

Aditivo químico obtenido de sales cuaternarias empleado para la estabilización de suelos arcillosos de subrasantes de carreteras



Chemical additive obtained from quaternary salts employed in stabilising the clay soil of road surface subgrades

Juan Mario JUNCO DEL PINO

Ingeniero
Especialista Principal ECOING 5, MICONS
Profesor Auxiliar Adjunto, ISFUAE
(10.600 La Habana, Cuba)

Eduardo TEJEDA PIUSSEAUT

Doctor Ingeniero, Profesor Titular
Departamento Ingeniería Vial, ISFUAE
(10.600 La Habana, Cuba)

RESUMEN

La estabilización química es una de las técnicas que se emplean para el mejoramiento de suelos, utilizando sustancias químicas que modifican sus características. En Cuba se desarrolla una investigación que parte de la creación de un procedimiento de estabilización de suelos utilizando sales cuaternarias de amonio, que se conoce como ROCAMIX, que tiene como ventajas principales su economía y simplicidad en su empleo, además de conseguir el incremento de resistencia y reducción de permeabilidad en los suelos.

En el artículo se presenta el modo en que las sales cuaternarias producen los cambios en los suelos, así como las modificaciones de las propiedades físicas y mecánicas de dos tipos de suelos estabilizados con este sistema, comparando las propiedades del suelo en su estado natural y después de mejorados, así como la influencia de la energía de compactación y la evolución de las características de los suelos estabilizados en el tiempo.

Palabras clave: Estabilización de suelos, Aditivo químico, Sal cuaternaria, Suelo arcilloso, Explanada, Terraplén.

ABSTRACT

The chemical stabilization is one of the techniques that are used for the improvement of soils, using chemical substances that modify its characteristics. In Cuba an investigation is developed that leaves of the creation of a procedure of stabilization of soils using quaternary salts of ammonium, that it knows as ROCAMIX, that has as main advantages its economy and simplicity in its employment, besides getting the resistance increment and permeability reduction in the soils.

In the article it shows up the way in that the quaternary salts produce the changes in the soils, as well as the modifications of the physical and mechanical properties of two types of stabilized soils with this system, comparing the properties of the soil in their natural state and after having improved, as well as the influence of the compaction energy and the evolution of the characteristics of the stabilized soils in the time.

Key words: Soils stabilization, Chemical additive, Quaternary salts, Clay soil, Esplanade, Embankment.

Las exigencias para los suelos de sub-rasante, motivado por las elevadas cargas del tránsito, en ocasiones, requiere que los ingenieros derrochen materiales del sitio de

construcción que no cumplen la calidad requerida y se ven obligados a utilizar suelos traídos de canteras, introduciendo mayores costos de transporte en los proyectos, lo que siempre resulta una opción más compleja. Una buena manera de resolver el problema es mediante el mejoramiento de los suelos, mediante diferentes formas de estabilización, lo que reduce la utilización de nuevas canteras de préstamo; vista por muchos expertos como una solución económica, además amigable con el medio ambiente.

Son varias las circunstancias que justifican la utilización de los suelos estabilizados, entre las que se encuentra la gran demanda de un transporte por carretera de óptima calidad, que condiciona una mayor durabilidad de los materiales y estructuras del pavimento bajo un tráfico pesado, cuyo crecimiento e intensidad sigue en aumento. La garantía de un pavimento de buen comportamiento precisa una elevada capacidad de soporte, garantizando la estabilidad del cimiento con mínima influencia por las condiciones atmosféricas.

Por otra parte, la protección del medio ambiente impone grandes limitaciones a préstamos y vertederos, lo que significa un empleo prioritario de suelos locales en los rellenos, procedentes de los desmontes. La reducción de espesores de pavimento, que se logra con una subrasante mejorada, contribuye indirectamente al ahorro de áridos de calidad y del ligante, además del ahorro del transporte de materiales, encarecido por los costos actuales de combustibles. Incluso, el aprovechamiento de los suelos locales mediante estabilización, en muchos casos, compensa el coste del producto estabilizador.

La ejecución requiere que las explanaciones puedan abrirse lo antes posible al tráfico de obra, sin grandes erosiones superficiales y manteniendo una buena regularidad y nivelación, lo que favorece la economía de la obra, que puede lograrse mejorando los rendimientos de la maquinaria, además de los procedimientos de ejecución, donde las estabilizaciones de suelos son una vía para lograrlo.

