

Módulo de resiliencia: Distribución de sus valores en el espacio de compactación y comportamiento en trayectoria de humedecimiento y secado

Natalia Pérez García & Paul Garnica Anguas
Instituto Mexicano del Transporte, México



RESUMEN

Después de la construcción de una carretera, es de esperarse que los contenidos de agua de los materiales varíen dependiendo de las condiciones ambientales que se presenten en el sitio, por tanto, dicho efecto deberá tomarse en consideración al llevar a cabo el diseño de la estructura. En este artículo se muestran algunos resultados de pruebas de módulo de resiliencia de probetas que fueron compactadas en condiciones óptimas y posteriormente secadas o humedecidas para determinar en qué grado el módulo de resiliencia se incrementó o se redujo. Además, se presenta el comportamiento del M_r en el espacio de compactación haciendo uso de las curvas de isovalores. Los resultados corresponden a una arcilla y a un limo de alta compresibilidad (CH y MH).

SUMMARY

After the construction of a highway it is expected that the water content of the compacted materials which constitute it will change because of the variations in the environmental conditions. Thus, this condition must be taken into account when carrying a pavement design. This paper shows the results of resilient modulus of samples that were compacted at optimum conditions and then were subjected to drying or wetting paths so that the increase or reduction of resilient modulus could be observed. In addition, it is shown the variation of resilient modulus by showing the isolines of resilient modulus in the compaction space. The results correspond to high plasticity clay (CH) and a high plasticity silt (MH).

1 INTRODUCCIÓN

Para determinar la estructuración de los pavimentos se requiere evaluar primeramente las propiedades de los materiales que van a constituir cada una de las capas, es decir, su módulo y la relación de Poisson. El último parámetro no tiene gran variación por lo que se asumen valores recomendados en la literatura para los diferentes materiales, sin embargo, el módulo depende de varios factores por lo que requiere de estudios más profundos para determinar el valor de diseño.

Un pavimento flexible convencional se constituye por materiales de terraplén, subrasante, base, subbase y carpeta; el comportamiento a largo plazo de esta estructura va a depender de cómo varíen las propiedades de los materiales mencionados. Por ejemplo, si la construcción se llevara a cabo con un control de calidad estricto y suponiendo que las propiedades de los materiales no se degradaran debido a condiciones ambientales y que las cargas no excediera las de diseño, podría esperarse que el pavimento perdurara al menos por el tiempo para el cual fue diseñado. No obstante, las condiciones climáticas son cambiantes y en muchas ocasiones los niveles de carga con los que los vehículos pesados transitan por la red carretera exceden los valores esperados, entonces, es de esperarse que los materiales que inicialmente fueron compactados con cierto contenido de agua y peso volumétrico seco mostrarán un comportamiento diferente al proyectado.

Tomando en cuenta que los materiales inicialmente se compactan a 95 % o 100 % del peso volumétrico seco, entonces, es deseable que los estudios de las variaciones de las propiedades se realicen con

especímenes compactados en estas condiciones y que posteriormente sufran ciertos cambios.

En este artículo se presentan comparaciones de valores de módulo de resiliencia de probetas que fueron compactadas en condiciones óptimas y posteriormente se humedecieron o secaron. Además, teniendo como conocimiento que los materiales en campo se compactan a un mayor o menor grado del especificado, se presentan las variaciones del módulo de resiliencia en un espacio de compactación en forma de curvas de isovalores, de esto se puede determinar el porcentaje de incremento o reducción en el módulo dependiendo de qué grado de compactación se alcance.

2 PROPIEDADES DEL SUELO ANALIZADO

Las propiedades de los suelos en los que se llevó a cabo el estudio se muestran en la Tabla 1. Los ensayos se realizaron de acuerdo con normas ASTM.

