

STABILIZZAZIONE DI ARGILLE GRASSE PER I SOTTOFONDI DELLE LINEE DI TRASPORTO IN MINIERE A CIELO APERTO

D. EVSTATIEV - L. ILIEVA (*)

SOMMARIO: Vengono esposti i risultati di una indagine sperimentale sulla stabilizzazione delle argille grasse con calce viva e con prodotti di rifiuto di centrali termoelettriche e di cementifici.

Le ricerche sulla stabilizzazione delle argille grasse presentano un notevole interesse applicativo; tali argille infatti, anche se nella loro sede naturale sono spesso caratterizzate da una elevata compattezza, una volta poste a contatto con l'acqua rigonfiano in misura notevole acquistando caratteristiche meccaniche molto scadenti.

Il problema assume importanza particolare nelle miniere a cielo aperto in cui gli strati di copertura siano costituiti da argille di elevata plasticità. In tali miniere esiste una fitta rete di rotaie ferroviarie e di strade, usate per il trasporto dei materiali, per le quali generalmente non si provvede a realizzare un sottofondo particolare in quanto si tratta di linee provvisorie sottoposte a continui spostamenti.

Nella stagione asciutta le linee in questione si mantengono in condizioni soddisfacenti, ma durante i periodi piovosi, a causa del rammollimento delle argille, la sicurezza dei trasporti non può essere garantita neanche stendendo al disotto delle rotaie strati di scorie e sabbia con spessori fino ad 80 cm.

Sono già apparsi nella letteratura tecnica [2, 4] esempi di applicazione della stabilizzazione di argille molli con calce idrata o viva nei lavori di autostrade o linee ferroviarie. Il problema si pone in termini diversi nel caso delle linee di trasporto in miniere a cielo aperto; il fatto che si tratti di linee provvisorie impone da un lato che le spese per l'approvvigionamento delle sostanze leganti e per il trattamento siano contenute entro limiti molto bassi, mentre d'altro canto non è necessario ottenere una elevata resistenza a cicli ripetuti in imbibizione e essiccamento in quanto le linee vengono generalmente utilizzate solo per una o due settimane.

Sono queste le considerazioni che hanno orientato le nostre ricerche, che rappresentano una delle prime

esperienze (1) di applicazione della stabilizzazione del terreno nelle miniere a cielo aperto.

Sono state studiate due diverse argille plioceniche, di colore rispettivamente grigio-verde e giallo, che rappresentano il terreno di appoggio della maggior parte delle linee di trasporto di un grande complesso minerario. Si tratta di argille di granulometria molto fine e di plasticità elevata (v. Tabella I).

L'analisi per diffrazione dei raggi X e l'analisi termica differenziale indicano che il minerale argilloso predominante è l'illite, con percentuali ridotte di montmorillonite.

TABELLA I

CARATTERISTICHE DELLE ARGILLE - VALORI MEDI

Caratteristiche	argilla pliocenica grigio-verde	argilla pliocenica gialla
Contenuto d'acqua naturale	48,5 %	41,0 %
Porosità	57,0 %	33,0 %
Grado di saturazione	0,98 %	0,74 %
Limite di liquidità	75 %	49 %
Limite di plasticità	30 %	18 %
Indice di plasticità	45 %	31 %
Composizione granulometrica		
d > 0,05 mm	8 %	12 %
0,05 > d > 0,005 »	19 %	32 %
0,005 > d > 0,001 »	25 %	24 %
d > 0,001 »	48 %	32 %
Capacità di assorbimento in mg equivalente a 100 gr. di materiale (metodo Schacht-Schabel)	43,9868	28,0311
Contenuto in humus	1,41 %	0,06 %

(*) Ing. Dimcio EVSTATIEV, ing. Liudmila ILIEVA, Istituto di Geologia dell'Accademia delle Scienze di Bulgaria.

(1) Applicazioni analoghe sono state effettuate recentemente in Germania [1].

Nei complessi di adsorbimento prevalgono gli ioni calcici e magnesiaci, ma sono anche presenti in quantità non trascurabile gli ioni sodici e potassici.