En la actualidad existen diferentes alternativas como métodos de estabilización química, entre los que se



Foto 1. Desde hace varios años se realiza en Cuba una investigación para conseguir estabilizar suelos con sales cuaternarias de amonio, buscando incrementar su resistencia y reducir su permeabilidad.

encuentran: suelo-cal, suelo-cemento, suelo con productos asfálticos, suelos arcillosos con aceites sulfonados, suelos-ácidos inorgánicos, suelos con productos resinosos, suelos con cerizas pulverizadas, entre otros, utilizados en el mejoramiento y estabilización de terraplenes o suelos de soporte del pavimento, como también como partes de la propia estructura, en bases o sub-base.

En Cuba, desde hace varios años, se desarrolla una investigación con el propósito de crear un procedimiento de estabilización de suelos utilizando sales cuaternarias de amonio, de cuyos resultados parte el procedimiento denominado ROCAMIX, con el que se han alcanzado apreciables ventajas por su economía y fácil empleo. Con este sistema de estabilización se consigue un significativo incremento de la resistencia, así como la reducción de la permeabilidad de los suelos (ver Foto 1).

En el artículo se presenta el modo en que las sales cuaternarias producen los cambios en los suelos, así como las modificaciones de las propiedades físicas y mecánicas de dos tipos de suelos estabilizados con el sistema ROCAMIX, en los que se ha empleado exitosamente; comparando las propiedades del suelo en su estado natural y después de mejorados, así como la influencia de la energía de compactación y la evolución de las características de los suelos estabilizados en el tiempo.

ESTABILIZACIÓN QUÍMICA PARA EL MEJORAMIENTO DE SUELOS DE SUB-RASANTES

Se denomina estabilización de suelos al proceso de someter los suelos naturales a ciertos tratamientos para

mecánicos; estabilización por drenaje; estabilización por medios eléctricos; estabilización por empleo de calor y calcinación; y estabilización por medio químico o adición de agentes estabilizantes.

La estabilización química de suelos consiste en el empleo de sustancias químicas para mejorar las propiedades ingenieriles de los suelos, reduciendo su plasticidad y haciéndolos más resistentes, ante la acción del tráfico y condiciones ambientales. En general el uso de aditivos químicos incrementa en la subrasante la capacidad de soportar cargas sin deformación, y en caminos de suelos, reduce la pérdida de materiales en la superficie y deformaciones, provocado por erosión del tráfico o lluvias fuertes.

Es importante para el ingeniero conocer las variadas opciones que existen para la estabilización de suelos por medios químicos, ya que cada una de ellas es eficaz para determinados tipos de suelos.

En el diseño de la estabilización de un suelo con agentes estabilizantes químicos se deben tener presentes las variaciones que se espera lograr en lo que respecta a la estabilidad volumétrica, resistencia mecánica, permeabilidad, durabilidad y compresibilidad.

Los procedimientos de estabilización química de suelos más conocidos y empleados son: suelo-cemento; suelo-cal; suelo-asfalto^(a); estabilización con sales; esta-

Hendricks demuestra que la cantidad de agua absorbida por la montmorillonita arrastrando ciertos iones de amina absorbidos hace que la diferencia entre la superficie plana basal extendida total y la parte probable de esta superficie cubierta por los iones de amina sea mínima. Apunta también que la reducción en el agua absorbida no es exactamente correlativa con el tamaño del ión orgánico, debido a que la forma del ión orgánico puede ser tal que puede destruir la configuración de las moléculas de agua en las capas del agua absorbida.

1. Influencia de los Cationes Intercambiables en las Arcillas

Los iones absorbidos en la superficie de los minerales arcillosos pueden afectar el agua absorbida de diferentes maneras: un catión puede servir como un enlace para sostener las partículas minerales de arcilla unidas o limitar la distancia a la cual pueden ser separados; el ión amonio tiene una gran tendencia a mantener unidos los minerales arcillosos, debido a su tamaño y número de coordinación que le permite fijarse con la red de oxígeno de la superficie de las tres capas de los minerales arcillosos.

