



**Il sistema integrato ALLU PM-PF
a sostegno della stabilizzazione di massa, tecnologia altamente efficace,
versatile ed economica**

IL CONSOLIDAMENTO DELLE TORBE CON STABILIZZAZIONE DI MASSA

Marco Curti*
Quintilio Napoleoni**
Alessandro Pardini***
Maurizio Scarapazzi****

La stabilizzazione di massa è una tecnica altamente efficace, versatile ed economica, come dimostrato da studi eseguiti in varie parti del mondo (EuroSoilStab, 2002), applicabile tra l'altro nei campi dell'Ingegneria Civile e Ambientale. In particolare, il sistema integrato ALLU PM-PF (Giannini, 2008) evidenzia come l'elevata versatilità di questa tecnologia si traduca in un'ottimizzazione dell'intervento in relazione alle esigenze tecnico-economiche di progetto.

Figura 1 -
Il sistema integrato ALLU PM-PF



La stabilizzazione di massa

Con questa tecnica, il consolidamento dei terreni avviene essenzialmente per miscelazione meccanica con cemento o calce e cemento ed, eventualmente, aggiunta di inerti (sabbia).

La scelta della miscela ottimale deriva da più fasi di studio tra loro sequenti e complementari.

La fase iniziale prevede una serie di analisi chimico-fisiche del terreno da trattare propedeutiche per la scelta della tipologia e della quantità minima di legante; successivamente, si procede all'esecuzione di prove di laboratorio volte a definire i parametri meccanici (principalmente la resistenza al taglio e la compressibilità) delle miscele sperimentate. In generale, i risultati dei test di laboratorio forniscono le indicazioni di miscelazione iniziali da verificare e perfezionare mediante la realizzazione di campi prova nei quali si collauda la stabilizzazione ottenuta tramite prove in sito.

Le prove di laboratorio consigliate e le procedure da adottare sono previste dalla Norma "UNI EN 14679:2005 "Esecuzione di lavori geotecnici speciali - Miscelazione profonda", che riprende un esaustivo documento internazionale di stato dell'arte sulla stabilizzazione profonda dei terreni torbosi (EuroSoilStab, 2002).

La fase preliminare di laboratorio è indispensabile in quanto i terreni normalmente oggetto di questi di interventi (torbe, fanghi organici, ecc.)

presentano risposte al trattamento molto variabili in dipendenza delle proprie caratteristiche chimico-fisiche, del tipo e della quantità di legante aggiunto. Lo scopo delle prove di laboratorio è, quindi, quello di valutare il comportamento del terreno in esame, a seguito della miscelazione con cemento e/o calce e inerti sottoposto a un periodo di maturazione di almeno 28 giorni. Si possono così provare più miscele con l'accoppiamento di due o più leganti oppure di leganti e inerti. Le prove che, in generale, vengono eseguite sono prove di compressione uniaassiale a espansione laterale libera con misura della deformazione (Ahnberg, 2006).

La caratterizzazione dei terreni trattati con stabilizzazione di massa

La procedura si articola in diverse fasi durante le quali il campione di terra da trattare, dopo essere stato analizzato e classificato, viene preventivamente miscelato con il legante prescelto.

La miscela ottenuta viene posta a maturare - in genere applicando un modesto precarico - in alcuni stampi cilindrici che determinano le dimensioni finali del provino. Nel caso di torbe, per esempio, è opportuno l'utilizzo di stampi tali da ottenere provini di grande diametro (usualmente non inferiori a 68 mm) per tenere in conto l'effetto delle fibre presenti in questo tipo di suoli.



Le condizioni di maturazione possono essere scelte in base alle esigenze e in relazione a come si prevede essere l'esecuzione futura dell'intervento reale: per esempio, se è prevista l'installazione di un precarico in fase di maturazione in sito - operazione oltretutto sempre consigliata - è opportuno che in laboratorio si simuli questa condizione apponendo dei pesi di costipamento adeguati sui campioni; oppure un altro aspetto da considerare è la presenza di acqua di falda; pertanto, i provini andranno fatti maturare in condizione di saturazione (ad esempio immersi in acqua).

