

MITIGAZIONE DEGLI EFFETTI INDOTTI DALLA REALIZZAZIONE DELLA LINEA B1 DELLA METROPOLITANA DI ROMA MEDIANTE LA TECNICA DEL COMPENSATION GROUTING

Maria Elena D'Effremo, Enzo Fontanella, Augusto Desideri
Università La Sapienza, Roma
mariaelena.deffremo@uniroma1.it

Sommario

L'articolo illustra le procedure di realizzazione e i risultati del monitoraggio di un campo prova di compensation grouting resosi necessario prima dell'utilizzazione di tale tecnica lungo la nuova linea B1 della metropolitana di Roma. Come illustrato nell'articolo l'efficienza del metodo è legata strettamente alla natura e alle condizioni di stato del terreno. Per questo motivo, allo stato attuale delle conoscenze, una progettazione di un intervento di compensation grouting (numero e posizione delle canne di iniezione, caratteristiche della miscela iniettata, stima dei volumi da iniettare) non può prescindere dall'esecuzione di un campo prova che verifichi sperimentalmente la risposta del terreno al trattamento. L'elaborazione dei risultati con isolinee di volumi e sollevamenti ha consentito una stima del fattore di efficienza del trattamento (GEF) col quale è stato possibile dimensionare l'intervento lungo la tratta Annibaliano– Bologna.

Introduzione

Il compensation grouting è una tecnica d'iniezione utilizzata per prevenire o limitare il più possibile i cedimenti indotti sulle strutture che insistono direttamente sul bacino di subsidenza creato dallo scavo di una galleria. È una tecnica definita attiva, ossia basata sul coordinamento e sincronizzazione scavo–iniezione che permette quindi di misurare e immediatamente correggere i cedimenti durante lo scavo. La linea B1 in fase di completamento si estende per una lunghezza di circa 5 Km interamente in sotterraneo. I cedimenti stimati in fase di progettazione hanno permesso di evidenziare alcune zone del tracciato nelle quali gli effetti sugli edifici avrebbero potuto produrre danni, da qui la scelta del progettista di utilizzare la tecnica del compensation grouting per ridurre i cedimenti attesi. A monte della progettazione dell'intervento di compensation grouting è stato necessario realizzare un campo prova al fine di testare l'efficacia del trattamento nei terreni attraversati dallo scavo della linea. Nell'ambito della realizzazione della linea B1 le iniezioni di compensazione sono state realizzate in prossimità della Stazione Bologna per edifici costruiti tra il 1932 e il 1962 con fondazioni a pozzi e barulle. La copertura (distanza tra la calotta della galleria e la quota d'imposta delle fondazioni) varia tra un minimo di 2.7 m a un massimo di 11 m. Nel tratto interessato dalle iniezioni, di sviluppo longitudinale di circa 200 m, i materiali presenti al di sopra della calotta dei nuovi tunnel sono prevalentemente costituiti da piroclastiti a granulometria limo sabbiosa e tufo litoide. Il campo prova preliminare è stato realizzato su un'area prossima a quella d'intervento con stratigrafia simile a quella di Piazza Bologna e, coerentemente con quanto avviene nell'intervento in linea, la compensazione è stata effettuata sopra il livello di falda. Oggetto del presente articolo è la descrizione della tecnologia esecutiva e dei principi di funzionamento del compensation grouting, la descrizione della geometria e dei risultati di monitoraggio del campo prova. L'articolo è concluso con un breve cenno alla descrizione

dell'intervento di compensation grouting realizzato in Piazza Bologna.

Compensation grouting

Il principio di funzionamento del compensation grouting è mostrato in *Figura 1*. Una miscela di cemento viene iniettata nel terreno tra la galleria e le fondazioni dell'edificio tramite tubi a manchettes (TAMs). I tubi vengono inseriti nel terreno attraverso le pareti di uno scavo posizionato nelle adiacenze della galleria. Le iniezioni sono effettuate in maniera ripetuta e selettiva a volume controllato con miscele opportunamente studiate. La verifica dei cedimenti, dei volumi e delle pressioni d'iniezione in tempo reale è resa possibile grazie all'utilizzo di un sistema di monitoraggio automatico in continuo, sia durante l'installazione che durante le fasi d'iniezione. Il sistema di monitoraggio approntato è costituito da assestimetri installati a diversa profondità e da capisaldi sul terreno. Le letture assestimetriche avvengono in continuo grazie a un sistema di tazze livellometriche connesse ad un software di controllo che ne dà in tempo reale l'andamento a video, con frequenza di restituzione dell'ordine dei minuti.

