

RECHERCHES SUR LA STABILISATION DES SOLS PAR LA CHAUX ET LES CENDRES VOLANTES

(Research on the Stabilization of Soils with Lime and Fly Ash)

(Investigación acerca de la estabilización de las tierras usando cal y cenizas volantes de centrales térmicas)

SOMMAIRE: Les travaux faits par l'auteur sur la stabilisation du sol avec des cendres volantes sont présentés ci-dessous. L'influence des matériaux qui composent le sol stabilisé ainsi que les facteurs qui influencent le compactage y sont analysés. Les cendres volantes avec la chaux peuvent être une méthode compétitive du point de vue économique dans la stabilisation du sol si les cendres volantes sont bon marché et de bonne qualité. On peut obtenir des résistances à 28 jours, comparables à celles obtenues avec du sol-ciment.

SUMMARY: The work done by the author on stabilization of soils with lime and fly ash is presented. The influence of the component materials, as well as the factors influencing compaction and curing, is analysed. Fly ash is cheap and of a good quality. After 28 days curing, strengths comparable to those of soil-cement can be obtained.

SUMARIO: Se presenta el trabajo hecho por el autor sobre la estabilización de las tierras con cal más cenizas volantes procedentes de centrales térmicas. Se analizan varios de los factores que pudieren afectar a la resistencias de las mezclas. La cal con cenizas puede ser un método competitivo para dar resistencia a las tierras si la ceniza es de buena calidad y se puede obtener a un coste razonable. Se obtuvieron resistencias análogas a las del hormigón, con algunas cenizas después de 28 días de curado.

INTRODUCTION

Plusieurs produits sont employés aujourd'hui avec les sols pour obtenir un matériau de construction avec des propriétés meilleures que celles du sol original. Ceux employés le plus couramment sont le ciment et la chaux. D'autres, tels que la chaux additionnée de cendres volantes, semblent être des stabilisateurs satisfaisants mais ils n'ont pas été très employés parce que leurs caractéristiques et leurs réactions, quand on les mélange avec des sols ne sont pas bien connus.

Ces huit dernières années, l'auteur a travaillé avec divers produits pour stabiliser les sols, prêtant une attention spéciale à l'emploi des cendres volantes. Les cendres volantes sont un sous-produit des centrales thermiques qui brûlent le charbon en poudre. Elles sont considérées comme une pouzzolane artificielle et s'emploient comme telle, avec du ciment pour faire du béton ou dans le sol-ciment. Les cendres volantes ont été employées aussi avec de la chaux dans la stabilisation des sols. L'intérêt de l'emploi des cendres volantes est dû au fait que la production atteint aux Etats-Unis 10 millions de tonnes par an, en Angleterre 4 millions et en France 3

millions. A mesure que d'autres pays s'industrialisent, on estime que la production des cendres volantes atteindra des chiffres semblables à ceux mentionnés plus haut.

Le travail fait antérieurement au sujet de l'intérêt de l'emploi de la chaux et des cendres volantes comme additifs des sols était assez restreint. Les conclusions générales avaient été déduites des résultats obtenus avec une variété très limitée de matériaux : sol, chaux et cendres volantes. Ces facteurs sont : type de chaux ; type de cendres volantes ; type de sol ; proportion et quantité de chaux et de cendres volantes ; relation humidité-densité-résistance ; effet de la puissance de compactage ; effet de la température de traitement ; effet de délai de compactage après addition d'eau dans le mélange ; effet de l'addition de produits chimiques ; étude de la modification des cendres volantes ; effet de l'addition de produits chimiques ; étude de la modification des cendres volantes ; effet de gel et de dégel ; comparaison avec d'autres méthodes de stabilisation des sols.

MECANISME DE LA REACTION ENTRE LA CHAUX ET LES CENDRES VOLANTES

On croit que quand on mélange la chaux et les cendres volantes avec le sol une partie de la chaux se combine avec les particules du sol, une partie avec l'oxyde de carbone présent dans le sol-air et le sol-eau et une partie avec les cendres volantes par une réaction pouzzolanique.