Tabla 1 Propiedades del suelo de estudio

| Suelo | w_{opt} (%) | γ_{dmax} (kN/m^3) | LL (%) | IP (%) | G_s | Pasa 200 (%) |
|-------|------------------|---------------------------------|-----------|--------|-------|--------------------|
| CH | 33.0 | 12.56 | 72 | 46 | 2.59 | 92.9 |
| MH | 34.0 | 12.73 | 57 | 26 | 2.64 | 89.6 |

3 DESCRIPCIÓN DE PREPARACIÓN DE LOS ESPECÍMENES

Los pasos seguidos en la preparación de los especímenes fue el siguiente:

- Muestreo de material,
- Reducción de muestras a tamaño de 1500 g aproximadamente,
- Adición de agua para alcanzar ya sea el contenido de agua óptimo o algún otro valor requerido,
- Dejar equilibrar el material durante 24 horas para una mejor distribución del contenido de agua,
- Compactación del espécimen en un molde seccionado cuyas dimensiones son 14 cm de altura sin collarín y 7.1 cm de diámetro. El espécimen se compactó en 8 capas,
- Se toman tres dimensiones de diámetro y altura y el peso correspondiente,
- En este paso, el espécimen se ensayó en prueba de módulo de resiliencia si era para determinar las curvas de isovalores,
- En el caso de que fuera un espécimen para determinar comportamiento en trayectoria de humedecimiento o secado, éste se compactó en condiciones óptimas y se le permitió que absorbiera agua por capilaridad o que perdiera agua dejándolo secar al medio ambiente y posteriormente fue ensayado en módulo de resiliencia,
- Después de ensayarlo en módulo de resiliencia, se desmontó del equipo triaxial y se disgregó para determinar el contenido de agua final.

4 PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR EL MÓDULO DE RESILIENCIA

Las pruebas de módulo de resiliencia se llevaron a cabo de acuerdo con el procedimiento NCHRP 1-28A: Métodos de prueba armonizados para la determinación del módulo de resiliencia para diseño de pavimentos flexibles (Tabla 2).

La prueba se corre con 16 secuencias en las cuales se combinan los esfuerzos de confinamiento y desviadores. Los confinamientos varían entre 14 y 55 kPa y el esfuerzo desviador entre 27 y 96 kPa.

La aplicación de la carga se lleva a cabo con una onda tipo haversine en donde el tiempo de aplicación de la carga es de 0.2 de segundo con un tiempo de descanso de 0.8 segundo (Figura 1).

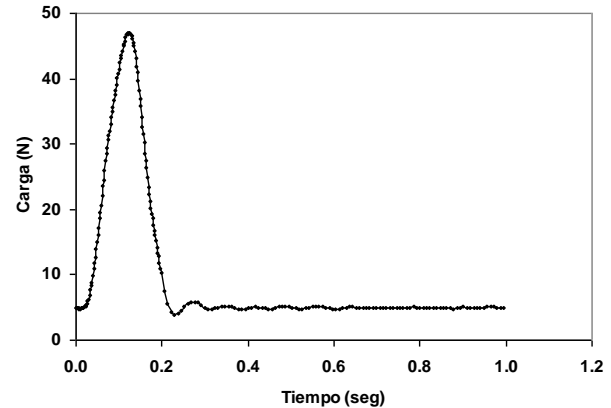


Figure 1. Onda tipo haversine aplicada en una de las secuencias de la prueba de módulo de resiliencia

Tabla 2. Secuencias de prueba del método NCHRP 1-28A.

| Secuencia No. | σ_3 (kPa) | σ_d (kPa) | Número de aplicaciones de carga |
|---------------|------------------|------------------|---------------------------------|
| 0 | 28 | 48 | 1000 |
| 1 | 55 | 27 | 100 |
| 2 | 41 | 27 | 100 |
| 3 | 28 | 27 | 100 |
| 4 | 14 | 27 | 100 |
| 5 | 55 | 48 | 100 |
| 6 | 41 | 48 | 100 |
| 7 | 28 | 48 | 100 |
| 8 | 14 | 48 | 100 |
| 9 | 55 | 69 | 100 |
| 10 | 41 | 69 | 100 |
| 11 | 28 | 69 | 100 |
| 12 | 14 | 69 | 100 |
| 13 | 55 | 96 | 100 |
| 14 | 41 | 96 | 100 |
| 15 | 28 | 96 | 100 |
| 16 | 14 | 96 | 100 |

5 LAS CURVAS ISOVALORES DE MÓDULO DE RESILIENCIA

Las Figuras 2 y 3 muestran los espacios de compactación en donde se indican tanto los contenidos de agua y los pesos volumétricos a los que se compactaron los especímenes utilizados en el análisis. Es importante hacer notar que los resultados de módulo de resiliencia que se utilizaron son promedio de dos o tres probetas que se compactaron en las mismas condiciones; de igual forma, los puntos indicados en los espacios de compactación corresponden a los promedios de pesos volumétricos y contenidos de agua.

