



*Università degli Studi di
Palermo*

Meccanica dei Materiali e delle Strutture

Vol. 1 (2010), no.3, pp. 44-55

ISSN: 2035-679X

Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Aerospaziale - DICA

Tecniche esecutive e controllo di qualità dei lavori in terra-calce

Prof. Ing. Bernardo Celauro

Professore Ordinario di “Costruzione di strade” – Dipartimento di Ingegneria delle Infrastrutture Viarie

Università degli Studi di Palermo

Email: bernardo@celauro.unipa.it

1. STUDI ED ATTIVITA' IN FASE DI ESECUZIONE DEI LAVORI.

Sebbene si tratti di una tecnica largamente sperimentata da diversi anni, ormai, e sviluppata per impieghi differenti che vanno dalla realizzazione di rilevati (stradali, ferroviari ed aeroportuali) alla formazione di strati di sottofondazione ed anche di fondazione delle pavimentazioni, la stabilizzazione con calce (o con calce e cemento), per essere applicata secondo le attuali regole dell'arte, richiede:

- conoscenze tecniche comprovate negli studi di progetto delle miscele e nell'adeguamento della composizione delle stesse, in corso d'opera, in relazione alla variabilità dei fattori di cantiere (contenuto naturale d'acqua dei terreni, condizioni climatiche, dispersioni di dosaggio);
- metodi rigorosi nell'esecuzione dei lavori e nel controllo di qualità dei prodotti finiti;
- attrezzature e macchine da cantiere specifiche e con prestazioni adeguate alle finalità del trattamento.

Con riferimento alla composizione delle miscele, occorre aver presente che le indagini e gli studi di trattamento effettuati in fase di progettazione contengono, già, indicazioni indispensabili per le valutazioni di natura tecnica-economica di progetto (idoneità delle terre al trattamento con calce o con calce e cemento, dosaggi prevedibili, confronti con tecniche alternative) e per le condizioni di esecuzione da considerare nelle norme tecniche di appalto.

Essi, tuttavia, tengono conto di una situazione media presunta e, prima dell'esecuzione dei lavori, vanno necessariamente approfonditi, per tener conto delle effettive condizioni di cantiere, specialmente, per quanto riguarda:

- l'omogeneità delle caratteristiche di natura dei terreni da trattare (granulometria, plasticità, contenuto di sostanze nocive al trattamento con calce) ;⁴⁴
- per data terra, il contenuto naturale d'acqua al momento dell'esecuzione dei lavori e le sue possibili variazioni in relazione alle condizioni climatiche ed ai processi di fabbricazione delle miscele;
- le caratteristiche della calce (o delle calci) da utilizzare nei lavori, in quanto, generalmente, quella approntata in cantiere è diversa da quella impiegata negli studi di laboratorio svolti in fase di progettazione.

Una volta affidati e/o consegnati i lavori, pertanto, occorre svolgere ulteriori indagini di dettaglio, generalmente mediante pozzetti esplorativi, per l'identificazione e la suddivisione in zone omogenee dei terreni da trattare.

Quindi, per data terra e per data destinazione d'uso delle miscele, occorre condurre, con impiego dei prodotti di trattamento che effettivamente saranno utilizzati dall'Impresa, uno studio di costipamento Proctor e di portanza immediata *IPI* formalmente analogo a quello svolto in fase di progettazione. I risultati di tale studio permetteranno di definire i riferimenti effettivi da considerare in corso d'opera riguardo:

- ai dosaggi in calce necessari per assicurare le prestazioni (valori di *IPI*) richieste alle miscele, in funzione delle variazioni del contenuto d'acqua;
- ai controlli della qualità del costipamento mediante misure di densità in situ.

Il flusso delle operazioni delle attività da svolgere in fase di esecuzione dei lavori potrà essere articolata, allora, come segue:

