

# APLICACIÓN DE CARBONATO CÁLCICO MICROBIOLÓGICO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS USADOS EN OBRAS LINEALES

Garzón, E., Morales, L.<sup>(P)</sup>

*(Universidad de Almería, Departamento de Ingeniería Rural)*

## Abstract

The present study examines the chemical, hydraulic and geotechnical properties of different types of soils. They are examined as a function of calcium carbonate content produced by biomineralization, with the aim of using these materials in lineal construction.

Different tests have been realized for the chemical characterization where the parameters determined have been pH, conductivity, soluble salts, content of sulfates, plaster, carbonates, organic matter and capacity of exchange cationic. For the hydraulic characterization, the permeabilities have been calculated in a triaxial equipment, the curves of retention by psychrometric method and the porosity of the samples by means of mercury intrusion porosimetry and adsorption of nitrogen gas. The characterization of the mechanical properties has been performed by testing the compressibility and resistance to the direct shear test. All the essays have been carried out with and without treatment with bacteria.

Has been observed that the soils improve its chemical properties. Also certain improvements of the hydro-mechanical properties have been obvious, as the decrease of the compressibility in conditions of saturation and an increase in the resistance to the cut. In spite of these improvements, it does not change its category in the system of classification to be used in the construction of roads and bridges (Spanish classification PG-3).

*Keywords: Soils stabilization, biomineralization, calcium carbonate.*

## Resumen

El presente estudio examina las propiedades químicas, hidráulicas y geotécnicas de diferentes tipos de suelos. Éstos se examinan en función del contenido de carbonato cálcico producido por biomineralización, con el objetivo de emplear estos suelos en obras lineales.

Se han realizado diferentes ensayos para la caracterización química donde se han determinado parámetros como: pH, conductividad, sales solubles, contenido de sulfatos, yeso, carbonatos, materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico. Para la caracterización hidráulica se han calculado la permeabilidad en un equipo triaxial, las curvas de retención por el método psicrométrico y la porosidad de las muestras por porosimetría de mercurio y adsorción de gas nitrógeno. Las propiedades mecánicas se han desarrollado mediante los ensayos de compresibilidad y resistencia al corte. Todos los ensayos se han llevado a cabo con y sin tratamiento microbiológico.

Se ha observado que los suelos mejoran sus propiedades químicas y ciertas propiedades hidromecánicas, como la disminución de la compresibilidad en condiciones de saturación y un aumento en la resistencia al corte. A pesar de esto, no varía su categoría en el sistema de clasificación para ser utilizados en la construcción de carreteras y puentes (PG-3).

*Palabras clave: Estabilización de suelos, biomineralización, obras lineales.*

## 1. Introducción

Las obras lineales en España han adquirido una importancia creciente en estos últimos años. Si analizamos la construcción de carreteras y vías urbanas en manos del Ministerio de Fomento, se observa que la inversión ha pasado de 2.120 (2003) a 4.315 (2006) millones de euros. Representando la inversión en carreteras y vías urbanas el 40,84% (2006) de la inversión total en obra civil. Lo que supone la segunda fuente de inversión para el Ministerio, tras la inversión en infraestructura ferroviaria. De estos datos se deduce que la ejecución de obras lineales constituye una prioridad política y una demanda social. Así en 2005 su licitación a nivel nacional supero los 15.000 millones de euros (MFOM, 2006). Este hecho ha posibilitado que la red de carreteras gestionadas por el Estado (vías de gran capacidad y resto de la red), han pasado de un total de 25.155 Km., en 2004, a los 25.804 Km. en 2006.

En ocasiones, el terreno a utilizar en la construcción de obras lineales no suele ser ideal desde el punto de vista de la ingeniería de suelos. En los primeros días de la construcción de obras lineales se evitaban problemas potenciales eligiendo otro lugar o eliminando el terreno indeseable y substituyéndolo por un suelo adecuado. Un segundo método es adaptar el proyecto a las condiciones existentes. Mientras que el método más viable es la mejora del suelo o estabilización. (Lambe y Whitman, 1967). La estabilización de los suelos pretende mejorar su estructura granular o su sensibilidad al agua o las dos cosas, con la adición al suelo natural de algo que modifique sus propiedades negativas. Si lo que se añade es otro tipo de suelo, estaremos en presencia de una estabilización granulométrica, que se denomina, asimismo, mecánica o natural. Pero, también se puede adicionar al suelo un producto industrial, ligante, que sea capaz de modificar la estructura granular, dotándole de la cohesión que no tiene o disminuir una plasticidad excesiva. Se trataría, entonces, de una estabilización química (cemento, cal, productos bituminosos, etc.) (Dal-Re, 1994). Sobre este punto Flórez y Lizcano, 2006 distingue entre los estabilizantes químicos tradicionales (cemento, cal ó materiales asfálticos) y otros aditivos como las escorias de horno alto, además apunta que desgraciadamente el proceso de estabilización tradicional lleva consigo la necesidad de altas inversiones por parte de las empresas constructoras.

Sin embargo, el riesgo que supone el uso de estabilizantes químicos para los operarios que los emplean (ANCADE; Occupational Safety & Health Administration.), así como para el medio ambiente (Häkkinen y Vares, 1998) está impulsando la utilización de bacterias y otros microorganismos en los diversos campos de la ingeniería en los últimos años (Gray 2001, Weiner y Addadi 1997).

