

CARRETERAS

Asociación
Española de la
Carretera

4ª EPOCA - NÚM. 197-SEP/OCT 2014 - REVISTA TÉCNICA DE LA ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE LA CARRETERA



• Comunicación

• Riqueza

• Movilidad

• Empleo

• Conexión

• Sostenibilidad



CONSEJO DE REDACCIÓN:

Presidente:
Julio González de Pedroviejo

Vocales:
Damaso Alegre Marrades
Mercedes Aviño Bolinches
Luis Ayuso Sánchez
Alberto Bardesi Orúa-Echevarría
María Dolores Cancala Rey
Fernando Catalá Moreno
Carlos Cristóbal Pinto
Juan Gallego Medina
Francisco Gutiérrez Ferrández
Juan José Jarillo Rodríguez
Jesús M^a Leal Bermejo
José Vicente Martínez Sierra
Pablo Nobell Rodríguez
Elena de la Peña González
Vicente Pérez Mena
Juan José Potti Cuervo
Sebastián de la Rica Castedo
Aurelio Ruiz Rubio
Pablo Sáez Villar
Gonzalo Sánchez Arias
Fuencisla Sancho Gómez
Luis Alberto Solís Villa
José Antonio Soto Sánchez

PRESIDENTE
Juan Francisco Lazcano Acedo

DIRECTOR:
Jacobo Díaz Pineda

DIRECTORA EJECUTIVA:
Marta Rodrigo Pérez

DIRECTOR TÉCNICO:
Ricardo Romero Amich

REDACTORA JEFE:
Susana Rubio Gutiérrez

REDACCIÓN:
Iván Corzo Reino

DISEÑO Y MAQUETACIÓN:
José María Gil

EDICIÓN Y PUBLICIDAD:
COMUNICACIÓN Y DISEÑO

O'Donnell, 18 - 5^a H
28008 Madrid
Tel: +34 91 432 43 18 • Fax: +34 91 432 43 19
comdis@cydiseño.com
www.cydiseño.com

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE LA CARRETERA
Goya, 23 - 3^a y 4^a Derecha
28001 MADRID
Tel: +34 91 577 99 72 • Fax: +34 91 576 65 22
aao@aecarretera.com
www.aecarretera.com

SUSCRIPCIÓN ANUAL (Año 2014):
España: 66 Euros (IVA incluido)
Europa: 109 Euros • América: 160 \$ / 124 Euros

IMPRESIÓN: Gráficas Marte
Depósito Legal: M-19.439-1975
ISSN: 0212 - 6389

Las opiniones vertidas en las páginas de Carreteras no coinciden necesariamente con las de la Asociación Española de la Carretera o las del Consejo de Redacción de la publicación.

La revista Carreteras aparece citada actualmente en las siguientes bases de datos científicas: Engineering Index, Ulrich, Dialnet (Publicaciones Técnicas y Científicas de la Universidad de La Rioja), DIT (Documentación Internacional de Investigación del Transporte de la OCDE), IEDCYT (Instituto de Estudios Documentales sobre Ciencia y Tecnología del CSIC), ICYT (Ciencia y Tecnología del CSIC), CIRBIC (Catálogo Colectivo de los Fondos de las Bibliotecas del CSIC), Centro de Documentación del Transporte y las Comunicaciones del Ministerio de Fomento, Latindex (Servicio Regional de Información para Revistas Técnicas de América Latina, Caribe, España y Portugal) y la holandesa Scopus.

Editorial

¿Mayores para la carretera? ¿Carreteras para mayores! **4**

Artículos Técnicos

Relación de la distancia entre glorietas en una carretera metropolitana y la comodidad de la circulación de los usuarios Sergio Sánchez García, Diego Sanz Abella, Miguel Ángel Carrera Hueso **7**

Los túneles de carretera durante el invierno. Problemática de mantenimiento y explotación Rafael López Guarga **18**

Considerar la sal remanente sobre calzada seca, asignatura pendiente en la planificación de tratamientos preventivos para la formación de hielo Sergio Nieto Ruiz **28**

Mezclas asfálticas tibias modificadas con azufre Mario Roberto Jair, Gary L. Fitts **37**

El sistema viario portugués: la búsqueda de la sostenibilidad António Palma Ramalho **45**

Técnicas de aprovechamiento energético inteligente en carreteras Borja Díaz Arce, Ángel Vega Zamanillo, María Antonia Pérez Hernando **65**

Influencia de la actividad de las arcillas en la estabilización de suelos con sales cuaternarias de amonio en Cuba Juan Mario Junco del Pino, Eduardo Tejeda Plusseaut **75**

Tribunas

Declaración de Cancún Comité Científico Internacional del IV CISEV **85**

¿En qué estamos fallando? José Antonio Soto Sánchez **87**

Área de Servicio

88

Guía Profesional de Empresas Colaboradoras

102

EMPRESAS COLABORADORAS



Influencia de la actividad de las arcillas en la estabilización de suelos con sales cuaternarias de amonio en Cuba

Influence of the clays activity in the results of the chemical stabilization of soils with quaternary salts of ammonium in Cuba

Juan Mario JUNCO DEL PINO

Especialista Principal Dirección Viales, Centro Técnico para el Desarrollo de los Materiales de Construcción (CTDMC), Ministerio de la Construcción de Cuba (MICONS) (La Habana, 11.200), Profesor Adjunto, Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría (CUJAE)(Cuba).

