

TRATTAMENTO A CALCE DELLE TERRE: TEMPI DI REAZIONE ED INFLUENZA DELLE CONDIZIONI DI STAGIONATURA SULLA MICROSTRUTTURA E SULLA COMPRESSIBILITÀ

Marta Di Sante

Università Politecnica delle Marche

m.disante@univpm.it

Evelina Fratalocchi

Università Politecnica delle Marche

e.fratalocchi@univpm.it

Sommario

La nota illustra i risultati di un progetto di ricerca in corso su terre di diverse caratteristiche trattate con il 5% di idrato di calcio, con l'obiettivo di confrontare le tempistiche di reazione e valutare l'effetto delle condizioni di stagionatura (presenza d'acqua) sulla quantità e tipo di prodotti di reazione nonché sulla compressibilità. Lo sviluppo delle reazioni nel tempo è stato dedotto mediante un metodo di prova basato sul valore del pH. Si è osservato che le reazioni di scambio ionico si esauriscono, per le miscele studiate, entro i primi tre giorni e quelle pozzolaniche si sviluppano pienamente entro le prime tre settimane. Il *wetting* immediato dei campioni di terra-calce consente una più uniforme distribuzione dei prodotti di reazione, presenti anche in forma cristallina. Una maggiore compressibilità si rileva per la stagionatura in condizioni sommerse, per alti valori (> 400 kPa) della pressione verticale efficace.

1. Introduzione

Gran parte delle terre da scavo disponibili nei cantieri, previo opportuno trattamento, potrebbe essere riutilizzata nell'ambito degli stessi cantieri nel caso in cui siano previste opere in terra, quali ad esempio rilevati, argini di contenimento, sottofondi, ecc. Tipici esempi sono rappresentati da strutture in pendio oppure da tracciati stradali con tratti in trincea e in rilevato. In tali casi, le opere in terra richiederebbero l'impiego di materiale idoneo prelevato da cava. Ciò comporta notevoli costi economici, dovuti all'acquisizione e al trasporto del materiale da cava, cui si aggiungono il trasporto e l'eventuale smaltimento delle terre da scavo. Accanto a questi devono essere poi considerati i costi ambientali, legati allo sfruttamento di cave di prestito e al transito di mezzi pesanti.

Le terre di scavo disponibili nel cantiere possono essere rese idonee mediante stabilizzazione con leganti, ovvero mediante l'aggiunta di leganti e successiva compattazione (in assenza di leganti, si parla di stabilizzazione meccanica). La calce è uno dei leganti maggiormente utilizzati allo scopo.

Il progetto delle miscele terra-calce parte dall'accurata determinazione delle caratteristiche fisico-chimiche della terra da stabilizzare e prevede una sperimentazione di laboratorio per individuare la quantità di legante ottimale (mix design) in funzione delle prestazioni richieste all'opera.

L'aggiunta di calce (Ca(OH)_2 o CaO) alle terre argillose, in presenza di acqua, provoca, a breve termine (Smith, 1996; Wintekhorn et al, 1991), lo scambio cationico degli ioni calcio con gli ioni sulla superficie delle particelle argillose (K^+ , Na^+ , H^+ etc.) causandone l'aggregazione, con miglioramenti nella plasticità, lavorabilità, resistenza e compressibilità. Un ulteriore successivo processo (detto "a lungo termine") è costituito dalla reazione pozzolanica tra la silice (e l'allumina) presente nelle terre e il calcio fornito con l'aggiunta di calce. I prodotti di reazione che ne derivano aumentano la resistenza