Uno dei parametri fondamentali del compensation grouting è il fattore di efficienza (grout efficiency factor, GEF), definito come il rapporto tra il volume sollevato V_{SOLL} e il volume iniettato in una certa area V_{INJ}

$$GEF = \frac{V_{SOLL}}{V_{INJ}} = \frac{\text{volume di terreno sollevato}}{\text{volume iniettato}}$$

Grazie al fattore GEF e ad una previsione dei cedimenti attesi è possibile determinare le portate di miscele da iniettare e quindi dimensionare l'impianto di pompaggio. Nella valutazione di questo parametro occorre comunque tenere presente che risulta influenzato da diversi fattori, tra cui principalmente: il tipo di terreno (Bezuijen A., Van Tol A.F., Sanders M.P.M. 2008); la storia tensionale, OCR (Au S.K.A. et al. 2003); la spaziatura e sequenza delle iniezioni (M.T. Cheong et al. 2001).

Le fasi di realizzazione del compensation grouting comprendono:

- la realizzazione di un pozzo per le iniezioni e l'installazione del sistema di monitoraggio;
- la perforazione e l'installazione delle canne valvolate, TAMs;
- le iniezioni di pretrattamento necessarie a ricondurre il terreno ad una condizione uniforme di ridotta permeabilità tale da evitare dispersioni di miscela nella zona interessata dalle successive iniezioni di compensazione. In questa fase è importante l'utilizzo di miscele che permettano una sicura riapertura delle valvole, aventi bassi valori di resistenza a compressione (0.3÷0.8 MPa) e alta penetrabilità;
- le iniezioni di condizionamento necessarie a raggiungere il cosiddetto "punto di efficienza" (H.F.Schweiger et E.Falk 1998), ossia in grado di rendere il terreno subito pronto a trasformare le fasi d'iniezione successive in aumento di volume e sollevamenti. In questa fase si vuole ottenere un lieve presollevamento allo scopo di predisporre il manufatto al successivo scavo della galleria, verificando la risposta delle strutture e prevenendo l'eccessivo sviluppo di cedimenti;
- le iniezioni di compensazione si realizzano contemporaneamente allo scavo della galleria iniettando volumi necessari a compensare i cedimenti rilevati in tempo reale dal sistema di monitoraggio. Il volume di miscela che occorre iniettare è correlato al volume perso causato dalle operazioni di scavo e al GEF.

Descrizione e obiettivi del campo prova

Il campo prova è stato realizzato tra gennaio e febbraio 2009 in Piazza Marucchi su un'area di circa 400 m². La geometria è mostrata in *Figura 2*. È stato realizzato un pozzo con pali

Φ600 di lunghezza pari a 12 m, di diametro utile interno di 3,45 m ed una profondità di 9 m da cui sono state realizzate 5 perforazioni di lunghezza complessiva pari a 28 m e 4 perforazioni di lunghezza 14 m disposte secondo una maglia a quinconce con spaziatura di 2,5 m in orizzontale e 1,5 m in verticale con inclinazione di 5° (Figura 3). È stato appositamente realizzato un manufatto in calcestruzzo, fondazione, al fine di poter simulare le iniezioni alla base di un edificio. La “fondazione simulata” è stata realizzata con 9 pali Φ600 costituiti da cls Rck 20 MPa, non armati, solidarizzati in testa da una soletta in cls leggermente armata, a un distanza di circa 23 m dal pozzo. I pali presentano una lunghezza tale da intestarsi nello strato costituito da piroclastiti (circa 7.5 m da p.c.). L’esperienza si poneva l’obiettivo di valutare l’efficienza del trattamento sia sotto la fondazione simulata, sia in area green field. Nel corso delle lavorazioni, sia in fase di perforazione che in fase di iniezione, i movimenti del terreno sono stati controllati da un sistema di monitoraggio composto da 38 capisaldi a p.c., 2 inclinometri e 12 assestimetri posizionati a diverse profondità (Figura 2). Le iniezioni di compensazione sono state realizzate nello strato di piroclastiti poste tra quota -7.0 m e -13.0 m. In Tabella 1 e 2 è riportata la granulometria e le proprietà meccaniche delle piroclastiti in sito.

