

**IAG77-08-2013**  
**EFFECTO DE CONFINAMIENTO GENERADO POR UN GEOSINTÉTICO**  
**EN ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO FLEXIBLE**  
**EFEITO DO CONFINAMENTO GERADO POR UM GEOSINTÉTICO**  
**NAS ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

Paulina Leiva Padilla  
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica  
San José, Costa Rica  
[paulina.leivapadilla@ucr.ac.cr](mailto:paulina.leivapadilla@ucr.ac.cr)

Luis Guillermo Loría Salazar  
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica  
San José, Costa Rica  
[luis.loriasalazar@ucr.ac.cr](mailto:luis.loriasalazar@ucr.ac.cr)

William Vargas Monge  
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica  
San José, Costa Rica  
[william.vargasmonge@ucr.ac.cr](mailto:william.vargasmonge@ucr.ac.cr)

Alejandro Navas Carro  
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica  
San José, Costa Rica  
[alejandro.navas@ucr.ac.cr](mailto:alejandro.navas@ucr.ac.cr)

## **Resumen**

Los suelos de Costa Rica son producto de los procesos geológicos que les dieron origen. La meteorización de suelos residuales y transportados, ha generado la formación de suelos con problemáticas para la ingeniería, lo que determina que es necesario modificar las técnicas de construcción y control de calidad de proyectos. Dentro de las obras de infraestructura vial, el refuerzo de estructuras de pavimento flexible, por medio de la utilización de materiales geosintéticos, es una solución de bajo costo que se adecúa a la solicitud mecánica y funcional que genera la problemática de los suelos blandos de subrasante. Comprender tal comportamiento, es un elemento importante para el desarrollo de metodologías de diseño más apropiadas. La presente investigación pretende estudiar el efecto de confinamiento por restricción lateral, que aportan materiales geosintéticos a las capas granulares, ya que pareciera tener una mayor influencia que el efecto de membrana, asociado a la resistencia hacia arriba generada por el geosintético cuando el material entra en tensión (contrario a lo que proponen las teorías de diseño actuales). Para este fin, se desarrollaron análisis con la ayuda de un programa basado en la metodología de elementos finitos, que permite introducir este tipo de elementos a la estructura (capacidad que los programas de análisis de pavimentos tradicionales no poseen).

## **Resumo**

Os solos da Costa Rica são resultado dos processos geológicos que lhes deram origem. O intemperismo dos solos residuais e transportados, tem gerado a formação de solos problemáticos para a engenharia, o que determina a necessidade de mudar as técnicas de construção e controle de qualidade dos projetos. Dentro das obras da infra-estrutura rodoviária, o esforço da estrutura do pavimento flexível, por meio da utilização de materiais geossintéticos, é uma solução de baixo custo adequada à solicitação mecânica e funcional que gera a problemática dos solos brandos do subleito. Compreender esse comportamento é um elemento importante para o desenvolvimento de metodologias de design apropriadas. O presente trabalho tem por objetivo estudar o efeito do confinamento por contenção lateral, que os geossintéticos contribuem com as camadas granulares, já que parece ter uma influência maior que o efeito de membrana, associado à resistência para cima gerada pelo geossintético quando o material entra em tensão (ao contrário do que é proposto pelas atuais teorias de design). Para este fim, a análise foi desenvolvida com a ajuda dum programa com base no método dos elementos finitos que permite introduzir este tipo de elementos na estrutura (capacidade que não tem os programas de análise de pavimentos tradicionais).