El tamaño de los cationes absorbidos y su tendencia a hidratarse puede influir en el ordenamiento natural del conjunto de las moléculas de agua y el espesor al cual la orientación puede desarrollarse.

(a) En España se emplea generalmente el término *suelo-betún*.

Base	Capacidad de intercambio catiónico (meq/100g)
Berridina	91
Aminodimethylanileno	90
Pbeocylenediamina	86
Naphtylamina	85
2,7-Diaminofluorene	95
Pipicridino	90
Barium	90-94

Tabla 1. Capacidad determinada de intercambio catiónico de una montmorillonita con ciertos cationes orgánicos (Hawthicks)

Dependiendo de la distribución de las cargas en las moléculas de agua, puede esperarse que los iones cargados en las soluciones iónicas atraigan las moléculas de agua electrostáticamente.

Ejemplo de esto, es que el espesor de las capas de agua entre las unidades de silicato depende de la naturaleza de los cationes intercambiables. Experimentos realizados por Mering, con montmorillonita en la presencia de grandes cantidades de agua sugiere que con ciertos cationes absorbidos, por ejemplo Na^+ , las capas se separan completamente, pero con otros cationes tales como el Ca^+ , el H^+ , y los cationes orgánicos la separación no es completa.

En la Tabla 1 puede observarse la capacidad determinada de intercambio de cationes de la montmorillonita con ciertos cationes orgánicos, lo cual será importante para nuestro trabajo, pues muestra lo alta que es ante las QACs (sales cuaternarias de amonio).

2. Caracterización de las sales cuaternarias y su papel en el proceso de estabilización

Los compuestos cuaternarios (QACs) de amonio son compuestos orgánicos que contienen cuatro grupos funcionales unidos covalentemente a un átomo central (R_4N^+) de nitrógeno. Estos grupos funcionales (R) incluyen al menos una cadena larga de grupo alkyl y el resto son alternativamente grupos de methyl o benzyl.

Las QACs están entre las Producciones Químicas de Alto Volumen (HPVs). Las QACs poseen propiedades activantes superficiales, características de conformación propias, detergentes y propiedades antimicrobianas. Las propiedades únicas físico químicas de las QACs han resultado en una variedad de usos y un alto nivel de popularidad en aplicaciones domésticas e industriales como surfactantes, emulsificadores, suavizadores, des-

infectantes, pesticidas e inhibidores de corrosión, entre otros.

3. Influencia de los Surfactante iónicos en el comportamiento de las Arcillas

La presencia de los surfactantes incrementa la viscosidad plástica y la intensidad del campo eléctrico a nivel iónico. Esta demostrado que el Surfactante Polarizado cabeza del grupo, ancla en la superficie de la placa tetraédrica, dejando la cadena alquilina extendida fuera en las caras y esquina. Por consecuencia, la cadena alquilina recibe interacciones hidrofóbicas que facilitan la asociación entre las placas e incrementa la estructura física dentro de la suspensión.

Diferencias estereoquímicas entre los grupos polares pueden llevar a diferencias en el modo de asociarse con la placa tetraédrica y así puede influir en el último efecto del comportamiento reológico. Existe una significativa interacción entre estos surfactantes y las arcillas montmorillonitas, y los cambios reológicos que ocurren pueden tener impacto en las cosas a emplear en los procesos de estabilización. Diversos estudios han investigado el efecto de la intercalación entre las placas de surfactantes iónicos en el comportamiento de las arcillas montmorillonitas.

Las arcillas montmorillonitas se caracterizan por alternar capas tetraédricas de silice con octahedricas de aluminio coordinados con átomos de oxígeno. La sustitución isomórfica de Al^{3+} por Si^{4+} en la capa tetraédrica y Mg^{2+} o Zn^{2+} por Al^{3+} en las capas octaédricas resulta en una red de cargas superficiales negativas sobre este tipo de arcillas. Estas cargas desbalanceadas son compensadas por cationes intercambiables (típicamente Na^+ o Ca^{2+}) en la superficie de las arcillas. Las capas estructurales de las arcillas permiten la expansión (hinchamiento) después de humedecidas. Estos factores en combinación con el pequeño tamaño de sus partículas, provoca que la montmorillonita exhiba una alta capacidad de intercambio catiónico comparada con otros suelos naturales.