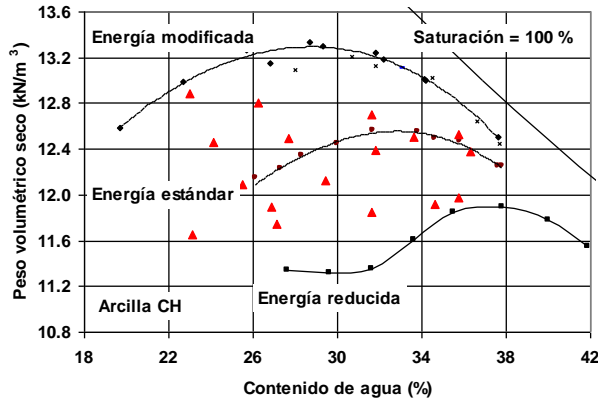


Figura 2. Espacio de compactación para la arcilla CH

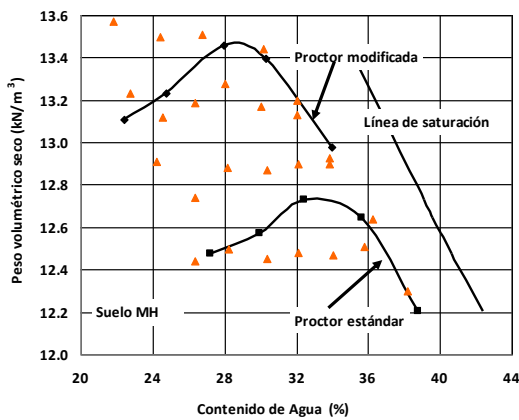


Figura 3. Espacio de compactación para el limo MH

La Tabla 3 y 4 son el resumen de los datos de los especímenes, es decir, contenidos de agua, pesos volumétricos y módulos de resiliencia para $\sigma_3 = 14$ kPa y $\sigma_d = 89$ kPa.

Tabla 3. Características de los especímenes ensayados en módulo de resiliencia para la arcilla CH.

| Punto No. | w (%) | γ_d (kN/m ³) | θ (%) | M_r (kPa) |
|-----------|-------|---------------------------------|--------------|-------------|
| 1 | 31.64 | 12.70 | 41.0 | 57 |
| 2 | 26.23 | 12.81 | 34.3 | 94 |
| 3 | 33.60 | 12.50 | 42.8 | 45 |
| 4 | 35.73 | 12.53 | 45.6 | 48 |
| 5 | 31.80 | 12.39 | 40.2 | 54 |
| 6 | 27.70 | 12.49 | 35.3 | 74 |
| 7 | 24.10 | 12.46 | 30.6 | 95 |
| 8 | 36.30 | 12.38 | 45.8 | 31 |
| 9 | 29.45 | 12.12 | 36.4 | 49 |
| 10 | 25.50 | 12.09 | 31.4 | 65 |
| 11 | 23.10 | 11.65 | 27.4 | 49 |
| 12 | 31.60 | 11.85 | 38.2 | 25 |
| 13 | 26.86 | 11.90 | 32.6 | 34 |
| 14 | 27.10 | 11.75 | 32.5 | 33 |
| 15 | 35.75 | 11.98 | 45.7 | 19 |

Tabla 4. Características de los especímenes ensayados en módulo de resiliencia para el limo MH

