

Evaluación comparativa del módulo dinámico y resiliente en las arcillas del ex lago de Texcoco

Tomás ROMERO^{a,1}, Alexandra OSSA^a y Mario FLORES^a

^a *Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México*

Resumen. Con el objetivo de conocer la relación entre el módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}) y el módulo resiliente (M_r) de suelos arcillosos blandos, se realizaron pruebas triaxiales cíclicas con pulsos de carga senoidal y haversiano. Los ensayos se realizaron a carga controlada en condiciones consolidadas no drenadas (CU), a distintos niveles de esfuerzo efectivo medio y desviador cíclico. Con los resultados obtenidos en cada una de las etapas de ensayo se trazaron curvas esfuerzo desviador cíclico-deformación unitaria axial y se obtuvieron los valores de E_{eq} y M_r ; se analizó la variación con la deformación unitaria axial y el esfuerzo desviador cíclico inducido, y se obtuvo una relación entre ambos módulos.

Palabras Clave. Módulo dinámico, módulo resiliente.

1. Introducción

Existen áreas de la mecánica de suelos que tienen aspectos en común, como es la ingeniería de pavimentos, la ingeniería sísmica, la ingeniería de cimentaciones fuera de las costas y el diseño de cimentaciones de maquinaria; todas convergen en el tema de cargas repetidas o carga cíclicas.

Uno de los principales movimientos vibratorios que son inducidos al suelo, son los movimientos sísmicos, los cuales están compuestos por una combinación compleja de ondas de cuerpo (ondas de compresión, P y ondas transversales o de corte, S) a diversos ángulos de incidencia, y de ondas superficiales (Rayleigh y Love). Schroeder y Schuster en 1968 indicaron que la propagación de ondas P, induce en las capas de suelo una variación del esfuerzo normal, mientras que la propagación de la onda S, induce una variación del esfuerzo cortante, tal como se muestra en la Figura 1, [7].

Cuando estas capas están compuestas por formaciones arcillosas como las encontradas en la zona del ex lago de Texcoco, las ondas P no se propagan de forma efectiva debido a la saturación del suelo y no es posible que cambie de volumen de manera instantánea. Por lo tanto, sólo se transmiten las ondas S, las cuales, generan esfuerzos cortantes en los planos verticales y horizontales del elemento que al invertir su dirección varias veces durante el sismo, producen el efecto de una carga cíclica; condición que puede reproducirse de manera aproximada en el laboratorio mediante ciclos de carga con forma senoidal.

¹ Tomás Romero Olán, Coordinación de Geotecnia, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México; E-mail: TRomeroO@iingen.unam.mx.

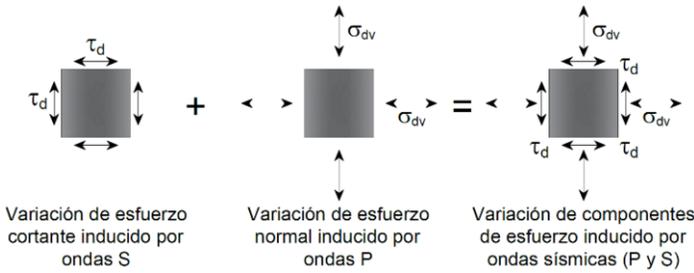


Figura 1. Esfuerzo en las capas de suelo inducido por vibraciones sísmicas, [7].

Las cargas cíclicas, producidas por un sismo, están asociadas a los parámetros dinámicos como lo son, el módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}), el módulo de rigidez al cortante dinámico (G), el coeficiente de amortiguamiento (λ), y su variación con la deformación angular (γ); la medición de esos parámetros presenta diferentes aplicaciones, siendo los anteriores, los más importantes para un análisis dinámico de depósitos de suelo y sistemas suelo-estructura.

