

La geomalla como elemento de refuerzo en pavimentos flexibles

Vargas Jiménez J.¹, Moncayo Theurer M.², Córdova Rizo J.³, Maza C.⁴, Barzola Zambrano I.⁴, Velasco Cevallos G.⁴, Salcedo I.⁵, Guzhñay J.⁵, Lucio S.⁵

Fecha de recepción: 03 de marzo de 2017 – Fecha de aprobación: 31 de mayo de 2017

RESUMEN

La geomalla se ha utilizado con el fin de reforzar y mejorar el comportamiento del pavimento. Recientes investigaciones se han llevado a fin de determinar las propiedades de las geomallas utilizándolas como elemento de refuerzo estructural en carreteras y taludes. Este trabajo resume las características de este material, sus ventajas al instalarse en un pavimento, los tipos de geomalla, las pruebas a realizarse y los métodos de diseño de pavimento que se utilizan para definir pavimentos reforzados con geomalla.

Palabras Claves: Geomalla, estructura de pavimento, disipación de esfuerzos, refuerzo de pavimento flexible.

The geogrid as a reinforcement element in flexible pavements

The geogrid has been used in order to reinforce and improve the behavior of the pavement. Recent research has been carried out to determine the properties of geogrids using them as a structural reinforcement element in roads and slopes. This paper summarizes the characteristics of this material, its advantages when installed in a pavement, the types of geogrid, the tests to be performed and the pavement design methods used to define pavements reinforced with geogrid.

Keywords: Geogrid, pavement structure, stress dissipation, flexible pavement reinforcement.

¹ Investigador de la Universidad de Guayaquil, Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas, Guayaquil-Ecuador.

² Investigador de la Universidad de Guayaquil, Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas, Guayaquil-Ecuador. Profesor de la Academia de Guerra Naval (AGUENA)
Profesor de la Universidad Estatal de Santa Elena, Facultad de ciencias de la Ingeniería.
Autor de correspondencia: solugran@gmail.com.

³ Vice - Decano de la Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas de la Universidad de Guayaquil.

⁴ Estudiante investigador.

⁵ Investigador.

Nota: Este artículo de investigación es parte de Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 21, No. 1, 2017, ISSN 2448-8364.

INTRODUCCION

Las carreteras están sometidas a importantes cargas dinámicas debido a la circulación de los vehículos, cargas que provocan la aparición de grietas que, junto con el agua, aceleran el proceso de deterioro de la estructura del pavimento flexible.

La existencia de grietas interrumpe la transmisión de las fuerzas transversales inducidas por la acción del tráfico, disminuyendo las propiedades mecánicas de las capas que la conforman. Tradicionalmente el procedimiento que se emplea para solucionar este problema es el tendido de una nueva capa de asfalto, sin embargo, la experiencia ha demostrado que, con el paso del tiempo, si las condiciones del tráfico no varían o disminuyen, las fisuras aparecen nuevamente en la nueva capa.

Para intentar retrasar este fenómeno, se han empleado carpetas de rodadura con espesores mayores, lo cual representa una solución antieconómica y poco práctica, ya que la transmisión de esfuerzos cortantes entre ambas capas es mínima, debido principalmente a la discontinuidad entre estas, lo que en algunos casos puede provocar deslizamientos entre la capa superior e inferior.

El deterioro en el pavimento se produce, entre otras razones debido a la aplicación reiterada de las cargas de tráfico, llamado efecto dinámico, este proceso puede originar una falla estructural del pavimento deteriorándolo de manera acelerada. Las cargas ambientales son inducidas por las condiciones climáticas, como las variaciones en la temperatura o la humedad en la sub-rasante, que también pueden causar 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. El uso de suelos con un exceso de finos especialmente los considerados plásticos, puede ocasionar un rápido deterioro del pavimento. Además, el deterioro del pavimento también se provoca por falta de mantenimiento (Yoder y Witczak 1975).

Uno de los mantenimientos más necesarios es el sellado de las grietas y la limpieza de canales y bordillos, para evitar que la presencia de la humedad deteriore los materiales. Una manera alternativa y moderna de reducir el deterioro del asfalto es el uso geomallas. (Zornberg y Gupta,2010).

