

Como elemento de soporte superficial en la estabilización de taludes

# Validación de los modelos físicos de análisis y diseño para el empleo de membranas flexibles *Tecco*<sup>®</sup> G-65

TORRES VILA, J. A., GEOBRUGG International R&D Office.

TORRES VILA, M. A., Investigador. Dpto. de Transportes y Tecnología de Procesos y Proyectos.

ETSI Caminos Canales y Puertos. Universidad de Cantabria.

CASTRO FRESNO, D., Profesor. Dpto. de Transportes y Tecnología de Procesos y Proyectos.

ETSI Caminos Canales y Puertos. Universidad de Cantabria

Palabras clave: CARGA, DESPLAZAMIENTO VERTICAL, ENSAYO, LÍMITE ELÁSTICO, MALLA, MODELO FÍSICO-MATEMÁTICO, SOPORTE UNITARIO.

En el presente artículo se presenta el resultado de la modelación a escala de laboratorio, en una instalación diseñada a tal efecto, de las membranas *Tecco*<sup>®</sup> G-65 sometidas a carga distribuida, comparándose los resultados del ensayo con los obtenidos de la aplicación de los modelos de cálculo y las características mecánicas de la malla. Se ha obteniendo una elevada coincidencia entre los resultados de la aplicación de los modelos teóricos con los obtenidos en las instalaciones de ensayo.

Las redes de cables como membrana flexible de soporte superficial en la estabilización de taludes se ha venido empleando cada vez con mayor amplitud y exitoso comportamiento.

Actualmente, se está introduciendo un nuevo tipo de membrana, la malla de alambre de acero de alto límite elástico, tipo *Tecco*<sup>®</sup> G-65. Para el empleo racional de este tipo de membrana, se han elaborado modelos físico-matemáticos de análisis y diseño para el cálculo de la capacidad de soporte y se han determinado los parámetros mecánicos de esta.

Se ha determinado la capacidad de carga de estas mallas, que en las condiciones del modelo cilíndrico, pueden alcanzar soportes de hasta 35-40 kN/m<sup>2</sup> y 40-60 kN/m<sup>2</sup> para las mallas con alambres de 3 y 4 mm de diámetro de alambre, respectivamente para  $FS > 2$ .

El cálculo racional de las membranas flexibles ancladas viene realizándose en España desde hace más de 5 años, tanto para redes de cables combinadas con anclajes pasivos, como sistemas de sostenimiento activos.

Los trabajos que recientemente se han realizado, son una continuación de la misma filosofía del sistema flexible, con la mejora in-

troducida por la existencia de un nuevo material, la malla anisotrópica *Tecco*<sup>®</sup> G-65 y el desarrollo de equipos de laboratorio mucho más elaborados y con una elevada calidad en la modelación del trabajo del sistema y mayor precisión en el registro de los datos.

El objetivo fundamental de este artículo, es la determinación en el laboratorio, de la capacidad de carga bajo diferentes condiciones de instalación para las mallas *Tecco*<sup>®</sup> G-65, susceptibles de ser empleadas como elementos flexibles de estabilización superficial en desmontes y la verificación de la validez de los modelos de comportamiento elaborados.

Los resultados obtenidos en los ensayos, realizados con carga distribuida, soporte unitario ( $p$ ) y los desplazamientos verticales ( $\Delta z$ ), serán comparados con los resultados obtenidos de la aplicación de los modelos físico-matemáticos.

## Ensayo con carga distribuida

La parte experimental, correspondiente a las pruebas de laboratorio realizadas con la malla *Tecco*<sup>®</sup> Mesh G-65, incluyó una serie de muestras con diámetros de alambre de 3 y 4 milímetros, para la determinación de la

capacidad de soporte bajo carga distribuida en la dirección perpendicular al plano de la malla para condiciones de trabajo del modelo *unidireccional* o modelo  $y$  (**Fig. 1**).

La carga se aplicará en dirección perpendicular al plano definido por el paño de malla. La determinación del comportamiento de la membrana sometida a carga distribuida, se evaluará mediante la medición de los siguientes parámetros:

- Relación: carga total aplicada v.s. desplazamiento vertical del centro del paño.
- Relación: carga total aplicada v.s. desplazamiento vertical en la dirección  $y$ .
- Geometría de la deformada de la malla para diferentes escalones de carga.

