

Refuerzo de suelos con fibras sintéticas



Comité de Geotecnia Vial de la
Asociación Técnica de Carreteras.

Ponentes: Carlos Fernández Calvo,
José Manuel Martínez Santamaría
y José María Thode Mayoral.

Resumen

Desde la Antigüedad se han utilizado fibras naturales para la mejora de las propiedades de los materiales que intervienen en la construcción. En la actualidad se están empezando a emplear fibras artificiales que se obtienen como excedente de procesos industriales y son susceptibles de ser utilizadas como mejora de diferentes materiales, entre otros el suelo.

El Comité de Geotecnia Vial de la Asociación Técnica de Carreteras ha venido desarrollando un conjunto de trabajos con relación al empleo de fibras en el refuerzo de suelos. Estos trabajos, básicamente, han consistido en realizar una revisión de las publi-

caciones más significativas a las que, con relación a este tema, ha tenido acceso el Comité y, por otro lado, en la ejecución de una serie de ensayos de laboratorio con diferentes muestras de suelos mezclados con distintos tipos de fibras.

A efectos de facilitar la redacción del artículo, éste se ha dividido en dos partes: una primera, en la que se incluye una descripción de las características y propiedades de las fibras; y una segunda parte, en la que se incluyen las experiencias de laboratorio realizadas con suelos procedentes de Andalucía y de Castilla y León.

Con relación a esta segunda parte de experiencia de ensayos, se ha estructurado recogiendo, por un lado, la descripción de las fibras utilizadas, coincidentes en el conjunto de suelos ensayados, y, por otro, la descripción de los ensayos y los resultados obtenidos en los mismos, tanto con suelos andaluces como con suelos de Castilla y León.

Palabras Clave: Refuerzo, suelos, fibras.

Parte I: Propiedades y características de las fibras

I-1. Generalidades

Las fibras pueden ser de origen natural o de origen artificial o sintético. Las fibras naturales de origen animal y vegetal son biodegradables y se usan sólo en los casos que se requiera dicha cualidad.

Las fibras naturales minerales (amianto, asbesto) tienen diferentes usos industriales, que hoy tienen prohibido su uso por ser cancerígenas. Otras fibras derivadas de metales (alambres) no se usan solas para refuerzo. Algunas, como las de vidrio, podrían usarse; pero son muy quebradizas y tienen una superficie muy lisa, por lo que su uso se restringe también a aplicaciones especiales.

En cuanto a las fibras sintéticas, sería muy largo enumerarlas todas, por lo que se va a mencionar las más usadas en el mercado, las de mayor producción.

Estas fibras son:

- Poliacrilonitrilo PAN (estándar y alta tenacidad).

- Poliamidas (varios tipos de poliamida).

- Poliéster PES (estándar y alta tenacidad).

- Polietileno PE (varios tipos).

- Polipropileno PP (atáctico, isotáctico: estándar o alta tenacidad).

Todas ellas, además, pueden tener tratamientos antibacterias y antimoho, así como otras características diferenciadas, tanto físicas como químicas.

Cabe mencionar también que, dado que la investigación no cesa, todos los años salen nuevas fibras, o nuevas familias de polímeros o nuevos tratamientos o modificaciones, por lo que la lista que se encuentra en este artículo se debe considerar como orientativa a día de hoy, y naturalmente variará en el futuro.

I-2. Características de las fibras

a. Propiedades mecánicas y características físicas

- Tenacidad (N/tex). Deben tener una tenacidad suficiente, y siempre mayor que el esfuerzo que deben soportar.

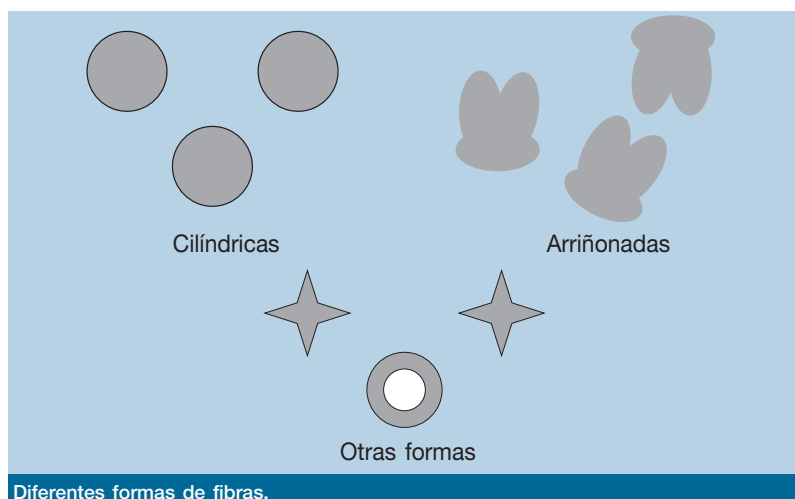
- Alargamiento (%). Para una misma tenacidad, cuanto menos alargamiento mejor; o, lo que es lo mismo, a mayor módulo de elasticidad (N/tex), mejor es la fibra para refuerzo.

- Densidad o peso específico de la fibra (g/cm^3). Cuanto menor sea, mayor será la superficie de fibra para un mismo peso dado.

- Diámetro (μm). Cuanto menor sea el diámetro, mayor será la superficie específica para un mismo peso.

- Título (dtex). Peso en gramos de 10 000 m de fibra o filamento.

- Forma. Debido a las características de cada polímero y a la forma de obtención de las fibras y los dis-



Diferentes formas de fibras.

positivos empleados, las fibras pueden tener diferentes formas (véase *figura superior*).

- Superficie (mm^2/m). También en función del polímero y de su forma de obtención, la superficie puede ser lisa o rugosa, con lo cual la superficie específica será superior en este segundo caso y, por tanto, mayor la fuerza desarrollada por el rozamiento con otros materiales.

- Resistencia a la compresión. Es la tensión de rotura en un ensayo a compresión.

- Módulo de cizallamiento. Es el módulo de elasticidad medido en un ensayo de torsión.

- Rizado (ondas/cm y amplitud de las ondas). Las fibras sin rizado no “enlazan” entre ellas. Las fibras con rizado pueden quedar retenidas unas con otras.

b. Propiedades químicas y medioambientales

- Resistencia a los ácidos.

- Resistencia a los álcalis.

- Resistencia a los disolventes.

- Resistencia a los rayos UV y a la intemperie.

- Resistencia a los microorganismos.

- Tasa de humedad.

