

Comportamiento resiliente de materiales fino-granulares en subrasantes

Resilient behavior of fine-grained materials in subgrades

HUGO ALEXANDER RONDÓN QUINTANA

Ingeniero Civil, Doctor en Ingeniería. Docente Asociado de la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: harondonq@udistrital.edu.co

FREDY ALBERTO REYES LIZCANO

Ingeniero Civil, Doctor en Ingeniería. Docente Titular del Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia. Contacto: fredy.reyes@javeriana.edu.co

EDGAR HUMBERTO SÁNCHEZ COTTE

Ingeniero Civil, Magíster en Ingeniería Civil. Docente Asistente de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: ehsanchezc@udistrital.edu.co

Fecha de recepción: 30 de Julio de 2012

Clasificación del artículo: Revisión

Fecha de aceptación: 1 de Octubre de 2012

Grupo de Investigación: GIIICUD

Palabras clave: *Comportamiento resiliente, materiales fino-granulares, pavimentos, subrasante.*

Key words: *Fine-grained materials, pavements, resilient behavior, subgrade*

RESUMEN

Los vehículos que circulan sobre una estructura de pavimento inducen ciclos de carga y descarga que generan en la subrasante deformaciones recuperables (resilientes) y permanentes (plásticas). La ingeniería de pavimentos ha venido desarrollando estudios desde la década de los 50's con el fin de intentar comprender el comportamiento elasto-plástico que experimentan los materiales granulares que conforman la subrasante. La mayor parte de las investigaciones que se han realizado en esta área se han concentrado en estudiar su comportamiento resiliente. El estado del conocimiento de estudios desarrollados para medir la respuesta resiliente en materiales fino-granulares es presentado en este artículo. Inicialmente se presenta la forma

como ha sido estudiado el comportamiento resiliente de estos materiales, y luego se describen los factores que influyen en dicho comportamiento. Un estado del conocimiento sobre el fenómeno de deformación permanente es presentado en un segundo artículo.

ABSTRACT

When the vehicles move on a pavement structure, they induce load cycles that generate resilient and permanent strains inside granular layers. Since the 50's pavement engineering has developed studies in order to understand the elastic-plastic behavior that undergoes granular materials on subgrade layer. Most of the researches that have been made in this area have concentrated in studying their resi-

liente behavior. A state of the art about the behavior of fine-grained materials in subgrade layers of pavements structures is presented in this paper. Initially, the paper tries on resilient stress-strain cha-

racteristics. The permanent strain characteristics of these materials are considered in a companion paper..

* * *

1. INTRODUCCIÓN

En una estructura de pavimento flexible cada eje de carga genera en las capas granulares (compuestas por materiales granulares no tratados) deformaciones tanto resilientes (recuperables) como permanentes (plásticas). Para entender el comportamiento de estos materiales bajo carga cíclica, la ingeniería de pavimentos ha venido desarrollando dos tipos de estudios generalmente por separado. El primero de ellos y sobre el cual se ha realizado mayor investigación desde la década de los 50's, se concentra en el desarrollo de ecuaciones matemáticas que predigan la evolución de la deformación resiliente y de las variables asociadas a la rigidez elástica del material (módulo resiliente M_r , módulo volumétrico K y el de cortante G) cuando experimentan diversas trayectorias de carga cíclica. Una vez desarrollada la ecuación se introduce en ecuaciones constitutivas elásticas con el fin de predecir la deformación que experimentará la capa granular. Estas ecuaciones son conocidas como elásticas no lineales y suponen que en cada ciclo de carga la deformación permanente es pequeña comparada con la deformación resiliente. Algunas de ellas se pueden consultar en [1-9]. El segundo tipo de estudio busca desarrollar ecuaciones matemáticas que permitan predecir la deformación permanente a partir del estado de confinamiento y del número de ciclos de carga a los cuales es solicitada una muestra en el laboratorio. Estas ecuaciones son consideradas como empíricas [p.e., 9-12]. Algunas incluyen la influencia del esfuerzo desviador [p.e., 13-14] y otras son basadas en la mecánica de suelos [15-22]. A pesar del amplio número de investigaciones en estas áreas el comportamiento elastoplástico de estos materiales aún no ha sido totalmente entendido [12, 23-29]. Específicamente existe un amplio

progreso en la predicción de la respuesta resiliente pero es menos exitoso en la predicción de la deformación permanente [30].

Los materiales granulares no tratados en un pavimento pueden ser divididos en dos: aquellos que conforman capas granulares no tratadas de base y subbase y los que conforman subrasantes. Por lo general, las capas de base y subbase se componen de agregados pétreos gruesos y la subrasante de agregados con partículas finas. Ambos tipos de materiales experimentan comportamientos diferentes bajo carga monotónica y cíclica. Para el caso de materiales gruesos que conforman capas de base y subbase estados del conocimiento de la respuesta que experimentan bajo carga cíclica pueden ser consultados en [12, 31-32]. Estados del conocimiento sobre la respuesta que experimentan materiales fino-granulares en pavimentos son escasos. Por lo anterior, en este artículo se presentan de manera resumida los resultados teóricos y experimentales de estudios llevados a cabo para evaluar el comportamiento resiliente de materiales fino-granulares cuando son sometidos a cargas cíclicas similares a aquellas que experimentan en estructuras de pavimento. Este artículo es acompañado por otro estado del conocimiento el cual trata el fenómeno de deformación permanente.

2. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL COMPORTAMIENTO RESILIENTE

La mayor parte de las investigaciones realizadas sobre materiales fino-granulares de subrasantes han demostrado que el módulo resiliente depende principalmente del estado de esfuerzos, el contenido de agua y el nivel de compactación. A continuación se describe la influencia que tiene cada uno de

los factores mencionados en la respuesta resiliente de estos materiales.

2.1 Influencia del esfuerzo

[33-34, 35-37, 38, 42, 43-63] reportan que en suelos finos el M_r decrece cuando incrementa el esfuerzo desviador en los ensayos cíclicos. Un ejemplo se presenta en la figura 1. De acuerdo con [35, 39, 40, 42, 62-63], para el caso de materiales finos, la influencia de la presión de confinamiento es menor en comparación con la del esfuerzo desviador (ver figuras 2 y 3).