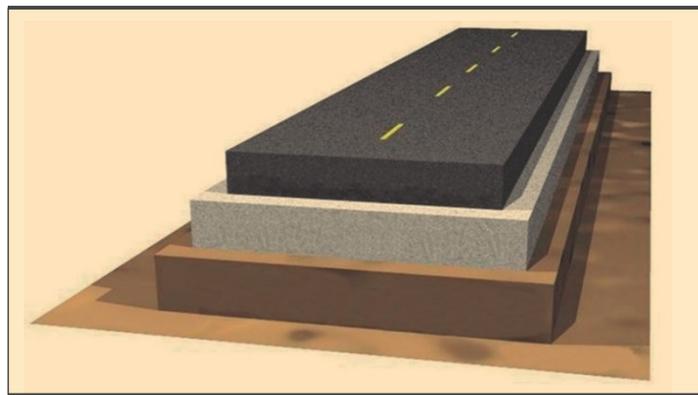


Figura 1. Sección transversal de un pavimento flexible (Muench 2006).

GEOMALLAS EN EL DIMENSIONAMIENTO DEL TERRENO

La geomalla es un elemento que se puede insertar en la estructura de pavimento, para mejorar sus condiciones de servicio como las siguientes: Evita la mezcla y contaminación de materiales, favorece el drenaje lateral, evita la fuga de los finos, refuerza estructuralmente el pavimento.

Con este elemento se logra la separación de diferentes tipos de capa, para que los materiales

instalados al sufrir diferentes procesos de humidificación, no se mezclen y de esa manera proteger las capas de base o sub-base. Además, se utilizan dentro de la estructura de un pavimentos flexible como refuerzo.

Dependiendo del caso y del proyectista la geomalla puede colocarse en varios sitios dentro de la estructura de pavimento como, por ejemplo: Entre las capas de Base y Sub-base o entre las capas de Sub-base y Sub-rasante.



Figura 2. Instalación de geomallas en carretera.

El efecto positivo de la instalación de geomalla sobre el comportamiento del pavimento se debe a tres mecanismos: La restricción lateral, el aumento de la capacidad de soporte y el efecto de membrana tensionada. (Giroud y Noiray 1981, Giroud et al 1984, Perkins. y Ismeik 1997, Holtz y cols. 1998).

RESTRICCIÓN LATERAL

El principal mecanismo asociado con la función de refuerzo para pavimentos flexibles es la restricción lateral. (Bender y Barenberg 1978). Este mecanismo se desarrolla por la fricción entre la interfaz de la geomalla y el suelo, por lo tanto, el mecanismo es de resistencia al esfuerzo cortante. (Perkins 1999)

Cuando una capa de suelo es sometida a cargas de tráfico, el suelo bajo la carga tiende a moverse lateralmente, la presencia de la geomalla impide este proceso lo que es favorable para la estructura de pavimento.

AUMENTO EN LA CAPACIDAD DE SOPORTE

Las cargas superficiales transmiten esfuerzos a la carpeta asfáltica, a la base y demás capas inferiores. La rigidez que aporta la geomalla limita las deformaciones en la capa de base, generando un tipo de confinamiento, lo que aumenta su resistencia al esfuerzo cortante. En la interfase base-geomalla también se produce fricción lo que contribuye a este mecanismo.

