

Sistema flexible unidireccional para la estabilización de taludes y laderas de suelos o materiales sueltos

CASTRO FRESNO, DANIEL (*); BALLESTER MUÑOZ, FRANCISCO (**)

RESUMEN En este artículo se presenta el desarrollo de un sistema flexible para la estabilización de taludes mediante mallas de alambre ancladas al terreno con bulones. En la primera parte se expone el modelo físico-matemático de comportamiento de estos sistemas. A continuación los resultados obtenidos en los ensayos realizados para la caracterización mecánica de las mallas de alambre, así como una descripción de la instalación empleada para los mismos. La tercera parte recoge la validación del modelo de cálculo a partir de los valores obtenidos en la realización de ensayos de laboratorio a escala real con una sobrecarga distribuida sobre la malla, simulando las condiciones reales de funcionamiento y la descripción de la instalación empleada.

UNIDIRECTIONAL FLEXIBLE SYSTEM FOR SOIL SLOPE STABILISATION

ABSTRACT *This article presents the development of a flexible system for the stabilisation of slopes through wire meshes anchored to the land with bolts. The physical-mathematical model of flexible system is exposed in the first part. Next the results obtained in the tests performed for the mechanical characterisation of wire meshes, together with a description of the installation used for the tests is presented. The third part gathers the validation of the model of calculus starting from the values obtained in the laboratory tests on real scale with a load distributed on the mesh, simulating the real condition of functioning and the description of the used installation.*

Palabras clave: Estabilización; Taludes; Sistemas flexibles; Suelos; Mallas.

1. SISTEMAS FLEXIBLES DE SOSTENIMIENTO SUPERFICIAL DE TALUDES

Se define como un sistema de sostenimiento flexible del terreno a un conjunto de elementos formado principalmente por una membrana de material de elevada resistencia a tracción, la cual es capaz de recibir o aplicar empujes al terreno de forma continua y transmitir esos esfuerzos a la cabeza del conjunto de bulones y de aquí a la parte estable del macizo, para cualquier condición y tipo de terreno. El sistema se complementa con un geosintético (geomalla) colocado entre el terreno y la membrana, que tiene como función controlar la erosión superficial por deslave del terreno.

1.1. ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO

Debido a las presiones ejercidas por el terreno sobre la membrana, ésta se deformará con una cierta curvatura, y generará una tensión de tracción en la membrana. Dependiendo de

la magnitud de la tensión de tracción a la que esté sometida la membrana y de la curvatura de la misma, se producirá una presión continua estabilizadora sobre el terreno.

Dependiendo del tipo de membrana que se emplee, "isótropa" o "anisótropa", las tensiones de tracción se transmitirán en dos direcciones ortogonales con magnitudes semejantes o en una dirección principal más cargada y otra secundaria menos cargada.

El arriostamiento de la membrana superficial se realiza mediante un conjunto de bulones que atraviesan la zona inestable y se anclan en la zona estable del terreno.

2. MODELO UNIDIRECCIONAL "MODELO Y"

El modelo físico de funcionamiento unidireccional se presenta sólo en el caso del empleo de membranas anisótropas, colocadas con la dirección de mayor rigidez en el sentido vertical.

En este caso, la membrana no se arriestra directamente a los bulones, sino que se coloca un elemento de soporte continuo, perpendicular a la dirección de máxima rigidez, al cual se le transfieren las tracciones generadas en la membrana (Figura 1).

Los bulones se dispondrán sobre los cables de refuerzo separados a una distancia " S_x ", de forma tal que respecto filas paralelas continuas, queden situados a tresbolillo preferentemente (Figura 1).

Si el elemento de arriostamiento horizontal fuese lo suficientemente rígido, la deformada de la lámina se correspondería perfectamente con un sector cilíndrico, aunque en la

(*) Doctor Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Profesor Asociado del Departamento de Transportes y Tecnología de Procesos y Proyectos. Universidad de Cantabria.

(**) Catedrático de Ingeniería de la Construcción. Departamento de Transportes y Tecnología de Procesos y Proyectos. Universidad de Cantabria.

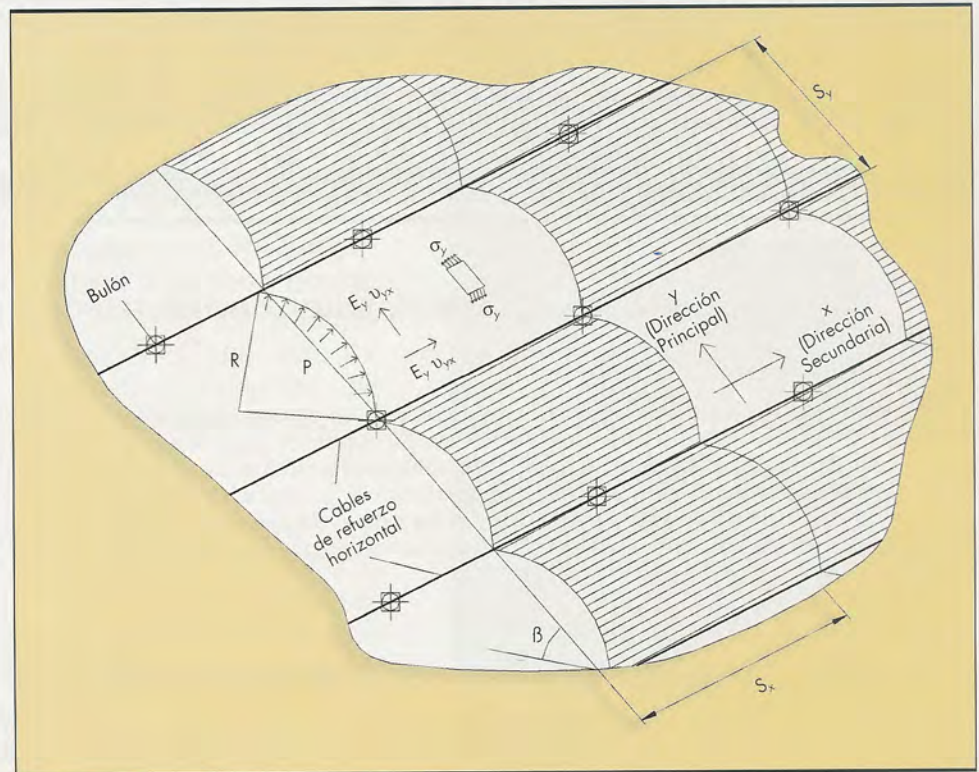


FIGURA 1. Esquema del modelo Unidireccional.

realidad no es así; podemos considerar el sistema como un conjunto continuo de láminas cilíndricas de ancho finito.