Allo stato naturale queste argille si presentano dotate di caratteristiche meccaniche piuttosto buone; la loro resistenza a taglio, misurata su campioni intatti con un apparecchio di taglio diretto tipo CASA-GRANDE, può essere caratterizzata da un valore della coesione di 0,85 kg/cmq e da un angolo di attrito di 12°40'.

Le proprietà meccaniche si riducono però in misura notevole per effetto del rimaneggiamento; queste argille inoltre rigonfiano sensibilmente a contatto con l'acqua, e pongono quindi seri problemi di stabilità e di sicurezza per le linee di trasporto.

La composizione mineralogica, la capacità di assorbimento e la granulometria finissima delle argille esaminate sono tutti presupposti favorevoli per la creazione di strutture idrofile coagulanti dotate di caratteristiche tixotropiche. Prove all'uopo eseguite con l'apparecchio di REHBINDER⁽²⁾ hanno confermato l'esistenza di queste proprietà.

Allo stato naturale la resistenza misurata con l'apparecchio di REHBINDER assume valori pari a 2 kg/cmq per l'argilla grigio-verde ed a 0,8 kg/cmq per l'argilla gialla.

Dopo rimaneggiamento a contenuto d'acqua costante, la resistenza si riduce a circa la metà, raggiungendo valori di 1 kg/cmq per l'argilla grigio-verde e di 0,4 kg/cmq per l'argilla gialla. Questa riduzione di resistenza è dovuta alle modifiche che intervengono — a seguito dell'azione di rimaneggiamento — nella natura dei legami tra acqua e particelle di argilla [6, 7]. Per effetto del rimaneggiamento infatti l'acqua passa completamente in istato di adsorbimento, la pellicola adsorbita intorno alle particelle si ingrossa, e quindi i legami fra le particelle stesse si indeboliscono e la resistenza meccanica dell'argilla si riduce.

Se si misura la resistenza delle argille in questione impastate con un contenuto d'acqua prossimo al limite di liquidità, si trova che questa resistenza aumenta nel tempo. Un successivo rimaneggiamento a contenuto d'acqua costante riporta il valore della resistenza a quello iniziale dell'impasto fresco.

Queste esperienze dimostrano l'esistenza di processi di formazione strutturale tipicamente coagulante, con formazione di strutture tixotropiche completamente reversibili [10]. A queste proprietà è da attribuire il peggioramento delle caratteristiche meccaniche delle argille in sito sotto l'azione di carichi dinamici o per effetto di cicli ripetuti di imbibizione ed essiccamento.

Nella sezione geotecnica dell'Istituto di Geologia dell'Accademia delle Scienze di Bulgaria sono state effettuate una serie di esperienze sulla stabilizzazione

⁽²⁾ Con tale apparecchio si misura la profondità h di infissione di un cono metallico di apertura α sotto l'azione di un carico statico F applicato con un sistema di pesi e leve. La « resistenza plastica » P del materiale in esame viene definita come segue:

$$P = K \frac{\alpha F}{h^2}$$

in cui K è un coefficiente che dipende dalle caratteristiche dell'apparecchio.

delle argille grasse mediante calce viva in polvere, cenere di risulta dei filtri elettrostatici di centrali termoelettriche e ceneri delle ciminiere di cementifici.

Le prove di laboratorio per la determinazione delle caratteristiche meccaniche delle argille stabilizzate sono state condotte secondo una metodologia analoga a quella adottata da SAKEB [3], e cioè:

a) Macinazione dell'argilla essiccata, stacciatura ad uno staccio con fori da 1 mm, miscelamento con le sostanze leganti e costipamento della miscela con un contenuto d'acqua pari all'optimum di PROCTOR. Il costipamento veniva effettuato applicando ai provini una pressione di 40 kg/cmq per la durata di un minuto, mediante un'apparecchiatura che permetteva la preparazione contemporanea di 6 provini.

b) Stagionatura dei provini per una settimana in ambiente umido e successivamente per tre settimane in atmosfera.

c) Determinazione della resistenza a taglio ed a compressione a 7 giorni ed a 28 giorni, dopo saturazione con acqua. Ogni prova veniva ripetuta su 3 provini, ed i relativi risultati venivano mediati.