Eduardo TEJEDA PIUSSEAUT

Departamento Ingeniería Vial, Facultad de Ingeniería Civil, Profesor Titular, Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría (CUJAE)(Cuba).

RESUMEN

Como parte de las investigaciones que se realizan en Cuba con el empleo de sales cuaternarias de amonio, como aditivo para la estabilización de los suelos de subrasante de carreteras, denominado Sistema Rocamix, se muestran los resultados obtenidos con el producto en varios trabajos ejecutados, con diferentes suelos, clasificados todos dentro de los grupos A-6 o A-7 (según AASTHO); y en los cuales este tipo de estabilización ha sido apreciablemente efectiva.

Se aprecia en los análisis realizados, que son evidentes los incrementos de la resistencia en los suelos arcillosos, sin embargo estos aumentos no se logran siempre en la misma proporción, a pesar de que la carta de Plasticidad de Casagrande los clasifica dentro del mismo grupo. Se ha encontrado buena correlación entre el incremento de la resistencia a CBR y el Índice de Actividad de la Arcilla, lo que explica las diferencias encontradas en el aumento de resistencia.

Palabras clave: Suelo, Arcilla, Explanada, Estabilización, Sal cuaternaria, Estabilización química de suelos, Actividad de las arcillas, Carta de actividad de Polidori.

ABSTRACT

As part of the investigations that are carried out with the employment of quaternary salts of ammonium in Cuba, as preservative for the stabilization of the soils of subgrade of highways, denominated Rocamix System, the obtained results with the product are shown in several executed works, with different soils, classified all inside the groups A-6 or A-7 (according to AASTHO); and in which this stabilization type has been considerably effective.

It is appreciated in the carried out analyses that are evident the increments of the resistance in the loamy soils, however, these increases are not always achieved in the same proportion, although the letter of Plasticity of Casagrande classifies them inside the same group. It has been good correlation among the increment from the resistance to CBR and the Index of Activity of the Clay, what explains the difference opposing in the resistance increase.

Key words: Soil, Clay, Formation level, Stabilisation, Quaternary salt, Chemical stabilization of soils, Activity of the clays, Chart of activity of Polidori.

Los problemas que se generan por la escasez de materiales para la construcción del cimiento de las obras viales con una aceptable calidad, han llevado a la búsqueda de soluciones para mejorar las propiedades ingenieriles de los suelos locales. Estas soluciones no se deben plantear como la autorización indiscriminada de fuentes de préstamo, y al respecto las autoridades competentes están siendo necesariamente cada vez más restrictivas, producto de los daños que producen al medio ambiente. De ahí que el empleo de las estabilizaciones de suelos se ha convertido en una de las alternativas más eficaces para mejorar los suelos, y ofrecen además costes más bajos que los métodos tradicionales de construcción de subrasantes.

Dentro de estos métodos la estabilización con aditivos químicos, a partir de exitosos trabajos ejecutados con ventajosa relación coste-efectividad, ha ido ganando adeptos en muchos países, resultando una fiable solución; mérito conquistado a partir de una gran cantidad de kilómetros de vías que han sido construidos con estos procedimientos con resultados satisfactorios. Se le denomina estabilizador químico de suelos a un compuesto químico que al ser agregado a los suelos, lo altera, mejorando sus propiedades ingenieriles.

El presente trabajo, que forma parte de un proyecto de investigación financiado por el Ministerio de la Construcción de Cuba, pretende llamar la atención sobre los resultados que se han logrado en el mejoramiento de suelos, con el uso de un aditivo químico obtenido en el país a partir de sales cuaternarias de amonio, denominado comercialmente como *Rocamix*^(a)(^(xvii)). Se ha recopilado información sobre varios trabajos efectuados con el uso de este aditivo, en diferentes suelos, clasificados todos dentro de los grupos A-6 o A-7 del sistema de clasificación de suelos AASTHO; y en los cuales este tipo de estabilización ha sido apreciablemente efectiva.

En los análisis realizados se aprecia que en los suelos arcillosos donde se ha aplicado el aditivo son evidentes los incrementos de la resistencia (medida como CBR); sin embargo, se ha comprobado que estos aumentos no se logran siempre en la misma proporción, aunque la carta de Plasticidad de Casagrande clasifique los suelos dentro del mismo grupo. Se acude entonces a la carta de Actividad de Polidori, quien para clasificar los suelos finos propone, además de los límites

de consistencia, la actividad de las arcillas⁽⁸⁾. Se ha encontrado entonces una buena correlación entre el incremento de resistencia a CBR y el índice de actividad de la arcilla, lo que puede explicar las diferencias encontradas en los aumentos de resistencia.

LOS SUELOS FINOS ARCILLOSOS. ACTIVIDAD DE LA ARCILLA

Dos tipos de materiales finos son reconocidos con un comportamiento diferente desde el punto de vista ingenieril: arcillosos y limosos.

Las arcillas están constituidas por partículas muy pequeñas, de formas laminares, planas y alargadas, de gran superficie específica, en la que su composición mineralógica y estructura influyen más en su comportamiento mecánico que la propia granulometría. Por su alto contenido de humedad en estado natural su resistencia al esfuerzo cortante puede ser muy baja y la capacidad de soporte muy reducida. Son impermeables, por eso absorben lentamente la humedad, pasando a un estado plástico con fácil moldeo, sin agrietamiento ni disgregación.

