

Test di laboratorio di iniezione per l'impermeabilizzazione e consolidamento di terreni granulari per mezzo di materiali innovativi

Alessio Chierigato*
Cristina Gabriella Oñate Salazar*
Carmine Todaro*
Daniele Martinelli*
Daniele Peila*
*DIATI – Politecnico di Torino, Italia

1. Iniezione nei terreni granulari

I trattamenti d'iniezione nei terreni sciolti nel caso della costruzione di gallerie consentono di ottenere la riduzione della permeabilità dell'ammasso al fine di permettere lo scavo sotto battente di falda, nonché di realizzare un arco di terreno con migliori caratteristiche meccaniche attorno al profilo di scavo, e quindi garantire la stabilità dello scavo e del fronte.

Le proprietà meccaniche (principalmente resistenza e deformabilità) ed idrauliche (permeabilità) del terreno possono essere migliorate attraverso l'iniezione di prodotti naturali o artificiali, con perforazioni di piccolo diametro, equipaggiate con tubi valvolati. L'uso di mi-

scele a base di cemento è particolarmente efficace in terreni di alta permeabilità, come ghiaie e sabbie grossolane, mentre la presenza di terreni meno permeabili, come sabbie fini e limi, rende necessario l'impiego di sospensioni più fini (cementi ultrafini) e/o di soluzioni chimiche (gel, resine).

La scelta della miscela dipende dalla compatibilità chimica e mineralogica tra miscela e terreno da iniettare, dalla sua granulometria e dalle proprietà meccaniche o idrauliche richieste, dal punto di vista ingegneristico, al terreno trattato.

Nel seguito si riportano i risultati di una campagna sperimentale finalizzata a verificare l'iniettabilità e le proprietà di terreni iniettati con cemento microfine e nanosilice colloidale.

La possibilità di iniettare un terreno, mediante una miscela in grado di modificarne le caratteristiche geotecniche, rimane oggi una delle tecniche di miglioramento dei terreni più efficace nell'ottica dello scavo di gallerie. I campi di applicabilità di queste miscele dipendono da numerosi parametri esterni, legati sia alle caratteristiche dei terreni da permeare, sia alle tecniche d'iniezione. Le prove di laboratorio non sono codificate e spesso sono basate su procedimenti concepiti ex novo dai vari sperimentatori. In linea generale si può dire che le prove di laboratorio sono prevalentemente focalizzate sulla caratterizzazione reologica delle miscele utilizzate, sulla loro effettiva capacità di penetrazione in terreni granulari campione e sui parametri di resistenza ottenibili sui terreni iniettati.

Il principale obiettivo della ricerca è quello di analizzare le proprietà di due nuovi materiali per l'iniezione, il microcemento e la nanosilice colloidale, attraverso la caratterizzazione della miscela e lo studio della sua capacità di penetrazione in vari terreni granulari.

Le prove effettuate in questa sperimentazione hanno dimostrato le effettive capacità di questi nuovi materiali nel conseguire un'eccellente penetrazione e un ottimo consolidamento dei terreni granulari, anche con percentuali di grani fini nel terreno.

Parole chiave: iniezioni, consolidamento, impermeabilizzazione, prove di laboratorio.

Nowadays the possibility of injecting a soil, by using proper mixtures able to modify the geotechnical properties, remains one of the most effective techniques of ground improvement when excavating a tunnel. The range of applicability of these mixtures depends on several external parameters which are linked both to the characteristics of the soil to inject and to the grouting techniques. Laboratory tests on these samples are not standardized and they are often based on procedures conceived from scratch by the technicians. In general we can say that laboratory tests are mainly focused on the of the rheological properties characterization of the mixtures used, on their actual penetration in sample granular soil and on the strength parameters obtained after grouting. The main focus of this research is the analysis of the properties of two new grouting materials, the microcement and the silica gel, by characterizing the mixture and by studying the penetration through some granular soils.

The tests carried out during the research demonstrated the actual capacities of these new materials in order to reach an excellent penetration and a good granular soils improvement, even in presence of finer grains in the soil.

Keywords: grouting, ground improvement, waterproofing, laboratory tests.

