

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

*Chemical additive obtained from quaternary salts used for soil stabilization of road subgrade clay.*



### **Prof. MSc. Ing. Juan M. Junco del Pino**

Especialista Principal

Empresa Constructora Obras de Ingeniería No. 5. MICONS. Cuba

Profesor Auxiliar. Facultad de Ingeniería Civil, ISPJAE. Cuba

Teléfono; 8816811

Email: [junco@arquitectura.cujae.edu.cu](mailto:junco@arquitectura.cujae.edu.cu)

[junco@ecoing5.netcons.com.cu](mailto:junco@ecoing5.netcons.com.cu)

### **Dr. Ing. Eduardo Tejeda Piusseaut**

Profesor Titular. Facultad de Ingeniería Civil, ISPJAE. Cuba

Email: [etejeda@civil.cujae.edu.cu](mailto:etejeda@civil.cujae.edu.cu)

Recibido: 10-06-11

Aceptado: 22-07-11

## **RESUMEN:**

La construcción de subrasantes para obras viales, como principio, se basa en el aprovechamiento de suelos locales como material de fácil obtención y de bajo costo, pero que en ocasiones necesitan ser mejorados, dado que no cumplen las exigencias mínimas para su empleo. Aún así se logran grandes ahorros, del orden del 20 al 45 % respecto a los costos de construcción con materiales extraídos de canteras de préstamos lejanas. La estabilización química es una de las técnicas que se emplean para el mejoramiento de subrasantes, utilizando sustancias químicas que modifican las características de los suelos, reduciendo plasticidad e incrementando la cohesión y su capacidad de soporte.

En Cuba, para aliviar la carencia de materiales locales en algunas regiones del país, se desarrolló una investigación que dio como resultado la creación de un procedimiento de estabilización de suelos utilizando sales cuaternarias. El "Sistema de Estabilización e Impermeabilización de Suelos", así creado, 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 donde se aplique.

El presente trabajo contiene una exploración sobre el estado de la técnica de utilización de aditivos en el mejoramiento de suelos, en la esfera internacional, y sobre el modo en que las sales cuaternarias producen los cambios en los suelos arcillosos, también algunos de los resultados fundamentales del empleo de esta técnica en nuestro país. Se analiza el comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas de los suelos estabilizados con el sistema, comparando las propiedades físicas y mecánicas del suelo en su estado natural y después de mejorados, así como la evolución de las características en el tiempo de los suelos estabilizados.

**Palabras claves:** estabilización de suelos, aditivos químicos, sales cuaternarias.

## **ABSTRACT:**

The subgrades constructions for road works, like principle, is based on the use of local soils as material of easy obtaining and of low cost, but that in occasions they need to be improved, since they don't complete the minimum demands for its employment. Big savings are achieved even this way, of the order of the 20 to 45% regarding the construction costs with extracted materials of quarries of loans far. The chemical stabilization is one of the techniques that are used for the subgrades improvement, using chemical substances that modify the characteristics of the soils, reducing plasticity and increasing the cohesion and its support capacity.

In Cuba, to alleviate the lack of local materials in some regions of the country, an investigation was developed that gave the creation of a procedure of stabilization of soils as a result using quaternary salts. The "System of Stabilization and waterproofing of soils", this way created, it has as main advantages their economy and simplicity in their employment, besides getting the resistance increment and permeability reduction in the soils where it is applied.

The present work contains an exploration on the state of the technique of use of additives in the improvement of soils in the international sphere, and on the way in that the quaternary salts produces the changes in the loamy soils, and some of the fundamental results of the employment of this technique in our country also. The behavior of the physical and mechanical properties of the stabilized soils with the system is analyzed, comparing the physical and mechanical properties of the soil in its natural state and after having improved, as well as the evolution of the characteristics in the time of the stabilized soils.

**Keywords:** soils stabilization, chemicals additives, quaternary salts.

## **Introducción:**

Las exigencias para los suelos de subrasante requieren en ocasiones, motivado por las elevadas cargas del tránsito, que los ingenieros desperdicien materiales del sitio de construcción que no cumplen la calidad requerida y se ven obligados a introducir en los proyectos costos de transporte de suelos desde canteras, lo que siempre resulta una opción complicada. Esta problemática se resuelve con el mejoramiento de los suelos, mediante diferentes formas de estabilización, al no disponer de nuevas canteras de préstamo; vista por muchos expertos como una solución económica, además amigables 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 de carretera de 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, insensible a los agentes atmosféricos, garantizando la estabilidad del cimiento a largo plazo, a pesar de las incidencias relacionadas con el drenaje o deformaciones originadas por bajas densidades.

Por otra parte, la protección del medio ambiente impone grandes limitaciones a préstamos y vertederos, lo que significa un empleo en los rellenos prioritario de suelos locales procedentes de los desmontes, buscando un equilibrio del movimiento de tierras. 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 influye en la economía de la obra, que se logra con plazos reducidos y elevados rendimientos de la maquinaria y 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 encuentran: suelo-cal, suelo-cemento, suelo con productos asfálticos, suelos arcillosos con aceites sulfonados, suelos - ácidos inorgánicos, suelos con productos resinosos, suelos con cenizas

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.

### **Estabilización Química de Suelos:**

Se denomina estabilización de suelos al proceso de someter los suelos naturales a ciertos tratamientos para aprovechar sus mejores cualidades, de manera que puedan soportar las condiciones adversas de clima, rindiendo en todo tiempo el servicio adecuado que de ellos se espera. (**Crespo**, 1998: 325).

Los procedimientos de estabilización, de manera general, consisten en mezclas de suelos con otros de diferentes características o con aditivos; la compactación por medios mecánicos; el uso de membranas impermeables; medios eléctricos, entre otros. La estabilización de suelos tiene como principales objetivos aumentar la resistencia, proporcionar o disminuir la permeabilidad y en lo posible, reducir los cambios volumétricos (asentamientos o expansiones).

En las sub-rasantes de carreteras, la estabilización persigue poder utilizar suelos naturales con una baja calidad de soporte, cercanos a la obra, no aptos por si solos para la construcción, para mejorarlos y hacerlos adecuados de una manera económica.

Los suelos, extraídos de bancos de préstamos cercanos a la obra, con propiedades que pueden variar sustancialmente a poca distancia, deben usarse sin que sus costos sobrepasen lo previsto. Según argumentan **Fernández Loaiza y Rico & Del Castillo**, en esto, el ingeniero puede tomar tres opciones principales:

- a) Aceptar el material tal y como está y proceder al diseño, sin obedecer los requisitos propuestos y calidad de obra que se pidiese, absteniéndose a las consecuencias posteriores;
- b) Rechazar el suelo de mala calidad e insatisfactorio y reponer o sustituirlo por un material cuyas propiedades ingeniérriles muestren a través del tiempo su buen comportamiento a los agentes externos;
- c) Modificar o alterar de la mejor forma las propiedades y características mecánicas de los suelos presentes para hacer de ellos un material que cumpla y reúna la calidad y los requisitos impuestos.

En la primera opción se corre el riesgo de que la obra no se comporte satisfactoriamente y en la segunda puede que los costos sean excesivos. Para la opción de mejoramiento del suelo existen actualmente diferentes procedimientos, o métodos de estabilización:

- a) Estabilización por medios mecánicos;
- b) Estabilización por drenaje;
- c) Estabilización por medios eléctricos;
- d) Estabilización por empleo de calor y calcinación;
- e) Estabilización por medio químico, adición de agentes estabilizantes.

La estabilización química de suelos consiste en el empleo de sustancias químicas para mejorar las propiedades ingeniérriles 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 mejora o reduce la pérdida de capa de rodadura o erosión por tráfico pesado 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 se 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; estabilización con sales; estabilización con polímeros, enzimas, compuestos resinosos y otros. Cada uno de estos procedimientos persigue objetivos y proporcionan modificaciones diferentes a cada suelo.

En fechas más recientes e impulsados por el Desarrollo Tecnológico de la Industria química han ido surgiendo diferentes aditivos con el objetivo de obtener mejoras en las propiedades ingeniérriles de

los suelo a partir de diversas reacciones químicas, ejemplo de ellos son: **CBR plus, RoadPacker Plus, Base – Seal, MINEDUR, Consolid, Permazyme, ISS 2000, Claycrete, y otros.**

## Las sales cuaternarias en el mejoramiento de las arcillas.

### 1. Breve caracterización de los suelos arcillosos.

Las arcillas están constituidas básicamente por silicatos de aluminio hidratados, presentando además, en algunas ocasiones, silicatos de magnesio, hierro u otros metales, también hidratados. Estos minerales tienen casi siempre, una estructura cristalina definida, cuyos átomos se disponen en láminas. Existen dos variedades de tales láminas: la silícica y la aluminica.