- a) verifica ed integrazione dei dati di progetto relativi alle terre di cui si prevede il trattamento attraverso indagini di campo e prove di laboratorio coi leganti effettivamente da impiegare;
- b) valutazione delle risorse di cantiere per la gestione in qualità dei lavori (attrezzature e macchine per l'esecuzione dei lavori, laboratorio e mezzi per il controllo di qualità, misure di protezione ambientale);
- c) predisposizione di un sistema per la gestione della qualità dei lavori basato sulla qualificazione preventiva dei materiali elementari (terra, prodotti di trattamento e loro miscele) e sulle prove di processo, come appresso specificato;
- d) messa a punto dei processi produttivi attraverso prove preliminari di campo (prove di processo), finalizzate a verificare, mediante controllo "a priori", che le prestazioni specificate in contratto vengano effettivamente soddisfatte. Nel corso di dette prove, inoltre, verranno definite le modalità esecutive delle diverse operazioni elementari di produzione delle miscele (preparazione dei terreni, correzione di umidità, spandimento dei prodotti di trattamento, miscelazione, regolazione degli spessori di stesa e costipamento). Dette modalità, validate dalle misure effettuate nel corso delle prove preliminari di processo, rappresenteranno le condizioni di corretta esecuzione (regole dell'arte) da adottare, a livello operativo, e da tenere costantemente sotto controllo, anche attraverso prove semplici od a grande rendimento da associare ai controlli di ricezione previsti in Contratto;
- e) monitoraggio in continuo (con le frequenze di prova indicate nelle Norme Tecniche di Appalto) della natura e del contenuto naturale d'acqua dei terreni, della qualità dei prodotti di trattamento, delle modalità di esecuzione e della qualità degli strati posti in opera.

2. MEZZI E MODALITA' DI ESECUZIONE DEI LAVORI

2.1. Attrezzature e macchine per il trattamento

Per i lavori di stabilizzazione con calce delle terre argillose di scavo vengono utilizzate:

- attrezzature comuni anche ad altri lavori di movimento di terra (macchine per lo scavo ed il carico delle terre scavate sui mezzi di trasporto, autocarri/dumpers per il trasporto delle stesse in rilevato, bulldozers e livellatrici per la stesa a strati ed il livellamento, innaffiatrici e rulli lisci per la finitura superficiale degli strati);
- attrezzature specifiche, indispensabili a garantire la qualità dei lavori in terra-calce (sili di stoccaggio dei leganti, mezzi per la preparazione dei terreni, mezzi per l'eventuale umidificazione, spanditrici di calce, macchine per la miscelazione, mezzi per il costipamento).

Sili di stoccaggio dei leganti

Sono necessari per disporre di una riserva di capacità sufficiente ad evitare "pause" (o arresti del cantiere) a causa di ritardi nell'approvvigionamento, per proteggere la calce dai rischi di ricarbonatazione, per permettere il raffreddamento del prodotto consegnato ancora caldo e la neutralizzazione delle cariche di elettricità statica. I sili, per motivi di sicurezza, debbono essere forniti di maniche e di filtri, per evitare dispersione di polvere durante i travasi effettuati sia per il rifornimento dei sili, sia per quello delle spanditrici di calce.

Mezzi per la preparazione dei terreni

La preparazione dei terreni da trattare con calce e/o con altro legante prevede, in generale, la scarificazione del terreno in situ e, se presenti, l'eliminazione dei blocchi di dimensioni tali da impedire o rendere difficoltosa la miscelazione. Per tali operazioni si utilizzano erpici a dischi o aratri polivomere portati (o trainati) da un bulldozer sul quale, anteriormente, può anche essere montato un "pettine" per la selezione e l'allontanamento dei blocchi di grosse dimensioni. Erpici ed aratri sono impiegati, pure, per la miscelazione della terra con la calce, quando non si richiede che questa sia particolarmente spinta (e fine), com'è il caso di miscele destinate a strati di rilevato posti a più di 2 metri dal piano di posa della pavimentazione. Gli erpici, nonostante siano dotati di dischi di grande diametro (circa 100 cm), permettono una profondità di scarificazione o di miscelazione di 20 cm come massimo. Gli aratri (con tre o più vomeri) possono raggiungere, invece, profondità maggiori, fino a 70 cm circa. In fase di miscelazione, tuttavia, la loro azione è meno efficace di quella degli erpici a dischi.

Va fatto notare che, nel caso di "trattamento in trincea", la profondità di scarificazione va commisurata a quella permessa dai mezzi di miscelazione e, per miscele destinate ad essere impiegate nello stesso posto (ad esempio, bonifiche dei sottofondi di trincea), quest'ultima va commisurata alle prestazioni offerte dai mezzi di costipamento.