En las figuras 2 - 4 se observa que en ensayos triaxiales cíclicos, el M_r tiende a un valor inferior constante a medida que aumenta el esfuerzo desviador (p.e., [33-34, 54, 39, 40-63]). Este valor de M_r es utilizado en el diseño de pavimentos.

Liu y Xiao ensayaron bajo carga cíclica en un triaxial muestras de arcilla expansiva tipo CL aplicando frecuencias de carga de 1 y 2 Hz. Ellos concluyen que el efecto de la velocidad de carga es nulo sobre la respuesta resiliente de este tipo de material.

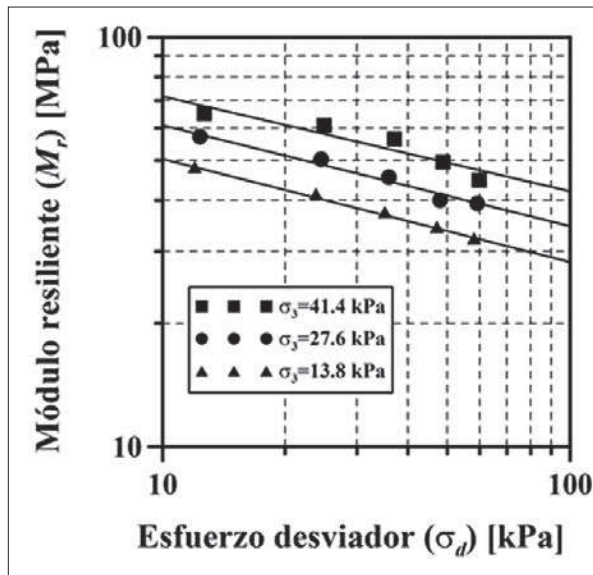


Figura 1. Evolución del M_r con el esfuerzo desviador
Fuente: Tomada de [42].

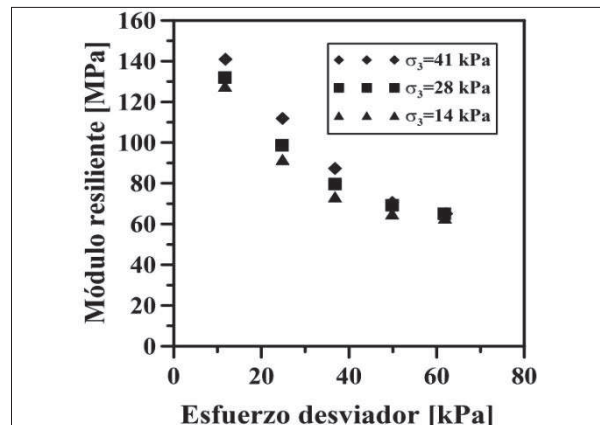


Figura 2. Influencia de la presión de confinamiento (σ_3) sobre el M_r
Fuente: Tomada de [51]

2.2 Influencia del contenido de agua

[54-55, 60-63] reportan que en suelos finos el M_r disminuye a medida que aumenta el contenido de agua (ver figura 5).

El estado teórico ideal de la subrasante para el ingeniero de pavimentos es aquel en el cual el suelo experimenta el contenido de agua óptimo (OMC por sus siglas en inglés) y la densidad máxima seca que pueda alcanzar en el ensayo de compactación

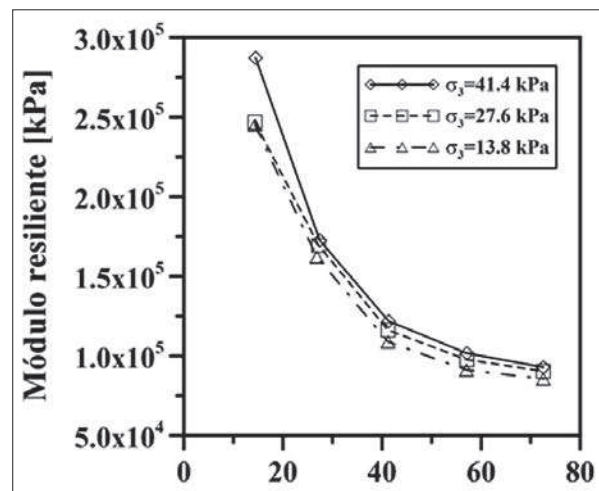


Figura 3. Influencia de la presión de confinamiento (σ_3) sobre el M_r
Fuente: Tomada de [39]

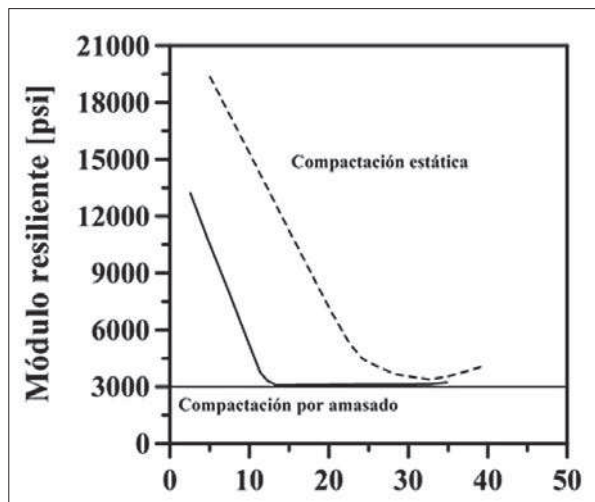


Figura 4. Evolución del M_r con el esfuerzo desviador
Fuente: Tomada de [33].

Proctor modificado. Sin embargo en campo, el contenido de agua presente en la subrasante fluctúa en el tiempo. Por lo anterior, las investigaciones más recientes han tenido como objetivo principal evaluar como influyen dichas fluctuaciones sobre las características resilientes de suelos de subrasante. En especial se han concentrado en evaluar dichas propiedades cuando el contenido de agua excede el OMC ya que por lo general la humedad en la subrasante es superior al OMC. Von Quintus y Killingworth examinaron subrasantes de 137 pavimentos en funcionamiento los cuales incluyeron 59 suelos cohesivos y encontraron que la humedad de dichos suelos está siempre por el lado de la rama húmeda. Basados en observaciones de campo [66-69] reportan un aumento de la humedad después de la construcción del pavimento. De acuerdo con [69], suelos arcillosos de subrasante exhiben un incremento del contenido de agua entre 20-30% más alto que el límite plástico del suelo y ocurre entre el tercer al quinto año de servicio del pavimento.

