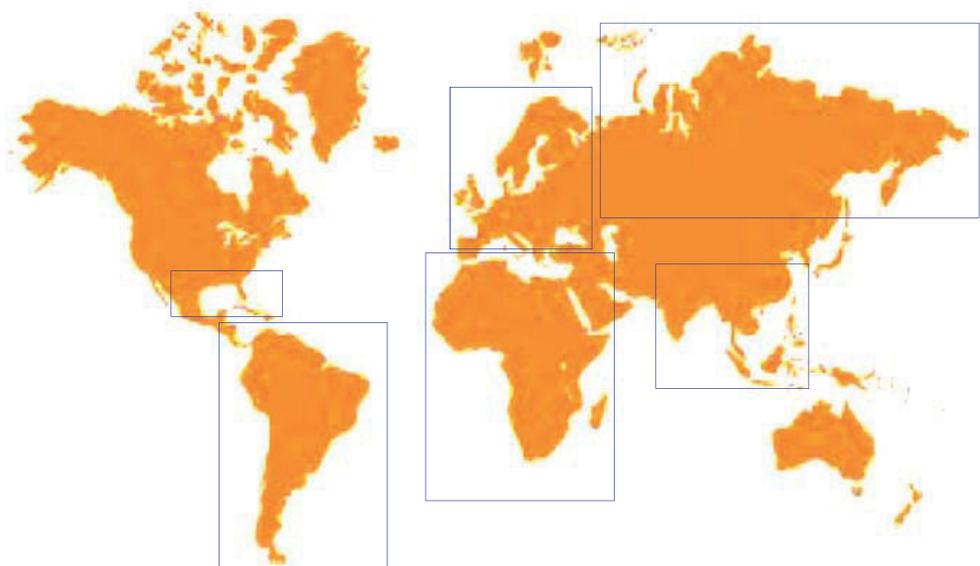




**stabilisation et imperméabilisation**  
**pour tous types de sols dans le monde**  
**Explications scientifiques**





# Sommaire

**1**

**Étude théorique  
des effets chimiques des  
SELS QUATERNAIRES avec ADDITIFS\*  
pour stabiliser les sols argileux**

Professeur MSc ingénieur Juan Mario Junco del  
Pino Docteur ingénieur Eduardo Tejeda Pieuuseaut

**2**

**Publication de la  
CONVENTION SCIENTIFIQUE  
d'ingénierie et d'architecture**

Université CUJAE La Havane 2010

**(\*) ROCAMIX®**

# 1

## ETUDE THÉORIQUE DES EFFETS CHIMIQUES DES SELS QUATERNAIRES AVEC ADDITIFS\* POUR STABILISER LES SOLS ARGILEUX

Par : Professeur MSc ingénieur Juan Mario Junco del Pino  
Docteur ingénieur Eduardo Tejeda Piusseaut Facultad de Ingeniería Civil, ISPJAE. Cuba



J. M. junco del Pino.

La stabilité chimique est l'une des techniques employée pour l'amélioration du sol, en utilisant des produits chimiques modifiant ses caractéristiques.

Nous avons pu ainsi développer une recherche sur la création d'une méthode de stabilisation du sol à l'aide de sels d'ammonium quaternaire et d'additifs actifs, dont le nom est Système Rocamix®.

Les principales qualités recherchées sont la recherche d'une méthode économique, une simplicité d'utilisation, une résistance supérieure et une très efficace réduction de la perméabilité du sol.

Ce document synthétique présente la manière dont les changements se produisent dans les sols avec l'emploi des sels quaternaires et d'additifs actifs. Ainsi que le fonctionnement des modifications des propriétés physiques et mécaniques, comparés aux propriétés du sol dans son état naturel, et l'influence de l'énergie de compactage et de l'évolution des caractéristiques dans le temps du sol stabilisé.

(\*) **ROCAMIX®**

## Stabilisation chimique pour l'amélioration des sols

La stabilisation des sols est ainsi appelée pour traiter les sols naturels soumis à certains traitements pour obtenir de meilleures qualités, afin qu'ils puissent résister à des conditions météorologiques défavorables : ce qui donne par tous temps le bon service que l'on attend d'eux. (Crespo, 1998: 325).

Les procédures de stabilisation sont généralement constituées de mélanges de sols de caractéristiques différentes et d'autres additifs : leur compactage par des moyens mécaniques ; l'utilisation de membranes d'étanchéité ; des moyens électriques, entre autres. La stabilisation des sols a pour principal objectif d'augmenter la résistance, de réduire la plasticité, de diminuer la perméabilité et, si possible, de réduire les variations volumétriques (enfouissement ou expansion).

Sur les sols formant les chemins et les routes, la stabilisation vise à utiliser les sols naturels du lieu ayant une faible résistance, donc impropres pour la construction. Pour les améliorer d'une manière économique, il existe actuellement diverses procédures ou méthodes de stabilisation : stabilisation par des moyens mécaniques ; stabilisation par la réalisation de drainage ; stabilisation par des moyens électriques ; stabilisation par l'utilisation de chaleur et d'inflammation ; la stabilisation chimique ou ajout d'agents stabilisants.

La stabilisation chimique des sols est l'utilisation de produits chimiques pour améliorer les propriétés mécaniques des sols, la réduction de leur plasticité résistante à l'action du trafic et des conditions environnementales. En général, l'utilisation d'additifs chimiques dans le sol de fondation augmente la capacité de support des charges sans déformation. Pour les routes du sol : de réduire la perte de matière sur la surface et la déformation, et de réduire l'érosion causée par la circulation ou de fortes pluies.

Il est important à l'ingénieur de connaître les différentes options pour la stabilisation du sol par des moyens chimiques, car chacun d'entre eux est efficace pour certains types de sols.

Dans la conception de stabilisation du sol avec des produits chimiques, des agents stabilisateurs doivent prendre en compte les variations à atteindre pour la stabilité volumétrique, la résistance mécanique, la perméabilité, la durabilité et la compressibilité.

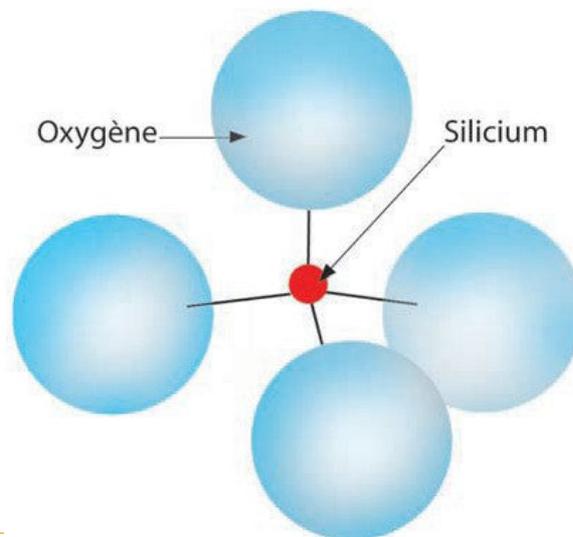
Les procédures de stabilisation chimique des sols connues et utilisées sont les suivants: sol-ciment, de chaux-sol, des sels de stabilisation du sol asphalté; stabilisation de polymères, d'enzymes et d'autres composés résineux. Chacune de ces procédures poursuit des objectifs différents et offre des modifications à chaque étage.

Poussé par le développement technologique de l'industrie chimique, divers additifs ont émergés afin d'améliorer les propriétés mécaniques des sols par l'utilisation de divers produits, tels que: CBR plus, RoadPacker Plus, Base - Seal, Minedur, Consolid, Permazyme, ISS 2000, Claycrete, et autres.

## Brève caractérisation des sols argileux

Les argiles sont constituées essentiellement de silicates d'aluminium hydratés et dans certains cas, présentent également, des silicates de magnésium, de fer ou d'autres métaux, hydratés eux aussi. Ces minéraux ont presque toujours une structure cristalline définie, dont les atomes sont structurés en lames. Il existe deux variétés de ces lames: la siliceuse et l'aluminique.

La première de ces feuilles est formée par un atome de silicium entouré de quatre d'oxygène, à positionner en forme de tétraèdre, comme représenté sur la figure 1. Ces tétraèdres s'agroupent en unités hexagonales, en utilisant un atome d'oxygène servant de lien entre chaque tétraèdre.



Un schéma d'une unité hexagonale est montré sur la figure 2. Ces unités hexagonales répétées indéfiniment, constituent un réseau laminaire.

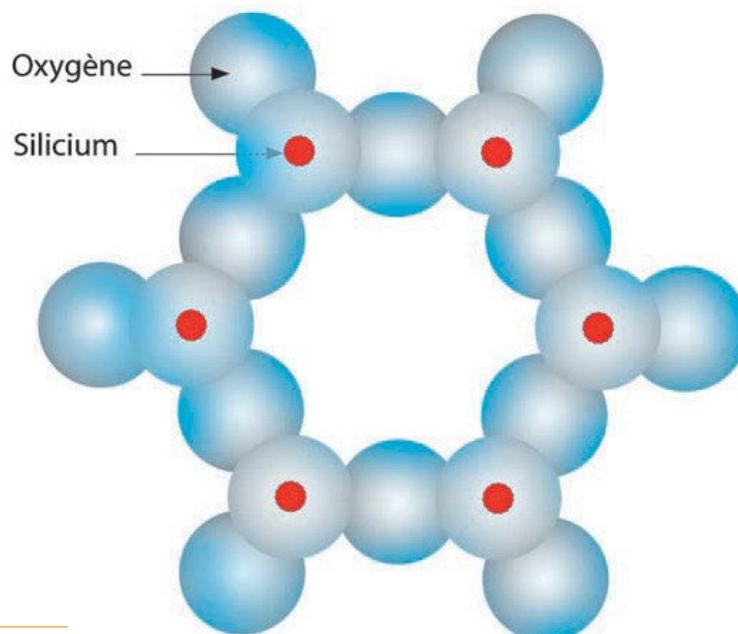


Figure 2

Les lames aluminiques sont formées par un treillis d'octaèdres disposés avec un atome d'aluminium au centre et six d'oxygène autour, comme le montre la figure 3. Aussi c'est maintenant l'oxygène qui fait le lien entre chaque octaèdre voisin formant ainsi la grille.