En un medio acuoso, los cationes de amonio cuaternario pueden ser retenidos por ambas superficies: la externa y las intercapas, de una arcilla expansiva, por un proceso de intercambio catiónico y no son fácilmente desplazadas por cationes más pequeños como H^+ , Na^+ o Ca^{2+} . Las propiedades de absorción de la superficie de la arcilla modificada puede ser significativamente alterada por esta reacción de sustitución.

Los surfactantes reducen grandemente la tensión superficial del agua, lo cual incrementa grandemente la capa-

cidad del agua ionizada para penetrar el suelo. Esto incrementa grandemente la capacidad de compactación del suelo tratado con ROCAMIX, pues por ejemplo las partículas de arcilla son capaces de moverse dentro de la grava más fácilmente. En los suelos tratados con el sistema la solución ionizada penetra la *doble capa difusa* de agua que rodea las partículas arcillosas. Esto trae más iones cerca de la superficie de las partículas de la arcilla, reemplazando el agua de suspensión previamente cargada electrostáticamente, lo cual provoca que gran cantidad del agua que previamente estaba unida sea desatada y quede como agua libre.



Foto 2. La incorporación del aditivo a una arena uniforme de tipo A-2-7, conteniendo arcilla de alta plasticidad, consiguió un producto apto para su empleo en subrasante de tráfico pesado.

A través de la poderosa acción ionizante de las QACs, el intercambio iónico es inducido en la superficie de las partículas de arcilla. Esto quiere decir que gran parte del agua que normalmente está unida, después de la aplicación drena a la superficie como agua libre, por eso actúa como un agente deshidratante. Al ser capaz de liberar previamente al agua sujeta, ROCAMIX le proporciona a las partículas de arcillas la posibilidad de colocarse más unidas durante la compactación.

Después del tratamiento, el *cojín* de agua electrostáticamente unida, que normalmente rodea partículas de la arcilla e impide la compactación óptima, es ahora despedida por la compactación física, posibilitando un realineamiento de las partículas de arcilla, por tanto actúa como un apoyo a la extremadamente eficiente compactación. Es decir, crea la posibilidad de que sea alcanzada la compactación óptima, reduciendo los espacios vacíos y la cantidad de agua en la arcilla.

La maximización de la compresión se logra mediante un aumento del entrelazamiento entre las partículas de arcilla, lo cual es resultado del realineamiento de las partículas, siendo unidas fuertemente. El proceso inducido de intercambio iónico es permanente, el cual permanentemente reduce la atracción entre agua y arcilla, y por consiguiente, reduce permanentemente la posibilidad del entumecimiento y el encogimiento. También se reduce permanentemente el Índice de Plasticidad de la arcilla.

Varias acciones de cohesión (cementantes) tienen lugar en los suelos tratados con QACs, pero estas acciones no son inmediatas, y tienen lugar durante varias semanas, como aglomeraciones, las cuales continúan durante meses. Las QACs alteran sólo la arcilla en el suelo porque sólo las arcillas tienen la estructura molecular con una

carga electrostática en la superficie (las arenas, limos y la roca no poseen esta característica). Por consiguiente, cuando un suelo responde al tratamiento con ROCAMIX es porque presenta una determinada cantidad de arcilla, en lo que también influye su naturaleza. La determinación del porcentaje de suelo que pasa el tamiz de 0,075 y el Índice de Plasticidad del suelo, puede indicar la cantidad y el tipo de arcilla en el suelo.

PRIMERAS EXPERIENCIAS CON EL PRODUCTO ROCAMIX

1. Experimentación en laboratorio con un suelo A-2-7

Para comprobar el efecto del producto, se realizó un estudio a nivel de laboratorio, utilizando un suelo extraído de la cantera Manuela, procedente de la zona del Mariel en la Habana. Este material presenta una alta plasticidad, que puede comprobarse a partir de los valores medios observados en el laboratorio: Límite Líquido de 41%, Límite Plástico de 16,3% y un Índice Plástico de 24,7%. El análisis granulométrico refleja un alto porcentaje de partículas menores que el tamiz No. 4, sin embargo, bajo porcentaje de material más fino que el 200.