Poichè le argille su cui si è operato presentano generalmente un contenuto d'acqua naturale superiore al contenuto d'acqua optimum, si è adoperata calce viva in polvere. In tal modo all'atto del mescolamento una parte dell'acqua si consuma nell'idratazione del CaO, un'altra parte evapora a seguito del calore che si sviluppa nella reazione di spegnimento della calce, e l'umidità della miscela si avvicina all'optimum. Sussiste la relazione [8]:

$$W_{\text{opt miscela}} = 1,5 W_{\text{opt argilla}} + 0,2 \Delta$$

ove con Δ si è indicata la percentuale di calce.

Subito dopo il mescolamento dell'argilla con la calce si verificano una serie di reazioni di scambio ionico ed i complessi di adsorbimento si saturano di ioni calcici. Le particelle argillose si aggregano e la granulometria della miscela risulta quindi più grossa di quella dell'argilla; ne consegue una migliore lavorabilità.

Col passar del tempo interviene poi una coagulazione completa ed irreversibile della componente argillosa.

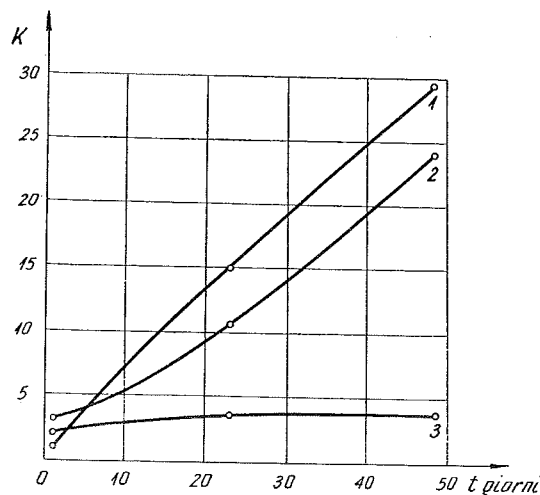


Fig. 1 - Aumento del coefficiente di stabilizzazione nel tempo; argilla grigio-verde miscelata con percentuali di calce del 10% (curva 1), 8% (curva 2) e 3% (curva 3).

Parallelamente ai fenomeni descritti, la plasticità delle argille varia. Per miscele con percentuali di calce relativamente modeste ($2 \div 3\%$) subito dopo il mescolamento si ha un aumento dell'indice di plasticità; se invece la percentuale di calce è più elevata la plasticità si riduce, e raggiunge valori minimi per percentuali di calce intorno al 10% . Dopo una stagionatura di 48 ore l'indice di plasticità della miscela diminuisce in ogni caso a causa dei processi di cristallizzazione.

I diagrammi di fig. 1 illustrano la dipendenza del coefficiente di stabilizzazione K ⁽³⁾ dalla percentuale di calce. Dalle fig. 2 e 3 può inoltre desumersi che per entrambe le argille il coefficiente di stabilizzazione aumenta continuamente nel tempo; questo indica lo svolgimento di processi di cristallizzazione e di formazione non reversibili.

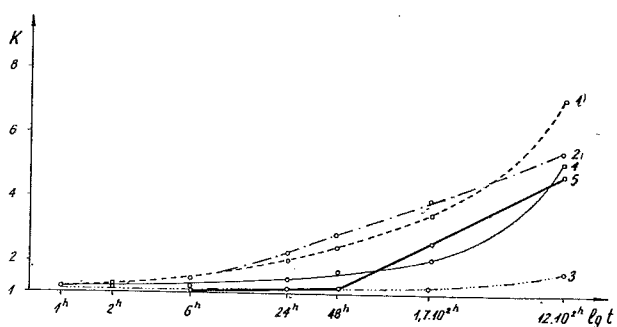


Fig. 2 - Aumento del coefficiente di stabilizzazione nel tempo; argilla grigio-verde miscelata con il 10% di calce (curva 1), con il 30% di cenere di cementificio (curva 2), con il 30% di cenere di centrale termoelettrica (curva 3), con il 10% di calce + 1% di $CaCl_2$ (curva 4) e con il 5 ÷ 10% di calce + 0,5% di $FeCl_3$ (curva 5).

