

Sistemas de pavimentos reforzados con geosintéticos

Geosynthetic-reinforced Pavement Systems

JORGE G. ZORNBERG (*)

RESUMEN Los geosintéticos se han utilizado como inclusiones de refuerzo para mejorar el comportamiento del pavimento. Si bien hay evidencias incuestionables de las ventajas de utilizar refuerzos geosintéticos, las condiciones o mecanismos específicos que rigen el refuerzo de pavimentos son, al menos, poco claras y se han mantenido prácticamente sin cuantificación. Se ha llevado a cabo recientemente una significativa investigación con el fin de: (i) determinar las propiedades relevantes de geosintéticos que contribuyen a la mejora del comportamiento de los sistemas de pavimentos, (ii) el desarrollo de métodos analíticos y empíricos, capaces de cuantificar el comportamiento del pavimento, y (iii) predecir el comportamiento del pavimento en función de las propiedades de los diversos tipos de geosintéticos.

ABSTRACT *Geosynthetics have been used as reinforcement inclusions to improve pavement performance. While there are clear field evidences of the benefit of using geosynthetic reinforcements, the specific conditions or mechanisms that govern the reinforcement of pavements are, at best, unclear and have remained largely unmeasured. Significant research has been recently conducted with the objectives of: (i) determining the relevant properties of geosynthetics that contribute to the enhanced performance of pavement systems, (ii) developing appropriate analytical, laboratory and field methods capable of quantifying the pavement performance, and (iii) enabling the prediction of pavement performance as a function of the properties of the various types of geosynthetics.*

Palabras clave: Geomalla, Pavimentos, Arcillas expansivas.

Keywords: Geogrid, Pavements, Expansive clays.

1. INTRODUCCIÓN

Un pavimento flexible consta de cuatro capas diferenciadas: mezcla asfáltica, capa de base, capas de subbase y subrasante (Figura 1). La capa superficial es normalmente de mezcla asfáltica, que es una mezcla caliente de áridos y asfalto obtenido de la destilación de petróleo. El hormigón asfáltico se apoya en una capa de base (entre 20 y 30 cm de espesor) de árido grueso sin cimentar. A veces, además se incluye una capa de subbase con árido triturado de alta calidad que se coloca debajo de la capa de base con el fin de reducir los costes o minimizar la acción capilar bajo el pavimento.

Los deterioros en el pavimento pueden ser debidos a las cargas de los vehículos o a factores ambientales. La aplicación reiterada de las cargas de tráfico a través de las ruedas puede originar una falla estructural o funcional del pavimento. Las cargas ambientales son inducidas por las condiciones climáticas,

1. INTRODUCTION

A typical flexible pavement system includes four distinct layers: asphalt concrete, base course, subbase, and subgrade (Figure 1). The surface layer is typically asphalt concrete, which is a bituminous hot-mix aggregate obtained from distillation of crude petroleum. The asphalt concrete is underlain by a layer of base course, typically consisting of 0.2 m to 0.3 m of unbound coarse aggregate. An optional subbase layer, which generally involves lower quality crushed aggregate, can be placed under the base course in order to reduce costs or to minimize capillary action under the pavement.

Pavement distress may occur due to either traffic or environmental loads. Traffic loads result from the repetition of wheel loads, which can cause either structural or functional failure. Environmental loads are induced by cli-

(*) Professor, The University of Texas at Austin, Austin, Texas, USA. President, International Geosynthetics Society. E-mail: zornberg@mail.utexas.edu

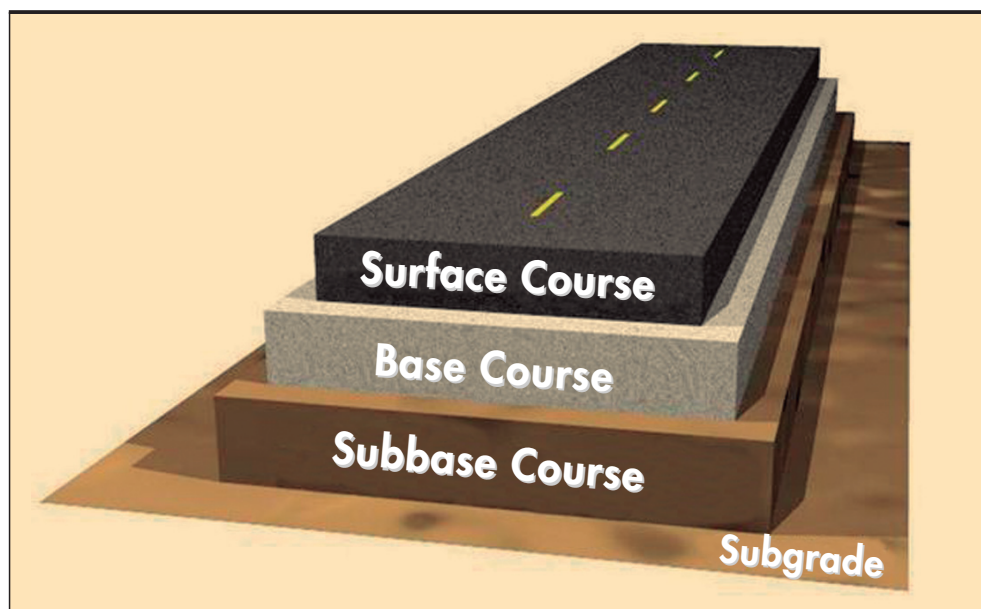


FIGURA 1. Sección transversal de un pavimento flexible (Muench 2006). / FIGURE 1. Cross-section of flexible pavement system (Muench 2006).

como por ejemplo las variaciones en la temperatura o la humedad en la subrasante, que pueden causar irregularidades superficiales o deterioros estructurales. Los ciclos de humedad y sequedad (o congelación y descongelación) pueden causar el deterioro del material de la capa de base. Los procedimientos constructivos también afectan el comportamiento del pavimento. Por ejemplo, el uso de áridos con un exceso de finos puede ocasionar un rápido deterioro del pavimento. Por último, el deterioro del pavimento también depende de su conservación o, por expresarlo con más propiedad, de su falta de mantenimiento (Yoder y Witzak 1975). Por ejemplo, el sellado de las grietas y las juntas a intervalos apropiados, y el mantenimiento de las hombreras mejora el comportamiento del pavimento. Los diversos mecanismos de deterioro producidos por el tráfico y las cargas ambientales pueden ser aminorados mediante el uso de geosintéticos. En este trabajo se presenta una actualización de la información general presentada por Zornberg y Gupta (2010) sobre el uso de geosintéticos de refuerzo de pavimentos.

2. GEOSINTÉTICOS EN EL DIMENSIONAMIENTO DEL PAVIMENTO

Los geosintéticos se han utilizado en el dimensionamiento de los pavimentos para que cumplan alguna de las siguientes funciones: separación, filtro, drenaje lateral, sellado, o refuerzo. Específicamente, los geosintéticos se han utilizado en los proyectos de pavimentos para que cumplan una función de separación de modo que minimicen la intrusión de suelo de la subrasante en las capas de base o subbase. También, los geosintéticos se han utilizado para desempeñar una función de filtro de modo que restrinja el movimiento de las partículas del suelo de la capa de subbase, a la vez que permita el movimiento del agua hacia la capa adyacente de árido más grueso. La función de drenaje de los geosintéticos proporciona un drenaje lateral. Además, los geosintéticos se han utilizado para mitigar la propagación de grietas mediante el sellado de la capa de asfalto cuando se extiende una capa de regularización. Por último, los geosintéticos se han utilizado en pavimentos flexibles como refuerzo, objeto principal de este trabajo. Mientras que la función de refuerzo, a menudo, se ha logrado usando geomallas, los geotextiles también se han utilizado como refuerzo en aplicaciones de transporte (Bueno et

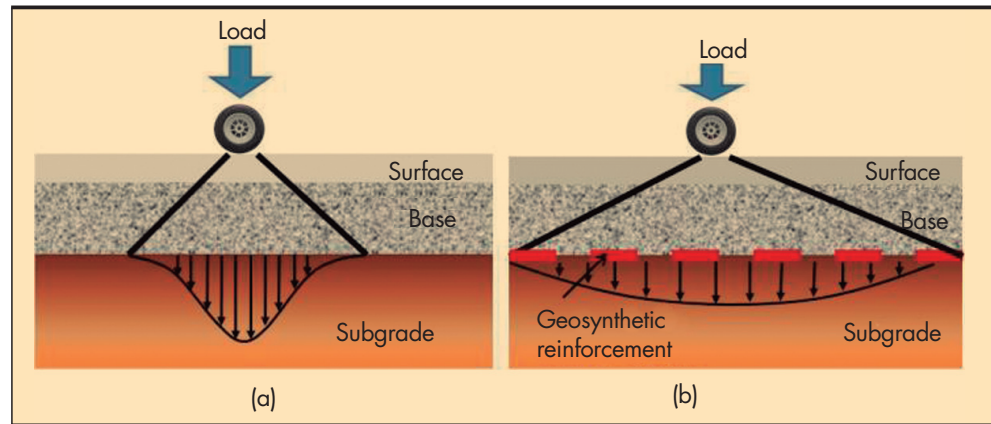
matic conditions, such as variations in temperature or moisture in the subgrade, which can cause surface irregularities and structural distress. Cycles of wetting and drying (or freezing and thawing) may cause the breakdown of base course material. Construction practices also affect pavement performance. For example, the use of aggregates with excessive fines may lead to rapid pavement deterioration. Finally, pavement distress is also a function of its maintenance or, more correctly, lack of maintenance (Yoder and Witzak 1975). For example, sealing cracks and joints at proper intervals and maintaining the shoulders improve pavement performance. The various distress mechanisms induced by traffic and environmental loads can be enhanced through the use of geosynthetics. This paper presents an update to the overview presented by Zornberg and Gupta (2010) on the use of geosynthetics for reinforcement of pavements.

2. GEOSYNTHETICS IN PAVEMENT DESIGN

Geosynthetics have been used in pavement design to address the functions of separation, filtration, lateral drainage, sealing, and reinforcement. Specifically, geosynthetics have been used for separation in pavement projects to minimize intrusion of subgrade soil into the aggregate base or sub-base. Also, geosynthetics have been used to perform a filtration function by restricting the movement of soil particles from the subgrade while allowing water to move to the coarser adjacent base material. In-plane drainage function of a geosynthetic can provide lateral drainage within its plane. In addition, geosynthetics have been used to mitigate the propagation of cracks by sealing the asphalt layer when used in pavement overlays. Finally, geosynthetics have been used in flexible pavements for reinforcement, which is the main focus of this paper. While the reinforcement function has often been accomplished using geogrids, geotextiles have also been used as reinforcement inclusions in transportation applications (Bueno et al. 2005, Benjamin et al. 2007). The geosynthetic reinforcement is often placed at the interface between the base and sub-base layers or the interface be-

FIGURA 2. Cargas relativas en la subrasante en el caso de (a) pavimento flexible sin refuerzo y (b) pavimento flexible reforzado con geosintéticos. /

FIGURE 2. Relative load magnitudes at subgrade layer level for (a) unreinforced flexible pavement and (b) geosynthetic-reinforced flexible pavement.



al. 2005, Benjamin *et al.* 2007). El refuerzo con geosintético se coloca a menudo en la interfaz entre las capas de base y sub-base, o subbase y subrasante, o en el interior de la base del pavimento flexible. Así se reducen las tensiones sobre la subrasante en relación con los pavimentos flexibles sin este refuerzo. (Figura 2).

El mejor comportamiento del pavimento debido al refuerzo con geosintéticos ha sido atribuido a tres mecanismos: (1) la restricción lateral, (2) el aumento de la capacidad de soporte, y (3) efecto membrana tensionada (Giroud y Noiray 1981, Giroud *et al.* 1984, Perkins, y Ismeik 1997, Holtz y cols. 1998). Estos tres mecanismos se ilustran en la Figura 3.

El principal mecanismo asociado con la función de refuerzo para pavimentos flexibles (Figura 3a) es la restricción lateral o confinamiento (Bender y Barenberg 1978). El nombre de este mecanismo puede ser engañoso ya que la restricción se desarrolla a través de una fricción en la interfaz entre el geosintético y el árido, por lo tanto el mecanismo es de resistencia al esfuerzo cortante en la interfaz (Perkins 1999). Cuando una capa de pavimento compuesta por árido es sometida a la carga de tráfico, el árido constituyente de la capa tiende a moverse lateralmente a menos que su movimiento se encuentre impedido por la subrasante o por el refuerzo con el geosintético. La interacción entre los áridos de la capa de base y el geosintético permite la transferencia del esfuerzo cortante desde la capa de base a un esfuerzo de tracción en el geosintético. La rigidez a tracción del geosintético limita las deformaciones laterales en la capa de base. Además, el geosintético confina la capa de base, lo que aumenta su tensión media y por tanto aumenta la resistencia al esfuerzo cortante. Ambas características, de fricción y de confinamiento

between the sub-base and subgrade layers or within the base course layer of the flexible pavement. This leads to lower stresses over the subgrade than in unreinforced flexible pavements (Figure 2).

The improved performance of the pavement due to geosynthetic reinforcement has been attributed to three mechanisms: (1) lateral restraint, (2) increased bearing capacity, and (3) tensioned membrane effect (Giroud and Noiray 1981, Giroud *et al.* 1984, Perkins and Ismeik 1997, Holtz *et al.* 1998). These three mechanisms are illustrated in Figure 3.

The primary mechanism associated with the reinforcement function for flexible pavements (Figure 3a) is lateral restraint or confinement (Bender and Barenberg 1978). The name of this mechanism may be misleading as lateral restraint develops through interfacial friction between the geosynthetic and the aggregate, thus the mechanism is one of a shear-resisting interface (Perkins 1999). When an aggregate layer is subjected to traffic loading, the aggregate tends to move laterally unless it is restrained by the subgrade or by geosynthetic reinforcement. Interaction between the base aggregate and the geosynthetic allows transfer of the shearing load from the base layer to a tensile load in the geosynthetic. The tensile stiffness of the geosynthetic limits the lateral strains in the base layer. Furthermore, a geosynthetic layer confines the base course layer thereby increasing its mean stress and leading to an increase in shear strength. Both frictional and interlock characteristics at the interface between the soil and

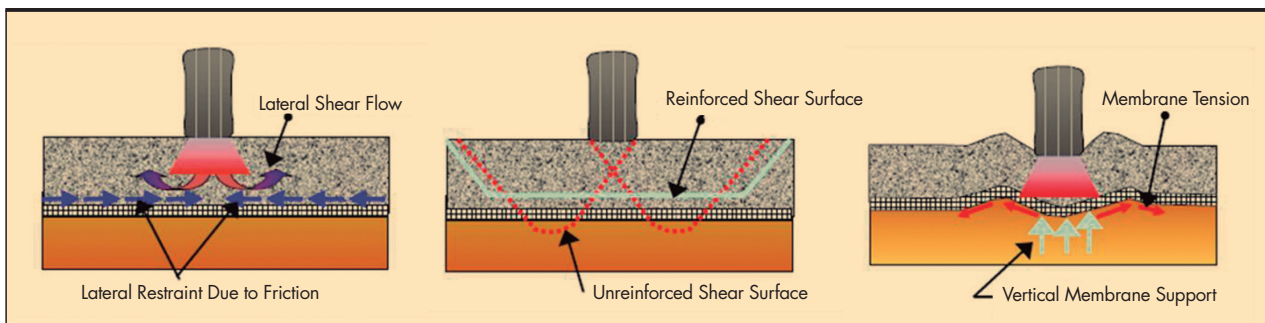


FIGURA 3. Los mecanismos de refuerzo inducidos por los geosintéticos (Holtz *et al.* 1998.): (A) Confinamiento lateral, (b) Aumento de la capacidad soporte, y (c) efecto membrana. / FIGURE 3. Reinforcement mechanisms induced by geosynthetics (Holtz *et al.* 1998): (a) Lateral restraint; (b) Increased bearing capacity; and (c) Membrane support.

en la interfaz entre el suelo y el geosintético, contribuyen a este mecanismo. Por consiguiente, las aberturas de la geomalla y el tamaño del material de la capa de base deben estar en consonancia. Un geotextil con una buena capacidad de fricción también puede proporcionar resistencia a la tracción para el movimiento lateral de los áridos.