El módulo dinámico equivalente (E_{eq}) se define como la pendiente media del ciclo histérico encontrado en el comportamiento esfuerzo-deformación axial de las muestras sometidas a carga cíclica. Este parámetro varía con la magnitud del esfuerzo desviador (σ_d) y con la amplitud de la deformación unitaria axial (ϵ). Haciendo la hipótesis de que el material presenta un comportamiento elástico no-lineal para un intervalo amplio de valores del esfuerzo desviador, hasta cerca del 70% de la resistencia obtenida en condiciones estáticas; el valor de G se puede obtener indirectamente para cada incremento de carga, mediante la siguiente expresión.

$$G = \frac{E_{eq}}{2(1+\nu)} \tag{1}$$

donde E_{eq} = Módulo dinámico equivalente de Young; y ν = Relación de Poisson (definida como 0.50 para el caso de arcillas saturadas).

Investigadores como [9], concluyeron de estudios realizados en suelos cohesivos, que el módulo G , incrementa con el aumento del esfuerzo efectivo medio (σ') y decrece con el aumento de la relación de vacíos (e).

Por otra parte, debajo de una simple aplicación de carga cíclica, debida al paso recurrentes de neumáticos, el suelo responde de una manera esencialmente resiliente. Cuando un material está sometida a cargas repetidas, éste reacciona recuperando parte de la deformación inducida; la capacidad de recuperación de dicho material es lo que comúnmente se denomina la resiliencia de los materiales.

La respuesta resiliente y la deformabilidad del suelo natural subrasante, son requerimientos básicos para el diseño de los pavimentos, siendo el módulo resiliente (M_r), el parámetro dinámico más importante para caracterizar la deformabilidad de las capas granulares y de suelo. Este parámetro es utilizado para el diseño de los espesores de las capas propias de la estructura del pavimento.

El patrón de esfuerzos que es inducido en una estructura de pavimento debido a una carga de tránsito consiste en pulsos de esfuerzo con componentes vertical, horizontal y cortante (Figura 2). En una capa de suelo no confinada el esfuerzo vertical y horizontal son positivos, mientras que el esfuerzo cortante es invertido al paso de la carga, [6].

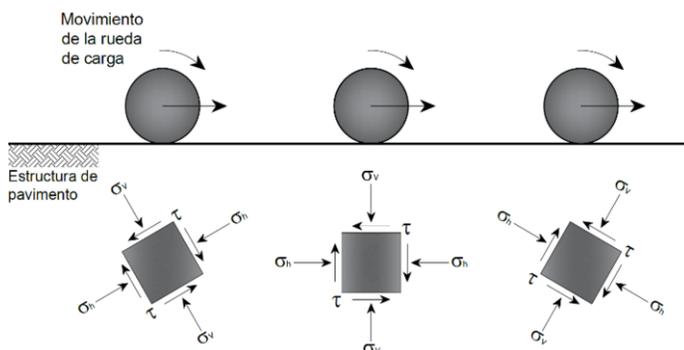


Figura 2. Esfuerzos originados por cargas de tránsito; Modificada de [5].

Durante un ensaye de carga repetida, se ha observado, que posterior a un cierto número de ciclos de carga (N), el módulo llega a ser aproximadamente constante y la respuesta del suelo puede ser asumida como elástica, [8]. De acuerdo con [11] y [3], los valores de M_r pueden ser calculados entre 100 y 200 ciclos de esfuerzo desviador repetido.

El concepto de módulo resiliente fue introducido por primera vez por [10] y definido como la relación entre el esfuerzo desviador (σ_d) repetido y la deformación axial recuperable o resiliente (ϵ_r) en una prueba triaxial.

$$M_r = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\epsilon_r} = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (2)$$

donde σ_1 = esfuerzo principal mayor; σ_2 = esfuerzo principal menor; σ_d = esfuerzo desviador; y ϵ_r = deformación axial recuperable.

En suelos cohesivos para un estado de esfuerzo dado, el módulo resiliente decrece con el incremento de σ_d [4] y es, en general, poco sensible a la magnitud del esfuerzo de confinamiento (σ') bajo condiciones no consolidadas.

El módulo M_r es una medida de las propiedades elásticas de los suelos reconociendo una cierta característica no lineal, por lo que es similar al módulo dinámico (E_{eq}). Muchos investigadores han llegado a establecer ecuaciones empíricas entre el módulo resiliente y otros parámetros; sin embargo, a pesar de los avances en los estudios, no se han adentrado en el estudio de correlaciones para predecir el M_r utilizando parámetros dinámicos, como lo son los módulos E_{eq} y G .

