

MÓDULO DE RESILIENCIA EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS

1. Introducción

Actualmente los métodos utilizados más comúnmente para el diseño de pavimentos, como lo son el método AASHTO (American Association of state Highway and Transportation Officials) y el método desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México consideran que la propiedad fundamental para caracterizar los materiales que constituyen la sección de un pavimento de una carretera o aeropista es el parámetro denominado *Módulo de Resiliencia*.

Por tal razón el especialista encargado de diseñar, construir y conservar pavimentos debe tener muy claro lo que el parámetro módulo de resiliencia significa, es decir que es lo que representa en el diseño de pavimentos, como se obtiene en el laboratorio y cuales son los factores que hay que considerar para su correcta utilización.

2. Definición

Cuando los materiales que conforman la sección estructural de un pavimento se ven sometidos a un gran número de aplicaciones de carga, es decir son afectados por esfuerzos de fatiga, debido a repetidas sollicitaciones, estos materiales empiezan a fracturarse o bien a acumular deformaciones dependiendo de su rigidez inicial, y esta es la principal causa del deterioro observado en la superficie de los pavimentos. De hecho, podemos mencionar que dichos agrietamientos y deformaciones aparecen para esfuerzos muy por debajo de los que se supone debería resistir el material por sí mismo.

Debido al paso por de los vehículos por la superficie de rodamiento de un pavimento, esta empieza a distribuir los esfuerzos hacia las capas inferiores, las cuales, por esta razón se ven sujetas a esfuerzos cíclicos de compresión σ_c y luego de tensión σ_t los cuales van provocando deformaciones en toda la estructura del pavimento. La curva esfuerzo-deformación obtenida en un espécimen de material de los que constituyen generalmente un pavimento, ya sea concreto asfáltico o hidráulico, algún material granular o un suelo cohesivo es cualitativamente la representada en la figura 1.

En dicha gráfica podemos observar que después de descargar gradualmente el espécimen casi toda la deformación a que se vio sometida la muestra se recupera, sin embargo existe una pequeña deformación permanente, la cual al someter la muestra a un número N de ciclos de carga y descarga se va acumulando, aunque dicha deformación permanente es cada ciclo consecutivo cada vez va siendo menor hasta llegar al ciclo N donde prácticamente se recupera toda la deformación. Aún así debido a que el material describe prácticamente la misma curva y que la deformación permanente es muy pequeña, se considera para fines de análisis que el comportamiento de los materiales es fundamentalmente elástico durante cada ciclo de carga y por lo tanto se le puede caracterizar con el denominado módulo de resiliencia.

El módulo de resiliencia queda definido entonces en forma análoga al módulo de young y se expresa con la siguiente ecuación:

Donde: σ_1 es el esfuerzo principal mayor

σ_2 es el esfuerzo principal mayor

σ_3 es el esfuerzo principal mayor

ϵ_r es la deformación recuperable.

Figura 1. Curva esfuerzo–deformación representativa del comportamiento de materiales sometidos a carga cíclica

Debido a que después de la aplicación un gran número de ciclos, para los niveles usuales de esfuerzos en pavimentos, se alcanza un estado perfectamente resiliente, en que cualquier deformación adicional es recuperable, es usual que se haga uso de las teorías de Burmister, para el análisis de esfuerzos en pavimentos, suponiendo que las capas son elásticas, y se utiliza como módulo de young los valores obtenidos de módulo de resiliencia obtenidos a partir de ensayos triaxiales cíclicos para cada capa

3. Factores que afectan el módulo de resiliencia en suelos cohesivos

Es muy importante señalar que, mediante estudios realizados a varios materiales constituyentes de la estructura de pavimentos bajo diferentes circunstancias, se ha observado que el módulo de resiliencia no es una propiedad constante para un tipo de suelo, sino que depende de varios factores que a continuación se mencionan:

- **Número de aplicaciones del esfuerzo**

Después de someter varios especímenes de arcilla compactada a pruebas de módulo de resiliencia con la secuencia recomendada por el Programa Estratégico de Investigación de carreteras (SHRP) se observó lo siguiente:

Al someter una muestra de arcilla compactada con un peso volumétrico seco de 14.05 kN/m³ y un contenido de agua del 28.70% existe una variación importante en el módulo de resiliencia conforme se le van aplicando gradualmente un mayor número de cargas cíclicas, sin embargo como se puede notar en la figura 2 parece que el módulo resiliente alcanza un valor constante a partir de un gran número de ciclos.

Algo que hay que comentar es que, no obstante se han utilizado varias formas de pulsaciones para representar el comportamiento de un pavimento ante cargas móviles, es recomendable utilizar una onda de tipo senoidal con un tiempo de aplicación de 0.1 seg y 0.9 seg de tiempo de reposo.

Figura 2. variación del módulo de resiliencia con el número de ciclos

b. Tixotropía

En estudios previos realizados sobre arcillas compactadas se encontró que a altos grados de saturación, particularmente para métodos de compactación que inducen cortantes en el suelo, estas muestran un gran incremento en su resistencia sobre todo si se les permite un periodo de reposo. Este incremento en la resistencia se le ha atribuido a la tixotropía propia de las arcillas y al cambio progresivo en el arreglo de las partículas y las presiones de poro de agua dentro de un suelo en un tiempo prolongado.

La tixotropía es una propiedad reológica que se presenta cuando la velocidad de deformación decrece inmediatamente, hasta hacerse constante, pero antes de esto produce una disminución considerable en la resistencia a la deformación, que hace que la velocidad de deformación aumente cada vez que se le vuelven a aplicar esfuerzos.