2. Materiali di iniezione utilizzati nella ricerca

2.1 Nanosilice colloidale

La nanosilice colloidale è una miscela minerale idrofila, a bassa viscosità, specifica per iniezioni di impermeabilizzazione e consolidamento in rocce poco consistenti ed in terreni stratificati limo-sabbiosi.

Tale miscela è caratterizzata da una sospensione di silice colloidale nanometrica (nanosilice colloidale), e presenta un tempo di gelificazione che può essere regolato mediante l'aggiunta di un accelerante, ovvero una soluzione di cloruro di sodio (NaCl) in acqua, che funge da attivatore del processo di gelificazione.

Le particelle di silice colloidale hanno una dimensione variabile da circa 4 a 16 nm (schede tecniche BASF Construction Chemicals) e non tendono a sedimentare in soluzione.

2.2 Microcemento

I microcementi sono stati originariamente sviluppati per le iniezioni di rocce e terreni e, potendo contare su tempi di presa di circa due ore, sono particolarmente adatti alle iniezioni in gallerie e sono composti di puro clinker Portland, senza altre aggiunte.

Il cemento microfino utilizzato nelle prove di laboratorio è stato il RHEOCEM[®] 900, composto da cemento Portland microfino con valore di Blaine > 900 m²/kg ove il 100% dei grani è < 20 µm.

Per ovviare agli effetti della sedimentazione e al contempo eliminare la tendenza a flocculare della miscela, è consigliato l'utilizzo dei microcementi in abbinamento ad un fluidificante (RHEOBUILD[®] 2000). Il dosaggio di tale additivo varia dall'1 al 3% in peso sul cemento: la quantità ottimale deve essere usualmente definita in funzione delle specifiche esigenze tecnico-operative quali temperature esterne, tipo di attrezzatura, tipologia di iniezione da eseguire, ecc.

La penetrabilità di una miscela cementizia in un terreno granulare dipende dalla geometria dei grani, in particolare vale la seguente relazione (schede tecniche BASF Construction Chemicals):

$$D_{95,c} \leq 0.08 \cdot D_{5,t} \quad (1)$$

dove:

$D_{95,c}$ dimensione espressa in micrometri (µm) al di sotto della quale sta il 95% dei grani del cemento;

$D_{5,t}$ dimensione espressa in micrometri (µm) al di sotto della quale sta il 5% del terreno.

Tale relazione lega la dimensione massima del legante a quella della dimensione minima dei grani del terreno.

3. Prove di laboratorio

Nel seguito saranno descritte in dettaglio le prove sperimentali eseguiti nella ricerca.

Le prove d'iniezione sono state realizzate iniettando le miscele in terreni con caratteristiche granulometriche differenti (Figura 1). I differenti valori di permeabilità sono sintetizzati in tabella 1.

3.1. Prove di caratterizzazione dei cementi microfino

Il procedimento adottato per la determinazione della viscosità Marsh segue lo standard di riferimento UNI 11152. I test effettuati hanno fornito risultati riportati in tabella 2, che riporta anche i valori della % di separazione tra le fasi solide e liquide dopo un tempo di attesa di circa 2 ore dalla miscelazione "bleeding".

3.2 Prove di caratterizzazione della nanosilice colloidale

Il metodo utilizzato per misurare i tempi di gelificazione della nanosilice colloidale con l'aggiunta dell'accelerante al 10% di NaCl è stato il seguente:

- miscelazione di 0,2 l di nanosilice con l'accelerante (a differenti percentuali) tramite miscelatore colloidale (1800 rpm) per 10 secondi;
- la misura del tempo di gelificazione parte immediatamente dopo la miscelazione e si interrompe quando la miscela non è più in grado di fluire.

L'andamento nel tempo della trasformazione della nanosilice in gel, a seconda della percentuale di accelerante (NaCl) utilizzata è ben espressa dal grafico di figura 2.

3.2.1. Viscosità dinamica

Tramite il viscosimetro rotazionale (dotato di apposita girante adatta alle bassissime viscosità) si sono invece misurati i valori di viscosità della miscela (nanosilice + accelerante in diverse percentuali).