La primera, de tales láminas, está formada por un átomo de silicio, rodeado de cuatro de oxígeno, disponiéndose el conjunto en forma de tetraedro, tal como se muestra en la Figura 1. Estos tetraedros se agrupan en unidades hexagonales, sirviendo un átomo de oxígeno de nexo entre cada dos tetraedros.

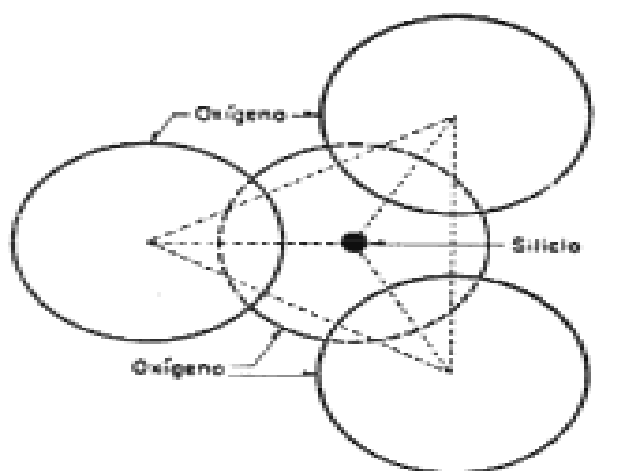


Fig. 1

Un esquema de una unidad hexagonal aparece en la Figura 2. Las unidades hexagonales repitiéndose indefinidamente, constituyen una redícula laminar.

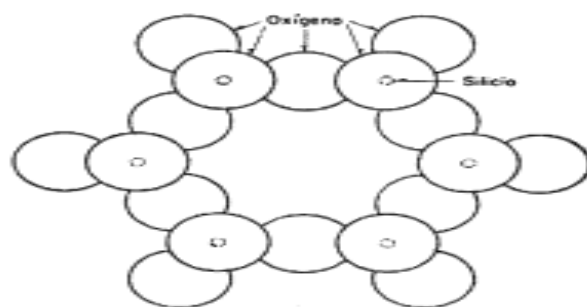


Fig 2

Las láminas aluminicas están formadas por redículas de octaedros dispuestos con un átomo de aluminio al centro y seis de oxígeno alrededor, tal como aparece en la Figura 1.3. También ahora es el oxígeno el nexo entre cada dos octaedros vecinos, para constituir la redícula.

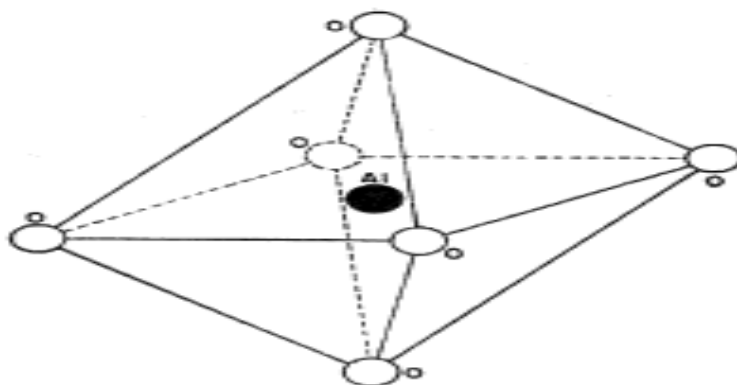


Fig 3

De acuerdo con su estructura, los minerales de arcilla se clasifican en tres grupos: kaolinitas, montmorilonitas e illitas. Para entender mejor la respuesta de los suelos finos a la estabilización es importante conocer los aspectos físico-químicos de estos. En general, se considera, que las partículas arcillosas tienen un tamaño del orden de 2 micras o menores y presentan una actividad eléctrica importante, que rige su comportamiento dada su gran superficie específica en relación con su volumen y aún su masa.

Una de las teorías más aceptadas, hasta ahora desarrolladas, para explicar la estructura interna de las arcillas es la que menciona que la superficie de cada partícula de suelo posee carga eléctrica negativa. La intensidad de la carga depende de la estructuración y composición de la arcilla. La partícula atrae a los iones positivos del agua ( $H^+$ ) y a cationes de diferentes elementos químicos, tales como  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $Al^{+++}$ ,  $Fe^{+++}$ , etc, se tiene entonces, en primer lugar, al hecho de que cada partícula individual de arcilla se ve rodeada en forma definida y ligada a su estructura (agua adsorbida).

Las moléculas de agua son polarizadas, es decir, en ellas no coinciden los centros de gravedad de sus cargas negativas y positivas, sino que funcionan como pequeños dipolos permanentes; al ligarse a la partícula por su carga (+), el polo de carga (-) queda en posibilidad de actuar como origen de atracción para otros cationes positivos. Los propios cationes atraen moléculas de agua gracias a la naturaleza polarizada de éstas, de modo que cada catión está en posibilidad de poseer un volumen de agua en torno a él. El agua adsorbida por cada catión aumenta con la carga eléctrica de éste y con su radio iónico (Peck, R.B., Hanson, W.E. y Thornburn, T.H. 1957).

Por lo anterior, cuando las partículas del suelo atraen a los cationes, se ve reforzada la película de agua ligada a la partícula. El espesor de la película de agua adsorbida por el cristal de suelo es así función, no solo de la naturaleza del mismo, sino también del tipo de los cationes atraídos.

Los cristales de arcilla pueden cambiar los cationes absorbidos en su película superficial; por ejemplo, una arcilla hidrógena (con cationes  $H^+$ ) puede transformarse en sódica, si se hace que circule a través de su masa, agua con sales de sodio en disolución. En realidad lo que ocurre es un intercambio de cationes entre el agua y las películas adsorbidas por las partículas minerales, algunas veces en reacción rápida. Los cationes intercambiables más usuales son  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $H^+$  y  $(NH_4)^+$ .

Comprender acertadamente las propiedades de la arcilla y del agua, y las Fuerzas de atracción entre las mismas que resultan en el "doble estrato difuso" de agua rodeando las partículas de la arcilla, son esenciales para completamente entender cómo trabajar para estabilizar las arcillas o suelos gravo arcillosos. Las moléculas de agua son dipolos, quiere decir que tienen un polo negativo en un extremo, donde está el oxígeno, y uno positivo donde está situado el Hidrógeno, lo cual significa que cada Molécula de agua actúa como una Barra Magnética, la cual puede alinearse a sí misma con Fuerzas o Campos electromagnéticos. Es esta propiedad que le da al agua su tensión superficial. Es también esta propiedad del agua la que posibilita que sea electrostáticamente atraída por las cargas superficiales de las partículas de arcilla. En algunas arcillas la Presión alcanzada en la atracción electrostática entre agua y arcilla puede resultar en valores por encima de las 10,000 atmósferas. Esto es una de las razones del por que la expansión de algunas arcillas pueden levantar edificios fuera de sus cimientos y el por que el proceso normal de humedecimiento y secado de bases, subbases y subrasantes frecuentemente causan el fallo de los Viales.