De todas las membranas analizadas, se consideró que la malla de alambre de acero de alto límite elástico, con geometría romboidal, (lo que impone unas características anisotrópicas), y protección contra la corrosión (Figura 2), es

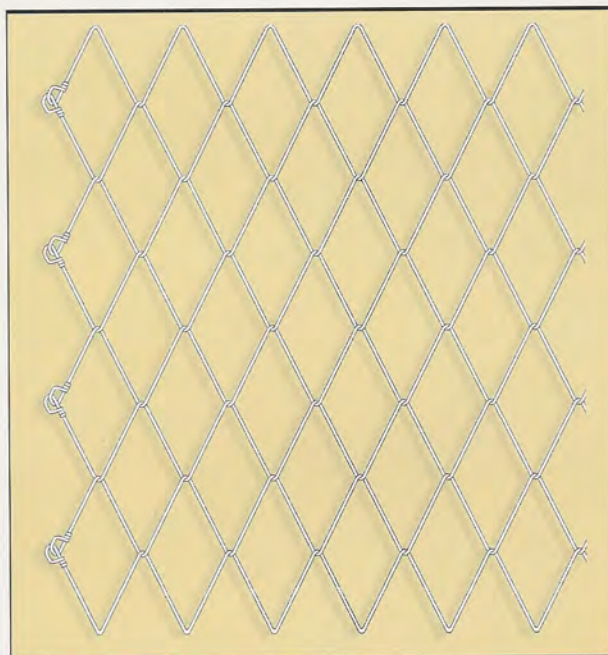


FIGURA 2. Malla con geometría romboidal.

una de las que mejor puede funcionar como elemento de soporte en el modelo unidireccional, frente al empleo de otros tipos de mallas de alambre, de simple o de triple torsión, que aporta resistencias insuficientes y poseen una durabilidad baja.

La malla se considera como un material continuo (Da Costa, 2000), aunque en realidad no lo es. Dado que la malla carece de resistencia a flexión, no se considera su espesor y los parámetros de la misma se emplearán siempre por unidades de longitud y no de superficie, en lo que a su sección se refiere.

Teniendo en cuenta las características geométricas de la deformada (Figura 3), que la deformación transversal de la malla es nula y compatibilizando con los parámetros mecánicos de la membrana, se obtiene la siguiente expresión que representa el desplazamiento vertical en función de la presión que aplica la malla sobre el talud.

$$\Delta Z = \left[\frac{S^2 \left(\frac{24 p S}{E_{yc}} \right)^{2/3}}{\left(64 - \left(\frac{96 p S}{E_{yc}} \right) \right)^{2/3}} \right]^{1/2}$$

Donde:

ΔZ = Desplazamiento vertical de la membrana en el centro del paño.

S = Distancia entre bulones.

p = Presión ejercida por el terreno sobre la malla.

E_{yc} = Módulo de elasticidad confinado en la dirección principal.

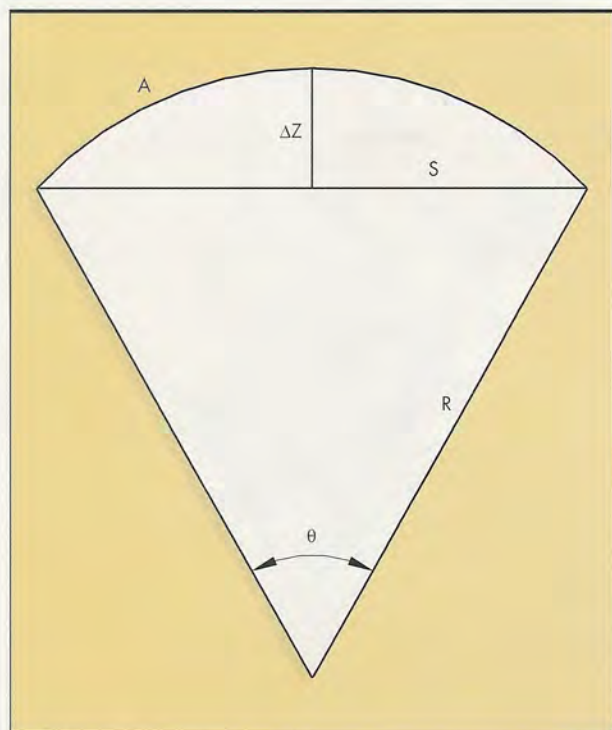


FIGURA 3. Deformada de la malla.

3. ENSAYOS PARA LA CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LAS MEMBRANAS

En un sistema flexible de estabilización superficial, el elemento más importante a seleccionar es la membrana resistente del empuje del terreno. Este elemento tiene como principal función la transmisión de dichos esfuerzos a los bulones o según sea el caso, directamente a los cables de refuerzo y de aquí a la cabeza de los bulones.

Actualmente se pueden encontrar en el mercado mallas de alambre fabricadas con dos calidades de acero bien diferenciadas. Por un lado se encuentran las mallas de triple torsión y simple torsión fabricadas con acero de bajo contenido en carbono y resistencia de entre 450-550 kN/mm² y mallas de simple torsión romboidales fabricadas con acero de alto límite elástico con resistencias entre 1750-2100 kN/mm²

En la Tabla 1 se muestra un resumen con los resultados de los ensayos preliminares de tracción directa longitudinal con arrioste lateral, realizados sobre los tipos de malla expuestos en el párrafo anterior de cara a evaluar sus posibilidades de utilización como membrana flexible para la estabilización de laderas inestables.

A la vista de los resultados recogidos en el cuadro anterior, se observa que la capacidad de carga de la membrana romboidal es muy superior al resto de las membranas, con los dos diámetros de alambre que se fabrica ($\phi = 3$ y 4 mm), por lo que se opta por analizar únicamente esta malla.

DATOS TÉCNICOS DE LA MALLA ROMBOIDAL

Geometría de las mallas

Geometría de la malla	Romboidal
Tamaño del rombo	ϕ 65 mm
Dimensiones del rombo	143 x 83 mm

Alambre de las mallas

Diámetro del alambre	3,0 y 4,0 mm
Resistencia nominal	1.770 – 2.020 N/mm ²
Material	Acero alto límite elástico
Protección anticorrosión	Cinz / Aluminio

El objetivo general de los ensayos de laboratorio es la determinación de las características tenso-deformacionales y la capacidad de carga bajo diferentes condiciones de instalación para las membranas flexibles susceptibles de ser empleadas como elementos de estabilización superficial y control de la erosión en desmontes de suelos y materiales sueltos.