La inclusión de soluciones biotecnológicas ha abierto nuevas posibilidades de estabilización de suelos a partir de la formación bacteriana de cristales de calcita, un conocido cementante natural que permite mejorar las propiedades mecánicas del suelo. Este se puede obtener con la acción de las bacterias degradadoras de urea que producen amonio a partir de la hidrólisis de esta, creando unas condiciones alcalinas necesarias para la precipitación de carbonato cálcico (Flórez y Lizcano, 2006).

Entre los materiales usados en ingeniería civil los suelos con una proporción importante de carbonatos merecen especial atención. Las propiedades geotécnicas de estos suelos están ampliamente correlacionadas con el tipo y cantidad de partículas calcáreas. (Georgiannou et al., 1991; Lamas, 2003). Por esto, el contenido en carbonatos puede influir en determinadas propiedades (Jiménez Salas, 1993; El Amrani et al., 1998) como el grado de compresibilidad y, en general en la respuesta tensión-deformación (Fischer et al., 1967; Mitchell, 1975; Bryant et al., 1979; Demars, 1982; Dapena, 1993) y, en un amplio sentido, en el comportamiento de la ingeniería de fundaciones y de materiales de construcción.

Por todo lo anteriormente expuesto, se hace necesario examinar la influencia de la bioprecipitación de carbonatos en las propiedades químicas e hidro-geotécnicas de tres tipos de suelos con el objetivo de aplicarlo en la construcción de obras lineales.

## 2. Metodología

Los diferentes ensayos se realizan sobre suelos naturales y sobre suelos tratados microbiológicamente. Los microorganismos se adicionan al suelo natural junto con el agua de amasado, de forma que se dejan crecer en cámaras húmedas para después frenar su crecimiento y proceder tanto a los ensayos químicos como a los hidro-mecánicos.

Se llevan a cabo análisis químicos de pH por potenciometría siguiendo la norma UNE-EN 13037:2001, de conductividad eléctrica del extracto de saturación con un conductímetro siguiendo la norma UNE 77308:2001, sales solubles a partir de la fórmula de Richards (UNE 103205:2006), sulfatos por turbidimetría (UNE 103201:1996), del yeso mediante el método de Richards (UNE 103206:2006), carbonatos determinados por el método de Barahona siguiendo la norma UNE 103200:93, materia orgánica (UNE 103204:1993) y la capacidad de intercambio catiónico que se ha realizado según la metodología recomendada (Método del acetato) por el Servicio de Conservación de suelos del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (Marañes, et al., 1994). Los ensayos de identificación geotécnica se determinan a partir de la distribución del tamaño de partículas, índice CBR e hinchamiento y límites de Atterberg, siguiendo los protocolos definidos en AENOR, 1999. Los ensayos de índice CBR e hinchamiento para los suelos tratados microbiológicamente, se llevan a cabo a igual grado de saturación que para los suelos naturales. Para la caracterización hidráulica se han hallado las permeabilidades en un equipo triaxial, las curvas de retención mediante el método psicrométrico (equipo WP4, Decagon Devices, *chilled-mirror dew-point psychrometer*), así como la porosidad de las muestras mediante el método de porosimetría por intrusión de mercurio (equipo Autopore IV, Micromeritics).

La caracterización de las propiedades mecánicas se ha determinado a partir de ensayos de compresibilidad en edómetro tipo Bishop, comenzando a cargar las muestras a 20kPa (de tensión vertical) y se saturaron a 50kPa y a 100kPa, con excepción de B-4, que se saturó a 100 y 200kPa (a diferentes humedades y saturada) y de resistencia al corte (saturada) (AENOR, 1999).

Si un tipo de suelo (definido por su mineralogía, granulometría, etc.) es compactado, su estado tensional inicial (que podría estar definido por las tensiones, la succión y la superficie de fluencia) dependerán del proceso de compactación, contenido de agua usado,  $\omega_{\text{ópt}}$ , y la densidad seca,  $\rho_d$ , generada después de la compactación (Gens 1995). Por ello, los ensayos llevados a cabo para el estudio de las propiedades hidráulicas, de compresibilidad, así como de resistencia al corte, se han realizado a partir de unas condiciones iniciales establecidas. Parten de un Proctor normal, correspondiente a una densidad seca óptima ( $\rho_d$ ) y una humedad comprendida entre la óptima y la óptima menos el 2% ( $\omega_{\text{ópt}} - \omega_{\text{ópt}} - 2\%$ ). Por lo tanto, se trabaja en el lado seco del plano de compactación (grados de saturación menores de 80%), en el que los suelos presentan una mayor rigidez, permeabilidad saturada y tienden a desarrollar colapso durante el mojado a tensiones elevadas (Prapaharan et al. 1991). Los suelos tratados microbiológicamente son compactados a partir de unos valores iniciales de humedad ( $\omega_{\text{ópt}} - \omega_{\text{ópt}} - 2\%$ ) idénticos a los de su homólogo sin tratar. Es decir, se mantiene la humedad y la energía de compactación PN para los suelos naturales y tratados.

Las muestras se evalúan siguiendo la clasificación del suelo para la construcción de carreteras y puentes en España (clasificación PG3) (MOPU, 1991).