El suelo clasifica como un A-2-7 (0), una arena uniforme con graduación discontinua. Presenta muy pocos finos inferiores al tamiz 200, con arcilla de alta plasticidad. Los resultados de los ensayos Proctor, mostraron una densidad máxima de 1,25 g/cm³ y humedad óptima de 21%, para la prueba Normal (PN), y de 1,3 g/cm³ y 19% para la prueba del Modificado (PM).

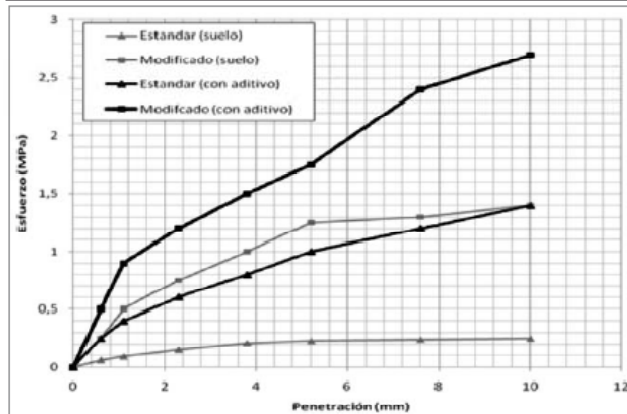


Figura 1. Relación Esfuerzo-deformación para diferentes condiciones, de energía y estado del material. Suelo A-2-7. Cartera Manual.

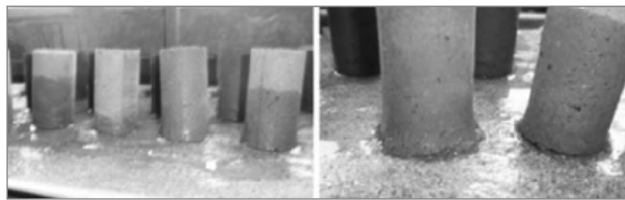


Foto 3. Ensayo del efecto de humedad en las probetas compactadas.

Se hicieron pruebas de resistencias utilizando el Índice CBR y para ambas energías de compactación (Normal PN y Modificado PM), tanto para el suelo natural como con el suelo modificado con el uso del aditivo. Se comprobó que el suelo compactado con la energía del PN tiene un Índice de CBR muy bajo, en torno al 2%, y utilizando el aditivo la resistencia se eleva hasta el 11%. Con la energía del PM con el suelo natural se puede alcanzar 11,5% de CBR, y la resistencia se incrementa entonces hasta el 20,0%.

La incorporación del aditivo provoca un efecto similar que el incremento de la energía. Cuando se adiciona aditivo y se compacta con el Proctor Modificado, entonces el suelo alcanza valores admisibles para una sub-rasante de tráfico pesado, ver Foto 2 (Norma 6.1 IC, del 2003). En la Figura 1 se pueden apreciar los cambios provocados por el uso del aditivo en el suelo.

Se preparó un ensayo para comprobar el efecto del agua en las probetas preparadas con el aditivo. Mediante el ensayo se puede apreciar como asciende el agua a través del material y el tiempo que pueden permanecer bajo la influencia del agua sin desmoronarse

o sufrir afectaciones importantes. La prueba se realizó con muestras de diferentes tiempos de curado: 7, 14 y 28 días. En la Foto 3 se aprecia el estado de las muestras, después de ser sometidas a la acción del agua por 24 horas.

Las muestras de suelo natural se desintegraron a las dos horas, mientras que las muestras con aditivo resistieron la influencia del agua. Fueron sometidas al ensayo después de haber sido curadas a 7, 14 o 28 días, y en todos los casos incrementaron su peso, por la presencia de humedad, sin desintegrarse.

La Figura 2 representa el incremento de peso que han tenido las probetas estabilizadas químicamente, y que han sido sometidas a la influencia de la humedad. Como se observa en la pendiente de variación del peso, la velocidad de incremento de humedad se reduce con los días de curado, lo que evidencia la importancia del

tiempo de curado en la mejora de las características de la mezcla. Se observó que a los 7 días de curado las probetas no se desintegraban en presencia de la humedad.

En la Figura 3 se muestran los resultados de la medida de resistencia a compresión axial, determinadas para diferentes días de curado y comparadas con el suelo natural sin el aditivo.