Mezzi per l'umidificazione

Nei casi in cui occorre accrescere il contenuto d'acqua della terra, per rispettare le condizioni necessarie alla produzione delle miscele ed al loro corretto costipamento, si avrà cura che l'acqua di apporto sia ripartita in modo uniforme ed omogeneo in seno a tutto lo spessore da trattare. Per fare ciò, è opportuno utilizzare apposite cisterne munite di pompe (con portata asservita alla velocità di avanzamento e regolabile) e dotate di dispositivi atti a distribuire l'acqua all'interno

della massa terrosa e non in superficie, allo scopo di evitare ruscellamenti lungo le tracce dei veicoli e concentrazioni della stessa nei punti bassi (**Figura 1**).⁴⁵



Fig 1 - Umidificazione all'interno dello strato

Spanditrici di calce

Lo spandimento, insieme alla miscelazione, costituisce la fase più importante e delicata del trattamento con calce. Prescindendo dallo spandimento “a mano”, tecnicamente valido, ma che può essere accettato per piccoli cantieri, per tale operazione si richiede, oggi, l'impiego di spanditrici automatiche munite di dosatore asservito alla velocità di avanzamento. Requisiti essenziali per le spanditrici sono la facilità di spostarsi su terreni di difficile trafficabilità (basso indice di consistenza) e la regolarità di distribuzione del legante. L'evoluzione che si è avuta per questi mezzi, al fine di garantire dosaggi medi pari ai valori di riferimento e dispersioni degli stessi estremamente contenuti, ha portato a classificare le moderne spanditrici in base alle caratteristiche che favoriscono l'affidabilità del rispetto dei dosaggi e, cioè:

- precisione dello spandimento, data dai coefficienti di variazione longitudinale e trasversale della massa di prodotto sparsa;
- presenza di dispositivi per la misura e registrazione in continuo della massa di prodotto sparsa e della distanza (o superficie) coperta in fase di spandimento;
- portata del dosatore, in quanto è preferibile spandere in una sola passata, per evitare rischi di “dimenticanze” in corso d'opera;
- presenza di accessori utili quali i dispositivi per variare la larghezza dello spandimento ed i dispositivi di allarme per serbatoio prossimo allo svuotamento.

Per motivi ambientali e per la tutela della salute dei lavoratori è indispensabile che i mezzi di spandimento siano provvisti di “gonne” flessibili che accompagnino la calce fin quasi a terra, evitandone la dispersione in aria.

Macchine per la miscelazione

Nella produzione di miscele destinate a strati di rilevato posti a più di 2 metri dal piano di posa della pavimentazione possono adoperarsi erpici ed aratri utilizzati anche per la scarificazione dei terreni, nonché, per una miscelazione più fine, polverizzatori ad asse orizzontale. Questi ultimi sono indispensabili, invece, per ottenere una fine ed intima dispersione della calce nella massa terrosa, così com'è necessario per miscele da destinare alla parte superiore dei rilevati (parte a meno di 2 metri dal piano di posa della pavimentazione) e, specialmente, agli strati di sottofondo delle pavimentazioni.

Evoluzione dei pulvimixer derivati dalle frese agricole (**Figura 2**), i moderni polverizzatori presentano un tamburo ad asse orizzontale munito di “coltelli” intercambiabili e di forma adatta al lavoro da compiere, sostenuto al centro degli assi della macchina e ruotante in senso contrario a quello di avanzamento. Per evitare dispersioni di polvere, il tamburo è chiuso all'interno di una

camera di miscelazione che, nei tipi più recenti, è munita di ugelli per spruzzare acqua, ove necessario.



Fig. 2 - Miscelatrice con fresa ad asse orizzontale

In fase di messa a punto del processo è possibile intervenire sul grado di polverizzazione della miscela (finezza di miscelazione), facendo variare la velocità di rotazione del tamburo rispetto a quella di avanzamento della macchina nonché l'apertura d'uscita ed il grado di riempimento della camera di miscelazione.

Macchine per la stesa ed il livellamento

Per la stesa ed il livellamento degli strati di rilevato possono adoperarsi tradizionali bulldozers (apripista) per lavori comuni di movimento di materie. La stesa va regolata in modo tale da ottenere, a costipamento ultimato, spessori resi degli strati in opera di circa 20÷40 cm, in relazione alle prestazioni offerte dai mezzi di costipamento ed alla possibilità di controllare l'addensamento delle miscele nella parte inferiore dello strato.

Per la formazione degli strati di sottofondazione (strato superiore del rilevato e strato di bonifica di trincea), considerato il livello di regolarità richiesto al piano di posa della pavimentazione, la stesa va effettuata esclusivamente mediante livellatrice e realizzata in sovrassessore. Dopo costipamento ed eventuale inaffiamento di superficie, si potrà completare il livellamento (per asportazione di materiale) ed il costipamento finale.

Mezzi per il costipamento

Per il costipamento degli strati in terra stabilizzata con calce possono essere utilizzati rulli a piedi costipanti, compattatori gommati (a pneumatico) e rulli vibro-gommati, pesanti o molto pesanti, in relazione allo spessore di stesa. Per gli strati di sottofondo, considerate le prestazioni richieste alle miscele, occorre provvedere con mezzi molto pesanti. Solo per la finitura di superficie, di fine giornata, possono essere impiegati rulli lisci in condizioni statiche o dinamiche, mantenendo in ogni caso basso livello di vibrazione, per evitare "sfogliamenti" della parte più superficiale dello strato.