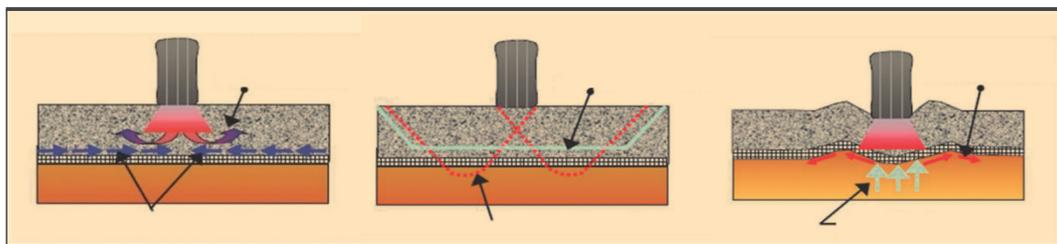
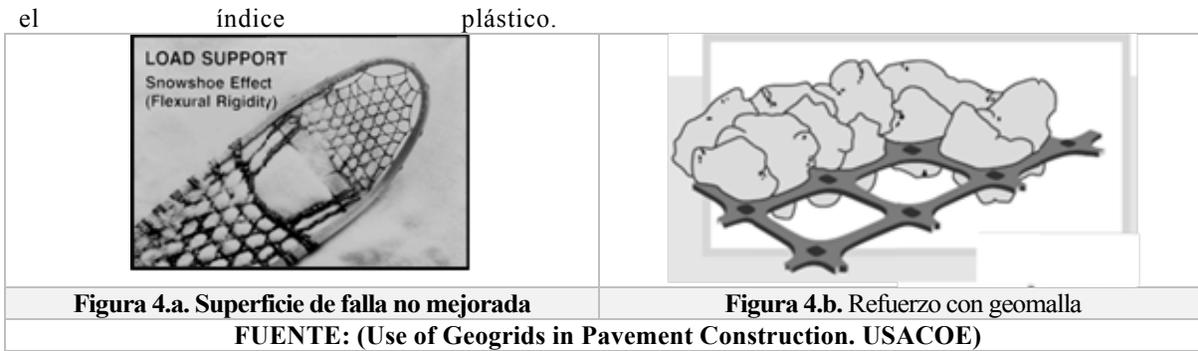


Figura 3. Los mecanismos de refuerzo inducido por las geomallas (Holtz *et al* 1998.): (A) Confinamiento lateral, (b) Aumento de la capacidad soporte, y (c) efecto membrana.

La geomalla y el tamaño del material de la capa de base deben estar correlacionados para que el elemento desarrolle su mayor beneficio, si esta alcanza buena capacidad de fricción, también puede proporcionar resistencia a la tracción para el movimiento lateral de los suelos.

MEJORAMIENTO DEL TERRENO

La geomalla permite distribuir las cargas aplicadas de mejor manera, logrando que los componentes de esfuerzos cortantes y verticales se disipen antes de llegar al terreno natural. Evitando que se produzca el efecto de zapato de nieve (Figura 4.a), donde se producen importantes hundimientos con poco esfuerzo y que normalmente ocurre al estar en presencia de un suelo blando o que tenga alto



METODOS PARA DIMENSIONAR PAVIMENTOS FLEXIBLES

Los orígenes de la construcción y planeamiento de pavimentos flexibles se remonta a la época del imperio Romano, ha evolucionado hasta nuestros días con el uso de ábacos y técnicas de ultimas generación. El dimensionamiento está basado en el principio de construir un conjunto de capas, llamadas estructura del pavimento, que sirvan como una capa protectora de la sub-rasante, esta capa protectora mejora la capacidad portante del sitio y permite que se soporte el tráfico, las cargas dinámicas y los factores ambientales.

En la época de la gran depresión, en los Estados Unidos, es decir la década de años 30, se planteó y tuvo mucha acogida la creación del parámetro CBR (California Bearing Ratio), al cual hoy en día se lo considera uno de los ensayos básicos que de acuerdo a la norma deben de hacerse sobre el suelo donde se está instalando el asfalto.

A fines de los años 60, la American Association of State Highway and Transportantion Officials (AASHTO), propuso un método para el dimensionamiento de los pavimentos llamado Covered Based Design Method, luego en los años 70, fue propuesto

por unos investigadores de Sudáfrica, el método de dimensionamiento lineal empírico mecanicista.

En los 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 donde se analizan parámetros característicos de los materiales de suelo y donde se utilizan análisis más sofisticados, como por ejemplo la aplicación del método de los elementos finitos no lineales.