Las partículas de limo presentan una cierta cohesión con presencia de agua entre sus partículas, son poco permeables y la humedad tiene gran influencia en su deformabilidad, compresibilidad e hinchamiento o retracción.

La plasticidad es la capacidad de los materiales arcillosos de deformarse sin agrietarse, desintegrarse o desmoronarse. El sueco Atterberg desarrolló un método para evaluar la plasticidad de los suelos, en función del contenido de humedad, y definió:

- *límite líquido (LL)* como la humedad del suelo cuando se encuentra en el límite entre el estado plástico y viscoso;
- *límite plástico (LP)* como la humedad entre el estado plástico y semisólido, y
- *Índice plástico (IP)* a la diferencia entre ambos valores.

Estas propiedades, aunque por sí solas no tienen una gran importancia, se emplean como parámetros índices en la clasificación de los suelos; y son innumerables las correlaciones realizadas entre estos índices de consistencia y las propiedades de los suelos.

(a) Artículo publicado en la revista *Carreteras*, 183, mayo/junio, 2012. *Aditivo químico obtenido de sales cuaternarias empleado para la estabilización de suelos arcillosos de subrasante de carreteras*^(xvii).

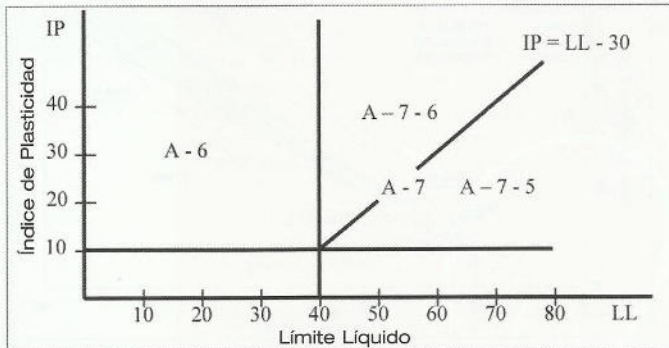


Figura 1. Carta de plasticidad. Sistema AASHTO.

De la bibliografía consultada se desprende que no hay completa dependencia del límite líquido de los suelos con la cantidad de material fino presente.

El método de clasificación de la "American Society for Testing Materials" (ASTM), clasifica los suelos de grano fino como aquellos que tienen el 50% o más de finos. Se trata de suelos arcillosos y limosos. En el conocido gráfico de Casagrande se establecen unas zonas que corresponden a diferentes subgrupos, de forma que los suelos son finalmente clasificados en función de la relación entre su límite líquido (LL) y su índice de plasticidad (IP) y según que contengan o no materia orgánica.

Este sistema divide los suelos finos en tres grupos: limos inorgánicos (M), arcillas inorgánicas (C) y limos y arcillas orgánicas (O). Cada uno de estos suelos se subdivide a su vez, según su límite líquido, en dos grupos cuya frontera es LL = 50%. Si el límite líquido del suelo es menor de 50 se añade al símbolo general la letra L ("low compressibility"). Si es mayor de 50 se añade la letra H ("high compressibility"). Obteniéndose de este modo los siguientes tipos de suelos:

- limos inorgánicos de baja compresibilidad (ML),
- limos y arcillas orgánicas de baja compresibilidad (OL),
- arcillas inorgánicas de baja compresibilidad (CL),
- arcillas inorgánicas de alta compresibilidad (CH),
- limos orgánicos de alta compresibilidad (MH), y
- arcillas y limos orgánicos de alta compresibilidad (OH).

Los suelos de grano fino se califican utilizando exclusivamente el gráfico de plasticidad. La línea A, prolongada por una pequeña franja, separa convencionalmente las

arcillas inorgánicas de plasticidad baja y media (CL) y alta (CH), de los limos inorgánicos (ML, MH) y de los suelos finos orgánicos (OL, OH).

El sistema de clasificación AASHTO, el más utilizado para la clasificación de suelos en carreteras, clasifica como materiales limo-arcillosos, aquellos que presentan más del 35% pasado por el tamiz No. 200 (Figura 1). Dentro del Grupo A-6 se encuentran los suelos arcillosos plásticos, normalmente con un 75% o más pasando el tamiz No. 200. Los materiales de este grupo experimentan generalmente grandes cambios

de volumen entre los estados seco y húmedo. Los del Grupo A-7 son similares al A-6, con la diferencia de que tiene elevado límite líquido y están sujetos a grandes cambios de volumen.

El grupo A-7 establece dos subgrupos: el A-7-5 que incluye aquellos materiales que tienen un índice de plasticidad moderado en relación con el límite líquido, que pueden ser altamente compresibles y estar asimismo sujetos a importantes cambios de volumen; mientras que los del subgrupo A-7-6, incluyen los materiales que tienen un índice de plasticidad elevado en relación con el límite líquido, sujetos también a cambios de volumen muy importantes (Figura 1).