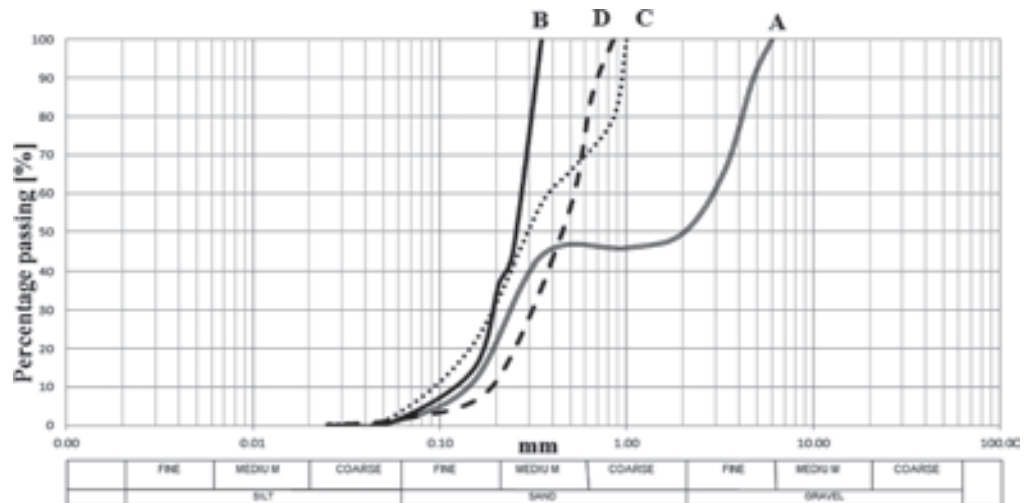
Si riportano nel seguito i grafici relativi a mix design tipicamente utilizzati in casi reali di costruzione di gallerie, quindi compatibili con i più comuni sistemi di iniezione.

3.3 Prove di iniezione

Le prove di iniezione sono state effettuate in tutti i 4 terreni sia con la nanosilice colloidale sia con i microce-

NOTE TECNICHE

Fig. 1. Distribuzione granulometrica dei terreni sottoposti ai test.
Grain size distribution of the tested soils.



menti. I risultati hanno evidenziato una evidente variazione dei parametri d'iniezione tra le due miscele quali, l'aumento della pressione, la velocità di penetrazione e del raggio d'iniezione della miscela.

3.3.1 Iniezioni con microcemento

Il metodo adottato per i test d'iniezione in laboratorio dei microcementi (rapporto a/c = 1 e fluidificante pari al 2%) è stato il seguente:

- preparazione del tubo in PVC di diametro esterno 63 mm, spessore 4,5 mm, lunghezza 1 m, posizionato orizzontalmente;
- riempimento con 10 cm di ghiaietto (3 mm) per impedire l'occlusione del raccordo d'uscita e avente funzione di filtro;
- introduzione del terreno di prova a strati successivi di circa 20 cm, ognuno dei quali è stato costipato facendo cadere nel tubo una massa cilindrica d'acciaio (di 4 kg di peso), da un'altezza costante di 50 cm;
- chiusura del tubo e sua connessione, tramite valvole a sfera filettata, al tubo di mandata della pompa. La pompa utilizzata in laboratorio è un sistema idraulico

Tab. 1. Valori di k dei terreni sottoposti ai test.
k-values of the studied soils.

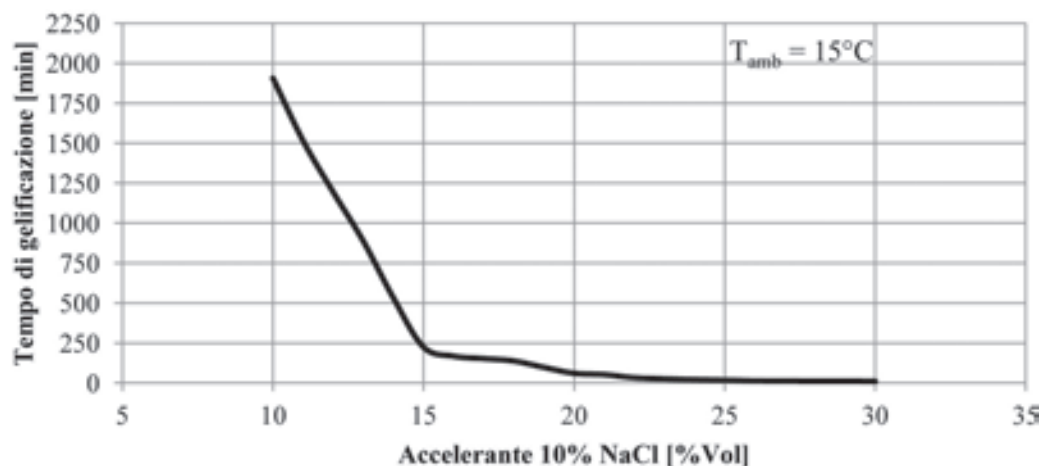
Terreno	A	B	C	D
k (m/s)	1,20 E-04	9,55E-06	5,72E-05	2,16E-05