MÉTODO AASHTO

El dimensionamiento de Pavimentos propuesto por la AASHTO es uno de los métodos más utilizados en el mundo. El método AASHTO considera el pavimento como un sistema elástico de multicapa 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” determina si el pavimento soporta las cargas de tráfico previstas y si experimentará una pérdida en su capacidad a lo largo de su servicio. El “SN” se determina usando un nomograma que resuelve en la ecuación contenida en la figura 5.

$$\begin{aligned}
 \log_{10}(ESAL) &= Z_R S_o + 9,361 \log_{10}(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right]}{0,40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} \\
 &+ 2,321 \log_{10} M_R - 8,07
 \end{aligned}$$

Desviación estándar normal (pointing to Z_R)
Desviación estándar global (pointing to S_o)
Número estructural (pointing to SN)
Ejes equivalentes (pointing to $ESAL$)
Módulo de resiliencia (pointing to M_R)

Figura 5. Ecuación para calcular el Numero Estructural “SN”

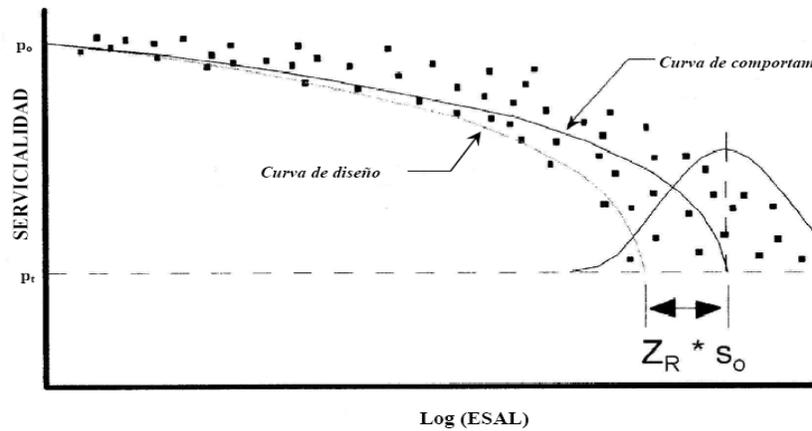


Figura 6. Gráfico de Serviciabilidad vs. ESAL.
Fuente: Guía para pavimentos flexibles de la AASHTO

Tabla 1. Valores de la normal, Z_R , correspondientes a los niveles de confiabilidad, R

Confiabilidad, R, en porcentaje	Desviación estándar normal, Z_R
50	-0,000
60	-0,253
70	-0,524
75	-0,674
80	-0,841
85	-1,037
90	-1,282
91	-1,340
92	-1,405
93	-1,476
94	-1,555
95	-1,645
96	-1,751
97	-1,881
98	-2,054
99	-2,327
99,9	-3,090
99,99	-3,750

Fuente: Guía para pavimentos flexibles de la AASHTO

Tabla 2. Valores de Nivel de confiabilidad R recomendados

Clasificación funcional	Nivel de confiabilidad, R, recomendado	
	Urbana	Rural
Interestatales y vías rápidas	85 - 99,9	80 - 99,9
Arterias principales	80 - 99	75 - 95
Colectoras	80 - 95	75 - 95
Locales	50 - 80	50 - 80

Fuente: Guía para pavimentos flexibles de la AASHTO

El modelo de ecuación de diseño está basado en la pérdida del índice de serviciabilidad (ΔPSI) durante la vida útil del pavimento, siendo éste un parámetro que representa el estado de la de la superficie de rodadura (Ver Figura 5).

La confiabilidad en el diseño (R) puede ser definida como la probabilidad de que la estructura tenga un comportamiento igual o mejor que lo previsto en el diseño (Ver tabla 1

y 2). Cada valor de R está asociado estadísticamente a un valor del coeficiente de (Z_R) que es la desviación estándar del modelo. A su vez, Z_R determina, en conjunto con el factor "So", un factor de confiabilidad.

El método 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.