Anche la temperatura, che influenza l'insacco delle reazioni dei leganti, deve essere oggetto di attenzione e di controllo a seconda delle necessità (Ahnberg, 2006).

Una volta trascorso il tempo preventivato prima dell'esecuzione delle prove di laboratorio, i provini vengono estrusi dagli stampi e sottoposti ai test. In ogni caso è possibile effettuare anche altri tipi di prove geotecniche sul materiale ottenuto oltre alle prove a compressione uniassiale, tra cui prove di taglio diretto, triassiali e di compressione edometrica.

Si può così ottenere un quadro completo del comportamento del terreno trattato che avrà caratteristiche completamente differenti da quello di partenza (Cortellazzo et al., 1999).

Grazie alle esperienze raccolte in questa fase preliminare, si è in grado di operare la scelta finale del tipo di legante e della quantità ottimale da adottare, rispettando comunque i criteri di economicità e di fattibilità. Tuttavia, l'esperienza suggerisce che solo con l'esecuzione di campi prova, preparati secondo le specifiche della composizione ottimale di legante e di inerti, si potrà avere una stima puntuale dell'efficacia del trattamento in condizioni reali (Euro-SoilStab, 2002).

I risultati di una sperimentazione su un campo prova a Massarosa (LU)

Un'importante esperienza di caratterizzazione dei terreni torbosi in laboratorio e di esecuzione di un esteso campo prova è stata sviluppata da La Quadrifoglio Scavi Srl di Massarosa (LU) in collaborazione con la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Roma "Sapienza" e con il supporto della Geoplanning Servizi per il Territorio Srl di Roma.

Esperienze di laboratorio

Su un terreno torboso (torba di Massarosa) proveniente dal bacino del lago di Massaciuccoli (LU) è stata studiata l'efficacia del trattamento con cemento Portland al calcareo (CEM II B/LL 32,5 R) e sabbia (materiale misto di scarto di laterizi e sabbia naturale).

Lo studio preliminare è consistito in una serie di analisi chimico-fisiche del terreno in oggetto, volto a descrivere le caratteristiche proprie della torba ai fini sia della classificazione sia all'individuazione di quei composti chimici che possano incidere l'efficacia del trattamento (ad esempio inibendo la presa del cemento) e interessare la durabilità della massa di suolo e di cemento ottenuta.

Oltre al pH e ai contenuti di acqua, di organico, in ceneri e in fibre della torba utili alla sua classificazione, si è indagato in particolare il tasso di umificazione, ovvero al rapporto

Contenuto d'acqua	354%
Contenuto organico	78%
Contenuto in ceneri	22%
Contenuto in fibre	49%
pH	5,2
Cloruri	0,41%
Solfati	0,39%
TOC	38%
Acidi umici e fulvici	25%
Tasso di umificazione	65%

Tabella 1 - Le caratteristiche chimico-fisiche della torba di Massarosa

tra carbonio organico totale e la quantità di acidi umici e fulvici presenti (TOC/[HA+FA]). Queste sostanze, infatti, che costituiscono l'humus dei suoli di cui la torba è ricchissima, in vari modi possono rallentare e a volte impedire la presa del cemento in quanto creano un ambiente particolarmente sfavorevole e si legano con i suoi costituenti prima ancora che si sviluppino i prodotti di idratazione (Kujala et al., 1996; Tremblay et al., 2002).

La neutralizzazione di questi acidi prevede la scelta di un dosaggio adeguato, in quanto non solo una parte di cemento dovrà essere sacrificata nella formazione dei composti organo-minerali, ma sarà necessario anche una sufficiente quantità di legante per innalzare il pH dell'acqua al livello ottimale per la presa del cemento, in quanto queste sostanze hanno una notevole capacità tampone.