Estos parámetros serán introducidos en el modelo matemático correspondiente al modelo físico de comportamiento del sistema de estabilización superficial con el objetivo de obtener la capacidad de soporte

ENSAYO DE TRACCIÓN DIRECTA SOBRE EL ALAMBRE

Los ensayos de tracción directa sobre los alambres componentes de las muestras de la malla romboidal se realizaron con el objetivo de verificar la calidad del alambre empleado en tres partidas de muestras y su correspondencia con los valores nominales aportados por el fabricante.

ENSAYOS DE TRACCIÓN DIRECTA SOBRE MUESTRAS DE MALLA ROMBOIDAL

Este ensayo tiene como objetivo la determinación de las características mecánicas, curva esfuerzo-deformación, módulo de elasticidad y relación entre la carga longitudinal vs. transversal, en condiciones de carga a tracción directa, para las mallas romboidales con diámetros de alambre de 3 y 4 milímetros. Los ensayos a tracción directa se realizarán en la dirección principal de carga de la malla "y" (diagonal mayor del rombo) y en la dirección ortogonal "x" (diagonal menor del rombo).

Los parámetros de carga-deformación, módulo de elasticidad y relación carga longitudinal vs. transversal, deberán ser obtenidos con condiciones de ensayo de laboratorio tales que simulen el estado tenso-deformacional a que estará sometida la membrana según las hipótesis de trabajo del modelo.

Tipo de malla	Carga (kN/m)	Deformación (mm/m)
Malla de Simple Torsión 500 N/mm ² (50 x 19 x 3.8 mm)	63,24	135,52
Malla de Simple Torsión 500 N/mm ² (40 x 18 x 3.3 mm)	83,66	163,07
Malla de Triple Torsión 500 N/mm ² (80 x 10 x 16)	30,87	96,13
Malla de Triple Torsión 500 N/mm ² (80 x 10 x 17)	41,48	98,46
Malla romboidal (83 x 143 x 3 mm)	151,46	83,80
Malla romboidal (83 x 143 x 4 mm)	257,65	58,12

TABLA 1. Resultado de los ensayos preliminares.

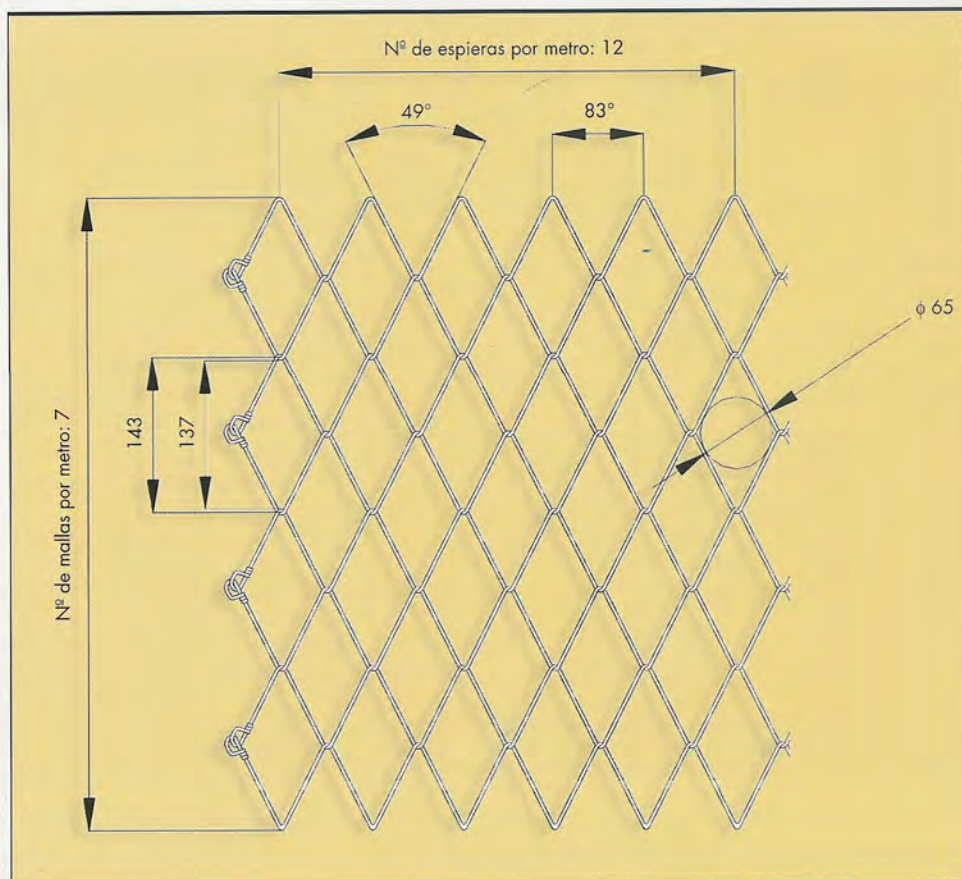


FIGURA 4. Geometría de la membrana.

En las condiciones del modelo unidireccional (Modelo "y"), la membrana puede deformarse solamente en la dirección principal "y". En la dirección transversal "x" la deformación es nula debido a que la membrana se considera infinita transversalmente. Para simular estas condiciones en el ensayo de laboratorio las muestras se ensayarán a tracción directa longitudinal (Dirección "y") con arriostramiento lateral de la muestra.

Descripción de la instalación

El ensayo se realizó en un bastidor (Castro, 2000) diseñado para tal efecto y construido con perfiles de acero (Figura 5). El dispositivo de ensayo estará formado por dos sujeciones transversales a la dirección de carga, una fija y otra móvil, en la cual se aplicará la tracción en el plano de la membrana. Lateralmente la malla se arriostará de forma tal, que tenga impedido el desplazamiento en el sentido transversal de la carga, pero no en el sentido de aplicación. Los valores de carga y de deformación serán captados por un dispositivo de medición digital que registre de forma continua y simultánea las magnitudes de la carga aplicada y la deformación de la malla. Para medir la carga de trabajo en la dirección transversal a la aplicación principal de la carga, se diseñó un dispositivo de medición entre el arrioste lateral y el borde de la muestra.

