



MIGLIORAMENTO DELLE PROPRIETÀ TERMICHE DEI TERRENI

Salvatore Erminio

Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale
e.salvatore@unicas.it

Michela Arciero

Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale
michela.arciero@unicas.it

Berhanu Arega Tadesse

Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale
berhanuarega.tadesse@studentmail.unicas.it

Gaspare Giovinco

Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale
giovinco@unicas.it

Giuseppe Modoni

Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale
modoni@unicas.it

Sommario

Nella presente nota si analizza la fattibilità tecnico-economica di interventi volti a migliorare le proprietà termiche dei terreni. Dapprima si espongono i risultati di prove di laboratorio di conducibilità e capacità termiche di una sabbia di riferimento trattata con additivi differenti. Partendo dai dati ottenuti si considera il fabbisogno energetico di un edificio per uffici di medie dimensioni, per valutare la fattibilità di un intervento di miglioramento termico del sottosuolo.

1. Introduzione

Raggiungere la neutralità climatica rappresenta per la società contemporanea un obiettivo tanto ambizioso quanto stimolante (European Commission, 2019). In questo scenario numerose sono le tecnologie innovative che identificano nel sottosuolo una preziosa risorsa per l'estrazione del calore o per il suo stoccaggio. Tra le tecnologie a bassa entalpia, (Muffler and Cataldi, 1978), gli usi di pompe di calore geotermiche (Ground Source Heat Pump, GSHP) (Bernier M., 2006) e di scambiatori di calore aria-terreno (Earth Air Heat Exchanger EAHE) (Sehli et al., 2012) risultano molto promettenti. Per ciò che riguarda invece lo stoccaggio dell'energia termica, i primi sistemi di accumulo realizzati mediante perforazioni (Soil- Borehole Thermal Energy Storage System, BTS) (Lanini et al., 2014) hanno mostrato

risultanti incoraggianti nel ridurre lo sfasamento temporale tra produzione e domanda dell'energia. In ognuna delle tecnologie sopracitate, i fenomeni di scambio termico e di accumulo del calore sono regolati dalla capacità e conducibilità termica dei terreni che ne determinano quindi l'efficienza. Il progetto di ricerca da cui è derivato il presente contributo mira quindi a esplorare diverse tecniche per migliorare le proprietà termiche dei terreni e incrementare l'efficienza degli impianti geotermici.

2. Studio sperimentale

In continuità con lo studio riportato in Salvatore et al. (2024), la fattibilità tecnica del miglioramento termico dei terreni è stata studiata mediante prove di conducibilità in regime transitorio su campioni di forma parallelepipedica confezionati con sabbia naturale, asciutta o satura, e con sabbia trattata mediante iniezione di nanosilice colloidale, o miscelata con differenti concentrazioni di cemento, bentonite, grafite, o miscele di additivi differenti. Conducibilità (k) e capacità termica (C) dei materiali sono stati ottenuti effettuando una back-analysis numerica delle diverse prove utilizzando un codice alle differenze finite.

1.1 Set up sperimentale

La sperimentazione è stata eseguita realizzando una cella termica (vedi Fig. 1) che costituisce lo sviluppo della precedente versione adottata in Salvatore et al. (2024). L'involucro in polistirene espanso ($C=1450\text{J/kgK}$ e $k=0.034\text{W/mK}$) è di forma parallelepipedica ($H=140\text{mm}$, $B=95\text{mm}$, $L=500\text{mm}$), suddiviso in due scomparti per mezzo di una piastra riscaldante. Le estremità sono costituite da due piastre in alluminio ($C=880\text{J/kgK}$ e $k=200\text{W/mK}$) in modo da realizzare una geometria di trasmissione del calore sostanzialmente monodimensionale. La particolare geometria a doppio scomparto è stata concepita per minimizzare il disturbo dovuto alla presenza delle termocoppie che sono infatti installate con passo di 50mm l'una dall'altra, ma a distanze dalla sorgente diverse nei due lati del campione.