Se conoce que los minerales arcillosos, tales como la montmorillonita y la kaolinita, son responsables de la plasticidad de los suelos. Las propiedades de la montmorillonita están determinadas en gran medida por el tamaño y carga de los cationes fijados entre las capas elementales formadas por tetraedros de sílice y octaedros de alúmina. Así, las montmorillonitas hidrogenadas y sódicas son muy expandibles; las de calcio y magnesio presentan una expansibilidad moderada; y los cationes de amonio tienden a estabilizar el espaciado debido a su tamaño igual al espacio entre los bloques de sílice^(xvi).

El tipo y la cantidad de los minerales arcillosos, con sus cationes intercambiables asociados presentes en los suelos de granos finos, controlan la plasticidad del suelo y su tendencia a los cambios de volumen, más que la cantidad de material más fino que 2 micras. Por esta misma razón una arcilla bentonítica, dependiendo del tipo de catión intercambiable, puede tener variaciones notables en el límite líquido, mientras se observan variaciones más bajas en su límite plástico.

La afinidad relativa de los minerales de la arcilla por el agua y por los cationes presentes en ella, depende del desequi-

librio de cargas eléctricas en la superficie de los minerales de arcilla. La estructura cristalina de la montmorillonita se caracteriza por un marcado desequilibrio de cargas eléctricas que debe ser compensado por la adsorción de cationes en la superficie de las partículas de arcilla. Tales cationes pueden ser cambiados por otros en solución en el agua intersticial y constituyen los llamados cationes intercambiables que pueden ser determinados cuantitativamente como su *capacidad de intercambio catiónico (CIC)*. Esta magnitud puede ser considerada como un indicador del contenido de montmorillonita de un suelo y, en consecuencia, como un indicador de su actividad.

Si el contenido del mineral arcilloso montmorillonítico es mayor en el contenido de la fracción menor de 2 micras *contenido de finos (CF)*, entonces el suelo exhibe un comportamiento arcilloso y alta plasticidad. Si es a la inversa, y el contenido de mineral arcilloso alto es kaolinitico, entonces el suelo presenta un comportamiento limoso y baja plasticidad.

El tipo de mineral arcilloso plano absorbido (también una función del tipo de catión absorbido), puede causar muy fuertes variaciones en los valores de los límites de Atterberg, aunque el porcentaje de arcillas permanezca igual. Esto puede ser inferido de la carta de actividad realizada por Polidori en el 2009, ver Figura 2^(a). Por ello, para suelos inorgánicos (con minerales arcillosos planos), la ubicación de los datos de *LL vs. IP* sobre la *línea 0,5 C* y *línea C* depende de las características de los minerales arcillosos que contienen.

Aun más, suelos que tienen el mismo valor de *LL* (o *IP*) pueden tener muy diferentes características a causa de la cantidad y tipo de minerales arcillosos que contengan. Por ejemplo, un suelo con alto contenido de limos y/o contenido de arenas (menor que 425 micras), con el mismo *LL*, muestra un índice de plasticidad más alto a causa de su mayor contenido de minerales arcillosos, que es más expandible a medida que el contenido de la fracción arcillosa decrece.

De todo esto se desprende que ni los límites de Atterberg ni el contenido de finos (*CF*) por si solos son suficientes para caracterizar, clasificar o predecir el comportamiento de un suelo fino. Para considerar de forma separada el efecto sobre el valor de los límites de Atterberg, de la cantidad y del tipo del mineral arcilloso contenido en un suelo fino, se emplea la relación entre el índice de plasticidad de la fracción arcillosa (*IP*) y la cantidad de mate-

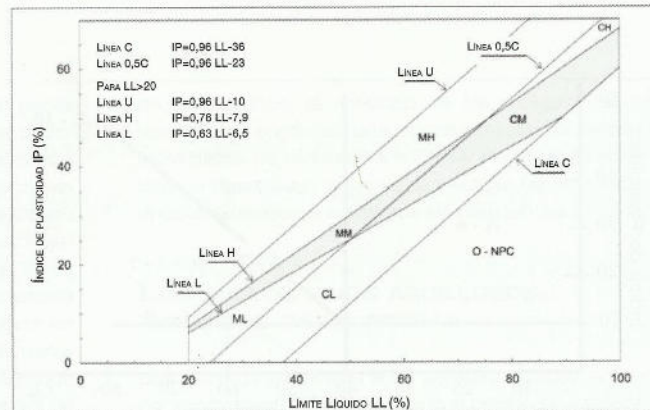


FIGURA 2. Carta de Actividad de Polidori^(a)

rial más fino que 2 micras (% Arc), denominada como *Actividad de Skempton^(a) (A)*, y se determina como:

$$A = \frac{IP}{\% \text{ Arc}}$$

La combinación de factores tales como el tipo de mineral arcilloso, tipo de catión absorbido pH, y otros, aportan una gran variedad de valores de actividad de las arcillas, donde los mínimos y máximos corresponden a los minerales arcillosos puros: kaolinita y montmorillonita respectivamente (en la forma iónica monovalente). Mientras más alto sea el valor de la actividad de un suelo más importante es la influencia de la fracción arcillosa sobre las propiedades intrínsecas y más susceptibles de intercambiar cationes. De hecho la ubicación de un suelo determinado, entre la *línea 0,5 C* y la *línea C*, depende de las características del mineral arcilloso que contenga.