2.2. Modalità di esecuzione dei lavori

In senso stretto, il trattamento con calce (e/o con altro legante) consiste nello spandere la massa di prodotto prevista, rapportata alla massa (asciutta) da trattare, e nel miscelarla con la terra fino ad ottenere una miscela omogenea per colorazione e granulometria (finezza).

A seconda del luogo in cui vengono effettuate le operazioni di spandimento e di miscelazione si distingue tra trattamento in situ ed in impianto. Quest'ultimo, invero, può essere preso in considerazione per la stabilizzazione con cemento (o con calce e cemento) di terre granulari a granulometria uniforme e, in ogni caso, tali da non porre problemi di intasamento nel corso della produzione delle miscele.

Per il trattamento dei terreni fini plastici, invece, la tecnica corrente è quella del **trattamento in situ** che, a sua volta, può essere realizzato:

- *in trincea* (o nel luogo di estrazione della terra, se occorre far riferimento a cava di prestito), sia per miscele da trasportare in rilevato, sia per quelle da utilizzare nello stesso posto, com'è il caso delle bonifiche dei piani di posa dei rilevati e dei sottofondi di trincea;
- *in rilevato*, per impieghi solo in rilevato.

Il **trattamento in trincea** si compone delle seguenti fasi: preparazione del terreno in situ – eventuale umidificazione – spandimento della calce – miscelazione – carico delle miscele e trasporto nei siti d'impiego – stesa in strati con eventuale ulteriore umidificazione – costipamento finale.

Questa tecnica, che comporta l'estrazione a strati del materiale, permette di ben governare l'omogeneità delle miscele e di trarre profitto dalle diverse manipolazioni (carico, trasporto, scarico e stesa nel luogo di impiego) per migliorarne l'omogeneità e per favorire la riduzione del contenuto d'acqua in condizioni di prevalente evapotraspirazione. Nel caso di miscele per le quali interessano le prestazioni di lungo termine, tuttavia, essa richiede che la produzione del cantiere di trattamento sia ben coordinata con quella del cantiere di posa in opera, per evitare che volumi di terra trattata abbiano a subire attese prolungate (più di 4÷5 ore) prima di essere poste in opera, con conseguenti cadute di resistenza meccanica. Occorre evitare, in ogni caso, che il carico sui mezzi di trasporto, effettuato mediante pale caricatrici, possa inglobare nel materiale miscelato terra non ancora trattata.

Il **trattamento in rilevato** prevede, invece, la seguente successione di operazioni: scavo e selezione della terra da trattare - trasporto della stessa in rilevato – stesa in strati di spessore costante (cosa essenziale per il rispetto dei dosaggi) con eventuale frammentazione delle zolle ed umidificazione - spandimento del prodotto di trattamento - miscelazione intima della terra con la calce – costipamento finale.

Questo processo, che non pone vincoli quanto alle modalità di scavo, è il solo che può essere praticato in presenza di terre provenienti da scavi di fondazione delle opere d'arte; inoltre, conviene quando i terreni prodotti dagli scavi di trincea risultano disomogenei e si pone il problema di selezionare quelli che richiedono un trattamento effettivo.

Il trattamento in rilevato, tuttavia, comporta rischi di disomogeneità del materiale posto in opera (per lenti o sandwich di terra non trattata), se la profondità d'azione dei mezzi di miscelazione risulta inferiore allo spessore di stesa.

Nel seguito sono descritte le operazioni considerate fondamentali nei processi di trattamento con calce.

Preparazione del terreno – Essa comprende, allo stesso tempo, la scarificazione del terreno e lo spietramento. La *scarificazione* consiste nello scasso del terreno in situ per lo spessore da trattare e nella frammentazione delle zolle mediante successivi passaggi di aratri polivomere od erpici a disco.

Una scarificazione piuttosto spinta del terreno favorisce la risalita in superficie dei blocchi di grosse dimensioni eventualmente presenti nella massa di terra, la riduzione dell'umidità della

terra per evapotraspirazione, la penetrazione dell'acqua in caso di umidificazione, la regolarità dello spandimento e la produttività dei mezzi di miscelazione.

