

Interacción entre suelos granulares y materiales compuestos

GONZALO JARA MORI (*) y LUIS FORT-LÓPEZ TELLO (**)

RESUMEN El presente artículo recoge los principales resultados de un estudio experimental llevado a cabo por los autores, para la evaluación de la interacción que se desarrolla en el contacto suelo granular-material compuesto. Para evaluar esta interacción se han realizado ensayos de corte directo empleando dos tipos de suelos, característicos de la ciudad de Madrid, y placas de materiales compuestos fabricadas a base de fibra de vidrio y resina de poliéster. En estos ensayos se ha determinado el efecto de la rugosidad superficial de las placas y el grado de compactación del suelo, en el rozamiento que se crea entre ambos materiales. Las placas de materiales compuestos fueron sometidas a un tratamiento superficial, mediante el cual se definieron tres tipos de rugosidad. Los resultados de este trabajo muestran el aumento del ángulo de rozamiento entre ambos materiales con el aumento de la rugosidad de las placas, en todas las pruebas realizadas.

INTERACTION BETWEEN GRANULAR SOILS AND COMPOSITES

ABSTRACT This paper contains the main results of a pilot study conducted by the authors, for evaluating the interaction that develops at the interface granular soil-composite. To evaluate this interaction has been tested in direct shear apparatus using two types of soil, characteristic of the city of Madrid, and plates of composite made from fiberglass and polyester resin. In these tests it was determined the effect of surface roughness of the plates and the degree of soil compaction, the friction that is created between the two materials. The composite plates were subjected to a surface treatment, which defined three types of roughness. The results of this study show an increase of the angle of friction between two materials with increasing the roughness of the plates in all tests.

Palabras clave: Fricción superficial, Rugosidad, Materiales compuestos.

Keywords: Skin friction, Roughness, Composites.

1. INTRODUCCIÓN

Desde el punto de vista geotécnico, el comportamiento estructural de muchas obras queda definido por la interacción que se desarrolla en el contacto suelo-estructura. La interacción que se crea en dicha interfase es principalmente debida al rozamiento entre ambos materiales.

Algunos investigadores han estudiado el rozamiento que se desarrolla en la interfase entre distintos materiales de construcción y suelos (Potyondy, 1961; Uesugi y Kishida, 1986-a y 1986-b; Rao et al, 1998; Frost y Han, 1999; Ampera y Aydogmus, 2005; Lings y Dietz, 2005), los cuales han presentado resultados de este parámetro en función de la rugosidad superficial del material empleado. Considerando estos antecedentes, en el presente artículo se presentan los resultados de un trabajo experimental desarrollado en la Universidad Politécnica de Madrid para evaluar el rozamiento en la interfaz entre suelos y materiales compuestos.

Los trabajos de laboratorio para la determinación del rozamiento de la interfase material compuesto-suelo, fueron

realizados en un aparato de corte directo convencional adaptado para esta investigación, según las recomendaciones presentadas por Potyondy (1961), Rao et al (1998) y, Frost y Han (1999). Para la realización de los ensayos se han seleccionado dos tipos de suelos que son comúnmente empleados en Madrid en obras de rellenos, y se han confeccionado placas de fibra de vidrio y poliéster con distintas rugosidades superficiales.

2. LOS MATERIALES COMPUESTOS

Los materiales compuestos (también denominados *composites*), corresponden a refuerzos con fibra de materiales metálicos, poliméricos y cerámicos, que fueron empleados inicialmente en la industria aeroespacial a partir de la década de los '50. El uso de materiales compuestos en la construcción, ha tenido un fuerte desarrollo bien entrado el Siglo XX. En especial, a partir de la Segunda Guerra Mundial, con el descubrimiento de las matrices plásticas, la expansión de los materiales compuestos ha sido constante. Sus usos han sido variados, pasando por el refuerzo de hormigones con fibra de vidrio, la construcción de estructuras de edificación, camisas para pilotes para su empleo en medios agresivos y puentes en base a estos materiales, entre otros.

(*) Ingeniero Constructor PUCV, Doctor en Geotecnia, UPM.

(**) Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, UPM.

Se trata de materiales heterogéneos, constituidos por una matriz orgánica (polímero) asociada con un refuerzo fibroso, por lo general de vidrio, de carbono o de aramida. Las fibras son las encargadas de proporcionar las propiedades mecánicas al material. Se caracterizan por ser continuas, orientadas en direcciones específicas, pudiendo dar lugar a comportamientos anisotrópos e isotrópos. Los esfuerzos a los que se ve sometido un composite son absorbidos por estas fibras, y transferidos de una fibra a otra gracias a la matriz. La matriz, además de transferir las cargas a las que se ve sometido el material a las fibras, es la responsable de mantenerlas unidas.

Los materiales compuestos disponen de ventajas con relación a otros productos, aportando numerosas cualidades funcionales como son: ligereza; resistencia mecánica y química; mantenimiento reducido; libertad de formas. Su uso permite aumentar la vida útil de ciertos componentes estructurales, gracias a sus propiedades mecánicas (rigidez, resistencia a la fatiga) y a sus propiedades químicas (resistencia a la corrosión). También enriquecen las posibilidades de diseño, permitiendo aligerar las estructuras y realizar formas complejas aptas para cumplir varias funciones.