e la rigidezza delle miscele compattate e ne incrementano la durabilità (TRB, 1987; NLA, 2004). Questi due processi sono preceduti dalla reazione di idratazione, se si impiega CaO (calce viva). Le tempistiche e le modalità di reazione non sono facilmente identificabili e sono ancora oggi oggetto di studio (e.g. Rao et al., 2005; Di Sante et al., 2014). In particolare, dopo l'idratazione, che dura qualche ora, si stima che lo scambio cationico avvenga entro i primi giorni, generalmente tra le 24 e le 72 ore (Smith, 1996) fino a 96 ore (Wintekhorn et al., 1991). Con riferimento alle reazioni pozzolaniche, alcuni autori affermano che gli alluminati di calcio idrati si sviluppano più rapidamente dei silicati e tendono ad incrementare la tendenza alla flocculazione delle particelle (Diamond et al., 1965) mentre altri studi affermano che tali reazioni iniziano solo dopo 7 giorni di stagionatura (Boardman et al., 2001). Un ulteriore punto di discussione è la possibilità che le reazioni avvengano in soluzione o direttamente sulla superficie dei minerali argillosi (Diamond et al., 1965; Stocker, 1972). È ritenuta verosimile anche una combinazione dei precedenti processi (TRB, 1987). Il decorso delle reazioni pozzolaniche dipende fortemente dalla temperatura (Anday, 1963; Al-Mukhtar et al., 2010) oltre che dalle caratteristiche delle terre da sottoporre a trattamento.

La presente nota illustra i risultati di un progetto di ricerca in corso di svolgimento su terreni di diverse caratteristiche trattati con il 5% di idrato di calcio, con l'obiettivo di confrontare le tempistiche di reazione e valutare l'effetto delle condizioni di stagionatura (in termini di presenza d'acqua) sulla quantità e il tipo di prodotti di reazione (identificati mediante osservazioni al SEM, microscopio elettronico a scansione supportato da analisi EDS, Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy) nonché sulla compressibilità delle miscele (prove di compressione edometrica ad incremento di carico, IL).

In particolare, lo studio è stato eseguito in maniera completa per la miscela realizzata con una terra limo-argillosa di elevata plasticità, analogia sperimentazione è in corso su altre due terre di diverse caratteristiche, trattate con la stessa quantità di calce.

2. Materiali e metodi

La sperimentazione è in corso su tre terreni di diversa provenienza (siglati MON, SGT, TES), le caratteristiche dei quali sono riepilogate in Tabella 1. La quantità di idrato di calcio aggiunta è pari al 5% (su peso secco), sempre superiore alla quantità minima di calce necessaria a garantire la reazione pozzolanica fra terreno e calce (ICL - ASTM C977-00).

Tabella 1. Caratteristiche dei terreni oggetto della sperimentazione

	LL (%)	IP (%)	Sand (%)	Fine (%)	Clay (<2um, %)	USCS class (-)	ICL (% Ca(OH) ₂)
MON	62	32	16	84	44	CH	4
SGT	40	20	3	97	39	CL	2
TES	63	37	1	99	56	CH	1.7

La calce utilizzata è una calce aerea idrata di tipo CL80-S (UNI EN 459-01), completamente passante al setaccio 200 ASTM (apertura 0.075 mm).

I campioni sono stati confezionati aggiungendo la calce alla terra per via umida (secondo la tipica sequenza di cantiere) e compattando la miscela con procedura Proctor Standard a strato unico, in corrispondenza dell'umidità ottima ($w_{opt} \pm 2\%$) relativa alla miscela ottenuta con ciascuno dei terreni.

Lo sviluppo delle reazioni tra terra e calce nel tempo è stato studiato ponendo i campioni confezionati con i terreni denominati MON e TES in acqua distillata entro un'ora dalla compattazione monitorando il pH dell'acqua di immersione, con la metodologia proposta e validata da Di Sante et al. (2014).

Gli effetti delle condizioni di stagionatura (della durata di 7 giorni) sono stati valutati:

- sulla microstruttura dei campioni confezionati e, di conseguenza, sui prodotti di reazione ottenuti dal trattamento, confrontando le osservazioni mediante microscopio elettronico a scansione (SEM) e i risultati delle analisi EDS di 2 coppie di campioni di miscela confezionati

con le terre MON e SGT (Tabella 1). Ciascuna coppia è costituita da un campione stagionato a w costante a temperatura ambiente ed uno in condizioni sommerse (wet).