En el Gráfico siguiente se puede apreciar la característica especial del Ion intercambiable en una montmorillonita:

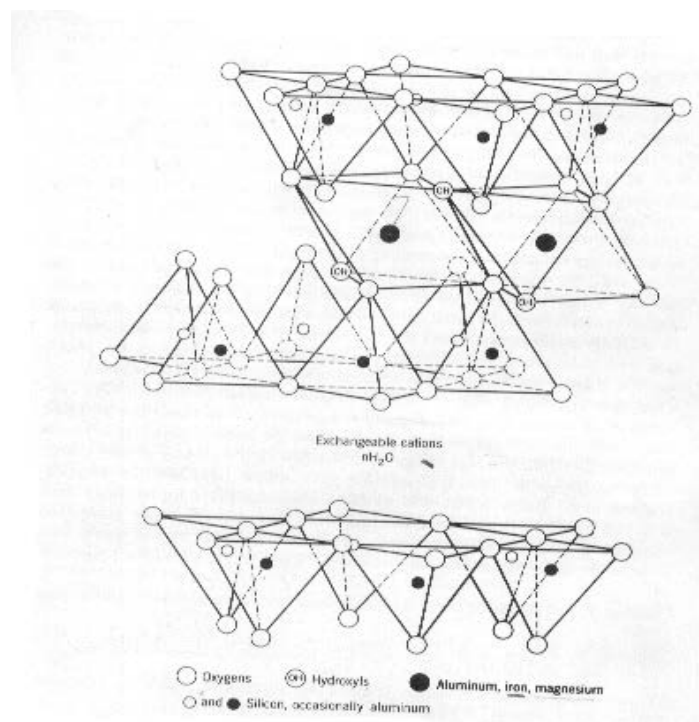


Fig 4

## 2. Influencia de las Moléculas Orgánicas Adsorbidas

Giesecking ha reportado que las Arcillas Montmorillonitas pierden su tendencia a hincharse mediante la absorción de agua hasta la saturación con una variedad de cationes orgánicos. Estos Cationes son absorbidos sobre la superficie plana basal de la montmorillonita. 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. Hendricks apunta también que la reducción en el agua absorbida no es exactamente correlativa con el tamaño del Ion orgánico, debido a que la forma del Ion orgánico puede ser tal que puede destruir la configuración de las moléculas de agua en las capas del agua absorbida.

## 3. 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 cation puede servir como un enlace para sostener las partículas minerales de arcilla unidas o limitar la distancia a la cual pueden ser separados.

El Ion amonio tiene una gran tendencia a mantener unidos los minerales arcillosos, debido a su tamaño y numero 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 el ordenamiento natural de conjunto de las moléculas de agua y el espesor al cual la orientación puede desarrollarse. 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  $\text{Na}^+$ , las capas se separan completamente, pero con otros cationes tales como el  $\text{Ca}^+$ , el  $\text{H}^+$ , y los cationes orgánicos la separación no es completa (ver Fig 5).

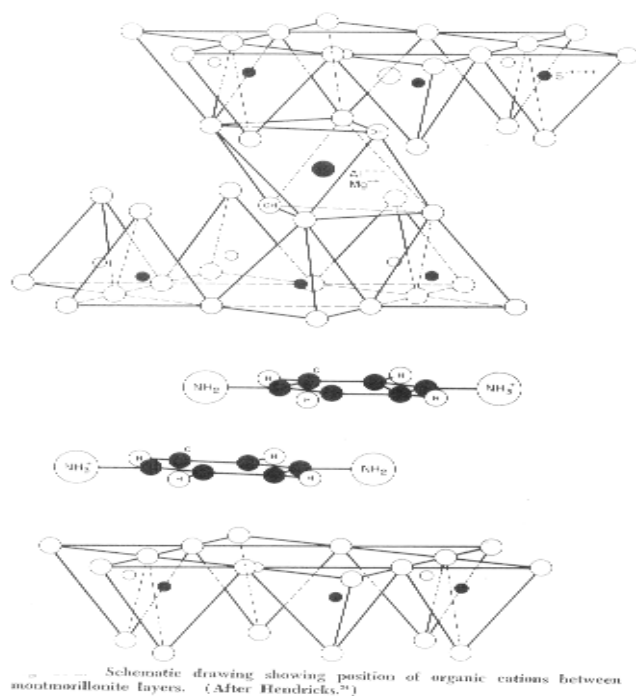


Fig 5

En la Tabla 1 que se presenta a continuación 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.

Cation-exchange capacity of a montmorillonite determined with certain organic cations (After Hendricks<sup>24</sup>)

Base	Cation-exchange capacity, meq/100 g
Benzidine	91
p-Aminodimethylaniline	90
p-Phenylenediamine	86
$\alpha$ -Naphthylamine	85
2,7-Diaminofluorene	85
Piperidine	90
Barium	90-94

Tabla 1

### 3.4 Caracterización de las Sales Cuaternarias y Papel de las mismas 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<sub>4</sub>N<sup>+</sup>) 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 (ver Fig 6). Los 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, desinfectantes, pesticidas e inhibidores de corrosión, entre otros.

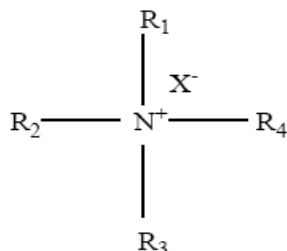


Figure 1.1. General molecular structure of a QAC (R represents a functional group, X<sup>-</sup> represents a counter ion such as Cl<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, or NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)

Fig 6

### 3.4.1 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 alcalina extendida fuera en las caras y esquina. Por consecuencia, la cadena alcalina recibe interacciones hidrofóbicas que facilitan la asociación entre las placas e incrementa la estructura física dentro de la suspensión.

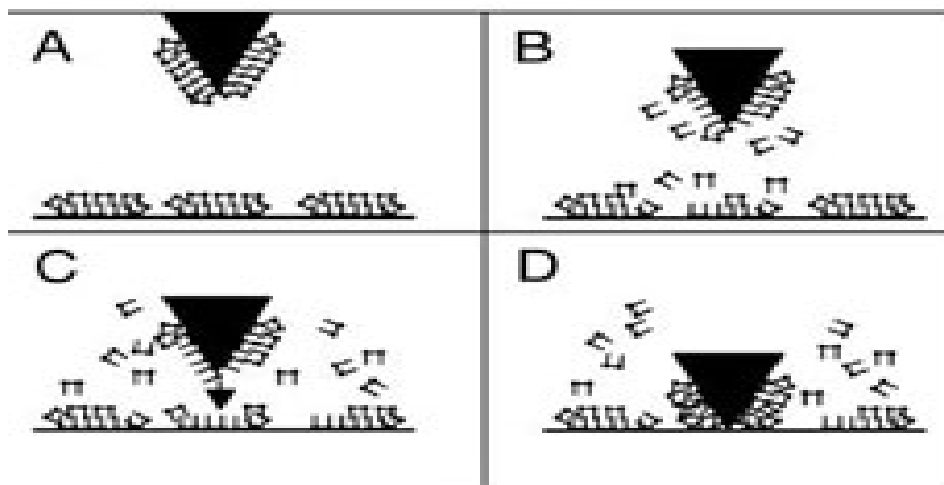


Fig 7

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 ultimo 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 dosis 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.

Como hemos visto las arcillas montmorillonitas se caracterizan por alternar capas tetraedricas de sílice con octahedricas de aluminio coordinados con átomos de oxígeno. La sustitución isomorfica de AL 3+ por Si 4+ en la capa tetraédrica y Mg 2+ o Zn 2+ por Al 3+ en las capas octaedricas 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

*Revista de Arquitectura e Ingeniería. 2011, vol.5 no.2.*



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 capacidad 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 mucha cantidad del agua que previamente estaba unida sea desatada y quede como agua libre.

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 esta unida, después de la aplicación dreña 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 la compactación óptima sea alcanzada 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. Permanentemente reduce 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 determinando cuando un suelo responde al tratamiento con ROCAMIX es una manera de determinar la cantidad de arcilla, y la naturaleza de la arcilla en el suelo. La determinación del porcentaje de suelo que pasa el tamiz de 75 micrones, y el índice de plasticidad del suelo, nos dará una indicación de la cantidad y el tipo de arcilla en el suelo.

## **CASOS DE ESTUDIO**

### **1. ANALISIS DE RESULTADOS.**

#### **1.1. Estudio realizado con el material extraído de la cantera Manuela, en el Mariel**

El material de la cantera Manuela, en el Mariel tiene una alta plasticidad, dado por lo valores medios de las determinaciones 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.

Se ofrece los resultados del ensayos Proctor, Normal y Modificado, en la figura 8.