Los parámetros que se van a determinar en estos ensayos, además de los utilizados en la definición de los modelos, son:

- $Q$  Soporte total (kN). Carga máxima que es capaz de soportar la malla en la dirección perpendicular al plano definido por ella.
- $P$ - Soporte unitario (kN/m<sup>2</sup>). Capacidad de carga por unidad de superficie.
- $\Delta z_y$ - Desplazamiento vertical en una línea paralela a la dirección principal (mm).
- $\Delta z_c$ - Desplazamiento vertical de la malla en el centro del paño de malla (mm).

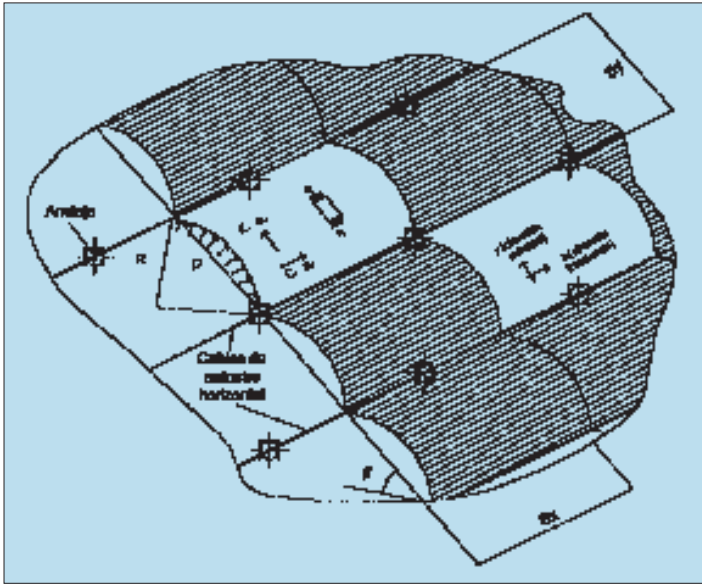


Fig. 1.- Esquema del modelo unidireccional.

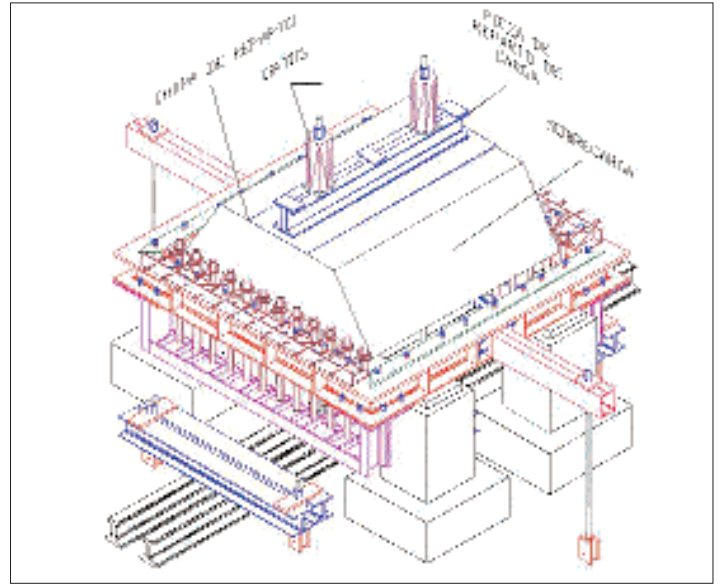


Fig. 2.- Vista general del aparato de ensayo para el ensayo de carga distribuida Unidireccional, con la sobrecarga.

**Ensayo de carga distribuida “Unidireccional”**

El dispositivo de ensayo empleado deberá ser capaz de reproducir las condiciones de carga de la membrana trabajando en las condiciones del modelo unidireccional (Modelo y). La membrana estará arrojada en todo su perímetro, permitiéndosele únicamente el desplazamiento vertical de los bordes paralelos a la dirección principal. En este tipo de ensayo, para un elemento diferencial de la malla, las condiciones de trabajo son idénticas a la obtenida en el ensayo de tracción directa en el estado tensional plano bidireccional.