Di grande importanza, inoltre, si è rivelata l'individuazione di quei sali disciolti nell'acqua di falda che intaccano nel lungo periodo la durabilità dei prodotti di idratazione del cemento.

In particolare, questi sono i cloruri e i solfati che, in determinate condizioni, innescano e sviluppano reazioni anche molto complesse che disgregano le strutture del cemento.

In questo senso ai fini del progetto riveste un ruolo importante il tipo di legante che si utilizza e sarà opportuna la scelta di un cemento resistente a questi tipi di attacchi senza dimenticare la spiccata acidità del terreno.

Nel caso in esame, la scelta di cemento Portland è legata a un primo tentativo di ottimizzazione della miscela leganti+inerti.

A seguito di questa prima parte, si è proceduto alla fase di test geotecnici sia su provini di terreno naturale sia su provini miscelati, preparati come descritto in precedenza. Il programma di prove ha interessato sette diverse miscele cemento-sabbia, come mostrato in Tabella 2.

Miscela	Cemento (kg/m ³)	Sabbia (kg/m ³)	Cemento (%)	Sabbia (%)	Aggiunta totale solidi (%)
2	150	200	10,7	14,3	25
3	200	200	13,8	13,8	27,6
4	250	250	16,1	16,1	32,2
6	250	150	17,2	10,3	27,6
9	100	200	7,4	14,8	22,2
10	100	150	7,7	11,5	19,2
50	200	0	16	0	16

Tabella 2 - La composizione delle miscele cemento-sabbia

I provini confezionati sono stati fatti maturare in immersione completa sia con un carico statico di costipamento pari a 18 kPa (corrispondente all'incirca a 1 m di rilevato in campagna) sia in assenza di costipamento.

In tal modo si è valutato l'effetto relativo dei due componenti delle miscele e delle condizioni di maturazione sulla resistenza finale ottenuta. La torba naturale (campione c.d. in bianco) ha presentato una resistenza a compressione uniassiale decisamente bassa, pari a 5 kPa, assolutamente insufficiente per la realizzazione di qualsivoglia opera.

Come si può osservare dal grafico riassuntivo delle prove effettuate in Figura 2, la prima indicazione ricavata riguarda il dosaggio: appare evidente che una quantità di cemento pari a 100 kg/m³ non sviluppa alcun effetto significativo e, comunque, non paragonabile agli altri dosaggi, se si considera ad esempio il confronto tra la Miscela 9 e la Miscela 2 per le quali, a parità di sabbia (200 kg/m³), una differenza di cemento del 50% aumenta la resistenza di circa otto volte passando da 23 a 170 kPa.

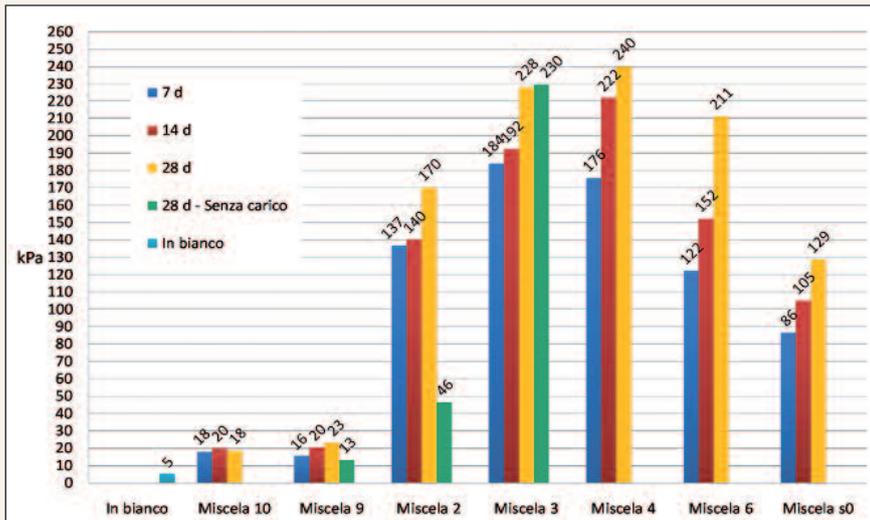


Figura 2 - Il grafico comparativo delle resistenze ottenute: la resistenza a compressione uniassiale media

Questo, pertanto, indica che può essere definita una soglia di efficacia del cemento, per questa torba, corrisponde a circa 150 kg/m³; al di sotto di questa, il trattamento di fatto non ha effetti significativi.