### 3. Resultados

#### 3.1. Parámetros químicos

Al tratar el suelo B-3 con microorganismos (BT-3), el pH se hace ligeramente alcalino y la conductividad eléctrica aumenta un poco, pero sigue siendo menor de 2. El contenido de sales solubles y yeso cae bruscamente y la materia orgánica se mantiene. La aplicación de microorganismos para B-4, hace que el suelo (BT-4) pase a ligeramente alcalino, donde se pueden dar problemas por acumulación de nitritos, los valores de conductividad eléctrica descienden y pasan a ser de salinidad alta. En cuanto a los contenidos de sales solubles, yeso y materia orgánica se reducen. Para el caso BT-5, baja el pH pasando a ligeramente alcalino y la capacidad de intercambio catiónico pasa a ser normal, con respecto al suelo no tratado (B-5). Y los contenidos de yesos y materia orgánica caen bruscamente (tabla 1).

Suelo	pH	Conductividad eléctrica (dS/m)	Sales solubles (%)	Sulfatos (%)	Yeso (%)	CaCO <sub>3</sub> eq (%)	Materia Orgánica (%)	Capacidad de intercambio catiónico (meq/100 gr. Suelo)
B-3	6.59	1.101	0.545	$8.5 \cdot 10^{-6}$	2.11	64.6	0.12	7.5
BT-3	8.84	1.41	0.09	0.0294	0.29	57	0.14	10.2
B-4	8.43	38.3	2.45	0.1192	1.25	3.1	0.39	8.73
BT-4	8.81	13.23	0.847	0.1056	0.44	22.7	0.16	10.8
B5	9.4	0.54	0.035	$1.1 \cdot 10^{-3}$	0.91	0.2	0.24	17.8
BT-5	8.88	1.27	0.081	$23.1 \cdot 10^{-3}$	0.12	2.6	0.07	22.3

Tabla 1. Parámetros químicos de las muestras ensayadas.

#### 3.2. Identificación geotécnica

En primer lugar se muestra la tabla resumen 2, con parte de los ensayos de identificación realizados.

El contenido de partículas finas (partículas menores de 0.08mm) y el porcentaje de partículas que atraviesan el tamiz # 4 y # 40, se presentan en la tabla 3. Para las tres muestras de suelo el tratamiento microbiológico actúa de igual forma, reduciendo el índice CBR, así como el hinchamiento que es constante para B-3 y BT-3 y disminuye para BT-4 y BT-5 (tabla 4). El límite líquido tiende a aumentar en las tres muestras tras el tratamiento microbiológico. Sin embargo, el índice de plasticidad se duplica para los suelos BT-3 y BT-4, mientras que prácticamente se mantiene para el BT-5. Esto permite clasificar los suelos según la Clasificación Unificada de Casagrande.

	<b>B-3</b>	<b>BT-3</b>	<b>B-4</b>	<b>BT-4</b>	<b>B-5</b>	<b>BT-5</b>	
<b>Densidad seca (Tn/m<sup>3</sup>)</b>	2	1.65	2.084	1.86	1.85	1.69	
<b>Humedad (%)</b>	8.12-10.10	9.34-11.59	9.4	6.18-8.07	12.5-14.4	11.9-12.9	
<b>Gravedad específica (Tn/m<sup>3</sup>)</b>	2.7	2.69	2.824	2.885	2.725	2.735	
<b>Permeabilidad (m/s)</b>	4*10 <sup>-09</sup>	4*10 <sup>-07</sup>	8*10 <sup>-10</sup>	10*10 <sup>-10</sup>	4*10 <sup>-10</sup>	2*10 <sup>-08</sup>	
<b>Ángulo de fricción (°)</b>	48.2	51.8	27.2	24.3	37.85	40.1	
<b>Índice de vacíos</b>	0.35	0.63	0.355	0.551	0.473	0.618	
<b>Porosidad (%)</b>	25.9	38.7	26.2	35.5	32.1	38.2	
<b>Densidad saturada (Tn/m<sup>3</sup>)</b>	2.26	2.04	2.346	2.215	2.171	2.072	
<b>Grado de saturación (%)</b>	62.6-77.9	39.9-49.5	74.8	32.4-42.2	71.7-83.2	52.5-57.2	
<b>Superficie específica (m<sup>2</sup>/g)</b>	BET	24.4	23.6	7.6	16.5	33.1	31.8
	Langmuir	33.7	32.7	10.6	22.9	45.9	43.7

Tabla 2. Identificación de las muestras ensayadas.

Muestra	Clasif.	% pasa			Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice de plasticidad (%)
		#4	#40	#200			
B-3	SM	60	30	16	34	27	7
BT-3	GC	48	27	15	36	22	14
B-4	SC	81.7	59.9	30.2	25.6	17.2	8.4
BT-4	SC	64	14	5	32	15	17
B-5	SC	100	70	48	48	18	30
BT-5	GW	40	2	0	49	20	29

Tabla 3. Clasificación, granulometría y límites de Atterberg de las muestras ensayadas.

MUESTRA	CBR		Hinchamiento
	100% Compactación	95% Compactación	
B-3	21	14	Nulo
BT-3	1.4	0.5	Nulo
B-4	2.5	1.7	3.56
BT-4	0.6	0.2	0.06
B-5	4	2	0.52
BT-5	2	0.5	0.19

Tabla 4. Índice CBR e hinchamiento.

### 3.3. Caracterización hidráulica

Los valores de permeabilidad, tabla 2, aumentan dos órdenes de magnitud para los suelos BT-3 y BT-5, manteniéndose casi constante para el BT-4.