[70-72] reportaron que el M_r disminuye cuando el contenido de agua es superior al OMC e incrementa cuando es menor (ver figura 6).

Khoury et al. utilizaron tres muestras arcillosas de Oklahoma y evaluaron la influencia del contenido de agua sobre el M_r de cinco formas. En la primera,

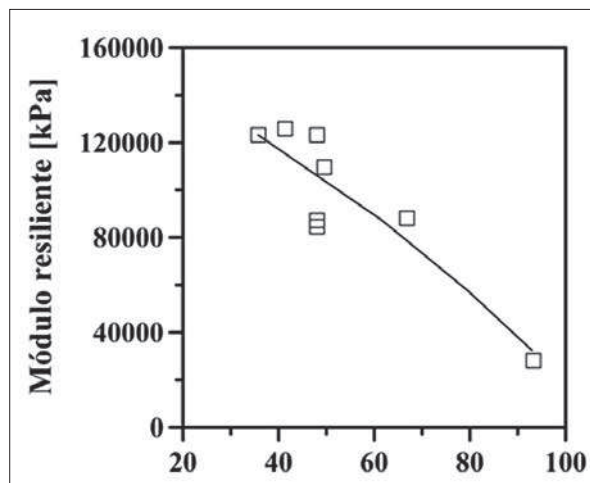


Figura 5. Evolución del M_r con el grado de saturación
Fuente: Tomada de [64].

las muestras fueron compactadas con OMC, OMC-4% y OMC+4%. En la segunda, los especímenes fueron compactados con OMC+4% y luego se secaban las muestras hasta OMC y OMC-4%. En la tercera, las muestras eran compactadas a OMC-4% y se humedecían luego hasta OMC y OMC+4%. En la cuarta, los especímenes se compactaban con el OMC y luego se secaban hasta OMC-4%. En la última, las muestras se compactaban en OMC y luego se humedecían hasta OMC+4% y mencionan que las muestras fueron preparadas de tal forma que alcanzaran densidades entre 95-100% del Proctor modificado con el fin de que el efecto de la densidad fuera nulo. En uno de los suelos, el M_r aumentó aproximadamente 200% cuando se compactó a OMC+4% y luego se secó a OMC-4%, mientras que cuando se compactó a OMC y se secó a OMC-4% el aumento del M_r fue tan solo de 80%. Cuando se humedece el suelo se observó una disminución en el M_r , pero esta disminución es mayor cuando se humedece desde OMC-4% en comparación que cuando se hace desde OMC.

En la figura 7 se observan los resultados de ensayar bajo carga cíclica en un triaxial, muestras de arcilla fabricadas con el contenido óptimo de agua (OMC) especificado por el Proctor modificado, con la humedad del suelo en campo (EMC la cual es superior a la OMC) y humedad entre OMC y

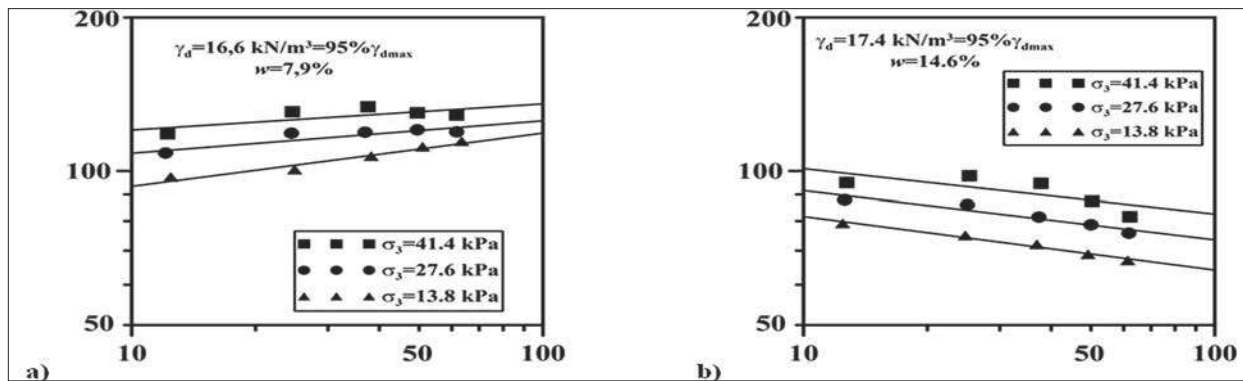


Figura 6. Evolución del M_r para una muestra de arcilla con contenido de agua a) inferior al OMC y b) superior al OMC
Fuente: Tomada de [72].

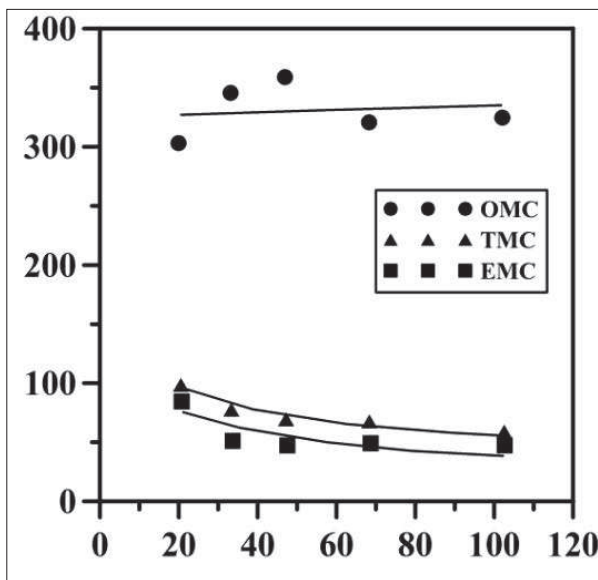


Figura 7. Evolución del M_r para una muestra de arcilla con el contenido de agua
Fuente: Tomada de [73].