Sobre la base de la interdependencia de los parámetros: *LL*, *LP*, *IP*, *CF* y *A*, parece apropiado clasificar los suelos inorgánicos, con minerales arcillosos planos acorde a: tamaño de la partícula arcillosa que contiene y su actividad. La Figura 2 muestra la carta de actividad en función de los límites de Atterberg y el grado de actividad de la arcilla. La *línea L* y la *línea H* (para $A=0,5$ y $A=1,0$ respectivamente) subdivide las zonas limosas y arcillosas en tres grupos: *baja actividad (L)*, *actividad media (M)* y *alta actividad (H)*, localizadas debajo, en medio, y encima de ambos límites, respectivamente.

ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA SUBRASANTES MEDIANTE EL SISTEMA ROCAMIX

La *subrasante^(a)* es la capa de suelos de la explanación de las carreteras que sirve de cimiento a la estructura de pavimento, con determinadas características de acuerdo al tráfico de diseño previsto. La capa puede estar

(a) En España suelo denominarse también *explanada*.



Foto 1. Obra terminada de suelos de la explanada estabilizados químicamente mediante Rocamix, alternativa de costas más bajas que otros métodos tradicionales.

formada en corte o relleno, y una vez compactada, debe poseer la suficiente resistencia para soportar los valores de tensiones que llegan desde la superficie por efecto de las solicitaciones.

La resistencia de la subrasante puede ser conseguida también a través de la estabilización de suelos, cuando los materiales del lugar no garantizan la resistencia especificada según el tipo de tráfico.

1. Características del Sistema Rocamix

La estabilización química de suelos consiste en el empleo de sustancias químicas que modifican la estructura o propiedades del suelo, incrementando la vinculación de las partículas, para aumentar la capacidad de soportar cargas sin deformación o para reducir la pérdida de materiales superficiales por la erosión del tráfico pesado o lluvias fuertes, en vías no pavimentadas (ver Foto 1).

Esta tecnología ofrece una alternativa en costes más bajos a los métodos tradicionales de construcción de subrasantes y tiene la gran ventaja de utilizar los suelos del lugar. A partir de los exitosos trabajos realizados y la ventajosa relación costo-efectividad lograda, el método ha ido ganando adeptos en todo el mundo.

El sistema Rocamix utiliza sales cuaternarias de amonio como elemento químico para la estabilización de los suelos arcillosos. Se emplea como una solución acuosa, que al incorporarse al suelo, produce reacciones de intercambio catiónico con la fracción menor de 2 micras contenida en los finos del suelo, desplazando a los cationes de agua que tienen un enlace iónico más débil, condicionándolo para alcanzar niveles de compactación

superiores al suelo natural y por tanto mayores índices de CBR (ver Foto 2).

Estos cambios afectan principalmente a la fracción coloidal de las arcillas y al agua contenida en el suelo, en particular:

- al agua higroscópica distribuida sobre las superficies de las partículas finas,
- al agua retenida por tensión superficial en los puntos de contacto de las partículas, y
- al agua capilar infiltrada en sus poros.

El estabilizador otorga al suelo un óptimo de condiciones para alcanzar una alta compactación con medios mecánicos, siendo irreversibles y permanentes, por cuanto la función catalítica del sistema Rocamix continúa indefinidamente cuando se encuentra en presencia del agua (Foto 3). Por lo tanto, la estabilización es definitiva y mejora con el tiempo, lo que constituye una barrera que impide la filtración de agua de lluvia en la superficie, o desde el subsuelo. Rocamix no es contaminante del medio ambiente; no es un tóxico diluido sino un preparado orgánico que genera una reacción iónica, por lo que no constituye amenaza para las fuentes de agua, la flora o la fauna.

2. Resultado de las experiencias con el Sistema Rocamix

Durante varios años se ha estado utilizando el aditivo Rocamix en diferentes tipos de suelos, comprobándose su efectividad con suelos clasificados dentro de los grupos A-6 o A-7 (según AASTHO). En todos los tramos ejecutados los resultados han sido evidentes, con incrementos de la resistencia, sin embargo se ha observado



Foto 2. Probetas de suelo estabilizado con sales cuaternarias, que produce mayores índices de CBR.