METODO EMPIRICO

Se desarrolló una guía para un dimensionamiento de pavimentos nuevos y dañados. El método empírico intenta mejorar la fiabilidad del dimensionamiento, reducir los costos del ciclo de vida, mejorar la caracterización de los efectos del drenaje - humedad y evitar fallas prematuras. (Olidis y Hein 2004).

El método empírico involucra la componente mecanicista y utilizan parámetros de entrada relacionados con las capas del pavimento, el tráfico, las condiciones climáticas y los materiales.

Para dimensionar el pavimento se ejecuta el procedimiento y su resultado es comparado con la hipótesis original, si el resultado no corresponde a los criterios originales de arranque, de manera iterativa debe volverse a calcular modificando la estructura hasta llegar a la solución óptima.

Los principales parámetros utilizados en el método empírico son las propiedades mecánicas de cada capa de pavimento como son: El coeficiente de poisson y el módulo de resistencia.

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE PAVIMENTOS REFORZADOS CON GEOMALLAS

La evaluación del desempeño de los pavimentos reforzados con geomalla se la realiza de diferentes formas, como son las siguientes: Pruebas de Campo a gran escala, Pruebas de Laboratorio y Simulaciones Numéricas.

PRUEBAS DE CAMPO

En las pruebas de campo se realizan tanto en calles como en carreteras en servicio. La metodología de dimensionamiento se ha desarrollado recientemente y requiere datos de los materiales a colocar en la estructura para realizar la validación y calibración (Watts y Blackman 2009).

El monitoreo de las carreteras es un proceso que conlleva bastante tiempo, por ello se generó un sistema de ensayos acelerados de pavimentos o (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 ejecutan repetidamente sobre la superficie de la pista de ensayo. El Sistema APT puede proporcionar una buena aproximación de los esfuerzos y el comportamiento de un pavimento en servicio, además se lo puede utilizar para estimar las condiciones de un pavimento bajo condiciones severas.

En pruebas de campo de pavimentos flexibles se acostumbra a recoger datos como: Las deformaciones en la superficie y el agrietamiento longitudinal, transversal y a la fatiga. La deformación superficial es el criterio de desempeño más importante para pavimentos reforzados y sin reforzar.

El deterioro es evaluado midiendo las deflexiones superficiales existentes en términos de profundidad de ahuellamiento que se produce debido al desarrollo de deformaciones permanentes en cualquiera de las capas del pavimento. El ahuellamiento horizontal se mide en metros cuadrados, es una medida superficial y fácil de tomar.

Las mediciones de deformación también se la puede realizar con ensayos no destructivos (NDT), para esto se utiliza deflectómetro de impacto (FWD), con el cual se miden las deformaciones en el pavimento. Esta metodología se aplica, trasladando un remolque al sitio que se desea estudiar donde se aplican una serie de impulsos en el pavimento con una placa de carga que se baja hidráulicamente hasta la superficie del pavimento, y luego se deja caer un peso desde una altura conocida.

La magnitud de la carga se mide usando una célula de carga, mientras las deformaciones se miden utilizando siete transductores y un equipo conocido como deflectómetro dinámico de balanceo (RDD), este aparato se desarrolló para evaluar las condiciones de los pavimentos y la determinación de perfiles de deflexión del pavimento continuo (Bay y Stokoe 1998).

La capacidad de realizar mediciones continuas hace del RDD un método más eficaz. El equipo aplica fuerzas sinusoidales al pavimento y mide las deflexiones resultantes a través de sensores.

Las pruebas de campo en los tramos de carretera a gran escala se han realizado para

evaluar el efecto del refuerzo con geomallas, para sistemas de pavimentos flexibles (Perkins y Ismeik 1997). Una serie de pruebas realizadas a pavimentos al aire libre y bajo techo son desarrolladas en Brown et. al 1982, Barksdale et al. 1989, Collin et al. 1996, Moghaddas-Nejad y Pequeñas 1996. Otras propuestas como pruebas al aire libre con una sola rueda en movimiento (Barker 1987, Webster 1993), y pruebas con un camión de doble rueda con dos se presentan en Halliday y Potter 1984.