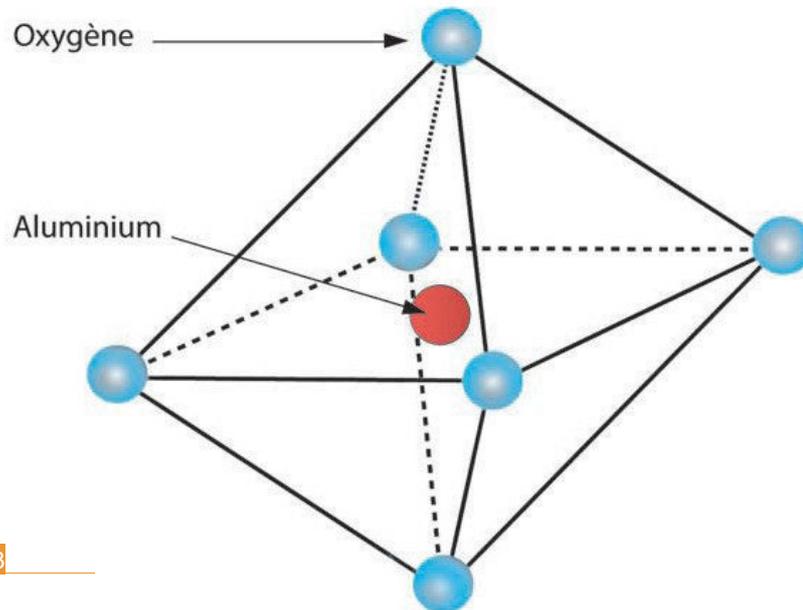


Figure 3

Selon leur structure, les minéraux argileux sont classés en trois groupes : kaolinites, montmorillonites et illites. Afin de mieux comprendre la réponse des sols fins à la stabilisation il est important de connaître les aspects physiques et chimiques de ces derniers. En général, on considère que les particules d'argile ont une taille d'environ 2 microns ou moins et présentent une importante activité électrique, qui régit son comportement en raison de sa grande surface par rapport à son volume et sa masse. L'une des théories développées les plus acceptées pour expliquer la structure interne des argiles est celle qui mentionne que la surface de chaque particule de sol possède une charge électrique négative. L'intensité de la charge dépend de la structure et de la composition de l'argile. La particule attire les ions positifs de l'eau ( $H^+$ ) et des cations de différents éléments chimiques, tels que  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $Al^{+++}$ ,  $Fe^{+++}$ , etc... Le fait est que chaque particule individuelle de l'argile est entourée d'une manière définie et reliée à sa structure (eau adsorbée).

Les molécules d'eau sont polarisées, c'est à dire qu'elles ne correspondent plus aux centres de gravité de leurs charges positives et négatives, mais fonctionnent comme des petits dipôles permanents ; par liaison à la particule par sa charge (+), le pôle de charge (-) est en mesure d'agir comme une source d'attraction positive pour d'autres cations. Les propres cations attirent les molécules d'eau à travers la polarisation de celles-ci, de sorte que chaque cation peut avoir un volume d'eau autour de lui. L'eau adsorbée par chaque cation augmente avec sa charge électrique et avec son rayon ionique (Peck, RB, Hanson, WE et Thornburn, TH 1957).

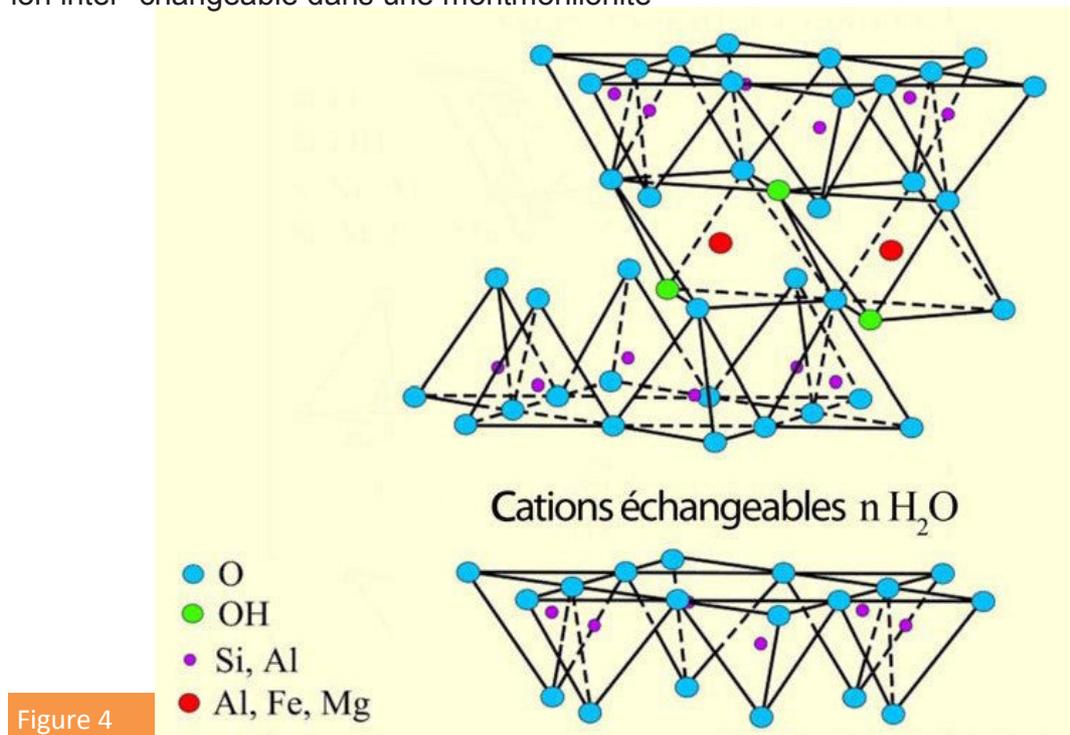
Par conséquent, quand les particules du sol attirent les cations la pellicule d'eau liée à la particule se renforce.

L'épaisseur de la pellicule d'eau absorbée par les cristaux du sol est fonction non seulement de la nature de celui-ci, mais aussi du type de cations attirés.

Les cristaux d'argile peuvent modifier les cations absorbés sur leur surface de pellicule. Par exemple, une argile hydrogénée (cations  $H^+$ ) peut se transformer en sodium, si se réalise une circulation à travers sa masse d'eau contenant des sels de sodium dissous. En réalité ce qui se passe c'est un échange de cations entre l'eau et les pellicules absorbées par les particules minérales, parfois en réaction très rapide. Les cations interchangeables les plus courants sont  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $H^+$  et  $(NH_4)^+$ .

Comprendre correctement les propriétés de l'argile et de l'eau, et les forces d'attraction entre elles qui résultent de la « double couche diffuse » de l'eau entourant les particules d'argile est essentiel pour bien déchiffrer la façon de travailler afin de stabiliser les sols argileux ou gravo-argileux. Les molécules d'eau sont dipôles, ce qui signifie qu'elles ont un pôle négatif à une extrémité, là où est l'oxygène, et un pôle positif où se trouve l'hydrogène, donc chaque molécule d'eau agit comme un aimant, qui peut s'aligner avec les forces ou les champs électromagnétiques. C'est cette propriété qui donne la tension superficielle de l'eau. C'est aussi cette propriété qui permet à l'eau d'être électrostatiquement attirée par les charges de surface des particules d'argile. Dans certaines argiles la pression atteinte par l'attraction électrostatique entre l'eau et l'argile peut atteindre des valeurs de plus de 10 000 atmosphères. C'est l'une des raisons pour lesquelles l'expansion de certaines argiles peut soulever des bâtiments et les pousser hors de leurs fondations et aussi la raison pour laquelle l'humidité et le séchage des couches de forme sous les routes peuvent être à l'origine de nombreuses déformations.

Dans le graphique ci-dessous (figure 4) vous pouvez voir la particularité d'un ion interchangeable dans une montmorillonite



1

2

## Influence des molécules organiques absorbées

Gieseeking a indiqué que les argiles montmorillonites perdent leur tendance à gonfler par absorption d'eau jusqu'à saturation avec une variété de cations organiques. Ces cations sont absorbés sur la surface de base de la montmorillonite. Hendricks démontre que la quantité d'eau absorbée par la montmorillonite en faisant glisser certains ions d'ammine absorbés fait que la différence entre la surface de base et la partie probable de cette zone couverte par des ions amine est minime. Il note également que la réduction de l'eau absorbée n'est pas exactement en corrélation avec la taille de l'ion organique, parce que la forme de l'ion organique peut être telle que la configuration peut détruire les molécules d'eau dans les couches de l'eau absorbée.

1

3

## Influence des cations échangeables dans les argiles

Les ions absorbés à la surface des minéraux argileux peuvent affecter l'eau absorbée de plusieurs manières :

- un cation peut servir de liaison pour maintenir les particules minérales de l'argile unies ou pour limiter la distance à laquelle elles peuvent être séparées,
- l'ion d'ammonium a une forte tendance à maintenir unis les minéraux argileux, en raison de leur taille et de nombre de coordination de réseau qui permet de se figer avec le réseau de l'oxygène à la surface des trois couches des minéraux argileux. La taille des cations absorbés et leurs tendances à s'hydrater peuvent influencer sur l'ordre naturel de toutes les molécules d'eau et de l'épaisseur à laquelle l'orientation peut être développée.

En fonction de la répartition des charges sur les molécules d'eau on peut s'attendre à ce que les ions chargés dans des solutions ioniques attirent les molécules d'eau par voie électrostatique.

Exemple de ceci : l'épaisseur des couches d'eau entre les unités de silicate dépend de la nature des cations interchangeable. Les expériences de Mering, avec de la montmorillonite en présence de grandes quantités d'eau suggèrent que certains cations absorbés, par exemple  $\text{Na}^+$ , séparent complètement les couches, mais avec d'autres cations tels que  $\text{Ca}^+$ ,  $\text{H}^+$  et les cations organiques, la séparation n'est pas complète. Voir figure 5

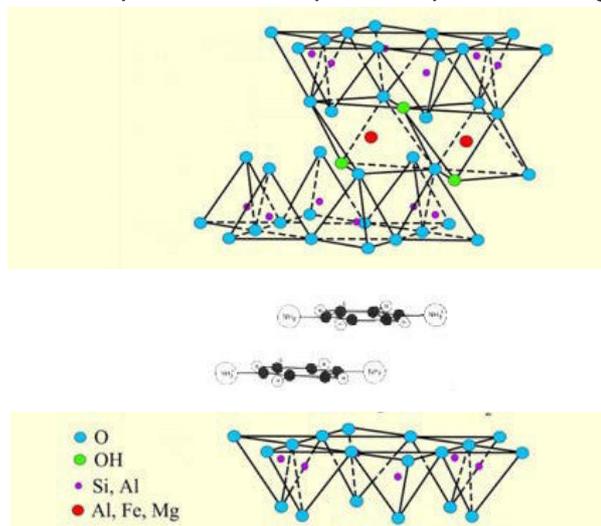


Figure 5

1

3  
suite

Dans le tableau 1 ci-dessous on peut voir la capacité déterminée d'échange des cations de la montmorillonite avec certains cations organiques. Ceci est important car il montre à quelle hauteur il est avant l'échange avec les CAQ (sels d'ammonium quaternaire).

**DÉTERMINATION DE LA CAPACITÉ D'ÉCHANGE CATIONIQUE D'UNE MONTMORILLONITE AVEC CERTAINS CATIONS ORGANIQUES (Hewdricks)**

| Base                 | Capacité d'échange cationique (meq/100g) |
|----------------------|------------------------------------------|
| Benzidine            | 91                                       |
| Aminodiméthylaniline | 90                                       |
| Phénylènediamine     | 86                                       |
| Naphtylamine         | 85                                       |
| Diaminofluorene      | 95                                       |
| Piperidine           | 90                                       |
| Baryum               | 90 - 94                                  |

Tableau 1

1

4

## Caractérisation et rôle des sels quaternaires dans le processus de stabilisation

Les composés quaternaires (QAC) d'ammonium sont des composés organiques contenant quatre groupes fonctionnels liés par covalence à un atome central ( $R_4N^+$ ) d'azote. Ces groupes fonctionnels (R) comprennent au moins une longue chaîne alkyle et les autres sont en alternance, groupe méthyle ou groupe benzyle. Les CAQ sont parmi les productions de produits chimiques à haut volume (HPV). Les CAQ ont des propriétés d'activation de surface caractéristiques de conformation propre, détergentes et des propriétés antimicrobiennes. Ces propriétés physico-chimiques uniques des CAQ ont donné lieu à une variété d'applications et un haut niveau de popularité dans les applications domestiques et industrielles tels que des agents tensioactifs, des émulsifiants, des adoucissants, des désinfectants, des pesticides et d'inhibiteurs de corrosion, entre autres.