La muestra correspondiente a un paño de malla se coloca sobre el bastidor principal mediante los elementos de sujeción diseñados para tal función, los cuales permiten su instalación con la dirección principal en el sentido de la tracción (ensayo de tracción directa longitudinal) y con la dirección secundaria en el sentido de la tracción (ensayo de tracción directa transversal). El yunque móvil lleva enganchado un cable que pasa-

rá entre el pie y la cabeza de los bastidores principal y secundario, respectivamente, y se introducirá entre las platabandas del carro de empuje y sobre sus casquillos. El cable se volverá a pasar entre la cabeza y el pie de los bastidores para enganchar esta punta en otro enganche del yunque móvil. Un gato se apoyará en el pie y la cabeza de los bastidores principal y secundario respectivamente, de tal forma que su eje quede a la misma cota que la malla. El gato conectado a un grupo hidráulico de presión empujará el carro, el cual tirará del cable y, a su vez, este del yunque móvil y de la malla.

Todos los elementos con partes deslizantes han sido engrasados adecuadamente, para disminuir al máximo la fricción. Tanto el bastidor principal como el secundario han sido sobredimensionados para evitar deformaciones permanentes por torsión o flexión producidas por los ciclos de carga de los diferentes ensayos.

Resultado de los ensayos

Los ensayos de Tracción Directa han sido realizados en el Laboratorio de Estructuras (LABEST) de la E.T.S.I. de Caminos Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria.

Durante todo el trabajo se hará referencia a los valores del módulo de elasticidad del material, sin embargo, con relación a este valor es necesario hacer las siguientes aclaraciones:

- La malla romboidal se comporta como un material elasto-plástico, debido a que durante el proceso de carga se produce un aplastamiento de las espiras y una variación de la geometría del rombo, por lo que la componente deformacional tiene una parte plástica importante.

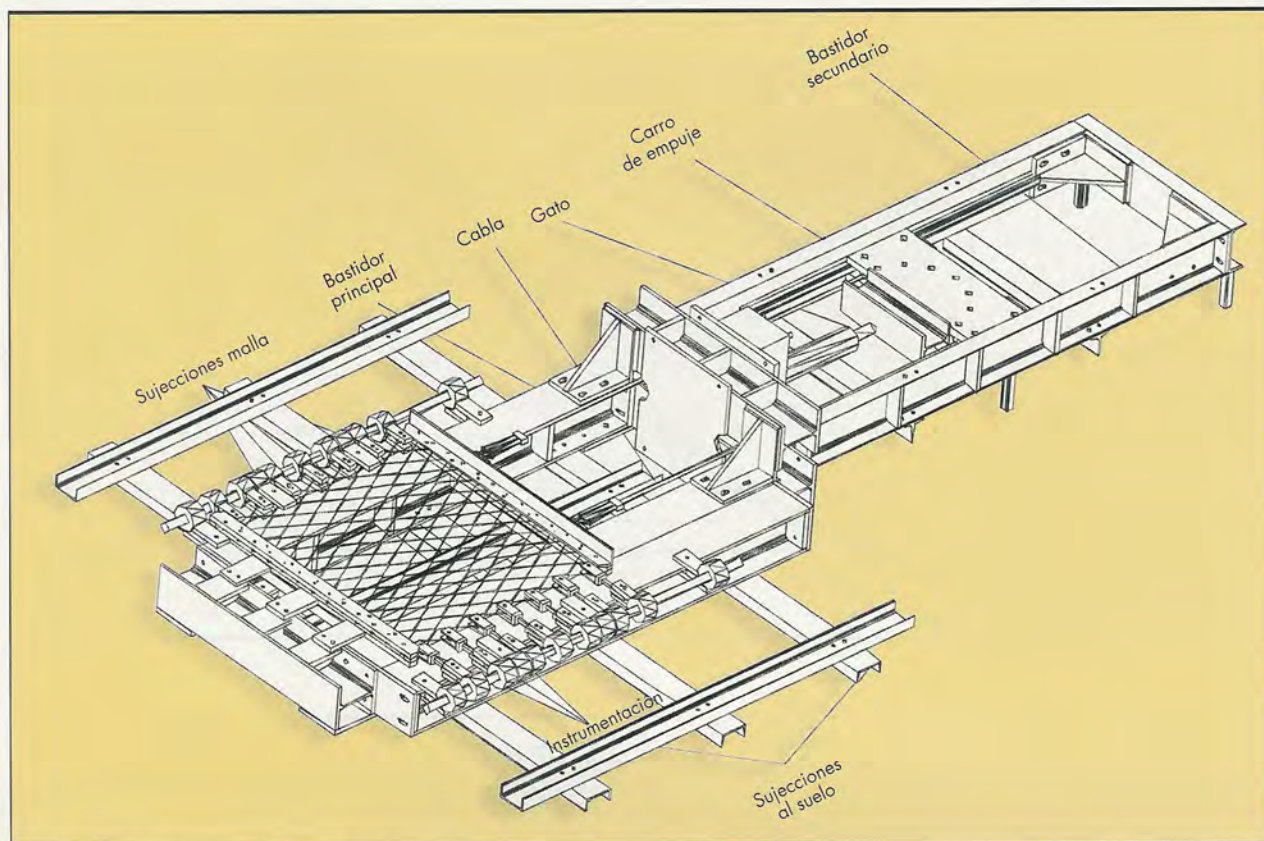


FIGURA 5. Vista general del bastidor con instrumentación lateral.

- Los valores calculados del módulo de elasticidad, en realidad representan valores de módulo de deformación "Módulo secante de la curva carga-deformación". De todas formas, se utilizará el término módulo de elasticidad definido como un módulo de deformación, ya que los análisis se realizarán en un solo ciclo de carga y su modelación matemática se ha realizado con la ayuda de las ecuaciones de la teoría de la elasticidad.
- A los efectos de la determinación del "módulo de elasticidad" ya sea longitudinal o transversal, la malla se considera como una membrana continua, sin embargo, la variación de la geometría hace que el "material resultante" cambie sus propiedades mecánicas a lo largo del ciclo de carga, por lo que los módulos del material no serán constantes en todo el intervalo de carga del ensayo, ni tampoco los valores de la relación entre la carga longitudinal vs. transversal.

Ensayos de Tracción Directa Longitudinal sobre mallas romboidales ($\phi = 3$ y 4 mm)

En la Figura 6 se recogen los resultados obtenidos para la malla de 3 mm. Como se puede observar, para valores de carga pequeños (0-10 kN), la malla se está acomodando a las condiciones de anclaje del aparato de ensayo. A partir de los 10 kN y hasta los 50 kN, la pendiente de la curva es continua y de aquí hasta la carga de rotura la pendiente disminuye debido a la pequeña deformación que introducen los nudos de remate de los bordes de la malla.

Para calcular las cargas en condiciones de trabajo se ha aplicado un factor de seguridad de 1,67 sobre el valor de la carga de rotura.

