

EFFETTO DI MALTE ADDITIVATE SUL COMPORTAMENTO DI MICROPALI ENERGETICI: RISULTATI PRELIMINARI

G. Ciardi

Università degli Studi di Perugia
giovanni.ciardi@unipg.it

K. Oliynyk

Università degli Studi di Perugia
kateryna.oliiynyk@icloud.com

C. Madiari

Università degli Studi di Firenze
claudia.madiari@unifi.it

C. Tamagnini

Università degli Studi di Perugia
claudio.tamagnini@unipg.it

Sommario

L'accoppiamento fra funzioni strutturali ed energetiche di molte strutture geotecniche ha permesso lo sviluppo di sistemi tecnologici di riscaldamento/raffrescamento degli edifici basati sullo sfruttamento della geotermia a bassa entalpia. Questa nota presenta una serie di risultati preliminari di analisi numeriche e di laboratorio volte a studiare la possibilità di utilizzo di micropali di fondazione con funzione energetica. In particolare, è valutato l'effetto dell'incremento della conducibilità termica della malta costituente il micropalo sullo scambio termico fra micropalo e terreno. Dopo aver discusso il problema attraverso analisi parametriche di un modello bidimensionale di una sezione ideale del micropalo ed aver mostrato come un apprezzabile incremento del flusso termico ($\approx 10\%$) si abbia a fronte di un significativo incremento della conducibilità termica ($>30\%$), si discutono i risultati sperimentali di prove di conducibilità termica su malte additivate con quattro diversi additivi commerciali. Con l'incremento di conducibilità termica sperimentalmente osservato sulle malte additivate, l'incremento prevedibile della efficienza energetica del micropalo risulta relativamente modesto; pertanto ulteriori studi sono necessari per incrementare la prestazione del micropalo in termini di flusso di calore scambiato.

1. Introduzione

In anni recenti la ricerca sull'utilizzo di geotermia a bassa entalpia per il riscaldamento/raffrescamento sostenibile degli edifici ha subito un notevole impulso. L'energia geotermica è rappresentata dal calore naturalmente presente all'interno della superficie terrestre, principalmente conseguente alla modalità di formazione del nostro pianeta. Al di sotto di uno strato di terreno più superficiale, dell'ordine di 4-6 m e in cui la temperatura del sottosuolo risente notevolmente sia degli effetti stagionali sia dell'alternanza del ciclo giorno/notte, la temperatura del terreno rimane pressoché costante, intorno ai 10-25°C, in dipendenza della latitudine del sito (Laloui & Rotta Loria 2019). Di conseguenza, tale zona risulta a temperatura minore nei mesi caldi e maggiore nei mesi freddi rispetto alla temperatura dell'aria, la quale influenza la temperatura presente all'interno delle costruzioni. Nei sistemi

tecnologici di condizionamento basati su questa caratteristica del terreno, il sottosuolo agisce come un serbatoio a temperatura costante, in grado di assorbire calore nei mesi caldi e cederlo nei mesi freddi. Sistemi di riscaldamento/raffrescamento basati sulla geotermia a bassa entalpia permettono quindi una sensibile riduzione delle emissioni di gas serra – non dovendo dipendere da sorgenti fossili – oltre a beneficiare di una fonte di energia gratuita, pulita e virtualmente “inesauribile” (Brandl 2006; Sanchez et al. 2017).