EMC (TMC). Se observa en la figura que a medida que incrementa la humedad el M_r disminuye.

[37, 47] mencionan que compactar muestras de arcilla por el lado seco del ensayo Proctor (contenidos de agua inferiores a OMC) genera valores superiores de M_r y las deformaciones resilientes incrementan rápidamente con incremento en el contenido de agua.

Para el diseño de pavimentos las propiedades mecánicas de la subrasante se evalúan principalmente cuando está saturado, ya que ésta es la condición

más crítica del suelo. Sin embargo, en campo este material se encuentra por lo general en estado parcialmente saturado. Por lo anterior, conceptos como el de succión, necesario para determinar esfuerzos efectivos en suelos parcialmente saturados, han sido involucrados en investigaciones recientes sobre evolución del M_r con el contenido de agua. En los estudios con succión se utiliza principalmente la matricial ya que es la mayor parte del total de succión que afecta el esfuerzo efectivo del suelo [54, 74]. Adicionalmente, para medir succión, el método más utilizado ha sido el del papel filtro ya que de acuerdo con [73-75] este método es barato, simple, cubre todos los rangos de succión y puede obtenerse la succión matricial y total al mismo tiempo. reportaron que un incremento en la succión genera un aumento en el M_r . Sauer y Monismith mencionan además que todos los suelos ensayados del tipo A-4 a A-7-6 disminuyeron el M_r cuando se incrementó el grado de saturación (decrece la succión) y el nivel de disminución varió con el tipo de suelo.

Shackel reportó que la succión del suelo disminuye cuando incrementa el número de ciclos de carga (N) y por lo tanto el M_r debe disminuir con N . Khoury et al. demostraron que el M_r incrementa cuando aumenta la succión matricial pero no varía significativamente con la succión osmótica. Adicionalmente, concluyeron que el M_r correlaciona mejor con la succión del suelo que con la humedad. [78-79] encontraron una relación lineal entre el M_r

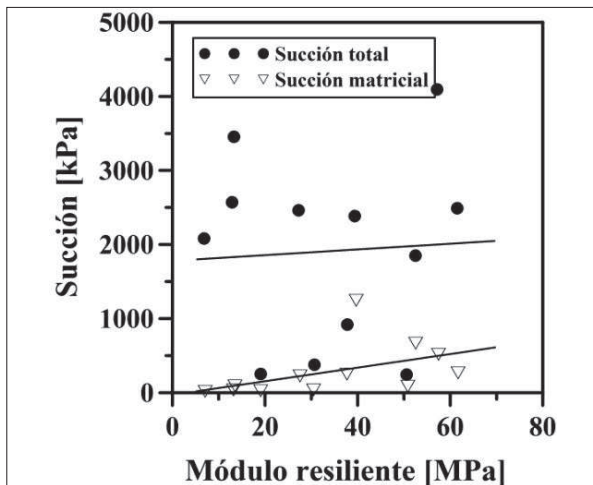


Figura 8. Evolución del M_r con la succión
Fuente: Tomada de [73]

y la succión del suelo.

La figura 8 muestra la evolución del M_r con la succión total y matricial. Se observa un incremento en M_r con aumento de la succión. Adicionalmente se observa que la correlación del M_r es mejor con la succión matricial que con la total [73].

Yang et al. ensayaron dos suelos arcillosos del Norte de Taiwán con el fin de evaluar el efecto de la succión sobre la respuesta resiliente. Es interesante observar en la figura 9 que cuando la magnitud de la succión es alta el M_r incrementa a medida que

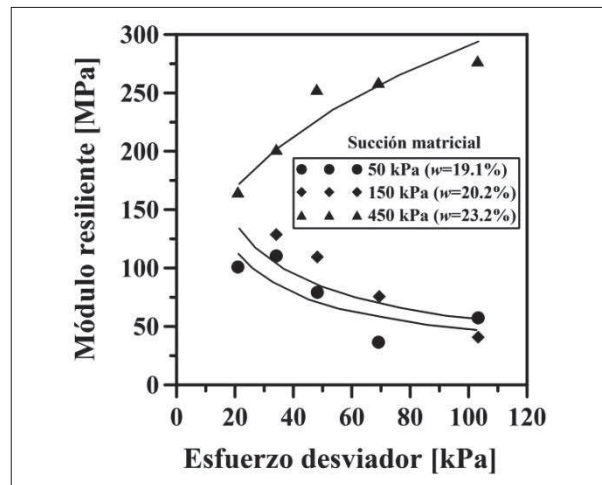


Figura 9. Evolución del M_r con el esfuerzo desviador y la succión
Fuente: Tomada de [80].

aumenta el esfuerzo desviador. Cuando la magnitud de la succión es pequeña el comportamiento es el típico que experimentan estos materiales, es decir, disminuye M_r con el desviador. Años atrás, Kung et al. habían reportado resultados similares sobre dos muestras de suelo arcilloso tipo A-6 y A-7-6 (ver figura 10).