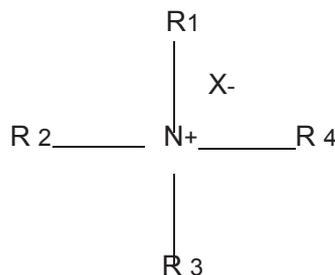


Figure 6 Structure moléculaire générale d'un QAC (R représente un groupe fonctionnel, X représente un ion négatif comme Cl<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup> ou NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)

1

5

## Influence de surfactant ionique dans le comportement des argiles

La présence d'agents tensioactifs augmente la viscosité plastique et le niveau d'intensité de champ électrique au niveau ionique. Cela démontre que le tensio-actif polarisé, groupe de tête, ancre dans la surface de la plaque tétraédrique, laissant la longue

chaîne alcaline en dehors dans les angles. Par conséquent, la chaîne alcaline reçoit les interactions hydrophobes qui facilite l'association entre les plaques et augmente la structure physique dans la suspension.

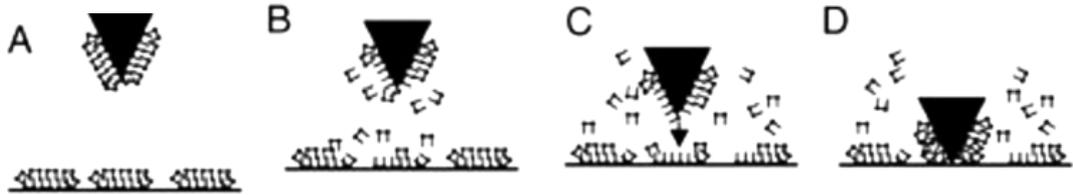


Figure 7

Les différences entre les groupes stéréochimiques polaires peuvent conduire à des différences dans le mode associé à la plaque tétraédrique et peut influencer sur le dernier effet du comportement rhéologique. Il existe une interaction significative entre ces tensio-actifs et les argiles montmorillonites. Ces changements rhéologiques qui se produisent, peuvent affecter les doses à utiliser dans le processus de stabilisation. Plusieurs études ont démontré l'effet de la confrontation entre les plaques de tensioactifs ioniques dans le comportement des argiles de type montmorillonite.

Les argiles montmorillonites se caractérisent par une alternance de couches tétraédriques de silice avec octaédriques d'aluminium coordonnés avec atomes d'oxygène. La substitution isomorphe de  $Al^{3+}$  par  $Si^{4+}$  dans la couche tétraédrique et  $Mg^{2+}$ , ou  $Zn^{2+}$  par  $Al^{3+}$  dans les couches octaédriques résulte en une charge de surface négative nette sur ces argiles. Ces charges non équilibrées sont équilibrées par les cations interchangeables (généralement  $Na^{+}$  ou  $Ca^{2+}$ ) sur la surface de l'argile. Les couches structurales des argiles permettent une expansion (gonflement) après humidification. Ces facteurs, en combinaison avec la petite taille de ses particules, font que la montmorillonite présente une capacité d'échange cationique très élevée par rapport aux autres sols naturels

En milieu aqueux, les cations ammonium quaternaire peuvent être maintenu par les deux surfaces : l'extérieure et les couches intermédiaires, d'une argile expansive, par un procédé d'échange cationique. Ils ne sont pas facilement déplacés par les cations plus petits tels que  $H^{+}$ ,  $Na^{+}$  ou  $Ca^{2+}$ . Les propriétés d'absorption de l'argile transformée peuvent être sensiblement modifiées par cette réaction de substitution.

Les tensioactifs réduisent considérablement la tension superficielle de l'eau, ce qui augmente énormément la capacité de l'eau ionisée pour pénétrer dans le sol. Ceci augmente fortement la capacité du compactage des sols traités avec le Système Rocamix®, car par exemple les particules d'argile sont capables de se déplacer beaucoup plus facilement dans les graves. Dans ces sols traités, la solution ionisée pénètre dans la « double couche diffuse » de l'eau qui entoure les particules d'argile. Cela apporte des ions plus proches de la surface des particules d'argile, remplaçant l'eau de suspension précédemment chargée électrostatiquement, ce qui provoque qu'une grande quantité d'eau, qui préalablement était « fixée », est décrochée et devient eau libre.

Grâce à la puissante action ionisante des CAQ, l'échange ionique est induit à la surface des particules d'argile. Cela signifie qu'une grande partie de l'eau qui est normalement fixée, après l'application, remonte à la surface comme eau libre, et pour cela Rocamix® agit comme un agent déshydratant. En étant capable de libérer préalablement l'eau prisonnière, Rocamix® donne la possibilité aux particules d'argile de se regrouper plus serrées au cours du compactage. Après le traitement, le « coussin » d'eau électrostatiquement uni, qui entoure normalement les particules d'argile et empêche le compactage optimal, est désormais expulsé par le compactage physique, permettant le réalignement des particules d'argile, agissant ainsi comme un support pour un compactage extrêmement plus efficace. Ainsi est créée la possibilité d'un compactage optimal, réduisant les espaces vides et la quantité d'eau dans l'argile.

La maximisation de la compression est réalisée par l'enchevêtrement accru entre les particules d'argile et le résultat de la réorganisation des particules qui maintenant sont fortement liées. Le processus d'échange ionique est permanent, ce qui réduit de façon ininterrompue l'attraction entre l'eau et l'argile, et réduit par conséquent la possibilité de rigidité et de retrait. Cela réduit de façon permanente l'indice de plasticité de l'argile.

# 1

## ETUDE DE CAS DES EFFETS CHIMIQUES DES SELS QUATERNAIRES AVEC ADDITIFS\* POUR STABILISER LES SOLS ARGILEUX

### A ANALYSE DE RESULTATS

#### Étude du sol extrait de la carrière de Mariel

##### 1 Classification du sol

L'étude de laboratoire du sol de la carrière montre que ce matériau a une plasticité élevée. Avec des valeurs moyennes de limite liquide de 41%, de limite plastique de 16,3% et l'indice plastique de 24,7%.

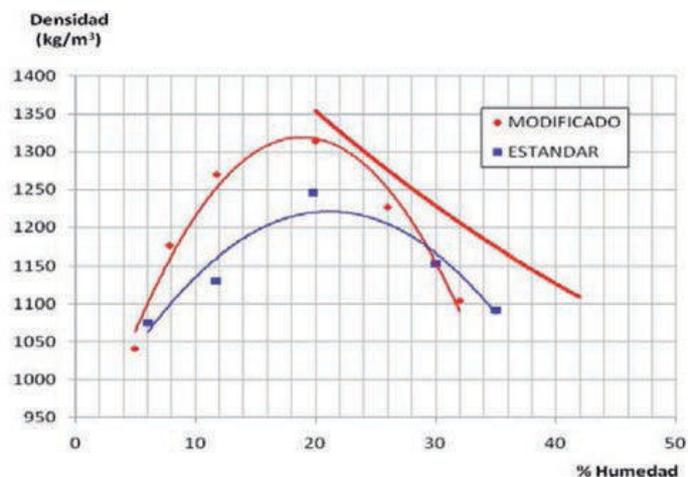
L'analyse granulométrique révèle un pourcentage élevé de particules plus petites que le tamis n° 4, avec un faible pourcentage de matériaux plus fin que le tamis 200 et également de l'argile à haute plasticité.

**Le sol peut être classé comme un A-2-7 (0), sable uniforme avec une gradation discontinue.**

##### 2 Test Proctor

Les tests Proctor, utilisant une énergie normale et modifiée sont présentés ci- dessous figure 8.

Figure 8



##### 3 Essais de CBR

Les tests de CBR ont été réalisés sur des échantillons de sol naturel et de sol traité avec Rocamix en utilisant deux types de compactage : Proctor standard et Proctor modifié.

Les résultats sont présentés dans le tableau 2 et la figure 9. On peut apprécier l'augmentation des valeurs de résistance pour les deux valeurs de compactage.

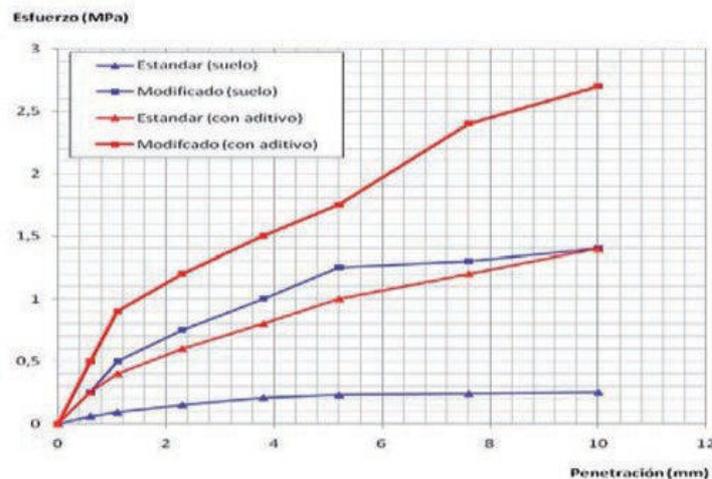
Le sol naturel compacté selon la méthode Proctor standard présente un faible indice CBR taux 1,7%, cependant avec l'application du Proctor modifié le CBR s'élève à 11,4%. Ce sol pourrait être utilisé comme matériau de sous-fondation mais ne serait pas recommandé pour un trafic lourd.

Avec ce même sol traité avec l'additif ROCAMIX et compacté selon le Proctor standard on obtient un CBR de 11,4%.  
Compacté selon le Proctor modifié, le CBR atteint alors 19,9%, une valeur admissible pour le trafic lourd.

Tableau 2

| mm                    | Mpa  | Sol naturel<br>Proctor Standard |     | Sol+Rocamix<br>Proctor Standard |      | Sol naturel<br>Proctor Modifié |      | Sol+Rocamix<br>Proctor Modifié |      |
|-----------------------|------|---------------------------------|-----|---------------------------------|------|--------------------------------|------|--------------------------------|------|
|                       |      | 2,54                            | 6,9 | 1,15                            | 2,2  | 0,7                            | 10,1 | 0,7                            | 10,1 |
| 5,04                  | 10,3 | 0,2                             | 1,9 | 1,2                             | 11,7 | 1,02                           | 9,9  | 1,8                            | 17,5 |
| <b>Valeur Proctor</b> |      | <b>1,7</b>                      |     | <b>11,0</b>                     |      | <b>11,4</b>                    |      | <b>19,9</b>                    |      |

Figure 9



#### 4 Normes

En général, les normes établissent pour les routes 3 différents niveaux de résistance à utiliser en fonction du type de trafic prévu : E1, E2 et E3.

Le **tableau 3** montre les valeurs requises pour ces catégories de sols et valeurs de module dans le cycle de charge, obtenues à partir de l'essai de chargement de plaque (NLT-357).