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 geomallas. El objetivo principal de las pruebas de laboratorio ha sido cuantificar los mecanismos de interacción suelo-geomalla en los sistemas de pavimento flexible ya sea mediante la medición de las propiedades de la geomalla o mediante la reproducción de las condiciones de campo.

Las pruebas se agrupan en dos categorías principales: pruebas confinadas y no confinadas. En la primera, las propiedades de la geomalla se miden incluyendo el confinamiento de suelo.

Para medir la resistencia a la tracción de los materiales con geomallas se llevan a cabo pruebas 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 geomalla estrecho. En su lugar, el ensayo de tracción en probeta ancha (D4595) se ha utilizado en aplicaciones de dimensionamiento.

Las pruebas no confinadas son simples, económicas y rápidas, a pesar de que no captan los aspectos importantes relacionados con el confinamiento por lo que no son suficientes para proyectar el comportamiento del pavimento y luego requieren correlaciones posteriores para extrapolarla a condiciones de desempeño de campo. Se ha probado que en un gran número de ocasiones los resultados de campo no concuerdan con los resultados de pruebas no confinadas por lo que las pruebas no confinadas se consideran inadecuadas para la evaluación del comportamiento de los

pavimentos reforzados con geomallas.

Los resultados de las pruebas confinadas se consideran más apropiados como entrada en los métodos de dimensionamiento, como la AASHTO.

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES A UTILIZAR

Si el esfuerzo de tensión horizontal es excesivo pueden resultar grietas en la capa de rodadura. Si la fuerza vertical de compresión es excesiva resultarán deformaciones permanentes en la estructura del pavimento. Una excesiva deformación de las capas solamente puede ser controlada por las propiedades de los materiales. Todos los materiales están caracterizados por el módulo de elasticidad, llamado módulo dinámico para el caso de las mezclas asfálticas, y módulo de resiliencia para los materiales granulares sin tratar y los materiales de suelos.

Para simular los efectos de la temperatura y sus cambios a través del año, se utilizan tres distribuciones típicas del promedio mensual de temperatura que a su vez representan tres regiones típicas, donde los cambios de temperatura son significativos dependiendo de las estaciones del año. El módulo dinámico es función directa del tiempo de fraguado y un período de seis meses es utilizado para la elaboración de las tablas de diseño.

Las geomallas pueden ser de hilos de poliéster, nylon o bien fibra de vidrio de alta densidad, fabricados con polietileno de alta densidad y polipropileno, formadas por una red regular de elementos de tracción conectados en forma integral, con aberturas, uniones y costillas lo suficientemente grandes como para permitir una traba mecánica entre el suelo y el material circundantes, funcionando principalmente como refuerzo, agregando resistencia, reduciendo las deformaciones y aumentando la capacidad soporte.

DIFERENTES APLICACIONES DE LA GEOMALLA

El movimiento de tierra es cada vez más costoso, las cargas de vehículos y otras han ido en aumento al crecer la población, es por ello que es necesario utilizar materiales de última generación que incrementen las capacidades del material y mejoran el proceso constructivo.

La geomalla puede utilizarse en diferentes tipos de obra de ingeniería como son:

Mejoramiento de caminos, Reforzamiento de taludes, y reforzamiento y mejoramiento de cimentaciones.

Tabla 3. Propiedades de la Geomalla - Fuente: evi.com (2010)

Propiedades mecánicas		Método de prueba	UNIDAD	BX1515PP	BX2020PP	BX2525PP	BX3030PP	BX4040PP
Resistencia a la tensión última (1)	DM	ASTM 6637	kN/m	17.7	24.8	28.7	33.2	39.5
	DC	ASTM 6637	kN/m	15.2	19.4	26.0	31.1	38.9
Resistencia última (2)	DM	ASTM 6637	%	11.9	8.6	15.7	14.4	18.8
	DC	ASTM 6637	%	7.8	8	9.8	6.9	9.9
Resistencia a la tensión al 2% (1)	DM	ASTM 6637	kN/m	6.3	11.1	9.5	11.9	13.9
	DC	ASTM 6637	kN/m	6.6	8.5	10.9	14.2	14.6
Resistencia a la tensión al 5% (1)	DM	ASTM 6637	kN/m	12.3	20.7	19.5	22.7	28.1
	DC	ASTM 6637	kN/m	12.4	16.0	20.1	26.7	28.8
Resistencia en el ensamble (2)	DM	GRI-GG2	kN/m	17.9	26.0	27.6	31.3	37.1
	DC	GRI-GG2	kN/m	15.6	19.9	23.6	29.0	35.7