2.3 Influencia de la densidad

[46, 49, 51-52, 62] reportan que en suelos finos el

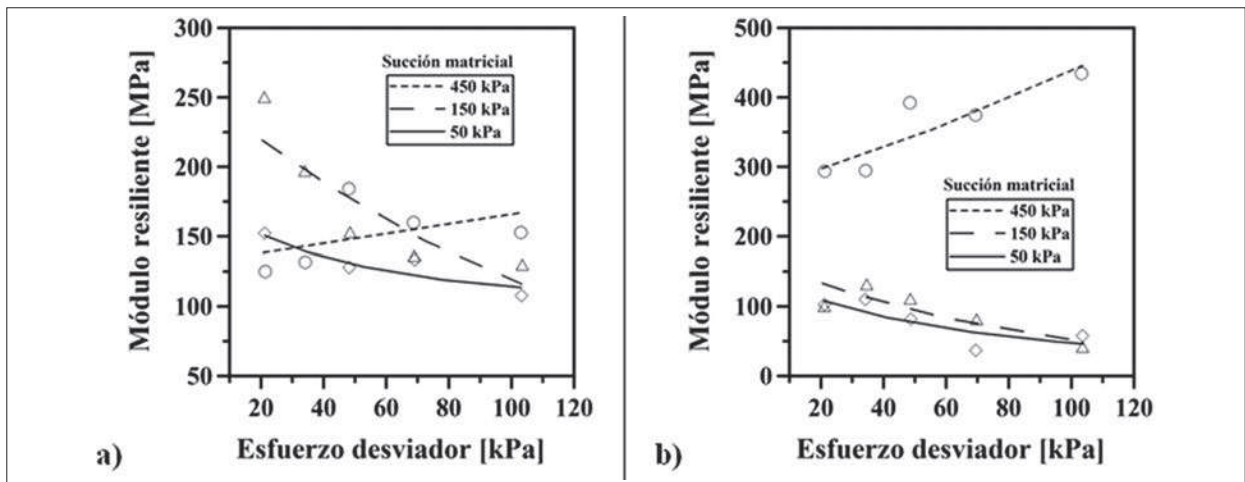


Figura 10. Evolución del M_r con el esfuerzo desviador y la succión para suelos a) A-7-6, y b) A-6
Fuente: Tomada de [81].

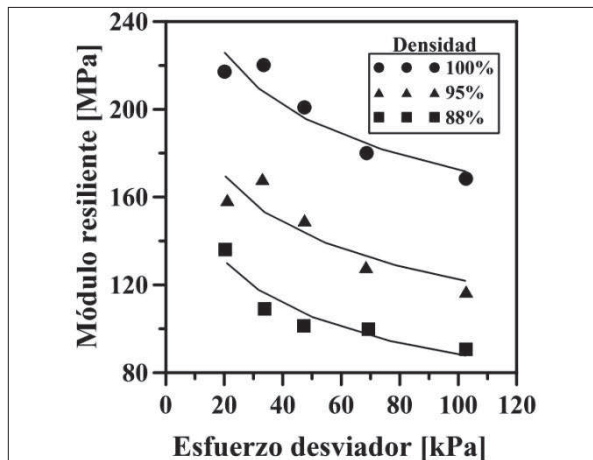


Figura 11. Evolución del M_r con el porcentaje de compactación Proctor
Fuente: Tomada de [73].

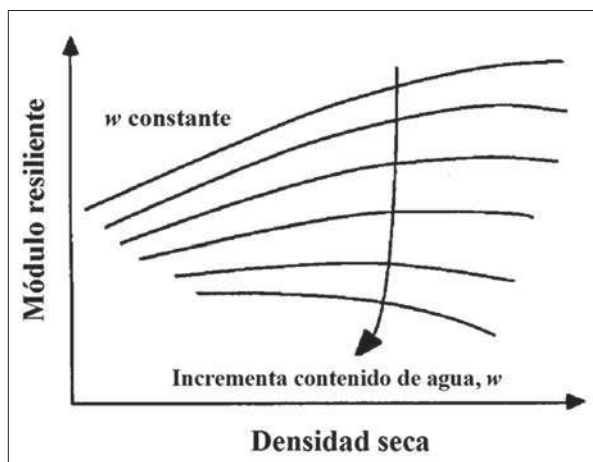


Figura 12. Representación esquemática de evolución del M_r con la densidad y el contenido de agua
Fuente: Tomada de [36].

M_r incrementa con el aumento en el peso unitario. Un ejemplo se presenta en la figura 11. Contrario a lo anterior, Li y Selig mencionan que la evolución del M_r con la densidad debe ser descrita evaluando el contenido de agua al mismo tiempo ya que al aumentar la densidad no siempre aumenta el M_r y presentan la figura 12.

reportan que muestras compactadas estáticamente generan mayores M_r en comparación con aquellas que son compactadas por amasado.

3. CONCLUSIONES

Los factores que más influyen sobre la respuesta resiliente que experimentan materiales fino granulares en subrasantes de pavimentos son los esfuerzos aplicados, el contenido de agua y el estado de compactación. Muy pocas investigaciones han sido desarrolladas para evaluar la influencia de otros factores tales como: tipo de arcilla utilizada (diferentes propiedades índices, capacidad de expansión, resistencia al corte, muestras normalmente consolidadas y sobre consolidadas), condiciones de ensayo y frontera (drenado, no drenado, con presión de confinamiento variable), anisotropía y velocidad de carga.

Materiales granulares finos bajo carga cíclica incrementan las deformaciones resilientes (rigidez disminuye) cuando se aumenta la magnitud del esfuerzo desviador aplicado y el contenido de agua, y cuando disminuye el peso unitario. En estos materiales, la influencia de la presión de confinamiento es menor en comparación con la del esfuerzo desviador. Cuando la magnitud del esfuerzo cíclico desviador incrementa, la tendencia del módulo resiliente es alcanzar un valor inferior constante el cual es utilizado en el diseño de pavimentos.

Muestras fino granulares fabricadas con humedad inferior al contenido de agua óptimo (OMC) especificado por el ensayo Proctor tienden a experimentar mayores módulos en comparación con aquellas fabricadas con OMC y con contenidos superiores al OMC. En estos casos en donde el material se encuentra parcialmente saturado el efecto de la succión juega un papel importante. La rigidez incrementa cuando aumenta este parámetro, y por lo general parece existir una relación directa entre el módulo resiliente y la succión matricial para niveles de esfuerzo pequeños. Cuando la magnitud de la succión es elevada, el módulo incrementa de manera atípica a medida que aumenta el esfuerzo desviador.