La chaux réagit avec les minéraux de l'argile dans le sol de deux manières. Une, ionique par nature, est une réaction complexe dans laquelle l'excès de cations de calcium, fourni par la chaux cause par son action de saturation sur les particules d'argile une floculation du sol et aussi un échange de calcium avec d'autres cations dans la structure de l'argile. Par cette réaction la plasticité diminue, la facilité pour la manipuler augmente grandement et les changements de volume dûs à l'humidité sont moins importants. L'autre réaction qui prend place quand le sol est compacté est pouzzolanique par nature. Des minéraux de quartz, de la taille de limon fin, en plus des minéraux de l'argile, prennent très probablement part à cette réaction. Des produits à réaction aglutinante se forment et augmentent la capacité de résistance du sol. Les produits aglutinants principaux sont les silicates et les aluminates de calcium.

L'oxyde de carbone se combine avec la chaux pour former du carbonate de calcium ou du carbonate de calcium-magnésium, suivant la chaux employée. Cette combinaison se retrouve à un rythme très bas dans les mélanges sol-chaux-cendres volantes. On a trouvé que la présence d'oxyde de carbone dans l'air n'affecte pas la résistance à la compression des sol limoneux et argileux stabilisés avec de la chaux et des cendres volantes.

TYPES DE CHAUX

Dans les études faites pour déterminer quelle est la chaux la plus efficace quand elle se combine avec des cendres volantes, on n'a employé que des chaux hydratées, parce que les chaux non hydratées sont très dangereuses à employer sur le chantier. Parmi les chaux hydratées, on n'a employé que des chaux calcaires- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - et dolomitiques monohydratées $-\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{MgO}$. La chaux dolomitique hydratée $-\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Mg}(\text{OH})_2$ - n'a pas été employée parce que, dans les études faites, on a prouvé qu'elle était très inférieure à la dolomitique monohydratée (Mateos, 1964b).

On ne peut tirer aucune conclusion sur le choix de la meilleure chaux. Dans une étude faite employant de la chaux et des cendres volantes sans sol, la chaux dolomitique monohydratée a produit en général des résistances 30 pour cent plus grandes que la chaux calcaire hydratée. Cependant, avec certaines cendres volantes la chaux calcaire a produit des résistances plus grandes que la dolomitique (Vincent, Mateos et Davidson 1961). Dans des expériences faites avec des sols, la chaux dolomitique monohydratée donne en général des résistances plus grandes que la calcaire (Mateos et Davidson 1963b).

Les conclusions que l'on peut tirer de ces études sont que les cendres volantes que l'on veut stabiliser avec de la chaux doivent être essayées avec des chaux dolomitiques et calcaires si on les trouve dans la région. La période de traitement doit être de trois mois et la température doit être semblable à la température du chantier sur lequel on traitera le sol. Sur les figures 1,2,4 et 5, on voit la grande influence que le type de chaux peut exercer dans les mélanges de sols stabilisés avec de la chaux et des cendres volantes.

TYPES DE CENDRES VOLANTES

L'étude principale faite pour déterminer les caractéristiques d'une cendre volante de bonne qualité est celle donnée dans la référence de Vincent, Mateos et Davidson (1961). Les résultats obtenus de cette étude indiquent que :

- 1) La surface spécifique des cendres volantes est fonction de leur finesse et de la teneur en imbrûlés et par conséquent n'est pas un bon critère des qualités qui produisent la résistance ou la réactivité avec la chaux.
- 2) Les cendres volantes obtenues dans des centrales thermiques par les méthodes de précipitation sont plus fines et contiennent moins d'imbrûlés que les cendres obtenues par les méthodes mécaniques.
- 3) Le pourcentage en poids des cendres volantes qui passent à travers le tamis No. 325 donne une indication générale de la teneur des imbrûlés et de la quantité de matériel réactif.
- 4) La concentration moléculaire du contenu en $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ est en relation directe avec la résistance.

On n'a pas trouvé de relations plus grandes entre la composition chimique ou physique des cendres volantes et leur réaction avec la chaux (Mateos 1961, 1964^a ; Mateos et Davidson 1962^a, 1963b). Les grandes différences dans la résistance que l'on obtient avec différentes cendres volantes peuvent s'observer en comparant les figures 1 et 2.