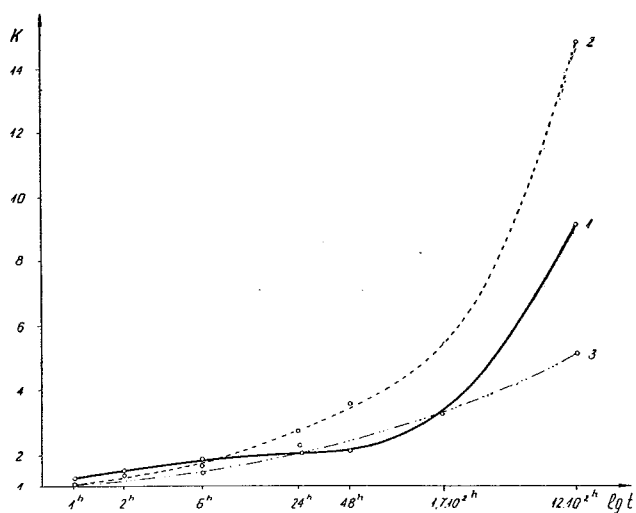


Fig. 3 - Aumento del coefficiente di stabilizzazione nel tempo; argilla gialla miscelata con il 10% di calce (curva 1), con il 30% di cenere di cementificio (curva 2) e con il 30% di cenere di centrale termoelettrica (curva 3).

Il miglioramento delle caratteristiche meccaniche è più sensibile per l'argilla gialla (Fig. 3), il che va posto in relazione con la sua granulometria, con la sua composizione mineralogica e con il minor contenuto di sostanza organica.

⁽³⁾ Il coefficiente di stabilizzazione K è definito come rapporto fra la resistenza plastica al tempo t e la resistenza iniziale di impasti freschi. In ambedue i casi, la resistenza plastica è stata misurata con l'apparecchio di REHBINDER.

Nella stabilizzazione delle argille plastiche con calce di polvere l'idrolisi e l'idratazione della calce avvengono in ambiente attivo e con una elevata superficie specifica. Come già detto, lo spengimento della calce ha luogo a spese del contenuto d'acqua dell'argilla e con erogazione di notevoli quantità di calore (18,3 calorie per ogni grammo molecola di massa reagente). Con la formazione del $Ca(OH)_2$ l'ambiente diventa fortemente basico, ed ha luogo la dissoluzione dell'acido silicico sulla superficie delle particelle argillose, con formazione di gel di idrosilicato di calcio che lega gli agglomerati di particelle insieme con l'idrato di calcio amorfo e occlude i pori con una sottile pellicola impermeabile, che col passare del tempo cristallizza [5, 9]. Si ottengono in tal modo strutture idrofobe dotate di rilevante resistenza.

In fig. 4 è rappresentata la variazione della resistenza a compressione dell'argilla grigio-verde, imbibita di acqua, in funzione della quantità di calce ad essa mescolata.

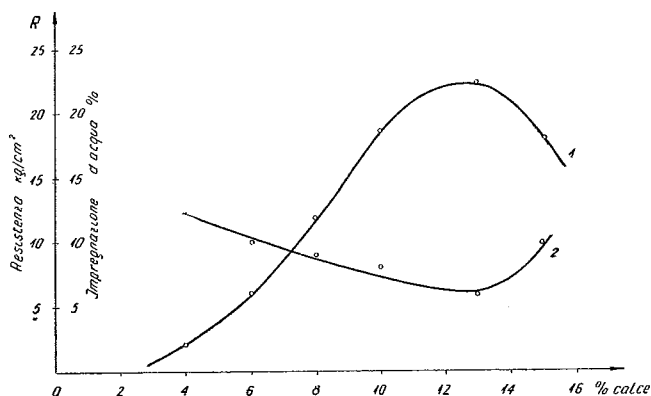


Fig. 4 - Argilla grigio-verde; resistenza a compressione (curva 1) ed assorbimento d'acqua (curva 2) in funzione della percentuale di calce.