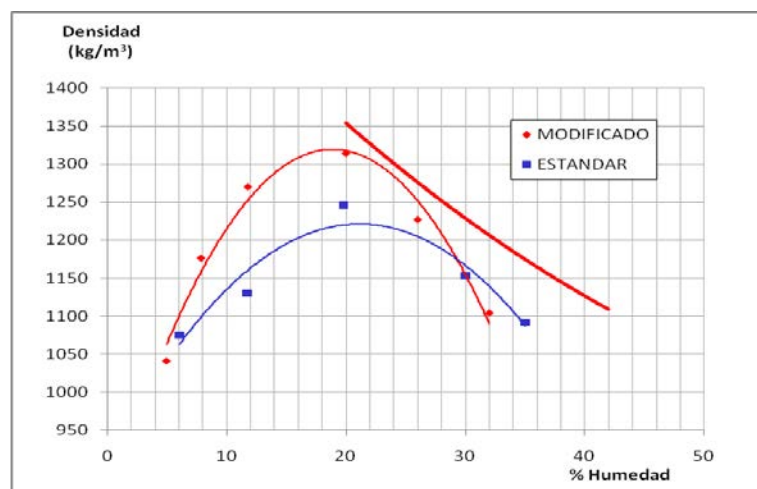


Fig 8

	tipo	Est (suelo)		Est (aditivo)		Mod (suelo)		Mod (aditivo)	
2,54	6,9	0,15	2,2	0,7	10,1	0,7	10,1	1,3	18,8
5,04	10,3	0,2	1,9	1,2	11,7	1,02	9,9	1,8	17,5
	CBR		1,7		11,0		11,4		19,9

Tabla 2

Se han obtenido los resultados del Índice CBR para las energías estándar y Modificado, con el suelo natural y el suelo tratado. Los resultados se muestran en la Tabla 2, donde se puede apreciar el incremento de la resistencia para ambos valores de compactación. El suelo natural compactado a energía estándar presenta un bajo índice de CBR (1,7%), sin embargo compactado con el Modificado eleva su resistencia hasta el 11,4%, pero aunque pudiera emplearse como material de subrasante de forma natural, no sería recomendable para tráfico pesado.

La incorporación del aditivo provoca un efecto similar que el incremento de la energía, registrándose un aumento del CBR hasta el 11,4%, solo añadiendo aditivo. Cuando se adiciona aditivo y se compacta con el Modificado, entonces el CBR alcanza valores admisibles para tráfico pesado (19,9%).

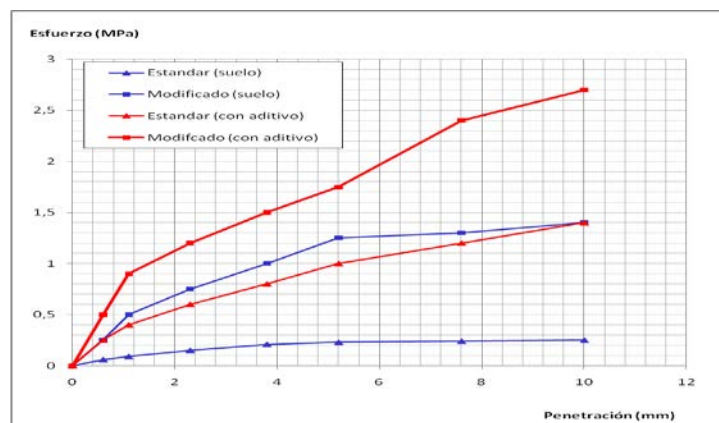


Fig. 9

La norma 6.1 IC, del 2003, establece tres secciones diferentes de firme (pavimentos), que han de emplearse dependiendo del tipo de tráfico de proyecto: E1; E2 y E3. La tabla 2, muestra los

valores exigidos para estas categorías de explanadas y los valores del módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga, obtenido del ensayo de carga con placa (NLT-357).

CATEGORIA DE EXPLANADA	E1	E2	E3
$E_{v2}$ (MPa)	$\geq 60$	$\geq 120$	$\geq 300$

Tabla 3

La Norma cubana 334-2004 establece también tres categorías de explanadas, de acuerdo al CBR obtenido en la subrasante como valor de diseño. Se clasifican en: Aceptable, media y buena, como se puede ver en la tabla 4.

Clasificación de subrasante	Resistencia de diseño
Aceptable	$5\% \leq \text{CBR} < 10\%$
Media	$10\% \leq \text{CBR} < 15\%$
Buena	$\text{CBR} \geq 15\%$

Tabla 4

### Ascensión capilar.

Se preparó un ensayo para medir la ascensión capilar que se produce en las mezclas estabilizadas. Es un ensayo sencillo que persigue conocer 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. Se ejecutó el ensayo con muestras de diferentes tiempos de curado: 7, 14 y 28 días. La figura 10 contiene algunos de estos resultados, después de ser sometidas a la acción del agua por 24 horas.



Figura 10. Ensayo de ascensión capilar.

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. No se apreciaron, sin embargo, influencia significativa del tiempo de curado, por lo que se supone que, aunque existe ascensión capilar, el curado de 7 días es un tiempo suficiente para que las muestras hayan adquirido la necesaria resistencia a la acción de la humedad.

La figura 11 representa el incremento de peso que han tenido las probetas estabilizadas químicamente, que han sido sometidas al proceso de ascensión capilar. Como se observa claramente, la pendiente de variación del peso la 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.