2. Etapa experimental

El procedimiento de prueba empleado para la ejecución de los ensayos triaxiales cíclicos está basado en la Norma ASTM D3999-91, "Standard Test Methods for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus", y en la Norma AASTHO T307-99, "Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials".

2.1. Materiales empleados, formación de las probetas de suelos y equipo utilizado

Las muestras inalteradas ensayadas en esta investigación provienen de la zona del ex lago de Texcoco y se obtuvieron empleando un muestreador de aluminio de pared delgada tipo Shelby, a una profundidad de entre 1.50 a 2.30 m.

Durante la realización de los ensayos triaxiales se determinó de cada una de las muestras de suelo, las relaciones volumétricas y gravimétricas, y sus propiedades índices, de acuerdo con las normas ASTM correspondientes. Las características de las muestras de arcilla utilizadas se presentan en la Tabla 1, mostrada a continuación.

Tabla 1. Características de las muestras ensayadas.

Sondeo	Contenido de agua, ω	Índice de plasticidad, I_p	Peso volumétrico, γ_m	Densidad relativa de sólidos, G_s	Relación de vacíos inicial, e_0	Grado de saturación, S_r
	(%)	(%)	(g/cm ³)			(%)
PCA-3.3	144.106	69.684	1.342	2.847	4.180	98.143
PCA-3.1	295.806	209.254	1.158	3.006	9.274	95.889
PCA-2.3	198.985	117.118	1.253	2.841	5.778	97.836
PCA-3.2	267.443	199.329	1.124	2.836	8.273	91.672
PCA-2.1	289.905	245.108	1.175	3.106	9.310	96.720
BH-1 1/3	116.722	83.385	1.339	2.783	3.502	92.730
BH-1 1/4	97.849	57.679	1.413	2.784	2.898	94.024
SS-02	99.178	51.997	1.429	2.789	2.887	95.816

De acuerdo con las propiedades índice, la mayoría de las muestras se localiza por arriba de la línea A y a la derecha de la línea Frontera de la carta de plasticidad, esto significa que se trata de arcillas de alta compresibilidad (CH); sin embargo, las muestra BH-1 M-1/43, BH-1 M-1/4 y SS-02 M-1/4, se clasifican como limo de alta plasticidad (MH).

Para la ejecución de las pruebas triaxiales se labraron probetas de 71 mm de diámetro, aproximadamente, con una relación de esbeltez mínima de dos (altura entre 140 y 150 mm).

Se utilizó un marco de carga MTS (Material Testing System) y una cámara triaxial instrumentada con una celda de carga sumergible, transductor de presión diferencial para la medición de cambio volumétrico, transductores de presión para medir el esfuerzo confinante y contrapresión o presión de poro, y un transductor de desplazamiento para medir las deformaciones axiales provocadas.

2.2. Procedimiento de ensaye

El trabajo experimental está conformado por ocho pruebas; en cada una de ellas, se incluye una previa saturación, y posteriormente, varias etapas de consolidación a diferentes niveles de esfuerzo efectivo medio. En cada incremento de esfuerzo efectivo, se realizaron pruebas triaxiales cíclicas seguidas de resilientes; se aplicó entre dos y cinco amplitudes de carga axial cíclica en orden ascendente a una frecuencia de 1 Hz y se determinaron los módulos en cada una de ellas (Figura 3).

Ambas pruebas, se tratan de ensayos triaxiales cíclicos, la diferencia radica en el pulso de carga inducido, uno se trata de una onda de tipo senoidal y la otra de una de tipo haversiana, (Figura 3). En la primera se aplicó como excitación en carga controlada, un patrón dinámico senoidal, variando la amplitud de la señal de carga con un número de

20 ciclos por etapa; en la segunda, se aplicó un patrón haversiano con recesos en el que se varía la amplitud de la señal de carga con un número de ciclos de 100 por etapa. De los últimos cíclicos inducidos, se determinó el módulo E_{eq} y M_r , respectivamente.