Il diagramma mostra chiaramente la presenza di un massimo della resistenza per percentuali di calce intorno al 13% , fenomeno questo già rilevato da altri ricercatori. Nella stessa figura sono riportati i contenuti d'acqua che si stabiliscono per effetto dell'imbibizione del campione per capillarità; se ne rileva che una percentuale di calce dell' $8 \div 10\%$ è completamente sufficiente per ottenere una struttura idrofoba.

Questi dati sono stati confermati anche da misure delle deformazioni subite dai campioni per effetto di cicli di imbibizione ed essiccamento; le deformazioni unitarie dell'argilla stabilizzata sono risultate dell'ordine di 10^{-2} mm/mm, mentre la stessa argilla allo stato naturale faceva registrare variazioni di volume dell'ordine di 1,3.

Nella figura 6 sono riportati i risultati di una serie di prove di taglio ⁽⁴⁾ sull'argilla naturale costipata

⁽⁴⁾ La resistenza a taglio del materiale è stata determinata con una prova di tipo particolare, che descriviamo brevemente. Il campione in esame C (vedi figura 5) viene inserito in un contenitore rigido A, formato da due parti separate lungo il piano MN. Al contenitore viene applicato uno sforzo F , il quale forma un angolo β con la normale al piano MN; tale sforzo viene incrementato fino a raggiungere la rottura del

all'optimum di PROCTOR, e su due miscele con percentuali di calce rispettivamente del 5 e 10 %.

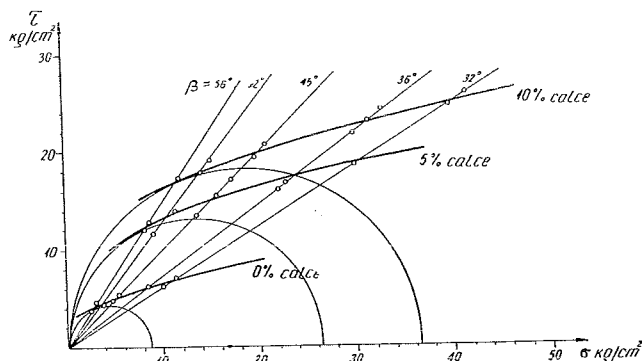


Fig. 6 - Argilla grigio-verde; variazioni della resistenza a taglio in funzione della percentuale di calce.

La coesione, che per l'argilla naturale assume un valore pari a 3,2 kg/cm² sale a 9,5 kg/cm² ed a 15 kg/cm² per le due miscele; l'angolo di attrito invece non risente l'effetto della stabilizzazione e si mantiene pari a 15 ÷ 16° sia per l'argilla naturale che per le miscele. L'aumento della resistenza a taglio delle argille stabilizzate è quindi da attribuire esclusivamente ad un aumento della coesione.

Le esperienze descritte hanno confermato che la calce è un mezzo molto efficace per la stabilizzazione di argille anche a granulometria molto fina. Occorre, però rilevare che l'impiego della calce come stabilizzante nelle miniere a cielo aperto risulta molto dispendioso; per tale ragione si è indagato sulla possibilità di adottare come sostanze leganti i prodotti di rifiuto (ceneri) di centrali termoelettriche e di cementifici.

L'effetto di stabilizzazione delle ceneri è dovuto al loro contenuto in ossido di calcio; esse danno luogo, una volta poste a contatto con le argille, a processi

campione. Noto il valore di β , è possibile determinare la tensione tangenziale τ e normale σ agenti sul campione in condizioni di rottura.

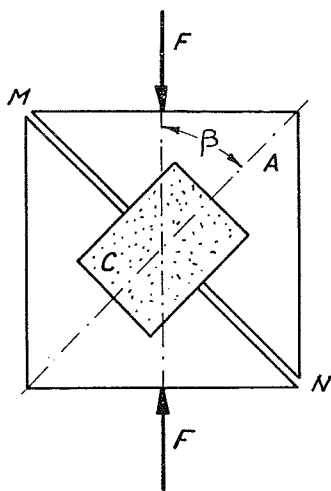


Fig. 5 - Schema dell'apparecchio per la determinazione della resistenza a taglio.