En cuanto a las presiones de poro hay que tener presente que en un suelo sometido a esfuerzos que tanto la fase sólida como la líquida no actúan por separado, de manera que se acumulan los efectos ocasionados en cada una, por lo que es evidente que el suelo tendrá un comportamiento muy complejo cada vez que se vea sometido a esfuerzos.

En la siguiente ilustración se puede observar los efectos de la tixotropía en las características resilientes para

arcillas compactadas.

figura 3. efecto de la tixotropía en el módulo de resiliencia del suelo de subrasante (AASHO).

En un trabajo realizado en 1962 se reportaron muestras que fueron preparadas con características semejantes y que fueron ensayadas a intervalos de 15 minutos, 7 horas, 21 horas, 3 días, 14 días y 50 días después de la compactación. Se puede notar que el efecto de la tixotropía en el modulo de resiliencia varia con el número de aplicaciones, de la figura 3 podemos observar que para menos de 10000 aplicaciones, el incremento en el tiempo de almacenamiento entre la compactación y la prueba tiene un gran efecto en el módulo resiliente haciendo que para mayores periodos de almacenamiento este módulo sea más grande, aunque va disminuyendo conforme aumenta el número de aplicaciones, hasta llegar a las 10000 aplicaciones donde después de esto el periodo de almacenamiento ya no causa efectos importantes en el la resiliencia. Este efecto se cree que se debe a que las deformaciones inducidas por la carga repetida progresivamente destruyen en gran medida la resistencia ganada. Pero debemos notar que para números pequeños de repeticiones el incremento en el módulo de resiliencia es muy importante de acuerdo al tiempo de almacenamiento, por ejemplo de la misma figura podemos ver que para muestras probadas un días después de la compactación y muestras probadas para 50 días después de la compactación hay diferencias hasta de 300 o 400%.

• Magnitud del esfuerzo desviador

El esfuerzo desviador tiene una marcada influencia en el módulo de resiliencia, el cual es obvio, puesto que se encuentra implícito en su definición. Se probó una muestra de arcilla compactada con un contenido de agua de 29.9% y un peso volumétrico de 13.93kN/m³. Los resultados obtenidos para esta muestra se encuentran en la figura 4.

Figura 4. efecto de la magnitud del esfuerzo desviador en el módulo de resiliencia.

En la figura anterior podemos notar la clara influencia ya comentada que tiene el esfuerzo desviador en la resiliencia, donde se ven los módulos obtenidos para arcillas sometidos a esfuerzos principales mayor de 41.4, 27.6 y 13.8 KPa, los cuales se mantenían constantes.

De lo anterior deducimos que se debe establecer una magnitud para el esfuerzo desviador, de manera que el módulo de resiliencia sea correctamente interpretado, pero debemos señalar que la magnitud de los esfuerzos principales también tienen cierta influencia. En la figura se observa que conforme se incrementa el esfuerzo desviador, las diferencias en el módulo de resiliencia para diferentes magnitudes de esfuerzos principales disminuyen, es por eso que generalmente se utiliza un esfuerzo desviador de 69 kPa (10 psi) para obtener el módulo, sin embargo lo más adecuado sería evaluar el estado de esfuerzos que estará presente en la subrasante.

• Método de compactación

Los estudios realizados sobre arcillas han demostrado que el método de compactación aplicado tiene un marcado efecto sobre el acomodo de las partículas de la muestra arcillosa. Parece ser que la estructura adoptada es debida principalmente al cortante inducido en el suelo durante el proceso de compactación.

Como ejemplo podemos mencionar que para muestras compactadas a bajos grados de saturación no hay una deformación apreciable inducida por el método de compactación y las partículas de arcilla asumen un arreglo al azar, adquiriendo una estructura floculada. Pero cuando las muestra son compactadas a altos grados de saturación (más de 85%), como ocurre en el lado húmedo de la curva de compactación, la resistencia al esfuerzo cortante inducida durante la compactación puede variar considerablemente. En suelos compactados por medio de amasado, el pisón que penetra en el suelo causa el levantamiento adyacente de la superficie del suelo como resultado de las deformaciones, y se tiende a adquirir una estructura dispersa, es decir, con las

partículas alineadas en forma paralela. Y si ese mismo suelo se compacta por un método estático, de manera que no exista posibilidad de que se produzcan desplazamientos laterales, las partículas conservarán su estructura floculada.

Si comparamos la resistencia a la compresión simple obtenida en muestras de arcilla compactadas (del lado seco) con métodos estáticos y por amasado, la diferencia no será significativa, sin embargo para las mismas muestras pero para altos grados de saturación la resistencia presenta gran variación.

En la figura 5 se observan los valores de módulo resiliente desarrollados a 60000 aplicaciones. Se ven claras diferencias en el módulo para contenidos de agua entre 16 y 18%

Figura 5. Efecto del método de compactación en las características de resiliencia.

• Grado de compactación y contenido de agua

En un estudio realizado a 35 muestras de arcilla de alta compresibilidad con pesos volumétricos entre 12 y 15 kN/m³ y contenidos de agua entre 14 y 36%. Estas muestras se sometieron a 20000 ciclos con un esfuerzo desviador de 69 kPa y una presión de confinamiento de 13.8 kPa.

El módulo de resiliencia presentó un rango de variación comprendido entre 33800 y 186000 kPa, para los rangos de contenido de agua y peso específico seco utilizados–

Se tomo como base los datos obtenidos de módulo de resiliencia para construir líneas isocaracterísticas de igual valor de módulo resiliente y de esta manera observar su comportamiento en el espacio de compactación. Dicho comportamiento lo podemos apreciar en la figura 7.

En esta figura se puede notar que la