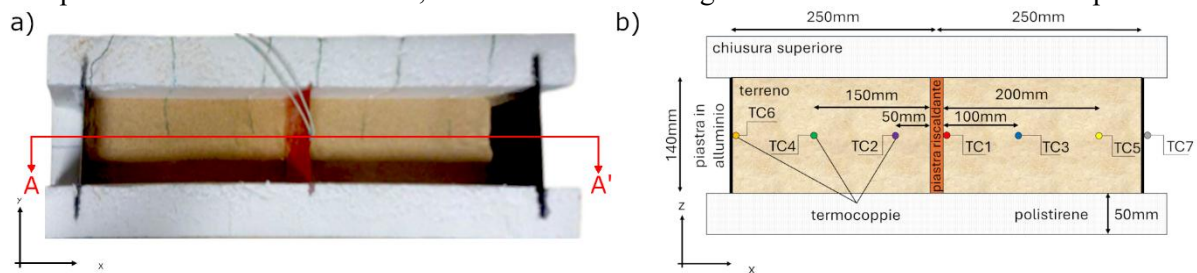


Fig 1. Dispositivo di prova per la misura delle proprietà termiche. a) fotografia, b) sezione verticale A-A'.

La piastra riscaldante è costituita da una resistenza in Ni-Cr rivestita esternamente da gomma siliconica ed è attraversata da corrente continua fornita da un alimentatore stabilizzato EUTRON BV340 30-10; le termocoppie utilizzate sono a giunzione esposta di tipo K e sono collegate ad un multimetro SIGLENT. SDM3055-SC. Un ulteriore multimetro dello stesso modello è stato utilizzato per monitorare la tensione di alimentazione della piastra riscaldante. Con questa strumentazione sono state eseguite prove di conducibilità termiche su una sabbia naturale in condizioni asciutte e satura e sulla stessa sabbia miscelata con vari additivi, cemento, bentonite, grafite o miscele degli stessi prodotti.

Il terreno di riferimento è una sabbia quarzifica estratta nella miniera di Fossanova per l'approvvigionamento delle industrie del vetro e delle ceramiche, caratterizzata da un diametro medio dei grani $D_{50}=0.303\text{mm}$, coefficiente di uniformità $C_u=1.6$ e gravità specifica $G_s=2.65$; il cemento adoperato è di tipo Portland ordinario (Colacem CEM II/B-LL 32.5 R); la bentonite utilizzata è di tipo sodico proveniente dall'isola greca di Milo con diametro corrispondente al 70% del passante in peso pari a $0.15\mu\text{m}$, gravità specifica $G_s=2.83$ e limiti di consistenza pari a $w_L=627\%$ $w_P=57\%$ (Proia, 2017). Infine, è stata utilizzata una grafite con diametro delle particelle pari a 10nm con proprietà termiche $C=710\text{J/kgK}$ e $k=25\div 440\text{W/mK}$. Le percentuali di additivo impiegate, riportate nella successiva Tab. 1, sono state fissate secondo quanto suggerito dalla letteratura tecnica per il miglioramento meccanico dei terreni. Tutti i campioni sono stati confezionati compattando strati successivi, dello spessore di 2cm , con un maglio di massa 1kg lasciato cadere da un'altezza di 2cm sistematicamente su tutta la superficie

del campione. I campioni trattati con cemento sono stati preparati miscelando preventivamente i materiali asciutti (sabbia, cemento, bentonite, nanosilice e grafite) ed aggiungendo successivamente il quantitativo d'acqua necessario ad ottenere un rapporto acqua/cemento (A/C) pari al 40%. La nanosilice colloidale è stata invece aggiunta al terreno dopo il compattamento di quest'ultimo, miscelando i componenti ed iniettandoli in forma liquida per filtrazione.