- sulla compressibilità delle miscele terra-calce, sottoponendo a prova di compressione edometrica IL una coppia di provini (ottenuti trattando la terra MON) di cui uno stagionato a w costante a temperatura ambiente ed uno posto in cella edometrica immediatamente dopo la compattazione (wet). La prova è stata comunque avviata dopo 7 giorni.

3. Risultati

3.1 Microstruttura

In Figura 1 è possibile osservare le particelle argillose delle terre non trattate aventi la tipica configurazione laminata (Fig.1a) mentre sono chiaramente visibili gli aggregati di particelle nei campioni di terra-calce.

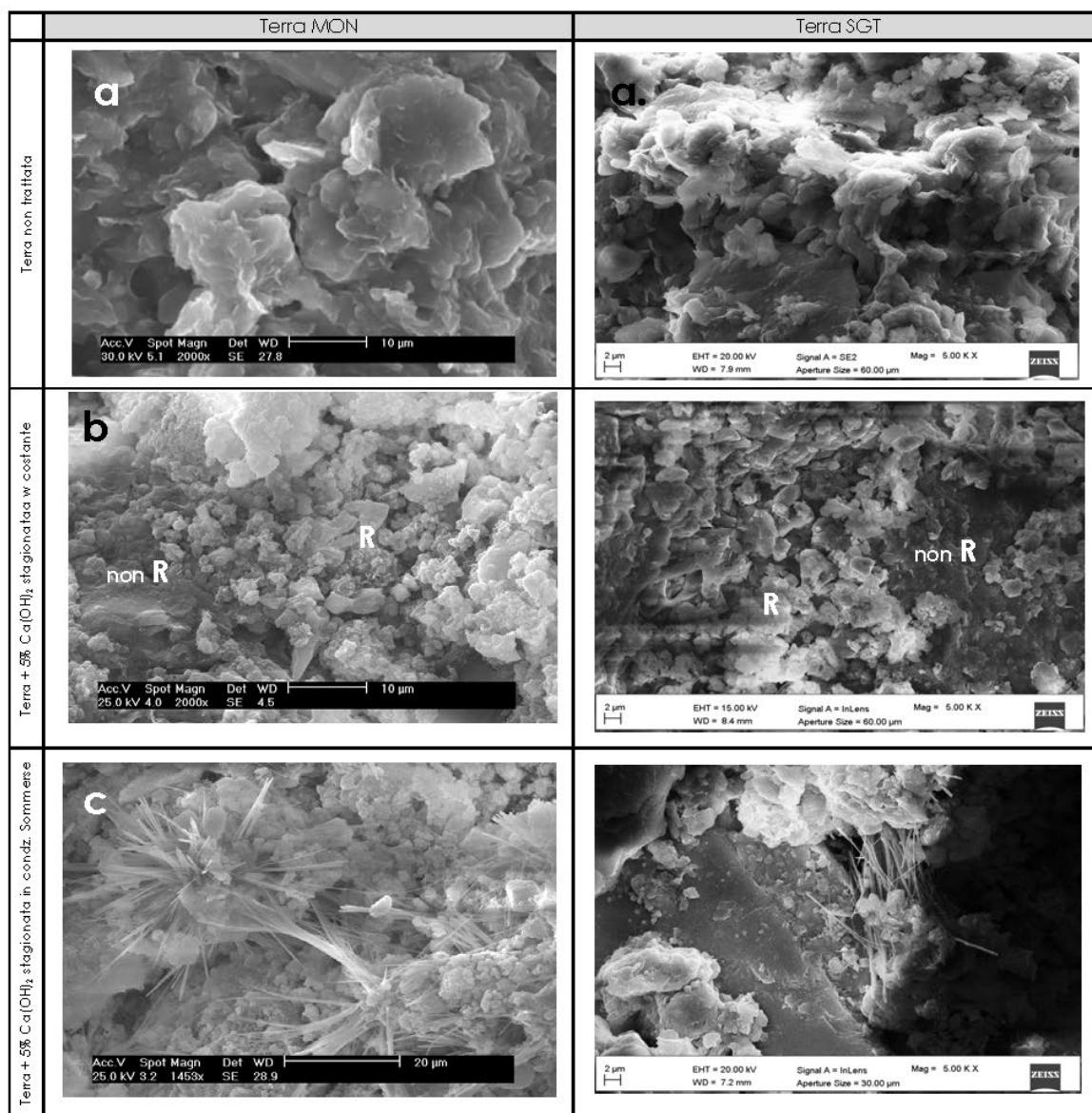


Fig 1. Immagini SEM delle terre non trattate e dei campioni di terra-calce stagionati per 7 giorni

In particolare, nei campioni di terra-calce stagionati a w costante si individuano zone con presenza di prodotti di reazione (indicate con la lettera "R" in Fig. 1b) e zone il cui aspetto è analogo a quello del

terreno non trattato (indicate con la sigla “non-R” in Fig. 1b). Tale evidenza, riscontrata per il terreno MON (ampiamente documentata in Di Sante et al., 2014 con analisi EDS eseguite nelle diverse zone), si rileva anche per il campione confezionato con la terra SGT, sebbene quest’ultima sia meno plastica. Viene pertanto confermato il fatto che in campioni parzialmente saturi (per MON+5%Ca(OH)₂ il grado di saturazione, S_r=80%; per SGT+5%Ca(OH)₂ S_r=70%) , i prodotti di reazione sono presenti ma non uniformemente distribuiti poiché l’acqua è l’elemento necessario affinché si sviluppino le reazioni tra terra e calce.

