

Estabilización de Lodos Bentoníticos Procedentes de Tuneladora Tratados con cal

Improvement with addition lime of sludge proceeding from tunnel boring for soil application

Diana Movilla-Quesada, Joaquín Díaz & Daniel Castro-Fresno
University of Applied Sciences – THM, Giessen, Germany
Department of Architecture and Civil Engineering
University of Cantabria, Santander, Cantabria, Spain
Department of Transports, Projects and Processes Technology – University of Cantabria, Santander, Spain



ABSTRACT

The investigation shows the results obtained from lime treatment of bentonite sludge samples obtained from the tunnel boring machine and it's applying on embankments or sub-grades. It has made mineralogical, mechanical and geotechnical characterization tests of the bentonite sludge mixture with the optimal proportion of 3% lime, improving 80 % in compared with the initial sludge mechanical properties

RESUMEN

La estabilización de suelos aplicada a la mejora de terraplenes y explanadas es una técnica que constituye una de las mejores alternativas desde el punto de vista funcional, ambiental y económico. El uso de la cal como conglomerante contempla ventajas mejorando las propiedades mecánicas del suelo.

En la presente investigación se muestran los resultados obtenidos a partir del tratamiento con cal de cuatro muestras de lodos bentoníticos procedentes de tuneladora. El estudio realizado se basa en ensayos de tipo mineralógico, químico, geotécnico y mecánico de la mezcla del lodo bentonítico con el porcentaje óptimo de cal, llegándose a alcanzar mejoras del 80% en las propiedades resistentes del suelo.

1 INTRODUCCIÓN

Los parámetros más importantes en el diseño y ejecución de terraplenes y explanadas, tienden al uso de nuevas tecnologías y métodos que sean más eficientes y menos agresivos con el medio ambiente (Kabak et al. 2007).

La estabilización de suelos consiste en adicionar un conglomerante (cal, cemento u otros) que permita mejorar las propiedades mecánicas y químicas de dicho material, para posteriormente poder aplicarlo en obras de carreteras (ANCADE 2007).

Este tipo de tratamiento con cal se realiza en suelos denominados inadecuados, por lo que los efectos esperados son importantes, ya que reutilizando este material, se lograrían obtener grandes beneficios medioambientales y económicos reduciendo el impacto de las obras sobre el medio ambiente y costes, ya que sería tratado y reutilizado in-situ (Usman et al. 2005).

Dependiendo de las características de cada suelo y del tratamiento posterior que se realice con el aditivo, los suelos podrán clasificarse acorde con la normativa [15] en marginales, tolerables, adecuados y seleccionados, siendo estos últimos los que mejores características presentan en cuanto a su aplicabilidad.

La estabilización de suelos es un método que ha sido estudiado en muchas partes del mundo. Investigadores como Omar Saeed et al. (2010) y Liu et al. (2009) procedentes de Universidades de Europa del Este, han sido autores de artículos basados en el estudio del suelo y sus diferentes conglomerantes.

En países como Nigeria donde la financiación de obras suele ser un problema, se han llevado a cabo estudios comparativos de la cal con otro tipo de aglomerantes por el bajo coste que supone utilizarla. En este estudio se llegó a la conclusión que para un mismo porcentaje de aglomerante, la cal tarda menos tiempo en reaccionar con el material y además modifica las propiedades químicas del suelo de una forma más exhaustiva (Osula et al. 1996).

Además de tratar suelos de naturaleza arcillosa o arenosa, se manejó la posibilidad de realizar este mismo estudio pero con otros suelos de origen marino proveniente de la zona de Níger. La investigación fue realizada con cemento y cal en un 2%, aunque los mejores resultados tanto de densidades como CBR fueron obtenidos con la cal, ya que esta mejoraba y aumentaba la capacidad portante del material (Konyeha et al. 2006).

En el año 2007 la Universidad de Oklahoma realizó un estudio sobre la reacción que produce la cal y otro tipo de conglomerantes sobre suelos expansivos. Una vez realizados los ensayos oportunos se llegó a la conclusión

de que utilizando porcentajes del 2 y 3% de cal era posible disminuir el grado de hinchamiento y por lo tanto mejorar la expansividad del suelo (Buhler et al. 2007).

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Materiales y Métodos

Los materiales utilizados en esta investigación proceden de la obra de ampliación del campo de vuelo del Aeropuerto de Málaga ubicada en las cercanías del río Guadalhorce. Los terrenos corresponden con secuencias detríticas muy heterogéneas de gravas, arenas, limos y arcillas, dónde aparecen bolsas de fangos orgánicos y arcillas grises asociadas a la antigua desembocadura del estuario y al abandono de canales activos.