Se concluye de estas pruebas que el aditivo, utilizado con el suelo A-2-7(0), provocó una mejora de las pro-

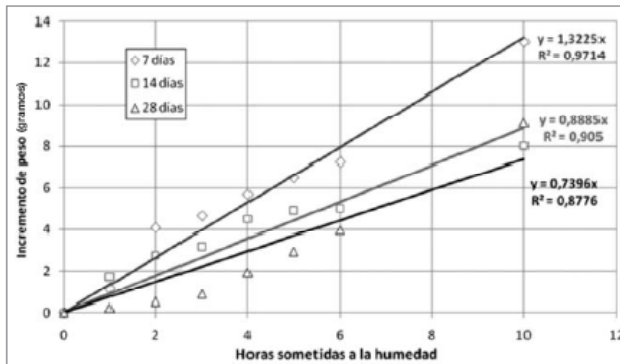


Figura 2. Variación de la humedad de las muestras con el tiempo de curado.

propiedades mecánicas de manera significativa y una apreciable reducción en la absorción por capilaridad, con lo cual el suelo se hace más resistente a los efectos destructivos del agua (Foto 4).

2. Experimentación con un suelo A-7-6

Para estas pruebas se seleccionó un suelo arcilloso, procedente de la Formación Via Blanca, que presenta una granulometría y plasticidad tal que permiten clasificarlo como un suelo A-7-6 (20), según el Sistema de Clasificación AASTHO; arcilla de alta compresibilidad y alto cambio de volumen. Según el Sistema SUCS, clasifica como un suelo CH, arcilla de alta compresibilidad. El LL promedio de las muestras ensayadas es de 68%, mientras que el LP es de 29%, para un IP del 39%. El contenido de arcilla se encuentra en un orden del 25%.

En las pruebas de laboratorio, el suelo fue mejorado utilizando un porcentaje de aditivo de 1,5% y el contenido de cemento del 2% respecto al peso de suelo. También se analizó la influencia de la energía de compactación.

La Tabla 2 muestra los resultados del CBR, para el suelo natural y estabilizado con el producto, y compactado con la energía normal y modificada. Como se puede comprobar la resistencia del suelo natural es muy baja, inferior a los niveles exigidos para subrasante, aún con la energía del Proctor Modificado. Incluso es un suelo que no cumple los valores de material para núcleo de terraplenes.

Sin embargo, con la adición del ROCAMIX el índice de CBR se incrementa de manera apreciable, incrementándose hasta valores admisibles

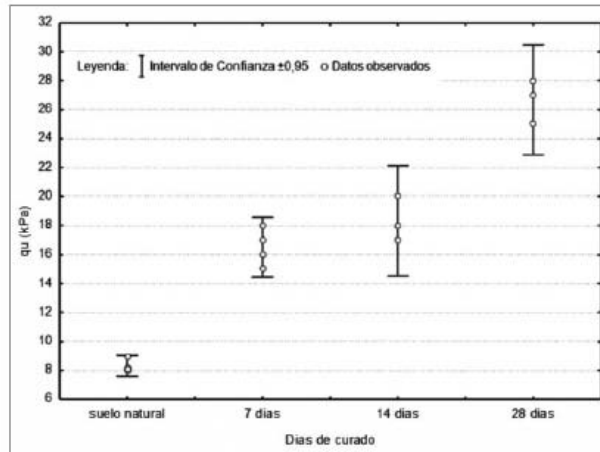


Figura 3. Incremento de la resistencia a compresión, para diferentes días de curado.



Foto 4. El empleo del aditivo sobre el suelo A-2-7(0) mejoró significativamente sus propiedades mecánicas y aumentó apreciablemente su resistencia ante los efectos del agua.

	ENERGÍA NORMAL			ENERGÍA MODIFICADO		
	Suelo Natural			Suelo Natural		
Índice de CBR	1	2	3	1	2	3
CBR (2,54)	0,87	0,43	1,01	1,01	1,16	1,30
CBR (5,04)	0,78	0,68	0,97	1,07	1,07	1,17
CBR	0,87	0,68	1,01	1,07	1,16	1,30
	Suelo Estabilizado			Suelo Estabilizado		
	1	2	3	1	2	3
Índice de CBR	1	2	3	1	2	3
CBR (2,54)	4,20	3,48	3,62	5,51	6,23	4,93
CBR (5,04)	4,08	3,59	3,59	5,36	5,92	4,80
CBR	4,20	3,59	3,62	5,51	6,23	4,93

Tabla 2. Resultados Índice de CBR Suelo A-7-6.