El módulo de elasticidad obtenido se corresponde con el valor del módulo confinado, el cual se puede emplear directamente en la modelación matemática del comportamiento del material en las condiciones de trabajo del modelo unidireccional "Modelo y". Aunque el valor del módulo de elasticidad cambia alrededor de los 50 kN, se puede decir que éste permanece constante durante el resto del ciclo de carga, por lo que se tomará el valor que mejor representa los valores medios de tensión de la malla.

Ensayo de tracción directa longitudinal con muestras de 3 mallas de largo

Este ensayo fue realizado con el objetivo de verificar la influencia del tamaño de la muestra en los resultados. La carga de rotura media obtenida es un 6,3% más baja que la obtenida con la muestra de diseño y la deformación unitaria es un 17,7% menor, por lo que el módulo de elasticidad resultante será superior al obtenido anteriormente.

Relación carga longitudinal vs. transversal

En la Figura 7 se representa un ejemplo de los resultados registrados para la instrumentación lateral correspondientes a la muestra 1 con alambre de 3 mm. Teniendo en cuenta que la longitud de la muestra es de un metro, los valores de la carga lateral, σ_x (kN/m), se obtienen sumando la carga registrada en cada una de las siete mallas instrumentadas para cada escalón de carga longitudinal (σ_y).

La relación entre la carga longitudinal vs. transversal prácticamente no varía a lo largo del ensayo. Si se representan en una gráfica los valores correspondientes a (σ_x v.s. σ_y) y se ajusta una recta (Figura 8).

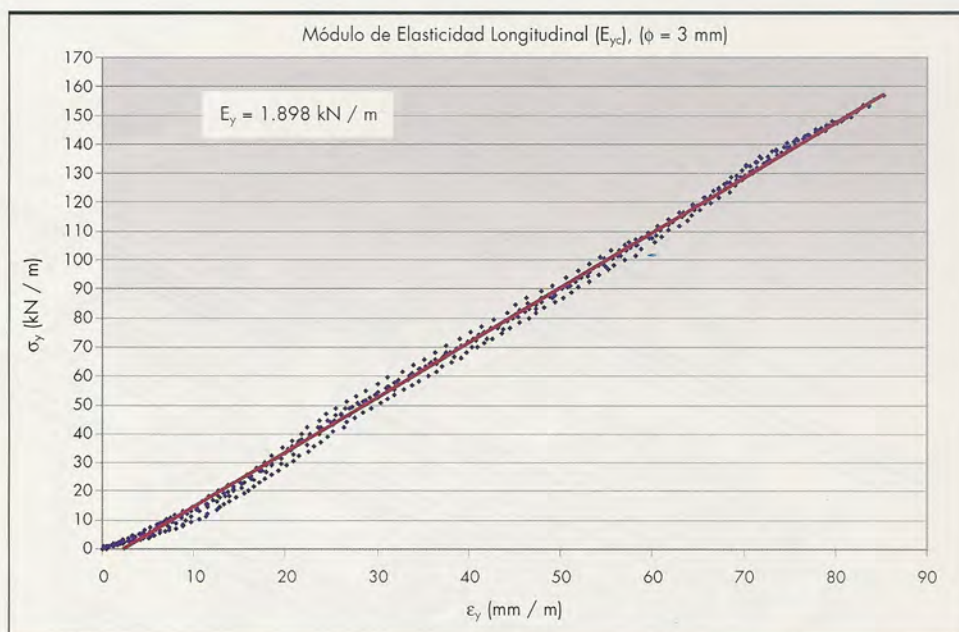


FIGURA 6. Módulo de elasticidad en la dirección principal "y".

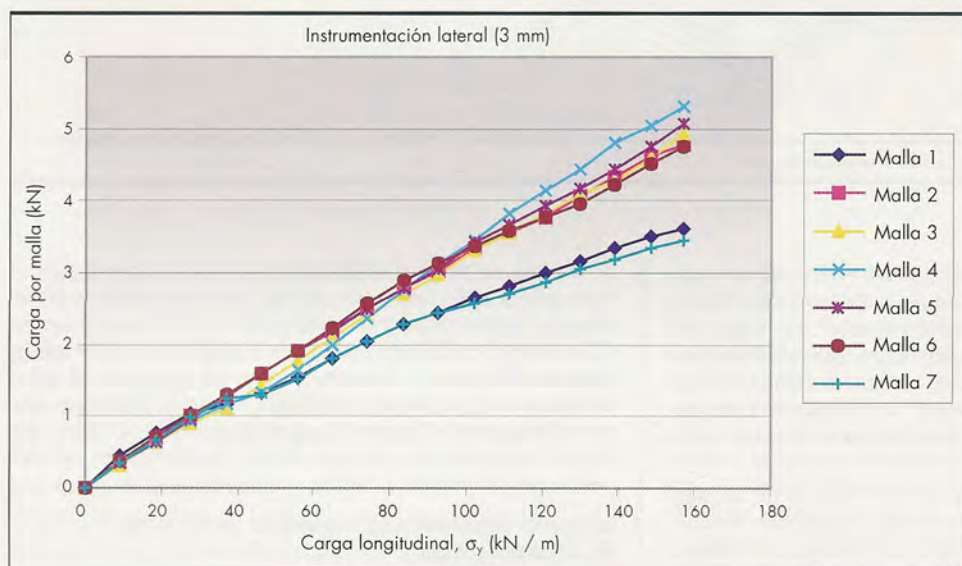


FIGURA 7. Valores de la instrumentación lateral.

Ensayos de Tracción Directa Transversal sobre mallas romboidales ($\phi = 3 \text{ y } 4 \text{ mm}$)

Debido a la variación de la geometría de la malla durante la realización del ensayo, los valores de carga deformación no varían de forma lineal, produciéndose un incremento de la rigidez de la muestra en la medida que se elonga la misma. Esto se debe a un incremento de la magnitud de la diagonal menor del rombo con la consecuente variación de los ángulos de los rombos de la malla. Esto produce un incremento relativo de la resistencia a tracción directa en la dirección transversal de la malla debido a un incremento de la proyección de las tensiones de los alambres en esta dirección.

La carga de rotura transversal no se utiliza como parámetro de diseño; no obstante, para obtener un valor comparativo, utilizando un factor de seguridad 1.67 para la carga de trabajo.

Para la determinación del módulo de elasticidad confinado en la dirección secundaria de la malla (E_{xc}), se han agrupado los resultados de todos ensayos en un solo registro de datos, los cuales se representan en el siguiente gráfico (Figura 9).