3. LA FRICCIÓN SUPERFICIAL ENTRE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

La interacción entre suelos y diferentes materiales de construcción, ha sido motivo de múltiples investigaciones que se han realizado con el propósito de definir el rozamiento que se crea en la interfase de estos materiales. La importancia de esto, según Frost y Han (1999), es debido a que el rozamiento creado en la interfase juega un papel importante en el dimensionamiento de muchas aplicaciones geotécnicas, como son: cimentaciones de estructuras pilotadas; muros de contención de tierras convencional; y, estructuras de suelo reforzado.

La interacción en la interfase, que es definida a partir de la fricción que se desarrolla en el contacto de ambos materiales, puede ser obtenida mediante diferentes ensayos, siendo los más empleados: ensayos de corte directo (a través de aparatos convencionales o modificados); ensayos de corte simple; pruebas de carga de pilotes in-situ; ensayos de arrancamiento o adherencia; entre otros.

Usualmente la fricción en la interfase es expresada en términos de un coeficiente de fricción μ o un ángulo de fricción δ (Rao et al, 1998). Si el tipo de suelo es puramente cohesivo, el contacto en la interfase puede ser expresada en términos de un coeficiente de adherencia c_a .

El valor de δ se define usualmente en función del ángulo de rozamiento interno ϕ' del suelo. Para ello, se suelen adoptar valores recomendados en la literatura, los cuales han sido ampliamente aceptados en la Ingeniería Geotécnica.

3.1. INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD EN LA FRICCIÓN SUPERFICIAL

Muchas investigaciones han demostrado que la rugosidad superficial juega un papel importante en el comportamiento de la interfase entre suelos y superficies sólidas (Uesugi y Kishida, 1986-a y 1986-b; Rao et al, 1998; Frost y Han, 1999; Lings y Dietz, 2005). Como resultado, se obtiene un aumento de los parámetros de rozamiento en la interfase, δ y C_a , con el aumento de la rugosidad.

El método más usado para cuantificar la rugosidad se basa en el registro de perfiles de altura, para lo cual se emplean equipos de sensibilidad micrométrica denominados rugosímetros o perfilómetros. A partir del tratamiento estadístico de los datos obtenidos por este equipo, se determina la rugosidad superficial a partir de la rugosidad máxima $R_{m\acute{a}x}$. La rugosi-

dad máxima $R_{m\acute{a}x}$ es definida como la altura entre el punto más alto y el punto más bajo del perfil de alturas, medidos ambos respecto a la línea central. Habitualmente, se seleccionan tramos homogéneos ΔL sobre la distancia medida en el equipo, obteniéndose para cada tramo el valor de $\bar{R}_{m\acute{a}x}$. El valor de final del perfil es obtenido mediante la siguiente expresión:

$$\bar{R}_{m\acute{a}x} = \frac{R_{m\acute{a}x1} + R_{m\acute{a}x2} + \dots + R_{m\acute{a}xn}}{n} \quad (1)$$

Algunos investigadores han propuesto formulaciones alternativas a las presentadas anteriormente, con el propósito de correlacionar la fricción en la interfase con el tamaño de las partículas de suelo. Según comentan Lings y Dietz (2005), una arena fina tiende a movilizar una mayor fricción en la interfase que una arena gruesa, si ambas deslizan sobre una superficie de rugosidad dada.

Uesugi y Kishida (1986-b) fueron los primeros en integrar bajo un solo concepto la rugosidad superficial y el tamaño de las partículas de arena. Para ello han definido el concepto de rugosidad normalizada R_n , la cual es obtenida a partir de la rugosidad máxima $R_{m\acute{a}x}$ y el tamaño D_{50} de la arena, que queda expresada como:

$$R_n = \frac{R_{m\acute{a}x}}{D_{50}} \quad (2)$$

siendo

$R_{m\acute{a}x}$ obtenido del perfil de alturas medido en el perfilómetro, considerando .

D_{50} la abertura del tamiz por donde pasa el 50% del material.

Paikowsky et al (1995) en ensayos realizados con varios tamaños de perlas de vidrio en contacto con superficies de acero y aluminio, correlacionaron el ángulo de fricción de la interfase pico con la rugosidad normalizada R_n . A partir de los resultados obtenidos han definido tres tipos de rugosidad que se pueden presentar en la interfase, las cuales las han denominado como: lisa, intermedia y rugosa. Estos términos pueden ser empleados, en general, para distinguir la rugosidad superficial de cualquier material que interactúe con distintos suelos.

3.2. INVESTIGACIONES REALIZADAS

La mayoría de las aportaciones más recientes han estado orientadas a la evolución de la fricción superficial en función de la rugosidad del material empleado en contacto con el suelo. Uesugi y Kishida (1986-a y 1986-b), han realizado una serie de estudios orientados a la determinación de la fricción superficial entre arenas secas y aceros. Para la realización de sus trabajos, han empleado aparatos de corte directo y aparatos de corte simple.