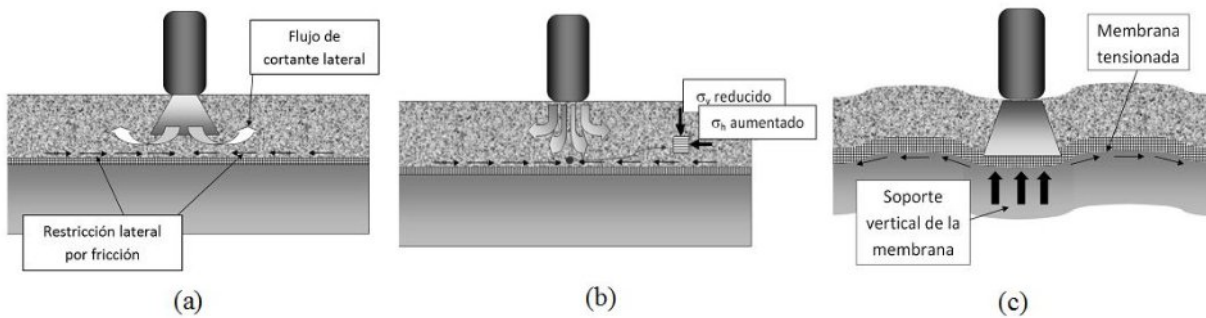
## INTRODUCCION

Según la norma ASTM D 4439, se define geosintético como “un producto plano fabricado a partir de materiales poliméricos, para ser usado con suelo, roca, tierra o cualquier otro material geotécnico, como parte integral de un proyecto, estructura o sistema realizado por el hombre”. (ASTM, 2003) Este tipo de materiales se compone comúnmente de polímeros (plásticos), entre estos el polietileno, poliéster, polipropileno, cloruro polivinílico, y poliestireno. El caucho, la fibra de vidrio, y otros materiales naturales, son también utilizados (Burd y Houlsby, 1986). La configuración de su constitución define las propiedades de cada grupo de geosintéticos.

A lo largo de la historia, se han realizado una serie de estudios y metodologías de diseño, que intentan considerar la incorporación de este tipo de materiales a las estructuras de pavimento. Estas tratan de introducir el comportamiento mecánico de los geosintéticos cuando son colocados específicamente en la interfase subrasante-capa granular, y más recientemente dentro de la capa de subbase. Por lo tanto, se hace necesario el estudio de los fundamentos de tales teorías, con la finalidad de mejorarlas y de esta manera, lograr que el diseño se acerque aún más a las condiciones reales que se van a modelar.

Es importante anotar que teóricamente se ha definido la existencia de un efecto de membrana que corresponde a la componente vertical generada por la deformación de la subbase cuando se encuentra bajo la acción de las cargas y hace que el geosintético se estire como una membrana. A este efecto es al que se le ha atribuido mayoritariamente el trabajo mecánico del geosintético hasta la actualidad (Giroud y Noiray, 1981). El efecto resultante de la componente horizontal es el de confinamiento por restricción lateral, este a su vez genera un incremento a la capacidad del soporte, el cual parece merecer la atribución de generar el efecto positivo en el geosintético. En la figura 1 se muestran los mecanismos de refuerzo desarrollados por los geosintéticos en pavimentos.

**Figura 1. Mecanismos de refuerzo de geosintéticos en pavimentos (a) Restricción lateral, (b) Incremento en la capacidad de soporte y (c) Efecto de membrana.**



La presente investigación tiene entonces la finalidad de comparar el análisis clásico de la formulación de Giroud y Noiray, con una evaluación realizada mediante la técnica del elemento finito, sobre la misma estructura de pavimento, condición de carga, propiedades de los materiales componentes, y localización especial del geosintético dentro del pavimento, en términos de los esfuerzos y deformaciones desarrollados en la fibra inferior de la capa granular, así como la influencia del tipo de interacción, en términos de coeficiente de fricción.