- Biodegradabilidad.

I-3. Elección de las fibras adecuadas para cada aplicación

Como se puede imaginar y cono-

cer, por las características intrínsecas de cada polímero, de la forma de obtenerlo (proceso) y de los aditivos que se le hayan podido incorporar, se encuentran en el mercado una variedad enorme de fibras de diferentes características que, si bien en un principio fueron concebidas para emplearse en la industria textil, hoy en día ya se están fabricando para diferentes ramos de la ingeniería.

El factor o característica dominante a la que, al final, se debe remitir la selección es el coste final de la fibra en la proporción adecuada para cumplir con unas especificaciones o expectativas dadas.

➤ Si lo que se quiere es que la superficie específica de la fibra sea elevada, pues su misión ofrecer resistencia al deslizamiento, se elegirá una fibra de pequeño diámetro y a ser posible de sección no circular y rugosa para ofrecer una mayor superficie por unidad de peso.

➤ Si lo que se pretende es que sea biodegradable, se usarán fibras naturales animales o vegetales o sintéticas, con diferentes componentes químicos que hagan descomponer a la fibra a lo largo de un cierto tiempo, ya sea por sí solas o en contacto con ciertas sustancias o con ciertos medios.

➤ Si estas fibras deben estar en contacto con microorganismos, ácidos o álcalis, productos oxidantes, etc., se deberá revisar su comportamiento frente a estas sustancias.

Fibra	SIM	p.e. g/cm ³	Tenac* N/tex	A.Rot %	Forma Secc.	Resistencia a			
						Ácidos	Álcalis	UV	Microorg.
Poliacrilonitrilo	PAN	1.17	0,2-0,4	17-45	Riñón	+++	++	++++	++++
Poliamida 6	PA6	1.12	0,4-0,57	18-30	Circular	++	++	++	+++
Poliamida 6.6	PA66	1.14	0,4-0,44	15-42	Circular	+	+++	+	++
Poliéster	PES	1.38	0,37-0,50	13-40	Circular	+++	++	+++	+++
Polietileno	PE	0,95	0,5	18-30	Circular	++++	++++	++	++++
Polipropileno	PP	0,91	0,4	20-25	Circular	++++	++++	+	++++

*Nota: Las mismas fibras en alta tenacidad (HT ó AT) aumentan su tenacidad un 70-80 %.

Tabla 1.

Todas estas premisas o pre-elecciones de fibras deben estar contras-tadas con su coste y su facilidad de obtención en el mercado.

Generalmente, las fibras reproce-sadas o regeneradas (que son las fi-bras que se vuelven a procesar des-pués de haber sufrido uno o más procesos de fabricación) se encuen-tran en el mercado a precios inferio-res a los de las fibras vírgenes; pero suelen tener mermadas alguna de sus características, especialmente en lo que se refiere a su tenacidad.

Como se ha dicho, existen unas fi-bras que, por su proceso de obten-ción (por ejemplo, haberlas pigmenta-do y no haber logrado el color deseado) no son aptas para lo que fueron fabricadas, pero siguen siendo aptas para otras funciones: refuerzo de tierras, de hormigones, de mezclas bituminosas, fabricación de geotexti-les, etc.

En el caso de seleccionar una fibra para que sujete o arme tierras, hor-migones o mezclas bituminosas, ade-más de la compatibilidad o resisten-cia a los diferentes agentes que pueden atacarla o perjudicarla, tiene que tener una buena superficie espe-cífica y una tenacidad suficiente, o, di-cho de otro modo, tener un módulo adecuado, facilidad para encontrar

cantidades suficientes en el mercado y precios o costes asequibles.

Cuando se dice que una tenacidad o módulo de elasticidad es adecua-da, lo que se quiere decir es que las fibras deben ser más tenaces que los materiales que deben armar. No es necesario que sean mucho más tena-ces, ya que sólo se aprovecha la te-nacidad compatible con el rozamien-to, es decir: a mayor rozamiento mayor será la tenacidad necesaria pa-ra que las fibras no se rompan ni que el material se disgregue.

La gran mayoría de fibras sintéti-cas tiene suficiente tenacidad para cumplir los requisitos necesarios pa-ra su uso en refuerzo; incluso las fi-bras reprocesadas, si es que no se han degradado mucho al procesarlas una o más veces, suelen tener la te-nacidad suficiente para la mayoría de aplicaciones.

I-4. Fibras para el refuerzo de tierras

Como se ha visto en el apartado anterior, se deben elegir las fibras en función de sus características técni-cas y también en función de su faci-lidad de utilización y su coste.

Hoy por hoy, las fibras sintéticas de mayor producción en el mercado, las más utilizadas y también las de

menor coste (posiblemente por ser las que se producen a mayor escala) son PAN, PA 6.6, PA 6, PES, PE, PP.

Sus precios no varían mucho de unas a otras, son fáciles de encontrar en el mercado en grandes cantidades y se pueden conseguir también re-procesadas.

Por todo ello, se muestran en la ta-bla 1 las características representati-vas de estas fibras para estos usos.

Desde el punto de vista de la fa-bricación, aunque todas ellas pueden, en teoría, fabricarse a diámetros muy pequeños, en la práctica resulta que, por ejemplo, las fibras PE y PP no se fabrican a menos de 3 dtex mientras que las demás se fabrican normal-mente hasta 1,5 dtex.

En principio, todas ellas deben ser válidas para el refuerzo de suelos, pe-ro para hallar una relación entre diá-metro y superficie específica, se mues-tra la tabla 2.

Como puede observarse, la super-ficie específica es muy similar de una fibra a otra y, realmente, la diferencia está más en el diámetro o finura que en la clase de polímero.

Otra cosa a contemplar puede ser la compatibilidad / incompatibilidad de las fibras con el medio que se refuer-za por el hecho de que algunas (PAN) son susceptibles de hacer ciertas unio-

Fibra	SIM	1,65 dtex		3,3 dtex		6,6 dtex	
		Φ µm	Superficie m ² /kg	Φ µm	Superficie m ² /kg	Φ µm	Superficie m ² /Kg
Poliacrilonitrilo	PAN	12	300 000	19	200 000	26	150 000
Poliamida 6	PA6	13	290 000	20	176 000	27	131 000
Poliamida 6.6	PA66	13	270 000	20	177 000	27	131 000
Poliéster	PES	11	260 000	17	170 000	25	116 000
Polietileno	PE	14	300 000	21	200 000	29	145 000
Polipropileno	PP	15	290 000	22	199 000	30	146 000

Tabla 2.

nes físico-químicas, mientras que otras como el PP, PE y PES no tienen tantas posibilidades.