| Punto No. | w (%) | γ_d (kN/m ³) | M_r (kPa) |
|-----------|-------|---------------------------------|-------------|
| 1 | 23.36 | 12.44 | 74 |
| 2 | 28.22 | 12.50 | 93 |
| 3 | 30.35 | 12.45 | 77 |
| 4 | 32.10 | 12.48 | 56 |
| 5 | 34.02 | 12.47 | 46 |
| 6 | 35.81 | 12.51 | 35 |
| 7 | 38.16 | 12.30 | 31 |
| 8 | 24.20 | 12.91 | 88 |
| 9 | 28.13 | 12.88 | 109 |
| 10 | 30.36 | 12.87 | 76 |
| 11 | 32.10 | 12.90 | 97 |
| 12 | 33.83 | 12.90 | 70 |
| 13 | 22.73 | 13.23 | 125 |
| 14 | 24.53 | 13.12 | 121 |
| 15 | 26.36 | 13.19 | 155 |
| 16 | 28.00 | 13.28 | 119 |
| 17 | 30.03 | 13.17 | 117 |
| 18 | 32.01 | 13.13 | 117 |
| 19 | 21.81 | 13.57 | 166 |
| 20 | 24.41 | 13.50 | 131 |
| 21 | 26.74 | 13.51 | 118 |
| 22 | 28.10 | 13.63 | 156 |
| 23 | 30.18 | 13.44 | 96 |
| 24 | 32.06 | 13.20 | 101 |

Una vez obtenidos los datos mostrados en las Tablas 3 y 4 se utilizó el software MINITAB para generar las curvas de isovalores. En la Figura 4 se indican el comportamiento del módulo de resiliencia en todo el espacio de compactación para el limo MH. Las curvas de compactación Proctor estándar y modificada se muestran como referencia. De esta figura puede interpretar lo siguiente: Si se mantiene un contenido de agua constante y se incrementa el peso volumétrico seco, el módulo de resiliencia se incrementa. Por otro lado, si se mantiene un peso volumétrico seco y se incrementa el contenido de agua, el módulo de resiliencia tiende a disminuir.

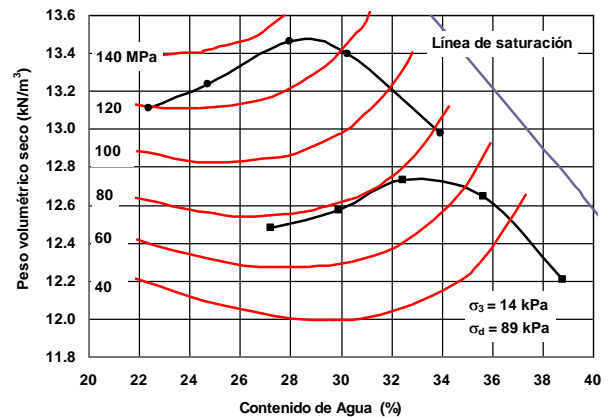


Figura 4. Curvas de isovalores de M_r para el limo MH ($\sigma_3 = 14$ kPa y $\sigma_d = 89$ kPa)

Con respecto a la arcilla de alta compresibilidad, se observa que al igual que el limo, el módulo de resiliencia depende tanto del peso volumétrico seco como del contenido de agua (Figura 5). En esta misma figura se puede observar que el valor mayor de M_r que se ha obtenido hasta lo que se lleva en la experimentación es de 90 MPa, mientras que para el caso del limo los valores máximos que se midieron fueron de 140 MPa.

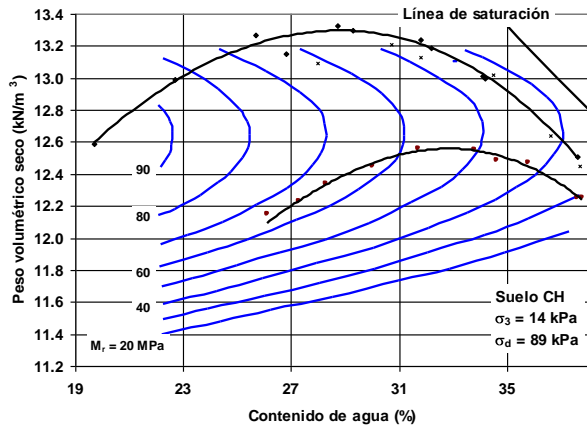


Figura 5. Curvas de isovalores de M_r para la arcilla CH ($\sigma_3 = 14$ kPa y $\sigma_d = 89$ kPa)

El tipo de curvas presentadas en las Figuras 4 y 5 son de utilidad ya que aquellas agencias u organismos que requieren datos de módulo de resiliencia pero que no cuentan con el equipo para llevar a cabo tal tipo de prueba pueden utilizar los valores de esta gráfica como datos preliminares.

