

PERMEATION GROUTING CON SOSPENSIONI DI SILICE COLLOIDALE IN TERRENI GRANULARI

Katia Boschi

DICA, Politecnico di Milano

katia.boschi@polimi.it

Claudio di Prisco

DICA, Politecnico di Milano

claudio.diprisco@polimi.it

Davide Grassi

Master Builders Solutions

davide.grassi@mbcc-group.com

Giuseppe Modoni

DICEM, Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale

modoni@unicas.it

Erminio Salvatore

DICEM, Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale

e.salvatore@unicas.it

Sommario

La tecnica del “permeation grouting” con sospensioni di silice colloidale è spesso adottata sia per impermeabilizzare sia per aumentare la resistenza alla liquefazione di terreni granulari. Questa tecnica consiste nell’ eseguire iniezioni, fissando una spaziatura l’una dall’altra, a basse pressioni tali da favorire il fenomeno della permeazione attraverso i pori del mezzo granulare. Le miscele utilizzate sono caratterizzate inizialmente da una bassa viscosità che permette il loro avanzamento anche in terreni poco permeabili; una successiva evoluzione temporale della reologia porta a un cambiamento di stato della miscela stessa, da quello fluido, a quello di gel fino a quello solido. Da un punto di vista applicativo, un’accurata modellazione del processo di permeazione di queste miscele è cruciale per progettare questi trattamenti. In questa nota, infatti, è stata investigata la reologia Binghamiana e dipendente dal tempo di diverse sospensioni di silice colloidale, caratterizzate da diverse composizioni chimiche, e la legge di Darcy è stata opportunamente modificata per tenere conto della natura reologica di queste miscele. Dopo una validazione, grazie a risultati di prove eseguite in laboratorio, questa legge è stata utilizzata per derivare un modello predittivo semplificato in grado di legare la portata imposta durante le iniezioni in sito con l’evoluzione temporale della distanza raggiunta dalla miscela e della pressione di iniezione.

1. Introduzione

Le iniezioni a bassa pressione di sospensioni di silice colloidale (SSC) sono spesso utilizzate per impermeabilizzare zone soggette all’azione di inquinanti, come rimedio rapido per arrestare venute d’acqua a seguito di scavi o per aumentare la resistenza alla liquefazione di sabbie (Salvatore et al., 2020). Ciononostante, la progettazione di queste iniezioni è spesso affidata a metodi empirici e osservazioni sperimentali in sito. In questo scenario, alcuni modelli matematici/numerici sono già stati proposti (Bouchelaghem et al. 2001; Coskun and Tokdemir, 2020), in cui, però, una descrizione

realistica della complessa reologia della miscela iniettata, che gioca un ruolo chiave nel caso di SSC (come si vedrà nel Paragrafo 3.2), è mancante. La novità di questo progetto sta nell'aver fornito una descrizione in questo senso nel caso di SSC caratterizzate da diverse composizioni chimiche (Paragrafo 2), arrivando poi a modellare l'importante ruolo giocato dal fenomeno di gelificazione nel processo di permeazione in terreni granulari (Paragrafo 3). Questi due ingredienti sono stati infine utilizzati per derivare un modello predittivo semplificato da utilizzare in fase di progettazione di trattamenti di permeation grouting.

2. Reologia delle sospensioni di silice colloidale

Le SSC, usate nel permeation grouting, sono principalmente composte da sospensioni acquose di particelle nanometriche (NS) derivanti dalla precipitazione di soluzioni sature di acido silicico, mescolate appena prima dell'iniezione stessa con soluzioni acquose di cloruro di sodio (NaCl). Viene innescata così la formazione di catene silicee, che con il tempo porta la SSC a passare da uno stato fluido a uno di gel fino a diventare solido.