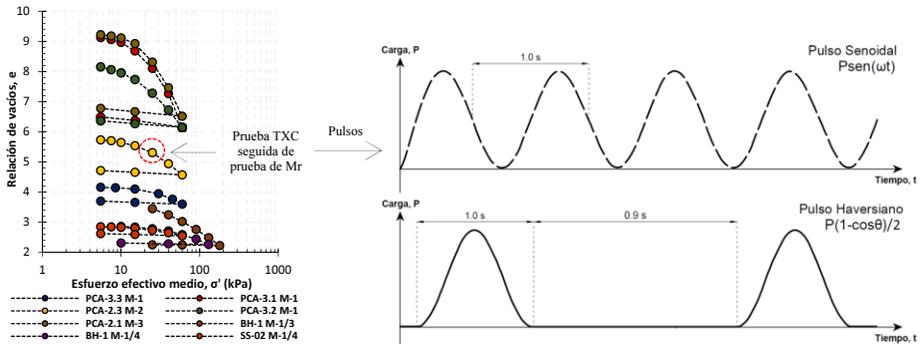


Figura 3. Curvas de compresibilidad resultantes y pulsos de carga aplicados en cada incremento de esfuerzo.

Es importante mencionar que debido a las propiedades mecánicas características de las arcillas del ex Lago de Texcoco y a los objetivos específicos planteados en esta investigación, se realizaron modificaciones a las Normas [1] y [2].

3. Resultados experimentales

3.1. Efecto de la deformación unitaria axial, ε

En la Figura 4, se presentan los resultados de los módulos dinámicos equivalentes (E_{eq}) y resilientes (M_r) contra la deformación unitaria axial (ε) generada con cada incremento de esfuerzo desviador cíclico (σ_d) aplicado en cada uno de los incrementos de esfuerzo efectivo de consolidación (σ'). Es importante mencionar que, para fines de este artículo, únicamente se presentan los resultados de una sola muestra; sin embargo, el comportamiento presentado es el mismo.

Debido a que la deformación unitaria axial depende de manera directa de la magnitud de esfuerzo desviador inducido en las muestras de suelo, podemos decir que, independientemente del nivel de σ' , a mayor σ_d mayor ε y, por lo tanto, la magnitud de los módulos E_{eq} y M_r será menor.

Por otra parte, debido al proceso de consolidación del suelo, en donde se aumenta la rigidez del suelo por al cambio volumétrico provocado por la expulsión de agua, se tiene que, a mayor σ' menor será ε inducida por el nivel de σ_d y, por lo tanto, la magnitud de los módulos E_{eq} y M_r será mayor.

En la mayoría de resultados se visualiza que las deformaciones unitarias axiales provocadas por las cargas con señal periódica senoidal, son ligeramente mayores que las provocadas por las cargas con señal haversiana. Esto se debe a que, en un pulso senoidal, la carga es aplicada de manera continua, lo que genera una acumulación de la deformación axial; por el contrario, en un pulso haversiano, existe un periodo de receso en donde la carga axial no es aplicada y en donde se recupera parte de la deformación axial provocada.

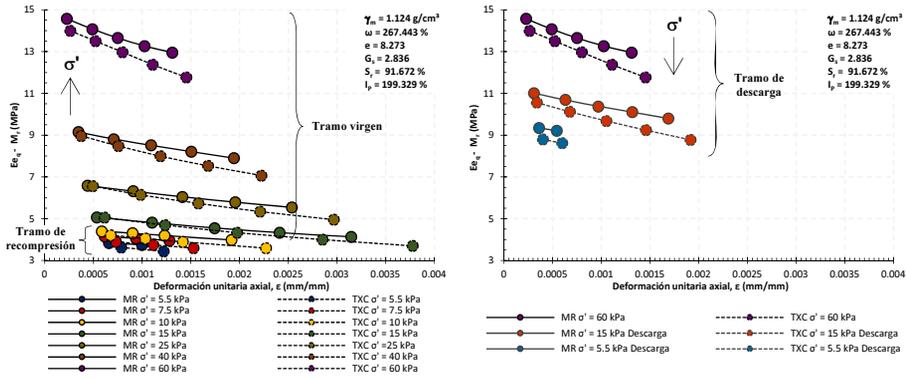


Figura 4. Curva σ_d vs E_{eq} - M_r correspondiente a la muestra PCA-3.2 M-1.