También, desde el punto de vista de “manejabilidad” o práctica de uso, las fibras como el polipropileno son mucho más volátiles que las demás, lo cual requiere ciertos cuidados cuando hay que colocarlas con viento.

En cuanto a la longitud de las fibras se puede admitir que las fibras cortas y largas sirven para refuerzo y que las muy cortas sólo para refuerzo, mientras que las largas pueden ejercer también funciones de retención o filtro. El uso, pues, de unas o de otras, o de ambas, dependerá de las funciones que queramos que realicen.

También se puede fabricar in situ una especie de geotextil: bastará esparcir por la superficie del suelo una capa de fibras, que pueden ser cortas si sólo tenemos que reforzar el terreno, o cortas y largas o sólo largas si además queremos que hagan funciones de filtro (o hasta drenaje y protección). A continuación podemos poner la siguiente capa o tongada de tierra.

Por orden creciente de precios las fibras usadas, así como sus correspondientes fibras reprocesadas, son:

- PP
- PES
- PAN
- PE
- PA

Para elegir la longitud de las fibras para “armado”, deberemos tener en cuenta la granulometría del suelo. Así, por ejemplo, una fibra de 4 mm de longitud no puede armar áridos de más de 50 mm de diámetro, ni al contrario, no se puede armar un árido fino de 2 mm con una fibra de 100 mm puesto que lo más fácil es que se apelmace y que se hagan pelotas de fibra. Las longitudes estándar que se encuentran en el mercado son 25 mm, 60 mm, 80 mm, 110 mm, si bien, pueden conseguirse longitudes menores y mayores para casos especiales.

Al tratar este tema hemos entrado también en la capacidad de dispersión y reparto de la fibra en el suelo. Las fibras se apelmazan y forman gru-

mos o pelotas. Deben tener un tratamiento superficial para que se dispersen bien. A ello ayuda el que la fibra sea mejor o peor conductora de electricidad. Una fibra mala conductora se electriza más fácilmente.

Para repartir en la tierra, las fibras que mejor se reparten son las de PAN, seguidas de las de PES y las de PP.

I-5. Conclusiones y comentarios (Parte I)

A partir de los datos de los apartados anteriores y del análisis de las publicaciones revisadas, incluidas como bibliografía, se considera que, entre otras, pueden hacerse las siguientes apreciaciones con relación a las fibras.

1. Existen diferentes fibras que pueden ser utilizadas en el refuerzo de suelos. Las más comunes para usar en estos momentos son las acrílicas poliacrilonitrilo, las de poliéster y las de polipropileno.

2. No todas las fibras producen los mismos efectos de refuerzo. Los efectos de refuerzo para tierras los producen más las fibras de mayor superficie específica (más finas, sección no redonda, superficie rugosa).

3. Las características intrínsecas de cada fibra son las que pueden determinar su mejor o peor comportamiento.

4. Existe una relación directa entre la superficie específica de cada fibra y su capacidad de refuerzo. (A mayor superficie específica, mayor refuerzo)

5. Las fibras cortas refuerzan, pero no hacen una función marcada de filtro o retención.

6. Las fibras largas pueden hacer también la función de filtro (efecto de retención de finos), pero son más difíciles de mezclar y conseguir una mezcla uniforme. El rizado de las fibras ayuda a que éstas se liven unas con otras y se acentúe su acción de filtro, minimizando la infiltración del agua.

7. Existen aparatos de laboratorio y normas para ensayos de medida de finuras, longitudes, tenacidades, etc., por lo que pueden determinarse estos valores a priori y relacionarlos con los ensayos de tierras cargadas con fibra.

8. De forma general, parece que las

aplicaciones se centran en inestabilidades superficiales, que pueden alcanzar algunos metros, siendo una alternativa a la solución de retaluzar con menos pendiente, al conseguirse una mejora de la resistencia al corte, mejorándose, además, el comportamiento frente a la erosión de los taludes tratados.

9. El procedimiento de reparación exige una excavación del material inestabilizado por debajo de la superficie de rotura. La geometría de la excavación (mediante bermas horizontales y retaluzado) debe facilitar la posterior colocación del material, que puede ser el mismo, o bien de préstamo según los casos, una vez mezclado con las fibras.

10. El mezclado de las fibras con el suelo se realiza con máquinas del tipo mezcladoras por rotación o gradas rotatorias (*rotary mixer, roto-till pulverizer*).

11. Una vez realizada la mezcla del suelo con las fibras, el material se extiende y compacta con medios convencionales, que deben especificarse en el proyecto. No obstante, parece recomendable alcanzar, salvo criterios específicos de la obra, densidades del orden del 95 % del Proctor Normal, siendo preferible el uso de compactadores de pata de cabra, con espesores de tongada limitados por la longitud de los dientes.

12. Las dosificaciones se realizan en función del peso seco del material, pudiendo estar en el orden del 0,2-0,4 %. El control de la dosificación se puede hacer en función de las bolsas de fibras necesarias por capa para una correcta dosificación.

13. La longitud de las fibras está asociada con la granulometría del material que se va a tratar, aunque los artículos no recogen criterios con relación a este parámetro.

14. De forma general, parece que los materiales más usados en las fibras para refuerzo de suelo son el polipropileno y el poliéster.

15. La mejora que se obtiene se asocia a un aumento de la resistencia al corte, cuya cuantificación en ensayos puede llegar a ser impor-



Foto 1. Aspecto al microscopio electrónico de los haces de fibras mezclados con arcillas.

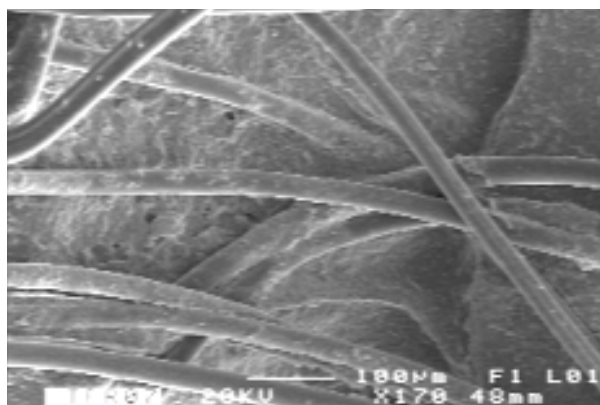


Foto 2. Detalle al microscopio electrónico de los haces de fibras mezclados con arcillas.

tante. En este sentido, cabe indicar que las mejoras de resistencia que se consiguen son altas; pareciendo que, en el caso de la cohesión, la mejora se puede asociar con un aumento de la cohesión aparente por efecto de las fibras; en cuanto a los ángulos de rozamiento, los valores que se obtienen, en determinados casos, parecen excesivamente altos (hasta 54°) y de difícil justificación. Los ensayos realizados son en general triaxiales, aunque en algún caso también se habla de ensayos de corte directo.