Argilla [%]	Limo [%]	Sabbia [%]	Ghiaia [%]
8-15	14-25	40-45	15-38

Tabella 1 Granulometria piroclastiti

	c'[kPa]	φ' [kPa]	E'[MPa]	c _u [kPa]
riporto	0	25-30	10	
piroclastiti	0-20	30-35	50	
limo	0-20	20-30	40	90

Tabella 2 Parametri di resistenza e deformabilità

Perforazione e posa in opera

Le perforazioni sono state realizzate a rotazione con circolazione d’acqua, inizialmente con aste e rivestimenti (Ø76mm e 114 mm), successivamente solamente col rivestimento (Ø114mm), utilizzando una corona a widia. Sono state quindi inserite le canne valvolate (5 cm di diametro con valvole a interasse di 50 cm) intasando contemporaneamente il foro con iniezioni di malta ed estraendo il rivestimento. La Figura 4 mostra le curve di isocedimento derivate dalle letture topografiche dei capisaldi al termine della fase di perforazione. Cedimenti di circa 3 mm si registrano nell’area green field (caratterizzata da una distanza molto ravvicinata delle canne valvolate) e cedimenti nulli al di sotto della fondazione.

Test di pretrattamento

La fase di pretrattamento ha avuto l’obiettivo di intasare gli interstizi del terreno provocando il contatto tra la miscela iniettata e il sistema. Tale obiettivo è stato raggiunto ottenendo uno spostamento di 1-2 mm a 8m di profondità. Le iniezioni hanno avuto inizio seguendo una sequenza predeterminata delle valvole e con volumi prestabiliti da 50 a 100 lt/valv. Nella fase di pre-trattamento/contatto sono state eseguite fino ad un massimo di 4 iniezioni per valvola. In questa fase sono stati iniettati circa 8000 litri sia nell’area green field sia nell’area fondazione.

Test di condizionamento e compensazione

Nelle applicazioni reali, al fine di limitare i cedimenti che si andranno a produrre durante lo scavo della galleria, nella fase di condizionamento si realizzano dei piccoli presollevamenti che costituiscono una precompensazione dei successivi cedimenti. Nella fase di condizionamento, nell’ambito del campo, prova sono stati iniettati circa 5000 litri in area green field e circa 3000 litri alla base della fondazione ottenendo sollevamenti di 5 mm a 8 m di profondità in entrambe le aree. Le misure a p.c. invece indicano un analogo sollevamento

nell'area della fondazione, dove il contatto avviene tra la miscela in pressione e la base dei nove pali, mentre in area green field non si misurano apprezzabili sollevamenti a causa della deformabilità dello strato di terreno compreso tra la zona di iniezione ed il p.c. Questo diverso risultato a p.c. raggiunto nelle due diverse aree di compensazione si manifesta anche nella fase di compensazione in cui, a fronte della simile quantità di volumi iniettati nelle due aree (Figura 5), in area fondazione a p.c. si raggiungono 4 cm di sollevamento, mentre nella zona green field i sollevamenti restano fermi a 5 mm (Figura 6).

Come atteso, la Figura 7 mostra che anche in fase di compensazione, a 8 m di profondità, in entrambe le aree si raggiunge la stessa entità di sollevamento pari a 4 cm.

Si osserva che in zona fondazione si ottiene un GEF pari al 7.2% (Tabella 3) molto maggiore del valore raggiunto in area green field pari all'1% (Tabella 4).

fondazione: efficienza per fasi		
	V_{inj} [m ³]	GEF [%]
pretrattamento	8.8	0.7
condizionamento	3.8	1.6
compensazione	13.9	7.2

Tabella 3 Efficienza zona fondazione

green field: efficienza per fasi		
	V_{inj} [m ³]	GEF [%]
pretrattamento	8.7	0.3
condizionamento	5.5	0.7
compensazione	10.7	1.0

Tabella 4 Efficienza zona green field

Si mostra inoltre in Figura 8 l'andamento nel tempo dei sollevamenti e dei volumi iniettati in zona fondazione. Si osserva chiaramente la variazione dell'efficienza nelle diverse fasi, poiché fino alla fase di compensazione i sollevamenti risultano modesti mentre crescono rapidamente in fase di compensazione.