Tab. 2. Risultati viscosità Marsh e bleeding test.
March viscosity results and Bleeding results.

Quantità fluidificante	1%	2%	3%
Viscosità Marsh (s)	34	32.5	31.5
Bleeding (%)	0.58	0.45	0.41

- monocomponente ad alta pressione (220÷270 bar) con una capacità di portata massima di 6,5 l/min;
- eventuale saturazione del terreno;
- miscelazione di 2 kg di microcemento con l'acqua tramite miscelatore colloidale (1800 rpm) per un tempo di 2 minuti. Aggiunta del fluidificante e miscelazione per un ulteriore minuto;
- iniezione della miscela nel tubo orizzontale, a pressioni P_i variabili da 2 a 20 bar fino a saturazione completa del provino definita dalla fuoriuscita della miscela dal raccordo finale d'uscita del tubo sperimentale;
- scollegamento del tubo dal sistema d'iniezione e mes-

Fig. 2. Tempi di gelificazione della nanosilice in funzione della percentuale di accelerante (10% NaCl).
Nano-silica gelling time in function of the accelerator dosage percentage. The accelerator has a percentage of NaCl equal to 10% in volume.



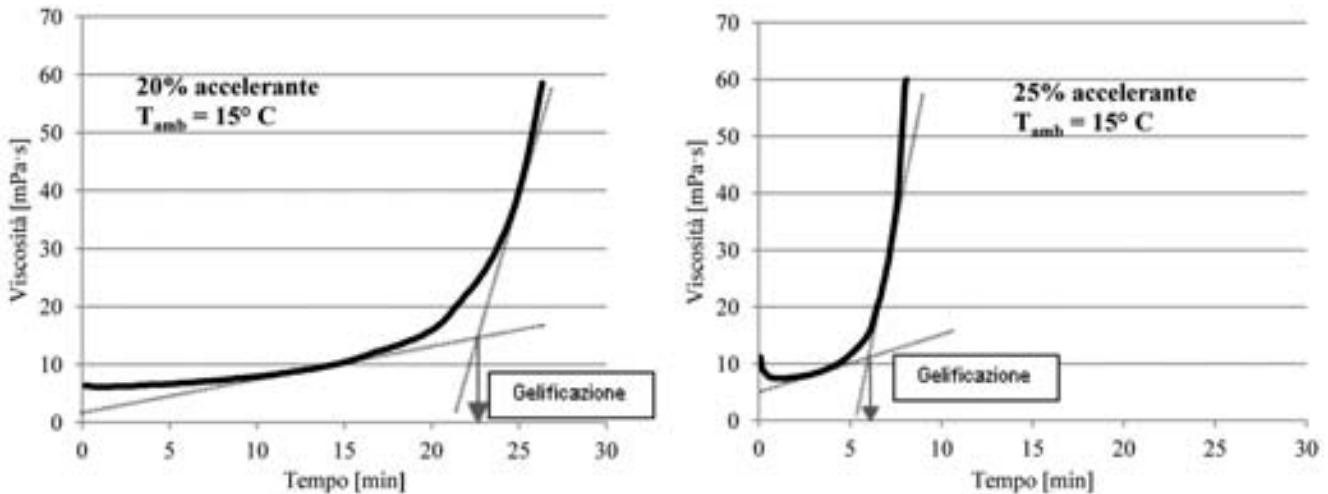


Fig. 3. Viscosità dinamica in funzione del tempo (20% e 25% di accelerante in soluzione al 10% di NaCl).
 Dynamic viscosity in function of time. The accelerator (10% NaCl in volume on the aqueous solution) dosage are 20% and 25% in volume of the mix.

sa a riposo per un tempo funzione della presa del microcemento in oggetto;

- collegamento del tubo ad un compressore d'aria (15÷20 bar) ed espulsione, in apposito carotiere, del provino di terreno trattato. Dopo 24 ore di riposo, i campioni vengono lasciati maturare in acqua alla temperatura di $20 \pm 2^\circ \text{C}$ prima delle prove meccaniche a 2, 7 e 14 giorni.