TYPES DE SOLS

Les sols qui bénéficient le plus quand on les stabilise avec de la chaux et des cendres volantes sont les sols friables. Ceux qui présentent le plus d'avantages quand on les stabilise avec de la chaux et des cendres volantes sont les sables ou les graviers de grains uniformes. Ces sols ne peuvent pas se stabiliser avec d'autres agents si on ne leur ajoute pas auparavant d'autres sols pour en améliorer la granulométrie. Cependant l'addition de chaux et de cendres volantes élimine la nécessité de changer la granulométrie.

Les sols limoneux et argileux répondent bien à la stabilisation avec la chaux et les cendres volantes pourvu qu'il y ait des cendres volantes bon marché et de bonne

qualité. Pourtant, les sols limoneux se stabilisent en général à meilleur marché avec du ciment et les sols argileux avec seulement de la chaux (Mateos 1961 ; Mateos et Davidson, 1962^a).

PROPORTIONS ET QUANTITE DE CHAUX ET DE CENDRES VOLANTES

On n'a pas trouvé de relation générale entre le contenu de la chaux plus cendres volantes et la résistance des sols stabilisés. Les proportions dépendent du type de sol et des cendres qu'on emploie. Pour des sols friables, la quantité de chaux devrait être entre 3 et 6 pour cent et la quantité de cendres volantes entre le 10 et le 25 pour cent ; pour les sols argileux, la quantité de chaux devrait être entre 5 et 9 pour cent et la quantité de cendres volantes, entre 10 et 25 pour cent (Mateos et Davidson 1962^a).

RELATION HUMIDITE-DENSITE-RESISTANCE

La résistance maximum des mélanges sol-chaux-cendres volantes est produite pour un contenu d'humidité pendant le compactage qui n'est pas nécessairement le contenu d'humidité optimum pour une densité maximum. L'humidité pendant le compactage pour la résistance maximum d'échantillons avec des sols sableux est du côté sec de l'humidité optimum. Dans des sols ayant une grande teneur en argile, au moins du type montmorillonite, l'humidité pendant le compactage est du côté humide. Avec d'autres sols, tels que le loess friable, la résistance maximum et la densité maximum peuvent correspondre à la même humidité de compactage.

Si on n'ajoute pas d'eau pendant le traitement, le contenu d'humidité pendant le compactage requis pour produire une résistance maximum change selon la période de traitement : plus la période de traitement est longue, plus grande est l'humidité (Mateos et Davidson, 1963^a)

EFFET DE LA PUISSANCE DE COMPACTAGE

L'influence de la puissance de compactage est très importante. Par exemple, le fait de passer de la Standard proctor à la Proctor modifiée augmente la résistance des mélanges sol-chaux-cendres volantes (Fig. 3). L'augmentation de résistance obtenue est variable, mais est habituellement de 50 à 160 pour cent (Mateos et Davidson, 1963^a)

EFFET DE LA TEMPERATURE DE TRAITEMENT

La réaction entre la chaux et les cendres volantes est très sensible à la température de traitement (les figures 4 et 5) (Mateos et Davidson, 1961d, 1962b ; Mateos, 1964). Avec des températures atteignant jusqu'à 22 C approximativement, la réaction se développe très lentement, et à des températures plus élevées, la réaction est rapide et proportionnelle à l'augmentation de la température.

Avec de la chaux dolomitique monohydratée, on a obtenu en général des résistances plus grandes qu'avec de la chaux hydratée calcaire, dans des mélanges sable-chaux-cendres volantes pour des températures de traitement qui vont jusqu'à environ 30 C (comparer les figures 4 et 5). On obtient avec de la chaux calcaire hydratée des résistances plus grandes qu'avec de la chaux dolomitique monohydratée dans des mélanges sable-chaux-cendres volantes pour des températures de traitement entre 60 C et 120 C.

La stabilisation du sol avec de la chaux et des cendres volantes devrait se faire au début de l'été pour profiter de la température élevée pendant le traitement.