2.2 Risultati sperimentali

Una volta confezionati i campioni, si è proceduto ad alimentare la piastra riscaldante (tipicamente $V=9V$ $A=0.7A$) e a misurare nel tempo, mediante le termocoppie, il campo della temperatura all'interno del campione. Le prove sono state quindi simulate mediante un codice alle differenze finite (Itasca Consulting Group, Inc., 2019) calibrando conducibilità e capacità termica dei materiali in modo da ottenere la migliore sovrapposizione tra le misure sperimentali ed i risultati numerici. Il modello numerico (Fig. 1), che riproduce un unico scomparto della cella termica, impone sulla frontiera sinistra il flusso termico prodotto dalla piastra riscaldante, condizioni adiabatiche sulla frontiera superiore ed inferiore e convezione naturale sulla frontiera destra a simulare la naturale dispersione del calore per convezione con l'ambiente esterno. Il coefficiente di trasferimento termico per convezione naturale $h=20W/m^2K$ è stato calibrato per ottenere il best fitting tra i risultati numerici e le misure sperimentali. I risultati della sperimentazione sono riportati in Tab, mentre in Fig 2 si mostra il confronto tra le misure sperimentali e la back analisi numerica per i cinque test eseguiti.

Legenda:

misure sperimentali: \times d=0cm \times d=5cm \times d=10cm \times d=15cm \times d=20cm \times d=25cm
 risultati numerici: — d=0cm — d=5cm — d=10cm — d=15cm — d=20cm — d=25cm