SUELO	LL	IP	CF (%)	ACTIVIDAD ARCILLA (A)	CBR INICIAL	VARIACIÓN CBR (%)	CLASIFICACIÓN AASHTO	CLASIFICACIÓN	
								POLIDORI	CASAGRANDE
1	43,4	26,8	18,9	1,41	0,6	2,6	A-7-6 (13)	MH	CL
2	43,1	26,0	20,6	1,26	1,1	2,2	A-7-6 (13)	MH	CL
3	41,5	24,4	20,9	1,17	0,9	2,4	A-7-6 (13)	MH	CL
4	55,0	37,4	20,8	1,79	2,4	3,3	A-7-6 (16)	MH	CH
5	55,7	38,1	20,7	1,84	2,4	3,3	A-7-6 (16)	MH	CH
6	56,4	38,7	20,9	1,85	2,4	3,1	A-7-6 (16)	MH	CH
7	43,4	26,5	20,1	1,32	1,6	1,4	A-7-6 (13)	MH	CL
8	43,1	26,2	20,1	1,30	1,5	1,8	A-7-6 (13)	MH	CL
9	41,5	24,6	20,1	1,22	1,5	1,6	A-7-6 (13)	MH	CL
10	67,0	45,7	33,2	1,38	1,1	4,4	A-7-6 (20)	MH	CH
11	65,0	40,8	44,8	0,91	1,2	5,1	A-7-6 (20)	MM	CH
12	68,0	46,1	35,4	1,30	1,3	3,6	A-7-6 (20)	MH	CH
13	64,8	42,8	36,2	1,18	4,6	3,1	A-7-6 (16)	MH	CH
14	63,7	41,7	36,2	1,15	4,1	2,9	A-7-6 (16)	MH	CH
15	62,9	41,0	36,2	1,13	3,3	3,6	A-7-6 (16)	MH	CH
16	69,8	47,2	37,6	1,26	1,0	4,7	A-7-6 (20)	MH	CH
17	79,1	56,2	37,6	1,50	1,6	4,8	A-7-6 (20)	MH	CH
18	58,1	36,0	37,5	0,96	1,1	4,8	A-7-6 (20)	MM	CH
19	37,0	22,1	13,3	1,66	5,5	9,6	A-6(8)	MH	CL
20	37,6	21,9	16,1	1,36	4,7	11,7	A-6(8)	MH	CL
21	39,3	23,8	15,0	1,58	4,0	12,1	A-6(8)	MH	CL
22	55,7	37,6	22,8	1,64	1,7	7,6	A-7-6(18)	MH	CH
23	55,1	37,0	22,8	1,62	1,8	7,8	A-7-6(18)	MH	CH
24	53,4	35,3	22,8	1,55	1,8	6,7	A-7-6(18)	MH	CH
25	47,8	32,8	11,8	2,79	1,6	13,4	A-7-6 (22)	MH	CL
26	50,0	34,9	11,8	2,96	1,6	14,8	A-7-6 (22)	MH	CH
27	47,6	32,6	11,8	2,77	1,6	14,5	A-7-6 (22)	MH	CL
28	41,0	27,3	8,1	3,36	2,3	26,1	A-7-6(9)	MH	CL
29	41,5	23,3	25,2	0,92	1,6	1,9	A-7-6(10)	MM	CL
30	40,8	20,3	34,0	0,60	1,6	1,9	A-7-6(10)	MM	CL
31	43,1	22,5	34,1	0,66	1,6	1,9	A-7-6(10)	MM	CL

Tabla 1. Características de los suelos estudiados

que los incrementos de resistencia no se logran siempre en la misma proporción.

La Tabla 1 muestra las características y propiedades mecánicas de varios suelos que han sido mejorados mediante el sistema Rocamix. Se muestran los límites de Atterberg (LL, IP), porcentaje de arcilla (CF), índice de actividad (A), valor de capacidad soporte CBR antes de la estabilización, la variación de CBR obtenida posterior a la estabilización y la clasificación de acuerdo al sistema AASTHO. Se muestra también la clasificación de los materiales de acuerdo a los criterios de la carta de Polidori en contraste con los de Casagrande.

En Polidori⁽⁸⁾ se demuestra la interdependencia entre los parámetros LL, LP, IP, A y CF, para suelos inorgánicos que contienen minerales arcillosos planos y un porcentaje de arcillas no demasiado bajo. La relación cuantitativa que incluye estos parámetros, con respecto al índice de plasticidad IP es la siguiente:

$$IP = 0,96 LL - (0,26 CF + 10)$$

Según nos muestra la expresión, el Índice de Plasticidad (IP) de un suelo se relaciona con su límite líquido (LL) y con la fracción arcillosa (CF), respecto al porcentaje del material menor al tamiz 40 (empleado en los ensayos de

límites de Atterberg). La relación cuantitativa con respecto al límite plástico es:

$$LP = 0,04 LL - (0,26 CF + 10)$$

Esta ecuación puede reemplazar el ensayo del límite plástico, si los valores del límite líquido (LL) y el contenido de finos (CF) son conocidos. Como resultado de un número elevado de ensayos Polidori llega a la conclusión que es recomendable utilizar los cálculos para determinar el LP o IP, en lugar de aplicar el ensayo tradicional para la determinación del límite plástico. Cuando se utiliza la ecuación propuesta, en un alto porcentaje de casos el valor se corresponde. Cuando no es así es atribuible a la pobre precisión del método normado internacionalmente para determinar el límite plástico, que es dependiente del operador.

En el trabajo se determinó el límite plástico utilizando la expresión anterior para cada uno de los suelos, estimándose el índice de actividad, con el porcentaje de arcilla, obtenido mediante el ensayo del hidrómetro.

La actividad de la arcilla (A), como se menciona en un apartado anterior, depende de varios factores, cuya combinación aporta un amplio rango de valores de actividad, y su valor depende de la cantidad de kaolinita y montmorillonita presentes. A más alta actividad de un suelo, mayor es la influencia de la fracción arcillosa en sus propiedades y más susceptibles sus valores de cambiar según el tipo de catión intercambiable y la composición del fluido portador.

En la Figura 3 se han ubicado los suelos del estudio en la carta de Plasticidad de Casagrande, donde los suelos se clasifican como arcillas de baja (CL) y alta plasticidad (CH). En la Figura 4 se han ubicado en la carta de actividad de Polidori y los suelos se clasifican como limos de actividad alta y media.