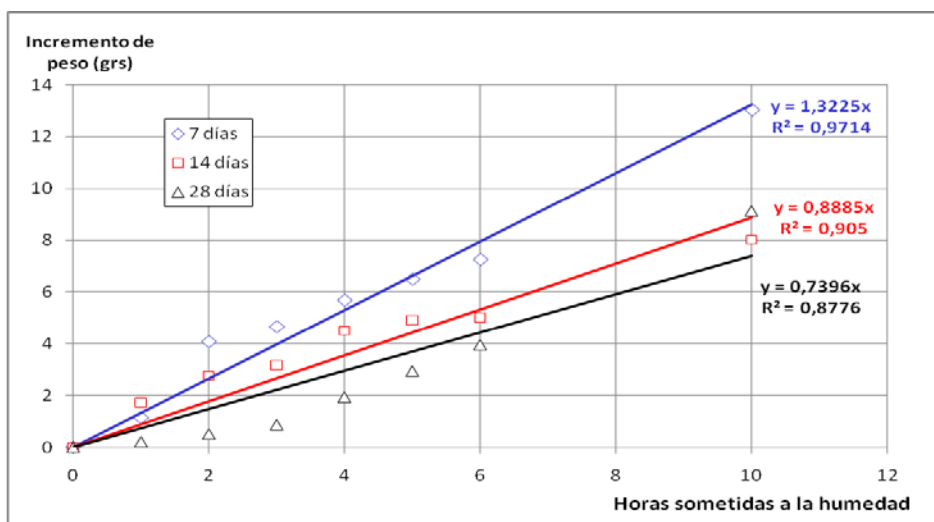


Fig. 11

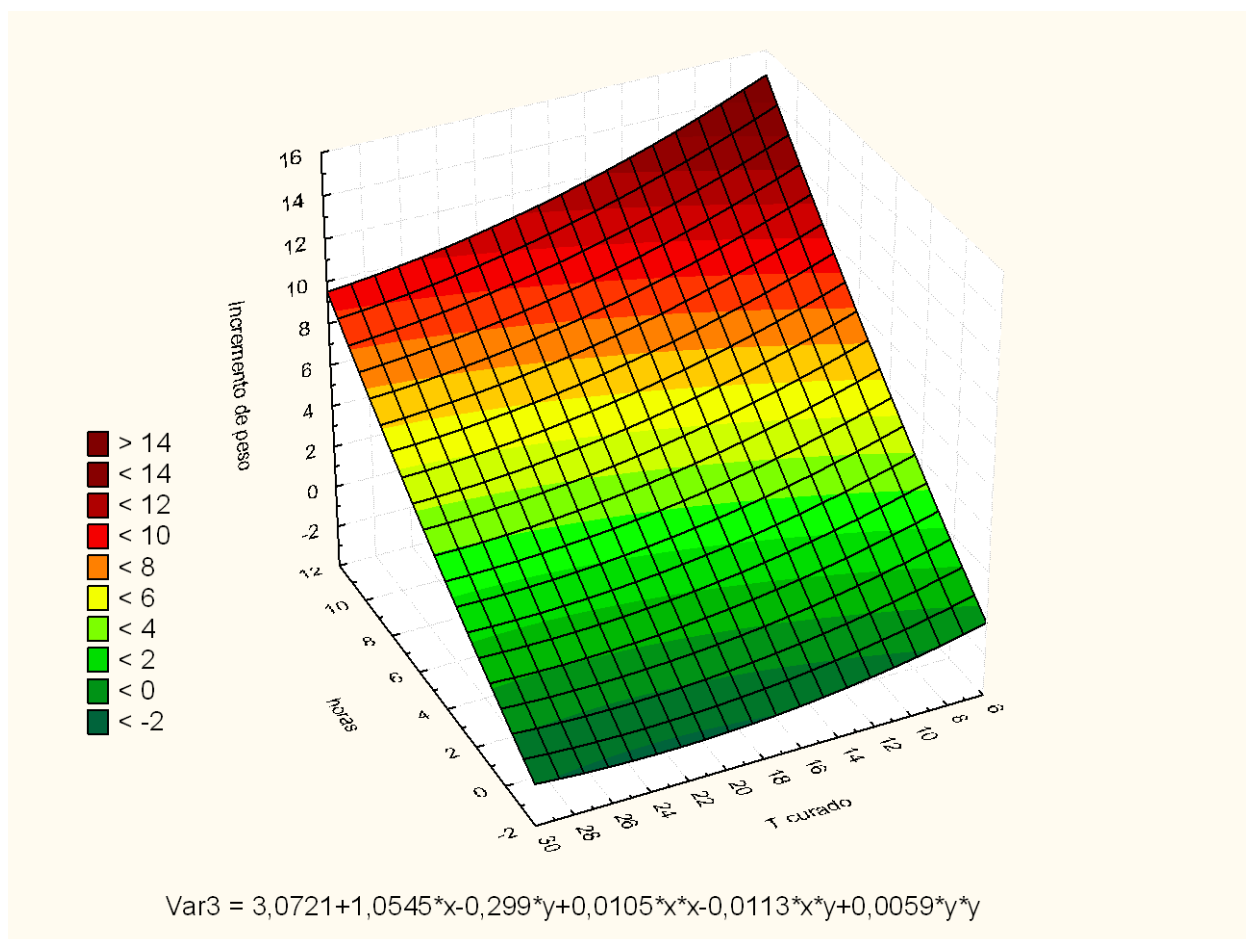


Fig. 12

### Resistencia a compresión axial

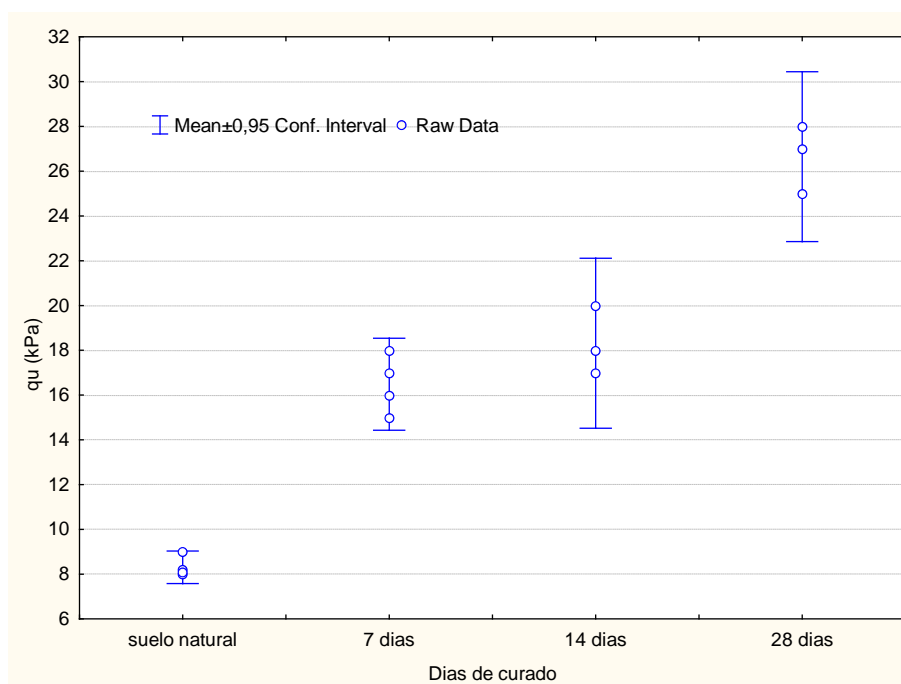


Fig. 13

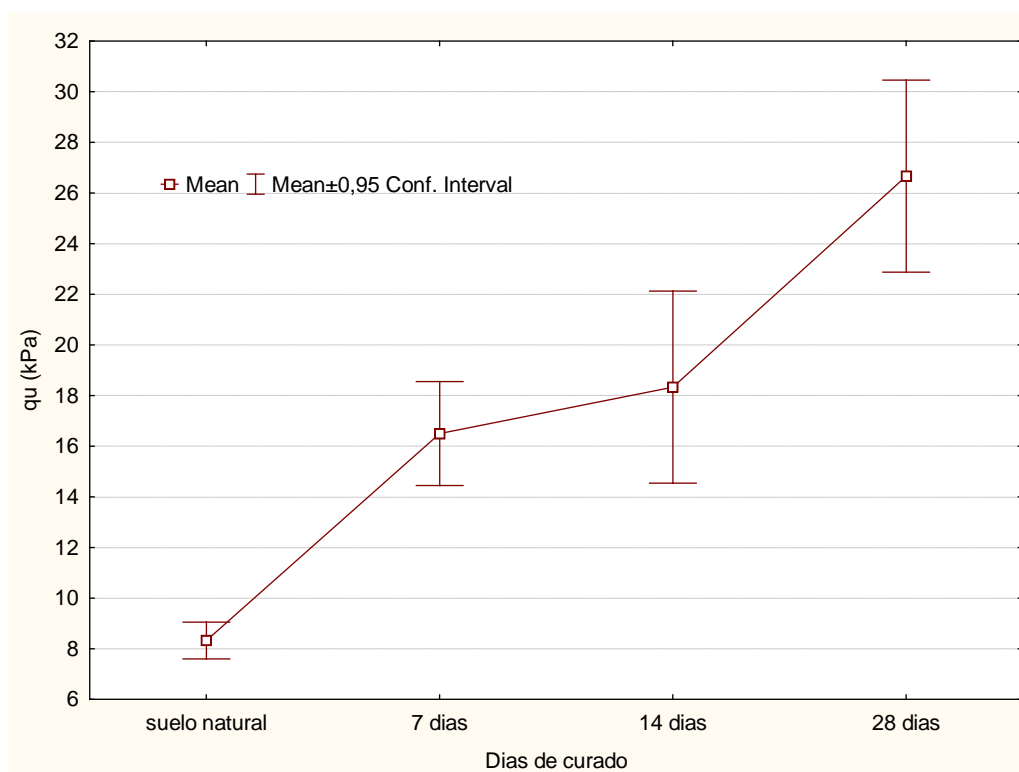


Fig. 14

El suelo procedente de la Cantera La Manuela que clasifica como un A-2-7 (0), en el Mariel; mejoró sus propiedades mecánicas de manera significativa, con la aplicación del aditivo. Se demostró con estos trabajos que, además de una mezcla resistente, se obtiene también apreciable reducción en la

absorción por capilaridad, con lo cual el suelo se hace más resistente a los efectos destructivos del agua.

## 1.2. Estudio realizado con el material extraído de la Formación Vía Blanca.

En otra investigación se compararon los resultados de la aplicación del aditivo en suelos arcillosos<sup>1</sup>. Para ellos se efectuaron pruebas con el empleo del Rocamix en un suelo de la Formación Vía Blanca, con una granulometría y plasticidad tal que permiten clasificarlo como un suelo A-7-6 (20), según el Sistema de Clasificación AASTHO; una arcilla de alta compresibilidad y alto cambio de volumen y de acuerdo al Sistema SUCS, 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%. Los resultados del ensayo del Hidrómetro, 0,074mm, se muestran en la tabla 5. Como se observa, el contenido de arcilla se encuentra en un orden del 25%.

Diámetro		% de finos real		
D(mm)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
0.055	74.3	75.4	75.0	74.9
0.040	70.2	72.5	71.0	71.2
0.023	68.5	68.9	69.0	68.8
0.018	67.0	67.8	67.4	67.4
0.013	66.7	62.7	65.0	64.8
0.011	64.4	65.0	64.7	64.7
0.008	60.0	60.0	60.0	60.0
0.006	53.5	54.0	54.0	53.8
0.004	43.9	50.0	47.0	47.0
0.003	36.7	36.7	37.0	36.8
0.001	24.3	23.9	24.0	24.1

Tabla 5. Análisis granulométrico a las partículas menores al tamiz 200. Ensayo del Hidrómetro.