Como se ilustra en la Figura 3b, el mecanismo de aumento de la capacidad portante causada por el refuerzo ocurre debido a que la presencia de los geosintéticos facilita el desarrollo de una superficie alternativa de falla. Este nuevo plano alternativo proporciona una superior capacidad de soporte. El refuerzo que aporta el geosintético puede disminuir los esfuerzos cortantes trasladados a la subbase y proporcionar confinamiento vertical fuera de la zona de carga. Con el refuerzo lo previsible es que cambie el modo de falla de la subrasante de punzonamiento a falla general. Asimismo es previsible que el geosintético actúe como una membrana tensionada, que soporta las cargas de rueda (Figura 3c). En este caso, el refuerzo proporciona una reacción de componente vertical a la carga de la rueda aplicada. Este efecto membrana tensionada es inducido por las deformaciones verticales, dando lugar a que el geosintético adopte una forma cóncava. Las tensiones originadas en el geosintético contribuyen a soportar la carga de la rueda y reducen la tensión vertical sobre la subrasante. Se precisa que surjan deformaciones importantes (es decir, grandes ahuellamientos) para que aparezca este mecanismo. Sólo hay constancia de la aparición de este fenómeno cuando el CBR de la subrasante es inferior a 3 (Barksdale *et al.* 1989).

Para que aparezcan los mecanismos mencionados con anterioridad son necesarios diferentes valores de deformación en el pavimento. En carreteras sin pavimentar, pueden tolerarse ahuellamientos importantes (superiores a 25 mm). Los mecanismos de aumento de capacidad de soporte y efecto de membrana tensionada aparecen en carreteras pavimentadas. Sin embargo, la deformación necesaria para movilizar estos mecanismos generalmente sobrepasa los requisitos de la aptitud del nivel de servicio de los pavimentos flexibles. Por lo tanto, para el caso de pavimentos flexibles, se considera la restricción lateral la principal contribución a la mejora de su comportamiento.

3. METODOLOGÍAS DE DIMENSIONAMIENTO PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES REFORZADOS CON GEOSINTÉTICOS

La filosofía original del diseño de los pavimentos flexibles es debida a los romanos, habiendo evolucionado hasta los procedimientos de dimensionamiento actuales. El dimensionamiento está basado en la construcción de una capa protectora sobre la subrasante que mejora su capacidad portante, soportando tráfico y factores ambientales.

El "Cover Based Design Method" fue desarrollado después de la gran depresión de la década de 1930. Requería un único parámetro, el California Bearing Ratio (CBR), además de una aportación significativa del ingeniero. Con posterioridad, tras la finalización en los años 60 de los ensayos de la *American Association of State Highway Officials* (AASHO), (Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras del Estado), fueron propuestos una serie de métodos de dimensionamiento. Eran más sofisticados que el *Covered Based Design Method*, precisando como entradas un mayor número de parámetros de dimensionamiento. En la década de los años 70, fue propuesto por los investigadores de Sudáfrica el método de dimensionamiento lineal empírico-mecanicista (ME). Desde principios de los años 90, en los EE.UU el interés en los métodos de dimensionamiento puramente empíricos ha sido desplazado por métodos de dimensionamiento ME que incorporan parámetros mecánicos característicos o análisis más sofisticadas usando métodos de elementos

the geosynthetic contribute to this mechanism. Consequently the geogrid apertures and base soil particles must be properly sized. A geotextile with good frictional capabilities can also provide tensile resistance to lateral aggregate movement.

As illustrated in Figure 3b, the increased bearing capacity mechanism leads to soil reinforcement when the presence of a geosynthetic imposes the development of an alternate failure surface. This new alternate plane provides a higher bearing capacity. The geosynthetic reinforcement can decrease the shear stresses transferred to the subgrade and provide vertical confinement outside the loaded area. The bearing failure mode of the subgrade is expected to change from punching failure without reinforcement to general failure with reinforcement.

*The geosynthetic can also be assumed to act as a tensioned membrane, which supports the wheel loads (Figure 3c). In this case, the reinforcement provides a vertical reaction component to the applied wheel load. This tensioned membrane effect is induced by vertical deformations, leading to a concave shape in the geosynthetic. The tension developed in the geosynthetic contributes to support the wheel load and reduces the vertical stress on the subgrade. High deformations (i.e. high rutting depth) are required to mobilize this mechanism. This reinforcement mechanism has been reported to develop only in cases with subgrade CBR values below 3 (Barksdale *et al.* 1989).*

The aforementioned mechanisms require different magnitudes of deformation in the pavement system to be mobilized. In the case of unpaved roads, significant rutting depths (in excess of 25 mm) may be tolerable. The increased bearing capacity and tensioned membrane support mechanisms have been considered for paved roads. However, the deformation needed to mobilize these mechanisms generally exceeds the serviceability requirements of flexible pavements. Thus, for the case of flexible pavements, lateral restraint is considered to contribute the most for their improved performance.

3. DESIGN METHODOLOGIES FOR GEOSYNTHETIC-REINFORCED FLEXIBLE PAVEMENTS

The design philosophy of flexible pavement systems was initiated by the Romans, evolving into the current design approaches. The design approach involves providing a protective layer over the subgrade that improves the serviceability under traffic and environmental loads.

The Cover Based Design Method was developed after the great depression in the 1930s. It required a single input in terms of the California Bearing Ratio (CBR), but it also required use of significant engineering judgment. Subsequently, and after completion of the American Association of State Highway Officials (AASHO) Road Test in the 1960s, a series of design methods were proposed. They were more sophisticated than the Cover Based Method, requiring a greater number of design parameters as input. In the 1970s, the linear mechanistic-empirical (M-E) design method was proposed by researchers from South Africa. Since the early 1990s, the focus in the US has shifted to M-E design methods that incorporate features from purely empirical methods to sophisticated non-linear finite element methods. Attempts have been made to incorporate the use of geosynthetic reinforcements into AASHO and M-E design methods.

finitos no lineales. Se han realizado intentos para incorporar el uso de refuerzos de geosintéticos en los métodos de dimensionamiento de la AASHTO y ME.

3.1. MÉTODO AASHTO

La Guía de Dimensionamiento de Pavimentos de la *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)* es uno de los métodos más utilizados para el dimensionamiento de pavimento flexible en América del Norte (AASHTO 1993). El método AASHTO utiliza ecuaciones empíricas desarrolladas a partir de los ensayos de carreteras de la AASHTO, que se realizaron a finales de los años 50. El método considera el pavimento como un sistema elástico de multi-capas con un número estructural global (SN) que refleja el espesor total del pavimento y su resistencia a la repetida aplicación de cargas de tráfico. El SN necesario para un proyecto es seleccionado de manera que el pavimento soportará las cargas de tráfico previstas y experimentará una pérdida en la capacidad de servicio no superior a los requisitos establecidos por el proyecto. El SN se determina usando un nomograma que resuelve la siguiente ecuación:

$$\log W_{18} = Z_R \times S_0 + 9.36 \times \log(SN + 1) - 0.2 + \frac{\log \frac{\Delta PSI}{2.7}}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log M_R - 8.07 \quad (1)$$

donde W_{18} es el número previsto de cargas equivalentes de un sólo eje acumuladas (ESAL) 18-kip a lo largo de la vida útil de los pavimentos, Z_R es la desviación típica para el nivel de confianza, S_0 la desviación típica global, ΔPSI es la pérdida admisible del nivel servicio y M_R es el módulo dinámico (rigidez) de la subrasante. Una vez que ha sido determinado el SN global preciso, se diseñan las diferentes capas del pavimento en consonancia mediante una serie de iteraciones que utilizan la siguiente ecuación:

$$SN = (a \times d)_{hma} + (a \times d \times m)_{base} + (a \times d \times m)_{subbase} \quad (2)$$

donde a es el coeficiente de fuerza relativa, d es el espesor (en pulgadas) de cada capa, y m es un modificador en función de las características de humedad del pavimento.

Los objetivos de la utilización de los geosintéticos como refuerzo en pavimentos flexibles han sido: (1) para extender la vida útil de un pavimento, o (2) para permitir la construcción de un pavimento con una cantidad inferior de material en la capa de base sin que perjudique el comportamiento del pavimento. Las primeras aproximaciones al dimensionamiento de pavimentos flexibles reforzados se centraron en la modificación de las ecuaciones 1 y 2 para reflejar el beneficio aportado por la incorporación de los geosintéticos. Estas mejoras en el pavimento, proporcionadas por el refuerzo con geosintéticos, se han medido en términos de la relación *Traffic Benefit Ratio (TBR)* y *Base Course Reduction (BCR)*.

El TBR se define como la relación entre (i) el número de ciclos de carga en una sección reforzada (N_R) hasta alcanzar un determinado nivel de falla (una profundidad de ahuellamiento), y (ii) el número de aplicaciones de carga en una sección sin reforzar (N_U) con la misma geometría y componentes materiales que alcance el mismo nivel de falla (Berg et al. 2000). Específicamente, la TBR se puede definir como:

$$TBR = \frac{N_R}{N_U} \quad (3)$$

El uso de la TBR en el dimensionamiento del pavimento conduce a una prolongación de la vida útil del pavimento definida por:

$$W_{18} (\text{reforzado}) = TBR * W_{18} (\text{no reforzado}) \quad (4)$$

3.1. AASHTO METHOD

The American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) guide for design of pavement structures is one of the most widely used methods for flexible pavement design in North America (AASHTO 1993). The AASHTO method uses empirical equations developed from the AASHTO road tests, which were conducted in the late 1950s. The method considers the pavement as a multi-layer elastic system with an overall structural number (SN) that reflects the total pavement thickness and its resiliency to repeated traffic loading. The required SN for a project is selected such that the pavement will support anticipated traffic loads and experience a loss in serviceability no greater than that established by project requirements. The SN is determined using a nomograph that solves the following equation:

$$\log W_{18} = Z_R \times S_0 + 9.36 \times \log(SN + 1) - 0.2 + \frac{\log \frac{\Delta PSI}{2.7}}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log M_R - 8.07 \quad (1)$$

where W_{18} is the anticipated cumulative 18-kip Equivalent Single-Axle Loads (ESALs) over the design life of the pavements, Z_R is the standard normal deviate for reliability level, S_0 is the overall standard deviation, ΔPSI is the allowable loss in serviceability, and M_R is the resilient modulus (stiffness) of the underlying subgrade. Once the required overall SN has been determined, the individual layers can be designed accordingly through a series of iterations using the following equation:

$$SN = (a \times d)_{hma} + (a \times d \times m)_{base} + (a \times d \times m)_{subbase} \quad (2)$$

where a is the coefficient of relative strength, d is the thickness (in inches) of each layer, and m is the modifier accounting for moisture characteristics of the pavement.

The purposes of using geosynthetics as reinforcement in flexible pavements have been: (1) to extend a pavement's life-span, or (2) to enable the construction of a pavement with a reduced quantity of base course material without sacrificing pavement performance. Early design approaches for reinforced flexible pavements focused at modifying Equations 1 and 2 to reflect the benefit achieved by the addition of geosynthetics. These improvements to the pavement system provided by geosynthetic reinforcement have been measured in terms of the *Traffic Benefit Ratio (TBR)* and the *Base Course Reduction (BCR)*.

The TBR is defined as the ratio between (i) the number of load cycles on a reinforced section (N_R) to reach a defined failure state (a given rutting depth), and (ii) the number of load cycles on an unreinforced section (N_U) with the same geometry and material constituents that reaches the same defined failure state (Berg et al. 2000). Specifically, the TBR can be defined as:

$$TBR = \frac{N_R}{N_U} \quad (3)$$

Use of the TBR in pavement design leads to an extended pavement life defined by:

$$W_{18} (\text{reinforced}) = TBR * W_{18} (\text{unreinforced}) \quad (4)$$

The TBR is sometimes referred to as the *traffic improvement factor (TIF)*. As shown in Figure 4, the TBR can be used to calculate the number of traffic passes that a reinforced pavement can withstand as compared to an unrein-

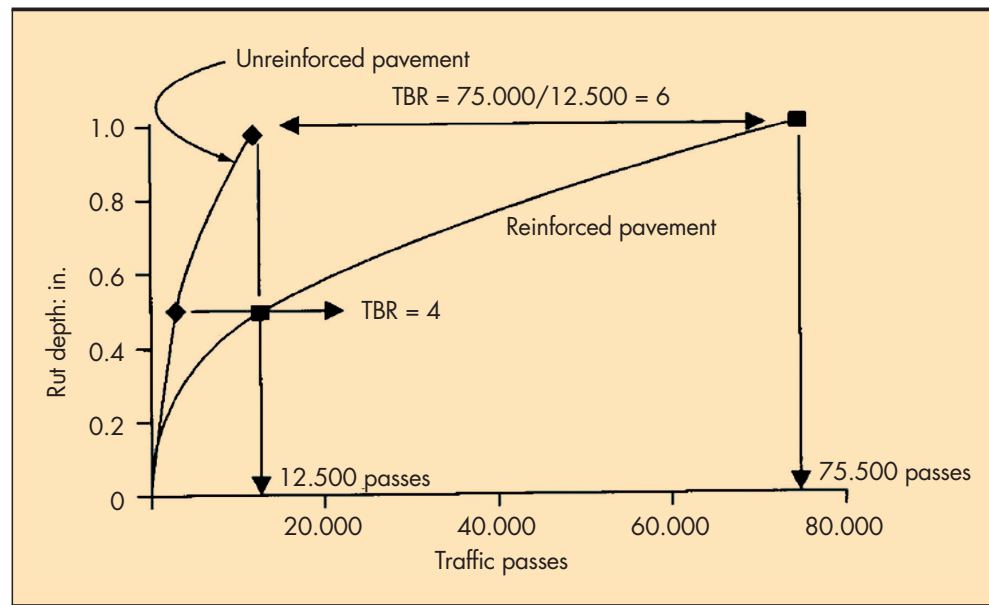


FIGURA 4. Valores de TBR típicos para un pavimento reforzado y hormigón armado hasta que se alcanza una determinada profundidad de rodada (Shukla 2002). / **FIGURE 4.** Typical TBR values for an unreinforced and reinforced pavement to reach a given rutting depth (Shukla 2002).

En algunas ocasiones el *TBR* es denominado factor de mejora del tráfico (*TIF*). Como se muestra en la Figura 4, *TBR* se puede utilizar para calcular el número de ejes adicionales que un pavimento reforzado puede soportar en comparación con otro no reforzado para un ahueamiento determinado. Para la mayoría de los geotextiles, el valor *TBR* oscila entre 1,5 y 10, y para las geomallas entre 1,5 y 70 (Shukla 2002).