Según los puntos kilométricos, los materiales atravesados por el túnel se distinguen en tres categorías, que corresponden de menor a mayor antigüedad a limos del cuaternario (Qm), arenas finas (Qs), arcillas grises y verdosas cuaternarias (Qc) y gravas limosas.

Los ensayos de caracterización y tratamiento de suelos con cal, fueron realizados en el laboratorio de Caminos y Aeropuertos ubicado en la Escuela de Caminos, Canales y Puertos de Santander.

2.2 Caracterización de la cal

Para el desarrollo de este proyecto se ha utilizado un tipo de cal viva DI90-Q dolomítica que presenta contenido en magnesio superior al 5% y que posteriormente ha sido hidratada en el laboratorio. Este tipo de material tiene su correspondiente marcado CE y es utilizada según la norma UNE EN 459 (2002).

Según la norma [31] este tipo de cales, al mezclarse con el suelo liberan una cantidad de iones Ca^{++} que se encargan de flocular las partículas arcillosas y aumentar el pH de la mezcla, hasta alcanzar valores que causan reacciones puzolánicas causantes del incremento de la resistencia en el tiempo (Boardman et al. 2001; Shanmuganathan et al. 1983).

Uno de los efectos más pronunciados en la mezcla suelo-cal es el aumento en la resistencia del suelo. Este crecimiento es debido a la atracción producida entre las partículas del suelo que provienen de los enlaces puzolánicos y los silicatos que contiene la cal (Godsey et al. 2007).

2.3 Caracterización del lodo procedente de tuneladora

En primer lugar se realizó la caracterización de las distintas muestras sin aporte de cal, ya que era necesario saber si con el aporte las muestras incrementaban o no sus propiedades de una forma satisfactoria.

Mediante una serie de ensayos físicos, químicos y mineralógicos de cada material se comprobó y clasificó cada lodo para su posterior tratamiento.

La comparación en cuanto a las características entre el material natural y el tratado con cal, está basada para ambos en la realización de los ensayos que presenta la normativa.

2.3.1 Análisis granulométrico

No obstante hay que indicar que no solo el tamaño del grano es influyente en el comportamiento de los suelos, ya que propiedades como compacidad, distribución granulométrica y composición mineralógica marcan de una forma especial, como veremos a continuación dicho comportamiento.

2.3.2. Análisis de plasticidad

Las cuatro muestras fueron sometidas a los ensayos de plasticidad denominados límites de Atterberg, a partir del aparato de Casagrande y de la placa de vidrio esmerilado. El contenido de humedad de la muestras es un factor determinante para calcular la plasticidad del material además de su cohesión entre partículas (Casagrande et al. 1960).

2.3.3 Proctor Normal

El ensayo de Proctor Normal se realiza acorde con la norma UNE EN 103500 (1994), utilizando moldes cilíndricos con capacidad para 2,5 kg de material. Cada suelo es compactado en tres capas de 25 golpes cada una, dejando caer libremente la pesa desde una altura de 30,5 cm (Inci et al. 2003).

2.3.4 C.B.R.

El ensayo CBR (*California Bearing Ratio*) se realiza acorde a la normativa UNE EN 103502 (1995). Se realizan tres moldes con compactaciones distintas de 15, 30 y 60 golpes, siendo cada uno de ellos sometidos a inmersiones en agua de 4 días. Los ensayos son realizados para el 95% y 100% de densidad seca máxima para cada una de las muestras (Consoli et al. 2009).

2.4.2 Análisis mineralógico

Las partículas de los suelos naturales están formadas por minerales que se crearon a partir de una erosión química y su composición es distinta de las rocas de las que proceden cada uno de ellos (Meneses et al. 2007; Ninov et al. 2008).

En el análisis mineralógico de cada muestra se puede observar mediante tabla adjunta (Tabla 4), la cantidad en porcentaje en peso de compuestos de cada tipo de suelo. El estudio realizado para calcular el porcentaje en peso de cada componente se realizó a partir del ensayo de difracción de rayos X, mediante el cual se comprueba

que el material con mayor porcentaje en óxido de silicio pertenece a la muestra arcillosa.

2.4.3 Contenido de humedad

Las muestras fueron sometidas al ensayo de contenido de humedad acorde con la norma ASTM D 2216-05 (2005), mediante el cual se calcula el porcentaje de humedad para cada contenido de cal en cada muestra.