El dispositivo de ensayo está formado por un marco principal de acero de dimensiones 1.800 x 1.800 mm de luz interior, el cual permite el arrojamiento total del borde de la malla perpendicular a la dirección principal, y un conjunto de barras verticales colocadas en el interior del marco facilitan el desplazamiento vertical de los bordes paralelos a la dirección principal, impidiendo el desplazamiento en el plano de la malla. El tamaño del testigo de ensayo será, de acuerdo con la construcción del sistema de fijación, de 1.800 mm de longitud y 1740 mm de ancho (Fig. 2).

La sobrecarga, compuesta por una pirámide truncada formada por sacos de grava, se coloca sobre la malla y un sistema de gatos hidráulicos aplica, de forma continua, la carga. Un conjunto de extensómetros colocados por debajo de la malla, registra los desplazamientos verticales en diferentes puntos a lo largo de la dirección principal: en el centro y en el borde. Los valores de car-

ga y desplazamiento serán registrados por la unidad de captación de datos, que los almacena de forma continua y simultánea.

**Ensayo con carga distribuida unidireccional. Malla Tecco® G-65 (φ=3 y 4 mm)**

Los ensayos con carga distribuida 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 entre los meses de octubre y diciembre de 2000, con la colaboración de Germán Gutiérrez.

Los valores de la carga de rotura y desplazamiento vertical máximo del punto central de la muestra, registrados para cada muestra, se presentan en la **Tabla I**.

Tomando 2,0 como valor aproximado del factor de seguridad para la carga, el valor del soporte unitario en condiciones de trabajo, bajo una sobrecarga distribuida de la malla de 3 y 4 mm será:

$$P_{Trabajo} = \frac{Q_{Rotura}}{S \times FS} = \frac{246,18}{1,8 \times 1,74 \times 2,0} \approx 39,3 \text{ kN/m}^2$$

$P_{Trabajo} \approx 39,3 \text{ kN/m}^2$  para malla de φ=3 mm

$P_{Trabajo} \approx 73 \text{ kN/m}^2$  para malla de φ=4 mm

Teniendo en cuenta que en las condiciones del modelo cilíndrico, la malla trabaja por bandas independientes en una sola dirección, tiene sentido la determinación del soporte por fajas de 1 m de ancho. Este valor de soporte es una constante, depende únicamente de las características de la malla, y es independiente de la separación entre cables de arrostre horizontal (Sy).

$$P_{Trabajo} = \frac{Q_{Rotura}}{S_x \times FS} = \frac{246,18}{1,74 \times 2,0} \approx 70 \text{ kN/m}^2$$

$P_{Trabajo} \approx 70 \text{ kN/m}^2$  para malla de φ=3 mm

$P_{Trabajo} \approx 130 \text{ kN/m}^2$  para malla de φ=4 mm

Así, el soporte unitario de la malla (kN/m<sup>2</sup>) dependerá de la distancia (Sy), según las condiciones de instalación del sistema.

**Deformada de la malla**

A partir de los valores registrados por los transductores de desplazamiento vertical, se obtiene la curva de la deformada de la malla para diferentes escalones de carga, correspondientes a las medias de los ensayos realizados para cada serie (Fig. 3).

Para la determinación de la deformación unitaria de la malla, se obtuvo la longitud de

Tipo de Ensayo	Muestra Nº	Desplazamiento vertical punto central, Δz (mm)		Carga de Rotura, Q (kN)	
		(φ=3 mm)	(φ=4 mm)	(φ=3 mm)	(φ=4 mm)
Carga distribuida “modelo y”	1	301,79	282,57	242,64	455,98
	2	315,09	312,44	254,67	424,18
	3	297,65	331,53	241,23	493,60
<b>Valor Medio</b>		<b>304,84</b>	<b>308,85</b>	<b>246,18</b>	<b>457,92</b>

**TABLA I.- Valores resultantes de la carga de rotura y desplazamiento vertical del ensayo realizado con carga distributiva unidireccional.**