Foto 5. Mediante la estabilización química de un suelo arcilloso, de baja capacidad portante se consigue elevar su CBR hasta permitir su empleo como sub-rasante en carreteras.

para la sub-rasante. Con la energía del modificado el suelo natural presenta un índice de CBR de 1,2% como promedio, y adquiere 5,6% cuando se ha estabilizado.

Se comprobó que la adición del ROCAMIX el suelo incrementa su resistencia de forma apreciable y que la energía aplicada favorece estos resultados, de la misma forma que sucede en otros sistemas de estabilización, observándose que este suelo arcilloso de baja capacidad portante, inaceptable en su estado natural, llega a alcanzar un CBR que le permite su empleo como sub-rasante para carreteras (Foto 5).

Para verificar la influencia de agua se prepararon muestras compactándolas con el miniproctor. Se comprobó como las muestras compactadas con Proctor Normal, sin aditivo se saturan inmediatamente y se desmoronan, con muy poca diferencia en su comportamiento para diferentes tiempos de curado, pues colapsan finalmente, sin embargo, todas las muestras con aditivo ofrecieron una mayor resistencia a la humedad.

Los resultado de estas pruebas son semejantes a las efectuadas con el suelo A-2-7 pues las muestras con aditivo absorben menos agua, a medida que el tiempo de curado es mayor las muestras absorben menos agua, ofreciendo mayor resistencia a la ascensión capilar.

Las pruebas de resistencia muestran que a medida que adicionamos el aditivo ROCAMIX líquido el suelo aumenta su resistencia a la compresión axial, lo que se hace más significativo con el incremento de la energía de compactación. La resistencia al esfuerzo axial aumenta desde 0,5 kN/m² a los 7 días de curado, hasta 3,8 kN/m² a 14 días y 7,0 kN/m² a los 28 días de curado, cuando se utilizó la energía PN. Utilizando la energía del modificado se obtuvo 0,5 kN/m²; 10,5 kN/m² y 20 kN/m² para 7, 14 y 28 días de curado respectivamente.

CONCLUSIONES

De estos primeros estudios se puede concluir que el empleo del sistema de estabilización de suelos creado a partir de sales cuaternarias de amonio produce un significativo incremento de resistencia en los suelos ensayados y apreciable resistencia a la acción del agua. Los suelos empleados en este estudio clasifican como materiales no adecuados como sub-rasantes, por su alta plasticidad y baja capacidad portante, con valores por debajo del 5% de CBR. Se comprobó en ambos casos la efectividad del procedimiento, empleando el aditivo químico ROCAMIX, con un

substancial mejoramiento de las propiedades de resistencia y permeabilidad.

El índice de CBR aumenta significativamente con la adición del producto y es más apreciable con el incremento de la energía de compactación. La resistencia a compresión axial aumenta con la presencia del aditivo, y es más significativo con el tiempo de curado y con el incremento de la energía de compactación. Se evidencia también la mejora en la resistencia del suelo a la acción del efecto del agua, lo que también se favorece con el incremento de energía de compactación y el tiempo de curado (Foto 6).

La estabilización de suelos, además de las ventajas económicas, contribuye a la protección del medio ambiente, en momentos en que la exigencia mundial en este sentido es cada vez mayor, ya que se reduce la necesidad de utilización de fuentes de préstamos, con grandes movimientos de tierras y altos consumos de combustibles.

El resultado de este trabajo forma parte de un proyecto de investigación que se desarrolla desde hace varios años en Cuba, con el propósito de buscar alternativas en la mejora de suelos de sub-rasantes, para las regiones del país donde escasean los suelos adecuados con estos propósitos, y como parte del esfuerzo que el país realiza en función de la protección del medio ambiente y la necesidad de reducir los costos de las inversiones.

Los suelos arcillosos o los que contienen algún porcentaje de arcilla son los que se ven favorecidos con este tipo de tratamiento. Actualmente las investigaciones abordan la influencia del contenido y actividad de arcilla en la mejora de los suelos de sub-rasante.