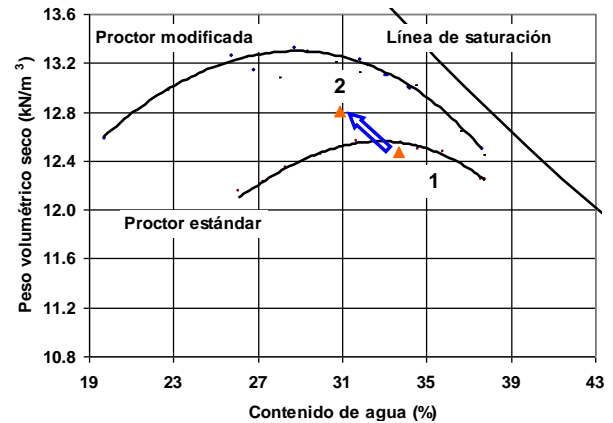
6 COMPORTAMIENTO DE LA ARCILLA EN TRAYECTORIAS DE HUMEDDECIMIENTO Y SECADO

Como se mencionó en la introducción, el comportamiento de los materiales ante ciclos de humeddecimiento y secado es importante para el diseño de pavimentos. En este caso, varias probetas de suelo se compactaron con contenido de agua óptimo y peso volumétrico seco máximo. Después de compactar se incrementó o se redujo su contenido de agua. A continuación se muestran algunos de los resultados obtenidos.

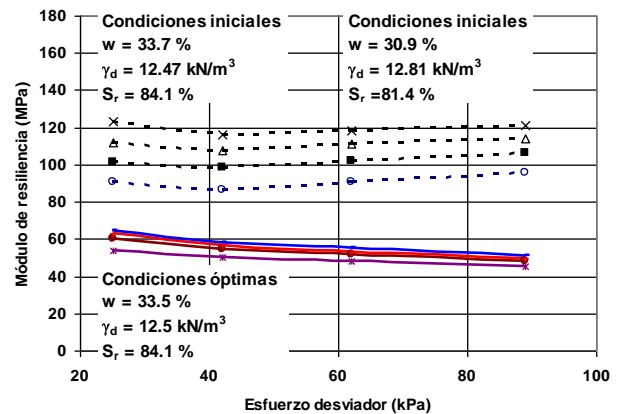
Por ejemplo, en la Figura 6a se muestra la trayectoria de secado que siguió un espécimen que se compactó en condiciones cercanas al óptimo y posteriormente se dejó al ambiente durante cinco días para que perdiera agua e incrementara el valor de succión.

En la Figura 6b se muestran los resultados de módulo de resiliencia y se comparan con los valores obtenidos en condiciones óptimas. Como lo indican los resultados, con una reducción en contenido de agua de 2.8 % (lo que corresponden a una reducción en grado de saturación de 2.7 %) los módulos alcanzan valores del doble de los obtenidos en condiciones óptimas. Por otro lado, en la muestra que perdió agua el efecto del confinamiento en el módulo de resiliencia es más notable ya que las curvas de los diferentes valores de presión de confinamiento tienden a mostrar cierta separación.

Entonces, podríamos afirmar que hasta un cierto punto el efecto del confinamiento pudiera reflejar la estructura interna del suelo, ya que lo que pudiera estar sucediendo es que a medida que se reduce el contenido de agua de la muestra se estén formando grumos de suelo y quizá el suelo empiece a tener un comportamiento de tipo granular.



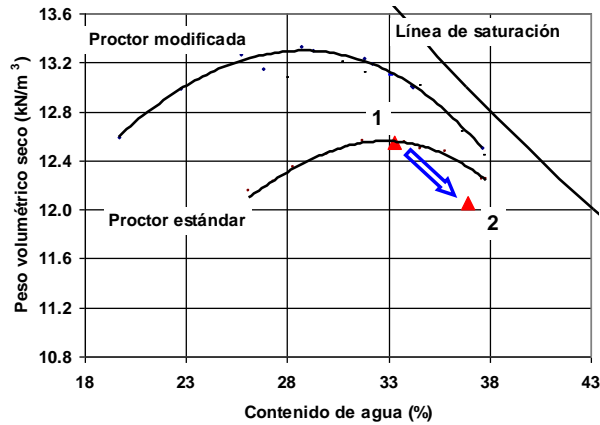
(a)