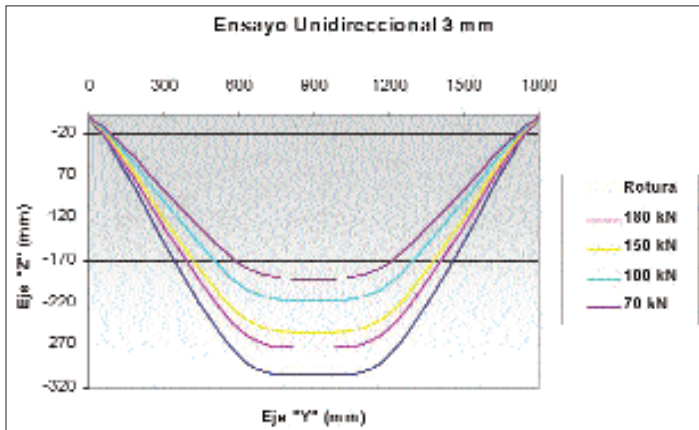


Fig. 3.- Deformadas de la malla Tecco® G-65 (φ=3 mm), en la dirección y para diferentes escalones de carga distribuida del ensayo unidireccional.

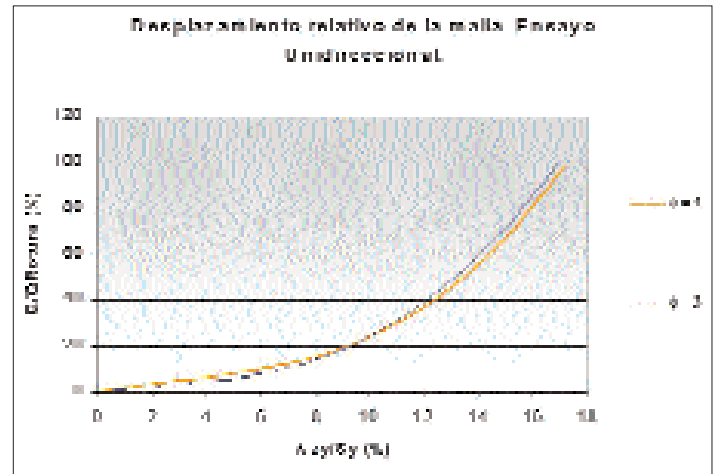


Fig. 4.- Desplazamiento relativo de la malla.

la curva ajustada ( $A_i$ ) resolviendo la integral curvilínea entre los puntos de arrojamiento para cada una de las deformadas (Tabla II). La deformación unitaria será entonces igual a:

$$\varepsilon_y = \frac{A_i - S_y}{S_y} \times 1.000 \text{ (mm/m)}$$

Para condiciones de carga diferentes a las de rotura, los desplazamientos verticales obtenidos en el punto central de la malla, aparecen en la Tabla III.

Para diferentes dimensiones del cuadro de arriostre, el desplazamiento vertical máximo para cualquier condición de carga se obtendrá aplicando la relación porcentual que aparece en la última columna de la Tabla III.

**Desplazamiento relativo de la membrana y control de deformación del sistema**

La relación entre el desplazamiento relativo ( $\Delta R$ ), y la carga relativa aplicada a la ma-

lla ( $QR$ ), representa en síntesis el comportamiento de este tipo de membrana bajo la aplicación de una carga distribuida (Fig. 4).

Del resultado de los ensayos se deduce que, para cargas cercanas a la rotura, los desplazamientos relativos de las mallas en la dirección de la carga son del orden del 17%.

Ajustando una curva al conjunto de puntos de las dos series de datos correspondientes al ensayo unidireccional representados anteriormente, se obtiene la siguiente expresión:

$$QR = 0,0205 \Delta R^3 - 0,0754 \Delta R^2 + 1,151 \Delta R$$

siendo:

$QR$  = Carga relativa aplicada en % del soporte total en rotura.

$\Delta R$  = Desplazamiento relativo en el centro de la malla aplicada en % de la distancia  $S_y$ .

La ecuación anterior caracteriza el comportamiento de la malla Tecco® G-65 para cual-

quier diámetro de alambre, siempre que se mantengan sus características geométricas.

Para valores de carga aplicada del 50% del soporte total en rotura, el valor de  $\Delta R$  es del 13%. Así, para valores de  $S_y = 3,0$  m, el desplazamiento de la malla en la dirección de la carga aplicada será  $\Delta Z_y = 0,39$  m, evidentemente muy elevado, por lo que el empleo únicamente de la carga de trabajo como criterio de diseño resulta insuficiente. En estas condiciones, se hace necesaria la introducción del control del desplazamiento de la malla como criterio de diseño.

