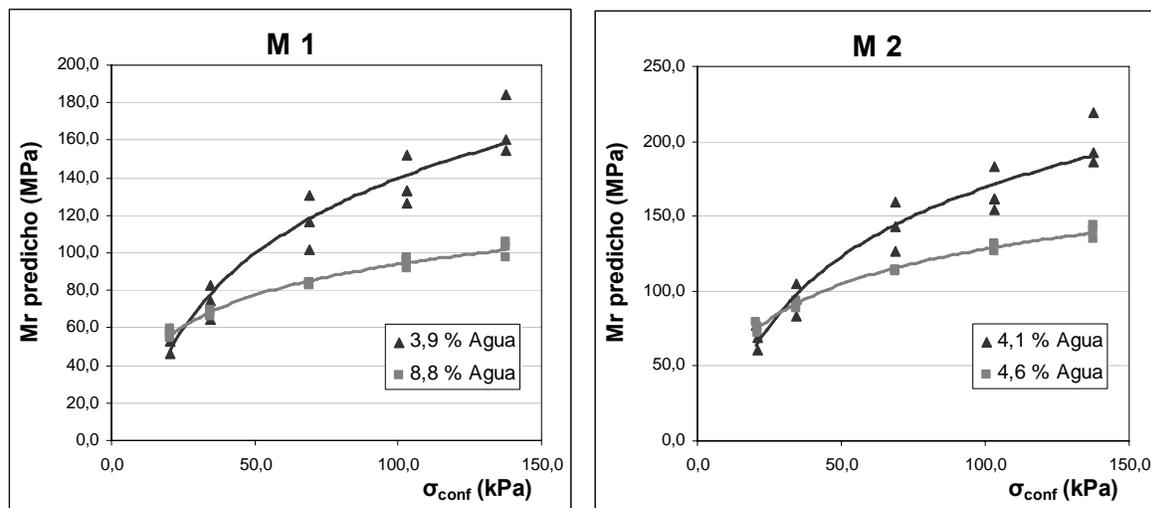
Se decidió descartar el agregado más grueso de 19,0 mm tamiz N° 3/4 (línea punteada en la Figura 3). Por lo tanto, se trabajó con especímenes de 101,6 mm de diámetro y 203 mm de altura aproximadamente. Se estudiaron dos condiciones de humedad y compactación, se realizó el ensayo de Próctor modificado para todos los materiales, descartando el material retenido en el tamiz de 19,0 mm (N° 3/4) de la granulometría original de los materiales, para establecer la densidad máxima seca y el contenido de humedad óptimo, de estos resultados se establecieron los porcentajes de compactación que se resumen en la Tabla 4.

**Tabla 2.** Resumen de resultados de densidad máxima seca, contenido de agua y compactación para todos los materiales.

Material	Condición 1			Condición 2		
	Densidad seca máxima (kg/m <sup>3</sup> )	Contenido de agua (%)	Compactación (%)	Densidad seca máxima (kg/m <sup>3</sup> )	Contenido de agua (%)	Compactación (%)
M1	1744	8,8	95,0	1870	3,9	102
M2	2054	4,6	97,5	2156	4,1	102
M3	2014	6,2	96,1	2128	3,9	102
M4	2121	5,0	99,7	2174	5,7	102
M5	2233	5,0	95,2	2336	7,2	100

### Módulo resiliente

Con este cambio en la granulometría del material, se lograron realizar los ensayos de módulo resiliente para todos los materiales y se ensayaron 6 especímenes por cada material. En la Figura 4 se presenta un ejemplo de los resultados de módulo resiliente predicho en función del esfuerzo de confinamiento.



**Figura 4.** Gráfico de Mr predicho para cada material en función del esfuerzo de confinamiento para los materiales M1 y M2.

Fuente: (La autora, 2009)

Los modelos finales obtenidos para cada material no fueron revisados tomando en cuenta valores de influencia o “outliers”. Como resultado del análisis estadístico el modelo sugerido en la Guía mecánica-empírica para el diseño de pavimentos se estableció como el mejor modelo para la predicción del módulo resiliente para los 5 materiales granulares estudiados en la condición de menor porcentaje de compactación. Donde la ecuación generalizada está dada por:

$$Mr = k_1 \times Pa * \left( \frac{\theta}{Pa} \right)^{k_2} \times \left( \frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{k_3} \quad [2]$$



Los parámetros estimados en la regresión se resumen en la Tabla 5 para cada material. Observando esta tabla el coeficiente  $k_1$  es positivo lo cual es congruente con la teoría pues este parámetro es proporcional al módulo de Young. Cuando los esfuerzos brutos ( $\theta$ ) aumentan se produce el endurecimiento del material lo que produce un mayor módulo resiliente, por lo tanto, el parámetro  $k_2$  debe ser positivo; con los resultados obtenidos podemos observar que los parámetros  $k_2$  obtenidos son consistentes con esta teoría.

En cuanto al parámetro  $k_3$  este debería ser negativo pues al aumentar los esfuerzos de cortante octaédricos se produce el ablandamiento del material, al observar los parámetros obtenidos, todos los  $k_3$  resultaron ser negativos. Lo que hace que el material produzca valores de módulo resiliente menores, podemos observar que los parámetros  $k_3$  obtenidos son consistentes con esta teoría.