3 RESULTADOS

3.1 Análisis granulométrico

Las muestras de limo y arcillas son analizadas a partir del método del densímetro según la norma ASTM D 422-63 (2007), ya que su tamaño de partículas es demasiado pequeño, mientras que para las muestras 3 y 4 al tener partículas de mayor tamaño son tamizadas según la normativa ASTM D 6913-04 (2009) (Figura 1).

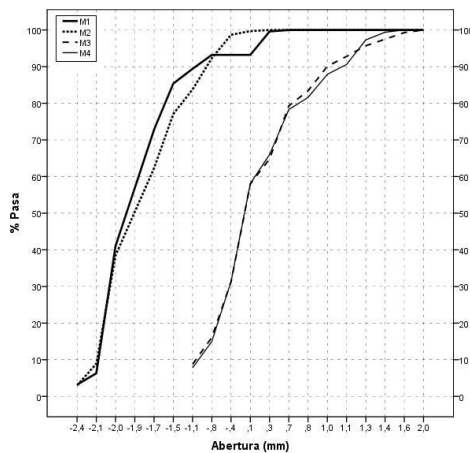


Figura 1. Análisis granulométrico por sedimentación y tamizado.

3.2 Análisis de plasticidad

La tabla 1 muestra como la plasticidad del material varía a medida que se adiciona una cantidad determinada de cal. Sin embargo sobrepasado en exceso el porcentaje de cal, la plasticidad del material no continúa variando. Por ello el punto óptimo de cal fue del 3%, ya que si se añadía un porcentaje mayor no actuaba de forma iónica, sino que tan solo actuaba como elemento cementante.

Tabla 1. Resultados de los ensayos de plasticidad

% Cal	Límite Líquido			
	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄
0%	38.4	34.7	25.6	22.8
2.5%	40.4	38.5	27.6	25.6
3%	46.4	42.5	30.7	28.3
3.5%	45.1	40.9	29.6	27.1
5%	42.3	38.7	28.7	26.7

Límite Plástico

0%	23.3	24.7	18.2	19.9
2.5%	27.6	29.3	22.1	21.9
3%	35.4	32.4	24.9	24.3
3.5%	33.3	30.1	22.6	23.2
5%	30.6	29.9	21.5	20.0

Se muestra una variación del límite líquido creciente para las muestras 2,3, y 4, mientras que para los limos (M1) se produce una disminución del límite líquido al añadirle un 3% de cal.

Si se aplicara la carta de plasticidad a las muestras en estado natural, M1 estaría dentro del grupo de limos arcillosos, aunque al añadirle el porcentaje óptimo de cal aumentaría su plasticidad en un 35%. La muestra 2 a simple vista contiene un mayor contenido de agua en estado natural y según la carta de plasticidad y por los resultados obtenidos pertenecería al grupo de las arcillas limosas.

En cuanto al grupo de M3 y M4 son materiales más granulares y atendiendo a la plasticidad de dichos suelos se podrían clasificar como arenas arcillosas cuya plasticidad aumenta cuando se le aplica el contenido óptimo de cal.

3.3 Análisis químico

Según los estudios realizados con anterioridad, un 10% en contenido de sílice puede actuar de manera muy efectiva en la cementación de los suelos. Por ello, la cantidad de sílice encontrada en la muestra 2 del 46 %, puede ser la causante de la dureza a la que llegaba el material cuando este reducía su contenido en agua a temperatura ambiente.

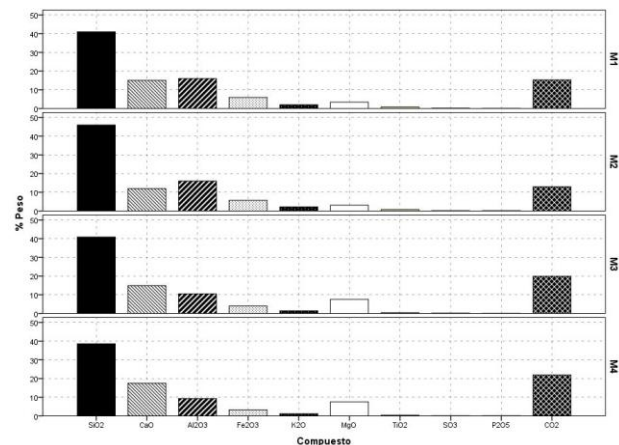


Figura 2. Resultados del análisis químico realizado para cada muestra

Los granos de la arcilla recubren con las pequeñas partículas de sílice y forman agregados, los cuales toman una resistencia bastante alta en comparación con otro tipo de formaciones minerales.