Para limitar el valor del desplazamiento que se le puede permitir al sistema al aplicarle la carga, sin limitar la capacidad de carga del mismo, se aplicará una precarga inicial, de tal forma, que se reduzca el desplazamiento relativo en condiciones de trabajo de la malla.

Con precargas del 15% del soporte total en rotura, se consigue eliminar la zona inicial de la curva (Fig. 4); así con el sistema preesforzado, el desplazamiento relativo de la malla será aproximadamente el 5%, con lo que el desplazamiento total se reduciría a 0,15 m. Este último valor se puede reducir aún más con el aumento de la precarga durante el montaje del sistema.

El resumen de los resultados de los ensayos se expone en la Tabla IV.

Posición en la dirección "y"	Ecuación de la deformada	Longitud de la curva (mm)	Deformación $\varepsilon_y$ (mm/m)
$Q_{Rotura}$	$\Delta z = 0,0004 y^2 - 0,7106 y + 13,849$	1.922	67,78
$Q_{Trabajo}$	$\Delta z = 0,0003 y^2 - 0,5895 y + 12,631$	1.885	47,22

Tabla II.- Valores de deformación unitaria de la malla.

Carga aplicada, Q (kN)		Q / Q <sub>Rotura</sub> (%)		$\Delta_z [Q]$ (mm)		$\Delta_z / S_y$ (%)	
3 mm	4 mm	3 mm	4 mm	3 mm	4 mm	3 mm	4 mm
246,18	457,92	100	100	305	309	16,94	17,17
180	250	73,12	54,59	272	255	15,11	14,17
150	200	60,93	43,68	254	236	14,11	13,11
100	150	40,62	32,76	218	191	12,11	10,61
70	100	28,43	21,84	192	168	10,67	9,33

Tabla III.- Desplazamientos verticales obtenidos para condiciones de carga diferentes a las de rotura.

**Modelación matemática del sistema flexible de soporte**

La determinación de los parámetros de capacidad de carga y deformación del sistema de soporte empleando la membrana flexible Tecco® G-65, se han obtenido mediante el empleo de dos modelos matemáticos diferentes.

# T A L U D E S

DIÁMETRO DEL ALAMBRE (MM)		$\phi = 3$	$\phi = 4$
Ensayo con carga distribuida, "Unidireccional"	Desplazamiento Vertical en Rotura, $\Delta Z$ (mm)	305	309
	Carga de Rotura, $Q$ (kN)	216	158
	Carga de Trabajo, $P_T$ (kN/m <sup>2</sup> )	39,3	73,0
	Carga de Trabajo, $P_T$ (kN/m)	70,0	130,0
	Deformación en la dirección principal	Def. Unitaria en Rotura, $\epsilon_T$ (mm/m)	67,78
	Def. Unitaria de Trabajo, $\epsilon_{YT}$ (mm/m)	47,22	46,11

TABLA IV.- Resumen de los resultados de los ensayos.

## Solución del modelo cilíndrico con el procedimiento de geometría impuesta

El valor del soporte específico  $P$  (kN/m<sup>2</sup>) de una membrana anclada según las condiciones de borde de un modelo determinado de trabajo, puede determinarse a partir del equilibrio de fuerzas del sistema, determinando las relaciones geométricas del elemento deformado y los resultados de laboratorio de los ensayos carga-deformación en el ensayo de tracción directa en el estado tensional plano de la membrana empleada. Este procedimiento, desarrollado por Torres Vila, J.A., y empleado por Geobrigg para el diseño de sistemas flexibles con redes de cables de acero, se ha denominado *modelo con geometría impuesta*.

Para el caso del modelo cilíndrico que se presenta en este trabajo (Fig. 5), se tienen los resultados de los ensayos de carga-deformación con confinamiento lateral de la malla medidos en la dirección principal de carga. Los parámetros geométricos de la membrana se obtienen de la forma siguiente:

- *Longitud del arco (A)*. La longitud de la cuerda deformada, para diferentes escalones de carga aplicada a la membrana, se obtiene con el valor de la deformación unitaria obtenida en los ensayos a tracción directa:

$$A = S_y(1 + \epsilon_y)$$

- *Angulo semi inscrito  $\theta/2$* . El valor del radio de cilindro, para diferentes longitudes de arco será:

$$A = 2R(\theta/2), \text{ siendo}$$

$$S_y = 2R \text{sen}(\theta/2)$$

Desarrollando en serie la función del seno se obtiene que:

$$\theta/2 = \sqrt{6\left(1 - \frac{S_y}{A}\right)}$$

Radio de la circunferencia (R):

$$R = \frac{S_y}{2 \text{sen}(\theta/2)}$$

Desplazamiento de la malla en el centro del paño:

$$\Delta Z_y = R\left(1 - \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)$$