Cenni ai risultati dell'intervento in Piazza Bologna

Il compensation grouting è stato realizzato durante lo scavo della linea B1 in prossimità di Piazza Bologna. I volumi di miscela da iniettare sono stati determinati sulla base di un fattore di efficienza GEF assunto pari al 6,5% sulla base del campo prova. L'intervento è stato realizzato da 4 pozzi e sono stati trattati 11 fabbricati. A titolo d'esempio si riporta la planimetria del pozzo realizzato in piazza Bologna, servito alla compensazione dei cedimenti di un solo edificio posizionato all'angolo tra Via Livorno e Via Michele di Lando (Figura 9). Sono state realizzate due file di perforazioni per un totale di 25 TAMs. In fase di pretrattamento e precondizionamento sono stati iniettati circa 95000 litri, ottenendo sollevamenti di 3-4 mm. Si riporta lo spostamento letto dagli assestimetri collegati alle tazze livellometriche nel tempo (Figura 10). Si notano spostamenti dell'ordine di 1-2 mm in fase di perforazione, spostamenti dell'ordine di 3-4 mm nella fase di pretrattamento e condizionamento, spostamenti dell'ordine di 5-6 mm nella fase di compensazione. I risultati mostrano dunque come grazie alle iniezioni di compensazione siano stati ottenuti spostamenti ridotti dell'ordine dei millimetri. Risultati simili sono stati ottenuti per gli altri fabbricati, tuttavia questi e altri risultati saranno presentati e commentati successivamente con maggiore approfondimento.

Considerazioni finali

Attraverso la realizzazione del campo prova lungo la linea B1 della metropolitana di Roma è stato possibile verificare l'efficacia del compensation grouting in terreni piroclastici ottenendo gli obiettivi prefissati in termini di sollevamenti, seppure con un basso valore del GEF (6.5-7%). L'attuale attività di ricerca è indirizzata alla modellazione del processo di compensazione. In questi studi i risultati del campo prova e il monitoraggio dell'intervento di compensazione a Piazza Bologna costituiscono un utilissimo punto di riferimento.

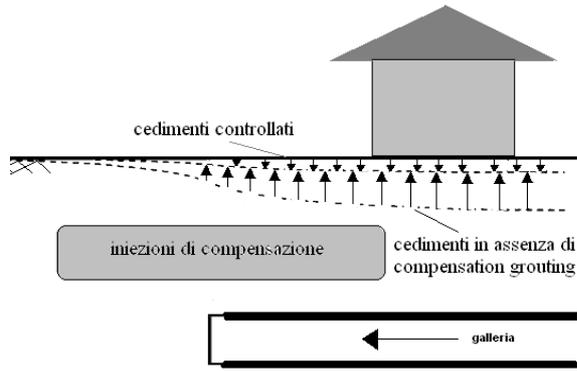


Figura 1 Principio di funzionamento del compensation grouting

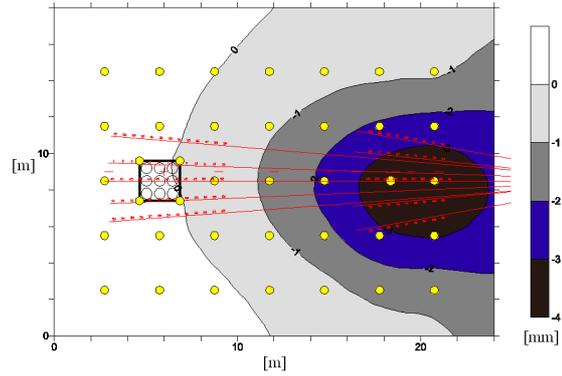


Figura 4 Isolinee di spostamento dei capisaldi a p.c. al termine della fase di perforazione