Lo *spietramento* consiste nell'allontanamento degli elementi lapidei di grossa pezzatura che, in fase di miscelazione, potrebbero impedire o rendere difficoltosa l'operazione. Le dimensioni massime accettabili per detti elementi dipendono essenzialmente dai mezzi impiegati per la miscelazione: nel caso di aratri ed erpici occorre che sia $D \leq 250$ mm, mentre ove è previsto l'impiego di polverizzatori ad asse orizzontale occorre che sia $D \leq 150$ mm, in generale, e per miscelazioni spinte destinate a strati di sottofondo $D \leq 100$ mm.

Umidificazione della terra – Si tratta di un'operazione spesso sottovalutata o trascurata (per l'impegno organizzativo richiesto in cantiere), ma indispensabile, per la corretta esecuzione dei lavori in terra-calce, quando, per condizioni di stato idrico dei terreni di scavo e/o per condizioni climatiche di forte evapotraspirazione, il contenuto d'acqua delle miscele risulta inferiore a quello richiesto per il loro corretto costipamento.

Occorre aver presente, infatti, che per miscele destinate alla realizzazione di strati di sottofondazione o, in ogni caso, per impieghi per i quali interessano gli effetti di lungo termine della stabilizzazione con calce, la presenza di un contenuto d'acqua minimo nelle miscele (molto prossimo all'umidità ottimale di costipamento della prova Proctor Normale) è condizione indispensabile per il corretto sviluppo dei processi pozzolanici.

Operando in periodo estivo, possono riscontrarsi casi per i quali occorrono elevati apporti d'acqua per accrescere l'umidità delle miscele anche di 6÷9 punti percentuali. In questi casi e tutte le volte in cui occorre incrementare il tenore in acqua di oltre il 2÷2,5%, a livello esecutivo, è necessario che la somministrazione d'acqua venga data con gradualità, per sequenze successive di umidificazione e miscelazione, considerando tempi di attesa tra due sequenze più o meno ampi (generalmente da 1 a 4 ore), in funzione della plasticità della terra e del contenuto di argilla.

Spandimento della calce – Per aree poco estese, com'è il caso dei cantieri edili, lo spandimento può essere effettuato anche "a mano", distribuendo la calce contenuta in sacchi sulla superficie da trattare, preliminarmente suddivisa a maglie quadre. Nella definizione dei riquadri si farà in modo che l'area di ciascuna maglia corrisponda, in relazione allo spessore da trattare ed al dosaggio in calce previsto, alla massa di calce contenuta in un sacco.

L'operazione prevede, successivamente, l'apertura dei sacchi e la distribuzione uniforme del loro contenuto all'interno della maglia interessata.

L'impiego di una spanditrice richiede, in primo luogo, la taratura della macchina e la messa a punto del processo in funzione delle condizioni del suolo, del legante utilizzato (per i flussi consentiti), dei dosaggi da applicare e delle dispersioni tollerate. Ciò può essere fatto nel corso delle prove preliminari di campo, facendo variare la portata del dosatore con la velocità di spostamento e misurando la massa di calce sparsa (media e coefficiente di variazione) attraverso quella raccolta entro teli di superficie nota (1,00x1,00 ovvero 0,71x0,71 metri quadri) disposti sul terreno, lungo le strisciate di stesa.

In corso d'opera, bisogna curare che lo spandimento venga effettuato secondo le modalità stabilite in fase di regolazione della spanditrice ed esclusivamente sulla porzione di terreno che si prevede di trattare entro la giornata lavorativa; inoltre, si deve impedire a qualsiasi mezzo, eccetto che a quelli adibiti alla miscelazione, di attraversare la porzione di terreno sulla quale è stato steso il legante, fino a quando questo non sia stato completamente miscelato.

Miscelazione – La miscelazione della terra con la calce può essere effettuata mediante successivi passaggi di aratri (a vomere o a disco) o mediante passaggi di frese ad albero orizzontale.

L'impiego di aratri o di erpici è ammessa solo per miscele grossolane destinate agli strati inferiori dei rilevati; per gli strati superiori (in ogni caso, per gli strati posti a meno di 2 metri dal piano di posa della pavimentazione) e per gli strati di sottofondazione occorre impiegare frese ad asse orizzontale.

Il numero dei passaggi da effettuare dipende, da un lato, dal tipo di mezzo e, d'altro lato, dall'omogeneità e dalla finezza (granulometria e grado di polverizzazione) richiesti alle miscele in relazione alla destinazione d'uso.