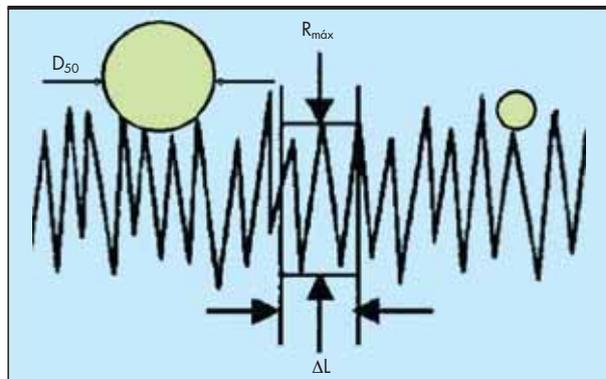
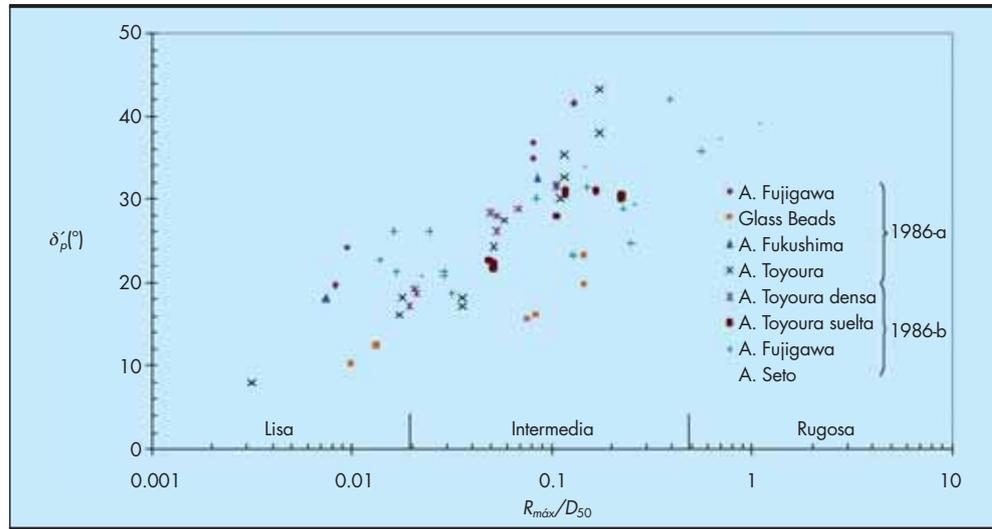


FIGURA 1. Representación esquemática del tamaño de las partículas de suelo sobre perfil de alturas. Definición de D_{50} .

FIGURA 2. Resultados de fricción superficial obtenidos por Uesugi y Kishida, mediante el estudio de arenas y aceros.



Las arenas investigadas presentan una granulometría bastante uniforme y todas ellas sin presencia de finos, siendo en general clasificadas como arenas medias a finas (Lambe y Whitman, 1969).

La rugosidad de las placas de acero fue obtenida mediante un tratamiento superficial de lijado y pulido, alcanzándose así rugosidades máximas $R_{m\acute{a}x}$ comprendidas entre 3 y 20 μm . Estos investigadores concluyen que los factores que más influyen en la determinación del coeficiente de rozamiento de la interfase son el tipo de arena empleada y la rugosidad de la superficie del acero, mientras que la tensión normal aplicada y el tamaño medio de los granos tienen poca influencia. Los resultados de su investigación se muestran en la figura 2.

Frost y Han (1999), han realizado un estudio experimental para evaluar el comportamiento en la interfaz entre arenas y FRP (polímeros reforzados con fibras). Los resultados obtenidos en estas pruebas fueron comparados con una serie de ensayos realizados sobre interfaz arena-acero.

Para el desarrollo de su trabajo, seleccionaron cinco tipos de arenas y cuatro tipos de perlas de vidrio. Las arenas han sido identificadas como: arena de voladura (VBS); arena de Ottawa

(OTW); y, arena silicia (SLC). Tanto la arena VBS como la SLC mostraron una forma subangular a angular, mientras que la arena OTW presentó una forma subredondeada a redondeada. Las placas de FRP fueron obtenidas de una sección de material elaborado con fibra de vidrio tipo E embebido en una matriz de poliéster, fabricadas mediante un proceso de pultrusión.

Según comentan estos investigadores, los resultados de sus ensayos muestran que el rozamiento en la interfaz arenas-FRP se ve directamente influenciado por la rugosidad normalizada, la tensión vertical aplicada, la densidad inicial de la masa de suelo y el tamaño medio de las partículas. Además, empleando este tipo de interfaz se obtienen mayores valores de rozamiento que en el caso de arena-acero.

4. ESTUDIO EXPERIMENTAL: EVALUACIÓN DE LA FRICCIÓN SUPERFICIAL ENTRE SUELOS Y MATERIALES COMPUESTOS

La realización de este estudio experimental ha tenido como objetivo evaluar la interacción que se desarrolla entre dos tipos de suelos y materiales compuestos. El estudio ha sido abordado mediante la realización de ensayos de corte directo.

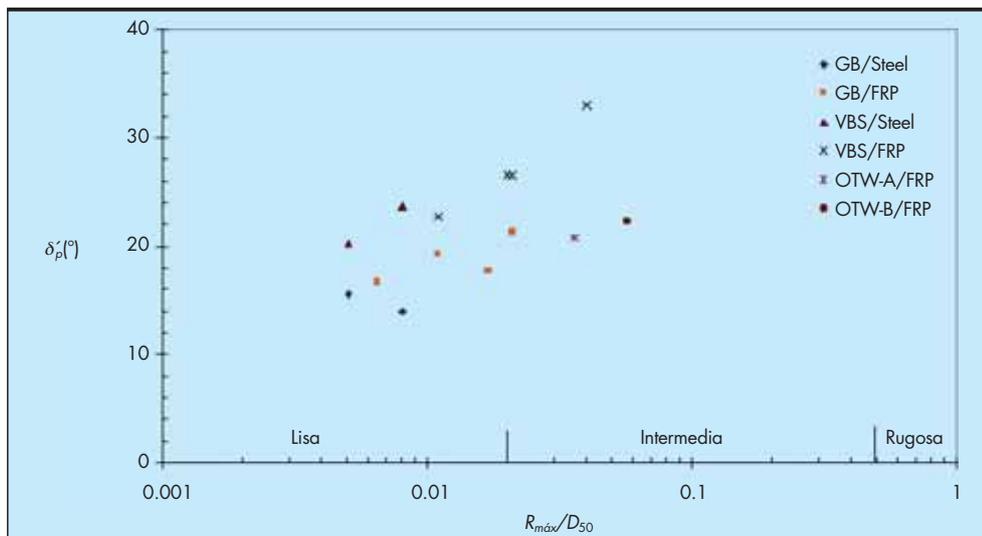


FIGURA 3. Resultados de fricción superficial obtenidos por Frost y Han para interfaz de arenas con aceros y FRP.