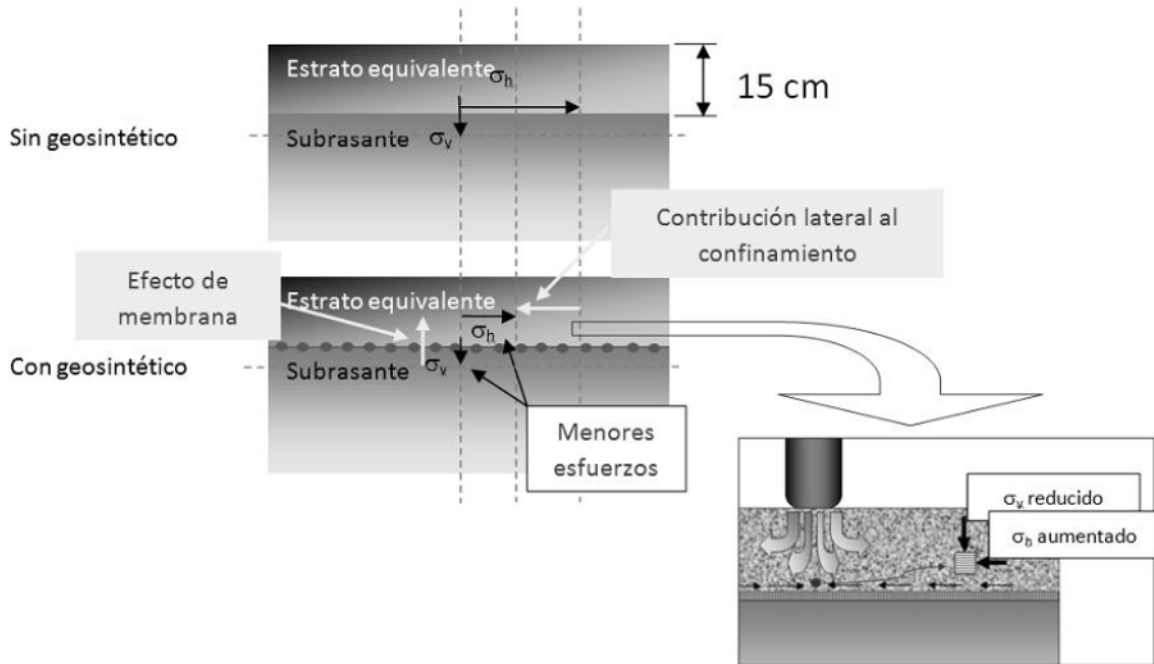
## MODELO DE ANÁLISIS UTILIZADO

El procedimiento consistió en el análisis de un modelo de pavimento lineal elástico de dos capas (subrasante y estrato equivalente) desarrollado con un software de elemento finito, esto con la finalidad de ser consistentes con los planteamientos de la teoría de Giroud y Noiray para caminos de lastre.

La primera capa corresponde a un estrato de material granular de 15 cm con valor de módulo elástico de 100 MPa (EEQ, simbología que se utilizó en el presente informe) equivalente a las tres primeras capas que componen el pavimento (carpeta asfáltica, base y subbase granular) y la segunda capa corresponde a la subrasante, cuyo valor de módulo es 10 MPa. El geosintético se modeló como una piel entre ambas capas, con propiedades de sección de membrana y un valor de módulo inicial de 4230 MPa.

Todo el modelo fue definido para el rango de lineal-elasticidad, conforme a la condición con y sin el elemento geosintético. La diferencia en los valores de esfuerzo medido en la fibra inferior del estrato equivalente, se consideró como el aporte al confinamiento por restricción lateral y la reducción en el valor del esfuerzo de la componente vertical como el aporte por el efecto de membrana (Figura 1).

**Figura 1: Efectos membrana y confinamiento**



## Condiciones de frontera

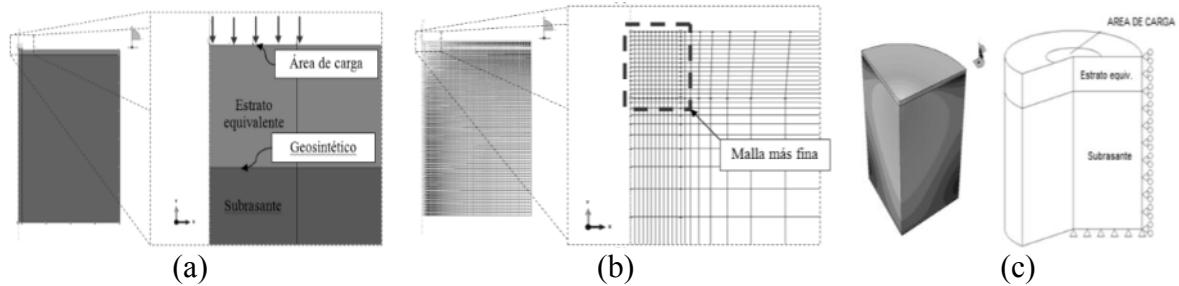
Para la modelación de la estructura se consideró un modelo axisimétrico con un área de carga circular de 124 mm de radio, y un valor de presión de 0.827 MPa. La distancia del eje de simetría en la horizontal hacia la frontera fue de 3500 mm, con la finalidad de que no existiera influencia de las condiciones de borde en los valores obtenidos. Se restringieron los desplazamientos en la dirección perpendicular a la carga, para permitir desplazamientos con respecto al eje vertical en caso de ser necesario pero no permitir desplazamiento en el eje horizontal, de esta manera se simulan adecuadamente las condiciones de frontera. Para la frontera inferior, la distancia desde la superficie fue de 5000 mm, y se restringieron los desplazamientos en la dirección de la carga y perpendicular a esta, ya que a tal profundidad, los desplazamientos en ambas direcciones no deben ocurrir.