El *BCR* se define como el porcentaje de reducción en el espesor de la capa de base debido a una adición de refuerzo geosintético (T_R) en relación con el espesor del pavimento flexible con los mismos materiales pero sin refuerzo (T_U), hasta alcanzar un determinado nivel de un determinado deterioro. El *BCR* se define del siguiente modo:

$$BCR = \frac{T_R}{T_U} \quad (5)$$

A veces, se hace referencia al *BCR* como la relación de coeficiente de capa (*LCR*). Se ha aplicado un modificador a la *SN* del pavimento, de la siguiente manera:

$$SN = (a \times d)_{hma} + BCR.(a \times d \times m)_{base} + (a \times d \times m)_{subbase} \quad (6)$$

Cuando se dimensiona un pavimento utilizando el *BCR*, el espesor reducido de la capa de base se puede estimar de la siguiente manera:

$$d_{base,(R)} = \frac{SN_u - (a \times d)_{hma} - (a \times d \times m)_{subbase}}{BCR.(a \times m)_{base}} \quad (7)$$

donde $d_{base,(R)}$ es el espesor de capa de base reducida debido a refuerzo y SN_u es el número estructural correspondiente al número de ejes W_{18} para el pavimento no reforzado.

El *BCR* ha sido determinado a partir de pruebas de laboratorio y de campo. Anderson and Killeavy (1989) construyeron secciones de ensayo con diferentes espesores de capa de base. El estudio mostró que una sección reforzada con geotextil con una capa de base de 350 mm de espesor se comportó de manera similar a una sección no reforzada con una capa de base de 450 mm. Miura et al. (1990) publicaron que la construcción de secciones reforzadas de campo contenía una capa de base que era 50 mm

forced pavement for a given rutting depth. For most geotextiles, the *TBR* value ranges from 1.5 to 10, and for geogrids from 1.5 to 70 (Shukla 2002).

The *BCR* is defined as the percent reduction in the base course thickness due to an addition of geosynthetic reinforcement (T_R) in relation to the thickness of the flexible pavement with the same materials but without reinforcement (T_U), to reach the defined failure state. The *BCR* is defined as follows:

$$BCR = \frac{T_R}{T_U} \quad (5)$$

The *BCR* is sometimes referred to as the layer coefficient ratio (*LCR*). A modifier has been applied to the *SN* of the pavement, as follows:

$$SN = (a \times d)_{hma} + BCR.(a \times d \times m)_{base} + (a \times d \times m)_{subbase} \quad (6)$$

When designing a pavement using the *BCR*, the reduced depth of the base course can be estimated as follows:

$$d_{base,(R)} = \frac{SN_u - (a \times d)_{hma} - (a \times d \times m)_{subbase}}{BCR.(a \times m)_{base}} \quad (7)$$

where $d_{base,(R)}$ is the reduced base course thickness due to reinforcement and SN_u is the structural number corresponding to the equivalent W_{18} for the unreinforced pavement.

The *BCR* has been determined from laboratory and field tests. Anderson and Killeavy (1989) constructed test sections with different base course thicknesses. The study showed that geotextile-reinforced section with a 350 mm thick base layer performed similarly to an unreinforced section with a 450 mm thick base layer. Miura et al. (1990) reported the construction of field reinforced sections that contained a base course that was 50 mm thinner than that of unreinforced sections. The reinforced sections were observed to perform better than the control sections for all rutting depths. Also, at a site with a subgrade of CBR 8, Webster (1993) showed that a section containing a geogrid

más delgada que el de las secciones no reforzadas. Observaron que las secciones reforzadas se comportaron mejor que las secciones de control para todas las profundidades de ahuellamiento. También, en un emplazamiento, cuya subrasante tenía un CBR de 8, Webster (1993) mostró que una sección que tenía una geomalla con una base de 150 mm de espesor se comportó de manera equivalente a la de una sección no reforzada con una base de 250 mm de espesor. Por lo tanto, las BCR oscilando entre el 20% y 40% son habituales en diferentes artículos, con mayor porcentaje de reducción para los materiales de subrasantes más fuertes.

El método de dimensionamiento AASHTO es de naturaleza empírica y no tiene en cuenta directamente la mecánica de la estructura del pavimento, efectos climáticos, o cambios en las cargas de tráfico y las propiedades del material sobre la vida del pavimento. Una ampliación de esta metodología de dimensionamiento para pavimentos reforzados con geosintéticos se ha limitado al caso de productos, materiales, geometrías y criterio de falla concreto, y las cargas utilizadas en las secciones de ensayo para cuantificar sus valores. Por lo tanto, esta manera de abordar el problema carece de la generalidad que permita extrapolar la experiencia.

3.2. NCHRP MÉTODO EMPÍRICO-MECANICISTA (2004)

El *National Cooperative Highway Research Program* de los EE.UU. (NCHRP) ha desarrollado recientemente una guía para un dimensionamiento M-E de pavimentos nuevos y rehabilitados (NCHRP 2004). El método utiliza principios mecanicistas y minuciosos datos de entrada para minimizar la dependencia del dimensionamiento de las observaciones empíricas y las correlaciones que puedan derivarse para un proyecto específico. El método ME intenta mejorar la fiabilidad del dimensionamiento, reducir los costos del ciclo de vida, una mejor caracterización de los efectos del drenaje y las variaciones estacionales de humedad y evitar fallas prematuras (Olidis y Hein 2004).

Si bien el método de dimensionamiento ME involucra dos componentes claves (mecanicista y empírico), ambos son considerados interdependientes uno de otro. Los modelos de cálculo precisan parámetros de entrada relacionados con las capas del pavimento, el tráfico, las condiciones climáticas y los materiales. La salida generada por el modelo se compara entonces con los parámetros utilizados como hipótesis para el dimensionamiento original. Si la comparación falla, el dimensionamiento se modifica utilizando un proceso iterativo y vuelto a evaluar.

Los principales parámetros utilizados en el método ME son las propiedades mecánicas de cada capa de pavimento, incluyendo su coeficiente de Poisson (ν) y el módulo resiliente (M_R). El coeficiente de Poisson (relación entre laterales y axiales en respuesta a la carga axial) suele variar entre 0,15 a 0,5 para los materiales constituyentes de los pavimentos. La M_R es una medida de la rigidez del material tras una carga cíclica, representado por:

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (8)$$

donde σ_d es la tensión cíclica (o la diferencia de tensiones principales cíclicas) y ϵ_r es la deformación recuperable (elástica). Por lo tanto, tanto la M_R y el Módulo de Young (E) representan la deformación del material a tensiones aplicadas. Sin embargo, no se considera la misma debido a las diferencias en la tasa de aplicación de la carga, como se muestra en la Figura 5. El valor de E se refiere a la deformación inicial (con algún componente permanente) del material, mientras que M_R se refiere a la deformación elástica del material después de la carga cíclica.

with a 150 mm-thick base showed a performance equivalent to that of an unreinforced section with a 250 mm-thick base. Thus, BCRs ranging from 20% to 40% have been reported in the literature, with greater percentage reduction for stronger subgrade materials.

The AASHTO design method is empirical in nature and does not directly consider the mechanics of the pavement structure, climatic effects, or changes in traffic loads and material properties over the design-life of the pavement. Extension of this design methodology to geosynthetic-reinforced pavements has been limited to the case of specific products, materials, geometries, failure criteria and loads used in test sections to quantify their values. Thus, this approach lacks desirable generality as experience cannot be easily transferred from one site to another.

3.2. NCHRP MECHANISTIC-EMPIRICAL METHOD (2004)

The *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) has recently developed a guide for M-E design of new and rehabilitated pavement structures (NCHRP 2004). The method uses mechanistic principles and detailed input data to minimize design reliance on empirical observations and correlations that may be applicable for a specific project. The M-E method attempts to improve design reliability, reduce life-cycle costs, characterize better the effects of drainage and seasonal moisture variations, and prevent premature failures (Olidis and Hein 2004).

While the M-E design method involves two key components (mechanistic and empirical), they are both considered interdependent on each other. The calculation models require input parameters regarding pavement layers, traffic conditions, climatic conditions and materials. The generated output is then compared against parameters used as hypothesis for the original design. If the comparison fails, the design is then modified using an iterative process and re-evaluated.

The main parameters used in M-E method are the mechanistic properties of each pavement layer, including their Poisson's ratio (ν) and resilient modulus (M_R). The Poisson's ratio (ratio of lateral to axial strains exhibited in response to axial loading) typically ranges from 0.15 to 0.5 for pavement materials. The M_R is a measure of the material stiffness after cyclic loading, represented by:

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (8)$$

where σ_d is the cyclic deviator stress (or cyclic principal stress difference) and ϵ_r is the recoverable (elastic) strain. Thus, both M_R and the Young's Modulus (E) represent the strain response of the material to applied stresses. However, they are not considered the same due to differences in the rate of load application, as shown in Figure 5. The value of E refers to the initial deformation (with some permanent component) of the material, whereas M_R refers to the elastic deformation of the material after cyclic loading.

The M-E method uses a hierarchical approach to design, based on the project importance and available information. Level 1 is the highest confidence level, typically reserved for research or very high-volume roads. Level 2 corresponds to moderate confidence level, intended for routine pavement design. Level 3 is the lowest confidence level, typically reserved for low-volume roads. Based on the selected design level, material properties are determined using the specific materials to be used in actual construction (Level 1), or estimated from the correlations using

El método de ME utiliza un enfoque jerárquico para el dimensionamiento, basado en la importancia del proyecto y la información disponible. El nivel 1 es el nivel de confianza más alto, por lo general reservado para la investigación o carreteras de alto volumen. El nivel 2 corresponde a moderado nivel de confianza, previsto para el dimensionamiento de pavimento de rutina. El nivel 3 es el nivel de confianza más bajo, por lo general reservado para caminos de bajo volumen. Basado en el nivel de dimensionamiento seleccionado, las propiedades de los materiales se determinan utilizando los materiales específicos para ser utilizados en la construcción actual (Nivel 1), o estimarse a partir de las correlaciones con las pruebas de rutina (Nivel 2), o se definen mediante los valores por defecto de la base de datos (Nivel 3).

Las propiedades mecánicas de los materiales de pavimento se utilizan para estimar las tensiones y desplazamientos bajo carga. Estas estimaciones son, a su vez utilizadas para cuantificar el deterioro del pavimento utilizando modelos de regresión de la base de datos de comportamiento de pavimento a largo plazo (PPLP), el cual contiene datos completos de las secciones de prueba de carretera a escala de campo. Deterioros de superficie se pueden clasificar en tres grupos: fractura, deformación y degradación. Estos deterioros superficiales se pueden utilizar para evaluar el desempeño, ciclo de vida estimado y anticipar los modos de falla del pavimento.

Dimensionamiento de pavimentos utilizando el enfoque de ME implica la medición de los ciclos de carga de tráfico que se corresponden con un nivel limitado de deterioro de superficie. Este enfoque podría ser aplicado a los pavimentos reforzados con geosintéticos. El enfoque de dimensionamiento ME es más adecuado que el método AASHTO para incorporar los beneficios de los geosintéticos. Esto es debido a que el enfoque de ME requiere la entrada del usuario para definir los materiales locales, proporcionando así una base más consistente para la evaluación de las propiedades de los geosintéticos.

En el modelo mecanicista, la contribución de una capa delgada tal como un geosintético se ha incorporado como un módulo resiliente equivalente y la relación de Poisson. Sin embargo, en el dimensionamiento empírico, la calibración del modelo de daño equivalente en términos de formación de ahuecamientos en la subrasante no ha proporcionado resultados similares para pavimentos flexibles reforzados con geosintéticos. Específicamente, en pavimentos de asfalto delgados la contribución del geosintético se ha incorporado en las propiedades de la capa de base, mientras que en los pavimentos de asfalto gruesos que se ha simulado como un retardo equivalente en la aparición de grietas de fatiga (en comparación con el inicio en un pavimento no reforzado). En consecuencia, los beneficios de geosintéticos no se han definido consistentemente con el dimensionamiento ME.

El enfoque de dimensionamiento ME se ha considerado como método más apropiado para estimar el comportamiento del campo de los pavimentos flexibles que un análisis elástico de varias capas, ya que es más riguroso y adaptable (Al-Qadi, 2006). Sin embargo, la viabilidad del método se ve comprometida ya que una cantidad significativa de información y datos de prueba se requieren para caracterizar el pavimento y su comportamiento esperado. Sólo pocos laboratorios consiguen realizar las pruebas complejas necesarias para determinar las propiedades tales como M_R , e incluso cuando lo son, los costos asociados podrían ser injustificadamente altos. Por último, como en el método AASHTO, el método ME también depende en gran medida de las correlaciones con las propiedades del material.

En resumen, la predicción del comportamiento de los pavimentos flexibles es complejo, ya que el comportamiento global es controlado por numerosos factores, incluyendo la magnitud de

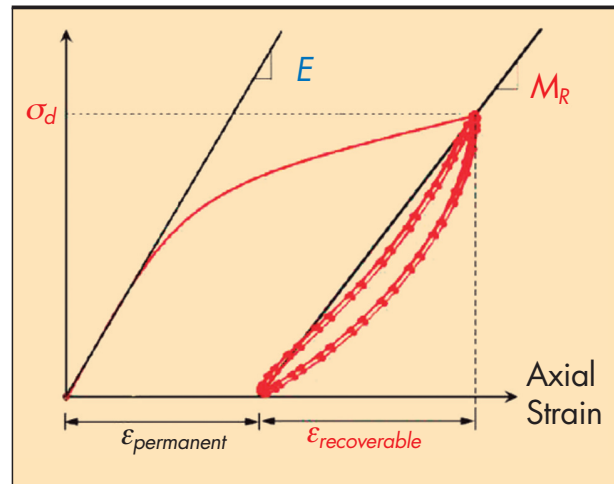


FIGURA 5. Comparación de módulo resiliente, M_R y módulo de elasticidad, E . / FIGURE 5. Comparison of Resilient Modulus, M_R , and Modulus of Elasticity, E .

routine tests (Level 2), or are defined using default values from the database (Level 3).

The mechanistic properties of pavement materials are used to estimate stresses and displacements under loading. These estimates are in turn converted into pavement surface distresses using regression models of the Long Term Pavement Performance (LTPP) program database, which contains comprehensive data from field-scale road test sections. Surface distresses are broadly classified into three groups: fracture, deformation, and degradation. These surface distresses can be used to evaluate performance, estimate life cycle and anticipate failure modes of the pavement.

Design of pavements using the M-E approach involves measuring the traffic load cycles that correspond to a limited level of surface distress. This approach could be applied to geosynthetic-reinforced pavements. The M-E design approach is better suited than the AASHTO approach to incorporate geosynthetic benefits. This is because the M-E approach requires input from the user to define the local materials, thus providing a more consistent basis for evaluation of geosynthetic properties.

In the mechanistic model, the contribution of a thin layer such as a geosynthetic has been incorporated as an equivalent resilient modulus and Poissons' ratio. Yet, in the empirical design, calibration of the equivalent damage model in terms of subgrade rutting has not provided similar results for thin and thick asphalt geosynthetic-reinforced flexible pavements. Specifically, in thin asphalt pavements the geosynthetic contribution has been incorporated into the properties of the base course layer, whereas in thick asphalt pavements it has been simulated as an equivalent delay in the onset of fatigue cracking (when compared to the onset in an unreinforced pavement section). Consequently, the benefits of geosynthetics have not been consistently defined using the M-E design.