Le frese ad asse orizzontale (polverizzatori), come detto, sono molto più efficaci degli aratri e degli erpici a disco e permettono di ottenere una miscelazione intima della terra con la calce (secondo i requisiti di omogeneità e di finezza richiesti per gli strati di sottofondazione), generalmente in non più di tre o quattro passate. Riguardo alla profondità d'azione (riferita allo spessore dello strato realizzato, dopo costipamento), i polverizzatori più diffusi consentono di realizzare spessori resi di 30÷35 cm al massimo; quelli di maggiore prestazione presenti sul mercato permetterebbero di raggiungere anche 50 cm. Tali spessori, invero, possono essere considerati solo per formare miscele da impiegare in luoghi diversi da quello di produzione, dato che non esistono attualmente compattatori capaci compattare efficacemente miscele terra-calce per spessori superiori a 40 cm.

La consistenza della terra, la presenza di ciottoli in quantità significative, la profondità da trattare determinano l'equipaggiamento della miscelatrice (tipi di "coltelli" del tamburo) e la scelta delle modalità operative (profondità d'azione e numero di passate). Queste ultime, inoltre, vanno stabilite in funzione della necessaria omogeneità di ripartizione del legante in tutto lo spessore trattato e della finezza desiderata per le miscele.

I fattori da controllare, sia in fase di regolazione della macchina che durante l'esecuzione, sono la granulometria apparente delle miscele e la profondità di trattamento secondo l'omogeneità richiesta. La granulometria delle miscele (dimensione massima dei grumi non superiore a 30÷40 mm, per strati di rilevato, ed a 20 mm, nel caso di strati di sottofondazione) e l'omogeneità vanno valutate per setacciatura a secco, la prima, ed attraverso misure di *pH* su campioni prelevati a differente profondità, la seconda.

Le misure di *pH*, in particolare, consentono di valutare, a posteriori, cioè dopo miscelazione, il dosaggio in calce e la sua dispersione.

Nel corso delle prove preliminari di processo è opportuno stabilire una corrispondenza tra le misure di granulometria apparente e di omogeneità delle miscele con l'aspetto visivo delle stesse. Tale corrispondenza, infatti, permette di alleggerire i controlli in corso di esecuzione, che possono essere effettuati in buona parte mediante esame visivo, riservando le misure alle derive evidenziate dai controlli visivi ed ai casi dubbi.

3. CONTROLLO DI QUALITÀ DEI LAVORI

3.1. Sistema per la gestione della qualità dei lavori

Nell'ambito dei Movimenti di Terra, il controllo di qualità dei lavori, inteso come misure effettuate "a posteriori", per verificare che le prescrizioni contrattuali siano state rispettate dall'esecutore, seppure significativo, ormai da tempo è considerato poco produttivo ed efficace e, pertanto, viene abbandonato a favore di un controllo che:

- a) mira ad anticipare i problemi di esecuzione, rendendo possibili azioni correttive, prima che abbiano a manifestarsi difetti ed anomalie;
- b) eviti situazioni di penalità o di rifiuto di prodotti o manufatti non conformi.

Tale obiettivo può essere soddisfatto attraverso la predisposizione di un sistema per la gestione in qualità dei lavori che:

- ancor prima di dare avvio alla loro esecuzione, massimizzi la parte del controllo che può essere effettuata “a priori”;
- durante l’esecuzione faccia intervenire il “giudizio dell’ingegnere”, cioè un giudizio tecnico fondato sia sui risultati delle misure, sia su come appare essere condotto il cantiere rispetto ai riferimenti (modalità di corretta esecuzione) stabiliti nelle prove preliminari di processo;
- riduca al minimo il controllo “a posteriori” (cioè le prove di accettazione degli strati posti in opera), da ritenere comunque significativo ed indispensabile per la verifica dei requisiti contrattuali.

In questo sistema, con particolare riferimento ai lavori in terra-calce, la parte del controllo effettuata “a priori” deve comprendere:

- l’identificazione delle terre da trattare, specie per quanto riguarda le condizioni di natura, la loro omogeneità nello spazio e le variazioni dello stato idrico;
- la qualificazione preventiva della calce e delle miscele che effettivamente saranno impiegate. Per queste ultime, in particolare, gli studi di portanza immediata IPI e di costipamento Proctor Normale, debbono fornire i riferimenti per i controlli di qualità ed indicazioni circa le variazioni delle prestazioni fisico-meccaniche in funzione delle variazioni del tenore in acqua e del dosaggio in calce;
- la qualificazione delle attrezzature (comprese quelle per il controllo interno) e delle macchine predisposte dall’impresa;
- la realizzazione di prove preliminari di campo (prove di processo) nel corso delle quali, per data terra da trattare e per data destinazione d’uso delle miscele, possano essere messi a punto i processi produttivi (cioè l’insieme delle diverse operazioni elementari di trattamento previste), verificando che i requisiti di contratto siano effettivamente soddisfatti.