La diferencia entre magnitudes de deformación es mayor conforme aumenta el esfuerzo desviador cíclico, y se reduce con el aumento del esfuerzo efectivo medio. Lo anterior nos da como resultado que la mayoría de los módulos M_r obtenidos sean mayores que los módulos E_{eq} , y que la degradación a partir de la deformación umbral (γ_c), sea distinta en ambos módulos.

3.2. Efecto del esfuerzo desviador cíclico, σ_d

Como se mencionó anteriormente, los resultados de todas las pruebas realizadas indican que, en términos generales, los módulos M_r y E_{eq} , independientemente del nivel de σ' , disminuyen en la medida que aumenta el σ_d . Así mismo, a medida que se incrementa el σ' , los valores de ambos módulos mejoran considerablemente. En la Figura 5, se presentan las curvas E_{eq} - M_r contra σ_d ; se muestran los resultados de una sola muestra; sin embargo, el comportamiento presentado es el mismo.

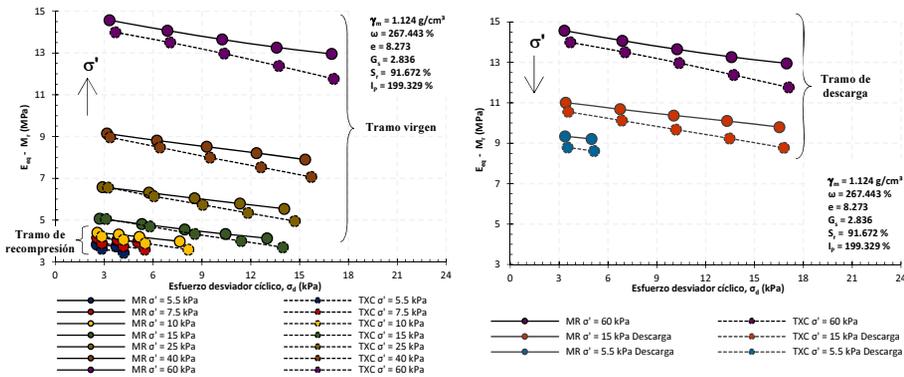


Figura 5. Curva ϵ vs E_{eq} - M_r correspondiente a la muestra PCA-3.2 M-1.

Se puede observar que ambos módulos son muy parecidos a niveles bajos de esfuerzo desviador; conforme este nivel aumenta, existe una dispersión incremental entre éstos. La diferencia, como se ha mencionado en el apartado anterior, es atribuida a la

naturaleza de las señales de carga inducidas y a la diferencia en los niveles de deformación resultantes de cada una.

De igual manera, en la mayoría de las pruebas se observó que cuando se tiene un nivel de esfuerzo efectivo de consolidación alto, los módulos M_r son mayores a los E_{eq} . Además, la diferencia entre ambos módulos, para un mismo nivel de σ'_v , es menor en la etapa de carga que en la de descarga del proceso de consolidación.

3.3. Comparativa de los módulos E_{eq} y M_r

Con los valores de los módulos dinámicos equivalentes (E_{eq}) y resilientes (M_r) resultantes de las ocho pruebas realizadas, se trazaron curvas comparativas entre ambos módulos. Las curvas integran los valores de los módulos obtenidos a lo largo de los tramos de carga y descarga de las pruebas de consolidación.

La variación de los valores de M_r obtenidos con respecto a los valores de E_{eq} para todas las muestras en el tramo de carga y descarga, se muestran en la Figura 6.

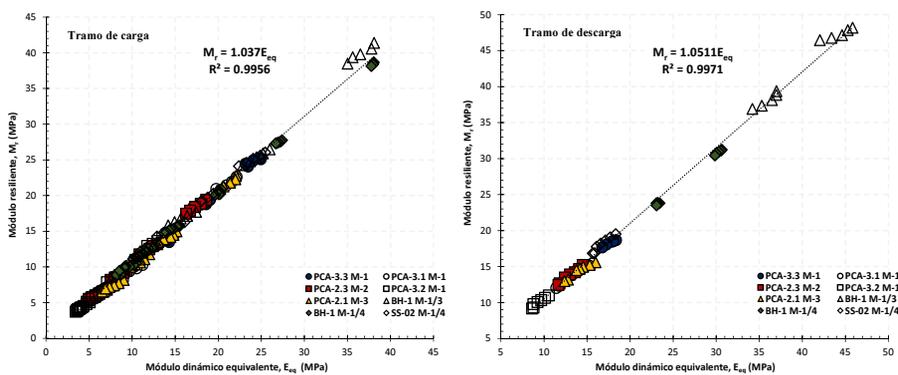


Figura 6. Curvas comparativas E_{eq} vs M_r .