El conocimiento de las propiedades de retención de agua (higroscopicidad y capacidad de almacenar agua) es un elemento esencial para la comprensión de las capacidades de hinchamiento (Musso et al., 2008). Las curvas de retención de agua para los diferentes materiales durante las trayectorias de secado y de humedecimiento se presentan en las figuras 1, 2 y 3. Por un lado, excepto para B-3 y BT-3 que muestran curvas similares, la capacidad de almacenamiento de agua para el rango de baja succión (alrededor de 1MPa) es ligeramente menor para los suelos tratados. Por otro lado, la relación lineal Log succión-contenido de agua para un rango mayor de succión muestra un menor aplanamiento de la pendiente, lo que denota una menor superficie específica para los suelos con carbonatos (Romero y Vaunat, 2000). La mayor superficie específica, la cual se corresponde con los datos presentados en la tabla 2, está asociada con una mayor higroscopicidad (la superficie específica permite absorber agua) y una mayor capacidad de sufrir cambios de expansión del volumen en el proceso de humedecimiento.

En las figuras 4, 5 y 6, se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de porosimetría por intrusión de mercurio para las muestras B-3 / BT-3, B-4 / BT-4 y B-5 / BT-5. En éstas se representa la función densidad de poros frente al tamaño de los poros. Tras el tratamiento, la muestra BT-3 aumenta la densidad de poros de menor tamaño en relación a B-3 (figura 4), mientras que BT-4 y BT-5 ven incrementada la densidad de poros de diámetro mayor en relación a B-4 y B-5 respectivamente (figuras 5 y 6).

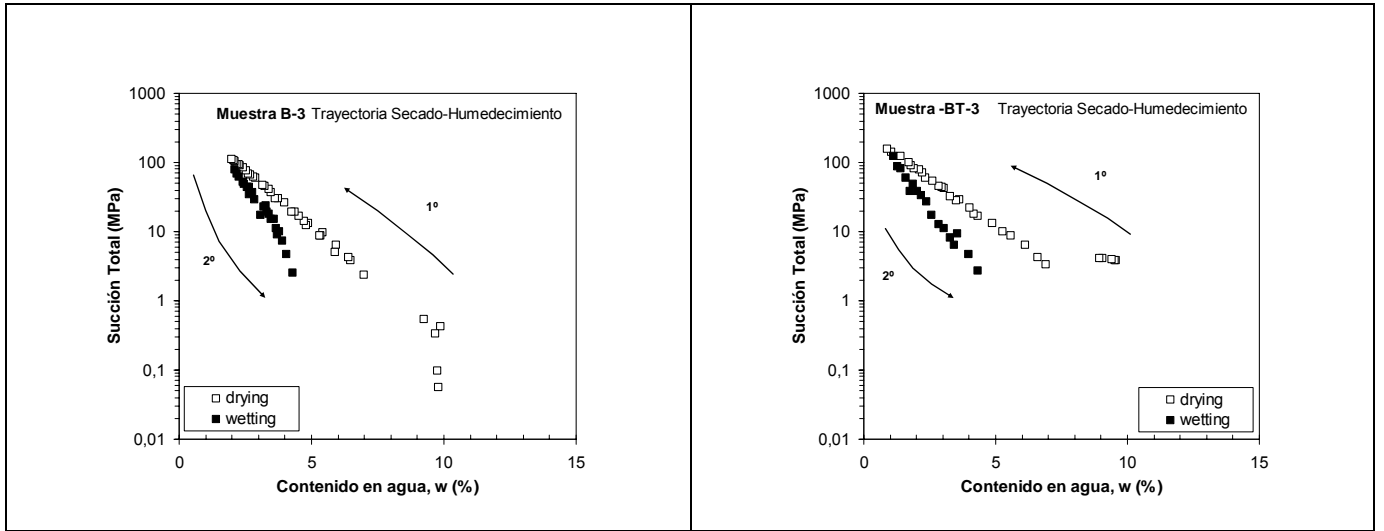


Figura 1. Resultados del ensayo de curvas de retención, basados en el punto de rocío, correspondientes a las muestras B-3 y BT-3.