Del equilibrio de fuerzas del sistema se obtiene que:

$$\sigma_y = pR$$

Así el soporte unitario del sistema será:

$$p = \frac{\sigma_y}{R} \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

Los resultados obtenidos, con la aplicación del modelo anterior aparecen en la *Tabla V*.

## Solución del modelo cilíndrico basado en la teoría de la elasticidad

La solución al sistema de sostenimiento flexible, también se puede obtener mediante el empleo de la siguiente fórmula, donde los términos son los mismos que el de las fórmulas anteriores, incluyendo además el módulo de *elasticidad* confinado en la dirección principal:

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

$$\theta/2 = 180 - 2 \arctan \frac{S_y}{2\Delta Z};$$

$$R = \frac{S}{2 \text{sen} \theta/2}; \quad A = R \cdot \theta$$

$$\epsilon = \frac{A - S}{S}; \quad \sigma = E_{yc} \cdot \epsilon$$

Los resultados obtenidos con la aplicación del modelo anterior aparecen en la *Tabla VI*.

Del análisis de los resultados de las tablas anteriores, se aprecia la elevada coincidencia de los dos modelos matemáticos empleados.

Malla TECCO G-65 ( $\phi = 3$ mm)					Carga de trabajo: 90 kN/m (FS=1,67)			
Distancia $S_y$ (m): 1,8					Carga de Rotura: 150 kN/m			
Tensión malla (kN/m)	Deformación unitaria $\epsilon$ (mm/m)	Longitud del Arco "A" (m)	Semi ángulo central " $\theta/2$ "	Radio de curvatura "R" (m)	Desplaz. Vertical " $\Delta Z$ " (m)	Soporte unitario "p" (kN/m <sup>2</sup> )	Soporte unitario "q" (kN/m)	Soporte total "Q" (kN)
40	21,80	1,839	20,90	2,970	0,153	15,55	28,02	49
60	32,50	1,859	21,90	2,138	0,199	28,07	50,52	88
80	43,20	1,876	22,58	1,863	0,229	42,50	78,49	133
90	48,20	1,887	23,10	1,795	0,242	50,11	90,26	157
120	61,80	1,917	24,62	1,681	0,281	75,75	136,36	237
140	75,70	1,936	27,23	1,486	0,303	94,12	169,41	295
151,46	82,55	1,949	28,78	1,436	0,317	105,35	189,36	330
Malla TECCO G-65 ( $\phi = 4$ mm)					Carga de trabajo: 156 kN/m (FS=1,67)			
Distancia $S_y$ (m): 1,8					Carga de Rotura: 260 kN/m			
Tensión malla (kN/m)	Deformación unitaria $\epsilon$ (mm/m)	Longitud del Arco "A" (m)	Semi ángulo central " $\theta/2$ "	Radio de curvatura "R" (m)	Desplaz. Vertical " $\Delta Z$ " (m)	Soporte unitario "p" (kN/m <sup>2</sup> )	Soporte unitario "q" (kN/m)	Soporte total "Q" (kN)
40	4,64	1,809	9,74	5,318	0,077	7,52	13,54	9
80	10,54	1,819	14,34	3,835	0,113	22,01	39,87	69
120	16,16	1,833	18,75	2,901	0,149	42,85	77,13	134
156	25,691	1,848	22,62	2,310	0,180	65,65	119,99	209
180	33,19	1,850	25,16	2,117	0,201	85,02	153,03	266
220	45,61	1,882	29,31	1,838	0,235	119,58	219,72	379
260	69,904	1,908	33,38	1,635	0,270	158,91	289,09	498

TABLA V.- Resultados obtenidos con la aplicación del modelo unidireccional Modelo Y. Cálculo con Geometría cilíndrica impuesta.