La tabla 2 muestra la composición mineral de cada muestra por difracción de rayos X. Se observa que la composición de las muestras en % mineral varía en dos

de ellos (feldespato y filosilicatos) pero se mantiene para elementos de calcita, cuarzo y dolomita.

Tabla 2. Resultados del ensayo de Difracción de Rayos X

	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄
Calcita (%)	18.5	20.8	21.2	10.7
Cuarzo (%)	22.5	30.3	32.8	38.7
Dolomita (%)	23.8	4.3	4.09	50.6
Feldespato (%)	3.2	4.9	5.1	-
Filosilicatos (%)	32	39.7	-	-

3.4 SEM/EDX

Se han llevado a cabo ensayos de microscopía a partir de un análisis EDAX para las muestras de limo y arcillas ya que son las que mayor contenido en agua presentan. Este estudio se ha realizado una vez que se han compactado dichas muestras sin adición de cal y con un 5% respectivamente y con una magnitud de 4000 aumentos con el microscopio. Los resultados sobre dichos análisis se muestran en las figuras 2 y 3.

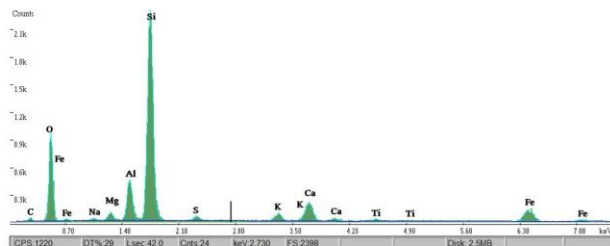
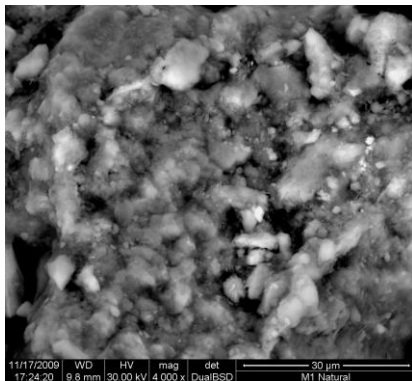


Figura 3. Ensayo XRD para M1 natural (x4000) (from Castro-Fresno et al. 2011).

El análisis EDAX determina las características morfo-estructurales y granulométricas de cada material lo que permite medir el tamaño casi exacto de los granos del suelo.

A través de estos ensayos se han detectado componentes como sílice y aluminio en las dos muestras.

Se ha observado que una vez tratados ambos elementos con cal hidratada han aparecido variaciones en la estructura produciéndose unas reacciones puzolánicas determinadas que conducen a la cementación de las partículas y por lo tanto a la aparición de elementos como la alúmina y la sílice hidratada [20].

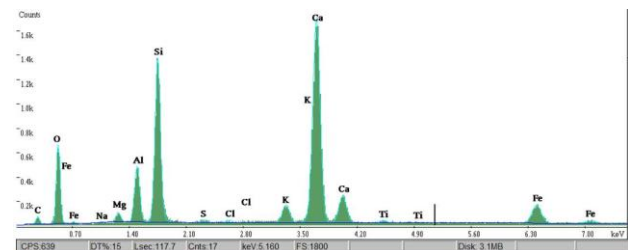
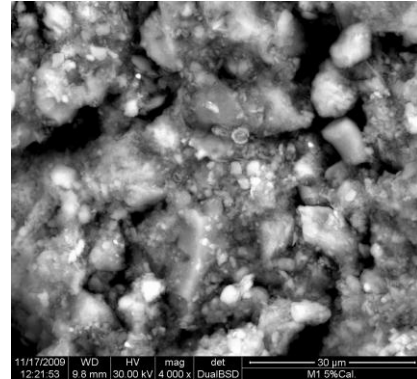


Figura 4. Ensayo XRD para M1 y 5% cal (x4000) (from Castro-Fresno et al. 2011).

3.5 Contenido de humedad

La figura 5 muestra los cambios que presenta el suelo una vez que se ha tratado con cal dependiendo siempre del estado de la cal y el porcentaje que se aplica.

La humedad natural que presenta cada suelo es próxima a la humedad óptima de compactación, lo que explica el haber utilizado porcentajes de cal del 2.5%, 3%, 3.5% y 5% para cada ensayo.

Una vez que la cal es mezclada con el suelo llega un momento en que éste llega a su capacidad máxima de humedad por lo que la cal comienza a actuar solamente como aporte de materia seca. En este caso se ha comprobado que el punto en el que los suelos llegan a su contenido en agua máximo es para una adición del 3%.