Foto 6. De acuerdo con los primeros estudios el sistema desarrollado incrementa significativamente el CBR, también aumenta la resistencia a compresión axial y se evidencia asimismo una mejora en la resistencia del suelo al efecto destructivo del agua.

BIBLIOGRAFÍA

- I. BERRY, P. & REID, D. (1993). "Mecánica de suelos". Santa Fé de Bogotá. McGraw-Hill.
- II. BRAJA M. DAS (2006). "Principios de Ingeniería Geotécnica". 3ª Edición. Universidad del Sur de Illinois y Carbondale. PWS Publishing Company
- III. CONDUCTED FOR TEXAS DEPARTMENT OF TRANSPORTATION IN COOPERATION WITH FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (2010). "Accelerated stabilization design of subgrade soils". Research Report 0-5569-1.
- IV. CONDUCTED FOR TEXAS DEPARTMENT OF TRANSPORTATION (2009). "Design Manual and Test Protocols to Accelerate Mix Design of Stabilized Subgrades Products P1 and P2". Research Project 0-5569.
- V. CRESPO, C. (1998). "Vías de comunicación". México D.F., Limusa.
- VI. CRESPO, C. (1998). "Mecánica de suelos y cimentaciones". México D.F., Limusa.
- VII. ESCUELA DE INGENIERÍA DE CAMINOS DE MONTAÑA (1998). Curso de actualización de "Diseño Estructural de Caminos. Método AASHTO '93", Tomo 1. Santiago de Chile, Tercera Edición.
- VIII. FERNÁNDEZ, G. (1982). "Mejoramiento y Estabilización de suelos". México, D.F. Limusa.
- IX. HERRERA ZAMBRANA R. (1997). "Estudio para la Construcción y Conservación del Pavimento Estructural con el Sistema Consolid para suelos finos". Cochabamba, Universidad Privada del Valle.
- X. HOLT CHRISTOPHER Ph. D. (2010). "Chemical Stabilization of Inherently Weak Subgrade Soils for Road Construction Applicability in Canada". Paper Prepared for Presentation at the Development of New Technologies for Classification of Materials Session of the 2010 Annual Conference of the Transportation Association of Canada, Halifax, Nova Scotia
- XI. HURTADO P. DANIEL (1999). "Ingeniería de Transporte II". Santa Cruz-Bolivia, UPESA.
- XII. JUAREZ, E. - RICO, A. (1997). "Mecánica de suelos, T1". México D.F., Limusa.
- XIII. JUAREZ, E. - RICO, A. (1997). "Mecánica de suelos, T2". México D.F., Limusa.
- XIV. JUSTINIANO FERLTA J.L. (2000). "Metodología de evaluación y mantenimiento de pavimentos flexibles". Santa Cruz. UPESA.
- XV. LARSON THOMAS D. (1996). "Cemento Portland y Concretos Asfálticos". México D.F., Cia. Editorial Continental, S.A.
- XVI. MOUSTAFA AHMED KAMEL, MOHAMED EL-SHABRAWY AU (2011). "A Procedure for Quantification and Optimization of Stabilized Subgrade Pavement Materials". International Journal of advanced Engineering Sciences and Technologies Vol No 6, Issue No 1, 025-035
- XVII. RICO, A. - DEL CASTILLO, H. (1999). "La Ingeniería de suelos en las vías terrestres, T1". México, D.F. Limusa.
- XVIII. RICO, A. - DEL CASTILLO, H. (1999). "La Ingeniería de suelos en las vías terrestres, T2". México D.F., Limusa.
- XIX. SOWERS GEORGE B. & SOWERS GEORGE F. (1978). "Introducción a la Mecánica de Suelos y Cimentaciones". México D.F., Limusa.
- XX. TERZAGHI, K. - B. PECK, R. (1973). "Mecánica de suelos en la Ingeniería práctica". Barcelona. El Ateneo.
- XXI. VALLE RODAS, R. "Carreteras, Calles y Aeropistas". Buenos Aires, Argentina. El Ateneo.
- XXII. VIVAR ROMERO, G. (1995). "Diseño y Construcción de pavimentos". Lima. Colegio de Ingenieros del Perú.
- XXIII. WESLEY PARKER, JOHN (2008). "Evaluation of Laboratory Durability Tests for Stabized Subgrade Soils". Department of Civil and Environmental Engineering Brigham Young University. 