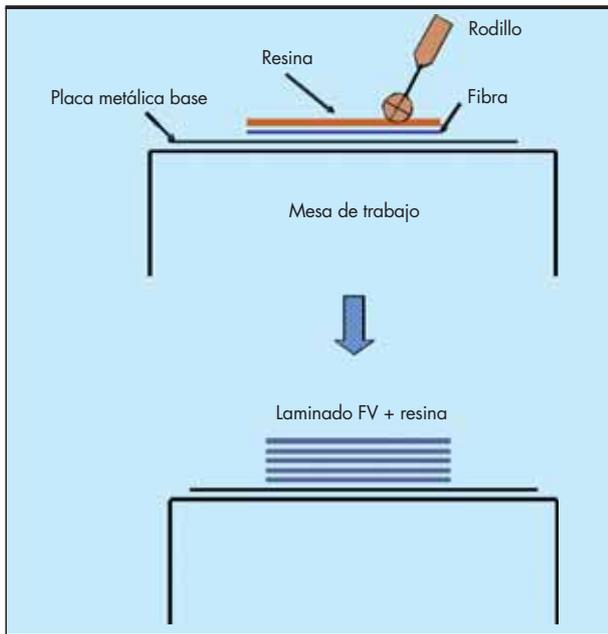


FIGURA 4. Esquema de fabricación de placas para ensayos de corte directo, compuestos por fibra de vidrio y resina poliéster.

Junto a los ensayos de corte directo, se ha medido la rugosidad superficial de las probetas de materiales compuestos,

mediante un equipo de perfilometría, que ha permitido obtener los perfiles de altura con los cuales se ha determinado la rugosidad normalizada R_n de dichas probetas.

Con relación a los suelos, se han seleccionado dos tipos de material (arena de miga y arena tosquiza) característicos de la ciudad de Madrid, los cuales han sido caracterizados tanto desde un punto de vista físico como químico, como así también, mecánico.

4.1. FABRICACIÓN DE PLACAS DE MATERIALES COMPUESTOS

Las placas de materiales compuestos empleadas en los ensayos de corte directo, han sido fabricadas a base de fibra de vidrio y resina de poliéster. Todas las placas fueron fabricadas de las mismas dimensiones, con una sección cuadrada de 5,9 x 5,9 cm y un espesor de 4 mm, mediante el procedimiento mostrado en la figura 4.

Para el estudio del rozamiento en la interfaz, las placas en materiales compuestos han sido fabricadas con tres tipos de rugosidad superficial, las cuales fueron identificadas como: PFV-RB (placa de fibra de vidrio con rugosidad baja); PFV-RI (placa de fibra de vidrio con rugosidad intermedia), y; PFV-RA (placa de fibra de vidrio con rugosidad alta).

Se han tomado imágenes de cada una de las placas, tanto en cámara digital como a través de microscopio electrónico. Un ejemplo de ellas se muestra en la figura 5. Las imágenes permiten apreciar la textura superficial alcanzada en cada placa, la cual fue corroborada con los perfiles de altura obtenidos para cada una de ellas con el equipo de perfilometría. En la figura 6 se muestra un ejemplo del perfil de altura que es obtenido con el equipo de perfilometría. Se han analizado un total de treinta placas, diez por cada tipo de rugosidad.

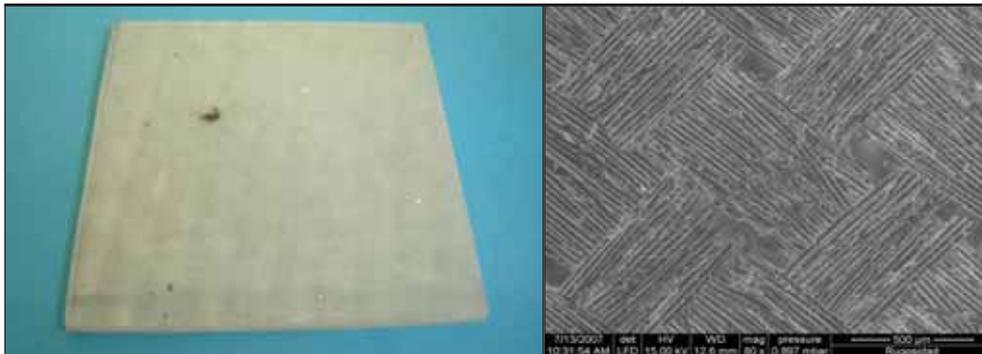


FIGURA 5. Imágenes de placas de fibra de vidrio para ensayos de rozamiento y detalle en microscopio electrónico (PFV-RA).