**Tabla 3.** Resumen de resultados para los parámetros de la regresión para todos los materiales.

Material	Parámetros estimados			$R^2_{ajustado}$
	$k_1$	$k_2$	$k_3$	
M1	670,8304999	0,4349805	-0,4473813	0,886881
M2	887,8348739	0,4469284	-0,4242848	0,817952
M3	1118,9090847	0,4404963	-0,3111992	0,866519
M4	1231,0619267	0,4608227	-0,2376733	0,931125
M5	1154,8202747	0,5391693	-0,1876631	0,978496

Fuente: (La autora, 2009)

Con respecto a la condición del contenido de agua óptimo no se realizó la prueba para alcanzar el 95% de compactación Próctor por lo que los especímenes ensayados tuvieron un grado de compactación mayor al 100 %. Por esta razón particular se considera que esto es significativo pues al realizar de nuevo el análisis estadístico para escoger el mejor modelo de módulo resiliente, el que mejor correlaciona con los datos es el modelo de  $k$ - $\theta$  desarrollado por Seed:

$$M_r = k_1 \times \left( \frac{\theta}{Pa} \right)^{k_2} \quad [3]$$

Los parámetros estimados en la regresión se resumen en la Tabla 6 para cada material.

**Tabla 4.** Resumen de resultados para los parámetros de la regresión para todos los materiales.

Material	Parámetros estimados		$R^2_{ajustado}$
	$k_1$	$k_2$	
M1	48,9804821267	0,6566123	0,952161
M2	64,2340870114	0,6073287	0,975011
M3	73,8961625054	0,5991649	0,973659
M4	71,6219309704	0,58333157	0,962796
M5	77,1608131355	0,58121113	0,981958

Fuente: (La autora, 2009)



## CONCLUSIONES

1. Se logró implementar el ensayo de módulo resiliente en materiales granulares basados en la norma AASHTO T 307. Con la limitante de la compactación con el martillo Próctor pues no se probaron métodos alternativos de compactación como la estática o la vibratoria recomendadas en la norma AASHTO. Al realizar este estudio también se logró capacitar a los técnicos de laboratorio en la realización del mismo en la Máquina Universal Dinámica.
2. Luego del análisis estadístico de regresión lineal múltiple, para la condición de más contenido de agua y menor compactación, se pudo establecer que el modelo universal constitutivo es el más significativo para poder predecir los módulos resilientes para los materiales estudiados. (Ver Cuadro 5). Para la condición de menos agua y mayor compactación, se pudo establecer que el modelo de Seed es el más significativo para poder predecir los módulos resilientes para los materiales estudiados. (Ver Cuadro 6).
3. El módulo resiliente para estos materiales se ve afectado por el estado de esfuerzos, es decir, el módulo aumenta conforme aumenta el esfuerzo aplicado (Ver Figura 4). Con el análisis de comparación estadístico (ANOVA) podemos concluir que el módulo se ve influenciado por la naturaleza de los agregados, así como también por el peso volumétrico, pues a mayor peso volumétrico mayor módulo para el caso del material M5.
4. El módulo resiliente disminuye para las condiciones de mayor cantidad de agua y menor compactación (materiales M1, M2 y M3) consistente con la teoría, esto porque los esfuerzos de cortante octaédricos se vuelven significativamente más influyentes en el comportamiento de los materiales granulares, de aquí la importancia de una buena compactación y de no sobrepasar el contenido de agua del óptimo de diseño a la hora de construir las capas de base en el pavimento.
5. Para los materiales M4 y M5, el grado de compactación parece no ser tan significativo como sí lo es un mayor contenido de agua, lo que hace la diferencia en el resultado de módulo resiliente, donde se sigue cumpliendo que más agua dentro del material lo debilita.
6. La escogencia del valor adecuado de módulo resiliente a utilizar en el diseño de pavimentos depende de la metodología de diseño. En la Guía AASHTO 93 no se establece ninguna recomendación con respecto a cuál dato utilizar y en la nueva guía MEPDG para el nivel 1 se requiere como dato de entrada los valores  $k$  del modelo. Para los análisis elásticos, el dato de módulo resiliente a utilizar debería considerar los factores de estado de esfuerzos, saturación y compactación para los materiales granulares para obtener una capa base que no falle por cortante. Como ejemplo de la variación del módulo tenemos un rango de módulos entre 46,2 MPa (6700 psi) como mínimo y un máximo de 257,1 MPa (37300 psi) entre los 5 materiales utilizados en este estudio.



## REFERENCIAS

1. **American Association of State Highway and Transportation Officials.** (2007). *AASHTO T 307-99 (2003) Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing*. XXVII ed. en inglés, EUA, AASHTO.
2. **National Cooperative Highway Research Program NCHRP.** (1997). *Laboratory determination of resilient modulus for flexible pavement design*, Reporte Final, NCHRP Web Document 14, Project 1-28, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., EUA. Consultado durante los meses de marzo a agosto de 2009 del sitio Web: [http://www.nap.edu/openbook.php?record\\_id=6353](http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=6353)
3. **Sall J., Lehman A. y Creighton L.** (2001) *JMP Start Statistics a Guide to Statistics and Data Analysis Using JMP® and JMP IN® Software*. Segunda Edición, SAS Institute, Inc.
4. **Tutumluer, Erol.** (2003, noviembre). *Técnicas de evaluación y análisis para capas granulares y suelos en pavimentos*. En: Seminario impartido en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Lanamme. San José, Costa Rica.
5. **Thurairajah, A.** (2007). *Unbound Materials Resilient Modulus Testing for Truckee Meadows Area*, Tesis de Maestría, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Nevada Reno, Nevada, EUA.