La plupart des pays établissent aussi trois catégories de terreplein, selon la plate-forme CBR obtenu comme valeur de calcul. Ils sont classés en : accept-able, moyen et bon comme le montre le **tableau 4**.

Tableau 3

| Catégories de terreplein | E1   | E2    | E3    |
|--------------------------|------|-------|-------|
| EV2 (MPa)                | ≥ 60 | ≥ 120 | ≥ 300 |

Tableau4

| Classification de la base | Résistance     |
|---------------------------|----------------|
| Acceptable                | 5% ≤ CBR < 10% |
| Moyen                     | 10% ≤ CBR <    |
| Bon                       | CBR ≥ 15%      |

## 5 Ascension capillaire

On prépare dans un essai pour mesurer la remontée capillaire qui se produit dans les mélanges stabilisés. Il s'agit d'un test simple qui cherche à savoir combien d'eau monte à travers le matériau et le temps qu'ils peuvent rester sous l'influence de l'eau sans pour autant s'effondrer ou de subir d'importantes affectations. Le test est réalisé avec des échantillons de différents temps de séchage : 7, 14 et 28 jours. La **figure 10** montre une vue des résultats, après avoir été soumis à l'action de l'eau pendant 24 heures.

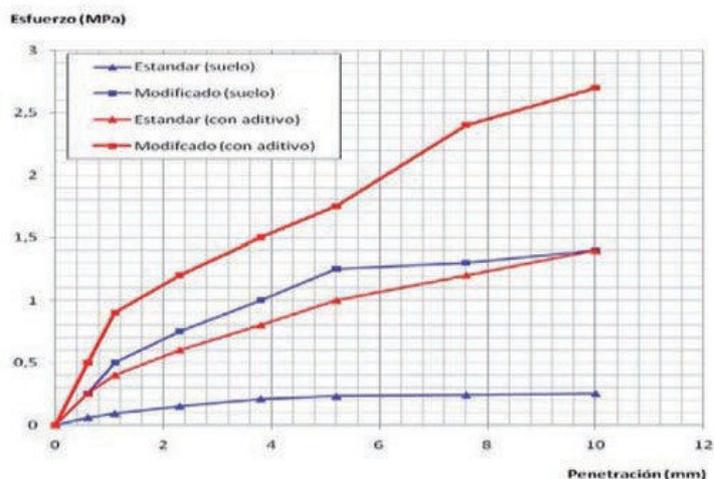


Figure 10

Les échantillons réalisés avec le sol naturel se sont désintégrés au bout de 2 heures, tandis que les échantillons avec contenant l'additif Rocamix résistent à l'influence de l'eau. Ils ont été soumis à l'épreuve après avoir été durci à 7, 14 ou 28 jours, et dans tous les cas leur poids s'est accru par la présence d'humidité, sans se désintégrer.

Il est à noter, cependant, que le temps de séchage a une influence significative, et il est supposé que, bien qu'il y ait remontée capillaire, le durcissement de 7 jours est un délai suffisant pour que les échantillons aient acquis la résistance nécessaire à l'action de l'humidité. La **figure 11** montre l'augmentation de poids des échantillons stabilisés chimiquement qui ont subi le processus d'ascension capillaire. Comme on le voit, la pente de la variation de poids se réduit selon les jours de séchage, ce qui démontre l'importance du temps de durcissement pour améliorer les caractéristiques du mélange.

Figure 11



## 6 Résistance à la compression

Résultats : Analyse des résultats pour le sol de la Gravière La Manuela classé AASHTO comme A-2-7 (0)

Ce sol a amélioré ses propriétés mécaniques de façon significative grâce à l'apport de l'additif Rocamix.

L'étude démontre qu'en plus du mélange obtenu, bien plus solide, la réduction de l'absorption par capillarité est également appréciable. Ainsi le sol est bien plus résistant aux effets destructeurs de l'eau.

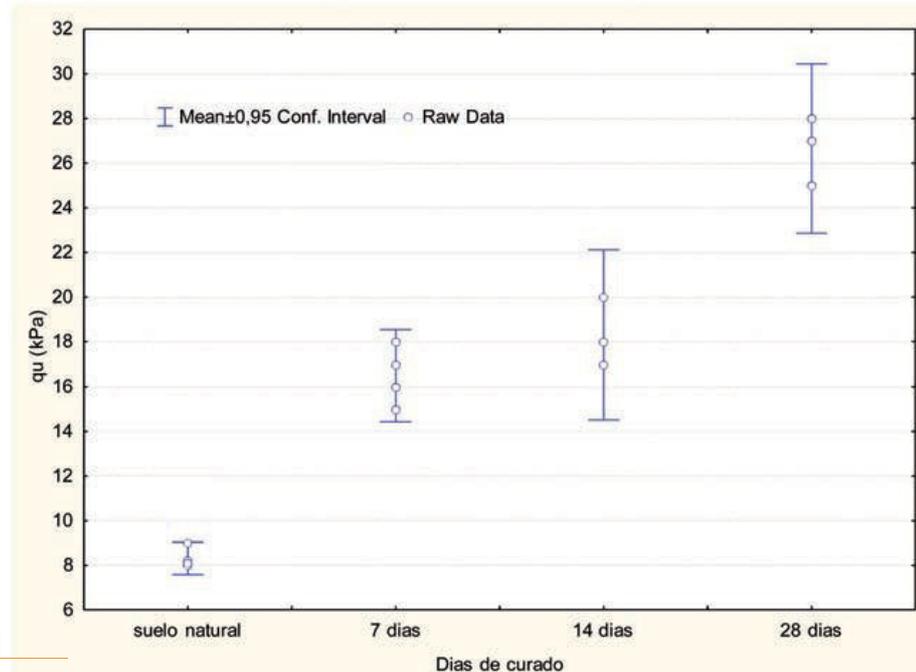


Figure 13

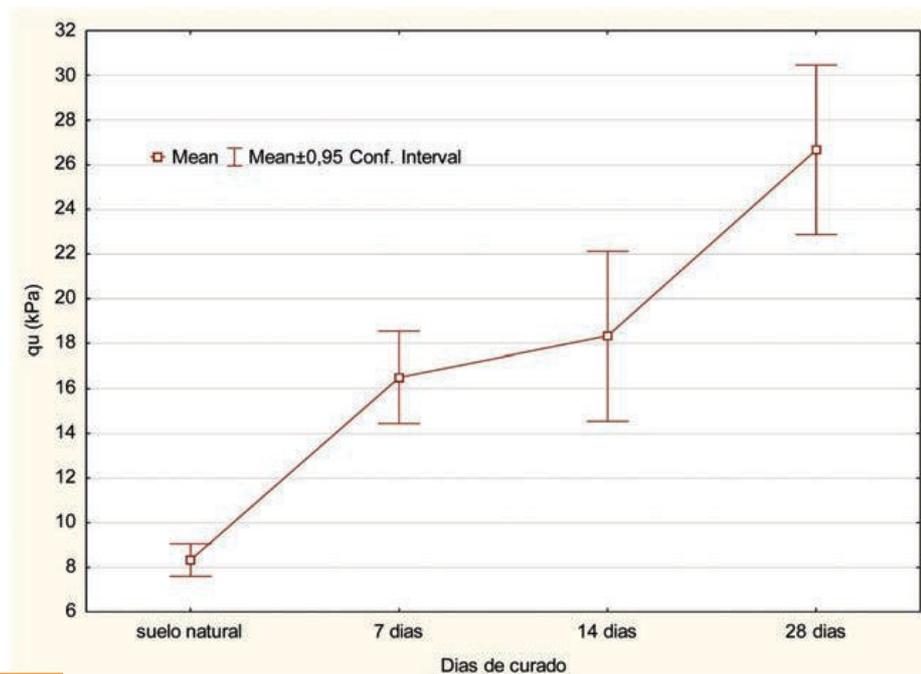


Figure 14

## Étude du sol de la Formation Via Blanca

### 1 Classification du sol

Dans cette autre étude ont été testés les résultats de l'application de Rocamix dans des sols argileux. Pour cela nous avons un sol de la « Formation Via Blanca » qui a une **granulométrie et une plasticité classée A-7-6 (20) suivant le système AASHTO**.

Selon le système SUCS, ce sol avec une argile de compressibilité élevée et une grande variation de volume peut être classé comme un sol CH.

La Limite Liquide (LL) des échantillons testés est en moyenne de 68%, tandis que la Limite de Plasticité (LP) est de 29% pour un Indice de Plasticité (IP) de 39%.

Les résultats des tests d'hydromètre = 0,074 mm, sont présentés dans le **tableau 5**. Comme indiqué précédemment, la teneur en argile du sol est de 25% environ

| Diamètre<br>(mm) | Pourcentage de fines réel % |          |          |         |
|------------------|-----------------------------|----------|----------|---------|
|                  | Témoin 1                    | Témoin 2 | Témoin 3 | Moyenne |
| 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    |

**Tableau 5** Analyse granulométrique des particules mineures au tamis 200. Essai de l'hydromètre.

Pour cette investigation le pourcentage incorporé d'additif Rocamix concentré a été de 0,50 litre/m<sup>3</sup> et pour le ciment 2% du poids du sol.

Nous avons également analysé l'influence de l'énergie du compactage, en utilisant deux énergies différentes, standard et modifiée.

### 2 Essais de CBR

Les **figures 15** et **15.1** montrent les résultats de CBR, pour le terrain naturel, avec l'énergie standard et l'énergie modifiée.

Comme on peut l'observer la résistance du sol est très faible, en dessous des niveaux requis pour former une couche de forme, même en employant le compactage avec une énergie modifiée.

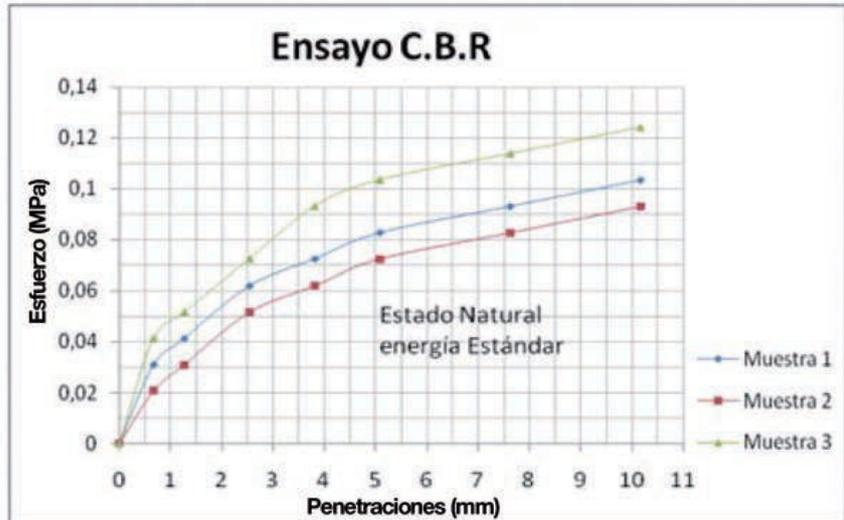
C'est un sol qui ne respecte pas les valeurs fondamentales de matériau de remblai. (Mention standard de remblais).

Les valeurs de CBR avec l'addition de Rocamix peuvent être observées dans les figures 16 et 16.1.