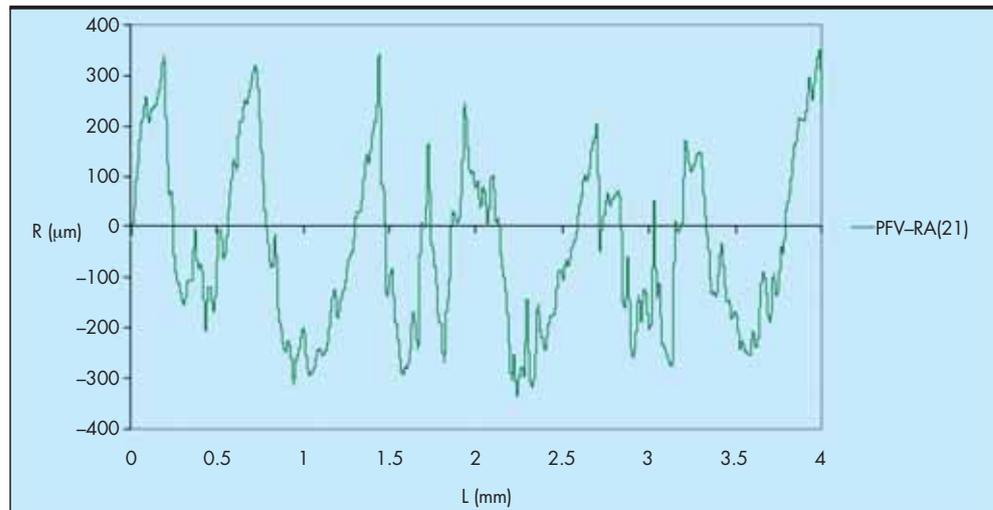


FIGURA 6. Perfil de altura placa de material compuesto de rugosidad alta.

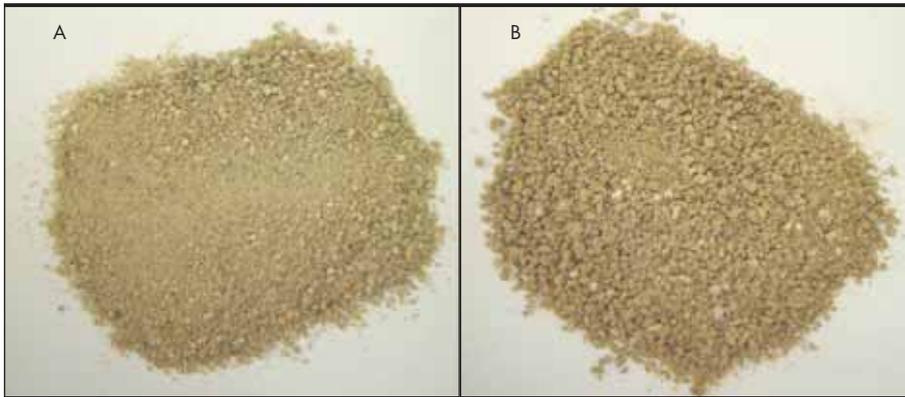


FIGURA 7. Suelos empleados en los ensayos de corte directo para el estudio de la fricción superficial. (a) Arena de miga; (b) Arena tosquiza.

4.2. SUELOS EMPLEADOS PARA ESTUDIOS DE ROZAMIENTO

Para este estudio experimental, se han seleccionado dos suelos, los cuales corresponden a materiales característicos de la ciudad de Madrid y que son utilizados con frecuencia en obras de rellenos, los que han correspondido a: Arena de Miga y Arena Tosquiza.

Con el propósito de valorar su comportamiento mecánico, se han realizado ensayos de corte directo y triaxial para la determinación tanto del ángulo de fricción interna ϕ' como la cohesión c' . Los ensayos de corte directo fueron realizados en

condiciones drenadas, mientras que los ensayos triaxiales fueron realizados en condiciones no drenadas con medida de presión de poros. Los resultados de los ensayos realizados a ambos suelos, se presentan en la tabla 1.

4.3. EVALUACIÓN DEL ROZAMIENTO EN LA INTERFAZ SUELO-MATERIAL COMPUESTO

La preparación de cada prueba ha consistido en la colocación de las placas de materiales compuestos en la parte inferior de

TABLA 1. Resumen parámetros mecánicos de suelos obtenidos en ensayos de corte directo y triaxial, en función del grado de compactación.

Grado de compactación	Arena Tosquiza		Arena de Miga	
	ϕ' (°)	c' (t/m ²)	ϕ' (°)	c' (t/m ²)
Ensayos de Corte Directo				
95% PN	35	0,15	–	–
92% PM	–	–	38	0
95% PM	39	0,15	41	0,25
100% DR	–	–	43	0
Ensayo Triaxial				
95% PM	35	3,0	37	0



FIGURA 8. Colocación placa en material compuesto y preparación muestra para ensayos de rozamiento en equipo de corte directo.



FIGURA 9. Equipo de corte directo empleado en los ensayos de rozamiento, perteneciente a la UPM.

la caja de corte, tal como se muestra en la figura 8, mientras que la muestra de suelo ha sido compactada en la parte superior de dicha caja, tomando como referencia los trabajos realizados por Potyondy (1961), Rao et al (1998) y, Frost y Han (1999). El equipo de corte directo empleado en estos ensayos se muestra en la figura 8.

Todos los ensayos han sido ejecutados en condiciones drenadas con consolidación previa, tanto para la arena de miga como para la arena tosquiza. La velocidad de corte fue defi-

nida a partir de la curva de consolidación de la muestra de suelo, empleándose para estas muestras velocidades de 0,03 y 0,06 mm/min. En las pruebas realizadas se pudo observar que no existe una influencia clara en los resultados obtenidos respecto a la diferencia de velocidades empleadas.