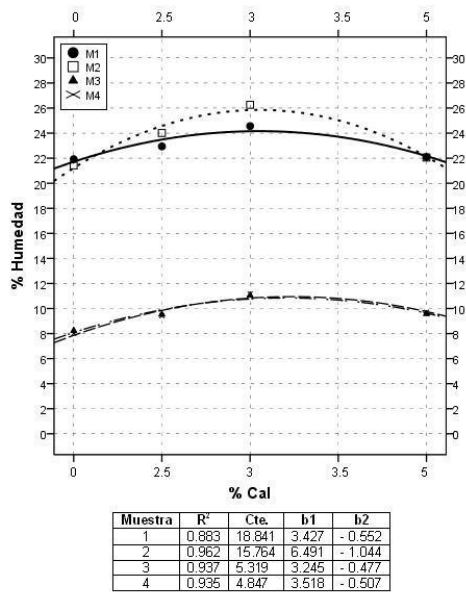


Figura 5. Comparativa entre humedades y porcentajes de cal para cada muestra.

3.6 Proctor Normal

La figura 6 muestra diferentes comportamientos dependiendo de la naturaleza del suelo. Esto lleva a la conclusión de que los limos, las arcillas y las arenas presentan resultados diferentes frente a los porcentajes de cal adicionados en cuanto a humedad óptima y densidad máxima.

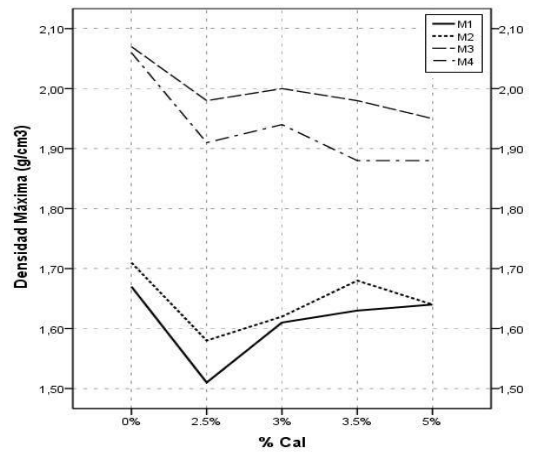
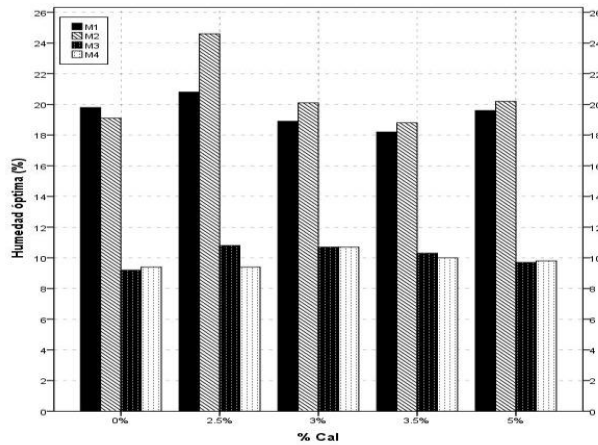


Figura 6. Resultados de la humedad óptima y densidad máxima.

La muestra 1 y 2 siempre en comparación con la muestra natural, a medida que se va adicionando cal, la densidad máxima seca disminuye al contrario de la humedad óptima, hasta llegar al punto de adición óptimo (3% cal) en el que ambos comienzan a comportarse de forma inversa. Esto es debido a que antes de llegar al porcentaje óptimo de cal, en el suelo se van desarrollando una serie de reacciones químicas entre las moléculas no saturadas de agua del suelo y la cal. Una vez pasado el porcentaje óptimo, si se adiciona más cantidad de cal lo que ocurre es que la densidad seca del suelo aumentarán, ya que al haberse saturado el suelo completamente por la acción de la cal, las partículas de ésta se quedarán formando parte del suelo sin mezclarse con él lo que hará que éste adquiera una mayor densidad.

Sin embargo para las arenas (muestras 3 y 4), al analizar los resultados obtenidos se demuestra que el parámetro de naturaleza del suelo asume un papel importante además del contenido en agua del suelo, ya que a medida que se varía la cantidad de cal a utilizar, varían de forma completamente distinta la densidad y la humedad óptima de dicho material. En estas muestras al adicionar porcentajes de cal menores al óptimo, la densidad seca máxima decrece mientras que la humedad óptima va en aumento. Esto se debe a que la cal saturada no actúa completamente en las partículas del suelo, es decir, no equilibra del todo las reacciones químicas producidas por el efecto de la cal. [18].