## Mallado

Al modelo definido, se le refinó la malla en los alrededores de la zona de carga, donde para los efectos del análisis tienen mayor importancia los valores de los esfuerzos y deformaciones (NCHRP, 2004). El número de nodos definidos fue de 15238, y el número de elementos asociados fue de 14504. La convención de signos se define como positiva hacia arriba, la derecha y saliendo del plano, con las direcciones en "x", "y" y "z", donde por condiciones de axisimetría  $x = z$ . En la figura siguiente, se observan fases de la definición del modelo, así como una vista

preliminar del barrido de un cuarto del modelo alrededor de su eje de simetría y la convención de ejes mencionada anteriormente.

**Figura 2: Definición del modelo (a) condiciones de carga, frontera y distribución de los materiales, (b) mallado, y (c) esfuerzos de Von Mises de una de las corridas con rotación alrededor del eje de simetría, esquema del modelo y convención de ejes.**

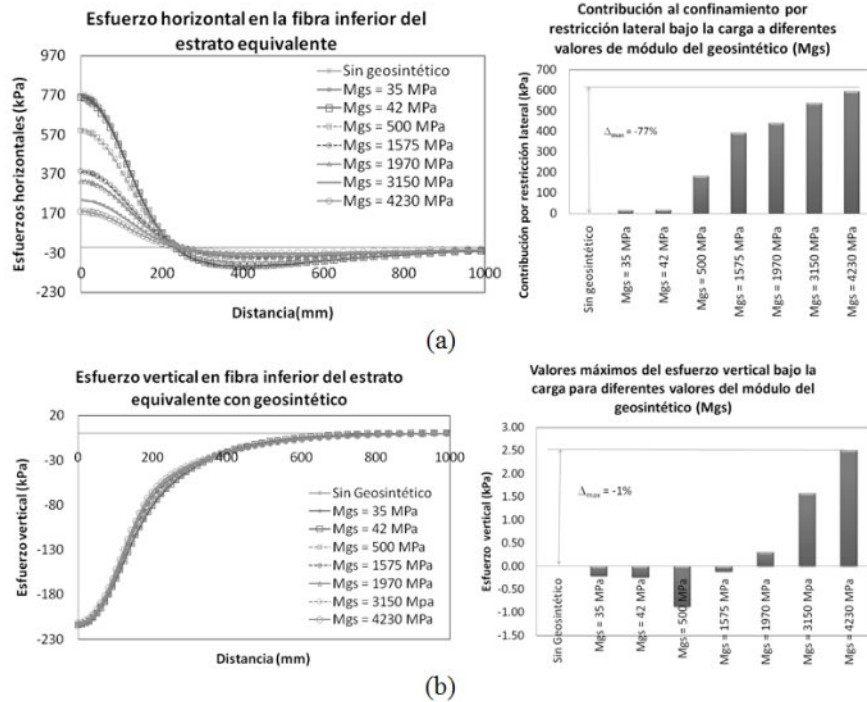


## **EVALUACIÓN DEL ESTADO DE ESFUERZOS EN LA FIBRA INFERIOR DE LA CAPA DE MATERIAL GRANULAR Y EFECTO DE MEMBRANA**

### **Efecto de los esfuerzos y deformaciones en la parte inferior de la capa de estrato equivalente (EEQ)**

Utilizando la misma estructura de análisis anterior, las siguientes figuras grafican la línea de las componentes de esfuerzos verticales y horizontales, a lo largo de la fibra inferior del estrato equivalente, el aporte al confinamiento por la restricción lateral y los valores máximos del esfuerzo vertical bajo el centro de la zona de carga.