Como era de esperar, la curva carga-deformación transversal se corresponde con una parábola con la concavidad hacia arriba, por lo que se tendrán valores de módulo de elasticidad diferentes para cada nivel de carga.

Teniendo en cuenta que la geometría del material varía con la aplicación de la carga, la definición de los módulos en longitudinal y transversal, deben realizarse en condiciones de trabajo simultáneas.

Por lo tanto, para calcular el módulo de elasticidad transversal, se definen unos escalones de carga en la dirección principal, para los cuales se calcula la deformación unitaria. Como se considera que esta deformación es aproximadamen-

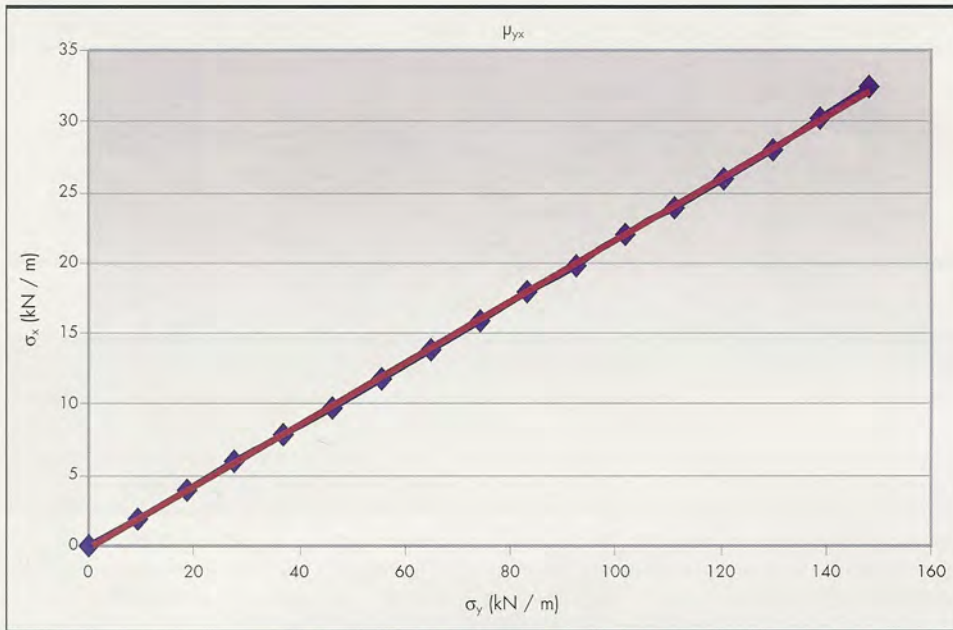


FIGURA 8. Relación carga longitudinal vs. transversal tracción directa longitudinal.

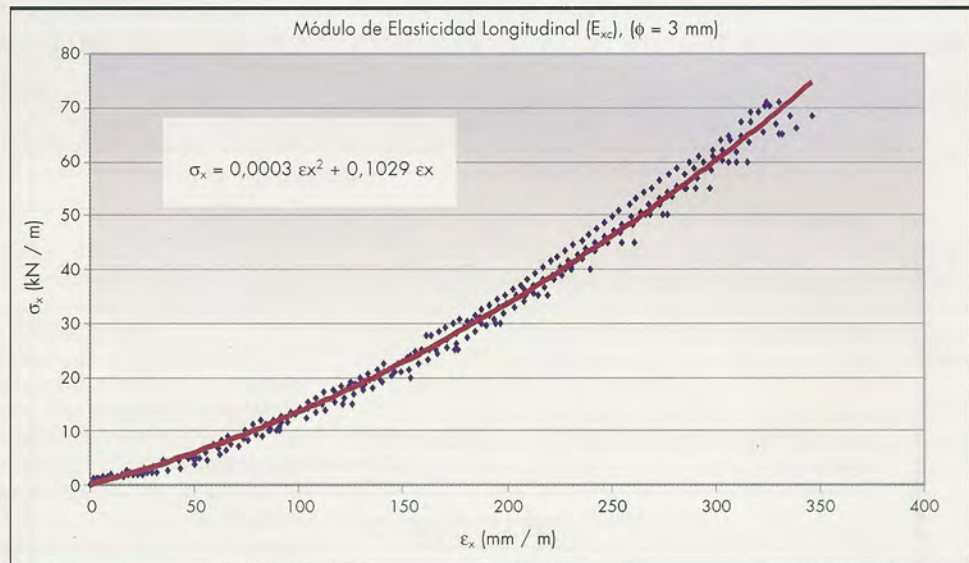


FIGURA 9. Módulo de elasticidad en la dirección secundaria "x".

te igual en el sentido transversal, se toman estos valores de entrada en la gráfica carga-deformación transversal (Figura 9) y se calcula la carga transversal en ese punto. El cociente entre la carga transversal y la deformación unitaria será el módulo de elasticidad transversal.

En la Tabla 2 se recogen los valores del módulo de elasticidad transversal, E_{xc} , para distintos valores de deformación unitaria.

En la Tabla 2 se puede observar que la tensión generada en la dirección transversal durante la aplicación de la carga en la dirección longitudinal es de aproximadamente el 6% de esta, lo que confirma la condición de extrema anisotropía de la malla empleada.

El módulo de elasticidad, E_{xc} se tomará igual a 118 kN/m para condiciones de carga de trabajo en la dirección principal σ_y . Para valores altos de deformación transversal, el módulo de elasticidad E_{xc} , toma valores entorno a 185 kN/m.

4. VALIDACIÓN DEL MODELO UNIDIRECCIONAL

Para la validación del modelo unidireccional se realizaron ensayos con carga distribuida cuyo objetivo era evaluar la carga máxima que es capaz de soportar la malla en la dirección perpendicular al plano definido por ella, para una determinada superficie cargada entre arriostramientos y el desplazamiento vertical en la dirección principal. El dispositivo de ensayo empleado reproducía las condiciones de carga del modelo unidireccional (Modelo "y"), donde la membrana está arriostrada en todo su perímetro, permitiéndose únicamente el desplazamiento vertical de los bordes paralelos a la dirección vertical (Figura 10). De esta forma, la membrana se deforma únicamente en la dirección principal.

La muestra correspondiente a un paño de malla de 1,74 de ancho \times 2,50 m, se coloca sobre el marco principal y se arriostra en el borde del marco perpendicular al eje principal

TABLA 2. Módulo de elasticidad transversal, Exc.