A partir de este porcentaje, toda la cal adicionada actuará de forma que la densidad y la humedad disminuirán claramente, con lo que la cal no producirá ningún efecto de resistencia en el material.

3.7 C.B.R.

La tabla 3 muestra los resultados obtenidos mediante el ensayo CBR. Se observa que para los cuatro tipos de muestras un contenido mayor o menor al óptimo de cal, puede no actuar de forma satisfactoria en la capacidad portante del mismo. Al relacionar los parámetros "Proctor" con los obtenidos en el CBR, las capacidades

resultantes en el óptimo son las máximas, pudiendo incluso cambiar la clasificación del PG-3 [15]

Ala hora de comparar el fenómeno mecánico que se produce cuando se mezcla el lodo con la cal, se pueden apreciar curiosos resultados. Para valores por encima de porcentaje óptimo de cal en la muestra arcillosa se observa una disminución notable de la capacidad portante hasta una recuperación que se produce al añadir un 5% de cal, siempre sin llegar a los valores de CBR óptimos.

A la vista de los resultados obtenidos, queda de manifiesto el poder floculante de la cal con respecto a las partículas finas y la variación de la densidad de los diferentes lodos. Dado que estos materiales poseen en mayor o menor magnitud una cantidad determinada de finos se puede decir que la cal actuará siempre en función de ellos.

Los ejemplos más aislados se encuentran en las arenas, donde el poder de floculación es menor y la aparición de cal suelta disminuye la densidad conjunta.

Tabla 3. Resultados de los ensayos de CBR

% Cal	CBR			
	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄
0%	5	2	5	15
2.5%	6	5	8	43
3%	25	30	58	71
3.5%	20	20	11	31
5%	22	23	31	43

Atendiendo a los resultados obtenidos, los únicos suelos que podrían utilizarse en su estado natural según la normativa [15], serían las arenas limosas y arcillosas, ya que según sus características propias cumplen con las condiciones expuestas (Tabla 6).

No obstante la recomendación es que este tipo de suelos sean tratados con cal de la misma forma que las muestras 1 y 2, ya que con dicha adición sería posible mejorar dicho material hasta clasificarlo como suelo seleccionado y poder ser aplicado en zonas más importantes del terraplén.

3.8 Hinchamiento libre y colapso

La peligrosidad que presenta el colocar material con valores de hinchamiento libre o colapso en terraplenes u otras zonas, que pueden suponer movimientos en la estructura con el paso del tiempo, ha sido una de las premisas a tener en cuenta a la hora de tratar el suelo con cal.

Tabla 4. Resultados obtenidos de los ensayos de Hinchamiento Libre en Expansión y Asiento de Colapso.

	Hinchamiento		Asiento de Colapso	
	0% Cal	3% Cal	0% Cal	3% Cal
M1	3.8	0.8	-0.7	-0.2
M2	1.8	0.2	-0.1	-0.03
M3	1.9	0.2	-0.1	0.0
M4	0.2	0.1	-0.1	0.0

Una vez analizados los resultados obtenidos (Tabla 4) en dichos ensayos acorde con la norma UNE EN 103-601 (1996) se observa que la diferencia en hinchamiento libre para suelos sin adición con cal y el porcentaje óptimo es bastante satisfactorio, ya que además de mejorar las propiedades es capaz de clasificar el propio suelo en una categoría más alta.

El hinchamiento libre obtenido habiendo utilizado la norma [1], ha sido para la muestra 1 con un 0% de cal ha sido de 3,81%. Si nos rigiésemos por este valor no podríamos utilizar este tipo de material en ninguna zona. Sin embargo si el suelo es tratado con la cantidad óptima (3% cal) el hinchamiento libre disminuye hasta un valor de 0,78% lo que implica una mejora de las propiedades volumétricas y su clasificación como suelo tolerable.

Para la muestra 2 (suelo arcillosos) sucede lo mismo que para la muestra 1, el hinchamiento libre se reduce en un 88% aproximadamente. La diferencia con la primera muestra es que para este tipo de suelo sin adición de cal, el suelo es clasificable como suelo tolerable y al añadirle el 3% queda clasificado igualmente como tolerable pero habiendo mejorado sus propiedades resistentes.

Sin embargo para las arenas el caso es diferente para este tipo de ensayos. Al tener una naturaleza diferente al de las arcillas la cal se comporta en cuanto al volumen de forma distinta.