Parte II: Experiencias de laboratorio

II.1. Introducción

En esta segunda parte del artículo se presentan los resultados de laboratorio obtenidos a partir de muestras de diferentes suelos mezclados con distintos tipos de fibra. Se han tomado suelos representativos de Andalucía y de Castilla y León, con el fin de ver la modificación de las propiedades geotécnicas por la mezcla.

II.2. Procedimiento operativo

II.2.1. Fibras de refuerzo

Las fibras utilizadas para los ensayos son fibras sintéticas remitidas por PUNSA (Punzonados Sabadell, S.L.).

Para la preparación previa al mezclado de las fibras ha sido necesario un desmenuzamiento y esponjamiento manual muy minucioso, dado que las fibras se presentan en haces difíciles de separar. Pos-

teriormente se ha efectuado la mezcla manual con el suelo. La proporción de la mezcla ha sido un 0,2% en peso de fibra respecto del suelo. Este valor es el recomendado en la información técnica analizada por el Comité de Geotecnia Vial, como la proporción más interesante, tanto bajo el punto de vista económico como de mejora de las propiedades geotécnicas (fotos 1 y 2).

Se han empleado seis tipos de fi-



Foto 3. Fibras empleadas en la mezcla con el suelo.

Características de las fibras enviadas para los ensayos de refuerzo de tierras					
Ref. Fibra	Polímero	Título	Diámetro	Forma	Tenacidad
Long. mm		(finura) dtex	μ m		N/tex
ASFORT CEMPO 100	Polipropileno (PP)	6,6	21.48	Cilíndrica	0,50-0,60
ASFORT CEMPO 200	Polipropileno (PP)	6,6	21.48	Cilíndrica	0,50-0,60
ASFORT ASAN 40	Poliacrilonitrilo (PAN)	3,3	13.40	Arriñonada	0,20-0,45
TRR PO 6	Polipropileno (PP)	3,3	15.19	Cilíndrica	0,40-0,50
TRR PO 12	Polipropileno (PP)	3,3	15.19	Cilíndrica	0,40-0,50
TRR PO 18	Polipropileno (PP)	3,3	15.19	Cilíndrica	0,40-0,50

Tabla 3.

Suelos ensayados por el laboratorio Euroconsult-Andalucía										
Descripción	Granulometría Pasa (mm)			Límites de Atterberg			Fibra	Próctor Normal UNE 103500		Índice CBR
	# 5	# 0,40	# 0,08	LL	LP	IP		Dmáx g/cm³	H. óp. %	
Gravas limosas GW-GM	51,4	29,5	11,3	NP	NP	NP		1,79	15	18,3
							0,2% TRR PO 12	1,76	15	14,9
Arena arcillosa SC	100	88,2	34,2	32,0	15,0	17,0		1,85	16,2	3,2
							0,2% TRR PO 6	1,82	16,7	2,7
Arena limosa con gruesos SM	100	64,6	15,4	NP	NP	NP		1,91	11,1	28,3
							0,2% TRR PO 12	1,9	11,3	27,6
Arcilla arenosa CL	100	99,7	81,7	28,1	16,4	11,7		1,82	13	2,4
							0,2% TRR PO 6	1,8	14,8	2,9

Tabla 4.

bras cuyas características se resumen a continuación (tabla 3).

II.2.2. Tipos de suelo ensayados y resultados obtenidos

En primer lugar se estudiaron diversos terrenos de Andalucía bajo la dirección de GIASA (Gestión de Infraestructuras de Andalucía). Los suelos estudiados fueron muy diferentes tanto en granulometría como en plasticidad. En la realización de los ensayos han participado tres laboratorios: Cemos, Euroconsult-Andalucía y Vorsevi.

Suelos ensayados por el laboratorio Euroconsult-Andalucía

Se han empleado cuatro muestras de suelo y dos tipos de fibras (véase tabla 4).

Conclusiones:

- El PN no se modifica aprecia-

blemente en ninguno de los casos, aunque en todos se aprecia una reducción de la densidad máxima (0,5-1,7%). La humedad óptima crece ligeramente (0,0-3,1%), salvo en el último suelo que alcanza el 13,8%, probablemente por tratarse del suelo más fino que puede almacenar agua en torno a acumulaciones de fibra.

■ El CBR experimenta notables variaciones en sentido aparentemente aleatorio, hasta el $\pm 40,0\%$ respecto de la densidad 100%PN y el $\pm 20,0\%$ para el 95%PN. En general, estos valores extremos se dan con la fibra más corta. Es posible atribuirlo a una deficiente calidad en la mezcla.

Suelos ensayados por el laboratorio Vorsevi

Se empleó una sola muestra la cual se mezcló con los seis tipos de fibras (véase tabla 5).

Conclusiones:

■ En todos los caso se observa una reducción de la densidad máxima PN comprendida entre el 4,0 y el 5,6%. La humedad óptima crece hasta el 16,0% exceptuando dos casos: incremento del 31,3% en la mezcla con AA 25-50 y reducción del 12,9% con AC 250.

■ El CBR experimenta en todos los casos fuertes reducciones (41,2-75,0% para densidad del 100% PN y 24,6-52,6% para el 95%PN)

Suelos ensayados por el laboratorio Cemos

Se ha ensayado un tipo de suelo con dos tipos de fibras.

El corte directo se realizó sobre muestra remoldeada del material que pasa por el tamiz de 2 mm (Véase tabla 6).