L'angolo β può essere fatto variare; è quindi possibile determinare una serie di coppie di valori τ , σ a rottura e tracciare la curva intrinseca del materiale.

analoghi a quelli già esaminati relativamente alla stabilizzazione con calce. Oltre all'effetto fisico-chimico le ceneri producono anche un effetto puramente meccanico, in quanto esse vengono sempre aggiunte alle argille in quantità rilevanti.

In Bulgaria le ceneri delle centrali termoelettriche vengono usate comunemente nell'edilizia; le loro proprietà dipendono da numerosi fattori fra i quali citeremo il tipo di carbone da cui esse derivano, la temperatura di combustione ed il grado di finezza. Nei riguardi della stabilizzazione la loro maggiore o minore efficacia dipende dalla quantità di cationi polivalenti in esse presenti; pertanto non tutti i tipi di cenere sono utilizzabili (ad esempio, sono da scartare tutte le ceneri trasportate in acqua).

Le nostre esperienze sono state effettuate con ceneri prelevate da centrali termoelettriche poste in vicinanze del complesso minerario di cui si è detto; si tratta di ceneri con ridotte percentuali di ossido di calcio, e pertanto i risultati ottenuti sono stati poco soddisfacenti.

L'aggiunta di cenere provoca in misura molto ridotta lo sviluppo di processi di aggregazione nell'argilla pliocenica grigio-verde; le caratteristiche di tale argilla (fig. 2) risultano quasi immutate.

A contatto con l'acqua la miscela rigonfia, ed i risultati delle prove di resistenza a taglio non differiscono sensibilmente da quelli dell'argilla allo stato naturale.

Poco più efficace risulta la stabilizzazione con le stesse ceneri per il caso dell'argilla pliocenica gialla (fig. 3).

Per migliorare l'effetto stabilizzante della cenere, si pensò di aggiungere una certa quantità di calce viva. Attraverso una serie di prove è stato rilevato che la miscela migliore è costituita da una percentuale in volume di cenere del 15 ÷ 20 %, più una percentuale di calce viva del 4 ÷ 5 % in peso rispetto al peso dell'argilla essiccata all'aria. Con tale miscela, nel caso dell'argilla grigio-verde si sono ottenuti valori della resistenza e compressione a 30 giorni pari a 16 kg/cm²; il miglioramento è quindi paragonabile a quello ottenuto con una aggiunta del 10 % di sola calce (v. fig. 4).

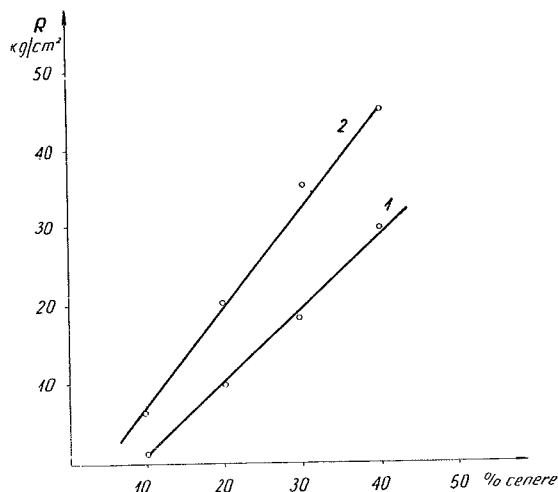


Fig. 7 - Argilla grigio-verde; variazione della resistenza a compressione R in funzione della percentuale di cenere di cementificio. La curva 1 è relativa a provini con 7 giorni di stagionatura, la curva 2 a provini con 30 giorni di stagionatura.

Molto soddisfacenti sono stati invece i risultati ottenuti con l'impiego di ceneri provenienti dalle ciminiere dei cementifici. Queste ceneri, che si raccolgono in quantità giornaliere di $20 \div 30$ ton. per ogni stabilimento, risultano molto ricche di ossido di calcio e di cationi polivalenti. Aggiunge di queste ceneri in percentuali del 30% in peso comportano variazioni delle caratteristiche delle argille della stessa entità di quelle che si hanno nelle miscele di calce ed argilla (Fig. 2 e 3). Ad esempio in fig. 7 si rileva che la resistenza a compressione dell'argilla grigio-verde stabilizzata con il 30% di ceneri raggiunte a 30 giorni il valore di 35 kg/cmq.