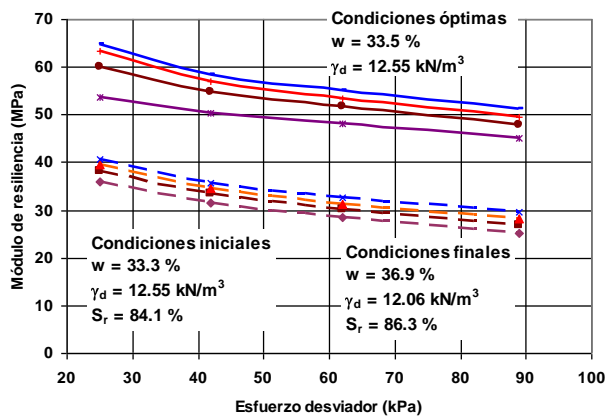
(b)

Figura 6. (a) Trayectoria seguida por la muestra de arcilla que se compactó en condiciones cercanas a la óptima y se dejó secar para reducir su contenido de agua; (b) Curvas de módulo de resiliencia para condiciones óptimas y de probetas a las que se les redujo el contenido de agua.

Para este mismo suelo, se prepararon muestras en condiciones óptimas y posteriormente se dejaron que absorbieran agua por capilaridad. La Figura 7a muestra la trayectoria seguida y la Figura 7b muestra las comparaciones de los módulos obtenidos con respecto a las condiciones óptimas. Como se puede notar de los datos de contenidos de agua de las muestras humeddecidas, éste se incrementó en un 3.6 % lo cual correspondió a un incremento en el grado de saturación de 2.2 %. Este incremento produjo aproximadamente una reducción del 50 % en los valores de módulo de resiliencia.



(a)



(b)

Figura 7. (a) Trayectoria seguida por la muestra de arcilla que se compactó en condiciones cercanas a la óptima y se dejó humedecer para incrementar su contenido de agua; (b) Curvas de módulo de resiliencia para condiciones óptimas y promedio de probetas a las que se les incrementó el contenido de agua.

Para generar una relación más completa entre la variación del módulo de resiliencia con respecto a variaciones de grados de saturación aun se están llevando a cabo varias series de pruebas y los resultados se publicarán próximamente.

7 CONCLUSIONES

De lo presentado en este artículo se puede concluir que el módulo de resiliencia depende de varios factores, entre los más importantes (con respecto a suelos finos) se encuentran el contenido de agua y el peso volumétrico seco. Esto se indica con las curvas de isovalores de módulo de resiliencia obtenidas para los dos suelos estudiados. Por otro lado, este tipo de gráficas son de gran beneficio para todos aquellos involucrados en el diseño de pavimentos y que requieran de los valores de módulo de resiliencia pero que no cuentan con los equipos para poder llevar a cabo las determinaciones en laboratorio.

Además, otro aspecto estudiado para la arcilla y mostrado en este artículo, es el cambio que puede sufrir el módulo de resiliencia ya sea por efectos de secado o humedecimiento. Los resultados muestran que el módulo de resiliencia puede incrementarse al doble de los valores que se obtuvieron en condiciones óptimas si el contenido de agua se reduce en un 2.8 %, lo que corresponde a una variación en grado de saturación del 2.7 %. Finalmente, si el contenido de agua del suelo se incrementa en un 3.6 % (lo que corresponde a un incremento en grado de saturación de 2.2 %), entonces, el módulo de resiliencia se reduce aproximadamente 50 % con respecto a los valores obtenidos en condiciones óptimas.

8 REFERENCES

- NCHRP. 2004. NCHRP 1-28A. Harmonized Test Methods for laboratory determination of resilient modulus for flexible pavement design. *Laboratory determination of resilient modulus for flexible pavement design*.
- Pérez, G. N., Garnica, A. P. y Nute, V. H. 2010. Evaluación de la relación módulo de resiliencia succión para suelos finos compactados. *XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*. Acapulco, Guerrero. México. 3:1209-1214.
- Nute, V. H. 2010. Evaluación de la relación-módulo de resiliencia en suelos finos compactados. *Tesis de Maestría*. Universidad Autónoma de Chihuahua.