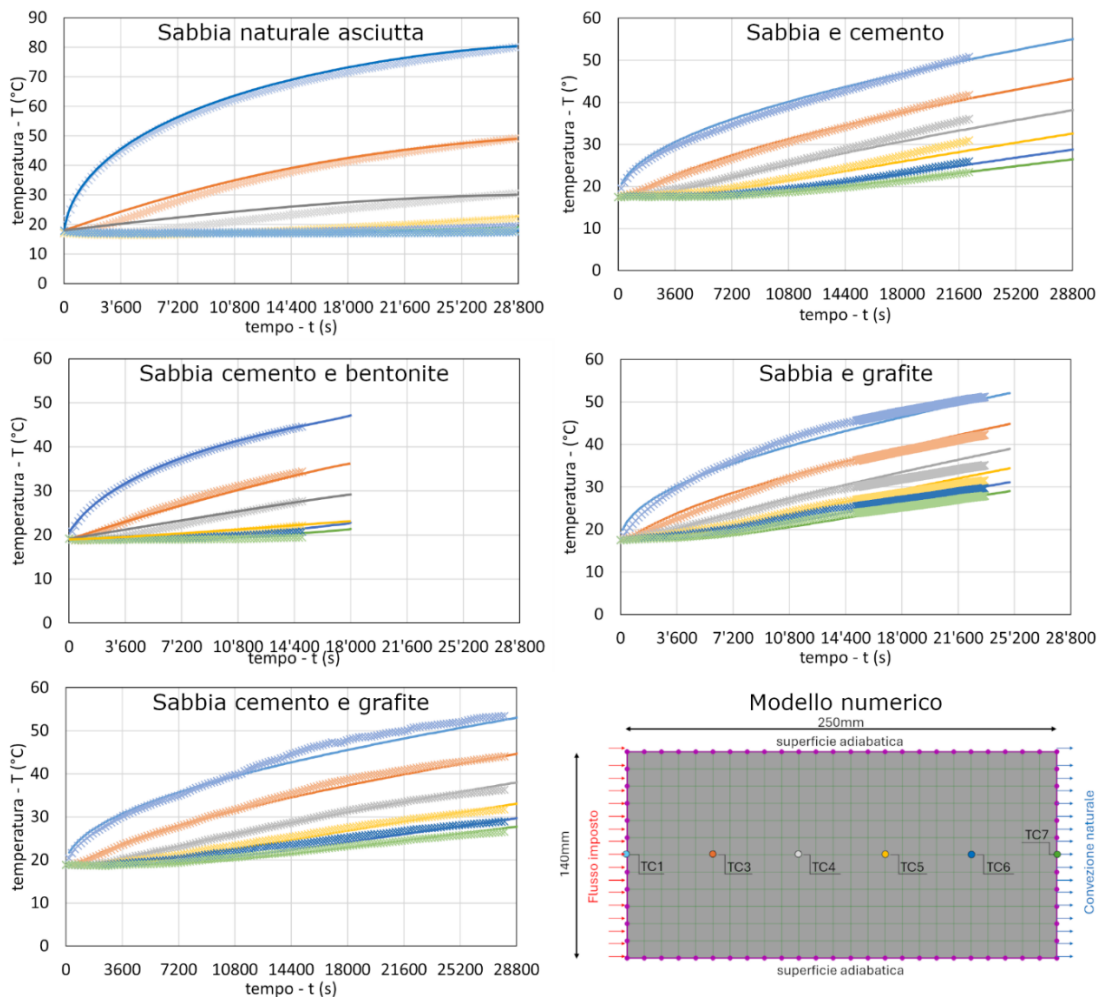


Fig 2. Confronti tra misure e simulazioni numeriche delle temperature alle termocoppie.

Tab 1. Proprietà fisiche dei campioni e proprietà termiche misurate.

ID	ρ (kg/m ³)	trattamento	costo additivo (€/kg)	χ_{add} (%)	curing (giorni)	C (J/kgK)	k (W/mK)
T1*	1497	no - asciutto	-	-	-	1700	0.8
T3*	2000	no - saturo	-	-	-	1900	3.7
T4a*	1991	nanosilice	-	3	1	2000	4.2
T4b*	1991	nanosilice	20.0	3	3	2000	4.5
T4c*	1991	nanosilice	-	3	5	2000	4.5
T5a*	1986	nanosilice	-	5	1	2000	4.4
T5b*	1986	nanosilice	20.0	5	3	2000	4.4
T5c*	1986	nanosilice	-	5	5	2000	4.4
T5d*	1986	nanosilice	-	5	10	2000	4.4
T2K	1956	cemento	-	15	0	1700	3.5
T1G*	1900	cemento	0.4	15	14	1700	3.3
T2G*	1900	cemento	-	29	14	1700	3.8
T4K	1781	grafite	10.0	10	-	1700	3.9
T5K	2002	cemento - grafite	-	15 - 5	0	1700	3.7
T3K	1810	cemento - bentonite	-	15 - 5	0	1700	1.0

* Salvatore et al. (2024);

** rapporto in peso tra additivo e sabbia asciutta.

Considerando come riferimento la sabbia naturale asciutta, caratterizzata da capacità termica pari a $C=1700\text{J/kgK}$ e conducibilità termica $k=0.8\text{W/mK}$, tutte le prove eseguite su sabbie con additivi hanno mostrato un incremento della conducibilità termica, mentre le variazioni della capacità termica sono risultate più contenute a testimoniare quindi che questa proprietà risulta regolata dalla componente sabbiosa. Il campione trattato con cemento e testato immediatamente dopo la miscelazione ha mostrato una conducibilità termica $k=3.5\text{W/mK}$, ovvero circa 4 volte superiore quella della sabbia asciutta; la conducibilità termica del campione trattato con il 10% di grafite è risultata pari a $k=3.9\text{W/mK}$, quella del campione preparato con 15% di cemento e 5% di grafite è pari a $k=3.7\text{W/mK}$, quella del campione preparato con il 15% di cemento e 5% di bentonite è pari a $k=1.0\text{W/mK}$.