σ_y (kN/m)	$\sigma_y/\sigma_y R$	$\epsilon_y \equiv \epsilon_x$ (mm/m)	σ_x (kN/m)	Exc (kN/m)
45	0,3	24,7	2,72	110
75	0,5	41,2	4,75	115
90	0,6	49,5	5,83	118
120	0,8	66,0	8,10	123
151,46	1,0	83,8	10,53	128

RESUMEN DE LOS RESULTADOS PARA LA CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LAS MEMBRANAS ROMBOIDALES					
Ensayo de Tracción Directa sobre el Alambre					
Diámetro del Alambre (mm)		$\phi = 3$	$\phi = 4$		
Diámetro Medio del Alambre (mm)		3,00	3,883		
Carga de Rotura, T_A (N)		13.746	22.296		
Resistencia a Tracción Directa, σ_A (N/mm ²)		1.945	1.886		
Módulo de Elasticidad, E_A (N/mm ²)		196.906			
Ensayo de Tracción Directa sobre muestras de Malla Romboidal					
Diámetro del Alambre (mm)		$\phi = 3$	$\phi = 4$		
Ensayo de Tracción Directa Longitudinal	Ensayo Estándar (1.079 x 1.001)	Carga de Rotura, σ_y (kN/m)	151,46	260,21	
		Def. Unitaria en Rotura, ϵ_y (mm/m)	82,55	59,34	
		Carga de Trabajo σ_y (kN/m)	90,00	155,00	
		Def. Unitaria de Trabajo, ϵ_y (mm/m)	49,52	25,21	
	Muestras Cortas (1.079 x 429)	Carga de Rotura, σ_y (kN/m)	142,49	—	
		Deformación Unitaria, ϵ_y (mm/m)	71,15	—	
	Módulo de Elasticidad Longitudinal E_{yc} (kN/m)		1.898	6.250	
	Relación carga longitudinal vs. carga transversal μ_{yx}		0,217	0,213	
	Ensayo de Tracción Directa Transversal	Ensayo Estándar (1.079 x 1.001)	Carga de Rotura, σ_x (kN/m)	68,86	99,10
			Def. Unitaria en Rotura, ϵ_x (mm/m)	336,79	241,54
Carga de Trabajo σ_{xT} (kN/m)			40,00	60,00	
Def. Unitaria de Trabajo, ϵ_y (mm/m)			228,37	139,14	
Muestras Cortas (1.001 x 249)		Carga de Rotura, σ_x (kN/m)	64,06	—	
		Def. Unitaria en Rotura, ϵ_x (mm/m)	422,42	—	
Módulo de Elasticidad Transversal, Exc (kN/m)		164	443		
Relación carga longitudinal vs. carga transversal μ_{xy}		2,50	3,01		

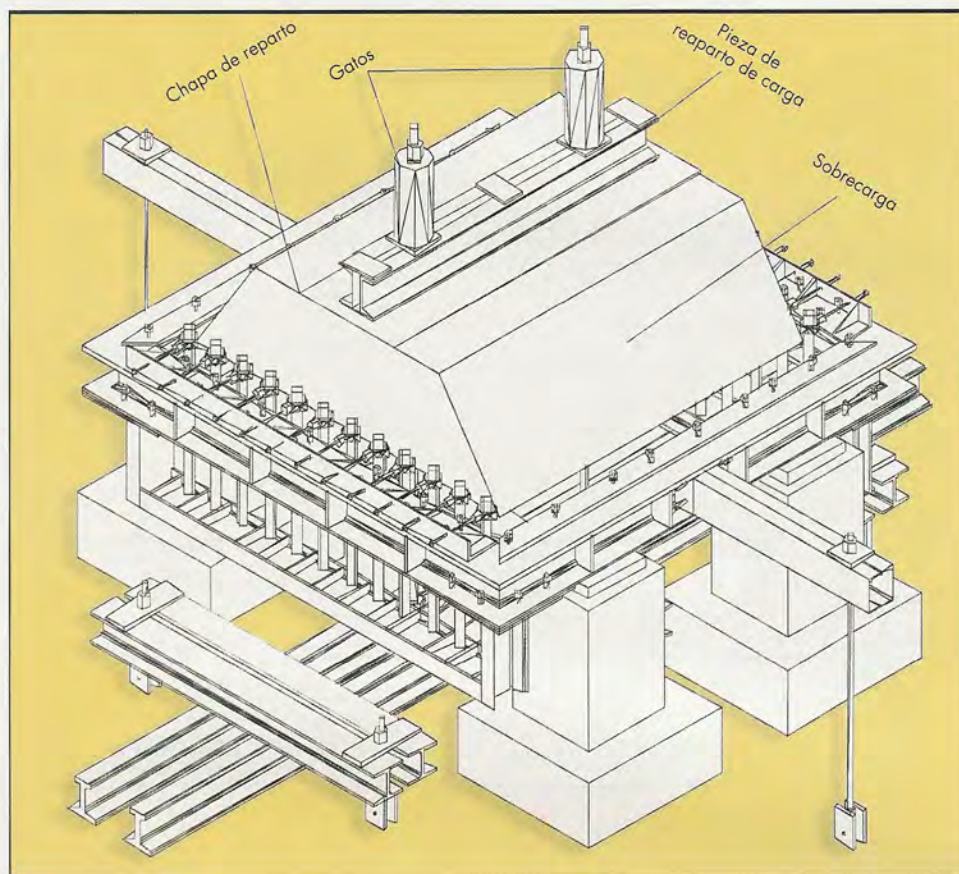


FIGURA 10. Instalación para el Ensayo de carga distribuida "Unidireccional".

mediante los elementos de sujeción diseñados para tal función. Los rombos de los bordes paralelos a la dirección principal de la malla se arriostran individualmente pasando por su interior los cuadradillos de fijación lateral.

Una vez fijada la malla, se colocan unas maderas que servirán como referencia para apoyar los transductores de medición de los desplazamientos verticales. Seguidamente, se coloca la sobrecarga junto con los tubos que van en su interior, la chapa de acero, la viga de reparto, las "jarras" y los cilindros hidráulicos para la aplicación de la carga. Finalmente, se colocan los transductores y el medidor de hilo, para registrar el desplazamiento vertical de la malla. Concluido el montaje del ensayo, se aplicará carga en forma continua por medio de dos cilindros conectados al grupo hidráulico hasta la rotura de la muestra. Los valores de carga y desplazamiento vertical son registrados de forma simultánea por la unidad de captación de datos.

A partir de los valores registrados por los transductores de desplazamiento vertical, se analiza la curvatura que la carga distribuida origina en la malla en distintos escalones de carga. En las condiciones de ensayo del modelo unidireccional, la curvatura de la malla se produce solamente en la dirección principal "y".