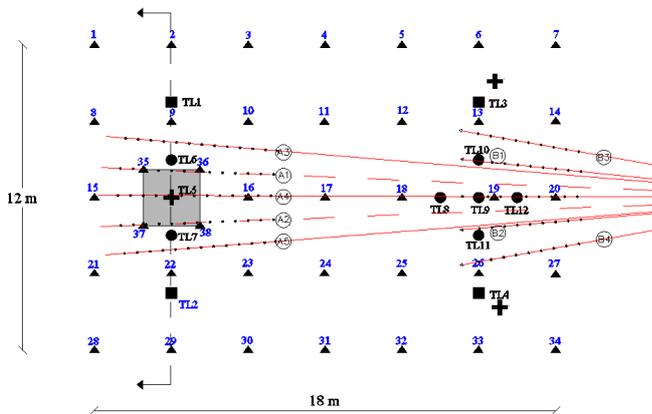


Figura 2 Planimetria e sezione trasversale del campo prova

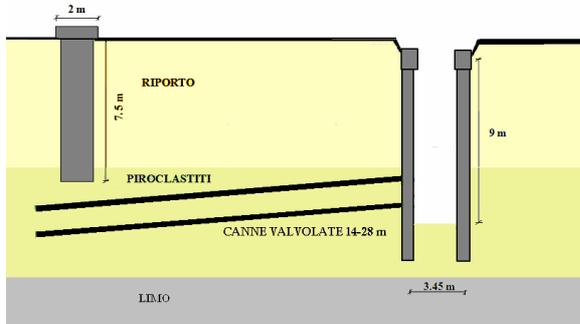


Figura 3 Sezione longitudinale del campo prova

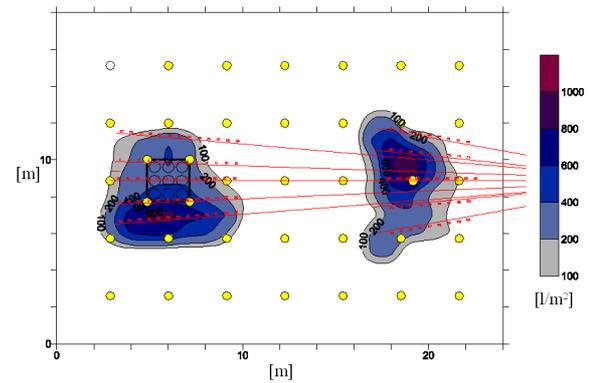


Figura 5 Volumi $[l/m^2]$ iniettati nella fase di compensazione

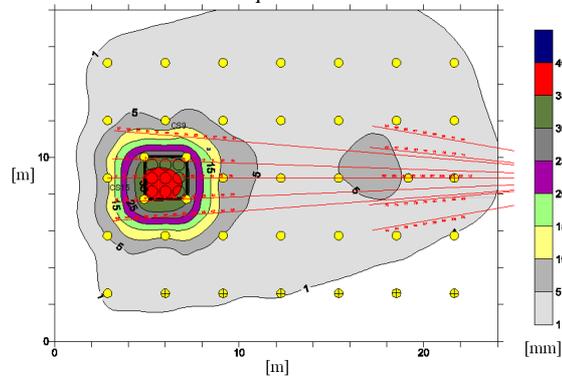


Figura 6 Isolinee di spostamento dei capisaldi a p.c. al termine della fase di compensazione

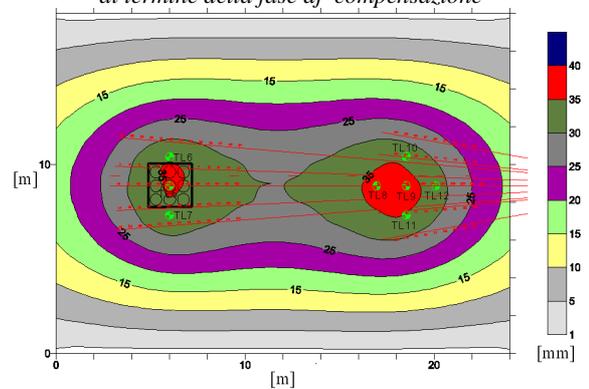


Figura 7 Isolinee di spostamento ottenute dagli assestimetri a 8 m di profondità al termine della fase di compensazione

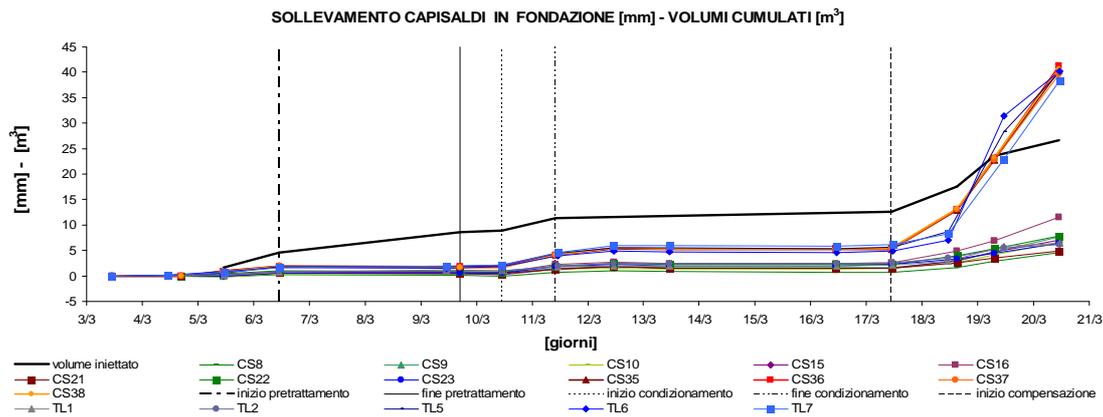


Figura 8 Sollevamento dei capisaldi nel tempo [mm] e volumi iniettati cumulati [m³]