Este tipo de suelos sin adición de cal están clasificados como suelos tolerables, así que aunque los resultados muestren un ligero aumento en los resultados no afectarán negativamente en el material para su uso posterior en terraplenes.

3.9 Variaciones producidas por efecto de la cal

Una vez finalizado el tratamiento de suelos con cal y habiendo analizado los resultados obtenidos para cada ensayo, se demuestran las variaciones producidas en la clasificación de los suelos en la tabla 5 que se adjunta a continuación:

Tabla 5. Clasificación de suelos en estado natural según PG-3

M _n	Material	M _n + 0% Cal	M _n + 3% Cal
M ₁	Limo Arcilloso	Marginal	Adecuado
M ₂	Arcilla verde y gris	Marginal	Adecuado
M ₃	Arena limosa	Adecuado	Seleccionado
M ₄	Arena Arcillosa	Adecuado	Seleccionado

4 CONCLUSIONES

En esta investigación se han utilizado lodos bentoníticos correspondientes a limos, arcillas verdes y grises y arenas, que en determinadas condiciones se pueden utilizar en suelos y terraplenes.

Para el estudio realizado se ha utilizado cal viva que ha sido posteriormente hidratada a partir de una relación 1:3. Este material es un compuesto químico que se

obtiene por la calcinación de la piedra caliza en hornos preparados para ello aproximadamente a 1000°C.

El efecto de la cal sobre los lodos bentoníticos es inminente, tanto hasta el punto de cambiar las propiedades de cada material mejorando su clasificación. Las muestras limosa y arcillosa que en principio fueron caracterizadas como marginales, después del tratamiento con cal pasaron a ser consideradas suelos adecuados, mejorando su hinchamiento y resistencia. Además las muestras de carácter arenoso 3 y 4 que eran clasificadas como suelos adecuados, después del tratamiento se clasificaron como suelos seleccionados pudiendo incluso ser utilizados en otras zonas del terraplén.

La adición de cal en un porcentaje óptimo (para este caso el 3%) produce cambios en la plasticidad de los tres tipos de materiales. En cuanto al límite líquido la variación más significativa es la producida en las arcillas, ya que en comparación con el suelo natural, dicho parámetro llega a aumentar hasta un 40%. Sin embargo para las arenas, el límite líquido aumenta en un rango de 16-19%. Este aumento en el L.L. supone a su vez un crecimiento del contenido de humedad, el cual viene determinado por la saturación de agua que contiene la cal apagada, es decir, las moléculas del suelo se mezclan con las moléculas saturadas en agua de la cal apagada lo cual indica que el contenido de agua en el material puede aumentar. En cuanto a la plasticidad, cuando los iones de la cal se mezclan con el material se producen cambios físico-químicos, como la formación de silicatos de calcio en las muestras limosas y arcillosas (M1 Y M2) lo que conlleva a una mejora en la plasticidad produciéndose un fenómeno cementante.

El estudio realizado sobre las muestras sin cal reflejó valores de CBR bajos para las muestras 1 y 2, clasificándolas como suelos marginales y más elevados para las muestras arenosas, llegando incluso a clasificar a la muestra 3 como suelo adecuado (CBR>5). Una vez que los suelos fueron tratados con el porcentaje de cal óptimo se observó un aumento en los índices CBR que permitió clasificar cada suelo en una categoría superior según el PG-3. Por lo que las muestras 1 y 2 fueron clasificadas como suelos adecuados y las muestras 3 y 4 como suelos seleccionados, pudiendo utilizar cada material en una parte del terraplén.

Los valores obtenidos en los ensayos de hinchamiento libre y colapso reflejan la estabilidad volumétrica para cada muestra. Así, para la muestra 1 se obtuvo un hinchamiento del 3.81%, lo cual indica la imposibilidad de utilizar este material en cualquier tipo de obra ya que suponía una peligrosidad por la formación de movimientos en las capas estructuradas. No obstante al tratar dicho material con el 3% de cal, el parámetro volumétrico disminuyó en un 88% obteniendo un suelo con características propias de un suelo adecuado. Los datos de hinchamiento obtenidos para las demás muestras, no eran valores significativos, aunque al ser tratados disminuyeron en un 30% aproximadamente respecto del suelo natural.

Por todo ello, el tratamiento con cal siempre que sea una cantidad óptima, supone la mejora del material en un 80%, lo cual además de mejorar su estabilidad volumétrica mejora otro tipo de propiedades como pueden ser químicas o mecánicas permitiendo su posterior uso en obra.