The M-E design approach has been deemed more appropriate method for estimating field behavior of flexible pavements than a multi-layered elastic analysis because it is more rigorous and adaptable (Al-Qadi, 2006). However, the practicality of the method is compromised since a significant amount of information and test data are required

la carga, la fuerza sub-base, espesor de la capa, capa intermedia de mezcla, la degradación del material, agrietamiento y la formación de ahuellamientos, y fluctuaciones estacionales y climáticas (WDOT 2007, Dougan 2007, Al-Qadi 2006). A pesar de ser beneficioso, el uso de refuerzo geosintético añade complejidad a la comprensión del sistema mediante la introducción de un nuevo conjunto de variables. Estos incluyen el mecanismo de refuerzo, los tipos de geosintéticos y la rigidez, resistencia a la tracción, tamaño de la abertura y la posición de colocación. Por lo tanto, debido a la incertidumbre en la cuantificación de los mecanismos de refuerzo geosintético, ni la AASHTO (1993), ni la NCHRP (2004) se acerca a incorporar propiedades específicas de los geosintéticos plenamente en el dimensionamiento de pavimentos.

4. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES REFORZADOS CON GEOSINTÉTICOS

La evaluación del desempeño de los pavimentos se ha llevado a cabo mediante pruebas de campo a gran escala, pruebas de laboratorio y simulaciones numéricas.

4.1. PRUEBAS DE CAMPO

Pruebas de campo a gran escala se han realizado tanto en las vías públicas y carreteras en servicio. Como se discutió previamente, la metodología ME de dimensionamiento se han desarrollado recientemente y requiere datos para fines de validación (Watts y Blackman 2009) y de calibración. El monitoreo de las carreteras en servicio es un proceso que lleva tiempo. Por consiguiente, datos útiles también se han generado utilizando ensayos acelerados de pavimentos (APT). Las instalaciones APT constan de pistas de prueba ubicadas ya sea en interiores o al aire libre. Implican el uso de sistemas automatizados, de uno o dos ejes, carga de las ruedas individuales que se ejecuta repetidamente sobre la superficie de la pista de ensayo. APT puede proporcionar una buena simulación de la realización de pavimentos en servicio y puede ser particularmente útil para proporcionar una rápida indicación del comportamiento del pavimento bajo condiciones severas.

Varios métodos han sido implementados para evaluar y comparar el comportamiento del pavimento en las secciones de prueba a escala de campo. En pavimentos flexibles, las dos variables más comúnmente cuantificadas son las deformaciones de la superficie y el agrietamiento (incluyendo agrietamientos longitudinal, transversal y a la fatiga). La deformación superficial es el criterio de desempeño más común para pavimentos tanto reforzados y sin reforzar. El deterioro ha sido evaluado usando: (1) la medición de deflexiones superficiales existentes en términos de profundidad de ahuellamiento, y (2) la medición de deflexiones superficiales en respuesta a una carga aplicada para determinar su capacidad estructural.

El ahuellamiento se produce debido al desarrollo de deformaciones permanentes en cualquiera de las capas del pavimento o en la sub-base. El ahuellamiento por lo general se mide en metros cuadrados de superficie para un grado de gravedad, según se define a partir de los datos recogidos con una varilla de medición de perfiles a intervalos de 15 m intervalos. Las mediciones de la profundidad de formación de ahuellamientos son relativamente fáciles de obtener, ya que se toman en la superficie del pavimento, y proporcionan un método simple de comparar el comportamiento del pavimento entre múltiples secciones de prueba.

Las mediciones de deformación también se han realizado utilizando los ensayos no destructivos (NDT) dispositivos con el fin de evaluar la capacidad estructural del firme y para calcular los módulos de diversos componentes del pavimento. El dispositivo

to characterize the pavement and its anticipated performance. Only few test agencies can perform the complex tests required to determine properties such as M_R , and even when they are, the associated costs could be unjustifiably high. Finally, as in the AASHTO method, the M-E approach also relies heavily on correlations to material properties.

In summary, prediction of the behavior of flexible pavements is complex, as the overall performance is controlled by numerous factors, including load magnitude, subgrade strength, layer thickness, interlayer mixing, material degradation, cracking and rutting, and seasonal and climatic fluctuations (WDOT 2007, Dougan 2007, Al-Qadi 2006). While beneficial, the use of geosynthetic reinforcement adds complexity to the system understanding by introducing a new set of variables. These include the reinforcement mechanism, geosynthetic types and stiffness, tensile strength, aperture size and placement location. Therefore, due to uncertainty in quantifying the mechanisms of geosynthetic-reinforcement, neither the AASHTO (1993) nor the NCHRP (2004) approaches incorporate specific geosynthetic properties fully in design of pavements.

4. ASSESSMENT OF THE PERFORMANCE OF GEOSYNTHETIC-REINFORCED FLEXIBLE PAVEMENTS

Assessment of the performance of pavements has been conducted using field scale tests, laboratory tests, and numerical simulations.

4.1. FIELD TESTS

Full-scale field tests have been performed on both public roadways and in-service roads. As previously discussed, M-E design processes have been recently developed that require data for calibration and validation purposes (Watts and Blackman 2009). The monitoring of in-service roads is a time consuming process. Consequently, useful data has also been generated using accelerated pavement testing (APT). APT facilities consist of test tracks located either indoor or outdoor. They involve the use of automated, one or two axle, single wheel loads that repeatedly runs over the test track surface. APT may provide a good simulation of the performance of in-service pavements and can be particularly useful to provide rapid indication of pavement performance under severe conditions.

Several approaches have been implemented to evaluate and compare pavement performance in field-scale test sections. In flexible pavements, the two most commonly quantified variables are surface deflection and cracking (including longitudinal, transverse and fatigue). Surface deflection is the most common performance criterion for both reinforced and unreinforced pavements. Distress has been evaluated using: (1) measurement of existing surface deflections in terms of rutting depth, and (2) measurement of surface deflections in response to an applied load to determine its structural capacity.

Rutting occurs because of the development of permanent deformations in any of the pavement layers or in the subgrade. Rutting is generally measured in square meters of surface area for a given severity level, as defined from data collected with a dipstick profiler every 15 m intervals. Measurements of rutting depth are comparatively easy to obtain, as they are taken at the pavement surface, and provide a simple method of comparing pavement performance among multiple test sections.

más utilizado para medir las deflexiones del firme es el deflectómetro de impacto (FWD). Esta metodología implica la aplicación de una serie de impulsos en el pavimento utilizando un dispositivo montado en un remolque que es trasladado a los lugares de prueba deseados. Una placa de carga se baja hidráulicamente a la superficie del pavimento, después de que un impulso se aplica al pavimento dejando caer un peso desde una altura conocida sobre la placa de carga. La magnitud de la carga se mide usando una célula de carga, mientras que las desviaciones se miden utilizando siete transductores de velocidad. Un equipo conocido como Deflectómetro dinámico de balanceo (RDD), se ha desarrollado recientemente para evaluar las condiciones de los pavimentos y la determinación de perfiles de deflexión del pavimento continuo (Bay y Stokoe 1998). A diferencia de la DM, la RDD realiza mediciones continuas en lugar de las mediciones de deformación discretas. La capacidad de realizar mediciones continuas hace del RDD probar un método eficaz para la caracterización rápida de las grandes secciones de pavimento. El equipo aplica fuerzas sinusoidales al pavimento a través de rodillos especialmente diseñados. Las deflexiones resultantes se miden por los sensores de rodadura diseñados para reducir al mínimo el ruido causado por las superficies de pavimento en mal estado.

Las pruebas de campo en los tramos de carretera a gran escala se han realizado para evaluar el efecto de refuerzo geosintético en sistemas de pavimentos flexibles. Perkins y Ismeik (1997) compararon los resultados de nueve secciones, entre las cuales cuatro fueron construidas en pistas de prueba en interiores, tres pistas de prueba al aire libre, una en una vía pública y otra en una zona camión-puesta en escena de campo. La prueba de pistas cubiertas utiliza una sola rueda en movimiento para cargar las secciones de prueba (Brown et al. 1982, Barksdale et al. 1989, Collin et al. 1996, Moghaddas-Nejad y Pequeñas 1996). El seguimiento de pruebas al aire libre involucra una sola rueda en movimiento (Barker 1987, Webster 1993), y un camión de doble rueda de dos ejes para cargar el pavimento (Halliday y Potter 1984).

Otros estudios han informado recientemente sobre secciones de prueba de geosintéticos reforzados, conducidas con equipos APT (Cancelli y Montanelli 1999, Perkins 2002, Perkins y Cortez 2005, Al-Qadi et al. 2008, Reck et al. 2009). La evaluación de estas secciones de ensayo indicó que la profundidad de ahuellamiento continuó siendo el método más común para evaluar el deterioro del pavimento. Un total de nueve secciones de prueba de campo y cuatro secciones APT se estudiaron con las mediciones de perfilómetro al final de los ciclos de carga de dimensionamiento. Sin embargo, las pruebas de tracción delantera se llevaron a cabo sólo en cuatro secciones de campo y en una sección de APT.

Zornberg y Gupta (2009) reportaron tres estudios de casos llevados a cabo en Texas, EE.UU., considerando pavimentos reforzados con geosintéticos en los que pruebas FWD se llevaron a cabo en las carreteras en servicio. Uno de los casos se trataba de una investigación forense realizada en un pavimento de nueva construcción. Se observaron grietas longitudinales en un pavimento reforzado con geomalla antes de que fuera abierta al tráfico. Sin embargo, la investigación reveló que el contratista había puesto rollos de geomalla dejando una parte de la pista sin reforzar. Grietas aparecieron solamente en lugares no reforzados en el pavimento. En consecuencia, la diferencia en la respuesta dentro y más allá de partes reforzadas de la pista ilustra que el uso de geomalla puede evitar el agrietamiento del pavimento.

El segundo caso de estudio informa el desempeño en el campo de pavimentos reforzados con geomalla construidas sobre suelos de subrasante altamente plásticos. Las secciones de pavimento se habían reforzado con dos tipos diferentes de geomallas

Deflection measurements have also been made using non-destructive testing (NDT) devices in order to evaluate the pavement structural capacity and to calculate the moduli of various pavement components. The device most widely used to measure pavement deflections is the Falling Weight Deflectometer (FWD). This approach involves applying a series of impulses on the pavement using a trailer-mounted device that is driven to the desired test locations. A loading plate is hydraulically lowered to the pavement surface, after which an impulse is applied to the pavement by dropping a weight from a known height onto the loading plate. The magnitude of the load is measured using a load cell while deflections are measured using seven velocity transducers. An equipment known as a Rolling Dynamic Deflectometer (RDD), has been recently developed for assessing the conditions of pavements and determining pavement deflection profiles continuously (Bay and Stokoe 1998). Unlike the FWD, the RDD performs continuous rather than discrete deflection measurements. The ability to perform continuous measurements makes RDD testing an effective approach for expeditious characterization of large pavement sections. The equipment applies sinusoidal forces to the pavement through specially designed rollers. The resulting deflections are measured by rolling sensors designed to minimize the noise caused by rough pavement surfaces.

Field tests on full-scale road sections have been conducted to evaluate the effect of geosynthetic reinforcement in flexible pavement systems. Perkins and Ismeik (1997) compared the results from nine sections, among which four were constructed on indoor test tracks, three on outdoor test tracks, one on a public roadway and one in a field truck-staging area. The indoor test tracks used a single moving wheel to load the test sections (Brown et al. 1982, Barksdale et al. 1989, Collin et al. 1996, Moghaddas-Nejad and Small 1996). The outdoor test tracks involved a single moving wheel (Barker 1987, Webster 1993), and a two-axle, dual wheel truck to load the pavement (Halliday and Potter 1984).

Additional studies have been recently reported on geosynthetic-reinforced test sections using APT equipment (Cancelli and Montanelli 1999, Perkins 2002, Perkins and Cortez 2005, Al-Qadi et al. 2008, Reck et al. 2009). Assessment of these test sections indicated that rutting depth continued to be the most common method to evaluate pavement distress. A total of nine field test sections and four APT sections were reported involving measurements from profilometer readings at the end of design loading cycles. However, FWD tests were conducted only at four field sections and at one APT section.

Zornberg and Gupta (2009) reported three case studies conducted in Texas, USA, for geosynthetic-reinforced pavements on which FWD testing was conducted on in-service roads. One of the cases involved a forensic investigation conducted in a newly constructed pavement. Longitudinal cracks were observed in a geogrid-reinforced pavement before it was open to traffic. However, the investigation revealed that the contractor had laid rolls of geogrid leaving a portion of the pavement unreinforced. Cracks only appeared in unreinforced locations within the pavement. Accordingly, the difference in response within and beyond reinforced portions of the pavement illustrated that use of geogrid can prevent pavement cracking.

The second case study reported the field performance of geogrid-reinforced pavements built over highly plastic subgrade soils. The pavement sections had been reinforced us-

que cumplen las especificaciones del proyecto. Aunque una sección reforzada con un tipo de geomalla mostró un buen desempeño, la otra sección reforzada con un segundo tipo de geomalla mostró grietas longitudinales. Las revisiones de las propiedades de los materiales llevan a la conclusión preliminar de que los malos resultados en la segunda parte se debieron a la insuficiencia de la eficiencia de junta de las geomallas. Además la inspección indicó un mayor módulo de tracción de la geomalla utilizada en la sección de mejor comportamiento. Este estudio pone de relieve la necesidad de una mejor caracterización de materiales y la posible insuficiencia de las especificaciones de uso común para los pavimentos reforzados con geosintéticos.

El tercer caso es el de tres secciones de pavimento. Estas incluyen dos secciones de geomalla reforzadas (secciones 1 y 2) que tenían espesores de capa de base de 0,20 m y 0,127 m, respectivamente. Por otro lado, una sección de control (sin geomalla de refuerzo) tenía una capa de capa de base de 0,20 m de espesor. Pruebas FWD mostraron un módulo comparativamente mayor para la sección de geomalla reforzada con una base de espesor de 0,20 mientras que un valor menor de módulo se obtuvo para la sección de geomalla reforzada con una base de 0,127 m de espesor. Sin embargo, la evaluación visual mostró la formación de grietas en la sección de control, mientras que las dos secciones de geomalla reforzadas mostraron un buen desempeño. Mientras que las secciones reforzadas con geomalla mostraron un mejor comportamiento, los resultados de las pruebas de FWD mostraron una tendencia diferente. Este estudio ilustra la insuficiencia de las técnicas de evaluación actualmente disponibles considerando ensayos no destructivos con el fin de cuantificar los beneficios de refuerzos geosintéticos.

Las lecciones aprendidas de estos estudios de campo, sirvieron de base para un programa de monitoreo sobre el terreno para evaluar el desempeño de pavimentos reforzados con geosintéticos construidas sobre arcillas expansivas. Este estudio implicó la rehabilitación de un camino de bajo volumen en Texas por el uso de refuerzos de geosintéticos. Se realizó una evaluación comparativa con 32 secciones de prueba. Esto incluyó 8 esquemas de refuerzo diferentes (3 productos de refuerzo y una sección de control no reforzada, así como secciones estabilizadas de cal). Además, y con el fin de dar cuenta de variabilidad debido a la del medio ambiente, la construcción y de tipo de subrasante, se construyeron un total de 4 repeticiones para cada uno de los ocho esquemas. Por lo tanto, se construyeron un total de 32 secciones de prueba (4 tipos de refuerzo x 2 métodos de estabilización x 4 repeticiones) (Figura 6).