On constate que ces valeurs de CBR ont augmenté jusqu'à obtenir des valeurs acceptables, passant de 1,2% pour le sol naturel, à 5,51% lorsqu'il est stabilisé en utilisant l'énergie modifiée.

Figure 15

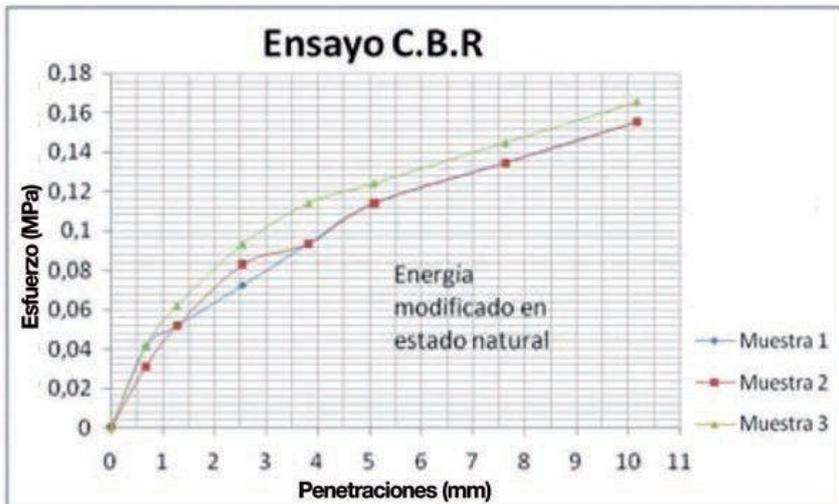
**Essai CBR  
sol naturel  
énergie  
standard**



| Témoin            | 1    | 2    | 3    |
|-------------------|------|------|------|
| Indice CBR (2,54) | 0,87 | 0,43 | 1,01 |
| Indice CBR (5,08) | 0,78 | 0,68 | 0,97 |
| Indice CBR        | 0,87 | 0,68 | 1,01 |

Figure 15.1

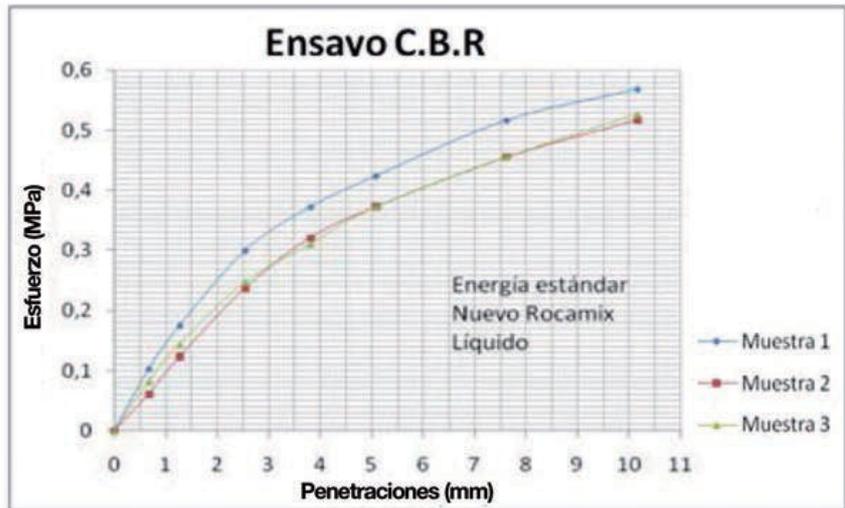
**Essai CBR  
sol naturel  
énergie  
modifiée**



| Témoin            | 1    | 2    | 3    |
|-------------------|------|------|------|
| Indice CBR (2,54) | 1,01 | 1,16 | 1,30 |
| Indice CBR (5,08) | 1,07 | 1,07 | 1,17 |
| Indice CBR        | 1,07 | 1,16 | 1,30 |

Figure 16

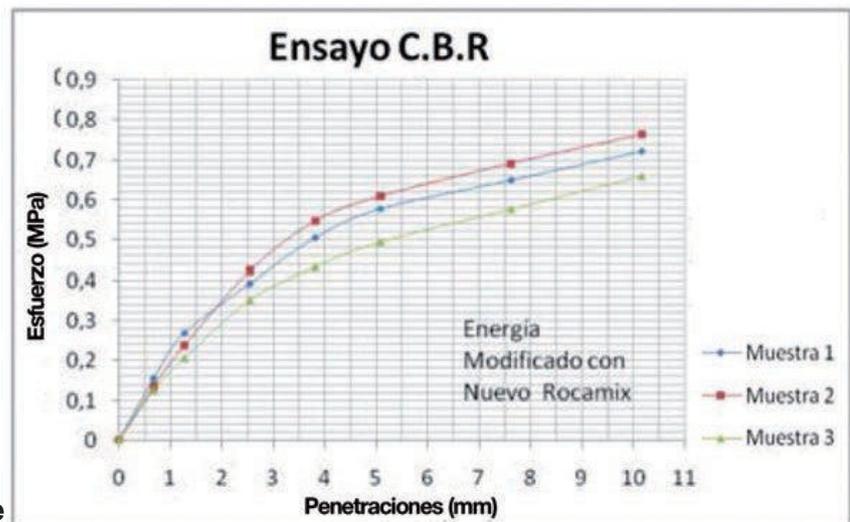
**Essai CBR  
sol Rocamix  
énergie standard**



| Témoin            | 1    | 2    | 3    |
|-------------------|------|------|------|
| Indice CBR (2,54) | 4,20 | 3,48 | 3,62 |
| Indice CBR (5,08) | 4,08 | 3,59 | 3,59 |
| Indice CBR        | 4,20 | 3,59 | 3,62 |

Figure 16.1

**Essai CBR sol  
Rocamix  
énergie modifiée**



| Témoin            | 1    | 2    | 3    |
|-------------------|------|------|------|
| Indice CBR (2,54) | 5,51 | 6,23 | 4,93 |
| Indice CBR (5,08) | 5,36 | 5,92 | 4,80 |
| Indice CBR        | 5,51 | 6,23 | 4,93 |

On peut constater que l'ajout de Rocamix dans ce sol augmente sa résistance de manière appréciable et que comme cela se passe dans d'autres systèmes de stabilisation, l'énergie appliquée favorise ces résultats. On observe également que ces sols argileux a très faible capacité portante au naturel atteignent, avec la stabilisation avec énergie modifiée, un CBR qui per- met leur utilisation comme sous-base ou base pour les routes.

### 3 Ascension capillaire

Résultats des tests d'ascension capillaire sur des échantillons de sol préparés avec mini Proctor et **compactés avec une énergie standard** **tableau 6**

Tableau 6

| Valeurs de l'ascension capillaire sur les témoins (mesuré en grammes) |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Temps (heures)                                                        | après 7 jours de      |                       | après 14 jours        |                       | après 28 jours        |                       |
|                                                                       | Témoin 1 sans additif | Témoin 2 avec Rocamix | Témoin 3 sans additif | Témoin 4 avec Rocamix | Témoin 5 sans additif | Témoin 6 avec Rocamix |
| 1                                                                     | 188,25                | 146,41                | 168,52                | 146,60                | 160,04                | 145,93                |
| 2                                                                     | 188,25                | 146,47                | 174,03                | 146,62                | 161,98                | 146,01                |
| 3                                                                     | 188,25                | 146,51                | 174,03                | 146,65                | 162,30                | 146,21                |
| 4                                                                     | 188,25                | 146,62                | 174,03                | 146,67                | 162,57                | 146,87                |
| 5                                                                     | 188,25                | 146,74                | 174,03                | 146,70                | 162,60                | 146,91                |
| 6                                                                     | 188,25                | 146,84                | 174,03                | 146,79                | 164,42                | 147,02                |
| 7                                                                     | 188,25                | 147,18                | 174,03                | 146,83                | 169,44                | 147,17                |
| 8                                                                     | 188,25                | 147,51                | 174,03                | 147,18                | 170,27                | 147,31                |
| 24                                                                    | 188,25                | 152,54                | 174,03                | 152,18                | 170,27                | 147,62                |

Les témoins qui ne contiennent pas de Rocamix montrent une saturation et un effondrement immédiat.

On peut noter que les échantillons traités avec Rocamix offrent une bien meilleure résistance à l'ascension capillaire car ils pèsent moins.

Résultats des tests d'ascension capillaire sur des échantillons de sol préparés avec mini Proctor et **compactés avec une énergie modifiée** (tableau 7)

Tableau 7

| Valeurs de l'ascension capillaire sur les témoins (mesuré en grammes) |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Temps (heures)                                                        | après 7 jours de      |                       | après 14 jours        |                       | après 28 jours        |                       |
|                                                                       | Témoin 1 sans additif | Témoin 2 avec Rocamix | Témoin 3 sans additif | Témoin 4 avec Rocamix | Témoin 5 sans additif | Témoin 6 avec Rocamix |
| 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                |

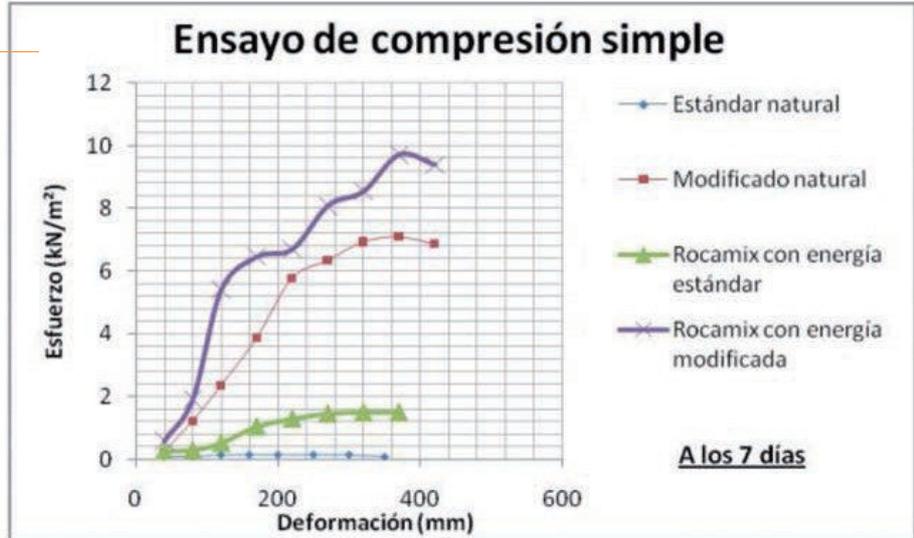
On peut voir que les échantillons avec le sol additivé Rocamix absorbent moins d'eau que les échantillons sans additif.

Les résultats après un séchage de 28 jours démontrent que plus le temps de séchage est long, moins le témoin a absorbé d'eau, prouvant que plus le temps passe plus la résistance à la remontée capillaire est forte.