4.4. INFLUENCIA DEL TIPO DE SUELO Y RUGOSIDAD SUPERFICIAL EN LOS ENSAYOS DE ROZAMIENTO

Para valorar la influencia del tipo de suelo empleado y la rugosidad superficial de las probetas de materiales compuestos, en las figuras 10 y 11 se muestran los resultados de los ensayos en función de la rugosidad normalizada R_n obtenida para cada probeta, que es función del tamaño medio de las partículas de suelo (D_{50}).

Como se puede apreciar en la figura 10, los valores de rozamiento de todas las probetas ensayadas se mueven en un rango de R_n comprendido entre 0,18 y 1,8 aproximadamente. Según esto, la rugosidad de las probetas de materiales compuestos diseñadas para el desarrollo de este estudio puede ser clasificada como de intermedia a rugosa (Paikowsky et al, 1995), valores que son bastante superiores a los obtenidos por Frost y Han (1999). Esto es debido, por un lado, a un mayor tamaño medio de las partículas de arena empleadas por Frost y Han, y por otro lado, a una menor rugosidad máxima alcanzada en las probetas de FRP. Como resultado, los valores de rozamiento en la interfaz δ' alcanzados son mayores a los obtenidos por estos investigadores, en una relación comprendida entre 1,25 y 1,5.

En la figura 11 se presenta la relación obtenida entre la rugosidad normalizada R_n y la relación δ'/ϕ' . Esta última es una relación empleada habitualmente en geotecnia para estimar el valor de δ' que es utilizado para el dimensionamiento de muchas obras de ingeniería. Además, los resultados obtenidos por Potyondy (1961) en sus ensayos de corte directo fueron definidos a partir de esta relación.

Como puede verse, los valores de δ'/ϕ' obtenidos se encuentran en un rango comprendido entre $2/3\phi'$ y ϕ' , siendo los mayores valores alcanzados para el caso de la arena tosquiza. Así, la relación δ'/ϕ' en la arena de miga toma valores

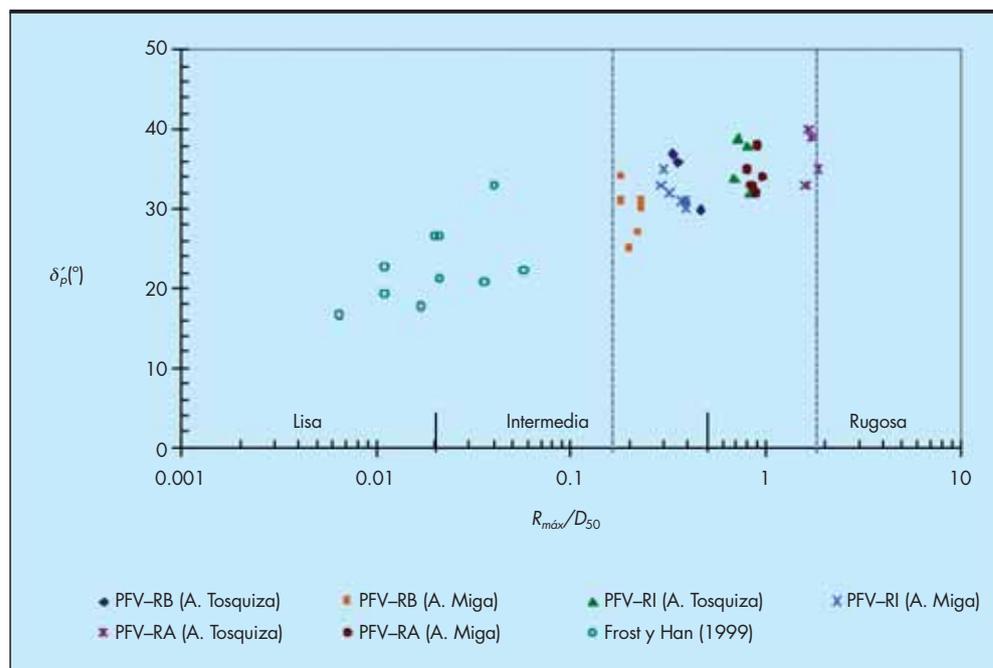


FIGURA 10. Relación entre la rugosidad normalizada R_n y el ángulo de rozamiento en la interfaz δ' .