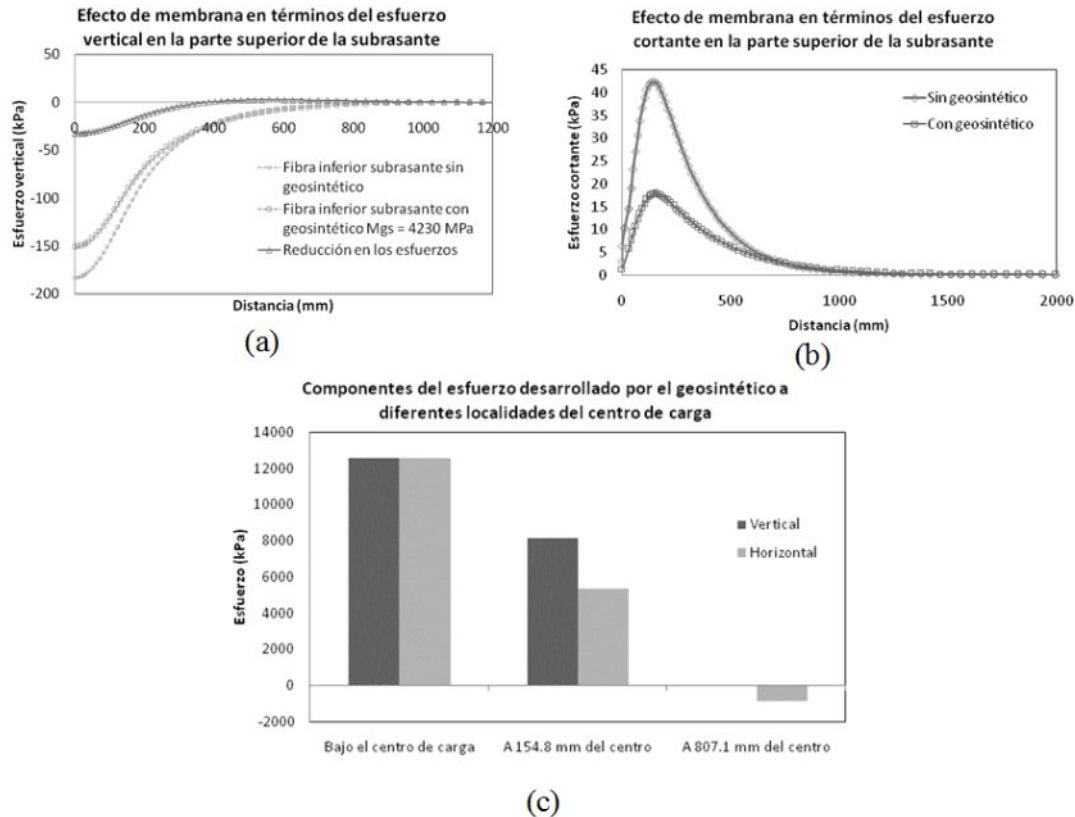
**Figura 3: (a) Esfuerzo horizontal, y contribución al confinamiento por restricción lateral y (b) Esfuerzo vertical y su correspondiente modulo bajo la carga en la fibra inferior del estrato equivalente con geosintético a diferentes valores de módulo ( $h=15\text{cm}$ ,  $M_{Reeq}=100\text{MPa}$ ).**



A partir de los gráficos se puede ver como aumenta el aporte al confinamiento por restricción lateral conforme el geosintético tiene valor de módulo mayor, y como realmente estos valores son mayores, alcanzando valores de alrededor de 600 kPa en este caso, que el cambio en los esfuerzos en la componente vertical, cuyos valores máximos para el ejemplo se aproximan a los 2.5 kPa.

Para observar la influencia del efecto de membrana en la estructura modelada, las siguientes gráficas muestran el esfuerzo vertical en la fibra superior de la subrasante para las dos condiciones analizadas, sin y con reforzamiento geosintético, el esfuerzo de cortante en esta misma zona y a las componentes del esfuerzo desarrollado por el geosintético al entrar en tensión de membrana.