Debido a las características únicas de este estudio de campo, el pavimento reforzado se considera experimental y un programa de monitorización de comportamiento extenso fue implementado después de la construcción. Esto incluyó la instalación de sensores de humedad para caracterizar los patrones de migración de humedad bajo el pavimento. Un total de ocho perfiles horizontales de sensores de humedad verticales, cada uno conteniendo una matriz de cuatro sensores se instaló por debajo del pavimento. Monitoreo de campo que implica la inspección visual, agrimensura y FWD se llevó a cabo antes de la reconstrucción e inmediatamente después de la reconstrucción de la carretera. La construcción final del pavimento reforzado se completó en enero de 2006 y la evaluación del desempeño de la carretera recién reconstruido se ha llevado a cabo de forma regular desde entonces. Los resultados obtenidos en el estudio de campo están proporcionando buena comprensión de los mecanismos subyacentes que gobiernan el comportamiento de los pavimentos reforzados con geosintéticos. Además, los datos recogidos son útiles para cuantificar los mecanismos de fisuración y la efectividad de los refuerzos de geosintéticos en mitigar tales deterioros longitudinales.

ing two different types of geogrids that met project specifications. Although a section reinforced with one type of geogrid was found to be performing well, the other section reinforced with second type of geogrid showed longitudinal cracking. The reviews of the material properties lead to the preliminary conclusion that poor performance in the second section was due to inadequate junction efficiency. Further inspection indicated a higher tensile modulus of the geogrid used in the better performing section. This study highlighted the need for better material characterization and the possible inadequacy of commonly used specifications for geosynthetic-reinforced pavements.

The third case involved three pavement sections. The two geogrid-reinforced sections (Sections 1 and 2) had base course thicknesses of 0.20 m and 0.127 m, respectively. On the other hand, a control sections (without geogrid reinforcement) had a 0.20 m-thick base course layer. FWD testing showed a comparatively higher pavement modulus for the geogrid-reinforced section with a 0.20 m-thick base while lower modulus value were obtained for the geogrid-reinforced section with a 0.127 m-thick base. Yet, field visual assessment showed cracking in the control section while the two geogrid-reinforced sections performed well. While the geogrid-reinforced sections outperform the unreinforced section, the results of FWD testing showed a different trend. This study illustrated the inadequacy of the currently available evaluation techniques involving non-destructive testing for the purpose of quantifying the benefits of geosynthetic reinforcements.

The lessons learned from these field case studies, provided the basis for a field monitoring program to evaluate the performance of geosynthetic-reinforced pavements constructed over expansive clays. This involved the rehabilitation of a low-volume road in Texas by use of geosynthetic reinforcements. A comparative evaluation with 32 test sections was conducted. This included 8 different reinforcement schemes (3 reinforcement products and an unreinforced control section, as well as lime stabilized sections). Also, and in order to account for variability due to environmental, construction and subgrade-type, a total of 4 repeats were constructed for each one of the 8 schemes. Therefore, a total of 32 test sections (4 reinforcement types x 2 stabilization approaches x 4 repeats) were constructed (Figure 6).

Due to unique characteristics of this field study, the reinforced pavement was considered experimental and an extensive post-construction performance monitoring program was implemented. This included the installation of moisture sensors to characterize the patterns of moisture migration under the pavement. A total of eight horizontal moisture and vertical moisture sensor profiles, each containing an array of four sensors was installed below the pavement. Field monitoring involving visual inspection, surveying and FWD was conducted before reconstruction and immediately after reconstruction of the road. The final construction of the reinforced pavement was completed in January 2006 and performance evaluation of the newly reconstructed road has been conducted on a regular basis since then. The results obtained from the field study are providing good understanding of the underlying mechanisms governing the performance of the geosynthetic-reinforced pavements. Also, the collected data is useful to quantify the mechanisms of longitudinal cracking and effectiveness of the geosynthetic reinforcements in mitigating such distresses.

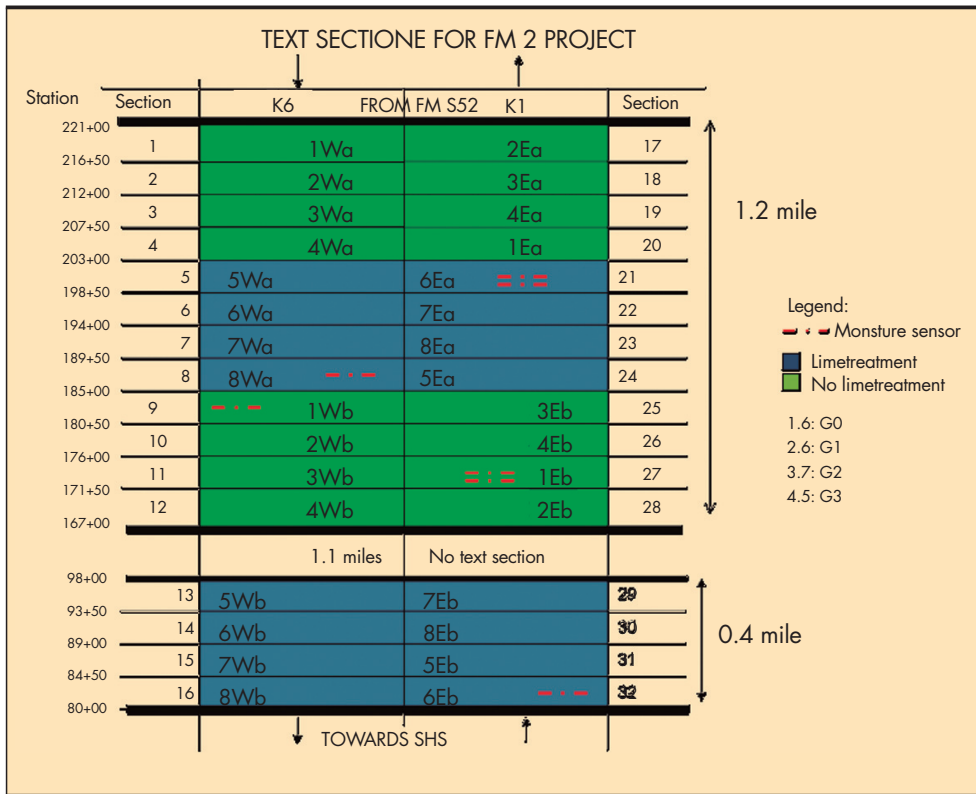


FIGURA 6. Estructura esquemática de las secciones de la prueba en el sitio de FM 2. / FIGURE 6. Schematic layout of test sections at FM 2 site.

En general, los resultados de estudios de campo reportados en la literatura han indicado que las secciones de prueba reforzadas con geosintéticos condujeron a menos profundidad de ahuellamiento que las secciones no reforzadas. La mejora del comportamiento se ha atribuido a la capacidad de los geosintéticos para controlar la propagación lateral de la capa de base.

4.2. PRUEBAS DE LABORATORIO

Se han propuesto una serie de pruebas de laboratorio para cuantificar los mecanismos que gobiernan el comportamiento de los pavimentos flexibles reforzados con geosintéticos. El objetivo principal de las pruebas de laboratorio ha sido cuantificar los mecanismos de interacción suelo-geosintéticos en los sistemas de pavimento flexible ya sea mediante la medición de las propiedades de índice geosintéticos o mediante la reproducción de las condiciones de campo. Una condición de campo importante para ser reproducida es el efecto del corte de la interfaz proporcionada por geotextiles y entrelazados proporcionados por geomallas cuando se utiliza en o dentro de la capa de capa de base de los pavimentos (Figura 7). Dependiendo del enfoque adoptado, las pruebas en la literatura se pueden agrupar en dos categorías principales: pruebas confinadas y no confinadas. En las pruebas no confinadas, las propiedades de los geosintéticos se miden en el aire, mientras que en las pruebas confinados se miden sobre el confinamiento de suelo. Las ventajas y limitaciones de las diferentes pruebas desarrolladas en América del Norte, en cada una de estas dos categorías se discuten a continuación.

4.2.1. Pruebas no confinadas

Como se mencionó, las pruebas no confinadas se realizan en muestras geosintéticos en aislamiento. Las ventajas de estas pruebas incluyen conveniencia, simplicidad y rentabilidad. Se pueden ejecutar en períodos cortos de tiempo utilizando disposi-

Overall, the results from field studies reported in the literature have indicated that the geosynthetic-reinforced test sections led to less rutting depth than the unreinforced sections. The improved performance has been attributed to the ability of the geosynthetics to control lateral spreading of the base layer.

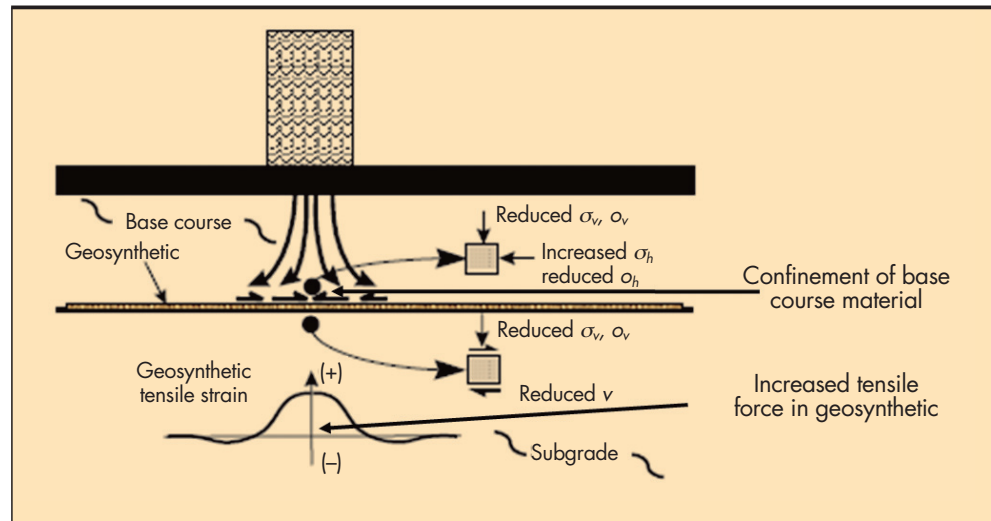
4.2. LABORATORY TESTS

A number of laboratory tests have been proposed to quantify the mechanisms governing the performance of geosynthetic-reinforced flexible pavements. The primary objective of laboratory tests has been to quantify the soil-geosynthetic interaction mechanisms in flexible pavement systems either by measuring the geosynthetic index properties or by replicating the field conditions. An important field condition to be replicated is the effect of interface shear provided by geotextiles and interlocking provided by geogrids when used under or within the base course layer of pavements (Figure 7). Depending on the adopted approach, the tests reported in the literature can be grouped into two main categories: unconfined and confined tests. In unconfined tests, geosynthetic properties are measured in-air, while in confined tests they are measured within confinement of soil. The advantages and limitations of the various tests developed in North America in each of these two categories are discussed next.

4.2.1. Unconfined Tests

As mentioned, unconfined tests are conducted using geosynthetic specimens in isolation. Advantages of these tests include expedience, simplicity, and cost effectiveness. They can be run in short periods of time using conven-

FIGURA 7. Mecanismos debido a la interacción suelo-geosintético en el pavimento reforzado con geosintéticos que se han probado a estar representados en las pruebas de laboratorio (Perkins 1999). / **FIGURE 7.** Mechanisms due to soil-geosynthetic interaction in geosynthetic-reinforced pavement that have been tried to be represented in laboratory tests (Perkins 1999).



tivos convencionales, lo que facilita la evaluación de la repetibilidad de los resultados de prueba. Sin embargo, se requieren correlaciones entre el índice de bienes obtenidos de estas pruebas y el comportamiento en el campo de los pavimentos reforzados con geosintéticos. Las pruebas en esta categoría incluyen la prueba de tracción en probeta ancha, ensayo de carga biaxial, prueba de la eficiencia de junta, y la prueba de resistencia a la torsión. Mientras que el ensayo de tracción en probeta ancha se puede realizar utilizando cualquier tipo de geosintéticos (geomalla, geotextil), las otras tres pruebas son específicas para la caracterización de geomallas.

La resistencia a la tracción de los materiales geosintéticos a menudo ha sido considerada como la propiedad más importante para los proyectos de aplicaciones de refuerzo. Mientras la resistencia a la tracción puede no ser particularmente relevante para el caso de dimensionamiento de pavimentos, la resistencia a la tracción a menudo se ha incorporado en el dimensionamiento y las especificaciones de pavimentos. El estado actual de la práctica para la medición de las propiedades de tracción de un geosintético consiste en colocar el material en un conjunto de abrazaderas, posicionar este montaje en un bastidor de carga y tensar el geosintético hasta que se produzca la falla. La prueba se lleva a cabo generalmente a una velocidad de deformación constante. En la actualidad, dos normas ASTM están disponibles para ensayos de tracción. El ensayo de tracción de agarre (D4632) se utiliza para el control de calidad de fabricación, ya que implica un espécimen geosintético estrecho. En su lugar, el ensayo de tracción en probeta ancha (D4595) se ha utilizado en aplicaciones de dimensionamiento. El bastidor de carga para un ensayo de tracción en probeta ancha llevado a cabo mediante pinzamientos de rodillos se muestra en la Figura 8. El ensayo de tracción proporciona la rigidez a la tracción a diferentes valores de tensión (1%, 2% y 5%), así como la resistencia a la tracción. Los métodos utilizados para el dimensionamiento de la carretera sin pavimentar han incluido la rigidez a la tracción a 5% en las especificaciones del producto. Basado en estudios con modelos a escala real de las carreteras pavimentadas, Berg *et al.* (2000) informaron una deformación acumulada en geosintéticos de 2% y por lo tanto se recomienda la rigidez a la tracción en este nivel de deformación para el dimensionamiento. Sin embargo, el nivel representativo de deformación real de las condiciones de campo es, sin duda menor para el caso de las solicitudes de pavimento.

tional devices, which facilitates the assessment of repeatability of test results. However, correlations are required between the index property obtained from these tests and the field performance of the geosynthetic-reinforced pavements. Tests in this category include the wide-width tensile test, biaxial loading test, junction efficiency test, and torsional rigidity test. While the wide-width tensile test can be conducted using any type of geosynthetics (geogrid, geotextile), the other three tests are specific for the characterization of geogrids.

