

EFECTOS DE LA COMPACTACIÓN Y ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO Y CAL EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE FILITAS

E. GARZÓN ⁽¹⁾, P.J. SÁNCHEZ-SOTO ⁽²⁾, M. RAIGÓN ⁽³⁾ Y A. RUIZ-CONDE ⁽²⁾

⁽¹⁾ Departamento de Ingeniería Rural, Universidad de Almería, La Cañada de San Urbano – 04120 – Almería, Spain.

⁽²⁾ Instituto de Ciencia de Materiales. Centro Mixto CSIC-US. Avda. Américo Vespuccio 49, Isla de la Cartuja - 41092-Sevilla. Spain. email: aruizi@icmse.csic.es

⁽³⁾ Departamento de Ingeniería Mecánica y de los Materiales. ESII. Universidad de Sevilla. C/ Camino de los descubrimientos s/n. Isla de la Cartuja. 41092 – Sevilla, Spain

INTRODUCCIÓN.

De forma general se considera a las «filitas» como rocas foliadas, cuyos componentes esenciales son filosilicatos de grano muy fino y cuarzo. Ocasionalmente pueden contener calcita (filitas calcáreas). Sus colores varían entre el beige, el violeta, el rojizo y el negro. La abundancia de filosilicatos de grano fino les imprime un tacto untuoso y la presencia de foliación les confiere la propiedad de partirse fácilmente en lajas delgadas (Valera, *et al.*, 2002).

En la Sierra Nevada forman una orla de materiales permo-triásicos (pizarras, mármoles y filitas arcillosas). De la misma forma, en Sierra de Alhamilla (Almería) aflora una zona de filitas de colores azules, violáceos y rojizos, sobre la que encontramos calizas y dolomías separadas por una zona de transición de calco-esquistos, materiales todos ellos pertenecientes al complejo Alpujarride. En otras zonas de Andalucía Oriental también se ha descrito la presencia de filitas (Gómez-Pugnaire *et al.* 1978).

Las filitas de la Alpujarra sufren diversos movimientos en masa como consecuencia de procesos de deslizamiento y/o flujo. Estos movimientos están condicionados, entre otros factores, por el ángulo de inclinación de las laderas, las propiedades mecánicas de los materiales y la presencia de humedad (Alcántara-Ayala, 1999). Sobre este punto Ayuso *et al.* (1998), trabajando con suelos arcillosos del Valle del Guadalquivir, encontraron que la estabilización con cal hidratada tiene una alta eficiencia en el incremento de la capacidad de soporte. Igualmente demuestran que con una dosis de sólo el 3% de cal se reduce considerablemente su hinchamiento, lo que posibilita que se puedan emplear en capas inferiores de caminos rurales ó como explanadas mejoradas en firmes de tráfico intenso. Sin embargo López-Lara, *et al.*, 1999 en México encontraron que el yeso humedecido (4-6%) era el mejor estabilizante de suelos expansivos, seguido del poliuretano (6%) y de la cal (6-8%). Aunque económicamente él más barato era la cal.

Debido a la baja resistencia mecánica de las filitas, se producen deslizamientos de taludes que acaban inutilizando carreteras, caminos y provocando la rotura de depósitos de hormigón situados sobre estos suelos. En función de lo anteriormente expuesto, con este artículo se estudian los efectos de la compactación y de la estabilización con cemento y cal sobre la capacidad portante de estos suelos.

METODOLOGÍA.

Para el presente trabajo se ha considerado una muestra de filita de color grisáceo, tacto untuoso y fácilmente exfoliable, procedente de una cantera situada en el término municipal de Berja (Almería). Se procedió a tomar una muestra representativa por sucesivos cuarteos, denominándose muestra todo-uno. Partes alícuotas de este material se han estudiado por distintas técnicas experimentales como son DRX (Siemens D-5019), FRX (Siemens SRS-3000).