**Figura 4: Distribución de los esfuerzos (a) verticales, (b) cortantes, en la fibra superior de la subrasante para las condiciones con y sin reforzamiento, y (c) componentes del esfuerzo desarrollado en el geosintético a diferentes distancias de la carga ( $h=15\text{cm}$ ,  $M_{Reeq}=100\text{MPa}$ ,  $M_{gs}$  4230 MPa).**

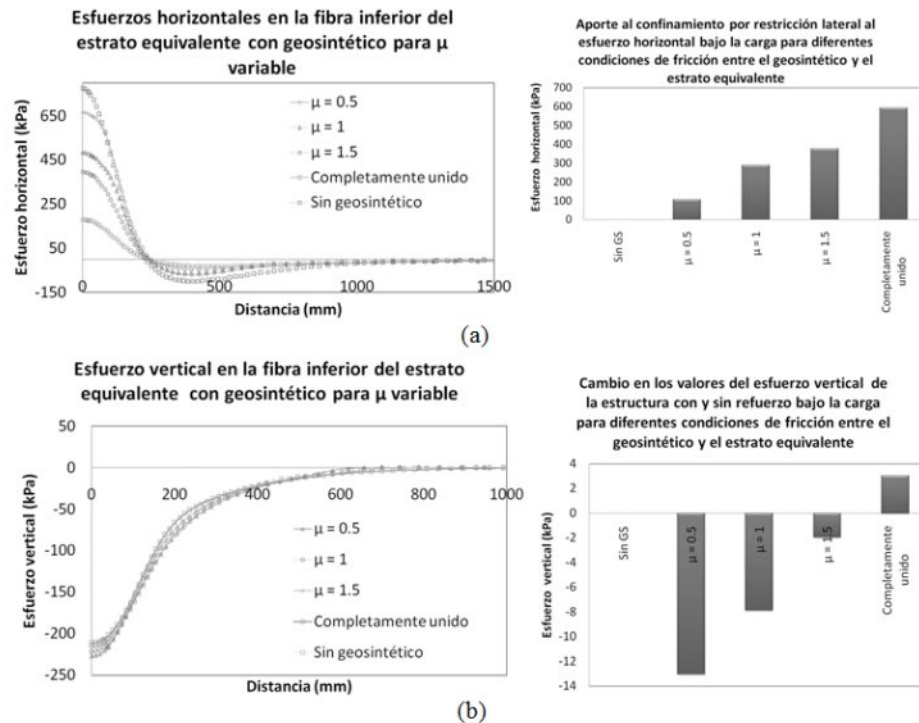


De la figura anterior, es evidente que el geosintético desarrolla un efecto de membrana de soporte a la subrasante cuando entra en tensión, que es debido principalmente a su componente vertical, y que genera una reducción de los esfuerzos verticales y de cortante en la parte superior de la subrasante, tal como se ha mencionado hasta la fecha en la literatura (e.g., Sellmeijer et al., 1982 Love et al., 1987, Madhav and Poorooshasb, 1988, Shukla, 1994a). Sin embargo, es importante considerar que el efecto de confinamiento también tiene un aporte importante en la labor de refuerzo de los pavimentos flexibles.

### Variación del coeficiente de fricción entre el estrato equivalente y el geosintético

Para observar la influencia del contacto, posteriormente se grafica la distribución de los esfuerzos en esta línea, para un valor de módulo del geosintético constante, con variaciones en los valores del coeficiente de fricción.

**Figura 5: Distribución de los (a) esfuerzos horizontales y su aporte al confinamiento por restricción lateral, (b) esfuerzos verticales y su cambio con respecto a la condición sin refuerzo en el estrato equivalente para diferentes valores de  $\mu$  ( $h=15$ cm,  $M_{Reeq}=100$ MPa,  $M_{gs}$  4230 MPa).**



Como resultado de los gráficos anteriores, se observa la influencia del tipo de interacción en el trabajo mecánico desarrollado por el geosintético en las estructuras de pavimento. Conforme el valor del coeficiente de fricción aumenta, el tipo de interacción se acerca a las condiciones ideales, donde el aporte al confinamiento por restricción lateral es mayor, lo que muestra la importancia del desarrollo de técnicas constructivas adecuadas, y el hecho de que el aporte al trabajo mecánico desarrollado por el geosintético puede ser mayor cuando se coloca entre las capas granulares del pavimento.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Por medio del análisis desarrollado en las secciones anteriores se logra determinar lo siguiente.