Un haut contenu d'imbrûlés semble être un retardateur de la réaction chaux-cendres volantes pour des températures de traitement à plus de 60 C.

EFFET DE DELAI DE COMPACTAGE APRES ADDITION D'EAU DANS LES MELANGES

Le compactage devrait se faire aussitôt que possible, après avoir mélangé et humidifié les mélanges de sol-chaux-cendres volantes ; sinon, la densité et la résistance peuvent être substantiellement abaissées. Avec des sol argileux (la fig. 6), le compactage devrait se terminer au plus tard quatre heures après que le mélange ait été humidifié tandis qu'avec des sols sableux, le compactage peut être retardé jusqu'au lendemain du jour où on a humidifié le mélange sans perte appréciable de résistance (Mateos et Davidson, 1963^a).

EFFET DE L'ADDITION DE PRODUITS CHIMIQUES

Tout d'abord, on a étudié 47 produits chimiques comme additifs dans des mélanges de sable-chaux-cendres volantes (mateos, 1958 ; Davidson, Mateos et Katti, 1959) et postérieurement on a étudié 12 autres produits chimiques (Mateos, 1961 ; Mateos et Davidson, 1961^a). Dans ce dernier travail, sont compris les produits qui avaient été prometteurs dans la première étude.

On a trouvé que la résistance immergée des mélanges peut être augmentée plusieurs fois au moyen de petites quantités de quelques produits chimiques. Le carbonate de soude, le métasilicate de soude et l'hydroxyde de soude semblent être les plus prometteurs parmi ceux qui ont été étudiés.

La résistance immergée de sols friables stabilisés avec de la chaux et des cendres volantes peut-être aussi augmentée par l'addition de petites quantités de carbonate de soude, de soude et dans quelques cas, de chlorure de soude. L'augmentation de résistance apportée par l'addition de produits chimiques est très critique à des températures voisines de 0 C parce qu'elle peut permettre la stabilisation des sol-chaux-cendres volantes dans des conditions climatiques froides, ce qui permet de travailler plus tard dans l'année (Mateos et Davidson, 1961^a, 1961b).

Le gypse peut avec certains mélanges être un additif bénéfique (Mateos et Davidson, 1964).

Il faut utiliser avec prudence ces produits chimiques parce que leurs effets changent selon les types de sol, chaux et cendres volantes. Avant de les utiliser, on recommande de les étudier en laboratoire avec les sols, chaux et cendres volantes que l'on va employer (Mateos, 1963).

EFFET DE LA MODIFICATION DES CENDRES VOLANTES

Les qualités pouzzolaniques des cendres volantes peuvent s'améliorer en éliminant la partie grossière, parce que cette partie est formée d'imbrûlés qui ne sont pas réactifs. Les cendres volantes peuvent aussi être améliorées en les passant au broyeur (Mateos, 1961c).

EVALUATION COMPARATIVE

Comme étude finale, on a pris quelques mélanges sélectionnés de sol, chaux et cendres volantes, et on a comparé leur résistance avec celle des mêmes sols stabilisés avec du ciment. Dans cette étude, sont comprises des épreuves de durabilité au gel et au dégel. Sur le tableau I, on présente quelques-uns de ces résultats.

Comme conclusion, on peut indiquer que les sols peuvent être stabilisés avec des cendres de bonne qualité et de la chaux. L'emploi de cette méthode de stabilisation est recommandé quand le prix de la chaux plus cendres volantes est inférieur au prix du ciment pour des résistances comparativement semblables au bout de 28 jours de traitement.

REFERENCES

Davidson, D.T., M.Mateos, and R.K.Katti (1959). Activation of the lime-fly ash reaction by trace chemicals. Highway Research Board of the National Academy of Sciences, National Research Council, Washington, D.C., Bulletin, No. 231, pp. 67-81.

Mateos, M. (1958). Effect of trace chemicals on strength of Ottawa sand-lime-fly ash mixtures. M.Sc. thesis, Iowa State University, Ames, Iowa.