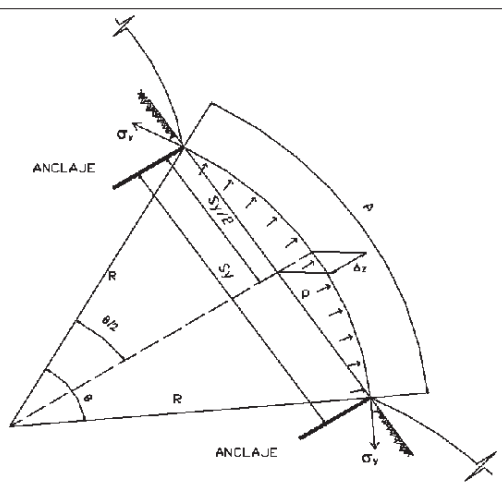


Fig. 5. Esquema del modelo cilíndrico.

Malla TECCO G-65 ( $\phi = 3 \text{ mm}$ )				Modulo de elasticidad confinado $E_{cy}$ (kN/m): 1.898				
Distancia $S_y$ (m): 1,8				Coeficiente de Poisson $\mu_{cy}$ : 0,217				
Tensión malla (kN/m)	Deformación unitaria $\epsilon$ (mm/mm)	Longitud del Arco $\overline{AC}$ (m)	Radio de curvatura $\overline{TC}$ (m)	Semi-ángulo central $\theta/2^\circ$	Desplaz. Vertical $\Delta z_y$ (m)	Soporte unitario $q^*$ (kN/m $^2$ )	Soporte unitario $q^*$ (kN/m $^2$ )	Soporte total $Q^*$ (kN)
29,83	15,83	1,828	2,983	17,56	0,139	10	18,0	31
62,86	33,62	1,861	2,095	25,44	0,203	30	54,0	94
90,53	46,72	1,868	1,775	30,47	0,245	51	91,8	160
112,79	61,02	1,910	1,611	33,96	0,275	70	126,0	219
134,52	73,14	1,932	1,495	37,02	0,301	90	162,0	282
151,00	82,42	1,946	1,425	39,16	0,320	106	190,8	332

Malla TECCO G-65 ( $\phi = 4 \text{ mm}$ )				Modulo de elasticidad confinado $E_{cy}$ (kN/m): Variable				
Distancia $S_y$ (m): 1,8				Coeficiente de Poisson $\mu_{cy}$ : 0,217				
Tensión malla (kN/m)	Deformación unitaria $\epsilon$ (mm/mm)	Longitud del Arco $\overline{AC}$ (m)	Radio de curvatura $\overline{TC}$ (m)	Semi-ángulo central $\theta/2^\circ$	Desplaz. Vertical $\Delta z_y$ (m)	Módulo de elasticidad $E_{cy}$ (kN/m)	Soporte unitario $q^*$ (kN/m $^2$ )	Soporte total $Q^*$ (kN)
73,21	10,36	1,819	3,680	14,23	0,112	7100	20	63
118,75	16,57	1,830	2,919	17,96	0,142	7100	40	125
155,38	24,45	1,844	2,420	21,76	0,173	6425	64	200
176,89	30,23	1,851	2,200	24,15	0,193	5900	80	251
201,12	36,80	1,865	2,011	26,58	0,213	5550	100	313
221,96	41,38	1,880	1,890	29,12	0,231	5100	120	376
240,79	52,11	1,891	1,720	31,56	0,251	4700	140	438
268,12	60,86	1,910	1,613	33,91	0,271	4350	160	501

TABLA VI.- Resultados obtenidos con la aplicación del modelo unidireccional Modelo Y. Cálculo con Cálculo con Modelación Matemática.

### Validación de los modelos físico-matemáticos

En el ensayo de carga distribuida Unidireccional ( $\phi = 3 \text{ mm}$ ), la carga de rotura es de 246 kN con un  $\Delta Z$  de 305 mm, mientras que los obtenidos con el modelo son 332 kN y 319 mm. La diferencia se debe a la dificultad de acercar la sobrecarga a los bordes laterales del marco de ensayo. Debido a esto, la deformada obtenida en las condiciones del ensayo se acerca más a una parábola que a una circunferencia.