*The tensile strength of geosynthetic materials has often been deemed as the most important property for projects involving reinforcement applications. While tensile strength may not be particularly relevant for the case of pavement design, tensile strength has often been incorporated into pavement design and specifications. The current state of practice for measuring the tensile properties of a geosynthetic involves placing the material within a set of clamps, positioning this assembly in a load frame, and tensioning the geosynthetic until failure occurs. The test is generally performed at a constant strain rate. Currently, two ASTM standards are available for tensile tests. The grab tensile test (D4632) is used for manufacturing quality control, as it involves a narrow geosynthetic specimen. Instead, the wide-width tensile test (D4595) has been used in design applications. The load frame for a wide-width tensile test conducted using roller grips is shown in Figure 8. The tensile test provides the tensile stiffness at different strain values (1%, 2%, and 5%), as well as the ultimate tensile strength. Methods used for unpaved road design have included the tensile stiffness at 5% in product specifications. Based on full scale model studies for the paved roads, Berg *et al.* (2000) reported accumulated in-service tensile strain of 2% in geosynthetics and thus recommended the tensile stiffness at this strain level for design. However, the actual strain level representative of field conditions is certainly smaller for the case of pavement applications.*

Bray and Merry (1999) investigated the stress and strain conditions in wide-width tensile tests. They concluded that strains vary across the specimen from a plane-strain, biaxial condition near the grips, to a uniaxial con-

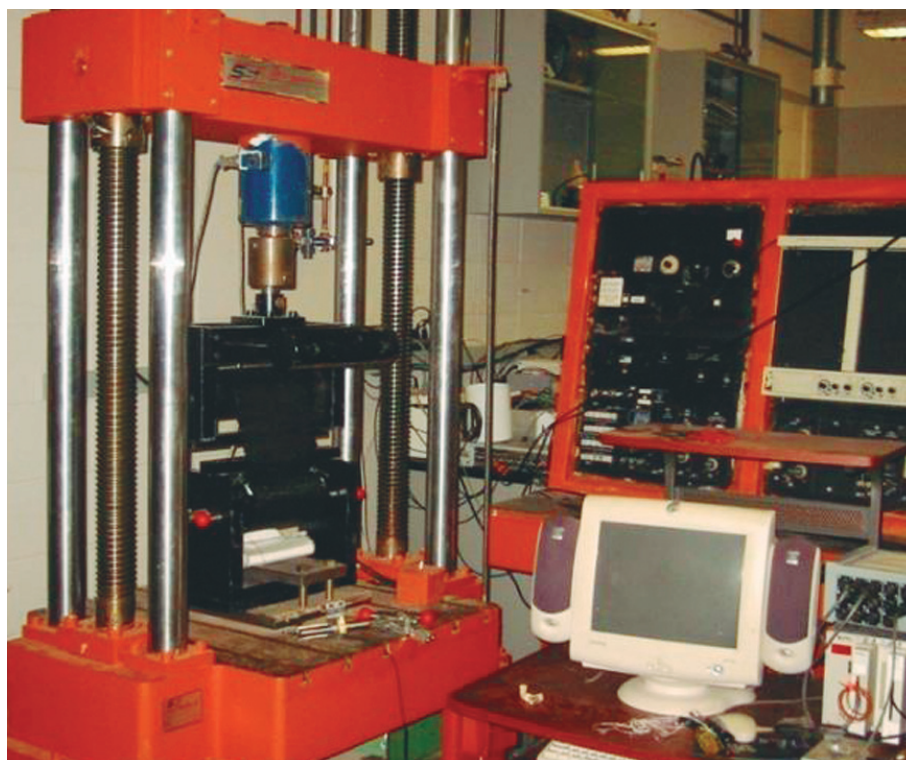


FIGURA 8. Ensayo de tracción en probeta ancha realizado con mordazas de acción cabestrante en la Universidad de Texas en Austin. / **FIGURE 8.** Wide-width tensile test conducted with roller grips at the University of Texas at Austin.

Bray y Merry (1999) investigaron los esfuerzos y las condiciones de deformación en los ensayos de tracción en probeta ancha. Llegaron a la conclusión de que las deformaciones varían a lo largo de la muestra desde un plano-deformación, condiciones biaxiales cerca de las agarraderas, a una condición uniaxial cerca del centro de la muestra. Por lo tanto, puede haber una idea errónea de que la prueba mide el comportamiento geosintético bajo la condición de 1-D, que es representativo de las aplicaciones de campo. Cabe señalar que la mayoría de las geomallas uniaxiales ensayadas utilizando métodos convencionales sufren distorsiones, tensiones no uniformes (en particular en las uniones), ruptura prematura de espécimen y problemas con la sujeción (McGown y col. 2005). Kupec y McGown (2004) propusieron un método de ensayo biaxial, que se centró principalmente en las geomallas y permitió la caracterización de la fuerza a tracción combinada de los elementos y las uniones en una sola prueba.

Para hacer frente a las deficiencias percibidas del ensayo de tracción uniaxial, una prueba uniaxial complementaria, conocida como la "prueba de resistencia de junta," fue desarrollada. Se lleva a cabo según el procedimiento recomendado en las especificaciones GRI-GG2 e implica sujetar el miembro transversal de un elemento de geomalla en ambos lados de la unión con un dispositivo de sujeción. La carga se aplica a continuación hasta que se rompe la unión. La fuerza requerida para fallar la unión se define como la fuerza de unión de la geomalla. La resistencia de junta ofrece la cuantificación de la contribución a la estabilidad que puede conducir a la ruptura de la geomalla durante la construcción del pavimento y de la carga de tráfico posterior. Sin embargo, la capacidad de geomalla para transferir el esfuerzo bajo ahuellamientos es una consideración probablemente de más relevancia para el caso de pavimentos flexibles. Sin embargo, los requisitos de rigidez de unión para proyectos de pavimentación no se han definido adecuadamente. Además, dado que esta prueba se desarrolló

condition near the center of the specimen. Thus, there may be a misconception that the test measures geosynthetic behavior under the 1-D condition that is representative of field applications. It should be noted that most geogrids tested using uniaxial methods suffer distortions, non-uniform stresses (particularly at the junctions), premature specimen rupture and problems with clamping (McGown et al. 2005). Kupec and McGown (2004) suggested a biaxial test method, which focused primarily on geogrids and allowed characterization of the combined strength of tensile ribs and junctions in a single test.

To address perceived deficiencies of uniaxial tensile test, a complementary uniaxial test, known as the "junction strength test," was developed. It is conducted as per the procedure recommended in GRI-GG2 specifications and involves gripping the cross member of a geogrid rib on both sides of the junction with a clamping device. Load is then applied until the junction breaks. The force required to fail the junction is defined as the junction strength of the geogrid. Junction strength provides quantification of the contribution to stability that may lead to rupture of the reinforcement during the pavement construction and subsequent traffic load. However, the geogrid ability to transfer stress under low strains is a consideration probably of more relevance for the case of flexible pavements. However, junction stiffness requirements for pavement projects have not been properly defined. Also, since this test was originally developed for geogrids with integral junctions, it does not incorporate newer geogrids with entangled fibers or those with heat bonded or laser welded junctions.

A torsional rigidity test was developed by Kinney and Yuan (1995) to measure the in-plane rotational stiffness of

originalmente para geomallas con uniones integrales, que no incorpora nuevas geomallas con fibras enredadas o aquellos con juntas formadas usando calor o láser.

Una prueba de rigidez a la torsión fue desarrollada por Kinney y Yuan (1995) para medir la rigidez en el plano de rotación de las geomallas. La prueba pretendía cuantificar el comportamiento de las pruebas de carretera pavimentadas reforzadas con geomalla construidas por el Cuerpo de Ingenieros de la Estación Experimental de Vías Navegables Ejército de EE.UU. Mientras que la prueba se centra en la capacidad de trabazón de la geomalla, no se pudo establecer una relación entre la rigidez a la torsión de la geomalla y el comportamiento de los tramos de carretera reforzados con geomalla. La prueba proporciona una mayor rigidez torsional para las geomallas rígidas que para las geomallas flexibles. Sin embargo, un estudio realizado por el Instituto de Investigación de Texas (TRI 2001) reporta una falta de correlación entre la rigidez torsional y el comportamiento confinado de las geomallas.

El comportamiento de los geosintéticos observado en el laboratorio usando pruebas no confinadas tiene que estar correlacionado con el comportamiento en aplicaciones de campo, que tienen diferentes cargas y condiciones de contorno.

4.2.2. Pruebas Confinadas

Los geosintéticos utilizados para el refuerzo de base están sobre el confinamiento de suelo y sometidos a cargas dinámicas (tráfico). Estas condiciones no se pueden simular mediante pruebas no confinadas monotónicas. El comportamiento del compuesto geosintético-suelo depende no sólo de la macro-estructura y las propiedades de los geosintéticos, sino también de las propiedades del suelo y, lo más importante, de la interacción entre geosintéticos y las partículas del suelo (Han *et al.* 2008). La interacción entre el suelo y los geosintéticos en confinamiento, específicamente las propiedades de tensión-deformación confinadas de los geosintéticos, ha sido el foco de previas investigaciones. La Administración Federal de Carreteras (FHWA) patrocinó un estudio centrado en ensayos de tracción confinados para geosintéticos, llegando a la conclusión de que la respuesta no confinada de geosintéticos es demasiado conservadora y que el confinamiento mejora de forma significativa la respuesta mecánica (Elias *et al.* 1998). Recientemente, se han propuesto una serie de pruebas confinadas, de las cuales seis pruebas se han centrado en la caracterización del comportamiento de geosintéticos utilizados para reforzar los pavimentos flexibles. Estas pruebas incluyen la prueba cíclica placa de carga, ensayos triaxiales cíclicos, prueba de arrancamiento cíclica, prueba de resistencia a la flexión, la prueba modificada del analizador de pavimento, y la prueba de rigidez de arrancamiento.

El ensayo de placa de carga cíclica ha implicado generalmente experimentos de laboratorio a gran escala en las secciones de pavimento reforzado y no reforzado (Al-Qadi *et al.* 1994, Cancelli *et al.* 1996, Haas *et al.* 1988, Miura *et al.* 1990, Perkins 1999). La configuración de la prueba diseñada por Perkins (1999) consistió en un tanque de hormigón armado de 2 m de ancho y 1,5 m de alto (Figura 9). La sección de pavimento modelo se construyó con un geosintético en la interface de la capa de base y las capas de subrasante. La carga se aplicó por un actuador neumático en la forma de un pulso de onda trapezoidal, que genera una presión superficial máxima de 550 kPa en el pavimento. Las respuestas de la fuerza y el desplazamiento se midieron utilizando una célula de carga y ocho LVDTs. TBR que van de 1 a 70 y BCR que van desde 20% a 50% se obtuvieron mediante las pruebas de carga placa cíclicas en secciones que implican refuerzos de geotextil y geomalla (Hsieh y Mao

the geogrids. The test aimed at quantifying the performance of geogrid-reinforced paved road tests constructed by the US Army Corps of Engineers at the Waterways Experiment Station. While the test focuses on the interlocking capacity of the geogrid, a relationship between geogrid torsional rigidity and the performance of geogrid reinforced road sections could not be established. The test provides a higher torsional rigidity for stiff geogrids than for flexible geogrids. However, a study conducted by the Texas Research Institute (TRI 2001) reports a lack of correlation between torsional rigidity and the confinement performance of the geogrids.

The geosynthetic behavior observed in the laboratory from unconfined tests has to be correlated with the performance in field applications, which have different loading and boundary conditions.

4.2.2. Confinad tests

*Geosynthetics used for base reinforcement are under the confinement of soil and subjected to dynamic loading (traffic). These conditions cannot be simulated by monotonic unconfined tests. Geosynthetic-soil confinement depends not only on the macro-structure and properties of geosynthetics but also on the properties of soil and, most importantly, on the interaction between geosynthetics and soil particles (Han *et al.* 2008). The interaction between soil and geosynthetics under confinement, specifically the confined stress-strain properties of the geosynthetics, has been focus of previous research. A Federal Highway Administration (FHWA) sponsored study focusing on existing confined tensile tests for geosynthetics concluded that the unconfined response of geosynthetics is overly conservative and that confinement significantly improves their mechanical response (Elias *et al.* 1998). Recently, a number of confined tests have been proposed, out of which six tests have focused on characterizing the behavior of geosynthetics used to reinforce flexible pavements. These tests include the cyclic plate load test, cyclic triaxial test, cyclic pullout test, bending stiffness test, modified pavement analyzer test, and the pullout stiffness test.*

The cyclic plate load test has generally involved large scale laboratory experiments on reinforced and unrein-

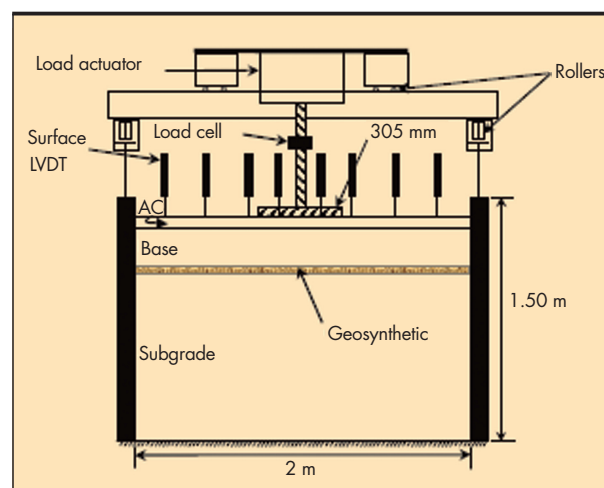


FIGURA 9. Ensayo de placa de carga cíclica (Perkins 1999). /
 FIGURE 9. Cyclic plate load test (Perkins 1999).

2005). Estas pruebas indicaron el efecto de confinamiento del suelo y la carga dinámica. Sin embargo, las instalaciones en las que la placa de carga cíclica puede llevarse a cabo no están disponibles, lo que limita la aplicación de esta prueba para los estudios de investigación. Además, la prueba de placa de carga cíclica se considera que tienen importantes inconvenientes asociados con los procedimientos de ensayo, exigencias de tiempo, y la simulación apropiada de cargas de las ruedas de rodadura (Han *et al.* 2008).

La prueba triaxial cíclica se ha utilizado para medir la capacidad de los suelos para desarrollar esfuerzos cortantes inducidos por carga cíclica (ASTM D5311 2004). El módulo resiliente, M_r , de los áridos del suelo calculado utilizando esta prueba se ha utilizado específicamente como aportación en el dimensionamiento ME (NCHRP 2000). Esta prueba fue modificada por Perkins *et al.* (2004) para cuantificar el cambio en el módulo elástico y el comportamiento de deformación permanente debido a la adición de geosintéticos a la capa de árido de los pavimentos. Los resultados de ensayos triaxiales cíclicos indican que el uso de refuerzos no afecta al módulo de resiliencia de los áridos, a pesar de que reduce significativamente las deformaciones permanentes del pavimento.

Las pruebas de arrancamiento cíclicos se llevaron a cabo por Cuelho y Perkins (2005) mediante la modificación de la prueba de arrancamiento estándar (ASTM D6706) para parecerse al protocolo de carga utilizado en una prueba triaxial cíclica. Ciclos de carga de corte cíclicos (de 100 a 300) se aplicaron a diferente nivel de confinamiento comenzando con una carga de asentamiento de 51 kPa hasta que se alcanzó la resistencia por arrancamiento. Con base en los resultados de la prueba, se definió el parámetro G_i para describir la interacción de refuerzo-árido bajo cargas cíclicas. Este parámetro se define como:

$$G_i = \frac{\tau_i}{\Delta_i} \quad (9)$$

donde Δ_i es el desplazamiento relativo entre el árido y el refuerzo y τ_i es el esfuerzo de corte aplicado a la interfaz. Las unidades de G_i son kN/m^3 . El parámetro, G_i se supone que se parecen mucho al M_r ya que depende tanto de la carga de corte y el confinamiento. Por lo tanto, la ecuación de tres parámetros para M_r , informada en NCHRP (2001) se modificó y se utilizó para calibrar G_i para una interfaz suelo-geosintético dado, de la siguiente manera:

$$G_i = k_1 \cdot P_a \left(\frac{\sigma_i}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_i}{P_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (10)$$

donde σ_i es la tensión normal en la interfaz, p_a es la presión atmosférica normalizada, P_a es la presión atmosférica por unidad de longitud y k_1 , k_2 y k_3 son parámetros adimensionales. El propósito de esta prueba era proporcionar una propiedad útil para caracterizar la interfaz de los módulos de corte en las simulaciones de elementos finitos realizados para calibrar el enfoque de ME. Sin embargo, los resultados de las pruebas llevadas a cabo en seis geosintéticos indican que las correlaciones entre los valores predichos y medidos fueron erráticos.

La prueba de resistencia a la flexión fue desarrollado por Sprague *et al.* (2004) como un procedimiento de prueba del índice de pequeña escala destinado a predecir el comportamiento de geosintéticos utilizados para el refuerzo de pavimentos. El aparato de ensayo es una versión modificada de la prueba de tensión multi-axial para geomembranas (ASTM D 5617).