REFERENCIAS

- [1]. H.R. Boyce, "A Non-linear Model for the Elastic Behaviour of Granular Materials under Repeated Loading", *Proceedings International Symposium on Soils under Cyclic and Transient Loading*, Swansea, U.K., vol. 1, pp. 285-294, 1980.
- [2]. R.G. Hicks and C.L. Monismith, "Prediction of the Resilient Response of Pavements Containing Granular Layers Using Non-linear Elastic Theory", *Proceedings of the 3rd International Conference on Asphalt Pavements*, vol. 1, pp. 410-429, 1972.
- [3]. E. Taciroglu and K.D. Hjelmstad, "Simple Nonlinear Model for Elastic Response of Cohesionless Granular Materials", *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 128, pp. 969-978, 2002.
- [4]. F. Tatsuoka, M. Ishiara, T. Uchimura, and A. Gomes Correia, "Non-linear Resilient Behaviour of Unbound Granular Materials Predicted by the Cross-Anisotropic Hypo-Quasi-Elasticity Model", *Unbound Granular Materials – Laboratory testing, In-situ testing and modelling*, Gomes Correia editor, Balkema, Rotterdam, pp. 197-206, 1999.
- [5]. I. Hoff and R.S. Nordal, "Constitutive Model for Unbound Granular Materials Based in Hyperelasticity", *Unbound Granular Materials – Laboratory Testing, In-situ Testing and Modelling*, Gomes Correia editor, Balkema, Rotterdam, pp. 187-196, 1999.
- [6]. P. Hornych, A. Kazai and J.-M. Piau, "Study of the Resilient Behaviour of Unbound Granular Materials", *Proc. BCRA '98*, Trondheim, Nordal & Refsdal editor's, vol. 3, pp. 1277-1287, 1998.
- [7]. E. Tutumluer and M.R. Thompson, "Anisotropic Modelling of Granular Bases in Flexible Pavements", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, no. 1577, Washington D.C., pp. 18-26, 1997.
- [8]. A. Adu-Osei, D.N. Little and R.L. Lytton, "Cross-anisotropic Characterization of Unbound Granular Materials", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, no. 1757, Washington, D.C., pp. 82-91, 2001.
- [9]. P.-Y. Hicher and C.S. Chang, "Anisotropic Nonlinear Elastic Model for Particulate Materials", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 132, no. 8, pp. 1052-1061, 2006.
- [10]. G.T. Sweere, "Unbound Granular Bases for Roads", PhD. Thesis, University of Delft, Netherlands, 1990.
- [11]. R.D. Barksdale, "Laboratory Evaluation of Rutting in Basecourse Materials", *Proceedings of the 3rd International Conference on Asphalt Pavements*, vol. 1, pp. 161-174, 1972.
- [12]. F. Lekarp, I. Ulf and A.R. Dawson, "State of the art. I: Resilient Response of Unbound Aggregates", *Journal of Transportation Engineering*, vol. 126, no. 1, pp. 66-75, 2000.
- [13]. A.K. Lashine, S.F. Brown and P.S. Pell, "Dynamic Properties of Soils", Department of Civil Engineering, University of Nottingham (England), 1971.
- [14]. G. Gidel, P. Hornych, J. Chauvin, D. Breyse, and A. Denis, "A New Approach for Investigating the Permanent Deformation Behavior of Unbound Granular Material Using the Repeated Load Triaxial Apparatus", *Bulletin Des Laboratoires Des Ponts et Chaussées*, pp. 5-21, 2001.
- [15]. K.W. Hau, G.R. McDowell, G.P. Zhang and S.F. Brown, "The Application of a Three-Surface Kinematic Hardening Model to Repeated Loading of Thinly Surfaced Pavements", *Granular Matter*, vol. 7, no. 2-3, pp. 145-156, 2005.

- [16]. H. Wolff, “Elasto-Plastic Modelling of Granular Layers”, Research Report RR92/312, Department of Transport, South Africa, 1992.
- [17]. H. Wolff and A.T. Visser, “Incorporating Elasto - Plasticity Granular Layers Pavement Design”, *Proc.Instn. Civil Engineering Transportation*, no. 105, pp. 259-272, 1994.
- [18]. P. Hicher, A. Daouadji and D. Fedghouche, “Elastoplastic Modelling of the Cyclic Behaviour of Granular Materials”. *Unbound Granular Materials – Laboratory testing, In-situ testing and modelling*, Gomes Correia, A. (Ed.), A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 161-168, 1999.
- [19]. C. Chazallon, “An Elastoplastic Model with Kinematic Hardening for Unbound Aggregates in Roads”. *Unbound Aggregates in Road Construction – UNBAR 5*, Dawson editor, Balkema, Rotterdam, pp. 265-270, 2000.
- [20]. Y. Takeuchi, M. Koyanagawa, T. Maki, T. Nishizawa, and K. Endo, “Fundamental Study on Permanent Deformation Analysis of Granular Base Course Material Using Elasto-Plastic Model”, *Proc., of the 6th International Symposium on Pavements Unbound*, pp. 69-78, 2004.
- [21]. T. Habiballah and C. Chazallon, “An Elastoplastic Model Based on the Shakedown Concept for Flexible Pavements Unbound Granular Materials”, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, vol. 29, no. 6, pp. 577-596, 2005.
- [22]. T. Habiballah, C. Chazallon and P. Hornych, “Simplified Model Based on the Shakedown Theory for Flexible Pavements”, *Proc., of the 6th International Symposium on Pavements Unbound*, pp. 191-198, 2004.
- [23]. S.F. Brown, “Soil Mechanics in Pavement Engineering”, *The 36th Rankine Lecture of the British Geotechnical Society, Géotechnique*, vol. 46, no. 3, pp. 383-426, 1996.
- [24]. F. Lekarp, I.R. Richardson and A. Dawson, “Influences on Permanent Deformation Behavior of Unbound Granular Materials”. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, no. 1547, Washington D.C., pp. 68-75, 1996.
- [25]. J. Uzan, “Permanent Deformation of a Granular Base Material”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, no. 1673, Washington D.C., pp. 89-94, 1999.
- [26]. I.F. Collins and M. Boulbibane, “Geomechanical Analysis of Unbound Pavements Based on Shakedown Theory”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 126, no. 1, pp. 50-59, 2000.
- [27]. S. Werkmeister, R. Numrich, A. Dawson and F. Wellner, “Deformation Behaviour of Granular Materials under Repeated Dynamic Load”, *Journal of Environmental Geomechanics – Monte Verità*, pp. 215-223, 2002.
- [28]. A.R. Dawson, “Cumulative Damage and its Applicability to Low Volume Road Pavements”. Presented at *Internationales Kolloquium Prüfung, Bewertung und Bemessung von Straßenbefestigungen*, Technische Universität Dresden, April 3-4, 2003.
- [29]. S. Werkmeister, “Permanent Deformation Behaviour of Unbound Granular Materials in Pavement Constructions”, PhD thesis, University of Technology, Dresden, 2003.
- [30]. A.R. Dawson, M.J. Mundy and M. Huhtala, “European Research into Granular Material for Pavement Bases and Subbases”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, no. 1721, Washington, D.C., pp. 91-99, 2000.
- [31]. F. Lekarp, I. Ulf and A.R. Dawson, “State of the art. II: Permanent Strain Response of Unbound Aggregates”, *Journal of Transportation Engineering*, vol. 126, no. 1, pp. 76-83, 2000.
- [32]. H.A. Rondón, “Comportamiento de un Material Granular no Tratado en Ensayos