Propiedades Físicas		UNIDAD	BX1515PP	BX2020PP	BX2525PP	BX3030PP	BX4040PP
Tamaño de Apertura DM (2)	Nominal	mm	49	43.7	37.9	41.4	38.7
Tamaño de Apertura DC (2)	Nominal	mm	40.4	41.9	37.6	38.9	40.5
Ancho del rollo (1)	Mínimo	m	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9
Largo del rollo (1, 2)	Mínimo	m	50	50	50	50	50
Peso estimado del rollo (2)		kg/lbs	44 kg/97lbs	53 kg/117lbs	50 kg/130lbs	77 kg/169lbs	107 kg/235lbs

TIPOS DE GEOMALLAS Y SUS CARACTERÍSTICAS

La geomalla puede ser constituida de hilos de poliéster, nylon o fibra de vidrio de alta tenacidad, también puede estar compuestos de polietileno, polipropileno y fibra de vidrio para casos especiales, se la puede conceptualizar como una red regular de elementos conectados, con una geometría de apertura suficiente para provocar una traba mecánica con el suelo y agregados. El porcentaje del área abierta debe estar entre cincuenta a ochenta por ciento, según recomendación del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos.

Las mallas de polietileno y de polipropileno, deben someterse a tratamientos antioxidantes para estabilizarlos para mejorar su durabilidad.

GEOMALLA UNIAXIAL

La geomalla uniaxial tiene su estructura completamente alineada en una única dirección, contando con juntas transversales, este tipo de elemento se utiliza cuando se conoce la dirección de aplicación de la carga.

GEOMALLA BIAXIAL

La geomalla biaxial tiene su estructura reforzada en ambas direcciones lo que permite que la redistribución de esfuerzo sea más eficiente. Se utilizan en casos de presentarse altas cargas, a corto plazo o cargas moderadas durante períodos prolongados de tiempo, además no importa la dirección de instalación

ya que funciona en ambas direcciones. Principalmente se fabrican de polipropileno, son química y biológicamente inertes y son resistentes a procesos degenerativos de los suelos.

CONCLUSIONES:

En obras viales se requiere que la estructura de pavimento tenga la capacidad de receptor las cargas dinámicas aplicadas y que cumpla con su vida útil, para ello se utilizan varios métodos de diseño que principalmente se basan en dar espesor a las capas que constituyen la estructura de pavimento.

Que las cargas superficiales de tráfico se convierten en esfuerzos en las capas interiores del pavimento y que estos deben de ser asimilados por la estructura. La geomalla es un elemento de última generación, ya que con un entramado de plástico se logra varios beneficios para la estructura de pavimento.

La geomalla genera una frontera que no permite la mezcla de las capas adyacentes de material en un pavimento, aumentando su vida útil, además logra disipar de mejor forma los esfuerzos provocados por las cargas superficiales, repartiendo el mismo en un área mayor y también la geomalla provee de una capacidad de resistencia que se suma a la capacidad del suelo. Las pruebas más recomendables en pavimentos con geomalla con las llamadas confinadas.

REFERENCIAS

Al-Qadi, I.L., Dessouky, S.H., Kwon J. and Tutumluer, E. 2008. Geogrids in flexible pavements: 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.

Bray, J.D. and Merry, S.M. 1999. A comparison of the response in the multi-axial and uniaxial test devices. Geosynthetics International, Vol.6, No. 1, pp. 19-40.

Perkins, S.W. and Ismeik, M. 1997b. A Synthesis and Evaluation of 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 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.

Barksdale, R.D., 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.