Han *et al.* (2008) propusieron un método de ensayo que implica el uso de un analizador de pavimento de asfalto (APA)

forced pavement sections (Al-Qadi *et al.* 1994, Cancelli *et al.* 1996, Haas *et al.* 1988, Miura *et al.* 1990, Perkins 1999). The test setup designed by Perkins (1999) consisted of a 2 m wide and 1.5 m high reinforced concrete tank (Figure 9). The model pavement section was constructed with a geosynthetic at the interface of the base course and subgrade layers. The load was applied by a pneumatic actuator in the form of a trapezoidal wave pulse, which generated a maximum surface pressure of 550 kPa on the pavement. The force and displacement responses were measured using a load cell and eight surface LVDTs. TBRs ranging from 1 to 70 and BCRs ranging from 20% to 50% were obtained using cyclic plate load tests in sections involving geotextile and geogrid reinforcements (Hsieh and Mao 2005). These tests were reported to have successfully demonstrated the effect of soil confinement and dynamic loading. However, facilities in which cyclic plate loading can be conducted are not readily available, thus restricting the application of this test to research studies. In addition, the cyclic plate loading test was considered to have important drawbacks associated with the testing procedures, time demands, and appropriate simulation of rolling wheel loads (Han *et al.* 2008).

The cyclic triaxial test has been used to measure the ability of soils to develop shear stresses induced by cyclic loading (ASTM D5311 2004). The resilient modulus, M_r , of the soil aggregates computed using this test has been specifically used as input in the M-E design (NCHRP 2000). This test was modified by Perkins *et al.* (2004) to quantify the change in resilient modulus and permanent deformation behavior due to the addition of geosynthetics to the aggregate layer of pavements. The results from cyclic triaxial tests indicate that the use of reinforcements does not affect the resilient modulus of the aggregates, although it reduces significantly the pavement permanent deformations.

Cyclic pullout tests were conducted by Cuelho and Perkins (2005) by modifying the standard pullout test (ASTM D6706) to resemble the loading protocol used in a cyclic triaxial test. Cyclic shear load cycles (ranging from 100 to 300) were applied at different confinement level beginning with a seating load of 51 kPa until pullout failure was reached. Based on the test results, a parameter known as geosynthetic-soil resilient interface shear stiffness (G_i) was defined to describe the reinforcement-aggregate interaction under cyclic loads. This parameter is defined as:

$$G_i = \frac{\tau_i}{\Delta_i} \quad (9)$$

where Δ_i is the relative displacement between the aggregate and reinforcement and τ_i is the shear stress applied to the interface. The units of G_i are kN/m^3 . The parameter, G_i was assumed to closely resemble M_r as it depends on both the shear load and confinement. Therefore, the three parameter log-log equations for M_r , reported in NCHRP (2001) was modified and used to calibrate G_i for a given soil-geosynthetic interface, as follows:

$$G_i = k_1 \cdot P_a \left(\frac{\sigma_i}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_i}{P_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (10)$$

where σ_i is the normal stress on the interface, p_a is the normalized atmospheric pressure, P_a is the atmospheric pressure per unit length and k_1 , k_2 and k_3 are dimensionless material. The purpose of this test was to provide a property useful to characterize the interface shear moduli in finite

para evaluar los beneficios del esfuerzo de geosintéticos en la capa de base del pavimento. La APA es un dispositivo de ensayo con una rueda de carga multifuncional utilizado para cuantificar la deformación permanente, agrietamiento por fatiga, y susceptibilidad a la humedad de las mezclas calientes y frías de asfalto. Una caja convencional se modificó con el fin de llevar a cabo la prueba en una capa de base reforzada con geosintéticos. La rueda de carga se mueve hacia adelante y hacia atrás sobre la superficie de la capa base.

Una prueba de rigidez de arrancamiento (PST) fue desarrollada recientemente por Gupta (2009) en la Universidad de Texas, Austin, a fin de cuantificar la interacción suelo-geosintético en pavimentos reforzados. El equipo consiste en una prueba de arrancamiento a gran escala modificada para capturar la rigidez de la interface suelo-geosintético bajo pequeños desplazamientos. Las investigaciones realizadas con el PST han demostrado que las pruebas de arrancamiento monotónicas dirigidas a la caracterización de la interacción suelo-geosintético considerando desplazamientos bajos son prometedoras. A pesar de que estas pruebas de arrancamiento no reprodujeron la naturaleza cíclica de las condiciones de carga de tráfico, simularon los mecanismos de transferencia de la interfaz entre el suelo y los refuerzos geosintéticos que se esperan en el campo.

Se propuso un modelo analítico para predecir las características de carga-deformación confinados de sistemas-geosintéticos suelo en pequeños desplazamientos utilizando los resultados obtenidos a partir de la PST. Este enfoque tiene en cuenta tanto la rigidez confinada (J_c) y la capacidad de los geosintéticos para movilizar cizalla o de enclavamiento (τ_y), que son dos parámetros importantes para el desempeño de las interfaces de geosintéticos. Los dos parámetros se pueden combinar para definir un coeficiente único de interacción suelo-geosintético (K_{SGI}) que caracteriza la interface suelo-refuerzo. Este coeficiente se calcula como:

$$K_{SGI} = 4 \cdot \tau_y \cdot J_c \quad (11)$$

Un programa integral de monitoreo de campo está en marcha para relacionar el comportamiento en el campo de resultados de laboratorio PST para una serie de refuerzos geosintéticos. Mientras que el monitoreo de campo en curso aún está en progreso, una buena correlación se ha obtenido hasta ahora entre el comportamiento en el campo y las características que se determinan a partir de las pruebas de PST. Por lo tanto, un nuevo método de ensayo basado en el comportamiento en forma de una prueba de rigidez de arrancamiento es prometedora como una prueba basada en el desempeño para evaluar el régimen de suelo-geosintético.

Una evaluación global de las diferentes pruebas desarrolladas hasta ahora para pavimentos reforzados con geosintéticos indica que las pruebas no confinadas son simples, económicas y rápidas, a pesar de que no captan los aspectos importantes relacionados con el confinamiento y el tipo de suelo. Además, las pruebas no confinadas han proporcionado sólo las medidas de índice de los mecanismos actuales, que requieren correlaciones posteriores con desempeño en el campo. Cabe señalar que los estudios de campo han llevado a veces a las tendencias de comportamiento que contradice las tendencias obtenidas utilizando las propiedades de las pruebas no confinadas. En consecuencia, y con base en la literatura actual, las pruebas no confinadas se consideran inadecuadas para la evaluación del comportamiento de los pavimentos reforzados con geosintéticos.

Un resumen de los métodos de ensayo confinados desarrollados para la evaluación de pavimentos reforzados con geosintéticos se presenta en la Tabla 1. Las pruebas proporcionan la

element simulations conducted to calibrate the M-E approach. However, pullout test results conducted on six geosynthetics indicated that correlations between the predicted and measured values were erratic.

The bending stiffness test was developed by Sprague et al. (2004) as a small-scale index test procedure aimed at predicting the behavior of geosynthetics used for reinforcement of pavements. The test apparatus is a modified version of the multi-axial tension test for geomembranes (ASTM D 5617).

Han et al. (2008) proposed a test method involving the use of an asphalt pavement analyzer (APA) to evaluate the benefits of geosynthetic-reinforcement in the base course layer of the pavement. The APA is a multifunctional wheel-loaded test device used to quantify permanent deformation, fatigue cracking, and moisture susceptibility of both hot and cold asphalt mixes. A conventional box was modified in order to conduct the test on a geosynthetic-reinforced base course. The loaded wheel is moved back and forth on the surface of base course.

A Pullout Stiffness Test (PST) was recently developed by Gupta (2009) at the University of Texas, Austin in order to quantify the soil-geosynthetic interaction in reinforced pavements. The equipment involves a modified large-scale pullout test modified to capture the stiffness of the soil-geosynthetic interface under small displacements. Research conducted using the PST has shown that monotonic pullout tests aimed at characterizing the soil-geosynthetic interaction under low displacements are promising. Although these pullout tests did not replicate the cyclic nature of traffic load conditions, it simulated the interface transfer mechanisms between soil and geosynthetic reinforcements that are expected in the field.

An analytical model was proposed to predict the confined load-strain characteristics of soil-geosynthetic systems under small displacements using the results obtained from the PST. This approach takes into account both the confined stiffness (J_c) and ability of geosynthetic to mobilize shear or interlock (τ_y), which are two important parameters governing the performance of geosynthetic interfaces. The two parameters can be combined to define a unique coefficient of soil-geosynthetic interaction (K_{SGI}) that characterizes the soil-reinforcement interface. This coefficient is computed as:

$$K_{SGI} = 4 \cdot \tau_y \cdot J_c \quad (11)$$

A comprehensive field monitoring program is under way to relate the field performance to laboratory PST results for a number of geosynthetic reinforcements. While ongoing field monitoring is still in progress, good agreement has been obtained so far between the field performance and the properties defined from PST testing. Thus, a new performance-based test method in the form of a pullout stiffness test is promising as a performance-based test to evaluate the soil-geosynthetic confinement.

An overall assessment of the various tests developed so far for geosynthetic-reinforced pavements indicates that unconfined tests are simple, economical and expeditious, although they do not capture the important aspects associated with confinement and the type of soil. Also, unconfined tests have provided only index measures of the actual mechanisms, requiring subsequent correlations with field performance. It should be noted that field studies sometimes led to performance trends that contradicted the trends obtained using properties from unconfined tests. Accordingly, and

Tipo de ensayo/ Test type	Ensayo de placa de carga cíclica/ Cyclic plate load test	Ensayo triaxial cíclico/ Cyclic triaxial test	Ensayo de arrancamiento cíclico/ Cyclic pullout test	Ensayo de resistencia a la flexión/ Bending stiffness test	Analizador de pavimento de asfalto modificado/ Modified asphalt pavement analyzer	Ensayo de resistencia al arrancamiento/ Pullout stiffness test
Referencias/ References	Perkins (1999)	Perkins et al. (2004)	Cuelho and Perkins (2005)	Sprague et al. (2004)	Han et al. (2008)	Gupta (2009)
Tipo de carga/ Loading type	Cíclico/ Cyclic	Cíclico/ Cyclic	Cíclico/ Cyclic	Cíclico/ Cyclic	Rueda móvil/ Moving wheel	Monótona/ Monotonic
Propiedad de diseño/ Design property	TBR	M_r	G_r	BS	RRR	KSGI
Método de diseño adecuado/ Suitable design method	AASHTO	M-E	M-E	AASHTO	AASHTO	M-E
Facilidad de funcionamiento del ensayo/ Ease of running test	Difícil/ Difficult	Difícil/ Difficult	Moderado/ Moderate	Moderado/ Moderate	Fácil/ Easy	Moderado/ Moderate
Sección de control/ Control section	Si/ Yes	Si/ Yes	No/ No	Si/ Yes	Si/ Yes	No/ No
Repetibilidad de los resultados del ensayo/ Repeatability of test results	-	No/ No	No/ No	No/ No	Si/ Yes	Si/ Yes
Capacidad para distinguir entre varios geosintéticos/ Ability to distinguish among various geosynthetics	-	No/ No	No/ No	No/ No	Si/ Yes	Si/ Yes

TABLA 1. Características de los ensayos confinados. / **TABLE 1.** Features of confined tests.

cuantificación del comportamiento de la interacción suelo-geosintético, a pesar de que son más caras y consumen más tiempo que las pruebas no confinadas. Las pruebas cuantifican el compartimiento del sistema suelo-refuerzo en los términos de desviaciones reducidas (por ejemplo, *TBR*, *BS*, *RRR*) o el aumento de módulo de confinamiento (por ejemplo, M_r , G_r , *KSGI*). Los resultados de las pruebas de confinadas se consideran más apropiados como entrada en los métodos de dimensionamiento, como la AASHTO y enfoques de dimensionamiento ME. Los diversos estudios indican que los sistemas reforzados siempre mejoran con respecto a las secciones de control sin geosintéticos. Sin embargo, también se identificaron inconvenientes en varios de los enfoques de pruebas confinadas propuestas. Específicamente, estas pruebas requieren equipo especializado y, al menos en varios de los métodos propuestos, la variabilidad de los resultados de la prueba fue significativa. En general, los métodos de prueba confinados fueron considerados más representativas y adecuadas para evaluar la mejora de los refuerzos de geosintéticos en pavimentos que los métodos de pruebas no confinadas. Las principales características y ventajas de los diferentes ensayos confinados se resumen en la Tabla 1.

Basándose en esta evaluación, se puede concluir que un método de ensayo razonable debería incluir las siguientes características: (a) capacidad para capturar el mecanismo de restricción lateral; (b) dar parámetros adecuados para el diseño M-E; (c) dar buena repetibilidad en los resultados; (d) utilizar parámetros que diferencien el comportamiento de los distintos geosintéticos; (e) ser sensible en bajos desplazamientos; y (f) ser fácil de llevar a cabo. La aproximación PST fue desarrollada teniendo en cuenta estas características, y parece prometedora para el diseño de pavimentos reforzados con geosintéticos.

5. CONCLUSIONES

Resultados de estudios de campo, de laboratorio y numéricos han demostrado los beneficios del uso de geosintéticos para

based on the current body of literature, unconfined tests are considered inadequate for assessment of the performance of geosynthetic-reinforced pavements.

A summary of the confined test methods developed for the evaluation of geosynthetic-reinforced pavements is presented in Table 1. The tests provide quantification of the soil-geosynthetic interaction behavior, although they are comparatively more expensive and time consuming than unconfined tests. The tests quantify the performance of the soil-reinforcement system in the terms of reduced deflections (e.g. *TBR*, *BS*, *RRR*) or increased confinement modulus (e.g. M_r , G_r , *KSGI*). Results from confined tests are deemed more appropriate as input in design methods such as the AASHTO and M-E design approaches. The various studies indicated that reinforced systems provided improvement over control sections without geosynthetics. However, drawbacks were also identified in several of the proposed confined test approaches. Specifically, these tests require specialized equipment and, at least in several of the proposed methods, the variability of test results was significant. Overall, confined testing approaches were considered more representative and appropriate to assess the improvement of geosynthetic reinforcements in pavements than unconfined testing methods. The main characteristics and relative merits of the various confined tests are summarized in Table 1.

Based on this evaluation, it may be concluded that a reasonable test method should include the following features: (a) ability to capture the mechanism of lateral restraint; (b) provide parameter(s) suitable for M-E design; (c) provide good repeatability of test results; (d) utilize parameter(s) that distinguish between the performance of different geosynthetics; (e) be sensitive under low displacements; and (f) be easy to conduct. The PST approach was developed keeping these features in mind, and it appears promising for design of geosynthetic-reinforced pavements.

mejorar el comportamiento de los pavimentos. Sin embargo, los criterios de selección de geosintéticos a ser utilizados en pavimentos reforzados todavía no están totalmente establecidos. El propósito de este trabajo es resumir la información generada hasta el momento para cuantificar la mejora de geosintéticos utilizados como refuerzo en los proyectos de pavimento flexible.

Investigaciones anteriores han llevado a una razonablemente buena comprensión de los beneficios obtenidos con el uso de geosintéticos en el dimensionamiento de pavimentos, pero, en su mayor parte, sólo desde el punto de vista empírico. Es decir, aunque se han desarrollado métodos para el dimensionamiento de pavimentos flexibles reforzados con geosintéticos, la cuantificación de los mecanismos de refuerzo, la identificación de propiedades que rigen el comportamiento del pavimento y, por último, las directrices de dimensionamiento aceptables no se encuentran todavía disponibles.