Mateos, M.(1961) Physical and mineralogical factors in stabilization of Iowa soils with lime and fly ash. Ph.D thesis, Iowa State University, Ames. Iowa.

Mateos, M. (1963). Discussion of the paper entitled soil stabilization with cement and chemical additives. Proc. American Society of Civil Engineers, SM3, vol. 89, paper 3528, pp.181-7.

Mateos, M. (1964^a). Heat curing of sand-lime-fly ash mixtures. Materials Research and Standards, Vol. 4, No. 5, pp. 112-17.

Mateos, M. (1964b). Soil-lime research at Iowa State University, Proc. American society of civil Engineers, SM2, Vol. 90, Paper 3847, pp. 127-53.

Mateos, M. and D.T. Davidson (1961^a). Further evaluation of promising chemical additives for accelerating hardening of soil-lime-fly ash mixtures. Highway Research board of the national Academy of Sciences, national Research Council, Washington, D.C. Bulletin, No. 304, pp. 32-50.

Mateos, M. and D. T. Davidson (1961b). Effect of chemical additives on strength of sand-lime-fly ash mixtures cured at low temperatures. Report, Engineering Experiment Station, Iowa State University, Ames, Iowa.

Mateos, M. and D. T. Davidson (1961c). Effect of addition of montmorillonite and kaolinite clays to Ottawa sand-lime-fly ash mixtures.Report, Engineering Experiment Station, Iowa State University, Ames, Iowa.

Mateos, M. and D. T. Davidson (1961d). Steam hardening of lime, lime-fly ash and cement treated soils. Report, Engineering Experiment Station, Iowa State University, Ames, Iowa.

Mateos, M. and D. T. Davidson (1962^a). Lime and fly ash proportions in soil-lime-fly ash mixtures and some aspects of soil-lime stabilization. Highway research Board of the national Academy of Sciences, National Research Council, Washington, D.C.- Bulletin No. 335, pp.40-64.

Mateos, M. and D. T. Davidson (1962b). Steam curing and X-ray studies of fly ashes. Proc. American Society for Testing and materials, vol. 62, pp. 1008-18.

Mateos, M. and D. T. Davidson (1963^a). Compaction characteristics of soil-lime-fly ash mixtures. Highway Research board of the national Academy of Sciences,

National Research Council, Washington, D.C. Highway Research record No. 29, pp. 27-41.

Mateos, M. and D. T. Davidson (1963b). Stabilization of Alaskan silty soils with inorganic additives. Document No. 29, 9^{ème} Congrès Panaméricain des Routes, Washington, D.C.

Mateos, M. and D. T. Davidson (1964). Gypsum as an additive to stabilized soils. Rapport présenté au premier Congrès International des Travaux Publics, sur les Terrains Contenant du Gypse. Madrid, Espagne. Publié dans les compte-rendus du congrès.

Vincent, R.D., Mateos, M. and Davidson, D.T. (1961). Variation in pozzolanic behaviour of fly ashes. Proc. American Society for Testing and Materials, Vol. 61, pp. 1098-1118.

SUMMARY : The work done by the author during eight years on stabilization of soils with lime and fly ash is presented. The influence of the component materials, as well as the factors influencing compaction and curing, is analyzed. Fly ash with lime can be a competitive method of stabilizing soils if the fly ash is cheap and of a good quality. After 28 days curing, strengths comparable to those of soil-cement can be obtained.

SUMARIO : Se presentó el trabajo hecho por el autor a lo largo de ocho años sobre la mejora de las tierras estabilizándolas con mezclas de cal más cenizas volantes procedentes de centrales térmicas. Analiza la influencia de los componentes materiales , así como otros factores que puedan influir en la compactación y en el curado. El uso de cal más cenizas volantes puede ser un método competitivo para mejorar la resistencia de las tierras si la ceniza es barata y de buena calidad. Después de 28 días de curado, se obtuvieron, con algunas mezclas, resistencias comparables con las del suelo-cemento.

M.MATEOS, MSc, PhD, Dr. Ing. Caminos, Canales y Puertos, Ing. T. de Obras Públicas, PE, Fellow ASCE.