Comparando ambos gráficos se puede observar que las zonas arcillosas y limosas parecen estar invertidas. La posición de la línea A es tal que los suelos inorgánicos que contienen minerales arcillosos planos más comunes, excepto los que contienen relativamente kaolinita pura, caen por encima, en la zona arcillosa, independientemente de su porcentaje de arcilla. Esto se ha comprobado en trabajos de otros autores, como el propio Polidori⁽⁹⁾, quien presenta un estudio de 125 ejemplos de suelos, también en el mismo artículo se presentan resultados de Nagaraj y Jayadeva, donde estudian 520 ensayos de suelos según la carta de plasticidad de Casagrande.



Foto 3. Proceso de mezclado mecánico del suelo con la sal cuaternaria Rocamix. La estabilización conseguida es irreversible y permanente, incluso en presencia de agua.

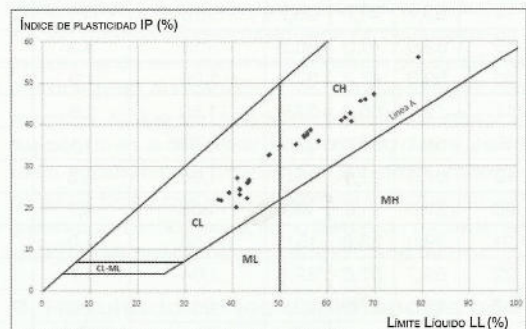


Figura 3. Clasificación de los suelos del estudio según carta de Plasticidad de Casagrande.

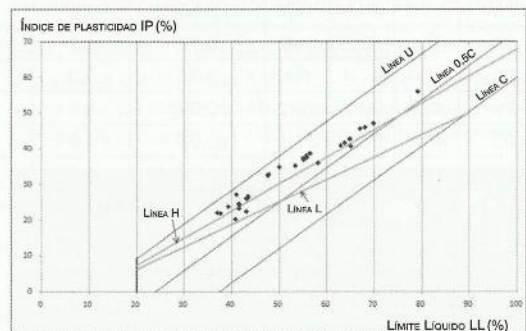


Figura 4. Clasificación de los suelos del estudio según carta de Actividad de Polidori.

Parece evidente que el límite planteado de la línea A es equivalente a la línea C de Polidori, por lo cual sería correcto afirmar que en la carta de plasticidad de Casagrande no existe distinción por encima de la línea A donde se clasifican los suelos más comunes. Por ello se induce que la carta de Casagrande no es suficiente para clasificar y predecir el comportamiento ingenieril de los suelos, en especial para las estructuras de los terra-

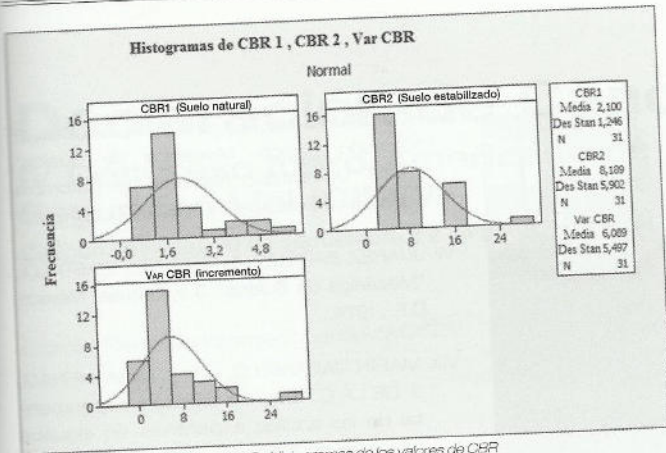


Figura 5. Histogramas de los valores de CBR

plenes de carreteras, y en los procesos de estabilización química.

CORRELACIÓN ENTRE LA ACTIVIDAD DE LA ARCILLA Y LOS INCREMENTOS DE RESISTENCIA

La Figura 5 representa los histogramas de frecuencia construidos con los valores de CBR de los suelos naturales (CBR 1) y estabilizados químicamente con las sales cuaternarias (CBR 2), así como el incremento en la variación del CBR (Var CBR). Se muestran también los gráficos de distribución normal ajustados a los valores observados, valores medios y desviación estándar de cada uno. En el gráfico se observa que el valor medio de CBR de los suelos, que inicialmente (suelo natural) estaba en 2,1%, se ha incrementado hasta 8,1% una vez que los suelos han sido estabilizados (ver Foto 4).

En la Figura 6 se ha representado la variación experimentada en el CBR con la actividad de la arcilla en cada uno de los suelos de la muestra. Como se ha expresado anteriormente, la actividad es una característica que depende principalmente de la composición mineralógica de las arcillas presentes y de la naturaleza de los cationes adsorbidos en la superficie de los minerales de arcilla.

De la Figura 6 se deduce que existe una relación entre actividad de las arcillas (ActArc) de los suelos con el incremento de CBR que experimenta el suelo una vez que ha sido estabilizado con el Rocamix (Var CBR), lo que puede expresarse a través de la expresión:

$$\text{Var CBR} = 2,671(\text{ActArc}^2) - 3,386\text{ActArc} + 3,937$$

Donde:

- Var CBR: Variación del índice de CBR respecto al valor inicial, y

- ActArc: Índice de actividad de la arcilla.