- El trabajo desarrollado por el elemento geosintético en el refuerzo de pavimentos, muestra que el aporte de la componente horizontal, que corresponde al confinamiento lateral del material sobre el geosintético, es mayor que el aporte de la componente vertical, relacionada con el efecto de membrana, lo que estaría mostrando que las afirmaciones definidas por Giroud y Noiray hasta la fecha, han considerado el efecto contrario al asumir el análisis piramidal 2:1. Esto muestra la necesidad de estudiar más afondo el trabajo del geosintético dentro de los pavimentos flexibles.
- Se demuestra que el desarrollo de técnicas constructivas adecuadas, permite asegurar un mejor trabajo del geosintético, esto debido a que el tipo de interacción entre el geosintético y la capa de material granular es un elemento importante en el aporte mecánico que el geosintético le pueda dar a la estructura,
- Efectivamente, como hasta la fecha se ha establecido, se da un aumento del módulo de la capa granular por el efecto de confinamiento por restricción lateral generado al colocar materiales geosintéticos en la interfaz subrasante-subbase.



- En el momento de análisis desarrollado, existe un aumento del módulo resiliente de las capas que componen las estructuras de pavimento, al colocar un elemento geosintético en la interfaz capa granular y subrasante, aportado por el efecto de confinamiento, tal como ha sido mencionado en investigaciones previas, sin embargo, se espera una disminución de tales propiedades al entrar el material en condiciones de fatiga.
- Se recomienda ampliar el análisis de manera que se considere la anisotropía de la capa granular, y el desarrollo de las deformaciones plásticas que podrían ocurrirle al geosintético en condiciones reales, tanto en la modelación como en la relación resultados de la realidad, de manera que se pueda realizar una calibración adecuada del modelo y de los resultados obtenidos.
- Con la finalidad de asegurar las condiciones ideales de trabajo del material geosintético, se recomienda la colocación de sellos entre la subrasante y el material geosintético, de manera que se prolongue el aporte por fricción al confinamiento dentro de la estructura.
- Debido a que el aporte por restricción lateral al confinamiento del material granular de la estructura muestra ser importante, se afirma la idea propuesta por varios autores (e.g., Haas et al., 1988; Webster, 1993, Collin et al., 1996) de que el trabajo del geosintético mejora cuando se coloca entre la capa granular del pavimento.

## REFERENCIAS

- Giroud, J., & Noiray, L. (1981). Geotextil Reinforced Unpaved Road Desing. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE. Vol 7. No GT9 , 1233-1254.
- American Society of Testing and Materials (ASTM). (2003). Designation D 4439, “Standard Terminology for Geosynthetics.
- Burd, H., & Houlsby, G. (1986). A large strain finite element formulation for the one dimensional membrane elements. Computers and Geotechnics , Vol. 2, pp 3 - 22.
- Backsdale, R. D., Brown, S. F., & Chan, F. (1989). Potential benefits of the geosynthetics in flexible pavement systems. Washington DC: National Cooperative Highway Research Program Report No. 315, Transportation Research Board, National Research Council.
- National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). (2004). Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Appendix RR: Finite Element Procedures for Flexible Pavement Analysis.
- Sellmeijer, J.B., Kenter, C.J., and Van den Berg, C. (1982). Calculation method for fabric reinforced road. Proceedings of the 2nd International Conference on Geotextiles. Las Vegas, NV, USA, pp. 393–398.
- Love, J.P., Burd, H.J., Milligan, G.W.E., and Houlsby. (1987). Analytical and model studies of reinforcement of a layer of granular fill on soft clay subgrade. Canadian Geotechnical Journal, 24, 4, 611–622.
- Madhav, M.R. and Poorooshab, H.B. (1988). A new model for geosynthetic-reinforced soil”. Computers and Geotechnics, 6, 4, 277–290.

- Shukla, S.K. and Chandra, S. (1994). A generalized mechanical model for geosynthetic-reinforced foundation soil". *Geotextiles and Geomembranes*, 13, 12, 813–825.
- Haas, R., Walls, J. and Carroll, R.G. (1988). Geogrid Reinforcement of Granular Base in Flexible Pavements", presented at the 67th Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Webster, S.L. (1993). Geogrid Reinforced Base Courses for Flexible Pavements for Light Aircraft: Test Section Construction, Behavior Under Traffic, Laboratory Tests, and Design Criteria", USAE Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, Technical Report DOT/FAA/RD-92/25, 100 p.
- Collin, J.G., Kinney, T.C., and Fu, X. (1996). Full Scale Highway Load Test of Flexible Pavement Systems with Geogrid Reinforced Base Courses, *Geosynthetics International*, 3(4), pp. 537-549.