Le SSC possono essere agevolmente preparate a diverse composizioni (% di NS e % di NaCl). A questo riguardo, è bene tenere in considerazione il fatto che sia le proporzioni assolute sia quelle relative di NS e di NaCl influenzano, insieme a pH e temperatura T , l'evoluzione temporale delle proprietà reologiche della miscela e di conseguenza anche i tempi di gelificazione della stessa (Iler, 1979).

Questo complesso accoppiamento termo-chemo-meccanico è stato in parte investigato dagli autori attraverso una campagna di prove reometriche condotte a velocità di deformazione di taglio $\dot{\gamma}$ costante, nell'intervallo compreso tra 20 e 130 s^{-1} . La temperatura è stata mantenuta costante pari a 20 °C e la variazione di pH investigata (da 10.2 a 9.3) deriva dai diversi rapporti di diluizione considerati per il prodotto commerciale usato (MasterRoc MP325 caratterizzato da particelle di 4 nm di diametro e una concentrazione di NS del 15%; MBS Italia, 2021). Dai risultati ottenuti, è stato possibile caratterizzare la reologia delle SSC, la sua dipendenza temporale (Paragrafo 2.1) e l'influenza della composizione chimica (Paragrafo 2.2).

2.1 Legame costitutivo dipendente dal tempo

La prima SSC studiata (pH = 10.2) è caratterizzata dal 12.7% di NS e dal 1.5% di NaCl, in linea con quanto comunemente suggerito dal produttore (MBS Italia, 2021). In Figura 1a, i risultati derivati dalle prove reometriche per questa SSC sono riportati in termini di sforzo di taglio τ misurato in funzione della $\dot{\gamma}$ imposta: i diversi simboli si riferiscono a diversi istanti temporali t .

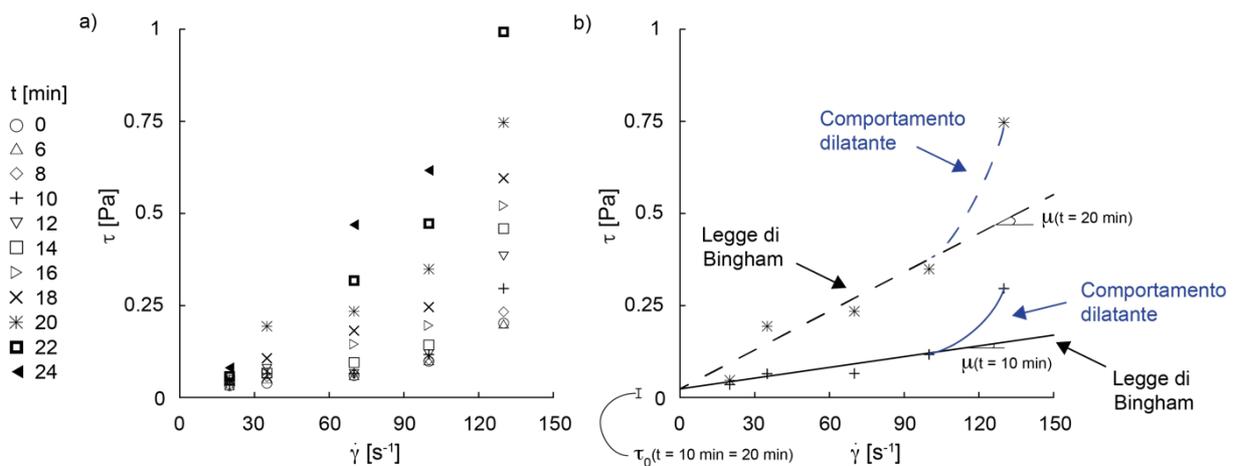


Fig 1. a) Curve τ vs. $\dot{\gamma}$ per diversi istanti di tempo t e b) interpolazione dei risultati sperimentali con la legge di Bingham per $t = 10$ min e 20 min (composizione della SSC: NS = 12.7% e NaCl = 1.5%).