Benché, potenzialmente, la maggior parte delle strutture geotecniche possa essere progettata per servire anche come scambiatore di calore fra terreno ed edificio attraverso l’installazione di una pompa di calore, la maggior parte delle applicazioni riguarda oggi soprattutto i pali di fondazione di medio e grande diametro (Mohamad et al. 2021). Il trasferimento del calore, dal terreno al palo e viceversa, avviene principalmente per conduzione all’interfaccia palo-terreno. Il calore viene assorbito/rilasciato da un fluido di circolazione che scorre all’interno di un circuito scambiatore installato sulla griglia d’armatura del palo e connesso alla pompa di calore posta all’interno dell’edificio. Studi recenti mostrano che anche elementi di sottofondazione come i micropali, tipicamente utilizzati come elementi stabilizzanti in strutture esistenti, potrebbero essere efficacemente impiegati anche come scambiatori di calore con il terreno (Ronchi et al. 2018). Rispetto ai pali di medie e grandi dimensioni, i micropali sono caratterizzati da un diametro ridotto, non superiore a 300 mm, e da lunghezze non superiori ai 15 m. Nella tipologia più utilizzata, i micropali sono caratterizzati da un’armatura tubolare d’acciaio continua, e sono installati mediante trivellazione del foro, posizionamento dell’armatura, iniezione di malta cementizia sia esternamente, nell’intercapedine fra armatura e terreno, sia all’interno dell’armatura. La malta utilizzata nell’industria dei micropali è costituita esclusivamente da una miscela di acqua e cemento, senza alcun tipo di inerte. Per le dimensioni limitate che caratterizzano i micropali, a parità di temperatura operativa il flusso di calore scambiato tra micropalo e terreno nell’unità di tempo è inferiore a quello ottenibile con pali energetici di medie o grandi dimensioni. L’obiettivo del presente studio è valutare la possibilità di ottenere un incremento del flusso termico scambiato mediante l’impiego di malte additivate caratterizzate da una maggiore conducibilità termica rispetto alle malte ordinarie. Infatti, le miscele cementizie possono essere rese termicamente più conduttive utilizzando additivi specifici (e.g. Allan & Kavanaugh 1999; Kim et al. 2003), diminuendo la resistenza termica alla trasmissione del calore e quindi incrementando lo scambio di calore fra palo e terreno (Faizal et al. 2016).

Nella presente nota sono riportati alcuni risultati preliminari relativi a: i) una serie di simulazioni numeriche bidimensionali mirate a quantificare l’incremento di efficienza termica (per unità di lunghezza) ottenibile al variare della conducibilità della malta; ii) una campagna di indagini sperimentali finalizzate a valutare l’effetto dell’impiego di quattro diversi additivi e del rapporto acqua/cemento sulla conducibilità termica delle malte impiegate nella realizzazione dei micropali.

2. Modellazione numerica dello scambio termico tra micropalo e terreno

Per una valutazione preliminare dell’effetto della conducibilità termica della malta sul flusso di calore scambiato tra palo e terreno in condizioni stazionarie, si è fatto riferimento al modello agli EF illustrato nella Figura 1. Assumendo condizioni di flusso bidimensionale nel piano ortogonale all’asse del palo, il modello riproduce la sezione del micropalo, equipaggiata con i tubi scambiatori di calore, inserita in un volume di terreno di dimensioni sufficientemente grandi da poter assumere sul contorno esterno una temperatura costante e pari a quella del terreno a grande distanza dal micropalo. Il diametro del foro del micropalo è pari a 200 mm, l’armatura del micropalo ha diametro esterno di 127 mm ed uno spessore di 10 mm. I tubi scambiatori interni al micropalo, realizzati in HDPE, hanno diametro esterno di 26 mm e spessore di 3 mm. La malta cementizia occupa gli spazi tra superficie esterna dell’armatura e terreno e tra superficie interna dell’armatura e tubi scambiatori. Il contorno esterno del modello è posto ad una distanza di 1 m dall’asse del palo. Alle conducibilità termiche dei diversi materiali sono stati attribuiti i valori seguenti: 14 W/m°C per l’armatura metallica; 0.35 W/m°C

per l'HDPE; 0.6 W/m°C per il fluido termovettore all'interno dei tubi in HDPE. La conducibilità termica della malta è stata variata nel campo compreso tra 1.18 W/m°C (conducibilità della malta non additivata) e 1.77 W/m°C.

In corrispondenza del contorno esterno del dominio, la temperatura è stata assunta costante e pari a 20 °C. Le temperature del fluido termovettore nei tubi di ingresso e di uscita sono state imposte come riportato in Tabella 1, che sintetizza le simulazioni eseguite, in forma parametrica, nell'ambito del presente lavoro.

Le simulazioni possono essere suddivise in 4 gruppi distinti, con l'obiettivo di valutare gli effetti: a) della conducibilità termica della malta; b) delle temperature dei fluidi all'interno dei tubi di immissione e di uscita; c) della conducibilità del terreno. Nella Tabella 1, k_{ext} e k_{int} rappresentano la conducibilità termica della malta all'esterno ed all'interno del tubo di armatura, mentre k_s la conducibilità termica del terreno; ΔT_f è la differenza di temperatura fra il fluido termovettore nel tubo di immissione e quella del fluido nel tubo di uscita; e ΔT_m è la differenza fra la media delle temperature nei due tubi e la temperatura del terreno. Nelle analisi, la conducibilità termica della malta è stata incrementata fino ad un massimo del 50%, mentre per le temperature all'interno dei due tubi sono state valutate le seguenti configurazioni: 1) $\Delta T_f = 5^\circ\text{C}$ e $\Delta T_m = 10.0, 12.5$ e 15.0°C ; 2) $\Delta T_f = 2.5^\circ\text{C}$ o 7.5°C e $\Delta T_m = 12.5^\circ\text{C}$.