Nei campioni stagionati per 7 giorni in condizioni “wet” si osserva la presenza di prodotti pozzolanici sia in forma amorfa sia cristallina (C-S-H) aghiforme (di lunghezza di 5-10 µm). Le analisi EDS in corrispondenza di tali prodotti confermano la presenza predominante di calcio, silicio e alluminio.

È possibile confermare che il *wetting* immediato dei campioni di terra-calce consente una più uniforme distribuzione dei prodotti di reazione, presenti anche in forma cristallina e che la disponibilità di acqua durante la stagionatura è dunque fondamentale per l’efficienza del trattamento (Di Sante et al., 2014; Beetham et al., 2015).

3.2 Monitoraggio delle reazioni chimiche nel tempo

Il pH dell’acqua di immersione è stato scelto quale indicatore della progressione delle reazioni chimiche poiché gli ioni ossidrile sono coinvolti nelle reazioni tipiche del trattamento con calce delle terre. In particolare, la dissociazione dell’idrato di calcio incrementa il pH nelle prime ore dopo la miscelazione e la compattazione. Successivamente, nel corso dello scambio cationico, che non coinvolge gli ioni OH⁻, il pH non subisce variazioni mentre le reazioni pozzolane, nelle quali vengono legati due ioni ossidrile ed uno ione calcio per ogni molecola di SiO₂ o Al₂O₃, causano la riduzione del pH che si protrae fino al completo sviluppo di tali reazioni. In aggiunta a tale metodo, impiegato anche in altri studi per valutare l’effetto della temperatura sulle reazioni terra-calce (Rao et al., 2005; Al-Mukhtar et al., 2010), è stata misurata la concentrazione degli ioni K⁺, Na⁺ e Ca⁺⁺ nell’acqua di immersione e sono state eseguite osservazioni SEM.

In Figura 2 è riportata la variazione del pH e della concentrazione nell’acqua di immersione degli ioni K⁺, Na⁺ e Ca⁺⁺ nel tempo, unitamente alle immagini SEM per la terra MON con il 5% di Ca(OH)₂.