Se si fissa un istante di tempo (Figura 1b, $t = 10$ e 20 min), il comportamento reologico della SSC può essere descritto per mezzo della legge di Bingham ($\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma}$, con τ_0 lo sforzo di snervamento e μ la viscosità effettiva) nell'intervallo $20 \text{ s}^{-1} \leq \dot{\gamma} \leq 100 \text{ s}^{-1}$. Una legge dilatante sarebbe più adatta per $\dot{\gamma} > 100 \text{ s}^{-1}$, che non sono però attesi durante la pratica del permeation grouting, se non in prossimità della sorgente di iniezione (Boschi, 2022). Inoltre, una legge non-lineare implicherebbe una perdita di linearità anche nella corrispondente relazione che lega velocità di filtrazione e gradiente idraulico (Paragrafo 3). Una volta individuati μ e τ_0 che permettono di interpolare i risultati sperimentali ai diversi istanti temporali, si derivano le funzioni $\mu(t)$ e $\tau_0(t)$ riportate in Figura 2 (composizione C), con μ che inizia a crescere dopo 7.5 min e τ_0 che rimane costante fino a quando la SSC non inizia a gelificare (21.6 min) e questi inizia quindi a crescere in modo esponenziale ($t = t_{RFA} = 24$ min è l'istante in cui $\tau_0(t_{RFA}) = 10 \cdot \tau_0(0)$).

2.2 Influenza della composizione chimica

Quattro altre diverse SSC, caratterizzate da diverse % di NS e NaCl (Figura 2), sono state investigate. Le composizioni scelte (3 o 5% per NS e 2 o 3% per NaCl) sono giustificate dall'ampio utilizzo fatto di SSC per ridurre il rischio di liquefazione dei terreni: in accordo con Salvatore et al. (2020), queste piccole percentuali, soprattutto di NS, sono sufficienti a questo scopo, andando anche di pari passo con un giovamento dal punto di vista economico. Le funzioni $\mu(t)$ e $\tau_0(t)$ derivate per le varie SSC studiate (analogamente a quanto fatto nel Paragrafo 2.1 per la composizione C) sono confrontate in Figura 2. Si può osservare che: (1) inizialmente τ_0 e soprattutto μ non sembrano molto influenzate dalla composizione chimica; (2) l'evoluzione temporale successiva è significativamente influenzata dalla % di NS; (3) i tempi di gelificazione dipendono dalle % sia di NS sia di NaCl, sia in termini assoluti sia relativi.