I risultati ottenuti mostrano che le ceneri dei cementifici possono sostituire efficacemente la calce nella stabilizzazione delle argille plastiche.

Allo scopo di definire la tecnologia più idonea per la stabilizzazione dei piani stradali e delle linee ferroviarie si è proceduto ad indagini in sito che sono state condotte su tre settori sperimentali per una superficie di circa 1.000 m².

Col proposito di ottenere uno strato stabilizzato dello spessore di 15 cm furono adoperate le seguenti quantità di sostanze leganti:

- I settore: calce viva, $25 \div 30$ kg/mq
- II » calce viva, $10 \div 15$ kg/mq + cenere di centrale termoelettrica, $50 \div 70$ kg/mq
- III » cenere di cementificio, $50 \div 70$ kg/mq.

Le operazioni successive erano le seguenti:

a) Spianamento del tracciato mediante bull-dozer; in fig. 8 si vede lo stato del terreno prima dello spianamento.

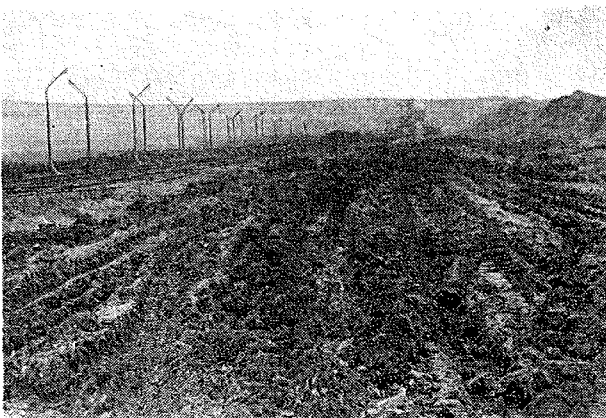


Fig. 8 - Aspetto del terreno prima della stabilizzazione.

b) Spargimento delle sostanze leganti; con un vagone di 20 ton. si copriva una superficie di circa 300 mq.

c) Mescolamento dell'argilla con le sostanze leganti. Questa operazione (fig. 9) risultava enormemente facilitata dai processi fisico-chimici che portavano alla disgregazione della massa argillosa.

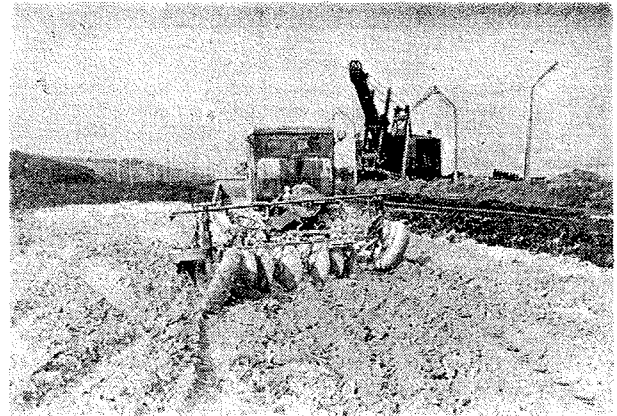


Fig. 9 - Miscelazione dell'argilla con le sostanze leganti.

d) Costipamento della miscela, dopo il mescolamento ed uno spianamento effettuato dal bull-dozer con lama calata in retromarcia. Sono stati provati vari tipi di rulli; quelli più pesanti davano luogo a fenomeni di rifluimento, mentre usando quelli leggeri (fig. 10) erano necessari numerosi passaggi per ottenere elevati pesi dell'unità di volume ($\gamma = 1,9$ t/m³).

I risultati migliori sono stati ottenuti con un pesante autocarro (l'impresa mineraria non disponeva sul posto di rulli gommati); con 8 \div 10 passaggi si ottenevano pesi dell'ordine di $1,9 \div 2$ t/m³.