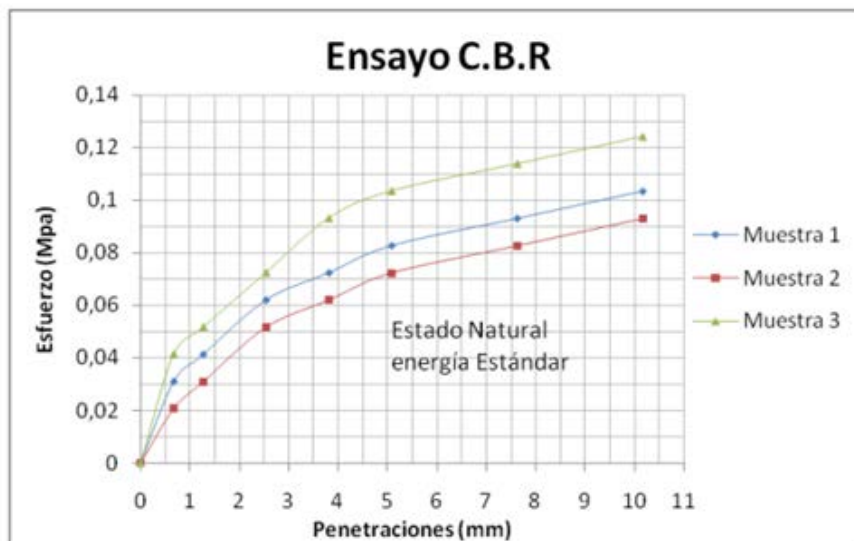
En la investigación se incorporó un porcentaje de aditivo de 1,5% y 2% de cemento respecto al peso de suelo. También se analizó la influencia de la energía de compactación, utilizando dos energías diferentes, estándar y modificado.

### 1.2.1 Ensayos de CBR.

La figura 15 muestra los resultados del CBR, para el suelo natural, con las energías estándar y modificadas. Como se puede comprobar la resistencia del suelo es muy baja, inferior a los niveles exigidos para subrasante, aún con la energía del Modificado. Incluso es un suelo que no cumple los valores de material para núcleo de terraplenes. (Mencionar norma española de terraplenes).

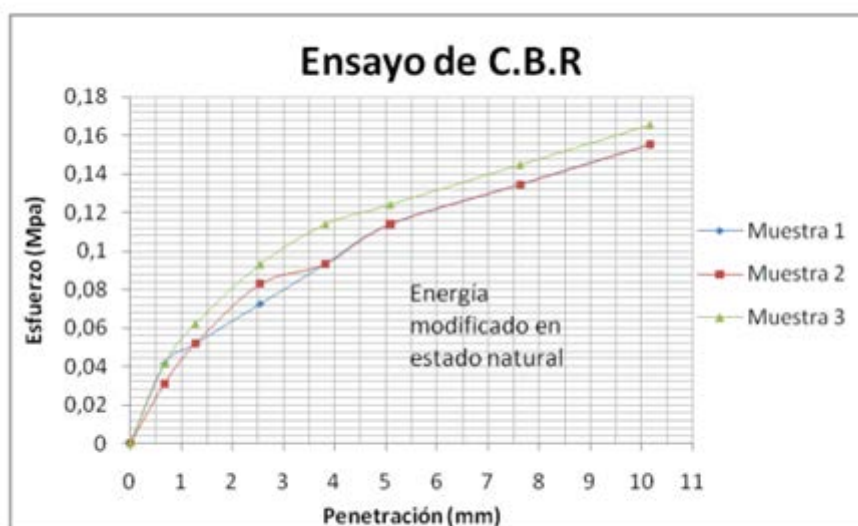
Los valores del CBR con la adición del Rocamix se pueden ver en la figura 16. Nótese que los valores de CBR se han incrementado hasta valores admisibles, pasando desde 1,2% con el suelo natural hasta 5,6% de CBR, cuando se ha estabilizado, empleando la energía del modificado.

<sup>1</sup> Comparación de los resultados de diversos ensayos en suelos arcillosos estabilizados con el nuevo ROCAMIX líquido.



Curva esfuerzo-deformación para el suelo natural y energía estándar.

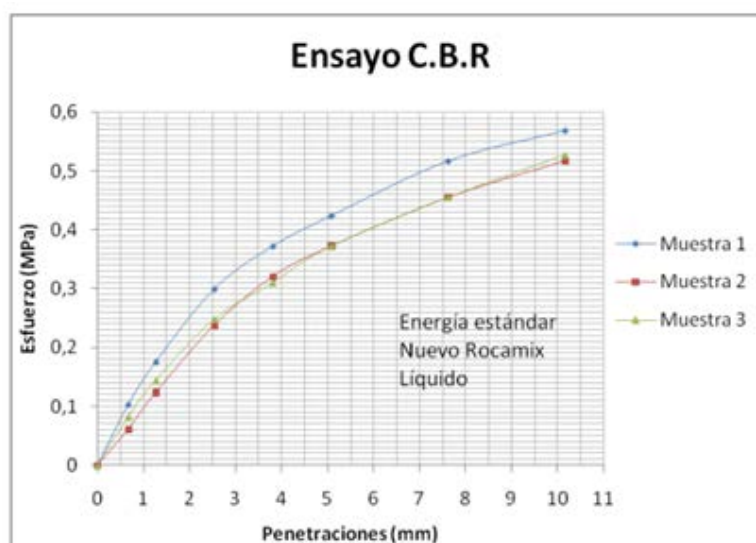
<b>Muestra</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Índice de C.B.R (2.54)</b>	0.87	0.43	1.01
<b>Índice de C.B.R (5.08)</b>	0.78	0.68	0.97
<b>Índice de C.B.R</b>	0.87	0.68	1.01



Curva esfuerzo-deformación para el suelo natural y energía del Modificado.

Muestra	1	2	3
Índice de C.B.R (2.54)	1.01	1.16	1.30
Índice de C.B.R (5.08)	1.07	1.07	1.17
Índice de C.B.R	1.07	1.16	1.30

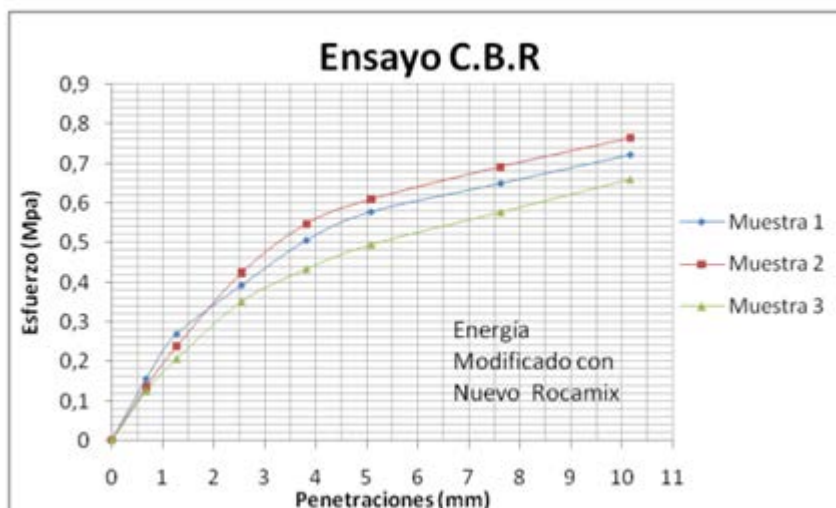
Fig. 15 Resultados Ensayo CBR para Suelo Natural



Curva esfuerzo-deformación para el suelo estabilizado con Rocamix y energía estándar.

Muestra	1	2	3
Índice de C.B.R (2.54)	4.20	3.48	3.62
Índice de C.B.R (5.08)	4.08	3.59	3.59
Índice de C.B.R	4.20	3.59	3.62

Fig. 16 Resultados Ensayo CBR para Suelo estabilizado con Rocamix y energía estándar





Curva esfuerzo-deformación para el suelo estabilizado con Rocamix y energía del modificado.

<b>Muestra</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Índice de C.B.R (2.54)</b>	5.51	6.23	4.93
<b>Índice de C.B.R (5.08)</b>	5.36	5.92	4.80
<b>Índice de C.B.R</b>	5.51	6.23	4.93

Fig. 17 Resultados Ensayo CBR para Suelo estabilizado con Rocamix y energía del modificado

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 en el caso de la Estabilización del Modificado este suelo arcillosos de baja capacidad portante como Natural, llega a alcanzar un CBR, que le permite su empleo como Subrasante para carreteras.