A otra parte, se ha caracterizado su comportamiento mecánico llevando a cabo los siguientes ensayos:

- El peso específico relativo de las partículas sólidas se ha determinado mediante picnómetros utilizando agua destilada como medio de suspensión siguiendo la norma UNE 103.302:1994. Y la densidad natural con parafina se ha realizado según la norma UNE 103.301:1994.
- *Textura y límites de Atterberg.* Se ha determinado la textura del material base según la norma UNE 103101:1995 y los límites de Atterberg para la muestra original y suelos estabilizados con cal (3%, 5%, 7%) y cemento (5%, 7%, 9%) según las normas UNE 103103:1994 y UNE 103104:1993.
- El suelo se ha sometido a diferentes grados de compactación (PN13golpes, PN26golpes, PN52golpes y proctor modificado) siguiendo las normas UNE 103500:1994 y UNE 103501:1994. Con el proctor modificado se ha evaluado la muestra original y el suelo estabilizado.
- *Ensayo C.B.R.* (compactadora Suzpecar S-2000, prensa multiensayo de mecánica científica). Para cada una de las muestras se ha determinado la capacidad portante del suelo, mediante el ensayo del CBR, según la norma UNE 103502:1995 (muestra original y suelo estabilizado).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización

El análisis por DRX de las fases cristalinas presentes en la muestra reveló la presencia de moscovita, caolinita y clorita, además de cuarzo y óxido de hierro, como componentes mayoritarios, mientras que se observaron feldespatos y un mineral interestratificado illita/smectita entre otros componentes minoritarios.

La composición química elemental media de esta muestra determinada por FRX, expresada en porcentaje de óxidos, confirma la presencia de sílice (49% en peso) y alúmina (26%), procedente de los silicatos presentes, además de elementos alcalinos, fundamentalmente óxido de potasio en un contenido de 4,2% que se asocia con la mica. Destaca el contenido en óxido de hierro en torno al 10% y de calcio y magnesio (ambos en torno al 3%), siendo poco relevantes el resto de los constituyentes que complementan el 4,49% restante.

El peso específico obtenido a partir de la muestra en su estado natural es de 2,82 gr./cm³. Este valor esta relacionado con la composición mayoritaria de la filita, que contiene moscovita con un peso específico relativo entre 2,7-3,1 gr./cm³, caolinita (2,64 gr./cm³) y clorita (2,6-2,9 gr./cm³). Además contiene cuarzo (2,65 gr./cm³) en un porcentaje menor (Lambe and Whitman, 1998). En cuanto a la densidad natural con parafina representa el 71,95% del peso específico.

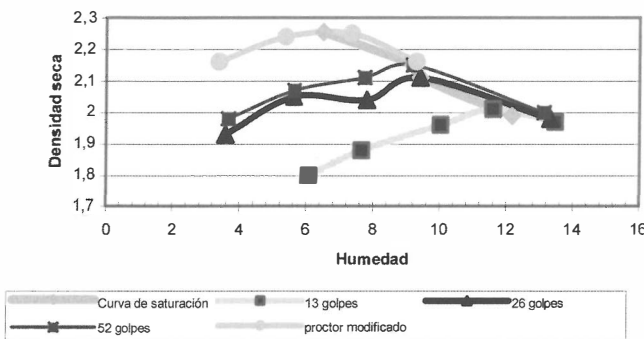


Figura 1: Evolución de la densidad seca y humedad con la energía de compactación en un suelo de filitas.

Al aumentar la energía de compactación aplicada a las filitas, se produce un incremento en la densidad seca y una disminución en la humedad requerida (figura 1). Este resultado confirma que cuanto mayor es el nivel de energía entregada al suelo, la densidad seca es mayor y se obtiene para un contenido de agua de compactación más bajo (Balmaceda, 1991). Y esta tendencia es más acusada al pasar de PN13golpes a PN26golpes y de PN52golpes al Proctor modificado. El hecho de que las diferencias entre PN y 2PN sean muy pequeñas, obedece a que la eficiencia de la energía de compactación aplicada al suelo se reduce en la medida que disminuye el índice de vacíos, pero estas disminuciones son rápidas al comienzo para disminuir posteriormente (Balmaceda, 1991).