Conclusiones:

- Mejora apreciable del ángulo de

Suelos ensayados por el laboratorio Vorsevi										
Descripción	Granulometría Pasa (mm)			Límites de Atterberg			Fibra	Próctor Normal UNE 103500		Índice CBR
	# 5	# 0,40	# 0,08	LL	LP	IP		Dmáx g/cm³	H. óp. %	
Arena arcillosa		33,3		26,9	15,0	11,9		1,77	16,3	5,7
							0,2% TRR PO 6	1,67	18,9	2,8
SC							0,2% TRR PO 12	1,69	16,9	2,8
							0,2% TRR PO 18	1,7	18,6	3,6
							0,2% AA 25-50	1,67	21,4	2,7
							0,2% AC 40-100	1,67	18,1	4,3
							0,2% AC 250	1,67	14,2	3

Tabla 5.

Suelos ensayados por el laboratorio Cemosa													
Descripción	Granulometría			Límites de			Fibra	Próctor Normal		Índice		Corte CD	
	Pasa (mm)			Atterberg				UNE 103500		CBR			
	# 5	# 0,40	# 0,08	LL	LP	IP		Dmáx g/	H. óp.	95	100	c	θ
							cm³	%	%	—	%		
Arena arcillosa	98,6	34	21,2	40,1	20,1	20,0	1,9	13,2	11,5	16,9	0,54	5,2	
SC							0,2% TRR PO 18	1,87	13	16,9	21,3	0,12	25
							0,2% AA 25-50	1,88	13,6	14,4	18,8	0,00	27

Tabla 6.

rozamiento interno (64-77%), con fuerte disminución (22%) o incluso anulación de la cohesión. Las situaciones extremas corresponden al poliacrilonitrilo AA 25-50.

■ Las variaciones de la densidad PN son pequeñas (<3%).

■ Mejora del CBR (11-26% para densidades del 100% PN y 25-46% para el 95% PN). Globalmente superior al 20%. Los mejores valores se obtienen con el polipropileno TRR PO 18.

Suelos ensayados por el Centro Regional de Control de Calidad de la Junta de Castilla y León (CRCC)

Una vez obtenidos los resultados anteriores promovidos por GIASA, se consideró oportuno por parte del Comité de Geotecnia Vial de la ATC continuar con otra serie de ensayos, ofreciéndose el CRCC para su ejecución. Se seleccionaron dos tipos de suelo de amplia distribución geográfica en Castilla y León y de defi-



ciente calidad, el primero por ser marginal a causa de su expansividad y el segundo por su carácter limoso (fotos 4, 5 y 6).

Suelo Marginal (Facies Cuestas del Terciario de la Cuenca del Duero).

Sus características de identificación



Foto 5. Preparación de las muestras en el CRCC.



Foto 6. Cuarteo del suelo.

Suelo Marginal (Facies Cuestas del Terciario de la Cuenca del Duero).											
Muestra/ descripción	Pasa	Límites de Atterberg			Químicos			CLASIFICACIÓN			
	# 0,08	LL	LP	IP	%CO ₃ Ca	%SO ₃	% MO	USCS	AASHTO	I.Grupo	PG-3
Margas arcillosas	99	80,5	27,8	52,7	49,7	0,07	0,36	CH	A-7-6	20	Marginal

Tabla 7.

se resumen en la *tabla 7*.

El resto de propiedades geotécnicas se describen en el Cuadro de resultados de ensayos (*tabla 8*), comparándose con las obtenidas a partir de las distintas mezclas con fibras.

Se efectuaron ensayos edométricos de todas las muestras, y los parámetros resultantes se incluyen en la *figura 1*.

siendo:

Cc Coeficiente de compresibilidad

Ce Coeficiente de expansividad

e₀ Índice de poros inicial

e₁₀ Índice de poros final (10 kp/cm²)

Conclusiones

■ Los valores de Proctor Normal no presentan variaciones significativas con relación al tratamiento con fibras. Las variaciones detectadas en la densidad son mínimas, mientras que las obtenidas por las humedades entran dentro del mismo rango para este tipo de suelo.

■ Los valores de hinchamiento libre y presión de hinchamiento se sitúan igualmente dentro del mismo

rango (3,97-5,36% y 30-95 kPa) si consideramos la variabilidad propia del muestreo y del ensayo.

■ Se observa que las variaciones de los parámetros edométricos son igualmente poco significativas respecto del suelo original con cualquier tipo de fibra.

■ En cuanto a la resistencia al corte (*figura 2*), las variaciones parecen depender fundamentalmente de la longitud de las fibras. Por ello, para una mayor claridad, los gráficos se han sintetizado utilizando los valores medios de los resultados de las mezclas con fibras cortas (< 18 mm) y con fi-

bras largas (> 40 mm).

■ En cuanto a los cortes directos y triaxiales, en general se observa que la cohesión no refleja variaciones significativas, mientras que el ángulo de rozamiento interno experimenta aumentos significativos en la mezcla (*ver figura 2*). Dicho aumento en los triaxiales efectuados en los tratamientos con fibras de mayor longitud (100 y 200 mm) llega a ser de 6 a 10° (*figura 3*).

■ También han sido significativas las mejoras obtenidas con el tratamiento en los ensayos de resistencia a compresión simple. Este ensayo se



Figura 1.

Fibra	Próctor Normal		Índice CBR		H.	P.	Compresión simple (kp/cm ²)				
	Dmáx g/cm ³	H. óp. %	AI 95%	AI 100%	Libre %	Hinch. kPa	-4%	-2%	Wóp	+2%	+4%
SUELO CUESTAS	1,44	28,6	2,35	3,95	4,10	65	3,05	2,45	1,95	1,50	1,00
0.2% TRR PO 6	1,43	27,4	2,1	4,08	4,67	75	2,95	2,70	2,20	1,45	0,80
0.2% TRR PO 12	1,44	26,0	2,08	2,86	4,53	30	2,80	2,80	2,35	1,75	1,25
0.2% TRR PO 18	1,43	28,8	2,24	3,5	3,73	50	3,35	2,80	2,20	1,70	1,25
0.2% AA 40	1,44	26,7	2,4	3,67	5,36	85	3,95	3,50	2,70	2,05	1,60
0.2% AC 100	1,43	26,9	3,1	3,24	4,62	70	4,25	4,10	3,30	2,55	1,90
0.2% AC 200	1,45	28,3	2,33	5	3,97	95	5,20	4,10	3,85	2,15	1,60