### 1.2.2. Resultados del Ensayo de Ascensión Capilar del Suelo de la Formación Vía Blanca estabilizado con el Sistema Rocamix.

a) Resultados de los Ensayos de Ascenso Capilar en muestras de suelo preparadas con el miniproctor y compactadas con energía estándar.

<b>Tiempo (hora)</b>	<b>Valores de la ascensión capilar de las muestras ( medida por peso en gramos)</b>					
	<b>Muestras con curado de 7 días</b>		<b>Muestras con curado de 14 días</b>		<b>Muestras con curado de 28 días</b>	
	Muestra 1 s/a	Muestra 2 c/a ROCAMIX líquido	Muestra 3 s/a	Muestra 4 c/a ROCAMIX líquido	Muestra 5 s/a	Muestra 6 c/a ROCAMIX líquido
<b>1</b>	188,25	146,41	168,52	146,60	160,04	145,93
<b>2</b>	188,25	146,47	174,03	146,62	161,98	146,01
<b>3</b>	188,25	146,51	174,03	146,65	162,30	146,21
<b>4</b>	188,25	146,62	174,03	146,67	162,57	146,87
<b>5</b>	188,25	146,74	174,03	146,70	162,60	146,91
<b>6</b>	188,25	146,84	174,03	146,79	164,42	147,02
<b>7</b>	188,25	147,18	174,03	146,83	169,44	147,17
<b>8</b>	188,25	147,51	174,03	147,18	170,27	147,31
<b>24</b>	188,25	152,54	174,03	152,18	170,27	147,62

Tabla 6. Resultados de la ascensión capilar de las muestras de suelo con energía estándar

Las Muestras confeccionadas con el miniproctor aplicando la energía Proctor Estándar que no contienen aditivo se saturan inmediatamente y se derrumban ofreciendo insignificante diferencia en cuanto al curado pues colapsan finalmente, observar que todas las muestras con aditivo ofrecen una mayor resistencia a la capilaridad pues pesan menos.

b) Resultados de los Ensayos de Ascenso Capilar en muestras de suelo preparadas con el miniproctor y compactadas con energía del proctor modificado.

Tiempo (min)	Valores de la ascensión capilar de las muestras ( medida por peso en gramos)					
	Muestras con curado de 7 días		Muestras con curado de 14 días		Muestras con curado de 28 días	
	Muestra 1 s/a	Muestra 2 c/a ROCAMIX líquido	Muestra 3 s/a	Muestra 4 c/a ROCAMIX líquido	Muestra 5 s/a	Muestra 6 c/a ROCAMIX líquido
1	167,12	167,79	167,97	165,48	146,08	166,10
2	167,38	168,17	168,53	165,98	149,69	166,23
3	167,64	168,23	168,70	166,05	151,22	166,33
4	167,71	168,34	168,80	166,25	151,93	166,65
5	167,75	168,47	168,97	166,61	152,24	166,84
6	167,88	168,66	170,28	166,86	152,31	167,16
7	168,79	168,93	171,37	167,13	152,38	167,34
8	170,26	169,25	172,37	167,60	152,63	167,64
24	178,58	174,79	179,22	174,09	153,35	168,12

Tabla 7. Resultados de la ascensión capilar de las muestras de suelo con energía proctor modificado

Se puede observar que las muestras con aditivo absorben menos agua que las muestras sin aditivos, observe que en el caso la muestra curada a 28 días los resultados indican que a medida que el curado es mayor en tiempo las muestras absorben menos agua y que con la adición del producto dicha pendiente va disminuyendo pues las muestras con más tiempo de curado ofrecen mayor resistencia a la ascensión capilar.

1.2.3. Resultados del Ensayo de Compresión Simple de un Suelo de la Formación Vía Blanca Estabilizado con el Sistema Rocamix.

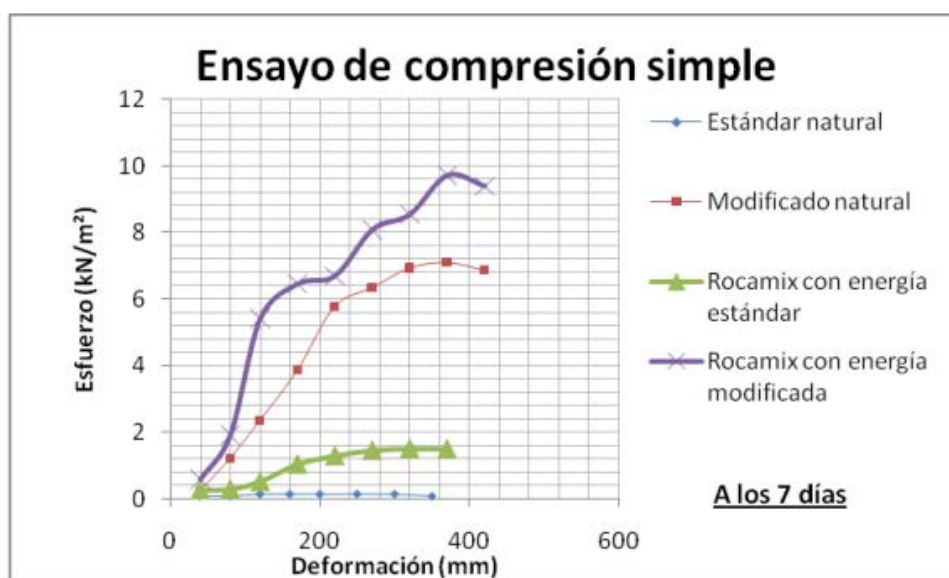


Fig. 18 Resultados del ensayo de compresión simple sin y con aditivo para 7 días de curado.

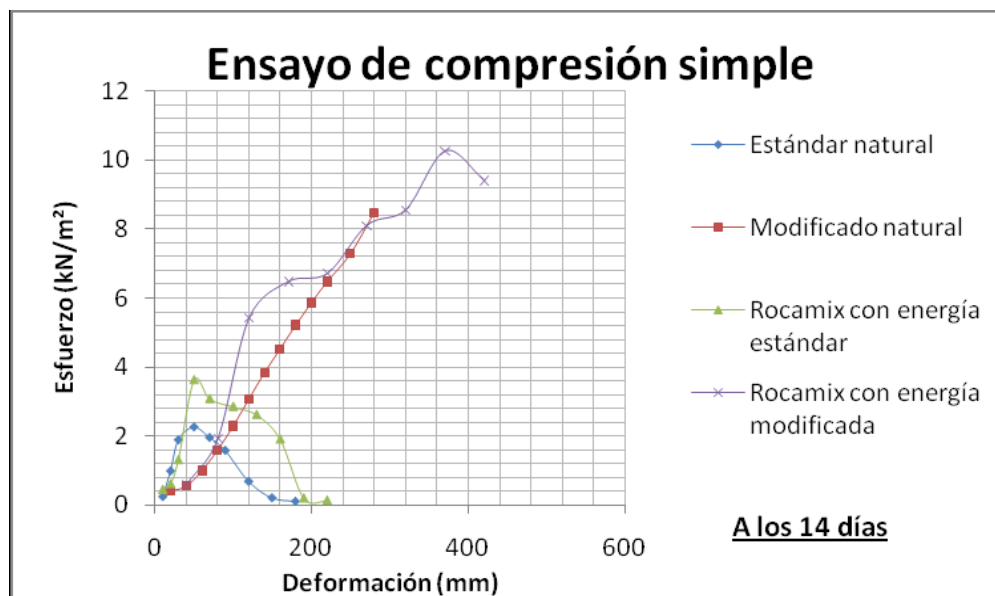


Fig. 19 Resultados del ensayo de compresión simple sin y con aditivo para 14 días de curado.