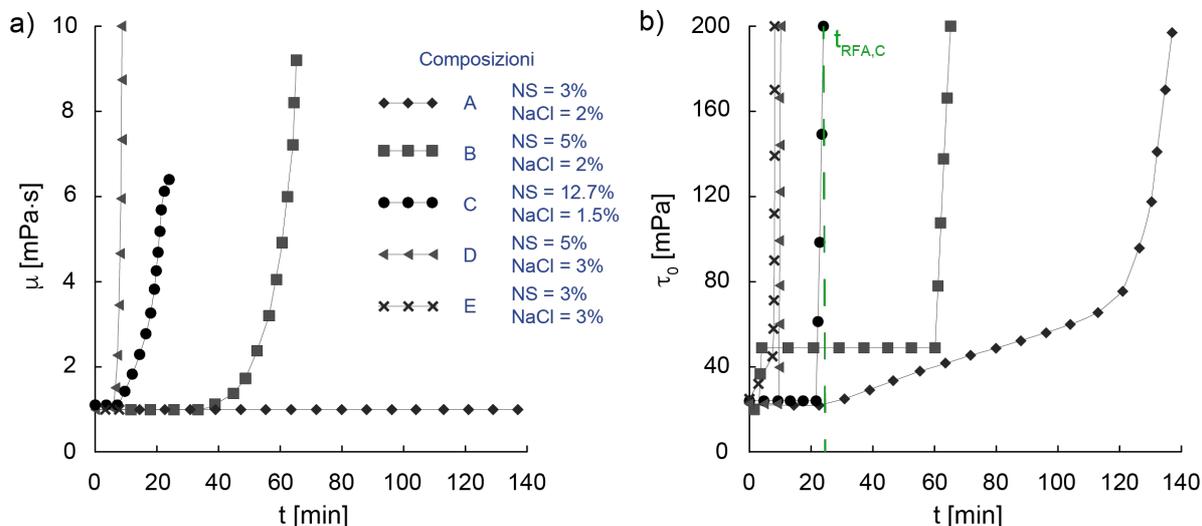


Fig 2. Funzioni a) $\mu(t)$ e b) $\tau_0(t)$ relative a diverse composizioni chimiche di SSC (pH = 9.3 per composizioni A e E; pH = 9.5 per composizioni B e D).

3. Legge di Darcy modificata per fluidi Binghamiani aventi reologia dipendente dal tempo

Una relazione che leghi velocità di filtrazione e gradiente idraulico nel caso di flussi di fluidi Binghamiani aventi reologia dipendente nel tempo in mezzi granulari (con fluido assunto incomprimibile e regime laminare) è derivata nel Paragrafo 3.1 e validata nel caso di SSC che permeano in sabbia nel Paragrafo 3.2.

3.1 Derivazione

Il problema di un fluido Binghamiano che scorre lungo un tubo di sezione circolare in un regime

laminare è già stato risolto da Buckingham (1921). (1) Applicando l'equazione di Buckingham a un sistema di pori composto da tubi rettilinei e paralleli di diametro costante δ , (2) trascurando i termini di ordine superiore al primo (ragionevole per gradienti idraulici non troppo esigui) e (3) considerando una velocità di filtrazione alla Darcy v , si deriva che:

$$v = -\frac{k}{\mu} \left\langle \frac{\Delta p}{L_t} - \frac{16}{3} \cdot \frac{\tau_0}{\delta} \right\rangle \quad (1)$$

con $\langle \cdot \rangle$ le parentesi di Macaulay, k la permeabilità intrinseca del mezzo poroso considerato e Δp la perdita di pressione lungo una lunghezza del tubo L_t . Si è così ottenuta una legge di Darcy modificata in cui il secondo termine gioca il ruolo di smorzatore o di “entry value”, a seconda del valore di Δp .

Più in generale, nel caso di (1) mezzi granulari, caratterizzati quindi da una matrice porosa più complessa di quella considerata prima (Scheidegger, 1958), anche se assunti omogenei e isotropi, e (2) fluidi Binghamiani con reologia dipendente dal tempo ($\mu(t)$ e $\tau_0(t)$), l'Equazione 1 può essere riscritta come segue:

$$\mathbf{v}(t) = -\frac{k \cdot \gamma}{\mu(t)} \cdot \left\langle 1 - \frac{G(t)}{\gamma} \frac{1}{\|\mathbf{i}(t)\|} \right\rangle \cdot \mathbf{i}(t), \quad (2)$$

con \mathbf{v} il vettore velocità di filtrazione, \mathbf{i} il vettore gradiente idraulico, $\|\mathbf{i}\|$ il suo modulo e $G(t)/\gamma$ il gradiente idraulico minimo necessario per innescare il flusso. La permeabilità intrinseca k può essere derivata attraverso correlazioni empiriche, elencate in Chapuis (2012), una volta note almeno la porosità n e una dimensione caratteristica della frazione fine del mezzo granulare in esame. Per quanto riguarda il termine $G(t) = 16 \tau_0(t) / (3\delta)$, gli autori suggeriscono di sostituire δ con una dimensione caratteristica d , in termini di diametro equivalente, dei restringimenti tra i pori del mezzo granulare, i così detti “pore throats”. In letteratura, molti autori hanno fornito stime sia del valore medio d_{50} di questi diametri sia del valore d_{PICCO} in corrispondenza del picco più alto nella distribuzione di frequenza, in funzione degli stessi parametri necessari per derivare k o di k stessa (Shire and O'Sullivan, 2016; Gueven et al., 2017).