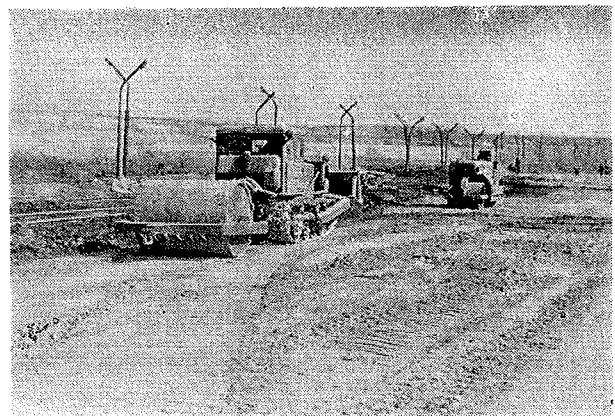


Fig. 10 - Costipamento dell'argilla stabilizzata.

Le indagini fin qui esposte ci hanno permesso di mettere in luce le ampie possibilità che presenta la stabilizzazione delle argille plastiche nell'esercizio delle miniere a cielo aperto.

Le centrali termoelettriche possono offrire quantità praticamente illimitate di ceneri, le cui proprietà leganti possono essere migliorate con aggiunte di modeste quantità di calce. È comunque necessario approfondire gli studi finora condotti, soprattutto per perfezionare la tecnologia della stabilizzazione con particolare riguardo ai problemi propri dell'esercizio delle miniere a cielo aperto.

Bibliografia

- [1] GROSSMAM W.: *Betrachtungen über die Bodenstabilisierung in den Braunkohlentagebauen*. Bergbautechnik, 1962, n. 3.
- [2] *Hydrated Lime Stabilizes Road bed*. Mod. rails roads, 1962, n. 3.
- [3] SAKEB F.: *Stabilizzazione delle argille con calce idrata*. Geotecnica, 1961, n. 1.
- [4] ZIMMERMANN: *Kalkstabilisierung im Wegebau der Marsch*. Wasser und Boden, 1960, n. 3.
- [5] BESRUK V. M., YASTREBOVA L. N., etc.: *Sovremenniyе metody stroitelstva dorojnich osnovanii i pokritiya na gruntov ukreplennich zementom, issvestiyu, bitumom diyoghtem*. Moskva, 1960.
- [6] GORKOVA I. M.: *Zakonomernosti izmeneniya mechanicheskikh svoistv glinistich porod v zavissimost ot vlanjnosti i strukturnovo sostoyaniya*. Trudi Laboratorii Ghidrogheol. problem, Moskva, 1960.
- [7] GUMENSKII B. M., NOVOJILOV G. F.: *Tiksotropiya gruntov i eyo uciót pri stroitelstve avtomobilnich dorogh i mostov*. Moskva, Avtotransizdat, 1961.
- [8] EGOROV I. V.: *Ukrepleniye pereuvlajnnich svoyasnich gruntov molotoi negascennoi izvestiyu*. Materiali sovestaniya p zakreplenyu i uplotneniyu gruntov. Kiev, 1962.
- [9] LEVCIANOVSKI G. N.: *Nekotoriye voprosi teorii izvestkovaniya pocivo gruntov v dorojnostroitelnich zelyach*. Trudi sovestaniya po teoreticeskim osnovam techniceskoi meliorazii gruntov. Moskva, 1960.
- [10] REHBINDER P. A.: *Fisiko-chimicheskaya mehanika kak osnova zakrepleniya gruntov v dorojnom stroitelstve i proizdstve stroitelnich materialov na osnove gruntov*. Trudi sovestaniya po teoreticeskim osnovam techniceskoi meliorazii gruntov. Moskva, 1960.

STABILISATION DES ARGILES GRASSES POUR BASE DU
BALLAST DES CHEMINS-DE-FER TEMPORAIRES DANS
LES MINES AU CIEL OUVERT

Sommaire: On rapporte les resultats de recherches en laboratoire et « in situ » sur la stabilisation des argiles grasses avec chaux vive en poudre et matériaux déchets (cendre de centrales thermoelectriques et d'usines productrices de ciment). On note les conditions spécifiques pour la stabilisation des sols dans les mines au ciel ouvert.

STABILIZATION OF FAT CLAYS AS A BED OF TEMPORARY
RAILWAYS IN OPEN PITS

Summary: Laboratory and « in situ » test results are exposed about the stabilization of fat clays with lime and fall products (fly-ash and cement factories by-products). The specific requirements for the stabilization of soils in open pits are examined.