3. Applicazione al finito

Nell'applicazione al finito si è ipotizzato che il trattamento della sabbia avvenga con cemento immaginando tipiche composizioni di materiale trattato con tecniche di miglioramento in sito (jet grouting, depp soil mixing) (Croce et al., 2014). Lo studio è stato condotto considerando come caso di studio un edificio dell'Università di Cassino su cui si disponeva dei dati sui consumi energetici. L'edificio è composto da una struttura di tre piani in calcestruzzo armato avente dimensioni in pianta di 68.6x24.6m. L'analisi energetica dell'edificio ha restituito un fabbisogno energetico complessivo pari a circa 40'000kWh per il riscaldamento ed a circa 20'000kWh per il raffrescamento. L'impianto di condizionamento attualmente in esercizio presso l'edificio è costituito da due caldaie a metano di potenza termica totale di 343kW e da due Chiller di potenza termica totale pari a 350kW per un costo totale pari a circa 200'000€. I consumi annui di metano per il riscaldamento e di elettricità per il raffrescamento risultanti dall'analisi delle fatture per le forniture ammontano rispettivamente a circa 200'000m³ e circa 40'000kWh. Considerando tipici costi attuali dell'energia elettrica pari a 0.16€/kWh, e del metano pari a 0.49€/m³ con IVA al 22%, si ottiene un costo di esercizio annuale per il condizionamento pari a circa 180'000€.

Utilizzando la piattaforma "BHEDesigner 8" sviluppata dall'Università di Genova (Fossa et al., 2024), è stato dimensionato il campo di sonde a servizio dell'edificio secondo l'algoritmo "ASHRAE-Tp8" (Kavanaugh and Rafferty, 2014). In particolare, la progettazione è stata eseguita con riferimento al terreno sabbioso asciutto investigato nella campagna sperimentale (test T1 di Tab 1).

Considerando i parametri di progetto ed i costi unitari definiti in Tab 2, la configurazione economicamente più vantaggiosa tra quelle studiate risulta in N.182 sonde della lunghezza $L=30\text{m}$ poste ad interasse $i=5.0\text{m}$, a cui corrisponde un costo di realizzazione (costo di perforazione e della sonda) pari a circa 730'000€ a cui si aggiungono il costo della pompa di calore pari a 70'000€ ed il costo annuale d'esercizio pari a circa 4'000€.

Tab 2. Parametri energetici del caso studio, dati tecnici della pompa di calore e prezzi unitari considerati.

Mese	$Q_{M,build}$ (kW/h)	Dati pompa di calore Aermec NRG 900H		Voce	costo
Gennaio	9349	$COP_{riscaldamento}$	3.20	pompa di calore (€)	Gennaio
Febbraio	6887	$SCOP_{riscaldamento}$	3.41	sonda geotermica (€/m)	50
Marzo	5531	$EER_{raffrescamento}$	2.63	jet grouting (€/m)	200
Aprile	2495	$SEER_{raffrescamento}$	4.53		
Maggio	1848				
Giugno	3615			Perforazione	costo (€/m)
Luglio	5210			fino a 20	80
Agosto	5820	Modalità impianto	Q_{avg} (kW)	fino a 40	90
Settembre	4850	riscaldamento	9	oltre	119
Ottobre	1075	raffrescamento	10		
Novembre	4490				
Dicembre	7850				

con $Q_{M,build}$: energia termica richiesta dall'edificio per il condizionamento, COP: coefficiente di prestazione in riscaldamento, EER: efficienza energetica in raffrescamento, SCOP: coefficiente di prestazione medio nella stagione di riscaldamento, SEER: efficienza energetica in raffrescamento media nella stagione di raffrescamento.

Si è quindi considerata l'ipotesi di inserire le sonde geotermiche all'interno di colonne di terreno cementato con proprietà termiche riconducibili a quelle del test T2G di Tab 1 (sabbia asciutta trattata con 29% in peso di cemento, $C=1700J/kgK$ e $k=3.8W/mK$).