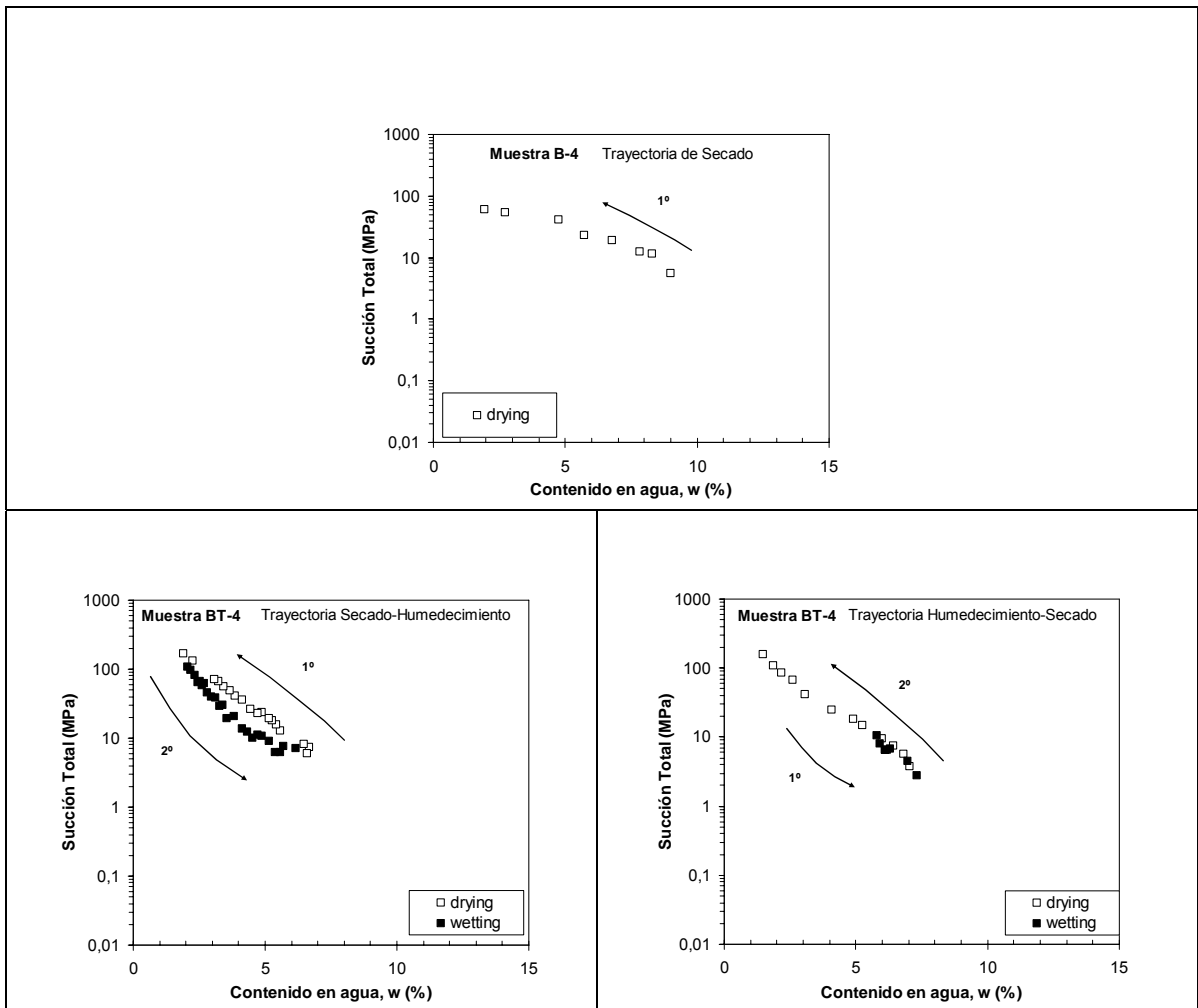


Figura 2. Resultados del ensayo de curvas de retención, basados en el punto de rocío, correspondientes a las muestras B-4 y BT-4.

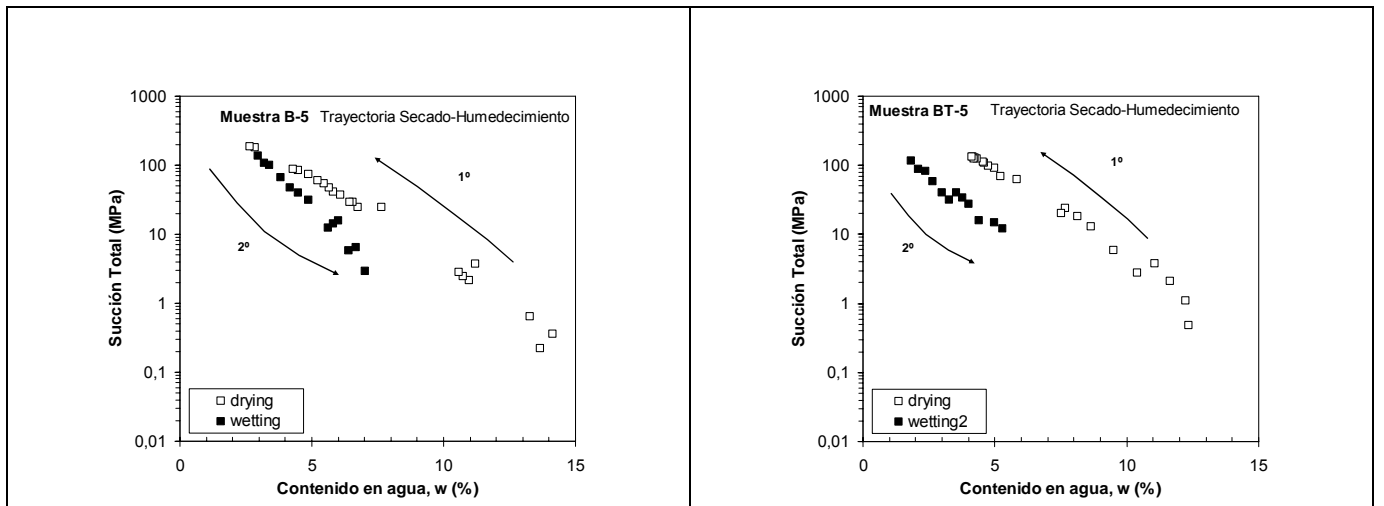


Figura 3. Resultados del ensayo de curvas de retención, basados en el punto de rocío, correspondientes a las muestras B-5 y BT-5.