Nelle prime ore il pH si incrementa fino a 12.5 e la concentrazione di Ca⁺⁺ raggiunge il valore massimo. La concentrazione degli ioni Na⁺ inizia ad aumentare dopo 10 minuti dall’immersione testimoniando l’immediato avvio delle reazioni di scambio ionico che si protraggono fino al terzo giorno, dopo il quale il pH inizia a decrescere e la concentrazione degli ioni K⁺ e Na⁺ rimane costante. La riduzione del pH e della concentrazione degli ioni Ca⁺⁺, corrispondente allo sviluppo delle reazioni di cementazione, è rapida nelle prime 3 settimane; tale riduzione continua, seppur più lentamente, fino al 60esimo giorno, dopo il quale non sono più osservabili significative riduzioni. Le osservazioni al SEM confermano quanto rilevabile dall’andamento del pH; infatti, a 2 giorni di stagionatura, si osserva già l’aggregazione delle particelle causata dallo scambio cationico ed a 7 e 28 giorni la presenza di prodotti pozzolanici in forma amorfa o cristallina, a seconda delle due condizioni di stagionatura.

L’andamento del pH dell’acqua di immersione nel tempo per il campione confezionato con la terra TES (Figura 3) è simile a quello della terra MON (Fig. 2): si incrementa rapidamente nelle prime ore fino a 12.5, valore che si mantiene costante per le prime 24 ore per poi decrescere. In questo caso è evidente che la reazione di scambio cationico è più rapida e si esaurisce nel corso del primo giorno e che, nelle prime 3 settimane, le reazioni pozzolane si svolgono più rapidamente.

3.3 Compressibilità

In Fig. 4 sono mostrati i risultati delle prove edometriche IL eseguite su campioni compattati di terra MON non trattata o additivata con il 5% di calce, stagionati per 7 giorni a w costante o in condizioni wet (rispettivamente “Saturation after 7 days” e “Immediate saturation” in Fig. 4).