Nell'ambito dell'ingegneria petrolifera, equazioni empiriche simili a Equazione 2, senza una reologia del fluido dipendente dal tempo, sono già state validate sperimentalmente (Mirzadzade et al., 1971). I parametri costitutivi sono stati però calibrati senza passare attraverso l'interpretazione micromeccanica qui proposta. Questa strategia non può invece essere adottata nel caso in esame, avendo a che fare con miscele caratterizzate anche da una variazione temporale della reologia.

3.2 Validazione

La legge di Darcy modificata è stata validata grazie a una campagna di prove di laboratorio, eseguite con la stessa apparecchiatura descritta in Salvatore et al. (2020). Su campioni omogenei (alti 140 mm e cilindrici di diametro interno 70 mm) di sabbia (sabbia di Fossanova, caratterizzata da particelle di forma regolare, $D_{10} = 0.2$ mm e $D_{50} = 0.275$ mm), sono state eseguite prove di permeabilità a carico variabile utilizzando SSC già investigate nel Paragrafo 2. In Tabella 1, sono elencate le prove eseguite. Per quanto riguarda la SSC usata, sono riportate la composizione chimica, a cui corrispondono le funzioni $\mu(t)$ e $\tau_0(t)$ in Figura 2, e il corrispondente peso per unità di volume γ . Per quanto riguarda il campione di sabbia, è riportata la n a cui è stato preparato, la k ricavata sperimentalmente (k_{exp} ; eseguendo prove di permeabilità con acqua sui campioni poi permeati con SSC) e il corrispondente parametro $d = d_{PICCO}$. Quest'ultimo valore è stato ricavato facendo riferimento ai risultati ottenuti da Gueven et al. (2017) per campioni granulari composti da particelle pseudo-sferiche e caratterizzati da analoghi valori di Cu , D_{10} e D_{50} : a partire da D_{50} e n o k/D_{50}^2 , hanno fornito correlazioni per derivare d_{50} e hanno osservato che $d_{PICCO} \cong 84\% d_{50}$. In Figura 3, le evoluzioni temporali della perdita di carico Δh totale registrata (linea continua verde) sono confrontate in modo più che soddisfacente con i corrispondenti risultati numerici

(linea punteggiata nera), ottenuti da Equazione 2 (1) imponendo le condizioni al contorno e iniziali del laboratorio, (2) considerando i parametri elencati in Tabella 1 e (3) adottando la descrizione reologica riportata nel Paragrafo 2. Il confronto sarebbe ancora soddisfacente nel caso di $d = d_{50}$, non riportato qui per brevità (Boschi, 2022). Infine, in Figura 3, sono riportati anche i risultati numerici ottenuti trascurando la natura Binghamiana del fluido in esame ($\tau_0(t) = 0$; linea continua nera) oppure la dipendenza temporale stessa della reologia ($\tau_0(t) = \tau_0(0)$ e $\mu(t) = \mu(0)$; linea tratteggiata nera). Si osserva come in generale queste reologie semplificate non siano in grado di riprodurre in modo soddisfacente i risultati sperimentali, condotti con gradienti idraulici analoghi a quelli registrati in sito durante la pratica del permeation grouting. Un'accurata descrizione reologica e il conseguente utilizzo di una legge di Darcy modificata si rivelano quindi necessari in fase di progettazione e modellazione delle iniezioni alla base del permeation grouting.

Prova	SSC	γ [kN/m ³]	n [-]	k_{exp} [m ²]	d [μ m]
1	A	10.13	0.34	$2.39 \cdot 10^{-11}$	15
2	B	10.28	0.32	$1.89 \cdot 10^{-11}$	14.4
3	E	10.19	0.34	$2.47 \cdot 10^{-11}$	15

Tab 1. Parametri richiesti per la modellazione numerica delle prove sperimentali.