Fibra	Corte Directo UU				Corte Directo CU				Triaxial UU				Triaxial CU			
	c	φ	c _r	φ _r	c	φ	c _r	φ _r	c _u	φ _u	c	φ	c _r	φ _r	c _u	φ _u
SUELO CUESTAS	0,75	17,4	0,40	17,1	0,44	18,3	0,33	15,1	1,25	11,6	0,10	21,2	0,12	28,7		
0.2% TRR PO 6	0,73	24,1	0,47	22,2	0,31	23,8	0,27	17,2	1,41	18,8	0,16	22,4	0,05	31,4		
0.2% TRR PO 12	0,56	33,5	0,12	37,0	0,24	24,8	0,28	21,0	1,19	24,1	0,04	21,8	0,12	28,2		
0.2% TRR PO 18	0,72	25,9	0,57	19,2	0,43	20,3	0,30	18,4	2,04	0,0	0,26	22,0	0,08	30,4		
0.2% AA 40	0,93	29,0	0,13	34,0	0,23	18,0	0,36	18,0	1,82	16,9	0,07	22,5	0,18	28,1		
0.2% AC 100	0,81	29,0	0,32	30,9	0,20	25,2	0,27	17,9	1,02	25,5	0,20	24,3	0,13	34,9		
0.2% AC 200	0,93	24,3	0,37	27,3	0,42	24,9	0,56	19,0	2,05	6,9	0,35	24,1	0,20	37,9		

Tabla 8.

ha efectuado sobre una serie de probetas remoldeadas con distintas condiciones de humedad respecto de la óptima referida a la compactación Proctor Normal. Las curvas de variación de dicha resistencia en función de la humedad se reflejan en la *figura 4*.

■ Los tratamientos con fibras cortas (6-12-18 mm) muestran un reducido aumento de la resistencia del orden del 0-20%, mientras que con las fibras más largas (> 40 mm) los aumentos son en general superiores al 50% en el entorno de las humedades $W_{op} \pm 4\%$. Por otro lado la forma de rotura experimenta una variación al prolongarse notablemente el estado plástico (*figura 5* de la página siguiente).

En línea continua (verde) se han representado las curvas de rotura del suelo sin mezcla, en discontinua corta (azul) el suelo mezclado con fibras cortas (TRR PO-6) y en discontinua larga (rojo) el suelo mezclado con fibras largas (AC-200).

Suelo Tolerable (Facies Tierra de Campos del Terciario de la Cuenca del Duero).

Sus características de identificación se resumen en la *tabla 9* de la página siguiente.

El resto de propiedades geotécnicas se describen en el cuadro de resultado de ensayos, comparándose con las obtenidas a partir de las distintas mezclas con fibras (*tabla 10*, página siguiente).

Conclusiones:

■ Los valores de Próctor Normal no presentan variaciones significativas en relación al tratamiento con fibras. Las variaciones detectadas en la densidad son mínimas, mientras que las obtenidas por las humedades entran dentro del mismo rango para este tipo de suelo.

■ En cuanto a los cortes directos, en general se observa que la cohesión refleja ligeras disminuciones, con aumentos del ángulo de rozamiento interno que, en general, crece con la mayor longitud de las fibras empleada en la mezcla (véase *figura 6*, pág. 23).

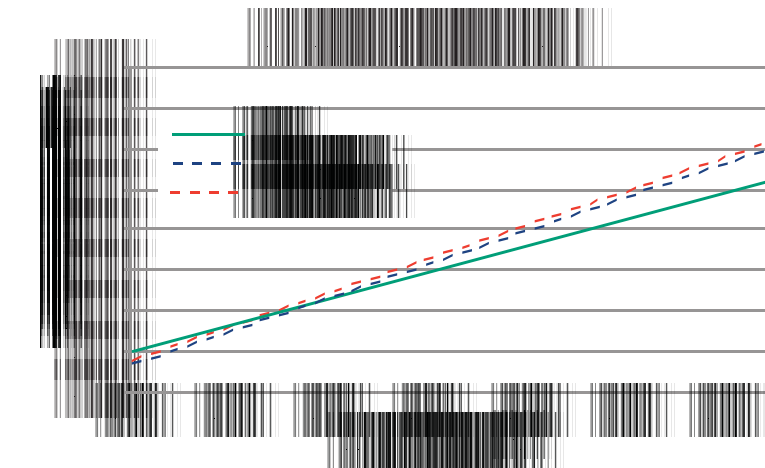


Figura 2.

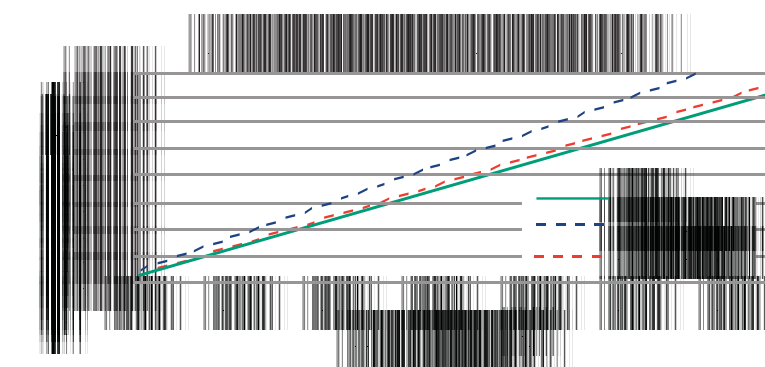


Figura 3.

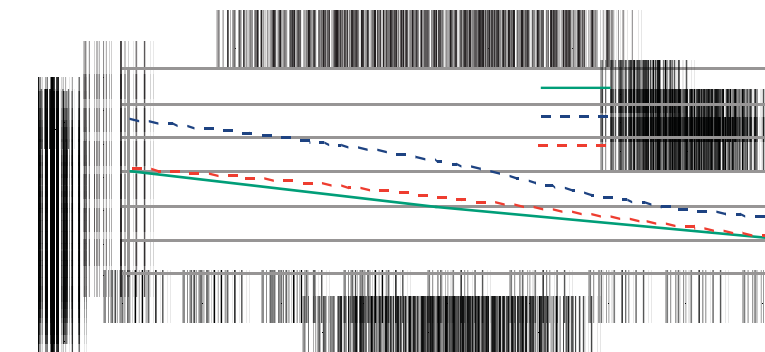


Figura 4.

■ En los triaxiales efectuados en los tratamientos con fibras de mayor longitud se aprecia un aumento de la cohesión y muy ligero del ángulo de rozamiento interno (*figura 7*, pág. 23).

■ Las mejoras obtenidas con el tratamiento en los ensayos de resistencia a compresión simple son, sin embargo menos significativas que en el suelo de las Facies Cuestas. Este ensayo se ha efectuado sobre una

serie de probetas remoldeadas con distintas condiciones de humedad respecto de la óptima referida a la compactación Próctor Normal. Las curvas de variación de dicha resistencia en función de la humedad se reflejan en la *figura 8*, pág. 23.