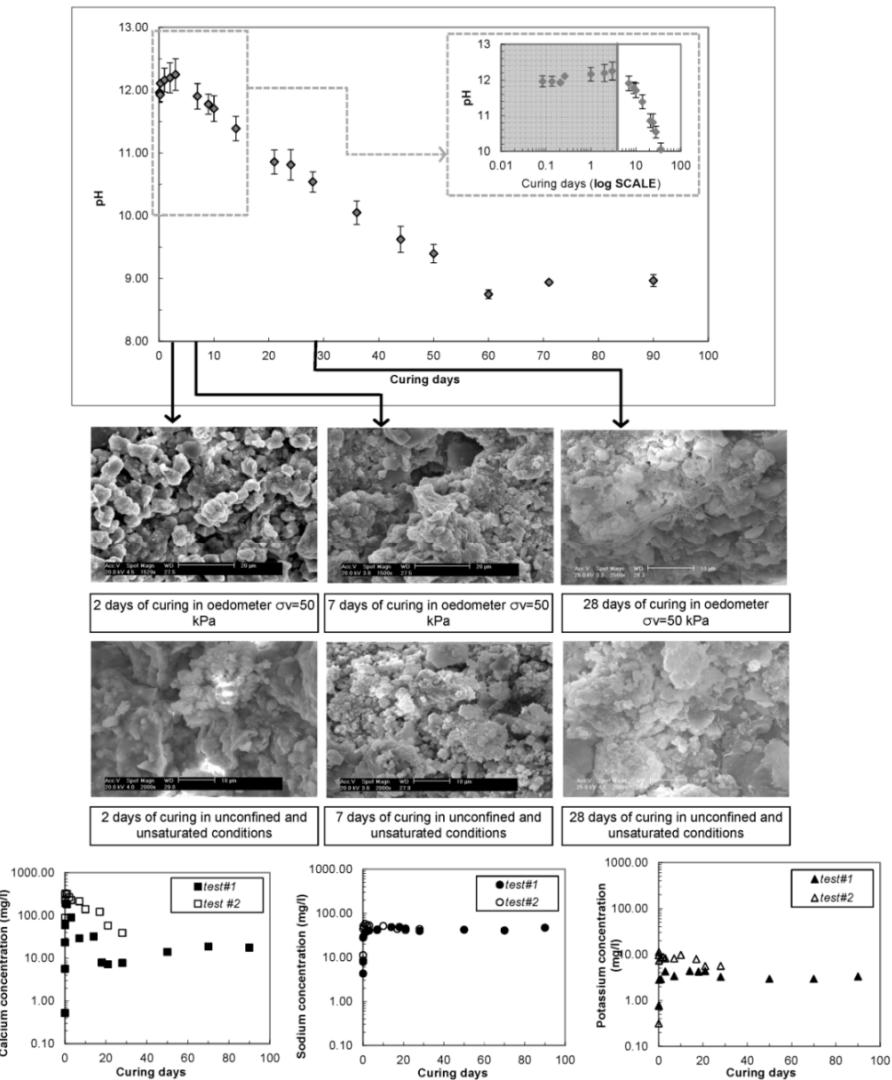


Fig 2. Variazione del pH e della concentrazione in acqua degli ioni nel tempo, unitamente alle immagini SEM - terra MON + 5% $Ca(OH)_2$ (Di Sante et al, 2014)

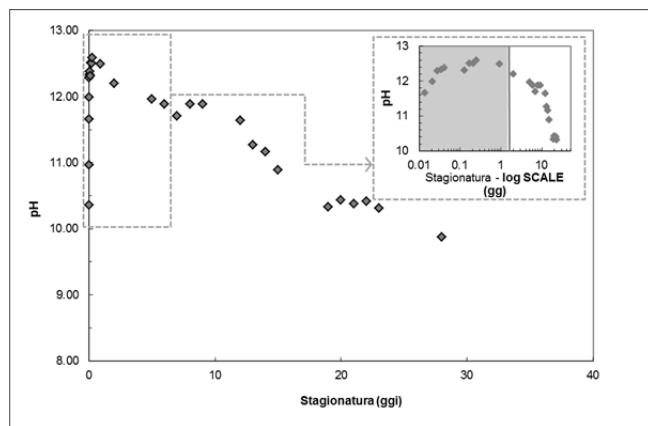


Fig 3. Variazione del pH in acqua - terra TES + 5% $Ca(OH)_2$

In primo luogo, si osserva che l'aggiunta di calce riduce significativamente la compressibilità della terra non trattata indipendentemente dalle condizioni di stagionatura. I due provini di terra-calce mostrano indici di compressione (c_c) molto bassi e del tutto comparabili fino a pressioni verticali

efficaci di 400kPa. All'aumentare della pressione, il provino stagionato in condizioni wet risulta più compressibile ma a 3200 kPa i provini hanno lo stesso valore di c_e . I prodotti cristallini, presenti nel solo campione stagionato in condizioni wet, danno origine ad una struttura fragile la quale, oltre i 400 kPa di pressione applicata, manifesta la rottura dei legami con conseguenti maggiori cedimenti dopo i quali la deformabilità torna ad essere governata su entrambi i provini dai prodotti di reazione amorfi.