- Triaxiales Cíclicos con Presión de Confinamiento Constante (PCC) y Variable (PCV)", PhD tesis de doctorado en Ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá D.C. (Colombia), 2008.
- [33]. H.B. Seed, C.K. Chan and C.E. Lee, "Resilient Characteristics of Subgrade Soils and their Relations to Fatigue Failures in Asphalt Pavements", *Proc., 1st Int. Conf. on the Structure Des. of Asphalt Pavements*, University of Michigan, Ann Arbor, pp. 611-636, 1962.
- [34]. M.W. Frost, P.R. Fleming and C.D.F. Rogers, "Cyclic Triaxial Tests on Clay Subgrades for Analytical Pavement Design", *Journal of transportation Engineering*, vol. 130, no. 3, pp. 378-386, 2004.
- [35]. M.R. Thompson, E. Tutumluer and M. Bejarano, "Granular Material and Soil Moduli Review of the Literature", Final Report DOT 95-C-001, Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, 1998.
- [36]. D. Li and E.T. Selig, "Resilient Modulus for Fine-Grained Subgrade Soils", *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 120, no. 6, pp. 939-957, 1994.
- [37]. W. Lee, N.C. Bohra, A.G. Altschaeffl and T.D. White, "Resilient Modulus of Cohesive Soils" *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 123, no. 2, pp. 131-136, 1997.
- [38]. S.F. Brown and E.T. Selig, "The Design of Pavement and Rail Track Foundations", *Cyclic Loading of Soils*, Chapter 6, pp. 249-305, 1991.
- [39]. P. Garnica, N. Pérez y J.A. Gómez, "Módulo de Resiliencia en Suelos Finos y Materiales Granulares", Publicación Técnica No. 142, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Qro., 2001.
- [40]. E.C. Drumm, Y. Boateng-Poku and T.J. Pierce, "Estimation of Subgrade Resilient Modulus from Standard Tests", *J. Geotechnical Engineering*, vol. 116, no. 5, pp. 774-789, 1990.
- [41]. M.R. Thompson and Q.L. Robnett, "Resilient Properties of Subgrade Soils", Final Report, FHWA-IL-UI-160, Univ. of Illinois, Urbana, 1976.
- [42]. M.B. Elias, H.H. Titi and S. Helwany, "Evaluation of Resilient Modulus of Typical Wisconsin Soils", *Geo Jordan 2004, Advance in Geotechnical Engineering with Emphasis on Dams Highway Materials and Soil Improvement*, Irbid, Jordan, pp. 335-346, 2004.
- [43]. M. Arm, "Dynamic Testing of Fine Grained Subgrade Soils", *Flexible Pavements*, Gomes Correia (ed.), Balkema, Rotterdam, pp. 135-142, 1996.
- [44]. L.N. Mohammad, A.J. Puppala and P. Alavilli, "Resilient Properties of Laboratory Compacted Subgrade Soils", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, no. 1196, Washington, D.C., pp. 87-102, 1995.
- [45]. Dawson, A. R. and A. Gomes Correia, "The Effects of Subgrade Clay Condition on the Sstructural Behavior of Road Pavements", *Flexible Pavements*, Balkema, pp. 113-119, 1996.
- [46]. T. Al-Refeai and A. Al-Suhaibani, "Factors Affecting Resilient Behavior of Subgrade Soils in Saudi Arabia", *J. King Saud University*, vol. 14, Eng. Sci. (2), pp. 165-182, 2002.
- [47]. J. Vidal y R. Osorio, "Comportamiento Resiliente de Suelos Finogranulares", *Revista Universidad EAFIT*, vol. 42, no. 141, pp. 92-110, 2006.
- [48]. J. Vidal y R. Osorio, "Módulo Resiliente de Suelos Finogranulares", *Revista Universidad EAFIT*, no. 125, pp. 63-71, 2002.
- [49]. K.P. George, "Prediction of Resilient Modulus from Soil Index Properties", Final Report, University of Mississippi, Department of Civil Engineering, Oxford, 2004.
- [50]. M.B. Elias and H.H. Titi, "Evaluation of Resilient Modulus Model Parameters for