En EE.UU. están en marcha investigaciones para desarrollar modelos de dimensionamiento en consonancia con la AASHTO. Las relaciones de TBR y BCR se han utilizado en la metodología AASHTO pero son limitadas debido a que los enfoques son específicos para los productos y condiciones de ensayo bajo las cuales estas relaciones han sido calibradas. Por lo tanto, los métodos ME se consideran más genéricos y, en consecuencia, más prometedores como marco para incorporar el uso de geosintéticos en el dimensionamiento de pavimentos. Sin embargo, debido a la naturaleza compleja de los pavimentos flexibles, la investigación para identificar y cuantificar las propiedades de ejercicio de pavimentos reforzados y su incorporación en métodos de dimensionamiento ME están todavía en curso.

La literatura disponible en relación a resultados del pruebas de campo y de laboratorio son concluyentes en que las propiedades mecánicas de los geosintéticos utilizados para pavimento se mejoran bajo el confinamiento proporcionado por el suelo. Secciones de pavimentos en pruebas de campo mostraron un mejor comportamiento en secciones reforzadas en relación al comportamiento de secciones no reforzadas en términos de reducción de deflexiones superficiales. En general, la evidencia experimental disponible indica que la mejora del comportamiento de los pavimentos reforzados con geosintéticos se puede atribuir a mecanismos de restricción lateral. Se han hecho intentos para cuantificar la restricción lateral en términos de la propiedad de rigidez de cortante de la interfaz del sistema suelo-geosintético.

Una serie de pruebas de laboratorio confinadas se han desarrollado recientemente con el objetivo de cuantificar la rigidez al corte de la interfaz de sistema suelo-geosintético. Varias de estas pruebas han aplicado cargas cíclicas para el sistema suelo-geosintético en un intento de simular la naturaleza dinámica de la carga de tráfico inducida. Sin embargo, probablemente debido al hecho de que las mediciones son sensibles a pequeños cambios en los desplazamientos, los métodos actualmente disponibles han resultado en una dispersión significativa en los resultados. Consecuentemente, una investigación en curso se centra en pruebas confinadas considerando desplazamientos bajos. Estas pruebas cuantifican la rigidez de arrancamiento sobre cargas monótonas, y parecen prometedoras para cuantificar los mecanismos pertinentes para el dimensionamiento de pavimentos reforzados.

En general, se puede concluir que avances significativos se han hecho en el área de refuerzo de pavimentos utilizando geosintéticos. Mientras que el estado de la práctica está mejorando rápidamente, todavía se necesitan más investigaciones para proporcionar una mejor base teórica a los enfoques de dimensionamiento empíricos disponibles en la actualidad.

5. CONCLUSIONS

The results of field, laboratory and numerical studies have demonstrated the benefits of using geosynthetics to improve the performance of pavements. However, selection criteria for geosynthetics to be used in reinforced pavements are not well established yet. The purpose of this paper was to summarize information generated so far to quantify the improvement of geosynthetics when used as reinforcement in flexible pavement projects.

Previous research has led to a reasonably good understanding of the benefits achieved with the use of geosynthetics in pavement design but, for the most part, only from the empirical point of view. That is, while methods have been developed for designing geosynthetic-reinforced flexible pavements, quantification of the reinforcement mechanisms, identification of properties governing the pavement performance and, ultimately, acceptable design guidelines are yet unavailable.

Efforts are currently under way in the US to develop design models consistent with the AASHTO and M-E approaches. The TBR and BCR ratios have been used in the AASHTO approach but are limited because the approaches are specific to the products and test conditions under which these ratios have been calibrated. Thus, M-E methods are considered more generic and, consequently, more promising as framework to incorporate the use of geosynthetics in current pavement design. However, due to the complex nature of flexible pavements, research to identify and quantify the properties governing the performance of reinforced pavements and its incorporation into M-E design is still under way.

The available literature involving field and laboratory test results is conclusive in that the mechanical properties of the geosynthetics used for pavement applications are improved under the confinement provided by the soil. Field test sections showed improved performance in the reinforced sections over the unreinforced sections in terms of reduced surface deflections. Overall, available experimental evidence indicates that the improved performance of geosynthetic-reinforced pavements can be attributed to lateral restraint mechanisms. Attempts have been made to quantify the lateral restraint in terms of the interface shear stiffness property of the soil-geosynthetic system.

A number of confined laboratory tests have been recently developed with the objective of quantifying the interface shear stiffness of the soil-geosynthetic system. Several of these tests have applied cyclic loads to the soil-geosynthetic system in an attempt to simulate the dynamic nature of traffic-induced loading. However, probably due to the fact that measurements are sensitive to small changes in displacements, currently available methods have resulted in significant scatter in test results. This has compromised the repeatability of the approaches and has made it difficult to differentiate the performance among different geosynthetics. Ongoing research focusing on confined testing under low displacements using monotonic loading pullout stiffness test appears promising to quantify relevant mechanisms in pavement reinforcement design.

Overall, it may be concluded that significant advances have been made in the area of geosynthetic reinforcement of pavements. While the state of practice is rapidly improving, further research is still needed to provide a better theoretical basis to the currently available empirical design approaches.

6. REFERENCIAS / 6. REFERENCES

- Al-Qadi, I.L., Brandon, T.L., Valentine, R.J., Lacina, B.A. and Smith, T.E. 1994. Laboratory evaluation of geosynthetic-reinforced pavement sections. *Transportation Research Record*, Volume 1439, pp. 647-662.
- Al-Qadi, I.L. 2006. Pavement interlayer system mechanisms: separation reinforcement and reflective cracking control. Lecture, Chinese Soc. of Pavement Engineering, Taipei, Taiwan, June 2, 2006.
- Al-Qadi, I.L., Dessouky, S.H., Kwon J. and Tutumluer, E. 2008. Geogrids in flexible pavements: validated mechanisms. *Journal of the Transportation Research Board*, No. 2045, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2008. pp. 102-109.
- American Association of State Highway and Transportation Officials 1993. AASHTO Guide for design of pavement structures. Washington, DC, USA.
- Anderson, P. and Killeavy, M. 1989. Geotextiles and Geogrids: cost effective alternate materials for pavement design and construction. Proc. of *Geosynthetics '89*, IFAI, Vol. 2, Sand Diego, USA, pp. 353-360.
- Barker, W.R. 1987. Open-Graded based for airfield pavements. Technical report GL-87-16, U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, USA, 76p.
- Barksdale, R.D., Brown, S.F. and Chan, F. 1989. Potential benefits of geosynthetics in flexible pavement system. National Cooperative Highway Research Program, Report No. 315, Transportation Research Board, Nation Research Council, Washington, DC.
- Bay, J.A., and Stokoe, K.H. 1998. Development of a Rolling Dynamic Deflectometer for continuous deflection measurements of pavements. Center of Transportation Research, Report 1422-3F, Univ. of Texas, Austin, TX.
- Bender, D.A. and Barnberg, E.J. 1978. Design of soil-fabric-aggregate systems. *Transportation Research Record 671*, pp. 64-75.
- Benjamin, C.V.S., Bueno, B., Zornberg, J.G. 2007. Field monitoring evaluation of geotextile-reinforced soil retaining walls. *Geosynthetics International*, April, Vol. 14, No. 1.
- Berg, R.R., Christopher, B.R. and Perkins, S.W. 2000. Geosynthetic reinforcement of the aggregate base/subbase courses of flexible pavement structures-GMA white paper II. Geosynthetic Materials Association, Roseville, MN, USA, 176p.
- Bray, J.D. and Merry, S.M. 1999. A comparison of the response of geosynthetics in the multi-axial and uniaxial test devices. *Geosynthetics International*, Vol.6, No. 1, pp. 19-40.
- Brown, S.F., Jones, C.P.D. and Brodrick, B.V. 1982. Use of Non-Woven fabrics in permanent road pavements. Proc. of the *Institution of Civil Engineers*, part 2, Vol. 73, pp. 541-563.
- Bueno, B.S., Benjamim, C.V., and Zornberg, J.G. 2005. Field performance of a full-scale retaining wall reinforced with non-woven geotextiles. Slopes and Retaining Structures under Seismic and Static Conditions, ASCE GSP No. 140, January 2005, Austin, Texas (CD-ROM).
- Cancelli, A., Montanelli, F., Rimoldi, P. and Zhao, A. 1996. Full scale laboratory testing on Geosynthetic-reinforced paved roads. Earth Reinforcement, Proc. of the Intl. Symposium on Earth Reinforcement, Fukuoka, Kyushu, Japan, November 1996, pp. 573-578.
- 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*, Vol. 3, No. 4, pp. 537-549.
- Cuelho, E.L. and Perkins, S.W. 2005. Resilient interface shear modulus from short-strip cyclic pullout tests. GSP-140, Slopes and retaining structures under seismic and static conditions, Geofrontiers, Austin, TX.
- Dougan, Charles 2007. Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: project level pavement management. Lecture Session 1a: PMS to support New MEPDG Norfolk, VA, May 7, 2007.
- Elias, V., Zehong, Y., Swan, R.H. and Bachus, R.C. 1998. Development of protocols for confined extension and creep testing of geosynthetics for highway applications. FHWA-RD-97-143, Final report, 201 p.
- Giroud, J.P., Ah-Line, C., and Bonaparte, R. 1984. Design of unpaved roads and trafficked areas with geogrids. Polymer Grid Reinforcement, A conference sponsored by SERC and Netlon, Ltd., Thomas Telford, London, England, pp. 116-127.
- Giroud, J.P. and Noiray, L. 1981. Geotextile-reinforced unpaved roads. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, American Soc. of Civil Engineers, Vol. 107, No GT9, pp. 1233-1254.
- Gupta, R. 2009. A study of geosynthetic reinforced flexible pavement system. Ph.D. Dissertation, Univ. of Texas at Austin, Texas, USA.
- Halliday, A.R. and Potter, J.F. 1984. The performance of a flexible pavement constructed on a strong fabric. Transport and Road Research Laboratory, Report 1123, Crowthorne, Berkshire, UK, 15p.
- Han, J., Zhang, Y., and Parsons, R.L. 2008. Development of a performance-based laboratory test method for evaluating geosynthetic-soil confinement. Geosynthetics Committee (AFS70) TRB 2008 Annual meeting, Washington DC.
- Haas R., Walls, J. and Carroll, R.G. 1988. Geogrid reinforcement of granular bases in flexible pavements. *Transportation Research Record 1188*, Washington DC, pp. 19-27.
- Holtz, R.D, Christopher, B.R. and Berg, R.R. 1998. Geosynthetic design and construction guidelines. Federal Highway Administration, Washington, DC, FHWA-HI-98-038, 460 p.
- Hsieh, C. and Mao, L. 2005. A bench-scale performance test for evaluation of the geosynthetic reinforcement effects on granular base courses. GRI-18 Geosynthetics Research and Development in Progress, Geofrontiers, Austin, TX.
- Kinney, T.C. and Yuan, X. 1995. Geogrid aperture rigidity by in-plane rotation. Proc. of Geosynthetics 1995, pp 525-537.
- Kupec, J. and McGown, A. 2004. The load-strain behavior of biaxial geogrids. Proc. of 3rd Asian Regional Conference on Geosynthetics, Seoul, South Korea, pp. 349-356.
- McGown, A., Kupec, J. Heerten, G. and Maubeuge K. von. 2005. Testing biaxial geogrids for specification and design purposes. *GRI-18 Geosynthetics research and development in progress*, ASCE, Austin, Texas.
- Miura, N., Sakai, A., Taesiri, Y., Yamanouchi, T. and Yasuhara, K. 1990. Polymer grid reinforced pavement on soft clay grounds. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 9, No. 1, pp. 99-123.

- Moghaddas-Nejad, F. and Small, J.C. 1996. Effect of geogrid reinforcement in model track tests on pavements. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 122, No. 6, pp. 468-474.
- Muench, S. 2006. <http://pavementinteractive.org/>
- NCHRP 2004. NCHRP Project 1-37A, Guide for Mechanistic-Empirical Design of new and rehabilitated pavement structure. Washington, D.C.
- NCHRP 2000. NCHRP Project 1-28A, Harmonized Test Methods for Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design, Volume 1. Unbound Granular Material, 198p.
- Olidis, C. and Hein, D. 2004. Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures: Material Characterization. Annual Conference of the Transportation Association of Canada, Quebec City, Quebec.
- Perkins, S.W. and Ismeik, M. 1997a. A Synthesis and Evaluation of Geosynthetic-reinforced Base Course Layers in Flexible Pavements: Part I Experimental Work. *Geosynthetics International*, Vol. 4, No. 6, pp. 549-604.
- Perkins, S.W. and Ismeik, M. 1997b. A Synthesis and Evaluation of Geosynthetic-reinforced Base Course Layers in Flexible Pavements: Part II Analytical Work. *Geosynthetics International*, Vol. 4, No. 6, pp. 605-621.
- Perkins, S.W. 1999. Mechanical Response of Geosynthetic-Reinforced Flexible pavements. *Geosynthetics International*, Vol. 6, No. 5, pp. 347-382.
- Perkins, S.W. 2002. Evaluation of geosynthetic-reinforced flexible pavement systems using two pavement test facilities. Final report, FHWA/MT-02-008/20040, Federal Highway Administration, Washington DC, 120p.
- Perkins, S.W. and Cortez, E.R. 2005. Evaluation of base-reinforced pavements using a heavy vehicle simulator. *Geosynthetic International*, Vol. 12, No.2, pp. 86-98.
- Reck, N.C. 2009. Mechanistic empirical design of geogrid reinforced paved flexible pavements. Jubilee symposium on Polymer Grid Reinforcement, Institute of Civil Engineers, London, England.
- Shukla, S.K. 2002. Geosynthetics and their application. 1st edition, Thomas Telford Ltd., 425 p.
- Sprague, C.J, Lothspeich, S., Chuck, F., and Goodman, R. 2004. Geogrid reinforcement of road base aggregate-measuring the confinement benefit. Proc. of Geo-Trans 2004 Conference, Los Angeles, 2004, 996 -1005.
- TRI 2001. In-plane rotational stiffness: Is this a relevant property for base reinforcement of geosynthetics? Internal report available at www.tri-env.com.
- Watts, G.R.A., and Blackman, D.I. 2009. Pavement trafficking trials. Jubilee symposium on Polymer Grid Reinforcement, Institute of Civil Engineers, London, England.
- 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. Technical report GL-93-6, U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, USA, 86p.
- WDOT 2007. Design Parameters for flexible pavements http://training.ce.washington.edu/wsdot/modulues/04_design_parameters
- Yoder, E.J., and Witczak, M.W. 1975. Principles of pavement design, 2nd edition, John Wiley and Sons, 711p.
- Yuan, Z. 2005. Theoretical analysis of bending stiffness test on geosynthetic-reinforced base layer. Proc. of NAGS/GRI-19 Cooperative Conference, Dec.14-16, Las Vegas, Nevada, 2005.
- Zornberg, J.G. and Gupta, R. (2009). "Reinforcement of Pavements over Expansive Clay Subgrades." Proc. of the *Seventeenth Int. Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Alexandria, Egypt, 5-9 October, pp. 765- 768.
- Zornberg, J.G., and Gupta, R. (2010). "Geosynthetics in Pavements: North American Contributions." Theme Speaker Lecture, Proceedings of the *9th Int. Conference on Geosynthetics*, Guarujá, Brazil, May, Vol. 1, pp. 379-400.