La capacità di scambio termico di una sonda immersa nella colonna è stata studiata mediante un modello numerico alle differenze finite. Lo schema implementato (Fig 3) consiste in un blocco parallelepipedo di sottosuolo con dimensioni in pianta pari alla metà dell'interasse tra le sonde ed altezza pari al doppio della loro lunghezza. La sonda geotermica è simulata imponendo in uno spigolo del modello una temperatura pari a quella del fluido termovettore, $t_{pi}=-3^{\circ}C$ in riscaldamento e $t_{pe}=35^{\circ}C$ in raffrescamento. La temperatura iniziale del suolo è stata fatta variare linearmente con la profondità tra il valore mensile registrato al piano campagna nel sito di Cassino (dati ARPA Lazio) e la temperatura di $15^{\circ}C$ alla profondità di 15m a partire dalla quale è stata assunta costante. Le frontiere laterali del modello sono state assunte adiabatiche in modo da riprodurre un campo indefinito di sonde geotermiche. Poiché la potenza termica scambiata dalla sonda è massima all'inizio del periodo di riscaldamento o raffreddamento e diminuisce poi nel tempo, si è assunta come potenza di progetto il valore minimo tra quella registrata in fase di riscaldamento e raffrescamento alla fine dei corrispondenti periodi di funzionamento ($Q_d=255W$).

Tra le configurazioni studiate, considerando un costo per il trattamento pari a 200€/m, che rappresenta un costo di riferimento per la realizzazione di colonne con jet grouting, è risultata economicamente più vantaggiosa la soluzione con N.40 sonde della lunghezza $L=30m$ ed interasse $i=5m$ con trattamento colonnare di diametro $d=1m$ a cui corrisponde un costo di realizzazione (costo di perforazione, della sonda e del trattamento) pari a circa 400'000€. Il trattamento comporta quindi una notevole riduzione del numero di sonde, che passa da 182 a 40 oltre ad un costo complessivamente più basso.

Dal diagramma di Fig 4, che riporta per le tre configurazioni d'impianto studiate il costo cumulato per il condizionamento, è possibile visualizzare il periodo di recupero semplice dell'investimento. L'investimento risulta quindi recuperato dopo circa 5anni per l'impianto con pompa di calore e sonde geotermiche in terreno sabbioso asciutto e dopo circa 3anni per l'impianto con pompa di calore e sonde geotermiche in terreno sabbioso migliorato con colonne di terreno cementato.

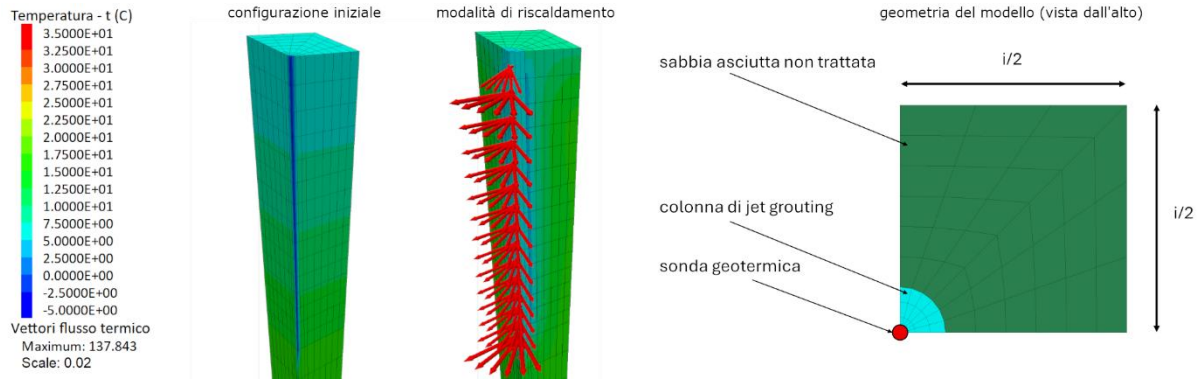


Fig 3. Modello numerico alle differenze finite della sonda geotermica in terreno migliorato mediante trattamento di jet grouting.