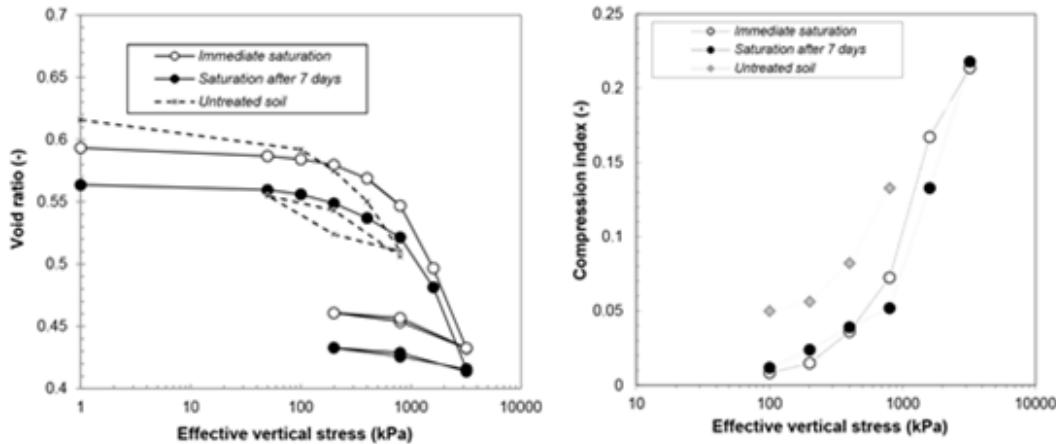


Fig 4. Curve di compressibilità dei tre provini ottenuti con la terra MON (modificato da Di Sante et al., 2014)

4. Conclusioni

Per le miscele terra-calce testate, il wetting immediato dei campioni assicura uno sviluppo più uniforme delle reazioni pozzolaniche e la crescita di prodotti cristallini che danno origine ad una struttura più fragile se posta, dopo 7 giorni, a pressioni elevate (>400 kPa) rispetto ai campioni stagionati a w costante per i quali i prodotti di reazione si presentano con struttura amorfa. La compressibilità risulta comunque molto ridotta se confrontata con quella della terra compattata non trattata. La sperimentazione eseguita ha dimostrato che il pH è un utile indicatore della progressione nel tempo delle reazioni che hanno una diversa durata in funzione del tipo di terreno trattato.

Bibliografia

- Al-Mukhtar M., Lasledj A., Alcover J. F. (2010). "Behaviour and mineralogy changes in lime treated expansive soil at 50°C" *App. Cl. Sci.* 50, 199-203.
- Anday M.C. (1963). "Curing lime stabilized soils" *Highway research record NRC*, Washington. 29, 13-26
- Beetham P., Dijkstra T., Dixon N., Fleming P., Hutchinson R., Bateman J. (2015) "Lime stabilization for earthworks: a UK perspective" *Ground improvement ice Proceedings*, 168, 81-95.
- Boardman D.I., Glendinning S., Rogers C.D.F. (2001). "Development of stabilisation and solidification in lime-clay mixes" *Géotechnique*. 50, 533-543.
- Diamond S., Kinter E. B. (1965). "Mechanisms of soil-lime stabilization, an interpretative Review" *Highway research record, NRC*, Washington. 92, 83-102.
- Di Sante M., Fratalocchi E., Mazzieri F., Pasqualini E. (2014). "Time of reaction in a lime treated clayey soil and influence of curing conditions on its microstructure and behaviour" *Appl. Clay Sci.*, 99, 100-109.
- National Lime Association (2004). Lime-treated soil construction manual. Lime stabilization & lime modification, Bulletin 326.
- Rao S.M., Shivananda P. (2005). "Role of curing temperature in progress of lime-soil reactions" *Geotech. Geolog. Eng.* 23, 79-85.
- Smith J.H. (1996). "Construction of lime or lime plus cement stabilized cohesive soil" in: Roger, C.D.F., Glendinning S., Dixon N. (Eds.), *Lime stabilization*. Thomas Telford, London, 13-26.
- Stocker, P.T. (1972). "Diffusion and Diffuse cementation in lime and cement stabilized clayey soils – Physical aspects" Proc. 6th Australian road research board conf.. 6, 235-289.
- Transportation Research Board (1987). State of the art report 5: Lime stabilization – Reactions, properties, design and construction, Transportation Research Board National Research Council Ed., Washington D.C.
- Winterkorn H.F., Pamukcu S. (1991). "Soil stabilization and grouting" in: Foundation Engineering Handbook, Hsai-Yang Fang Ed., Van Nostrand Reinhold, New York, 317-378.