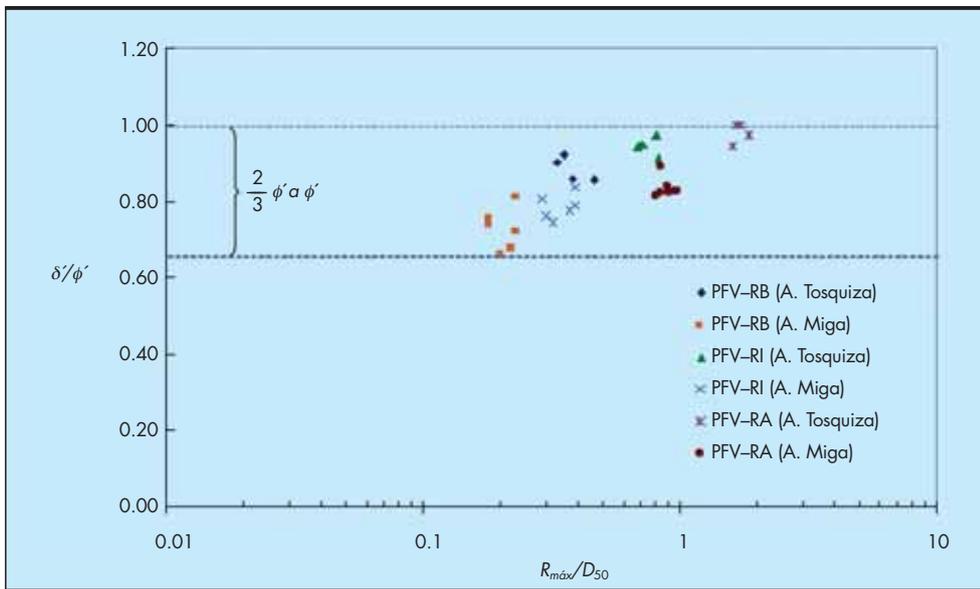


FIGURA 11. Relación entre la rugosidad normalizada R_n y el coeficiente de rozamiento en la interfaz δ'/ϕ' .

entre $0,66 \cdot \phi'$ y $0,90 \cdot \phi'$, mientras que en la arena tosquiza esta relación toma valores entre $0,85 \cdot \phi'$ y ϕ' .

Comparando estos resultados con los obtenidos por Potyondy en 1961, se puede inferir que tanto para la arena de miga como para la arena tosquiza los valores de la relación δ'/ϕ' , son asimilables a los estudiados por este investigador mediante el empleo de interfaz suelo-madera y suelo-hormigón. Potyondy ha obtenido valores comprendidos entre $0,80 \cdot \phi'$ y $0,95 \cdot \phi'$ cuando emplea materiales con un 50% de fracción arenosa más un 50% de fracción fina, y valores entre $0,76 \cdot \phi'$ y $0,98 \cdot \phi'$ para suelos puramente granulares.

4.5. INFLUENCIA DEL GRADO DE COMPACTACIÓN EN LOS ENSAYOS DE ROZAMIENTO

Los resultados de la influencia del grado de compactación en el rozamiento de la interfaz suelo-material compuesto, es pre-

sentado en las figuras 12 y 13, tanto para arena tosquiza como para arena de miga, respectivamente. En ambos casos se presentan los valores de δ' en función de la rugosidad normalizada R_n .

En general los resultados obtenidos muestran que el aumento en el grado de compactación provoca un aumento en el valor de rozamiento de la interfaz δ' , siendo el valor de δ'_{PM} del orden de $1,2 \cdot \delta'_{PN}$ para el caso de la arena tosquita y, δ'_{DR} del orden de $1,2 \cdot \delta'_{PM}$ para el caso de la arena de miga.

Además, considerando todos los tipos de rugosidad empleados se produce un aumento aproximadamente lineal de δ' a medida que aumenta la rugosidad normalizada R_n , manteniéndose este comportamiento tanto si se define como compactación de referencia el ensayo Proctor Modificado, el ensayo de Densidad Relativa o si se emplea el ensayo Proctor Normal.

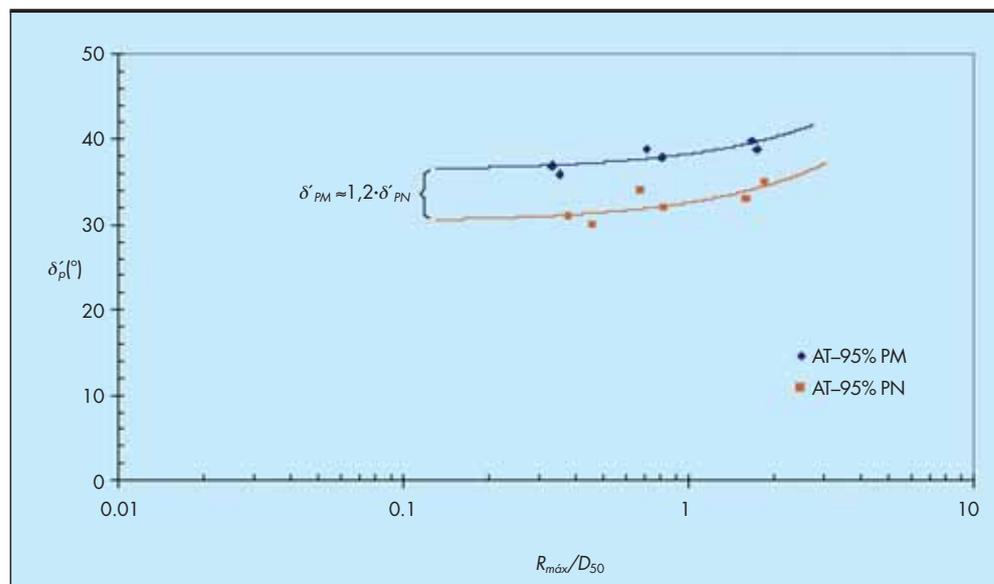


FIGURA 12. Influencia de la compactación en el rozamiento de la interfaz arena tosquiza-material compuesto.