■ Los tratamientos con fibras no muestran diferencias significativas, salvo con las fibras más largas (> 40 mm) en la zona del lado húmedo respecto de la humedad óptima, donde los au-

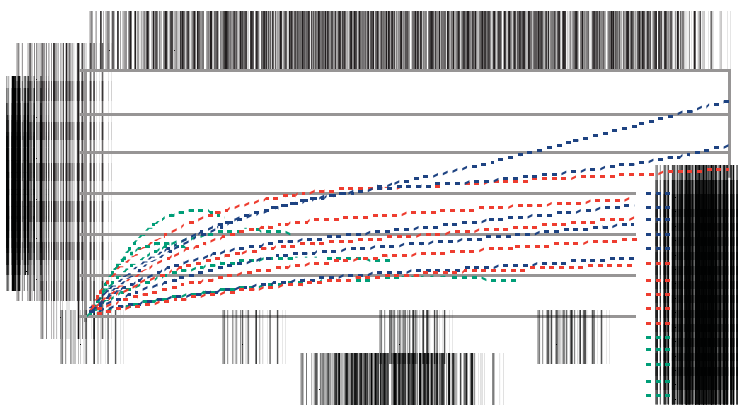


Figura 5.

mentos son en general superiores al 50%. Por otro lado, la forma de rotura experimenta una variación al prolongarse notablemente el estado plástico, al igual que ocurre en el otro tipo de suelo estudiado (Facies Cuestas).

II.3. Conclusiones y comentarios generales (Parte II)

A la vista de los resultados obtenidos y teniendo en cuenta la limitación de los datos obtenidos, se pueden hacer las siguientes conclusiones:

- La operación de disgregación y mezcla realizada manualmente es muy laboriosa, por lo que se requerirán, en obra unos medios muy específicos para conseguir una buena homogeneización de la mezcla. Esta homogeneización resulta más difícil con las fibras de mayor longitud (foto 7).

- Los suelos arenosos de cierta calidad no experimentan una mejora de sus propiedades geomecánicas con el tratamiento de fibras; por el contrario, a veces se reducen, siendo

compleja la interpretación detallada de los resultados obtenidos en laboratorio.

Por el contrario, sobre el suelo marginal estudiado (Facies Cuestas), se observa que:

- Los ensayos de Próctor Normal reflejan una homogeneidad en los resultados, lógica por la baja dosificación de fibras.

- Los ensayos de CBR en condiciones de Próctor Normal, tampoco muestran una variación de su índice en función de la adición de fibras, mostrando una tendencia uniforme en el conjunto de las muestras.

- Los ensayos de hinchamiento libre no presentan igualmente variaciones significativas.

- Lo mismo ocurre con la presión de hinchamiento y los valores de parámetros edométricos.

- Los ensayos de corte directo y triaxiales no parecen detectar un aumento de la cohesión; pero sí un significativo aumento del ángulo de rozamiento, que, con las fibras más largas, podría estimarse en un aumento del orden de 6-10°.

Muestra/descripción	Pasa		Límites de Atterberg			Químicos			CLASIFICACIÓN			
	# 0,08	LL	LP	IP	%CO ₃ Ca	%SO ₃	% MO	USCS	AASHTO	Grupo	PG-3	
Arcillas limoarenosas	56	33,3	18,7	14,6	11,7	0,00	0,11	CL	A-6	6	Tolerable	

Tabla 9.

Fibra	Próctor Normal		Compresión simple (kp/cm ²) según Wóp				
	Dmáx g/cm ³	H. óp. %	-4%	-2%	Wóp	+2%	+4%
SUELO T. CAMPOS	1,78	14,7	3,60	3,30	2,65	1,50	0,75
0.2% TRR PO 6	1,77	15,3	3,70	3,30	2,30	1,40	0,55
0.2% TRR PO 12	1,79	14,5	3,71	3,50	3,10	1,45	0,50
0.2% TRR PO 18	1,77	14,0	3,60	3,50	3,10	2,00	1,25
0.2% AA 25-40	1,78	14,3	3,60	3,30	2,75	2,00	2,00
0.2% AC 100	1,77	14,5	3,70	3,30	2,80	2,30	1,45
0.2% AC 200	1,75	1	6,3	3,50	2,95	2,20	2,00

Fibra	Corte Directo UU				Corte Directo CU				Triaxial UU		Triaxial CU			
	c	φ	c _r	φ _r	c	φ	c _r	φ _r	c _u	φ _u	c	φ	c _r	φ _r
SUELO T. CAMPOS	1,14	19,7	0,31	29,0	0,62	21,1	0,00	28,9	0,9	30,5	0,17	21,0	0,02	32,9
0.2% TRR PO 6	0,91	25,7	0,27	28,9	0,29	24,0	0,00	29,2	1,1	27,5	0,56	23,4	0,14	34,9
0.2% TRR PO 12	0,84	29,4	0,21	31,7	0,41	23,1	0,15	27,3	1,1	29,9	0,82	18,3	0,18	34,6
0.2% TRR PO 18	0,6	29,7	0,31	31,4	0,08	28,6	0,00	29,7	1,0	31,9	0,5	19,3	0,08	36,5
0.2% AA 25-40	0,69	28,1	0,33	28,4	0,55	24,1	0,02	31,9	1,1	34,1	0,46	25,8	0,20	36,4
0.2% AC 100	0,77	24,7	0,26	31,1	0,00	30,8	0,00	31,0	2,3	23,0	0,69	22,7	0,34	38,0
0.2% AC 200	0,5	31,0	0,40	28,9	0,27	26,2	0,06	30,8	1,9	19,6	0,94	23,4	0,64	34,2

Tabla 10.

- Los ensayos de compresión simple experimentan mejoras ligeras de la resistencia (0-20%) con el tratamiento a base de fibras cortas, pudiendo sobrepasar el 50% de incremento con las fibras más largas, en los ensayos realizados sobre probetas remoldeadas en el entorno de la humedad óptima Proctor Normal (foto 8, pág. siguiente).

Sobre el suelo tolerable estudiado (Facies Tierra de Campos), se observa que:

- Los ensayos de Próctor Normal reflejan una homogeneidad en los resultados, lógica por la baja dosificación de fibras.