L'estremo superiore di resistenza lo si è ottenuto con la Miscela 4 corrispondente all'immissione di una quantità di cemento e di sabbia in rapporto 1:1 (rispettivamente 250 kg/m³) che ha portato il valore di resistenza fino a circa 240 kPa in 28 giorni di maturazione, in acqua sotto carico, cioè moltiplicando il valore iniziale di 48 volte. Il beneficio appare evidente, considerando anche che l'elevatissimo contenuto d'acqua iniziale della torba pari a 382% si è ridotto di circa 3,5 volte passando a un valore di 108%.

L'aggiunta di sabbia rappresenta un ottimo coadiuvante; si è infatti constatato dai diversi confronti tra le miscele che un'immissione di inerti pari a 100 kg/m³ mediamente corrisponde a un aumento di resistenza tra il 13% e il 18%.

Pertanto la sabbia può, almeno in parte, sostituire con costi molto contenuti una certa frazione di cemento.

Un'ultima indicazione riguarda la presenza del precarico in fase di maturazione.

Ciò che è emerso nel caso considerato è che questa variabile ha un effetto determinante sulla resistenza finale qualora il dosaggio di cemento a parità di sabbia sia basso (100-150 kg/m³) con una riduzione di resistenza per i provini maturati senza carico statico che va dal 50% fino al 75%, mentre per un dosaggio di cemento più elevato (200 kg/m³) non sono state evidenziate particolari differenze.

Come documentato in Letteratura (EuroSoilStab, 2002; Ahnberg, 2006), i valori di resistenza ottenuti a 28 giorni sono destinati a salire, fino anche a raddoppiare in un anno, man mano che le reazioni del cemento si completano; questo aspetto conferisce anche un certo margine di sicurezza.

I risultati di test su campi prova in sito

Le esperienze di laboratorio sono state trasferite in campagna attraverso l'esecuzione di campi prova sperimentali, installati ai fini del confronto con i valori ottenuti nelle fasi preliminari.

Le aree di prova avevano dimensioni pari a 3,0x3,0x2,5 m (fino allo spessore massimo dello strato di torba), per un volume complessivo di 22,5 m³ ciascuno.

La valutazione degli interventi di miscelazione è avvenuta attraverso l'esecuzione di prove penetrometriche CPT a punta meccanica.

Dopo 28 giorni di maturazione del cemento sono emerse alcune interessanti analogie di risultati con le prove di laboratorio, consistenti in primo luogo con la conferma della soglia di efficacia della percentuale di cemento osservata con le prove di resistenza.



Figura 3 - L'esecuzione dei campi prova (immagine dell'archivio fotografico de La Quadrifoglio Scavi Srl)