Le **prove preliminari di campo**, considerate generalmente elemento essenziale per l’accettazione delle macchine e delle modalità operative nei lavori di movimento di terra, nel caso specifico del trattamento con calce risultano indispensabili per tenere conto della variabile tempo, allorché, per forza di cose, il controllo degli strati finiti non può essere effettuato immediatamente, ma dopo un certo numero di giorni dalla loro esecuzione.

Bisogna considerare, infatti, che la stabilizzazione meccanica progredisce nel tempo insieme a quella chimica, facendo registrare, in conseguenza del consumo della calce libera, una diminuzione del pH delle miscele ed un aumento delle proprietà meccaniche e, quindi, della portanza degli strati posti in opera.

Va fatto notare che, a seconda dei casi e dell’importanza dei cantieri, la consistenza di una prova di campo può farsi variare da quella delle *prove di ottimizzazione* - considerando più fattori e più livelli per ciascun fattore - a quella, molto più semplice e nettamente meno impegnativa, di una *prova di convenienza* dei processi proposti dall’impresa.

In ogni caso, oltre a verificare preventivamente che i processi costruttivi proposti dall’impresa permettono di soddisfare i requisiti di qualità richiesti dal contratto d’appalto, le prove preliminari di campo serviranno a definire le *condizioni di corretta esecuzione* riguardanti ciascuna delle operazioni elementari del trattamento, condizioni che faranno parte dei verbali di prova e che saranno di riferimento al “giudizio dell’ingegnere” sulla condotta dei lavori da parte dell’impresa.

Le prove preliminari di campo potranno essere utilizzate, inoltre, per definire:

- correlazioni tra i criteri di qualità specificati in contratto e altri parametri, che possono essere apprezzati in modo semplice o compatibile con le cadenze di esecuzione, così da avere

- ulteriori strumenti di giudizio (in aggiunta ai controlli di accettazione previsti in contratto) nella valutazione della qualità di esecuzione nelle fasi intermedie del processo;
- per le proprietà meccaniche e chimiche delle miscele, nei casi di interesse, la dipendenza dalla variabile *tempo* delle norme di qualità considerate in contratto;
 - le azioni correttive da adottare in caso di anomalie esecutive.

Fra i parametri che consentono un apprezzamento semplice e ad elevato rendimento della qualità delle lavorazioni conviene ricordare:

- i controlli “a vista” dell’omogeneità e della finezza della miscelazione, per confronto con immagini calibrate con misure di granulometria e di pH/colorazione nelle prove preliminari di processo;
- i controlli del costipamento e della portanza degli strati posti in opera attraverso misure della profondità d’ormai (cedimento permanente Δh) prodotta dal passaggio di un autocarro con asse posteriore di 10 tonnellate, in accordo alla norma SN 670 365.

3.2. Controlli in corso di esecuzione e sui prodotti finiti

Dosaggio in calce

Il controllo interno d’impresa del corretto funzionamento delle spanditrici può essere effettuato mediante misure:

- della superficie coperta dal mezzo fino a svuotamento completo;
- della massa di prodotto sparsa su teli di superficie nota, posti lungo le strisciate di stesa, ad intervalli di 10÷20 metri circa.

Quest’ultima modalità permette di valutare media e dispersione dei dosaggi. La complessità delle operazioni che essa comporta, tuttavia, la fa riservare ai controlli esterni ed alla regolazione delle macchine (ovvero alla taratura delle spanditrici dotate di dispositivo di registrazione in continuo della massa di prodotto sparsa e della distanza percorsa).

I controlli di dosaggio “a posteriori” - cioè a miscelazione avvenuta o sugli strati compattati - risultano più complessi, in quanto richiedono prove derivate dall’analisi chimica (misure di pH) e debbono tenere conto della variabile tempo, dato che il pH delle miscele è correlato, come detto, per data qualità della calce impiegata, alla quantità di calce libera che non si è ancora combinata.

Qualità della miscelazione

I fattori da controllare in questo caso sono:

- l’omogenea ripartizione della calce in tutto lo spessore di terra trattata, che deve apparire di colorazione uniforme e privo di strisce bianche e zollette di calce ancora non miscelata;
- la finezza delle miscele prodotte (granulometria e dimensione massime delle zolle).

Nel corso delle prove di processo, la finezza viene determinata mediante setacciatura a secco, rilevando il D_{95} ; l’omogeneità è valutata, invece, attraverso misure di pH su campioni prelevati a diverse profondità dello strato.