Las curvas muestran una relación lineal razonable entre los dos tipos de módulos, en donde el coeficiente de determinación (R^2), en ambos casos, es cercano a uno. Este resultado muestra un excelente ajuste y deja en evidencia la relación que existe entre los módulos. De acuerdo con las tendencias resultantes, los valores de M_r son mayores a los valores de E_{eq} en un 3.7% y 5.1%, en el tramo de carga y descarga, respectivamente.

Es claro que existe cierta diferencia entre los valores de E_{eq} y M_r ; sin embargo, podríamos decir que en las arcillas de la zona del ex Lago de Texcoco, para los niveles de esfuerzo desviador y efectivo inducidos en esta investigación, ambos módulos son similares y, en la práctica, podrá determinarse uno u otro, ya sea por pruebas triaxiales cíclicas o de módulo resiliente.

4. Conclusiones

Las magnitudes de los módulos E_{eq} y M_r resultantes varían entre 3 MPa y 44 MPa, y dependen de factores como la deformación unitaria axial (ϵ) y el esfuerzo desviador cíclico inducido (σ_d).

Al comparar los módulos E_{eq} y M_r resultantes, podemos decir que existe una relación lineal entre ellos y ambos son similares para los niveles de esfuerzo desviador y efectivo inducidos en esta investigación. Para fines prácticos, se podrán considerar como iguales y se podrá determinar uno u otro, por medio de pruebas triaxiales cíclicas o de módulo resiliente.

Agradecimientos

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) por el apoyo recibido para el financiamiento de esta investigación mediante el proyecto PAPIIT IA10511.

Referencias

- [1] American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standard, ASTM D3999 – 91: Standard Test Methods for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus, West Conshohocken, PA, 2003.
- [2] American Association of State Highway and Transportation Officials, Standard Specifications for Transportation and Methods of Sampling and Testing, AASHTO T307 – 99: Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials, 23rd edition, Washington, DC, USA, 2002.
- [3] Barksdale, R. D., Test procedures for characterizing dynamic stress-strain properties of pavement materials, Transportation Research Board, Spec. Rep. 162, Washington, D.C., 1975.
- [4] Brodsky, N. S., Resilient modulus measurements on cohesive soils, Geotechnical Special Publication, ASCE, 24(1989), 15-30.
- [5] Brown, S. F., (1996). "Soil mechanics in pavement engineering", *Géotechnique*, 46(3): 383-426.
- [6] Dawson, A. R., Mundy, M. J. y Huntala, M., European research into granular material for pavement bases and subbases", *Transportation Research Record*, 1721, Transportation Research Board, Washington, D. C., 91-99, 2000
- [7] Chuan G., Jun W., Yuanqiang C., Zhongxuan Y. y Yufeng G., Undrained cyclic triaxial behavior of saturated clay under variable confining pressure, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 40(2012), 118-128.
- [8] Drumm, E. C., Reeves, J. S., Madgett, M. R., and Trolinger, W. D., Subgrade Resilient Modulus Correction for Saturation Effects, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(1997), No.7, 663-670.
- [9] Humphries, W. K. y Wahls, H. E., Stress history effects on dynamic modulus of clay", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 94(1968), No. SM2.
- [10] Seed, H., Chan, C. K., & Lee, C. E., Int. Conf. on the Structural Design of Asphalt Pavements, Resilience characteristics of subgrade soils and their relation to fatigue failures, Ann Arbor, Michigan, 611-636, 1962.
- [11] Yoder, E. J. y Witzcak, M. W., *Principles of Pavement Design*. 2nd Edition, John Wiley and Sons, Inc. New York, 1975.