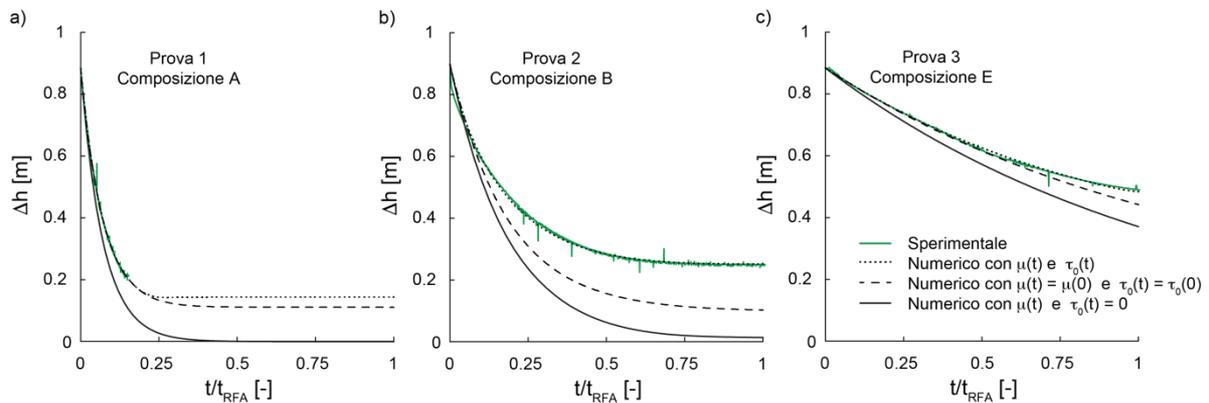


Fig 3. Prove di permeabilità a carico variabile: evoluzione di Δh nel tempo, risultati sperimentali e numerici a confronto.

4. Modellazione di iniezioni di silici colloidali in terreni granulari

Utilizzando la legge di Darcy modificata appena validata con la reologia Binghamiana dipendente dal tempo di diverse SSC, gli autori derivano un modello predittivo semplificato che può essere un valido strumento in fase di progettazione per le iniezioni in terreni granulari. In accordo con Coskun & Tokdemir (2020), sono introdotte le seguenti ipotesi semplificative: (1) simmetria di permeazione sferica (gravità trascurata); (2) n e k costanti nel tempo e nello spazio; (3) immiscibilità tra fluido iniettato e fluido interstiziale; (4) effetti di capillarità trascurati; (5) perdite di carico concentrate nella miscela iniettata. Imponendo così il bilancio di massa e Equazione 2 nella regione iniettata e integrando spazialmente, si deriva che:

$$\left(\frac{p_{inj}(t) - p_0}{p_0} - \frac{G(t)r_0}{p_0} \cdot \left(\frac{r_g(t)}{r_0} - 1 \right) \right) - \frac{Q(t)\mu(t)}{A(r_0)k\gamma} \cdot \frac{\gamma r_0}{p_0} \cdot \left(1 - \frac{r_0}{r_g(t)} \right) = 0, \quad (3)$$

con p_{inj} la pressione di iniezione, p_0 la pressione del fluido interstiziale iniziale, r_0 il raggio della sorgente di iniezione, $r_g(t)$ il raggio raggiunto dalla miscela all'istante t , Q la portata di iniezione e $A(r)$ l'area di una sfera di raggio r . (1) Imponendo comunemente Q costante durante l'iniezione nell'intervallo compreso tra 3 e 20 l/min e (2) derivando quindi che la variabile interna $r_g(t) = r_0 \cdot \sqrt[3]{1 + 3Qt/(A(r_0)n\gamma)}$, è possibile, grazie all'Equazione 3, monitorare l'evoluzione temporale della p_{inj} e verificare che non superi un certo valore critico al di sopra del quale possono innescarsi fenomeni non

voluti, come fratturazione idraulica o espansioni di cavità (Boschi, 2022).