Estabilización con cemento y cal

Efectos sobre los límites de Atterberg.

En la **tabla I** se recogen los resultados obtenidos en los límites de Atterberg para el suelo base y los suelos tratados. En ella se observa que los suelos estabilizados con cal se produce una reducción importante de la plasticidad ocasionada fundamentalmente por el incremento del límite plástico, con variaciones muy superiores a las experimentadas por el límite líquido. Dichos resultados concuerdan con los obtenidos por Kezdy (1979), Ayuso (1998) y López-Lara *et al.*, (1999). Conforme se incrementa la proporción de cal la reducción de la plasticidad es menor así en el suelo estabilizado con una proporción de un 3% se produce una reducción de aproximadamente un 74,6% frente a un 12,1% en el suelo estabilizado con una proporción de un 7% de cal. Ello induce a pensar que porcentajes superiores al 3% de cal son ya poco efectivos en la reducción de la plasticidad, estos resultados corroboran los obtenidos por Ayuso (1998). Sin embargo en suelos estabilizados con cemento el índice de plasticidad obtenido en todas las muestras ensayadas es superior al del material sin tratar y éste a su vez es superior al valor de 10, con lo cual, el suelo presenta una plasticidad media-baja. Incrementos en la concentración de cemento llevan acarreados aumentos de plasticidad oscilantes entre un 25,4%, con la adición de un 5%, y un 43,4%, con la adición de un 9% de cemento.

Efectos sobre la compactación.

En la **tabla II**, se observa que tanto la adición de cal hidratada como de cemento produce en todos los suelos un descenso de la densidad seca máxima y un aumento de la humedad óptima de compactación en relación al suelo no tratado. Dichos resultados concuerdan con los obtenidos por Kezdy (1979) y Ayuso (1982).

Los descensos producidos en la densidad seca máxima son debidos por una parte al menor peso específico de los aditivos empleados en relación al del suelo y por otro a las interacciones físico-químicas que se producen entre éstos y las partículas del suelo. Así, la interacción de la cal con las partículas de arcilla produce una estructura floculada más porosa y de menor densidad (Venuat, 1980). Igualmente se ha visto que la adición de cal hidratada conlleva una mayor reducción de la densidad seca máxima con descensos oscilantes entre 100 y 160 kg/m³, que equivalen a un 4,6 y a un 7,1%, para una concentración de cal de un 3 y un 7%, respectivamente. Con la adición de cemento las reducciones de densidad oscilan entre 80 y 110 kg/m³, equivalentes a un 3,6

Tabla I. Límites de Atterberg

MUESTRA	L.L.	L.P.	I.P.
Suelo base	25,6	17,2	8,4
Suelo + Cal 3%	31,85	29,72	2,13
Suelo + Cal 5%	36,90	31,12	5,78
Suelo + Cal 7%	40,80	33,42	7,38
Suelo + Cemento 5%	35,60	25,07	10,53
Suelo + Cemento 7%	35,85	24,60	11,25
Suelo + Cemento 9%	35,85	23,80	12,05

Tabla II. Ensayo Proctor Modificado

MUESTRA	Densidad seca máxima (t/m ³)	Humedad óptima (%)
<i>Suelo base</i>	2,25	6,5
<i>Suelo + Cal 3%</i>	2,15	8,5
<i>Suelo + Cal 5%</i>	2,12	9,0
<i>Suelo + Cal 7%</i>	2,09	9,2
<i>Suelo + Cemento 5%</i>	2,17	8,0
<i>Suelo + Cemento 7%</i>	2,16	8,2
<i>Suelo + Cemento 9%</i>	2,14	8,9

y un 4,9%, para una concentración de un 5 y un 9%, respectivamente. Por el contrario, en relación a la humedad óptima de compactación, la adición de cal lleva asociada incrementos en el porcentaje de humedad oscilantes entre un 2,0 y 2,7% para una concentración de un 3 y un 7% respectivamente, mientras que los aumentos para el cemento se cifran en un 1,5 y un 2,4% para una concentración de un 5 y un 9% de cemento, respectivamente. En ambos casos, como cabría esperar, un aumento del porcentaje de finos lleva asociado un aumento en el porcentaje de humedad a aportar a la muestra para alcanzar la densidad seca máxima.