5 REFERENCIAS

- Al-Amoudi, O.S.B., Khan, K. & Al-Kahtani, N.S. 2010, *Stabilization of a Saudi calcareous marl soil*, Construction and Building Materials, 24: 1848-1854.
- ANCADE 2007, *Manual de estabilización de suelos con cal*, Madrid.
- ASTM D 1883-07e2 2007, "Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils".
- ASTM D 422-63 2007, "Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils".
- ASTM D 6913-04 (2009) "Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis".
- ASTM D2216-05 2005, "Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass".
- Boardman, D.I., Glendinning, S. & Rogers, C.D.F. 2001, *Development of stabilisation and solidification in lime-clay mixes*, *Geotechnique*, 51 (6): 533-543.
- Buhler, R.L. & Cerato, A.B. 2007. Stabilization of Oklahoma expansive soils using lime and Class C Fly ash, 1.
- Casagrande, L. & Hirschfeld, R.C. 1960, First progress report on investigation of stress deformation and strength characteristics of compacted clays, *Harvard Soil Mech. Series*, 61.
- Consoli, N.C., Lopes, L.S. & Heineck, K.S. May 2009, Key Parameters for the Strength Control of Lime Stabilized Soils, *Journal of Materials in Civil Engineering*.
- Dirección General de Carreteras 2007, *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de Carreteras y Puentes (PG-3)*.
- [32] UNE EN-459. Cales para la construcción. 2002, *Asociación Española de Normalización y Certificación*.
- EN 103-500. Geotechnics. Compactation Test. Standard Proctor", 1994, *Asociación Española de Normalización y Certificación*.

- EN 103-601. Test for free swelling of soils in edometer device. Mayo 1996, *Asociación española de Normalización y Certificación*.
- Godsey, C.B., Pierzynsky, G.M., Page, P.W., Mengel, D.B. & Lamond, R.E. May-June, 2007, Evaluation of Common Lime Requirement Methods, *Soil Science Society of American Journal*, 71(3): 843-849.
- Hossain, K.M.A., Lachemi, M. & Easa, S. 2007. Stabilized soils for construction applications incorporating natural resources of Papua New Guinea, *Resources, Conservation and Recycling*, 51(4): 711-731.
- Inci, G., Yesiller, N. & Kagawa, T. 2003, Experimental investigation of dynamic response of compacted clayey soils, *Geotechnical Testing Journal*, 26 (2): 125-141.
- Jofré, C., Kraemer, C., López-Bachiller, M., Atienza, M. & Díaz-Minguela, J. 2008, Manual de estabilización de explanadas con cemento o cal, *ANCADE*.
- Kabak, K. & Akiarli, A. January 2007. A field application for lime stabilization, *Environmental Geology*, 51 (6): 987-997.
- Konyeha, V.U. & Ogbeide, F.N. September 2006. *Lime-cement stabilised chicoco as a road pavement material*, International Conference on Engineering Research and Development: Impact on Industry.
- [22] Kraemer, C. & Mestre, V. 2006. Evaluación y Optimización de las Explanadas, *VII Congreso Nacional de Firmes*.
- [23] Little-Dallas, N. 1998, "Lime in Soil Stabilization".
- [24] Liu, S., Cao, W.D., Gao, X.C., Cui, X.Z. & Shang, Q.S. 2009. *Experimental Study on Soil Stabilized with Firming Agent and Lime*, Road Pavement Material Characterization and Rehabilitation.
- [25] Meneses, M., Chaves, J.A.M., Mancilla, P. & Rodríguez-Páez, J.E. 2007. Caracterización físico-química de arcillas del municipio de Guapi-Costa Pacífica Caucana, *Revista Académica Colombiana Ciencias*, 31 (121): 537-544.
- [26] Ninov, J. & Donchev, I. 2008. Lime Stabilization of Clay from the "Mirkovo" Deposit. Part I: Kinetics and Mechanisms of the Processes, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 91 (2): 487-490.
- [28] Osula, D.O.A. 1996. A comparative evaluation of cement and lime modification of laterite, *Engineering Geology*, 42 (1): 71-81.
- [30] Shanmuganathan, R.T. & Oades, J.M. 1983. Modification of soil physical properties by addition of Calcium Compounds, *Australian Journal of Soil Research*, 21 (3): 285-300.
- [33] Usman, A., Kuzyakov, Y. & Stahr, K. 2005, Effect of Clay Minerals on Immobilization of Heavy Metals and Microbial Activity in a Sewage Sludge-Contaminated Soil, *Institute of Soil Science and Land Evaluation. Department of Soil and Water. Journal of Soil and Sediments*, 5 (4): 245-252.