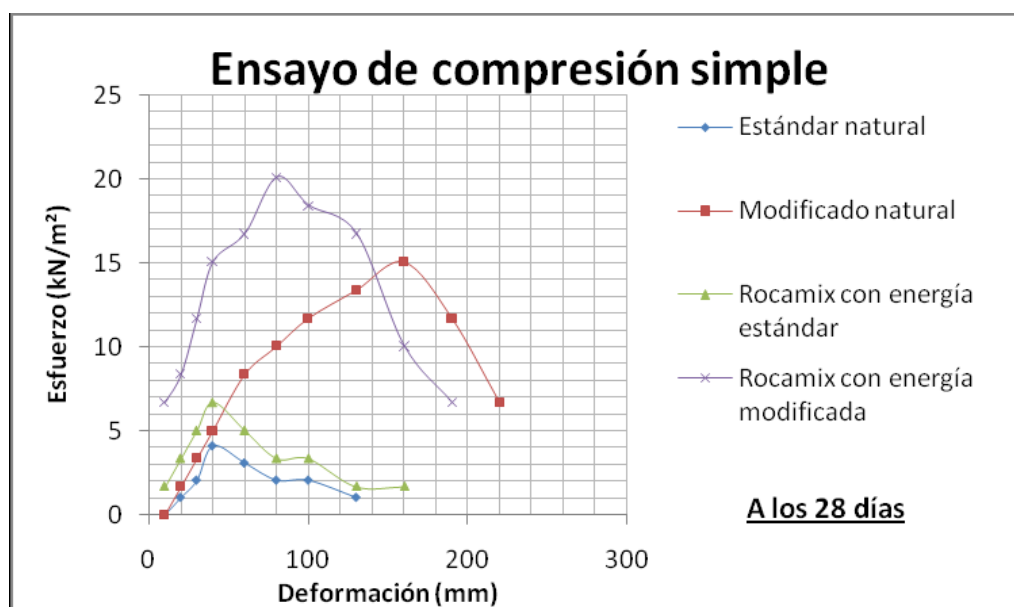


Fig. 20 Resultados del ensayo de compresión simple sin y con aditivo para 28 días de curado.

Estos resultados muestran que a medida que adicionamos el aditivo Rocamix líquido el suelo aumenta su resistencia a la compresión axial y que además se hace significativo en la diferencia de energías de compactación de la muestra, se concluye entonces:

- a) En todas las muestras se observa aumento de la resistencia a compresión axial con la adición del producto Rocamix líquido.
- b) Los valores de resistencia al esfuerzo axial aumenta de 0.5 kN/m<sup>2</sup> a 3.8 kN/m<sup>2</sup> de 7 a 14 días de curado y hasta 7.0 kN/m<sup>2</sup> a los 28 días de curado para la energía estándar de confección de las muestras con aditivo.

c) Los valores de resistencia al esfuerzo axial aumenta de 9.5 kN/m<sup>2</sup> a 10.5 kN/m<sup>2</sup> de 7 a 14 días de curado y hasta 20kN/m<sup>2</sup> a los 28 días de curado para la energía modificado de confección de las muestras con aditivo.

d) Las resistencias aumentan con la adición del producto entre 1.0 kN/m<sup>2</sup> y 2.0 kN/m<sup>2</sup> para la energía estándar y entre 3.0 kN/m<sup>2</sup> y 5.0 kN/m<sup>2</sup> para la energía modificado, el aumento es más apreciable para el caso de curado de 28 días.

#### **1.2.4. Conclusiones Suelo Formación Vía Blanca**

El suelo objeto de estudio después de ser debidamente examinado mediante los ensayos de Granulometría e hidrómetro e índices de plasticidad clasifica como un: **SUCS Arcilla de alta compresibilidad (CH) AASHO A-7-6 (20) Arcilla de alta compresibilidad y alto cambio de volumen** Por lo que le corresponde una dosificación correspondiente al manual de 2% de cemento + 14.8ml del producto ROCAMIX para 1.0 kg de suelo a estabilizar. 2. El parámetro CBR aumenta significativamente con la adición del producto y con el aumento de energía de compactación con que se confeccionan las muestras. Este parámetro es de gran importancia para el diseño de carreteras pues en los proyectos de confección de bases, subbases y subrasantes es una de las condicionantes de diseño más importante a medir. 3. De forma general las mejoras en las propiedades del suelo con respecto a su ascensión capilar de un suelo estabilizado con Sistema **ROCAMIX Líquido** se evidencia en la disminución del nivel de ascensión capilar que en este caso fue medido por peso de las probetas. A medida que la muestra se realiza con mayor energía de compactación menos asciende el agua, la adición del producto demuestra que existe menos posibilidad de ascensión capilar y el aumento del tiempo de curado demuestra este efecto pero en menos medida. 4. Aumenta considerablemente la resistencia a la compresión axial con la presencia del aditivo, es más significativo en este parámetro el aumento del tiempo de curado de 7, 14 a 28 días e igualmente asciende la resistencia con el aumento de la energía de compactación.

#### **Conclusiones:**

De los estudios y análisis realizados podemos afirmar que es factible el empleo del Sistema de Estabilización e Impermeabilización de suelos creado a partir de sales cuaternarias de amonio en la estabilización de suelos que serán utilizados en la conformación del paquete estructural de un pavimento flexible. Se demuestra su efectivo poder en el sustancial mejoramiento de las propiedades de resistencia y permeabilidad de los suelos finos-arcillosos, que por lo general son considerados suelos no aptos para la construcción de pavimentos flexibles y rígidos.

Los procesos constructivos y de mantenimiento de pavimentos utilizando el sistema propuesto no requieren de equipos especiales. Hemos podido obtener en este estudio, que su empleo en dos tipos de suelos diferentes permite obtener parámetros de capacidad soportante que satisfacen su empleo como subrasante de carreteras según las Normas españolas, cubanas e incluso la AASHTO. Incluso queda demostrado que su empleo reduce la Permeabilidad del suelo, lo cual es muy ventajoso en la ejecución de obras viales, ya que con ello podemos asegurar que los costos de mantenimiento futuros serán menores. Hay que añadir que esta Tecnología, contribuye a lograr potenciar la protección del medio ambiente, en momentos en que la exigencia mundial en este sentido es cada vez mayor debido a que reduce la necesidad de utilización de fuentes de préstamos que obligan a realizar movimientos de tierras voluminosos que por demás hacen que el consumo de combustibles aumente y con el los costos lógicamente.

Este trabajo que presentamos forma parte integrante de un Proyecto de Investigación que se desarrolla en Cuba, con vistas a consolidar el concepto de las ventajas de esta técnica de Estabilización química de suelos, como parte de los esfuerzos que hoy se realizan en función de la Protección del Medio ambiente y la necesidad de reducir los costos de las inversiones, más aún a partir de la reducción del consumo de combustibles fósiles.

### **Bibliografía:**

- BERRY, P. & REID, D. (1993). **Mecánica de suelos**. Santa Fé de Bogotá. Mcgraw-Hill.
- BRAJA M. DAS, **Principios de Ingeniería Geotécnica**. 3ra Edición. Universidad del Sur de Illinois y Carbondale. PWS Publishing Company
- CRESPO, C. (1998). **Vías de comunicación**. México D.F., Limusa.
- CRESPO, C. (1998). **Mecánica de suelos y cimentaciones**. México D.F., Limusa.
- 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.
- FERNÁNDEZ, C. (1982). **Mejoramiento y Estabilización de suelos**. México, D.F. Limusa.
- 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.
- HURTADO P. DANIEL (1999). **Ingeniería de Transporte II**. Santa Cruz-Bolivia. UPSA.
- JEUFFROY, G. (1977) **Proyecto y Construcción de Carreteras**. Editorial Científico Técnica, La Habana.
- JUAREZ, E. - RICO, A. (1997). **Mecánica de suelos**, T1. México D.F., Limusa.
- JUAREZ, E. - RICO, A. (1997). **Mecánica de suelos**, T2. México D.F., Limusa.
- JUSTINIANO PERALTA J.L. (2000). **Metodología de evaluación y mantenimiento de pavimentos flexibles**. Santa Cruz. UPSA.
- LARSON THOMAS D. (1996). **Cemento Pórtland y Concretos Asfálticos**. México D.F., Cía. Editorial Continental, S.A.
- RICO, A. - DEL CASTILLO, H. (1999). **La ingeniería de suelos en las vías terrestres, T1**. México, D.F. Limusa.
- RICO, A. - DEL CASTILLO, H. (1999). **La ingeniería de suelos en las vías terrestres, T2**. México D.F., Limusa.
- SOWERS GEORGE B. & SOWERS GEORGE F. (1978). **Introducción a la Mecánica de Suelos y Cimentaciones**. México D.F., Limusa.
- TERZAGHI, K. - B. PECK, R. (1973). **Mecánica de suelos en la ingeniería práctica**. Barcelona. El Ateneo.
- VALLE RODAS, R. **Carreteras, Calles y Aeropistas**. Buenos Aires, Argentina. El Ateneo.
- VIVAR ROMERO, G. (1995). **Diseño y Construcción de pavimentos**. Lima. Colegio de Ingenieros del Perú.