Efectos sobre la capacidad portante.

La tabla III muestra los resultados obtenidos por este ensayo con los diferentes tratamientos, observando que el suelo original tiene un CBR por debajo de 3, lo que le convierte en un suelo inadecuado o marginal, cuyo empleo sólo es posible si se estabiliza (art. 330 PG3) La adición de cal y cemento produce importantes incrementos en la capacidad portante del suelo estudiado, pudiéndose considerar ambos aditivos como adecuados para la estabilización de suelos. Sin embargo con la adición de un 3% de cal el valor del índice C.B.R. al 95% del P.M. es de 19,6 pudiéndose considerar según 6.1-IC «Secciones de firme» como adecuado para la constitución de explanadas. Un aumento de la concentración de cal lleva acarreado ligeros incrementos en el valor del índice C.B.R.

A pesar de que con la adición de cemento también se consiguen buenos resultados éstos presentan una ma-

yor variabilidad. Con la adición de un 5% de cemento el suelo presenta un índice C.B.R. de 15,0 al 95% del P.M., valor inferior a 20 que es el requerido según el Art. 330 del PG-3 para que el suelo pueda ser utilizado para la constitución de explanadas. Con la adición de un 7 o un 9% lograríamos alcanzar los requisitos fijados, no obstante, con la adición de un 9% el índice C.B.R. disminuye con respecto al 7% de cemento, lo cual, induce a pensar que concentraciones superiores al 7% de cemento resultan inadecuadas para la estabilización de los suelos de filitas.

REFERENCIAS

- Alcántara-Ayala, I. (1999). Geofísica Internacional, 38, 1-3.
- Ayuso, J. (1982). Boletín del Laboratorio de Carreteras y Geotecnia, 152, 3-11.
- Ayuso, J. M^a; Caballero, A.; Pérez, F. (1998). IV Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos. Córdoba.
- Balmaceda, A.R. (1991). Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña.
- Gómez-Pugnaire, M.T., Sassi, F.P., Visona, D. (1978). Boletín geológico y minero, T. LXXXIX-V, 468-474.
- Hillel, D. (1971). Soil and water: Physical principles and processes, Academic Press, New York.
- Kezdy, A. (1979). Stabilized earth roads. Scientific Pub. Co, Amsterdam.
- Laird, D.A. (1999). Clays and Clay Minerals, 51 (Vol. 47), 630-636.
- Lambe, T. W., Whitman. R.V. (1998). Mecánica de suelos., Editorial Limusa, S.A. México D.F., México.

Tabla III. Ensayo C.B.R.

MUESTRA	Índice C.B.R. 100% P.M. (%)	Índice C.B.R. 95% P.M. (%)
<i>Suelo base</i>	2,5	1,7
<i>Suelo + Cal 3%</i>	34,9	19,6
<i>Suelo + Cal 5%</i>	37,9	21,2
<i>Suelo + Cal 7%</i>	42,0	22,2
<i>Suelo + Cemento 5%</i>	43,0	15,0
<i>Suelo + Cemento 7%</i>	50,0	28,4
<i>Suelo + Cemento 9%</i>	31,8	35,6

López-Lara, T., Zepeda-Garrido, J.A., Castario, V.M. (1999). Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Queretaro, Oro; 76.010; México.

Romero, E. (1999). Thesis, Technical University of Catalunya. Barcelona.

Terzaghi, K., y Peck, R.B. (1967). Soil mechanics in Engineering Practice. John Wiley and Sons. Nueva

York.

Valera, T.S., Ribeiro, A.P., Valenzuela-Diaz, F.R., Yoshiga, A. Ormanji, W., Toffoli, S.M. (2002). Annual Technical Conference – Society of Plastics Engineers, (Vol. 3) 60, 3949-3953.

Venuat, M. (1980). Le traitement des sols à la chaux et au ciment. Chatillon-s Bagueux.