- Los ensayos de corte directo y triaxiales dan resultados más heterogéneos, no siendo claro el aumento de la resistencia al corte.

- Los ensayos de compresión simple no muestran diferencias significativas, salvo con las fibras más largas (> 40 mm) en la zona del lado húmedo respecto de la humedad óptima, donde los aumentos son en general superiores al 50%, en los ensayos realizados sobre probetas remoldeadas en el entorno de la humedad óptima Proctor Normal.

Conclusiones generales del estudio

Es difícil obtener una correspondencia clara entre los artículos anali-

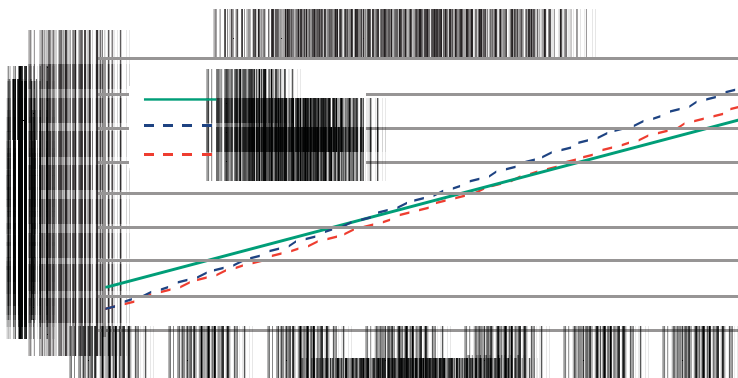


Figura 6.

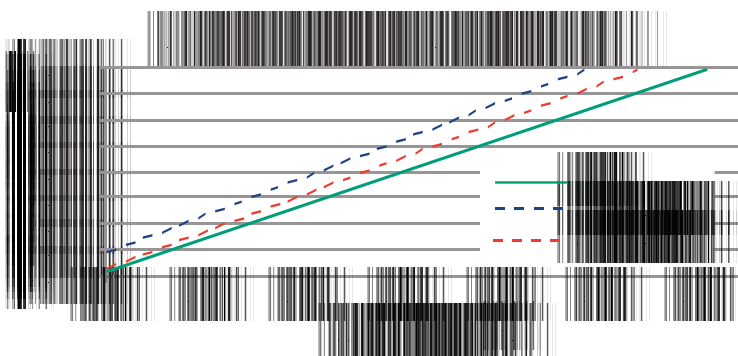


Figura 7.

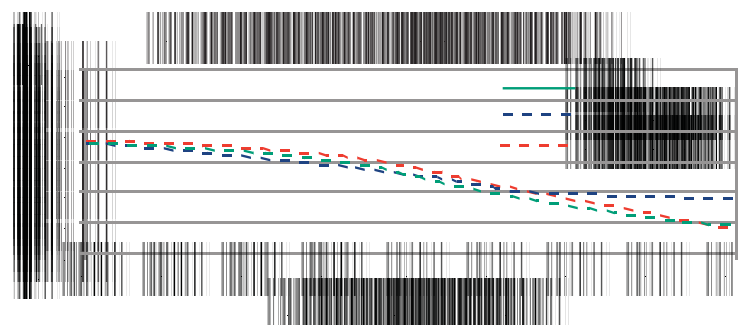


Figura 8.

Foto 7. Aspecto del suelo mezclado con fibras largas.





Foto 8. Rotura a compresión de suelo sin mezclar (izquierda) y con fibras largas (derecha).

zados, en buena parte comerciales, y los resultados de los ensayos de laboratorio. No obstante, de todo el trabajo realizado por el Comité de Geotecnia Vial de la Asociación Técnica de Carreteras (ATC), de la AIPCR, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La mezcla de suelos con fibras sintéticas constituye un posible método de mejora del terreno, al igual que otros procedimientos alternativos conocidos (tratamientos con cal, cemento, etc.).

- En los artículos revisados se observa que uno de los usos principales de las fibras, en el caso de las fibras largas, es su empleo como elemento antierosivo (por su capacidad de retención de finos), propiedad que no se ha analizado en los ensayos de laboratorio realizados, al haberse centrado éstos en los ensayos geotécnicos tradicionales.

- Las proporciones recomendadas oscilan en torno al 0,2% en peso de fibra respecto del total de suelo.

- La variación (mejora) de las propiedades geotécnicas no se puede establecer a priori. Aparte de

las diferencias encontradas en las referencias bibliográficas, se aprecia que dicha variación depende de las características de cada tipo de suelo.

- En determinados suelos (p. ej. más arenosos), las características de la mezcla pueden incluso empeorar determinadas propiedades.

- Los suelos más arcillosos, por el contrario, parecen obtener mejoras considerables, resultando mayores cuanto peor es el suelo. Dichas mejoras se basan en un aumento significativo de la resistencia al corte, fundamentalmente a través del incremento del ángulo de rozamiento interno, que llega a ser superior al 20%.

- Las mejoras importantes parecen relacionarse directamente con la longitud de las fibras. A mayor longitud, mejores propiedades.

- Las dificultades de mezcla observadas en laboratorio deben tenerse en cuenta, comprobándose el reparto homogéneo en obra.

- Es recomendable la realización de tramos experimentales in situ con un control a base de ensayos a mayor escala que los de laboratorio.

Bibliografía

Geofibers, Job Report . “Estabilización de taludes junto al Trinity River”.

Geofibers, Job Report. “Laver court slope reconstruction”.

Geofibers, Job Report. “Riverview drive slope reconstruction”.

Geofibers, Job Report. Referencia: “Rehabilitation of the South Prong Dam”, Rutledge, John G. and Ron G King. Freese and Nichols, Inc.,1994. *Rehabilitation of the south prong dam*.

Geofibers, Job Report. *Refuerzo con fibra de un talud en la carretera I-10 (Luisiana-EEUU)*.

Geofibers; Technote. *Procedimientos de colocación de fibras para reparar inestabilidades superficiales*.

Gregory, G.H. and Chill P.S. (1998). Sixth International Conference on Geosynthetics. *Stabilization of earth slopes with fiber reinforcement*.

R. Bahar, H. Stiti, & B. Melbouci, University of Tizi-Ouzou, Algeria. Referencia: Geosynthetics-7th ICG- Delmas, Gourc&Girard (eds) ©2002 Swets & Zeitlinger, Lisse ISBN 90 5809 523 1. *Experimental study of cohesive soils reinforced with synthetic fibres*. ■