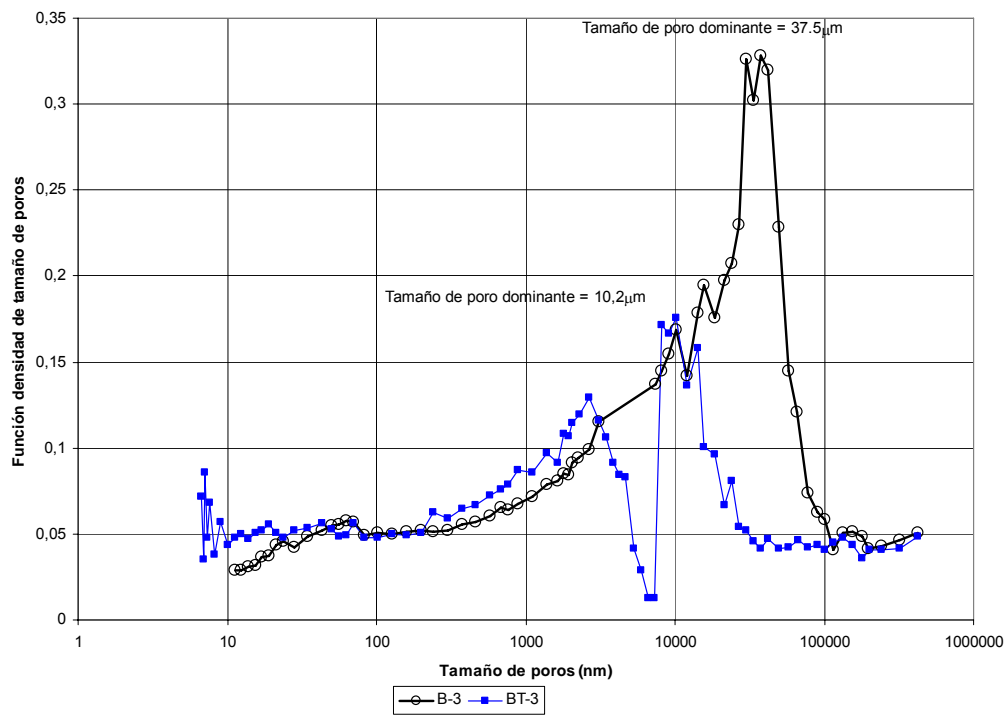


Figura 4. Función de densidad de poros frente al tamaño de los poros llevada a cabo para las muestras B-3 y BT-3.



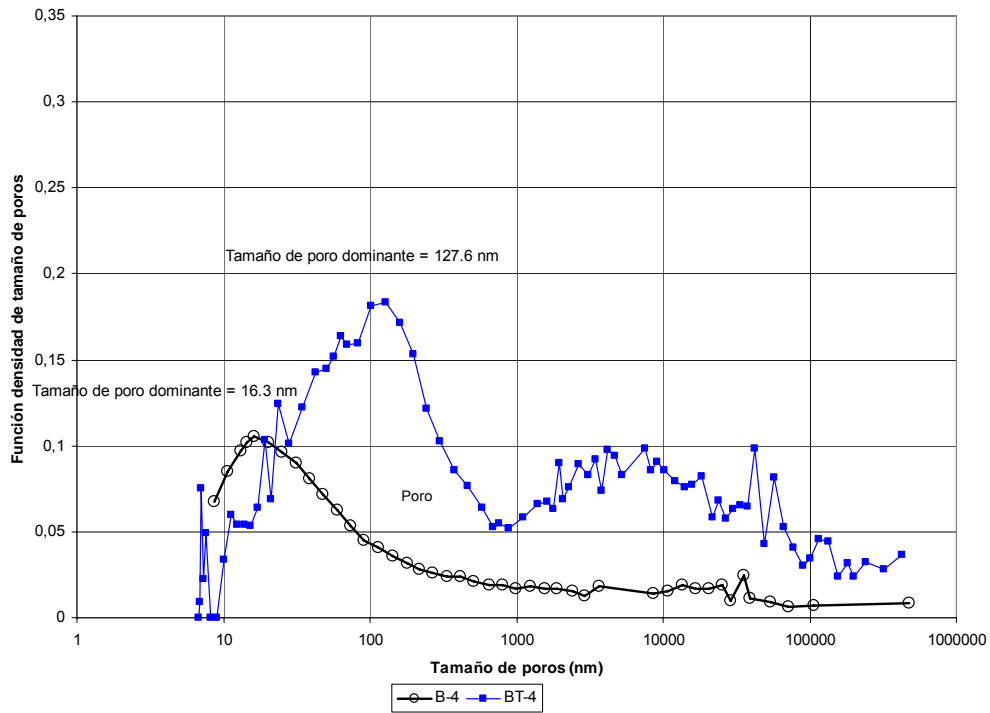


Figura 5. Função de densidade de poros frente ao tamanho de los poros llevada a cabo para las muestras B-4 y BT-4.