4 Essai de compression simple (figures 18, 19, 20)

Figure 18

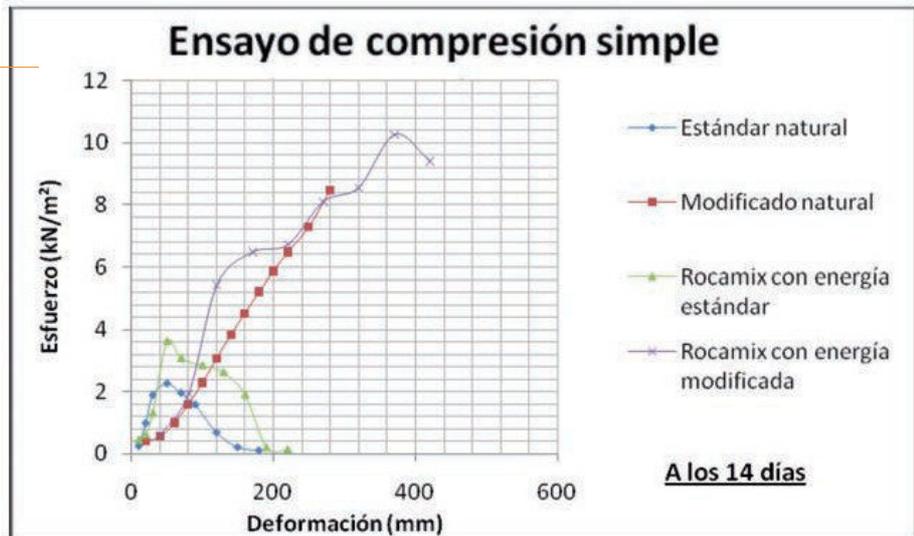
7 jours



Résultats des essais de compression simple avec et sans Rocamix après 7 jours de séchage.

Figure 19

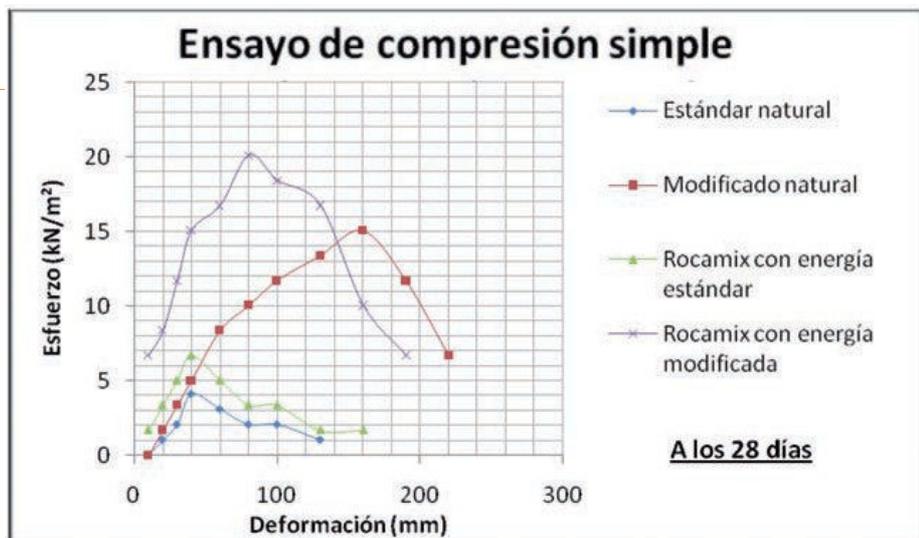
14 jours



Résultats des essais de compression simple avec et sans Rocamix après 14 jours de séchage

Figure 20

21 jours



Résultats des essais de compression simple avec et sans Rocamix après 28 jours de séchage.

Ces résultats démontrent que à mesure que l'on rajoute Rocamix le sol augmente sa résistance à la compression axiale et également se produit une différence significative suivant l'énergie de compactage du échantillons, il s'ensuit :

a) Dans tous les tableaux ci-dessus on peut observer une résistance accrue à la compression axiale avec l'ajout du produit Rocamix.

b) Les valeurs de résistance à l'effort axial augmentent de 0,5 à 3,8 kN/m<sup>2</sup> de 7 à 14 jours de séchage et à 7,0 kN/m<sup>2</sup> après 28 jours de séchage avec l'emploi de l'énergie standard pour la préparation des échantillons avec Rocamix.

Les valeurs de résistance à l'effort axial augmentent de 9,5 à 10,5 kN/m<sup>2</sup> de 7 à 14 jours de séchage et à 20,0 kN/m<sup>2</sup> après 28 jours de séchage avec l'emploi de l'énergie modifiée pour la préparation des échantillons avec Rocamix.

Les valeurs de résistance à l'effort axial augmente de 1,0 à 2,0 kN/m<sup>2</sup> pour l'énergie standard et entre 3.0 kN/m<sup>2</sup> y 5.0 kN/m<sup>2</sup> pour l'énergie modifiée et l'augmentation est plus importante avec un séchage de 28 jours.

## 5 Conclusions sol de la formation Vía Blanca

Le sol après étude de sa classification, des limites d'Atterberg et indices de plasticité est suivant la méthode AASTHO : A-7-6(20) Argile de haute compressibilité ou SUCS : Clay (CH) ) Argile de haute compressibilité et important changement de volume.

Suivant les normes établies par Rocamix pour le traitement de ce type de sol il faut utiliser pour sa stabilisation et imperméabilisation :

Ciment : un volume égal à 2% du poids du sol

Rocamix concentré, 0,60 litre par m<sup>3</sup> de sol à traiter

Avec l'addition de Rocamix et de la faible quantité de ciment et une, énergie de compactage utilisant le Proctor modifié, le paramètre CBR augmente considérablement sur ces échantillons réalisés.

Ce paramètre est d'une très grande importance pour la conception de projets routiers parce qu'en réalisant des sous-bases, des bases et des couches de forme c'est l'une des contraintes de conception les plus importants à mesurer. La baisse de l'ascension capillaire synonyme d'imperméabilisation est plus efficace avec l'utilisation du Proctor modifié et s'améliore au fil du passage du temps facilitant le séchage.

La résistance à la compression axial, utilisant l'énergie du Proctor standard ou modifié, est augmentée de manière significative et s'accroît e fonction du temps de séchage de 7, 14 à 28 jours.

## Conclusions

Après ces études et ces analyses, nous pouvons affirmer qu'il est possible d'utiliser le Système Rocamix, qui a démontré ses effets sur la stabilisation et imperméabilisation des sols et qui peut ainsi être utilisé dans la formation du paquet structurel d'une chaussée souple. Sa puissance efficace est démontrée dans l'amélioration substantielle des propriétés de résistance et d'imperméabilité des sols argilo-fines, qui sont généralement considérés comme des sols impropres à la construction de chaussées souples et rigides. Les procédés de construction et d'entretien des chaussées en utilisant le Système Rocamix ne nécessitent pas d'équipements spéciaux. Nous avons pu démontrer dans cette étude que l'utilisation du Système Rocamix dans deux types de sols très différents a permis de transformer ces sols impropres à leur utilisation pour la construction de routes et chemins à des sols qui répondent aux paramètres employés par l'AASHTO référence mondiale des règles de construction de ces travaux. Et le fait d'imperméabiliser les sols permet de démontrer que les coûts de maintenance futurs seront très inférieurs. Il faut rajouter que cette technologie contribue à améliorer la protection de l'environnement, au moment où la demande mondiale à cet égard est à la hausse, car il réduit la nécessité d'utiliser des sources qui obligent les travaux de terrassement très volumineux, des transports utilisateurs de carburant .

Ce travail est aussi une partie intégrante d'un projet de recherche qui, en vue de consolider le concept des avantages de cette technique de stabilisation chimique des sols, permet :

Une bien meilleure protection de l'environnement

Une très importante réduction des coûts d'investissement,

Une importante réduction de la consommation de combustibles fossiles.

## Bibliographie

- 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.
- 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.

# 2 PUBLICATION DE LA CONVENTION SCIENTIFIQUE D'INGÉNIERIE ET D'ARCHITECTURE (UNIVERSITÉ CUJAE LA HAVANE 2010)

Par : Professeur MSc ingénieur Pedro Marales Université Cujae La Havane  
Professeur MSc ingénieur Juan Mario Junco del Pino



Professeur Pedro Morales



J. M. Junco del Pino.

## Présentation

Le monde se dirige vers l'utilisation des sols en développant de nouvelles techniques, et il est important pour l'ingénierie de s'adapter aux conditions environnementales.

L'amélioration des sols avec de nouvelles technologies a aussi comme but de réaliser des économies pouvant atteindre 20 à 45% des coûts de construction conventionnelles.

La stabilisation chimique consiste en l'utilisation de produits chimiques pour modifier les propriétés du sol : les rendre plus dense et augmenter la liaison des particules entre elles pour élever leur capacité à supporter le poids du trafic sans déformation. Les plus utilisés pour la stabilisation chimique des sols sont le ciment, la chaux et les sels.

A partir de ces nécessités ont été entreprises des recherches à l'Université CUJAE de La Havane qui ont conduit à la création d'un système de stabilisation et imperméabilisation des sols avec l'utilisation de sels quaternaires et additifs, qui entrent dans la définition préétablie : économie, endurance, simplicité, écologie. Les principales applications de cette technique de stabilisation et imperméabilisation sont les sols de fondations des chaussées, l'entretien et la construction des routes, les plateformes de voies ferrées, les sols des décharges publiques entre autres.

Notre travail comprend une partie des résultats obtenus grâce à la mise en œuvre de ce système de stabilisation et imperméabilisation, montrant leur effet sur les propriétés mécaniques des sols et leur augmentation avec le temps.

## Introduction: Stabilisation de sols pour sous-bases

Dans de nombreuses régions du monde les réseaux routiers, vitaux et fondamentaux pour le développement des pays se détériorent rapidement, provoquant inquiétudes et difficultés pour les gouvernements des fédérations, des états, des provinces, et jusqu'aux échelons locaux. Le coût de la construction et de la réparation de ces routes est souvent la plus grande part des budgets gouvernementaux du monde entier, quelle que soit la taille du pays, ce coût atteint aujourd'hui des mille milliards de dollars par an.

En raison du manque de financement dans de nombreux pays il est nécessaire de créer des méthodes de construction et d'entretien plus efficaces du point de vue du rapport coût-efficacité. L'utilisation de la stabilisation chimique des sols s'est converti en une très sérieuse alternative et en ce moment, il commence à avoir beaucoup de routes qui ont été évalués et construits avec cette méthode, avec des résultats très encourageants.

La stabilisation chimique des sols offre une alternative moins coûteuse par rapport aux méthodes traditionnelles de construction de plate-forme et a le grand avantage d'utiliser le même sol du lieu. Basé sur l'avantage coût-efficacité, la méthode a gagné en popularité dans de nombreux secteurs des travaux réalisés par les gouvernements du monde entier.

Des études ont été réalisées à Cuba pour solutionner les problèmes d'approvisionnement pour la réalisation des travaux de voiries car les carrières sont très éloignées et les coûts de transport très élevés. En plus de ces énormes coûts, l'Etat a limité les ouvertures de nouvelles carrières en raison des dommages faits à l'environnement.

Ce travail présenté ici, qui s'inscrit dans le cadre d'une thèse de doctorat, expose une partie des résultats obtenus pour la stabilisation et imperméabilisation des échantillons de sol, de la formation « Capdevila », située près de la capitale soumis aux essais réalisés avec l'application de différentes doses de sels quaternaires + additifs (Rocamix) avec ajout de ciment et de chaux.

Ci-dessous sont les résultats qui reflètent l'application et qui analysent les propriétés mécaniques en fonction du vieillissement.