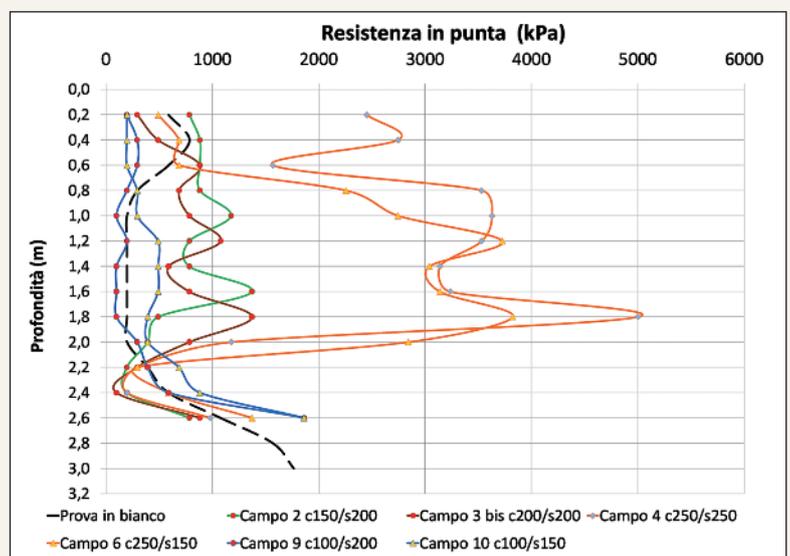


Figura 4 - La resistenza in punta per le diverse aree sottoposte a prova



Al di sotto di questa, mediamente si è ottenuto anche un peggioramento del comportamento, in quanto la destrutturazione del terreno a seguito della miscelazione non è stata compensata dall'effetto positivo del cemento.

Anche in questo caso si nota come i valori massimi di resistenza in punta siano stati raggiunti con la Miscela 4 e che le altre miscele presentano comportamenti in linea con le attese, ad eccezione della Miscela 3 che invece ha fornito risultati deludenti probabilmente legati a un difetto di miscelazione del terreno.

Un'importante indicazione ricavata dal raffronto delle prove eseguite in laboratorio e sul campo consiste nell'individuazione del fattore di cono N_k per la valutazione della resistenza a compressione a partire dalle prove penetrometriche: per le miscele ad alto dosaggio di cemento (250 kg/m^3) questo è risultato pari a 25, mentre per le miscele a dosaggi minori ($150\text{-}200 \text{ kg/m}^3$) pari a 10.

Conclusioni

A fronte di queste considerazioni, appaiono evidenti i benefici in termini di comportamento geotecnico che l'intervento di stabilizzazione di massa conferisce ai terreni di scarse caratteristiche meccaniche - quali ad esempio la torba di Massarosa -, proponendosi come una più che valida alternativa alla tecnica di sostituzione del suolo (soil replacement) finora largamente utilizzata nei casi di terreni soffici estesi fino a medie profondità, presentando un minore impatto ambientale ed economico. Ogni intervento, però, necessita di attente valutazioni, data la notevole complessità dei fenomeni di varia natura che avvengono a seguito del trattamento chimico del terreno. ■

* *Ingegnere della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Roma "Sapienza"*

** *Professore Ordinario della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Roma "Sapienza"*

*** *Amministratore Delegato de La Quadrifoglio Scavi Srl*

**** *Responsabile di Laboratorio della Geoplanning*

BIBLIOGRAFIA

- [1]. H. Åhnberg - "Strength of stabilized soils - A Laboratory Study on Clays and Organic Soils Stabilized with Different Types of Binder", Report 16 Swedish Deep Stabilization Research Centre, Linköping (2006).
- [2]. G. Cortellazzo, S. Cola - "Geotechnical characteristics of two Italian peats stabilized with binders", Proceedings of the International Conference on Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization. Stockholm, Sweden, 13-15 Oct. Edited by H. Bredenberg, G. Holm, B.B. Broms. A.A. Balkema, Rotterdam (1999).
- [3]. EuroSoilStab "Design Guide Soft Soil Stabilization - Development of design and construction methods to stabilize soft organic soils", EC CT97-0351 Project No. BE 96-3177 (2002).
- [4]. R. Giannini - "La giusta integrazione per la stabilizzazione di massa", "Strade & Autostrade" n° 3 Maggio/Giugno 2008.
- [5]. K. Kujala, M. Mäkikyrö, O. Lehto - "Effect of humus on the binding reaction in stabilized soils", Grouting and deep mixing, ed. Yonekura, Terashi, Shibasaki, pp. 415-420, Balkema, Rotterdam (1996).
- [6]. H. Tremblay, J. Duchesne, J. Locat, S. Leroueil - "Influence of the nature of organic compounds on fine soil stabilization with cement", Canadian Geotechnical Journal 39, pp. 535-536 (2002).