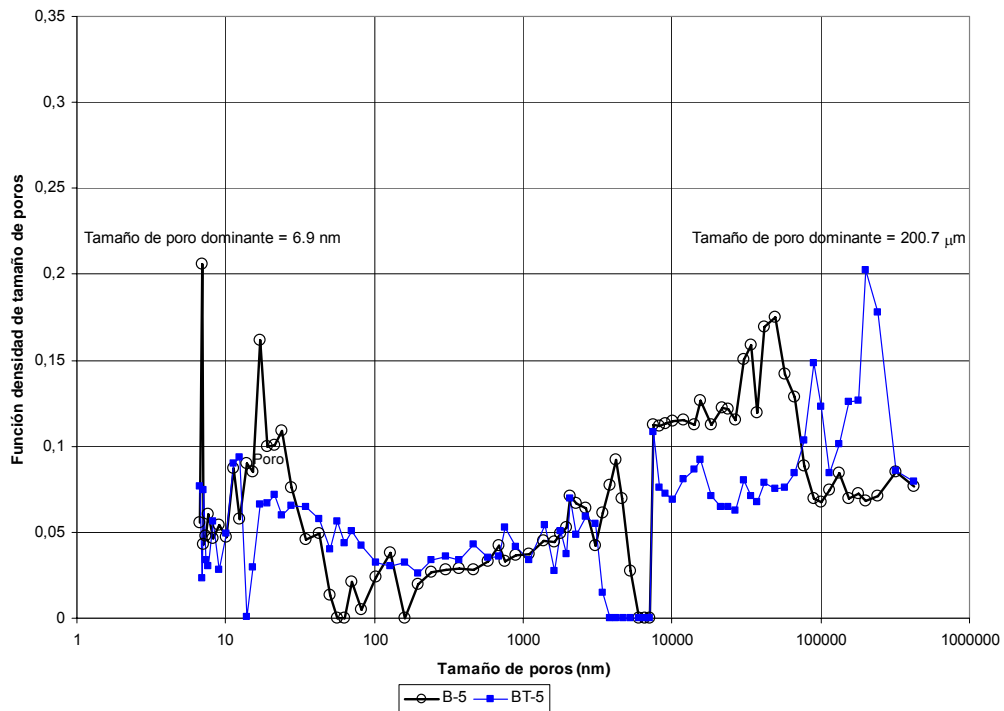


Figura 6. Função de densidade de poros frente ao tamanho de los poros llevada a cabo para las muestras B-5 y BT-5.

### 3.4. Caracterización mecánica

Los suelos tratados se muestran menos compresibles que en su estado natural, al ser estructuras más rígidas. De igual forma, los suelos se comportan de forma más resistente al corte tras el tratamiento, estos resultados coinciden con los encontrados por Fischer et al., 1967; Mitchell, 1975; Bryant et al., 1979; Demars, 1982; Dapena, 1993. Con excepción del suelo BT-4, que fue compactado a un PN con  $\omega_{opt} = 7\%$ , mientras que B-4 fue compactado a un PN con  $\omega_{opt} = 5\%$  (Tabla 5).

Material	Compresibilidad saturada ( $-\delta e / \delta \ln \sigma_v$ )		Resistencia al corte (drenada)	
	Carga	Descarga	$\phi$ (°)	C'
<b>B-3</b>	0.073-0.082	0.001-0.005	48	0
<b>BT-3</b>	0.065 -0. 073	0.007	52	0
<b>B-4</b>	0.038-0.061	0.012-0.014	27	0
<b>BT-4</b>	0.063-0.068	0.016-0.019	24	0
<b>B-5</b>	0.096	0.013	38	0
<b>BT-5</b>	0.080	0.008	40	0

Tabla 5. Valores de compresibilidad y resistencia al corte.

### 3.5. Clasificación PG3

En los proyectos de ingeniería civil en España, el PG3 para la construcción de carreteras y puentes (MOPU, 1991), es el sistema de clasificación oficial, que define cinco niveles de calidad del suelo (para terraplenes) de acuerdo con los valores de tamaño máximo de partícula, porcentaje <0.08mm, límites de Atterberg, CBR, yeso y contenido en sales solubles, contenido en materia orgánica y asiento en ensayo de colapso. Estos cinco niveles de calidad, de menor a mayor son los siguientes: suelos inadecuados, suelos marginales, suelos tolerables, suelos adecuados y suelos seleccionados. Nuestras muestras de acuerdo con los resultados que se presentan en la tabla 6 son:

<b>B-3</b>	<b>BT-3</b>	<b>B-4</b>	<b>BT-4</b>	<b>B-5</b>	<b>BT-5</b>
Tolerable	Tolerable	Marginal	Marginal	Tolerable	Tolerable

Tabla 6. Clasificación PG3 de los suelos ensayados.

Los diferentes valores obtenidos para B-3 permiten clasificar este suelo como tolerable según el PG3. Para BT-3, los valores de yeso son los que impiden clasificarlo como adecuado, a pesar de disminuir considerablemente respecto a B-3. La muestra B-4, se clasifica como marginal, mientras que BT-4 al ser el colapso superior al 1%, el suelo se sigue considerando marginal. B-5 es tolerable y BT-5 con estos parámetros físico-químicos sigue siendo tolerable, ya que el valor del límite líquido supera en un 9% lo establecido en el PG3.

## 4. Conclusiones

El tratamiento con microorganismos mejora considerablemente las propiedades químicas de los suelos. No tanto así las propiedades hidro-mecánicas, ya que al trabajar a igualdad de energía de compactación no se alcanza una misma densidad seca máxima al Proctor normal, haciendo que la permeabilidad al agua aumente. Sin embargo, la compresibilidad de los suelos tratados es menor y la resistencia al corte se ve incrementada.

Estos resultados revelan que los tratamientos de suelos con microorganismos pueden convertirse en un procedimiento eficaz de estabilización de suelos, siendo además una técnica que no produce ningún impacto sobre el medioambiente y todo ello con un coste económico mucho más bajo, en comparación con los procedimientos tradicionales de estabilización.