## Matériaux et Méthodes

### A Caractérisation des sols objet de l'étude « Formation Capdevila »

Le nom a été appliqué à une série de schistes et de grès calcaires minces de couleur chocolat qui affleure dans plusieurs endroits de la province de La Havane. Son apparence lithologique est très typique et facile à reconnaître.

Les provinces de l'ouest de Cuba, en particulier dans les environs de La Havane, sont parsemées de formations similaires qui sont censés être du même âge que celui de la Formation Capdevila. Dans cette région de l'ouest, elle est et a été utilisé comme matériau de construction pour de nombreux barrages en terre. Ce type de matériau peut être trouvé dans la nature avec une humidité au-dessus du test d'humidité optimum donnée par le Proctor Standard. Les propriétés physiques et mécaniques de l'argile de cette formation ont été largement étudiées, bien que présente dans cet article.

Propriétés du sol utilisé dans cette étude sont présentées ci-dessous dans les tableaux 1, 2, 3 et 4 ainsi que dans la figure 1.



**Granulométrie par passage au tamis HRB**

Tableau 1

| Granulométrie |             |
|---------------|-------------|
| Tamis         | % qui passe |
| 4             | 100         |
| 10            | 97.51       |
| 20            | 97.02       |
| 30            | 96.34       |
| 40            | 95.51       |
| 60            | 94.21       |
| 100           | 92.02       |
| 200           | 85.45       |

**Détermination de l'humidité du sol  
Limites d'Atterberg**

$$LL = 42.68\%$$

$$LP = 22.78\%$$

$$IP = 42.68 - 22.78 = 19.89$$

$$a = \text{Tamis } 200 - 35 = 85.45 - 35 = 50.45 / 40$$

$$0 < a < 40$$

$$b = \text{Tamis } 200 - 15 = 85.45 - 15 = 70.45 / 40$$

$$0 < b < 40$$

$$e = LL - 40 = 42.68 - 40 = 2.68$$

$$0 < e < 20$$

$$d = IP - 10 = 19.89 - 10 = 9.89$$

$$0 < d < 20$$

$$IG = 0.20 a + 0.005 ae + 0.01 bd$$

$$IG = 0.20 (40 + 0.005(40 (2.68 + 0.01 (40 (9.89 = 12.88 / 13$$

$$IP > = LL - 30$$

$$19.89 > 43 - 30$$

$$19.89 > 13$$

**Classement  
AASHTO****A-7-6 (13)** Argile de haute compressibilité et importante variation volumétrique**Mesures à l'hydromètre**

Tableau 2

**Résultats de l'Hydromètre**

| Diamètre (mm) | % Fines Réel |
|---------------|--------------|
| 0.115         | 74.49        |
| 0.086         | 62.49        |
| 0.050         | 56.40        |
| 0.040         | 53.12        |
| 0.027         | 50.34        |
| 0.021         | 48.37        |
| 0.015         | 41.56        |
| 0.009         | 35.30        |
| 0.006         | 30.27        |
| 0.004         | 25.89        |
| 0.003         | 22.18        |
| 0.001         | 15.34        |



## Poids spécifiques des témoins

Tableau 3

### Poids spécifique des particules solides

| Témoins        | Gs   |
|----------------|------|
| 1              | 2.69 |
| 2              | 2.72 |
| 3              | 2.71 |
| <b>Moyenne</b> | 2.71 |

## Résultats Proctor

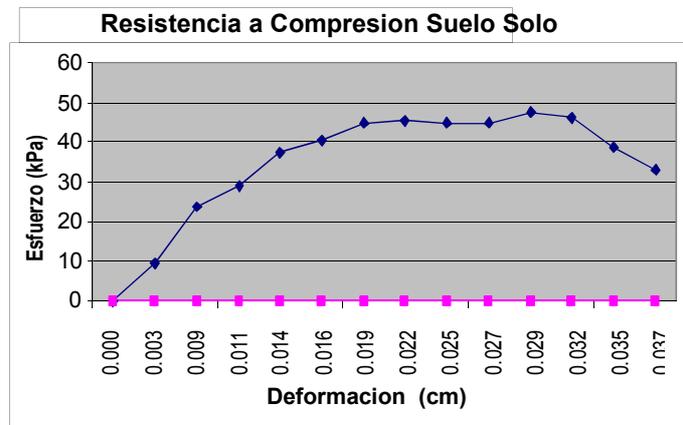
Tableau 4

### Résultats Proctor Standard et Modifié

| Témoins        | Proctor standard |          | Proctor modifié              |                              |
|----------------|------------------|----------|------------------------------|------------------------------|
|                | Wopt (%)         | Wopt (%) | Y d-max (kN/m <sup>3</sup> ) | Y d-max (kN/m <sup>3</sup> ) |
| 1              | 22.54            | 13.10    | 19.10                        | 14.60                        |
| 2              | 23.51            | 12.40    | 22.45                        | 14.20                        |
| 3              | 28.39            | 12.20    | 22.23                        | 14.20                        |
| <b>Moyenne</b> | 25.00            | 12,70    | 21.00                        | 14.30                        |

## Résistance à la compression simple

Figure 1



## B Préparation des échantillons de sol avec l'additif à essayer

Pour la préparation des échantillons de sol auxquels sont ajoutés les sels quaternaires + additifs (Rocamix®) et ciment + chaux, il est nécessaire de suivre le processus suivant :

- Dans un récipient ajouter une quantité du produit solide (terre du sol).
- Ajouter Rocamix® mélangé dans une quantité d'eau égale à 20 fois la quantité en volume du Rocamix concentré, mélanger de telle sorte que l'ensemble du produit soit dilué dans l'eau pour l'hydrater complètement.
- Laisser reposer pendant 24 heures.
- Après 24 heures, ajouter une quantité d'eau égale en poids au mélange et mélanger à nouveau cette composition de manière à obtenir un produit liquide.
- Ajouter la proportion de ciment et de chaux comme indiqué.

Le tableau 5 montre la quantité d'additif Rocamix®, d'eau, ainsi que les proportions de ciment et de chaux pour la préparation de 1000 g de sol.



**Doses****Les doses employées**

Tableau 5

Le dosage B est le dosage maximum (selon les recommandations Rocamix®)

| Type de dosage (g) | Rocamix (g) | Quantité d'eau x7 (g) | Total (g) | Ciment (g) | Chaux (g) |
|--------------------|-------------|-----------------------|-----------|------------|-----------|
| A                  | 0.45 g      | 3.15                  | 3.60      | 4 g        | 2.5 g     |
| B                  | 0.60 g      | 4.20                  | 4.80      | 4 g        | 2.5 g     |

**Résultats de l'application Rocamix****Granulométrie**

Tableau 6

**Valeurs des % passés en moyenne par jour**

| Tamis N° | Pourcentage de passages à |         |         |          |          |
|----------|---------------------------|---------|---------|----------|----------|
|          | 1 jour                    | 3 jours | 7 jours | 60 jours | 96 jours |
| 4        | 100                       | 100     | 100     | 100      | 100      |
| 10       | 98.24                     | 98.04   | 97.98   | 98.60    | 98.45    |
| 20       | 96.46                     | 96.08   | 96.16   | 96.43    | 96.02    |
| 40       | 95.49                     | 94.81   | 95.04   | 94.47    | 93.60    |
| 60       | 93.93                     | 92.88   | 93.31   | 92.67    | 91.75    |
| 100      | 91.30                     | 89.75   | 90.47   | 90.16    | 89.57    |
| 200      | 83.30                     | 82.98   | 82.24   | 81.40    | 78.95    |

**Hydrométrie**

Tableau 7

**Résultats Hydrométriques en fonction du temps**

| Diamètre mm | Pourcentage de passages à |         |         |          |          |
|-------------|---------------------------|---------|---------|----------|----------|
|             | 1 jour                    | 3 jours | 7 jours | 60 jours | 96 jours |
| 0.115       | 74.36                     | 73.21   | 72.18   | 70.68    | 68.18    |
| 0.086       | 62.25                     | 61.05   | 60.16   | 58.25    | 56.99    |
| 0.050       | 56.68                     | 54.86   | 52.21   | 51.05    | 49.96    |
| 0.040       | 53.08                     | 51.63   | 50.65   | 48.96    | 47.10    |
| 0.027       | 50.10                     | 49.25   | 48.17   | 47.05    | 46.21    |
| 0.021       | 48.06                     | 47.08   | 46.02   | 44.79    | 43.18    |
| 0.015       | 41.25                     | 40.36   | 39.18   | 37.21    | 36.18    |
| 0.009       | 35.05                     | 33.98   | 32.05   | 31.02    | 30.18    |
| 0.006       | 30.16                     | 28.10   | 27.08   | 25.56    | 24.29    |
| 0.004       | 25.10                     | 24.10   | 23.12   | 21.12    | 20.16    |
| 0.003       | 22.06                     | 21.10   | 20.12   | 19.16    | 17.13    |
| 0.001       | 15.10                     | 14.01   | 13.18   | 12.21    | 11.01    |

**Hydrométrie**

Tableau 8

**Poids spécifique des particules solides**

| Témoins | Gs   |
|---------|------|
| 1       | 2.71 |
| 3       | 2.73 |
| 7       | 2.75 |
| 60      | 2.77 |
| 96      | 2.81 |



## Consistance

Tableau 9

|          |                | Limites de Consistance |                    |                      |                      |
|----------|----------------|------------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
|          |                | Témoins                | Limite Liquide (%) | Limite Plastique (%) | Indice de Plasticité |
| 96 jours | 1              |                        | 39.00              | 21.12                | 17.93                |
|          | 2              |                        | 41.00              | 19.60                | 21.40                |
|          | 3              |                        | 40.00              | 21.36                | 18.64                |
|          | <b>Moyenne</b> |                        | <b>40.00</b>       | <b>21.00</b>         | <b>19.00</b>         |
| 7 jours  | 1              |                        | 43.00              | 22.41                | 20.59                |
|          | 2              |                        | 42.00              | 23.37                | 19.07                |
|          | 3              |                        | 41.00              | 21.36                | 19.94                |
|          | <b>Moyenne</b> |                        | <b>42.00</b>       | <b>22.36</b>         | <b>19.64</b>         |

## Classification du sol par le HRB 7 jours

## Granulométrie par passage au tamis HRB

Tableau 10

| Granulométrie |             |
|---------------|-------------|
| Tamis         | % qui passe |
| 4             | 100         |
| 10            | 97.98       |
| 20            | 96.16       |
| 40            | 95.04       |
| 60            | 93.31       |
| 100           | 90.47       |
| 200           | 82.24       |