- Mechanistic-Empirical Pavement Design”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Washington, D.C., no. 1967, pp. 89-100, 2006.
- [51]. A.M. Rahim, “Subgrade Soil Index Properties to Estimate Resilient Modulus for Pavement Design”, *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 6, no. 3, pp. 163-169, 2005.
- [52]. S.-R. Yang, W.-H. Huang and Y.-T. Tai, “Variation of Resilient Modulus with Soil Suction for Compacted Subgrade Soils”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Washington, D.C., no. 1913, pp. 99-106, 2005.
- [53]. D. Kim and N.Z. Siddiki, “Simplification of Resilient Modulus Testing for Subgrades”, Final Report FHWA/IN/JTRP-2005/23, Joint Transportation Research Program, Project No. C-36-52S, School of Civil Engineering, Purdue University, Feb., 2006.
- [54]. R. Y. Liang, S. Rabab’ah and M. Khasawneh, “Predicting Moisture-Dependent Resilient Modulus of Cohesive Soils Using Soil Suction Concept”, *Journal of transportation Engineering*, vol. 134, no. 1, pp. 34-40, 2008.
- [55]. E. C. Drumm, J.S. Reeves, M.R. Madgett and W.D. Trolinger, “Subgrade Resilient Modulus Correction for Saturation Effects”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 123, no. 7, pp. 663-670, 1997.
- [56]. F.M. Limaymanta y W. Gutiérrez, “Ensayo de Módulo Resiliente”, presentado en *XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil – QUITOS 2003*, 2003.
- [57]. B.E. Wilson, S.M. Sargand, G.A. Hazen and R. Green, “Multiaxial Testing of Subgrade”, *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, no. 1278, Washington, D.C., pp. 91-95, 1990.
- [58]. R. Pezo and W.R. Hudson, “Prediction Models of Resilient Modulus for Non-granular Materials”, *Geotechnical Testing Journal*, vol. 17, no. 3, pp. 349-355, 1994.
- [59]. A. Sawangsuriya, T.B. Edil and C.H. Benson, “Effect of Suction on Resilient Modulus of Compacted Fine-Grained Subgrade Soils”, *Transportation Research Record: Journal of the TRB*, Washington, D.C., no. 2101, pp. 82-87, 2009.
- [60]. J. Liu and J. Xiao, “Experimental Study on the Stability of Railroad Silt Subgrade with Increasing Train Speed”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 136, no. 6, pp. 833-841, 2010.
- [61]. A. Gomes Correia and S. Gillett, “Resilient Behavior of Soils”, *Flexible Pavements*, Gomes Correia (ed.), Balkema, Rotterdam, pp. 105-112, 1996.
- [62]. L.N. Mohammad, A. Herath, M.Y. Abu-Farsakh, K. Gaspard and R. Gudishala, “Prediction of Resilient Modulus of Cohesive Subgrade Soils from Dynamic Cone Penetrometer Test Parameters”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 19, no. 11, pp. 986-992, 2007.
- [63]. W.E. Wolfe and T.S. Butalia, “Continued Monitoring of SHRP Pavement Instrumentation Including Soil Suction and Relationship with Resilient Modulus”, Rep. No. FHWA/OH-2004/007, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, D.C., 2004.
- [64]. D.A. Greenwood, “Bothkennar Soft Clay Test Site: Characterization and Lesson Learned”, *8th Géotechnique Symp., Géotechnique*, vol. 42, no. 2, pp. 161-378, 1992.
- [65]. H.L. Von Quintus and B.M. Killingsworth, “Analysis Relating to Pavement Material Characterizations and their Effects on Pavement Performance”, Publication FHWA-RD-97-085, FHWA, U.S. Department of Transportation, 1998.
- [66]. E.K. Sauer and C.L. Monismith, “Influ-

- ence of Soil Suction on Behavior of a Glacial Till Subjected to Repeated Loading”, *Highway Research Record*, no. 215, HRB, National Research Council, Washington D. C., pp. 8-23, 1968.
- [67]. M.K. Elfito and J.L. Davidson, “Modeling Field Moisture in Resilient Modulus Testing”, *Geotechnical Special Publication*, no. 24, pp. 31-51, 1989.
- [68]. G.B. Tadmalla and K.P. George, “Characterization of Subgrade Soils and at Simulated Field Moisture”, *Transportation Research Record: Journal of the transportation research board*, no. 1481, Washington D.C., pp. 21-27, 1995.
- [69]. J. Uzan, “Characterization of Clayey Subgrade Materials for Mechanistic Design of Flexible Pavement”, *Transportation Research Record: Journal of the transportation research board*, n1629, o. Washington D. C., pp. 188-196, 1998.
- [70]. D. Yuang and S. Nazarian, “Variation in Moduli of Base and Subgrade with Moisture”, presented at *82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C., 2003.
- [71]. N.N. Khoury and M.M. Zaman, “Correlation Between Resilient Modulus, Moisture Variation and Soil Suction for Subgrade Soils”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, no. 1874, pp. 99-107, 2004.
- [72]. MEPDG (2004), ARA, Inc., ERES Consultants Division, “*Guide for the Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*”, NCHRP Project 1-37A, Transportation Research Board, Washington, D.C., www.trb.org/mepdg/. Accessed September 12, 2007.
- [73]. S.-R. Yang, W.-H. Huang and Y.-T. Tai, “Variation of Resilient Modulus with Soil Suction for Compacted Subgrade Soils”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Washington, D.C., no. 1913, pp. 99-106, 2005.
- [74]. D.G. Fredlund and H. Rahardjo, *Soil mechanics for unsaturated soils*, Wiley, New York, 1993.
- [75]. A. Sawangsurriya, “*Stiffness-suction-moisture relationship for compacted soils*”, PhD. thesis, University of Wisconsin, Madison, 2006.
- [76]. B. Shackel, “Changes in Soil Suction in a Sand-Clay Subjected to Repeated Triaxial Loading”, *Highway Research Record*, 429, HRB, National Research Council, Washington D.C., pp. 29-39, 1973.
- [77]. N.N. Khoury, M. Musharraf, J.B. Nevels and J. Mann, “Effect of Soil Suction on Resilient Modulus of Subgrade Soil Using Filter Paper Technique”, presented at *82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C., 2003.
- [78]. G. L. Dehlen, “The Effect of Non-Linear Material in the Behavior of Pavements Subjected to Traffic Loads”, PhD thesis, Univ. of California, Berkeley, 1969.
- [79]. F. N. Finn, K. Nair and C.L. Monismith, “Application of Theory in the Design of Asphalt Pavements”, *Proc. 3rd Int. Conf. on the Struct. Des. of Asphalt Pavements*, Univ. of Michigan, Ann Arbor, pp. 392-409, 1972.
- [80]. S.-R. Yang, H.-D. Lin, J.H.S. Kung and W.-H. Huang, “Suction-Controlled Laboratory Test on Resilient Modulus of Unsaturated Compacted Subgrade Soils”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 134, no. 9, pp. 1375-1384, 2008a.
- [81]. J.H.S. Kung, H.-D. Lin, S.-J. Yang and W.-H. Huang, “Resilient Modulus and Plastic Strain of Unsaturated Cohesive Subgrade Soils”, *Unsaturated Soils 2006*, pp. 541-552, 2006.