## 5. Referencias

AENOR. "Geotecnia. Ensayos de Campo y de Laboratorio". Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, 1999.

Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España. [www.ancade.es](http://www.ancade.es)

Bang, S.S., Galinat, J.K., Ramakrishnan, V. "Calcite precipitation induced by polyurethane-immobilized *Bacillus pasteurii*". Enzyme and Microbial Technology, Vol. 28, 2001, pp. 404–409.

Bryant, W.R., Deffache, A.P., Trabant, P.K. "Physical and Mechanical Properties of Calcareous Sediments". Plenum Press, New York, 1979.

Dal-re, R. "Caminos Rurales. Proyecto y Construcción". Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, 1994.

Dapena, E. "Influencia de la rigidez del material del núcleo de arcilla sobre el comportamiento de una presa de materiales sueltos". Simposio Sobre Geotecnia de Presas de Materiales Sueltos. Zaragoza, 1993, pp. 217–226.

Demars, K.R. "Unique Engineering properties and compression behaviour of deep-sea calcareous sediment". Demars, K.R., Chaney, "Geotechnical Properties Behaviour and Performance of Calcareous Soils", ASTM STP, Vol. 777. ASTM, Philadelphia, 1982, pp. 97–112.

El Amrani, N., Lamas, F., Irigaray, C., Chaco'n, J. "Engineering geological characterization of Neogene marls in the southeastern Granada Basin, Spain". Engineering Geology, Vol. 50 (102), 1998, pp. 165–175.

Fischer, A.G., Honjo, S., Garrison, R.E. "Electron Micrography of Limestones and their Nanophosil". Princeton University press, Princeton, N.J., 1967.

Flórez J. A., Lizcano, A. "Estabilización de suelos con biocemento". ICYA 2006-23, 2006.

Gray, D. "Microbial Stabilization". University of Michigan, 2001.

Gens, A. "Constitutive laws. Modern Issues in Non-saturated Soils". Edited by A. Gens, P. Jouanna and B.A., Schrefler. Springer - Verlag, 1995, pp. 129-158.

Georgiannou, V.N., Rampello, S. and Silvestri, F. "Static and dynamic measurements of undrained stiffness on natural overconsolidated clays". Prodecings XECSMFE, Vol. 1, Florencia, 1991, pp. 91-95.

Häkkinen, T., Vares, S. "Environmental Burdens of concrete and concrete products. Technical Research Centre of Finland", 1998.

Jiménez Salas, J. "Núcleos, espaldones y escolleras: estudio de préstamos y características de los materiales". Simposio sobre Geotecnia de Presas de Materiales Suelos. Zaragoza, 1993, pp. 11-44.

Lamas, F., Irigaray, C. and Chacón J. "Geotechnical characterization of carbonate marls for the construction of impermeable dam cores". Engineering Geology, Vol. 66, 2002, pp. 283-294.

Lambe, W.T., Whitman, R. W. "Mecánica de suelos". Editorial Limusa S.A. México, 1998.

Marañés, A., Sánchez, J.A., Haro, S., Sánchez, S.T., Lozano, F.J. "Análisis de suelos: Metodología e interpretación". Editorial Copysur, Almería, 1994, 126 pp.

Ministerio de Fomento, 2006. [www.fomento.es](http://www.fomento.es)

Mitchell, J.K. Soil Behaviour, Vol. 1. Wiley, New York, 1975.

Mitchell, J.K. and Santamarina, J.C. "Biological Considerations in Geotechnical Engineering in Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 131 (10), 2005, pp. 1222-1233.

MOPU. "Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG3)". Dirección General de Carreteras, Secretaría General Técnica, Servicio de Publicaciones, Madrid, 1991, 570 pp.

Musso, G., Chiguini, S. and Romero, E. "Mechanical Sensitivity to Hydrochemical Processes of Monastero Bormida Clay". Water Resources Research, Vol. 44, 2008.

Occupational Safety & Health Administration. [www.osha.gov](http://www.osha.gov)

Prapaharan, S., White, D.M. and Altschaeffl, A.G. "Fabric of field- and laboratory-compacted clay". J. Geotech. Engrg., ASCE, Vol. 117(12), 1991, pp. 1934-1940.

Romero, E. and Vaunat, J. "Retention Curves of Deformable Clays, in Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils", edited by A. Tarantino and C. Mancuso, 2000, pp. 91-108, A. A. Balkema Rotterdam.

Tiano, P., Biagiotti, L. Mastromei, G. "Bacterial bio-mediated calcite precipitation for monumental stones conservation: methods of evaluation". Journal of Microbiological Methods, Vol. 36 (1-2), 1999, pp. 139-145.

UNE-EN 13037:2001 "Mejoradores del suelo y sustratos de cultivo. Determinación del pH".

UNE 77308:2001 "Calidad del suelo. Determinación de la conductividad eléctrica específica".

UNE 103205:2006 "Determinación del contenido de sales solubles de un suelo".

Weiner, S. Addadi, L. "Design strategies in mineralized biological materials". Journal of Materials Chemistry, Vol. 7(5), 1997, 689-702.

**Correspondencia** (Para más información contacte con):

Departamento de Ingeniería Rural. Universidad de Almería.

La Cañada de San Urbano. CITE II A. 04120 Almería (España).

Teléfono +34 950 015529. e-mail: [mh1274@alboran.ual.es](mailto:mh1274@alboran.ual.es) ; [egarzon@ual.es](mailto:egarzon@ual.es)