## Détermination de l'humidité du sol Limites d'Atterberg

$$LL = 42.23\%$$

$$LP = 22.36\%$$

$$IP = 42.23 - 22.36 = 19.87$$

$$a = \text{Tamis } 200 - 35 = 82.24 - 35 = 47.24 / 40$$

$$0 < a < 40$$

$$b = \text{Tamis } 200 - 15 = 82.24 - 15 = 67.24 / 40$$

$$0 < b < 40$$

$$e = LL - 40 = 2.23$$

$$0 < e < 20$$

$$d = IP - 10 = 19.87 - 10 = 9.87$$

$$0 < d < 20$$

$$IG = 0.20 a + 0.005 ae + 0.01 bd$$

$$IG = 0.20 (40) + 0.005(40) (2.23) + 0.01 (40) (9.87) = 12.39 / 12$$

$$IP > = LL - 30$$

$$19.87 > 42.23 - 30$$

$$19.87 > 12.23$$

Classement  
AASHTO

A-7-6 (12) Argile à compressibilité basse à moyenne

## Classification du sol par le HRB 96 jours

### Granulométrie par passage au tamis HRB

Tableau 11

| Granulométrie |             |
|---------------|-------------|
| Tamis         | % qui passe |
| 4             | 100         |
| 10            | 98.45       |
| 20            | 96.02       |
| 40            | 93.60       |
| 60            | 91.75       |
| 100           | 89.57       |
| 200           | 78.95       |

### Détermination de l'humidité du sol Limites d'Atterberg

$$\begin{aligned} LL &= 40.00\% \\ LP &= 21.00\% \\ IP &= 40.00 - 21 = 19.00 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a &= \text{Tamis } 200 - 35 = 78.95 - 35 = 43.95 / 40 \\ 0 &< a < 40 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b &= \text{Tamis } 200 - 15 = 78.95 - 15 = 63.95 / 40 \\ 0 &< b < 40 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e &= LL - 40 = 0.01 \\ 0 &< e < 20 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d &= IP - 10 = 19 - 10 = 9 \\ 0 &< d < 20 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} IG &= 0.20 a + 0.005 ae + 0.01 bd \\ IG &= 0.20 (40) + 0.005(40)(0.01) + 0.01 (40) (9) = 11.61 / 12 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} IP &> = LL - 30 \\ 19 &> 40.0 - 30 \\ 19 &> 10.00 \end{aligned}$$



Classement  
AASHTO

**A-7-6 (12)** Argile à compressibilité basse à moyenne

### Résistance à la compression simple

Tableau 12

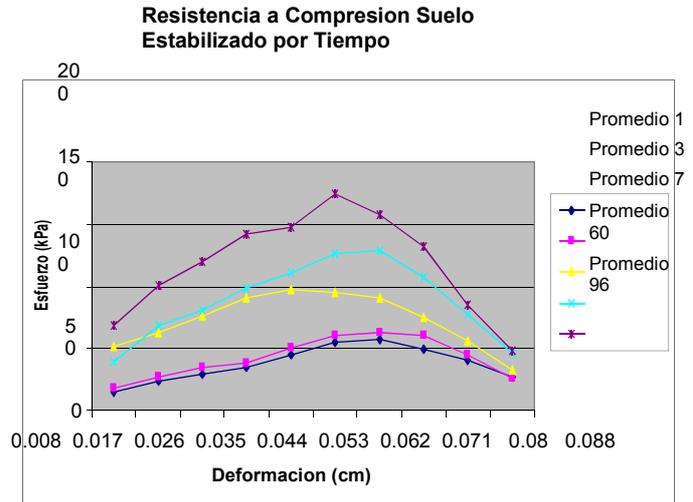
### Résistance à la compression simple dans le temps

| Jours passés | Résistance à la compression<br>Dose additif 0,60 g (kPa) |
|--------------|----------------------------------------------------------|
| 1            | 54.04                                                    |
| 3            | 62.25                                                    |
| 7            | 94.87                                                    |
| 60           | 122.31                                                   |
| 96           | 179.39                                                   |



## Graphique effort axial et déformation axiale en fonction du temps

Figure 2



Les résultats obtenus prouvent une augmentation significative produite pour la résistance des sols traités, et leur progression suivant le passage du temps. Le premier jour, le sol atteint une résistance de 5404 kPa, en hausse de 8,21% qui se produit au cours des trois jours suivants, tandis qu'après 96 jours elle atteint un 373,73 % comparée avec la résistance à la compression du sol sans additifs.

### Résultats de l'Absorption capillaire. Comparaison du comportement du sol naturel avec sol + Rocamix®

Tableau 13

Ce tableau montre les poids en grammes des échantillons à différents moments du test de capillarité.

### Résultats de l'absorption capillaire

| Heures d'essais | Sol sans additif | Sol + Rocamix dosage 1/m3 |              |
|-----------------|------------------|---------------------------|--------------|
|                 |                  | 0.45                      | 0.60         |
| Début essai     | (g)<br>180       | (g)<br>148.5              | (g)<br>151.0 |
| 1               | 186              | 151.0                     | 158.0        |
| 2               | 187              | 153.5                     | 162.0        |
| 3               | 190              | 155.0                     | 164.0        |
| 4               | -                | 155.5                     | 164.0        |
| 8               | -                | 159.0                     | 164.5        |
| 24              | -                | 159.0                     | 164.5        |

Le sol sans additif est détruit dans les trois heures. Son poids qui est passé à 190 g est suffisant pour que le témoin cède facilement. Les argiles ont généralement une forte teneur en humidité et absorbe un peu plus et pour cela se décomposent rapidement.

## Conclusions

Dans l'essai granulométrique on observe que dans le sol en état naturel, le % passant par le tamis numéro 200 est d'environ 85% alors que pour le sol stabilisé avec Rocamix, dans la période de 24h il est passé à 83% et après 96 jours à 78 %. Cette diminution indique que les particules ont été agglomérées pour former des grains plus gros, ce qui montre une diminution des matières fines de ce même sol.

La limite de liquidité (LL) du sol dans son état naturel est de 43%, tandis qu'après sept jours de la stabilisation avec Rocamix elle est de 42% et après 96 jours elle est de 40%.

La limite de plasticité (PL) du sol dans son état naturel est de 23% et pour les sols stabilisés avec Rocamix, à elle est après 7 jours de 22,36% et de 21% après 96 jours.



L'indice de plasticité du sol dans son état naturel est égal à 20% et après 7 jours de stabilisation avec Rocamix elle est de 19,87% et de 19% après 96 jours.

Ceci indique une diminution de la plasticité du sol.

Selon la méthode de classification USCS, le sol est considéré comme un CL : argile limoneuse contenant du sable, et selon la classification **AASHTO** comme un **A-7-6 (13)** : argile de compressibilité élevée et très expansif.

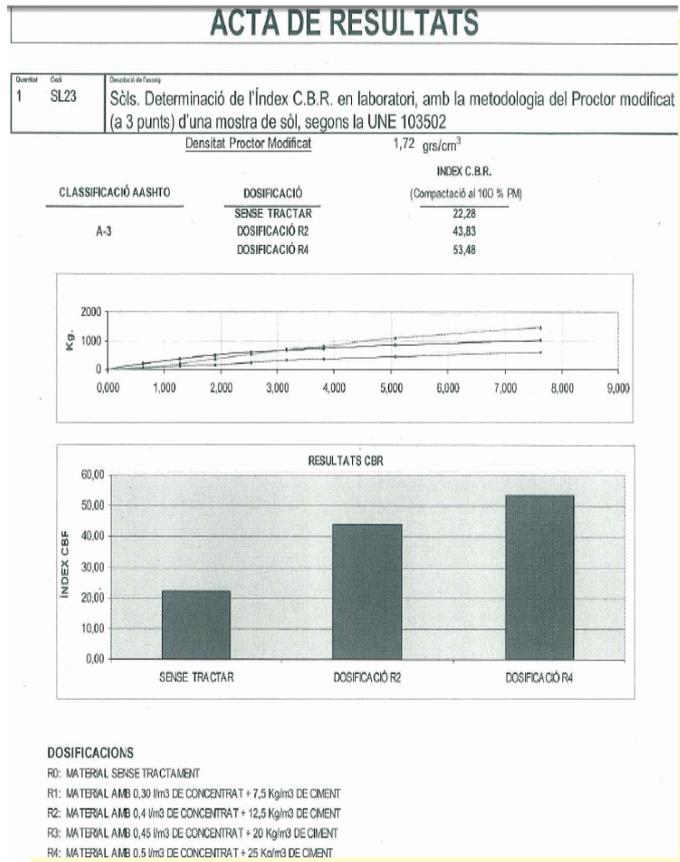
Pour le poids spécifique, il s'est produit une augmentation significative, le sol dans son état naturel étant de 2,71, et ce poids spécifique a augmenté au fil du temps jusqu'à atteindre 2,81, valeur donnée après une période de 96 jours, ce qui signifie que pour la réalisation du compactage, les résultats du sol avec un poids spécifique supérieur seront beaucoup plus efficaces.

La résistance à la compression du sol dans son état naturel est 47,67 kPa et après 96 jours de séchage elle est égale à 179,39 kPa, ce qui représente une augmentation par rapport au sol naturel de 376%. Ce qui est une augmentation très significative de la résistance à la compression.

Des travaux plus récents, effectués dans des laboratoires en Espagne, Colombie, Côte d' ont confirmé que cette technologie Rocamix peut réaliser des augmentations du CBR des sols jusqu'à 400%.

Tableau 14

**Tableau n° 14** illustre l'augmentation du CBR à partir du :  
 Sol naturel = 22,28%  
 Sol traité avec Rocamix dosage R2 = 43,83%  
 Sol traité avec Rocamix dosage R4 = 53,48%



## Remerciements

Les auteurs de cet article remercient pour leur inestimable participation et leurs précieuses aides les professeurs du groupe de la Section Mécanique des sols du département ISPJAE de l'Université CUJAE La Havane Cuba.

## Bibliographie et références

Colectivo de autores (1963) : Mecánica de suelos para ingenieros de carreteras y aeropuertos. Centro de estudios y experimentación de Obras Publicas. Madrid.  
Fernández, LC (1982) : Mejoramiento y estabilización de suelos. Editorial Limusa México. Juárez, Badillo E y Rico, Rguez A : (1963) Mecánica de Suelo, Tomo 1. fundamentos de mecánica de suelos. Edición Revolucionaria.  
Sowers George & Sowers (1971). Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones. Primera Parte, Edición Revolucionaria.

## Normes

NC 10 : 1999 Geotecnia. Preparación de las muestras de suelos.  
NC 19 : 1999 Determinación del peso específico relativo de la fase sólida de los suelos.  
NC 18 : 1999 Geotecnia. Determinación de la Resistencia a compresión Axial no confinada de los suelos.  
NC 20 : 1999 Determinación de de la granulometría de los suelos.  
NC 58 : 2000 Geotecnia. Determinación del Limite Liquido, Limite Plástico e Índice de plasticidad de los suelos.  
NC 59 : 2000 Clasificación geotécnica de los suelos.  
NC 67 : 2000 Determinación de la humedad.

## Références

- (1) López Lara, T. y Zepeda Garrido. "Mejoramiento de Suelos" Capitulo 9, 2004 [www.lanam, e.ucr.ac.cr](http://www.lanam.e.ucr.ac.cr) (documento on-line)
- (2) Torres Vila, J.A. 'Diseño y construcciones de Explanaciones. 'Tomo I. La Habana, 1986
- (3) Arizpe Narro, G. < articulosgratis>. 01 de 02 de 2007.
- (4) IMT, INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE Estabilización de Suelos con Cloruros para su uso en Vías Terrestres. 'Publicación Técnica No 201 Sanfandila Qru., 2002.
- (5) 'Presas de Tierras Homogéneas con Arcilla Capdevila. Criterios de Diseño. 'Revista de Ingeniería Estructural y Vial', 1993 :14.