5. Conclusioni

La nota presenta, innanzitutto, una descrizione dettagliata della reologia dipendente dal tempo di diverse sospensioni di silice colloidale, tra quelle più comunemente utilizzate nella pratica del permeation grouting, utilizzando un modello Binghamiano. La permeazione di queste miscele in terreni granulari è stata poi modellata attraverso una legge di Darcy modificata, fortemente dipendente non solo dall'evoluzione temporale dei parametri costitutivi del fluido, ma anche dalla microstruttura del mezzo poroso, in termini sia di permeabilità intrinseca sia di un diametro equivalente caratteristico della matrice porosa. A seguito di una validazione, i due ingredienti sono stati utilizzati per derivare un modello predittivo in grado di supportare (1) la progettazione e ottimizzazione del processo di iniezione a bassa pressione, alla base della tecnica del permeation grouting, principalmente in termini di spaziatura delle sorgenti di iniezione, composizione chimica della miscela da utilizzare e portata imposta e (2) l'interpretazione dei risultati sperimentali ottenuti dalle prove in sito, richieste e eseguite prima dell'esecuzione del trattamento vero e proprio.

Ringraziamenti

Questa ricerca è stata finanziata da MBS Master Builders Solutions Italia Spa con lo scopo di investigare e modellare i complessi processi idro-chemo-meccanici accoppiati che governano le iniezioni di miscele.

Bibliografia

- Boschi, K. (2022). "Permeation grouting in granular materials. From micro to macro, from experimental to numerical and viceversa." PhD Thesis. Politecnico di Milano. <http://hdl.handle.net/10589/182992>
- Bouchelaghem, F., Vulliet, L., Leroy, D., Laloui, L., & Descoedres, F. (2001). "Real-scale miscible grout injection experiment and performance of advection–dispersion–filtration model." *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 25(12), 1149-1173.
- Buckingham, E. (1921). "On plastic flow through capillary tubes." In *Proc. Am. Soc. Testing Materials*, 1154-1156.
- Chapuis, R.P. (2012). "Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils: a review. *Bulletin of engineering geology and the environment*", 71(3), 401–434.
- Coskun, S. B. and Tokdemir, T. (2020). "Modelling of Permeation Grouting Through Soils. *Journal of Applied Engineering Sciences*", vol.10, no.1, pp.11-16.
- Gueven, I., Frijters, S., Harting, J., Luding, S., & Steeb, H. (2017). "Hydraulic properties of porous sintered glass bead systems." *Granular matter*, 19(2), 28.
- Iler, K. R. (1979). "The chemistry of silica. Solubility, polymerization, colloid and surface properties and biochemistry of silica."
- MBS Italia (2021). "Technical datasheet of MasterRoc MP 325." <https://assets.master-builders-solutions.com/it-it/basf-masterroc mp 325 mar 2020.pdf>
- Mirzadzandade, A. KH., Amirov, A. D., Akhmedov, z. M., Barenblatt, G. I., Gurbanov, R. S., Entov, V. M., and Zaitsev, YU. V. (1971). "On the Special Features of Oil and Gas Field Development Due to Effects of Initial Pressure Gradient", *Preprints of Proceedings of 8th World Petroleum Congress, Special Papers*. Elsevier London.
- Salvatore, E., Modoni, G., Mascolo, M. C., Grassi, D., & Spagnoli, G. (2020). "Experimental Evidence of the Effectiveness and Applicability of Colloidal Nanosilica Grouting for Liquefaction Mitigation." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 146(10), 04020108.
- Scheidegger, A. E. (1958). "The physics of flow through porous media." *Soil Science*, 86(6), 355.
- Shire, T., & O'Sullivan, C. (2016). "Constriction size distributions of granular filters: a numerical study." *Géotechnique*, 66(10), 826-839.