Si se dibuja en una misma gráfica la deformada obtenida del ensayo para la carga de rotura y una circunferencia de desarrollo igual a la deformada del ensayo (Fig. 6), se observa que el ángulo tangente en el borde del marco en condiciones de rotura varía, siendo mayor para el caso de la circunferencia ( $\alpha_r = 35^\circ$ ), que para la parábola del ensayo ( $\alpha_r = 25^\circ$ ). Teniendo en cuenta las condiciones de equilibrio de fuerzas en el marco de ensayo, el valor de la carga que debió obtenerse en el ensayo será:

$$Q_{Rotura} = 2\sigma_y \text{ sen } \alpha_r$$

La carga de ensayo, corregida para las condiciones de una deformada cilíndrica, se puede obtener multiplicando los valores obtenidos por la relación entre los senos de estos dos ángulos:

$$Q_{Corregida} = Q_{Medida} \frac{\text{sen } 35}{\text{sen } 25} = 246 \times 1,357 = 333 \text{ kN}$$

El valor así obtenido, es semejante al calculado en la tabla anterior para el modelo cilíndrico con geometría impuesta, por lo que se puede concluir que existe una coincidencia entre el comportamiento real de la malla bajo carga y los modelos matemáticos desarrollados.

En el ensayo de carga distribuida Unidireccional ( $\phi = 4 \text{ mm}$ ), la carga de rotura es de 458 kN con un  $\Delta Z$  de 309 mm. Comparando estos valores con los obtenidos en la tabla, se observa que la carga de rotura calculada es similar a la medida (8% de diferencia), siendo del mismo orden los valores del desplazamiento vertical. La justificación de esta pequeña diferencia es la misma que en el ensayo anterior ( $\phi = 3 \text{ mm}$ ), pero la diferencia es menor porque la carga aplicada es muy alta y en estas condiciones la sobrecarga se reparte mejor.

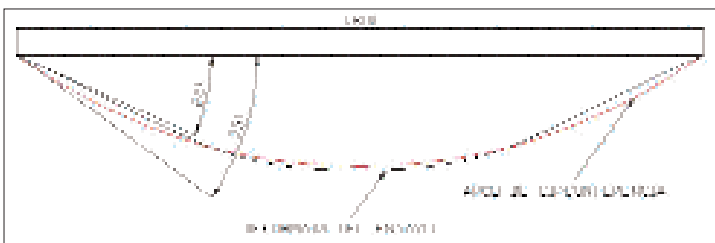


Fig. 6.- Deformadas del ensayo y de la circunferencia para igual desarrollo.

### Conclusiones

Se determinó la elevada coincidencia de los resultados de la aplicación de los modelos teóricos con los obtenidos en las instalaciones de ensayo, así como la correspondencia exacta entre el modelo de cálculo basado en la teoría de la elasticidad y el modelo denominado de *geometría impuesta*, el cual se ha empleado para el cálculo de la capacidad de soporte de los sistemas denominados *Pentifix* que utilizan la red diagonal de cables de acero como membrana de sostenimiento.

Los ensayos de carga distribuida demostraron que las mallas tipo *Tecco® G-65* instaladas en las condiciones del modelo cilíndrico, pueden alcanzar en condiciones de trabajo capacidades de soporte de hasta 35-40 kN/m $^2$ , para las mallas con alambres de diámetro 3,0 mm, y de hasta 40-60 kN/m $^2$ , para las mallas con alambres de diámetro 4,0 mm, con valores de  $FS > 2$ .

La deformación adicional de la superficie de la membrana posterior a la instalación, puede disminuirse racionalmente hasta los niveles deseados, mediante la pretensión controlada del sistema durante la puesta en obra, empleando la ley de variación entre la carga relativa aplicada a la membrana con respecto al desplazamiento relativo del sistema.

Teniendo en cuenta que el soporte total de la malla para el caso del modelo unidireccional es independiente de la distancia entre arrostres, las condiciones del ensayo son representativas para cualquier valor de  $S_y$ . Los valores del desplazamiento vertical variarán con la distancia entre arrostres, pero manteniendo constante el valor del desplazamiento relativo ( $\Delta Z_y / S_y$ ).

### Referencias

- TORRES VILA, J. A. (1997). *Procedimiento de análisis y diseño para la aplicación de redes de cables de acero en la estabilización de taludes*. IV Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Granada. España.
- MUÑOZ PÉREZ, B. Y TORRES VILA, J. A. (2000). *Sistemas de soporte flexibles en la estabilización de taludes y control de la erosión*. II Congreso Andaluz de Carreteras. España.