Le prove d'iniezione hanno evidenziato un'ottima penetrabilità nei terreni con pressioni d'iniezione inferiori a 30 bar.

3.3.2 Iniezioni con nanosilice colloidale

Il metodo adottato per i test d'iniezione in laboratorio della nanosilice colloidale, è analogo a quanto descritto per i microcementi. In questo caso i campioni vengono lasciati riposare in aria alla temperatura di $20 \pm 2^\circ \text{C}$.

Nelle iniezioni dei terreni di prova le pressioni che si sono raggiunte sono comprese tra i 2 e i 10 bar e non si sono riscontrate particolari difficoltà nel permeare completamente tutti i materiali naturali disponibili.

3.3.3 Analisi comparativo dei risultati di iniezione

I limiti di penetrabilità in funzione della permeabilità raggiunti nelle prove, sia usando microcementi (in blu) sia usando nanosilice colloidale (in rosso) sono rappresentati in figura 4, lo schema di base proposto in letteratura tecnica (schede tecniche BASF Construction Chemicals) è stato modificato per evidenziare il superamento dei limiti granulometrici e di permeabilità dei terreni trattati, il che indica come questi materiali siano molto efficaci anche in terreni con percentuali di grani molto fini.

3.4 Prove meccaniche di compressione monoassiale sui terreni iniettati.

Le prove sono state effettuate seguendo lo standard normativo EN 12504-1 mediante una pressa elettroidraulica con massimo carico applicabile pari a 50 MPa.

Per confrontare i valori di resistenza a compressione monoassiale misurati sulle carote (di geometria cilindrica), estratte dal tubo d'iniezione, con quelli determinati su provini cubici si è deciso di effettuare le prove di schiacciamento su carote aventi rapporto h/d pari a 1 (come peraltro suggerito dalla norma EN 12504-1). In figura 5 si mostra un provino iniettato con microcemento in fase di esecuzione della prova di compressione monoassiale.

I grafici riportati nella figura 6 riportano i valori di resistenza a compressione monoassiale raggiunti dai terreni iniettati con il microcemento; mentre i valori ottenuti per la nanosilice colloidale sono riportati in figura 7.

4. Conclusioni

In conclusione è possibile evidenziare che le prove reologiche su miscele di iniezione realizzate con microcemento consentono di ottenere un'elevata stabilità della miscela ($\text{bleeding} \leq 1\%$) e bassa viscosità ($31,5 \div 34 \text{ s}$, cono di Marsh). Grazie a questi parametri la miscela ha una buona iniettabilità ed è facile da gestire in cantiere. Le prove di laboratorio hanno dimostrato anche un'eccellente penetrazione del microcemento nei terreni di prova ma, come ovvio, le pressioni di iniezione aumentano all'aumentare della frazione fine, rimanendo sempre al di sotto dei 30 bar, che rappresenta il limite superiore indicato in letteratura per le iniezioni per permeazione, al fine di evitare l'insorgenza di fenomeni di claquage.

MISCELA	Coefficiente di permeabilità k [m/s]						
	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷
Cemento microfine							
Cemento Ordinario							
Bentonite							
Silicato di sodio							
Resine							
Resine acriliche							
Nanosilice colloidale							
MISCELA	Ghiaia	Sabbia			Limo	Argilla	
		Grossa	Media	Fine			
Cemento microfine							
Cemento Ordinario							
Bentonite							
Silicato di sodio							
Resine							
Resine acriliche							
Nanosilice colloidale							
Dim. Grani [mm]	2	0,5	0,25	0,074	0,01	0,005	

Fig. 4. Penetrabilità di alcune miscele in funzione di granulometria e permeabilità dei terreni (Prove di laboratorio: punti= limite raggiunto dai microcementi, linee = limite raggiunto dalla nanosilice).
Mixture penetrability in function of the grain size distribution and the soil permeability (laboratory tests: dots = upper limit reached using microelements, lines = upper limit reached using colloidal nanosilica).