Para la determinación de la deformación unitaria de la malla, se ha obtenido la longitud de la curva ajustada para cada una de las deformadas. La longitud de la curva (A_i) se determinó realizando la integral curvilínea entre los puntos de arriostramiento (Figura 11).

En este tipo de ensayo, para un elemento diferencial de la malla, las condiciones de trabajo son idénticas al ensayo de tracción directa longitudinal con arriostramiento lateral. En la Tabla 3 se recogen los resultados obtenidos.

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos de tracción directa y carga distribuida se realizaron dos modelaciones del sistema, una geométrica y otra matemática a partir de la teoría de la elasticidad para mallas anisótropas desarrollada anteriormente. Los resultados de estas modelaciones se recogen en la Tabla 4.

En la Tabla 4 se puede observar que las modelaciones matemática y la geométrica del modelo Unidireccional conducen a valores prácticamente iguales entre ellas

5. CONCLUSIONES

Las grandes cargas de rotura registradas en los ensayos de tracción directa de la malla romboidal hacen que esta pueda ser considerada como una de las membranas más resistentes del mercado, incluso por encima de las redes de cables.

Los criterios de diseño para la selección del tipo de membrana pueden estar basados en estados de tensión controlada o en estados de deformación controlada. Los valores máximos de capacidad de soporte de las mallas romboidales son sumamente elevados, pero también son elevados los valores de deformación que se obtienen. Por esta razón se recomienda el criterio de control de deformación para la determinación de la capacidad de trabajo de los sistemas.

Las modelaciones matemática y la geométrica del modelo Unidireccional conducen a valores prácticamente iguales entre ellas. Las pequeñas diferencias existentes con los resultados obtenidos en el ensayo de carga distribuida unidireccional se deben a una inadecuada distribución de la sobrecarga, lo que originó una deformada no cilíndrica. Una vez calculada la relación entre el ángulo de la tangente en el bor-

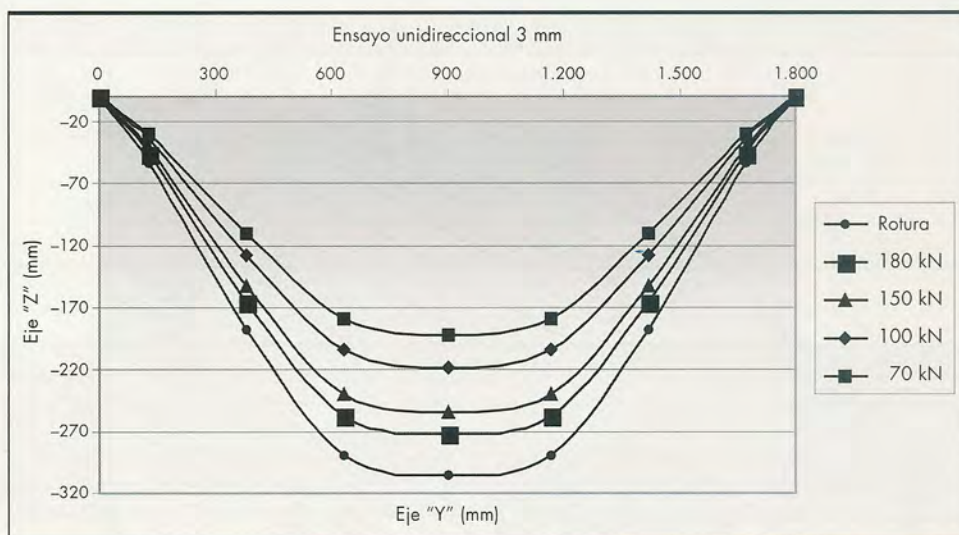


FIGURA 11. Deformadas de la malla romboidal ($\phi = 3$ mm), en la dirección "y" para diferentes escalones de carga distribuida del ensayo unidireccional.

Diámetro del Alambre (mm)	$\phi = 3$	$\phi = 4$
Desplazamiento Vertical en Rotura, ΔZ (mm)	305	309
Carga de Rotura, Q (kN/m)	142	263
Def. Unitaria en Rotura, ϵ_r (mm/m)	67,78	66,67

TABLA 3. Resultado de los ensayos con carga distribuida.

Malla romboidal	$\phi = 3$ mm		$\phi = 4$ mm	
	Modelo Geométrico	Modelo Matemático	Modelo Geométrico	Modelo Matemático
Soporte Unitario "p" (kN/m ²)	106	106	155,47	160
Desplaz. Vertical " ΔZ_y " (m)	0,319	0,320	0,266	0,274
Carga en la Malla " σ " (kN/m)	151,46	151,00	257,65	258,12
Def. Unitaria " σ " (mm/m)	83,80	82,42	58,12	60,86
Soporte Total "Q" (kN)	332	332	487	501

TABLA 4. Comparativa de las modelaciones geométrica y matemática del modelo "y".

de para la deformada de la malla en el ensayo, y el ángulo de la tangente de la circunferencia con el mismo desarrollo, se obtienen valores de carga similares.

Debido a que se producen importantes desplazamientos iniciales de la malla para valores bajos de carga, se debe pretensar los sistemas durante el montaje con cargas entre 40 - 60 kN por bulón para las mallas de 3 mm, y entre 70 - 120 kN para mallas de 4 mm, para controlar el desplazamiento máximo del sistema bajo las cargas sin necesidad de reducir la capacidad de carga de la instalación.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca dentro del proyecto "Desarrollo de nuevas tecnologías de refuerzo y estabilización de desmontes en suelos y materiales sueltos" (Ref. 1FD97 - 0757) cofinanciado con fondos FEDER cuyo responsable es D. Francisco Ballester Muñoz. En dicho proyecto participan el Area de

Ingeniería de la Construcción, la División de Ingeniería del Terreno y el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria, junto con las empresas Geobrugg Ibérica S. A. y Malla Talud Cantabria S.L.

REFERENCIAS

CASTRO FRESNO, D. Estudio y análisis de las membranas flexibles como elemento de soporte para la estabilización de taludes y laderas de suelos y/o materiales sueltos. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria. 2000
 DA COSTA GARCÍA, ALMUDENA. Corrección de inestabilidades superficiales de taludes en suelos. Departamento de Ciencias e Ingeniería del Terreno y los Materiales. División de Ingeniería del Terreno. Universidad de Cantabria. 2000.
 TORRES VILA, J. A. Procedimiento de Análisis y Diseño para la Aplicación de Redes de Cables de Acero en la Estabilización de Taludes. Geobrugg Ibérica S.A. 1997.