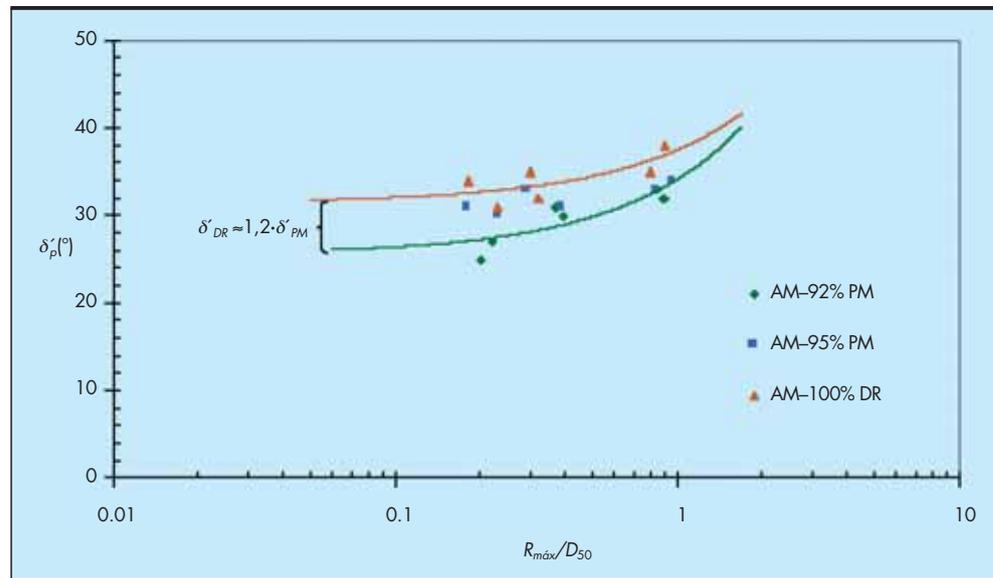


FIGURA 13. Influencia de la compactación en el rozamiento de la interfaz arena de miga-material compuesto.

5. CONCLUSIONES

Los resultados de los ensayos de rozamiento realizados muestran que, los distintos factores estudiados influyen de forma importante en la interacción entre materiales compuestos y suelos. De todos los factores analizados la rugosidad de las placas es el que presenta la mayor influencia en el ángulo de rozamiento de la interfaz δ' , dándose una tendencia lineal del aumento de δ' con la rugosidad normalizada R_n , tanto para la arena de miga como para la arena tosquiza.

Los resultados alcanzados permiten corroborar lo planteado por Frost y Han (1999): materiales con menor tamaño medio de partículas D_{50} que deslizan sobre una superficie de rugosidad dada alcanzan mayores valores de δ' que aquellos que tienen un mayor valor de D_{50} , y que deslizan sobre la misma superficie. Es importante en este sentido considerar el efecto de la compactación, dado que esta respuesta se dará en la medida que las condiciones de densificación de los materiales sean semejantes.

Así también, los valores del ángulo de rozamiento entre materiales se ajustan de manera adecuada a los resultados alcanzados en investigaciones previas (Potyondy, 1961; Uesugi y Kishida, 1986-a y 1986-b; Tsubakihara et al, 1993; Rao et al, 1998; Frost y Han, 1999; Ampera y Aydogmus, 2005; Lings y Dietz, 2005), siendo en general mayores en todas las pruebas realizadas.

Tanto la arena de miga como la arena tosquiza presentan un rozamiento adecuado con los materiales compuestos empleados, pudiendo ambos materiales ser utilizados para el diseño de muros de contención de tierras, en especial en muros de tierra mecánicamente estabilizada.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-MHAIDIB, A. (2006). "Influence of shearing rate on interfacial friction between sand and steel". *Engineering Journal of the University of Qatar*, vol. 19.

AMPERA, B. and AYDOGMUS, T. (2005). *Skin friction between peat and silt soils with construction materials*. Electronic Journal of Geotechnical Engineering. Volumen 10, Bundle

D (en línea). Disponible en <http://www.ejge.com/2005/Jour-TOC10D.htm>.

DIETZ, M. and LINGS, M. (2006). "Postpeak strength of interfaces in a stress-dilatancy framework". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 132 (11): 1474-1484.

FROST, J., and HAN, J. (1999). "Behavior of interfaces between fiber-reinforced polymers and sands". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 125 (8): 633-640.

JARA, G. (2008). Estudio de la aplicabilidad de materiales compuestos al diseño de estructuras de contención de tierras y su interacción con el terreno, para su empleo en obras de infraestructura viaria. Tesis Doctoral UPM. 2º Premio Entrecanales a la Mejor Tesis Doctoral en Geotecnia 2007-2008.

LAMBE, T. and WHITMAN, R. (1969). *Soil Mechanics*. Massachusetts Institute of Technology. John Wiley and Sons, New York.

LINGS, M. and DIETZ, M. (2005). "The peak strength of sand-steel interfaces and the role of dilation". *Journal Soils and Foundations*. 45 (6): 1-14.

PAIKOWSKY, S., PLAYER, C. and CONNORS, P. (1995). "A dual interface apparatus for testing unrestricted friction of soil along solid surfaces". *Journal Geotechnical Testing*. 18 (2): 168-193.

POTYONDY, J. (1961). "Skin friction between various soils and construction materials". *Geotechnique*. 11 (4): 339-353.

RAO, S., ALLAM, M. and ROBINSON, R. (1998). "Interfacial friction between sands and solid surfaces". *Proceedings Instn. Civil Engineering, Geotechnical Engineering*. 131: 75-82.

UESUGI, M. and KISHIDA, H. (1986-a). "Influential factors of friction between steel and dry sands". *Journal Soils and Foundations*. 26 (2): 33-46.

UESUGI, M. and KISHIDA, H. (1986-b). "Frictional resistance at yield between dry sand and mild steel". *Journal Soils and Foundations*. 26 (4): 139-149.