Le prove di resistenza a compressione monoassiale effettuate sui campioni di terreno iniettati con il microcemento danno valori compresi tra 6 MPa (a 2 giorni) e 17 MPa (a 14 giorni) con un aumento regolare nel tempo.

Le prove effettuate con miscele prodotte con nanosilice colloidale, con una percentuale di accelerante al 10%, evidenziano che è necessario utilizzare una percentuale di accelerante dal 20% al 26% per ottenere un tempo di gelificazione compreso tra 61 min e 14 min. Tale campo di applicazione, trova giustificazione nella compatibilità di utilizzo della nanosilice colloidale con i tradizionali impianti di miscelazione e pompaggio usati nelle applicazioni in galleria: tempistiche troppo basse potrebbero, infatti, portare a blocchi delle linee d'iniezione dovuti alla gelificazione della miscela e, con-



Fig. 5. Provino iniettato con microcemento, in fase di esecuzione della prova di compressione monoassiale.
Soil sample injected by microcement, during the uniaxial compressive strength test execution.

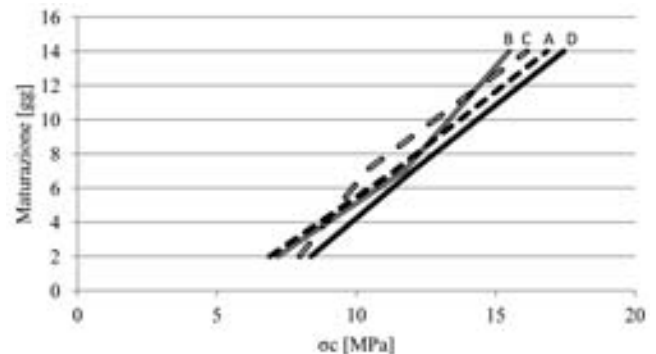


Fig. 6. Resistenza a compressione monoassiale per i terreni iniettati con microcemento.
Uniaxial Compressive Strength results for samples injected by micro-cement.

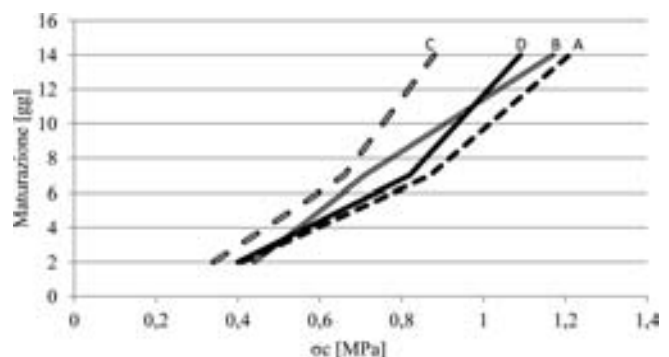


Fig. 7. Resistenza a compressione monoassiale per i terreni iniettati con nanosilice colloidale.
Uniaxial Compressive Strength results for samples injected by colloidal nano-silica mixed with 10% NaCl accelerator.

seguentemente, alla non riuscita del trattamento d'iniezione ed alla perdita della linea di iniezione con posteriori ritardi operazionali.

Per quanto concerne la viscosità delle miscele prodotte con nanosilice colloidale, le prove hanno fornito il classico andamento delle miscele evolutive. Le prove di iniezione hanno evidenziato l'ottima capacità di penetrazione delle miscele prodotte con nanosilice colloidale in tutti i terreni studiati, anche in quelli con elevato contenuto della frazione fine, con pressioni di iniezioni basse: comprese tra 2 e 10 bar.

Analizzando infine i risultati delle prove di compressione monoassiale, sui provini di terreni iniettati con nanosilice colloidale in soluzione con l'accelerante al 10% di NaCl, si sono ottenuti valori compresi tra 0,2 e 1,2 MPa.