Los resultados obtenidos muestran que los mejores suelos para ser estabilizados con este aditivo son los que contienen arcilla y el cambio que experimentan puede ser previsto a través del análisis del índice de actividad, lo que puede ser una herramienta para predecir los resultados que se esperan con la estabilización.

CONCLUSIONES

La estabilización química con el aditivo Rocamix ha demostrado ser efectiva en los suelos con apreciable contenido de arcilla (Foto 5). La clasificación de estos suelos mediante la carta de plasticidad de Casagrande no ha sido suficiente para explicar los incrementos experimentados, siendo más adecuado considerar la carta de actividad de Polidori, que propone clasificar los suelos finos, añadiendo a los límites de consistencia la actividad de las arcillas.



Foto 4. Ejecución del ensayo CBR en inmersión. En media, la estabilización mediante Rocamix aumenta el valor del CBR del 2,1% al 8,1%.

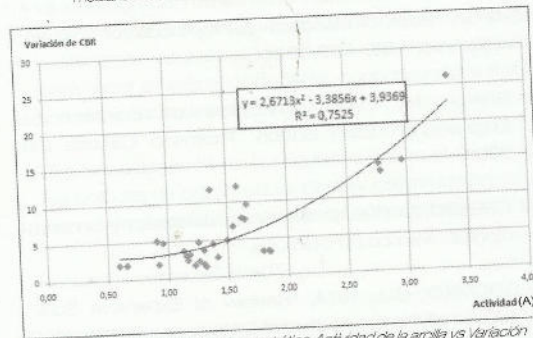


Figura 6. Línea de tendencia cuadrática Actividad de la arcilla vs Variación de CBR.



Foto 5. Obra terminada en Colombia de estabilización química de suelos mediante Rocamix.

Se ha comprobado que se produce un evidente incremento en el índice de CBR cuando se aplica el aditivo, y es posible poder predecir la variación esperada en la resistencia, ya que se ha encontrado una buena correlación entre el incremento de resistencia a CBR y el índice de Actividad de la Arcilla. De ahí que se recomiende determinar la actividad de los finos del suelo antes de acometer un trabajo de estabilización química con sales cuaternarias de amonio, por la influencia que tendrá este factor en el resultado final de la capacidad soporte del suelo estabilizado. Actualmente se continúa trabajando con cada suelo utilizado, para corroborar estas experiencias.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- I. ABDULJAUWAD, S.N. "Characteristics and chemical treatment of expansive clay in Al - Gatif", Saudi Arabia. Engineering Geology, 31: pp 143 - 158, 1991.
- II. ASTM. "Book of standard test methods for soils and rocks". vol 4.08, 4.09, 1994.
- III. BRAJA M. DAS. "Principles of Geotechnical Engineering". Sixth Edition. Thomson Canada Ltd, 2006.
- IV. CRESPO, C. (1998). "Mecánica de suelos y cimentaciones". México D.F., Limusa.
- V. GROMKO, G.J., 1974, "Review of Expansive Soils". Journal of the Geotechnical Engineering Division, 100, No Gt6: pp 667 - 687.
- VI. HOYOS PATIÑO, F., & MEJÍA M. DEL P. "Glosario Básico: Mecánica de Suelos", V.XXVI, Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, pp 55 - 110, 1997.
- VII. JUÁREZ BADILLO, & RICO DEL CASTILLO., "Mecánica de Suelos", 3 v, Limusa, México, D.F., 1974.
- VIII. MARÍN JARAMILLO, J.F Y MIRA HENAO, J. DE LA C. "Estudio teórico y experimental de las arcillas expansivas en algunos sectores de Medellín". Trabajo dirigido de grado, Facultad de Minas, Medellín, 111 p. 1988.
- IX. MITCHELL, JAMES K AND SOGA, KENICHI. "Fundamentals of Soil Behavior", John Wiley & Sons, N. York, 2005.
- X. POLIDORI, E. "Proposal for a new plasticity chart". Geotechnique53, No 4,397-406, 2003.
- XI. POLIDORI, E. "Relationship between the Atterberg Limits and clay content", Soils and foundations Vol 47, No 5, 887-896, Japanese Geotechnical Society, Oct 2007.
- XII. POLIDORI, E. "Reappraisal of the activity of clays. Activity Chart". Soils and foundations Vol 49, No 3, 433-441, Japanese Geotechnical Society, June 2009.
- XIII. SOWERS GEORGE B. & SOWERS GEORGE F. "Introducción a la Mecánica de Suelos y Cimentaciones". México D.F., Limusa, 1978.
- XIV. SPANGLER, M.G. & HANDY R.L. "Soil Engineering". Harper & Row, Cambridge, pp 72 - 91. 1982.
- XV. STEPKOWSKA, E.T. "Aspects of the clay - electrolyte - water system with special reference to the geotechnical properties of clays". Engineering Geology, vol 28: pp 249 - 267, 1990.
- XVI. TERZAGHI, K. - B. PECK, R. "Mecánica de suelos en la ingeniería práctica". Barcelona. El Ateneo, 1973.
- XVII. JUNCO DEL PINO, Juan Mario, y TEJEDA PIUSSEAUT, Eduardo. "Aditivo químico obtenido de sales cuaternarias empleado para la estabilización de suelos arcillosos de subrasantes de carreteras". Revista Carreteras número 183. Mayo-Junio 2012. ☐