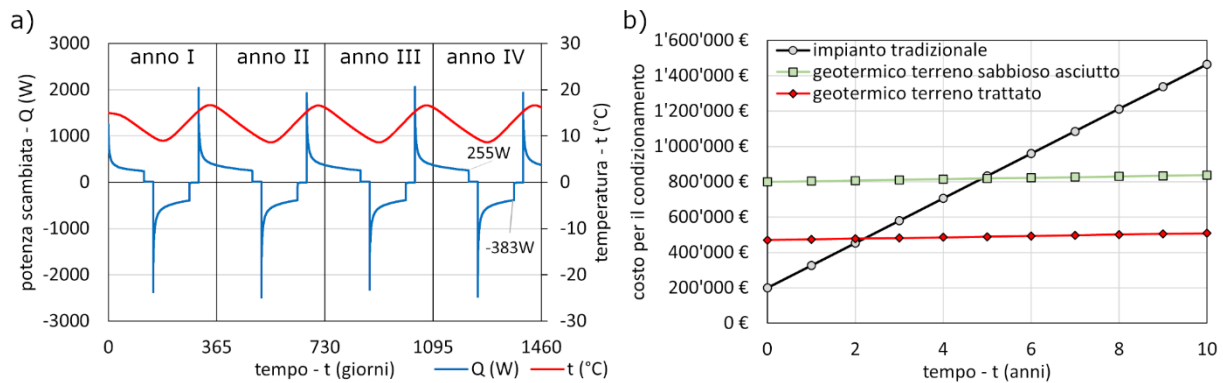


Fig 4. a) Risultato della simulazione in termini di potenza scambiata e temperatura tra le sonde. b) andamento del costo cumulato per il condizionamento, per le tre configurazioni considerate.

4. Conclusioni

I risultati ottenuti mostrano come le tecniche di trattamento considerate: iniezione a bassa pressione di nanosilice colloidale, cementazione e miscelazione con grafite, possano essere utilizzate efficacemente per migliorare le proprietà termiche delle sabbie e quindi il rendimento degli impianti geotermici. Lo studio di fattibilità economica ha mostrato che, in presenza di terreni sabbiosi asciutti, il trattamento di miglioramento per cementazione del terreno consente di ridurre il numero di sonde geotermiche necessarie in modo da rendere l'investimento in un impianto di condizionamento a pompa di calore economicamente più vantaggioso.

Bibliografia

- Bernier M. (2006). "Closed-loop ground-coupled heat pump systems". ASHRAE J 2006;48(9): 13–24.
- Croce, P., Flora, A., & Modoni, G. (2014). Jet grouting: technology, design and control. Crc Press.
- European Commission. (2019). The European Green Deal (COM(2019) 640 final). EUR-Lex. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640>
- Itasca Consulting Group, Inc. (2019) FLAC2D — Fast Lagrangian Analysis of Continua in Two-Dimensions, Ver. 7.0. Minneapolis: Itasca.
- Kavanaugh, S. P., Rafferty, K. D. (2014). Geothermal Heating and Cooling: Design of Ground-source Heat Pump Systems. Stati Uniti: ASHRAE.
- Lanini, S., Delaleux, F., Py, X., Olivès, R., & Nguyen, D. (2014). "Improvement of borehole thermal energy storage design based on experimental and modelling results". Energy and Buildings, 77, 393-400.
- Muffler, L. J. P., & Cataldi, R. (1978). Progress in geothermal energy research and development in the United States. Geothermics, 7(2-4), 139–158.
- Proia, R (2017) .Experimental analysis of sand - bentonite mixtures. Tesi di dottorato. XXX ciclo. Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale.
- Salvatore et al. (2024). Analisi sperimentale delle proprietà termiche dei terreni trattati. In Atti dell'incontro annuale dei ricercatori di geotecnica. Gaeta (Italy) dal 4 al 6 settembre 2024. Edizioni AGI, Roma. ISBN 9 788897 517191.
- Sehli, A., Hasni, A., & Tamali, M. (2012). The potential of earth-air heat exchangers for low energy cooling of buildings in South Algeria. Energy Procedia, 18, 496-506.