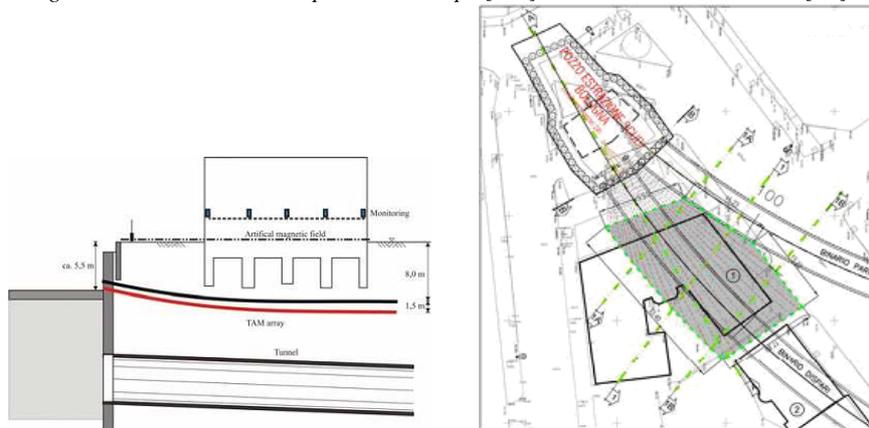


Figura 9 Sezione e planimetria dell'edificio e del pozzo in Piazza Bologna

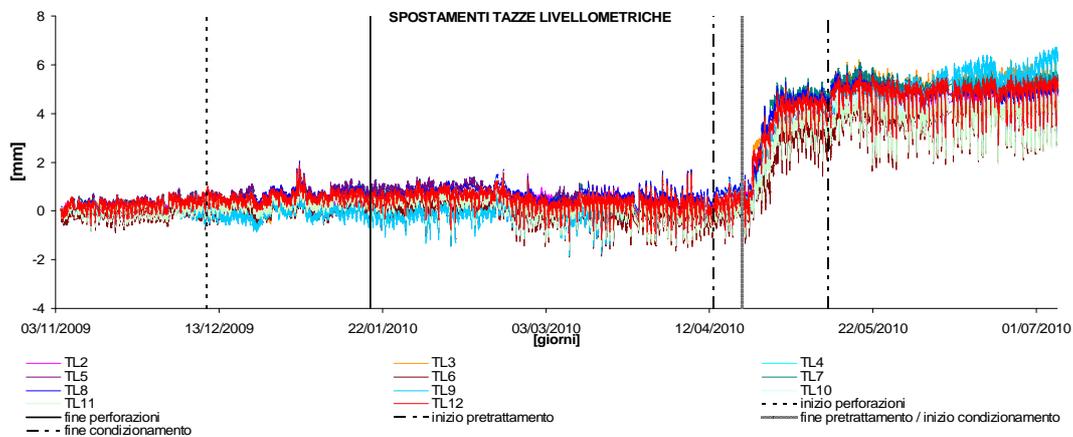


Figura 10 Spostamenti verticali registrati dalle tazze livellometriche

Bibliografia

- Bezuijen A., Van Tol A.F., Sanders M.P.M. (2008). *Mechanisms that determine between fracture and compaction grouting in sand*. Proceedings of the Sixth International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Shanghai.
- Au S.K.A., Soga K., Jafari M.R., Bolton M.D. and Kommiya K. (2003). *Factors Affecting Long-Term Efficiency of Compensation*. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering, March 2003. pp. 254-262
- Cheong M.T., Au S.K.A., Soga K., Mair R.J., Bolton M.D. (2001). *Fundamental Study of Compensation Grouting in Clay*. PhD Thesis University of Cambridge.
- Schweiger H.F., Falk E. (1998). *Reduction of settlements by compensation grouting- Numerical studies and experience from Lisbon underground*. Tunnels and Metropolises, Negro Jr & Ferreira 1998 Balkema, Rotterdam.