Bibliografia

- AFTES (Association française des tunnels et de l'espace souterrain), *La conception et la réalisation des travaux d'injection des sols et des roches*, in *Recommandations de l'AFTES*, n. GT8R2F1.
- AFTES (Association française des tunnels et de l'espace souterrain), *Travaux d'injection pour Ouvrages Souterrains*, in *Recommandations de l'AFTES*, n. GT8R1F2.
- Akbut, S. e Saglamer, A., 2002, *Estimating the groutability of granular soils a new approach*, in *Tunnelling and Underground Space Technology*, n. 17.
- ASTM C136 - 06, 2006. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.
- ASTM D2434-68, 2006. Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head).
- Axelsson, M., 2006. *Mechanical tests on a new non-cementitious grout, silica sol: a laboratory study of the material characteristics in Tunnelling and Underground Space Technology*, n° 21.
- Bahadur, A.K., Holter, K.G. e Pengelly, A., 2007. *Cost-effective pre-injection with rapid hardening microcement and colloidal silica for water ingress reduction and stabilisation of adverse conditions in a headrace tunnel*, in *Underground Space – the 4th Dimension of Metropolises*, Taylor & Francis Group, London, Bezuïjen.
- Butrón, C., Gustafson, G. e Axelsson, M., 2009. *Silica sol for rock grouting: Laboratory testing of strength, fracture behaviour and hydraulic conductivity*, in *Journal homepage, Tunnelling and Underground Space Technology*, n° 24.
- Cambefort, H., 1967. *Injection des sols*, Paris, Éditions Eyrolles.
- Cambefort, H., 1977. *The principles and applications of grouting*, in *Q.Jl Engng Geol.*, Vol. 10.
- Chieragato, A., Oñate Salazar, C.G., Torado, C. e Peila, D., 2014. *Mechanical improving of granular soils by permeation grouting: results of laboratory tests*, in *World Tunnel Congress*.
- Garshol, K.F., 2010. *Rock Tunnelling with Groundwater Ingress Control - "Dry" tunnels using Pre Excavation Grouting*, in *ICE Breakfast Forum*.
- Holter, K.G. e Hognestad, H.O., 2010. *Advantages in pre-injection grouting*, in *Tunnels & Tunnelling International*, Ottobre 2010, London, World Market Intelligence.
- Holter, K.G. e Hognestad, H.O., 2012. *Modern pre-injection in underground construction with rapid setting microcements and colloidal silica*, in *Geomechanics and Tunnelling*, vol. 5.
- Holter, K.G. *Modern pre-injections in underground construction with microcements and liquid colloidal silica for water ingress reduction and ground improvement*, in *Geomechanics and Tunnelling*.
- Karol, R.H., 2003. *Chemical grouting and soil stabilization*, New York, Marcel Dekker, Inc.
- Kolybas, D., 2005. *Tunelling and Tunnel Mechanics. A Rational Approach to Tunnelling*, Berlin, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Mahrholz, A. T., Stängle, J. e Sinapius, M., 2009. *Quantitation of the reinforcement effect of silica nanoparticles in epoxy resins used in liquid composite moulding processes*, in *Journal homepage*, parte A, n° 40.
- Melbye, T., Hognestad, H.O. e Dimmock, R., *Pre-Injection technology for mines*, in *8th International Congress on Mine Water & the Environment*, Johannesburg, South Africa
- Moseley, M.P. e Kirsch, K., 2005. *Ground improvement*, Taylor & Francis e-Library.
- Mutman, U. e Kavak, A., 2011. *Improvement of granular soils by low pressure grouting*, in *International Journal of the Physical Sciences*, Vol. 6.
- Peila, D., Chieragato, A., Picchio, A. e Borio, L., 2010. *Studio della permeabilità di terreni condizionati con schiume*, in *GEAM*, Vol. XLVII, n° 2, Pàtron Editore.
- Tornaghi, R., Bosco, B. e De Paoli, B., 2003. *Application of recently developed grouting procedures for tunneling in the Milan urban area. 5th International Symposium on Tunnelling*, London.
- UNI EN 11152:05, 2005. *Sospensioni acquose per iniezioni a base di leganti idraulici - Caratteristiche e metodi di prova*.
- UNI EN 196-3:05, 2005. *Metodi di prova dei cementi - Parte 3: Determinazione del tempo di presa e della stabilità*.
- UNI EN 12504-1:09, 2009. *Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Parte 1: Carote - Prelievo, esame e prova di compressione*.

Ringraziamenti

Si ringrazia Basf Construction Chemical Italia per il finanziamento della presente ricerca e per aver fornito i materiali per l'iniezione.