Le scale di corrispondenza che si stabiliscono nel corso di queste prove preliminari tra i valori di finezza ed omogeneità misurati, da un lato, e l’aspetto delle miscele, dall’altro, semplifica notevolmente i controlli in corso di esecuzione, che possono essere limitati in buona parte all’esame visivo (**Figure 3**).



Fig. 3 – Miscelazione grossa 0/40 (sopra) e molto fine 0/20 (sotto).

Qualità del costipamento

Nei lavori in terra-calce il controllo del costipamento degli strati posti in opera effettuato mediante misura della densità in situ può considerarsi significativo e, quindi, valido solo se si è certi del dosaggio in calce, determinato per altra via. Per una data terra trattata con calce ad una data umidità, infatti, una stessa energia di compattazione dà luogo ad una densità secca variabile con la percentuale di calce presente in miscela, nel senso che la densità decresce all'aumentare del dosaggio in calce e viceversa.

Con riferimento ai valori massimi della densità secca determinati, per dato tenore in calce nelle miscele, nello studio Proctor Normale di laboratorio (γ_{OPN}), i controlli dell'addensamento degli strati posti in opera possono prescrivere, salvo esigenze particolari, i seguenti valori di densità secca da riscontrare in almeno il 95% dei casi:

- per strati di rilevato a più di 2 metri dal piano di sottofondo $\gamma_d \geq 0,97 \gamma_{OPN}$
- per strati di rilevato a meno di 2 metri dal piano di sottofondo $\gamma_d \geq 0,99 \gamma_{OPN}$
- per strati di sottofondazione (sia di trincea, sia di rilevato) $\gamma_d \geq 1,00 \gamma_{OPN}$

Prestazioni meccaniche delle miscele e degli strati finiti

Il controllo delle prestazioni meccaniche delle miscele prodotte in cantiere può essere effettuato mediante misure dell'indice di portanza immediata, *IPI*, realizzate sui materiali prelevati in situ immediatamente dopo la miscelazione, compattati e sottoposti a prova in accordo alla EN UNI 13286/47. I risultati delle misure, in relazione alla plasticità delle terre ed alla destinazione d'uso delle miscele, debbono soddisfare i valori minimi previsti in fase di progetto negli studi di formulazione come indicato nel par. 6 di [7]).

Il controllo prestazionale degli strati finiti prevede, invece, la valutazione della portanza attraverso prove di carico con piastra, statiche o dinamiche, per la determinazione:

- del modulo di deformazione/compressibilità Md (con piastra \varnothing 30 cm),
- del modulo di deformazione Ev (con piastra \varnothing 60 cm),
- del modulo dinamico Ed , dedotto da prove con LWD o, ad alta cadenza di misure, col FWD.

Tenuto conto del carattere evolutivo della stabilizzazione con calce, questo genere di controllo richiede che le soglie prestazionali di riferimento siano definite nel corso delle prove preliminari di campo, facendo intervenire la variabile “tempo”.

Nel caso di prove effettuate subito dopo il costipamento delle miscele, il rapporto tra il modulo di deformazione al secondo ciclo di carico e quello al primo ciclo permette di giudicare sull'efficienza del costipamento (occorre che sia soddisfatta la condizione: $Md_2/Md_1 < 2$).

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Tesoriere G., Celauro B., Giuffrè O. - Problemi di esecuzione dei lavori in terra-calce ed indicazioni fornite da studi sperimentali. *Le Strade*, N° 1184, maggio-giugno 1979.
- [2] Celauro B., Giuffrè O. – Guida agli studi di trattamento a calce dei terreni fini in vista di un più esteso impiego di materie locali non tradizionali. *Atti del XIX Convegno Nazionale Stradale A.I.P.C.R.*, Rimini, 8-12 giugno 1982.
- [3] SETRA-LCPC (2000) - Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des remblais et des couches de forme. Guide Technique, ISBN 2-7208-3810-1, Bagnaux, Janvier 2000.
- [4] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Ispettorato per la Circolazione e la Sicurezza Stradale - Studio a carattere pre-normativo delle Norme Tecniche di Tipo Prestazionale per Capitolati Speciali, Roma, 2002.
- [5] UNI EN 14227-11. Miscele legate con leganti idraulici - Specifiche - Parte 11: Terreno trattato con calce Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, luglio 2006
- [6] UNI EN 13286-47. Miscele non legate e legate con leganti idraulici - Parte 47: Metodo di prova per la determinazione dell'indice di portanza CBR, dell'indice di portanza immediata e del rigonfiamento, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, 2006.
- [7] Celauro B. – Criteri e studi di progetto per il trattamento con calce dei terreni fini di scavo. *Bollettino dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Palermo*, ISSN 1972-2117 , Palermo, Maggio/Agosto 2009.