Tabella 1. Programma delle simulazioni numeriche.

Gruppo #	k_{ext} (W/m°C)	k_{int} (W/m°C)	k_s (W/m°C)	ΔT_f (°C)	ΔT_m (°C)
1	1.18-1.77	= k_{ext}	1.5	5.0	10.0, 12.5, 15.0
2	1.18-1.77	= k_{ext}	1.5	2.5, 7.5	12.5
3	1.18-1.77	1.18	1.5	5.0	12.5
4	1.18-1.77	= k_{ext}	1.2, 1.8	5.0	12.5

La Figura 1 mostra, a titolo d'esempio, la distribuzione della temperatura all'interno di un modello del gruppo #1 in cui $k_{ext} = 1.18$ per la malta. Nell'immagine, il micropalo è al centro del modello; l'interfaccia micropalo-terreno è localizzata ad una distanza dal centro pari al diametro del foro. Si nota come le isolinee della temperatura all'interno del terreno tendano ad essere praticamente circolari e quasi coassiali con l'interfaccia palo-terreno.

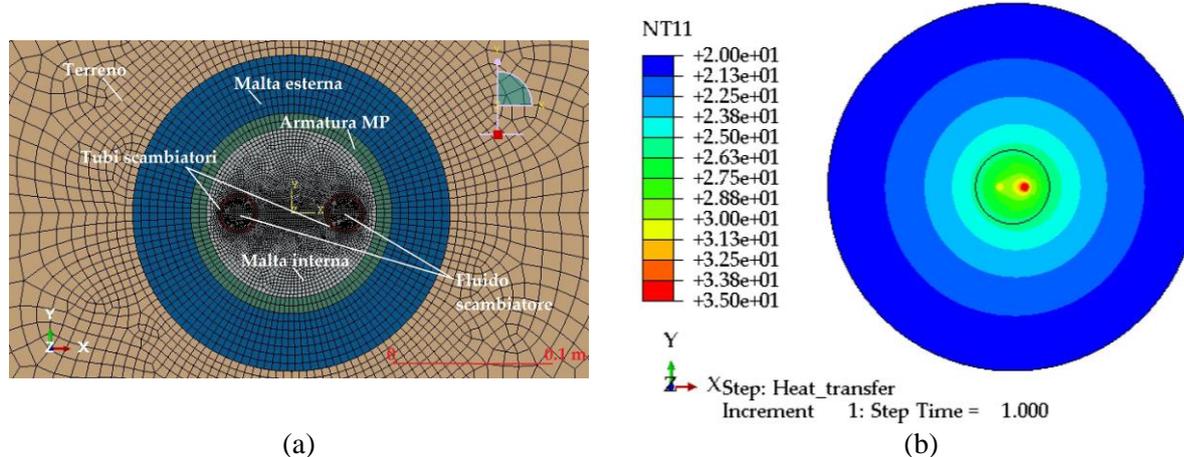


Figura 1. Modello numerico: a) geometria del problema e discretizzazione adottata; b) distribuzione della temperatura nel palo e nel terreno per la simulazione del gruppo #1 con $k_{ext} = 1.18$.

La Figura 2 mostra i risultati ottenuti dalle analisi del gruppo #1, nel quale la stessa conducibilità termica è stata adottata per la malta all'interno ed all'esterno del tubo di armatura. Si osserva come, in termini assoluti, l'entità del flusso termico scambiato all'interfaccia micropalo-terreno aumenti

all'aumentare di ΔT_m a parità di conducibilità della malta. Come prevedibile, un incremento della conducibilità termica della malta produce un incremento del flusso termico. Il rapporto q/q_0 tra il flusso termico relativo alla conducibilità k e quello ottenuto con la conducibilità termica di riferimento ($k_0 = 1.18 \text{ W/m}^\circ\text{C}$) risulta indipendente da ΔT_m (Figura 1b). In termini quantitativi, dalla curva di Figura 1b si deduce che per ottenere un incremento di circa il 10% del flusso termico scambiato tra palo e terreno è richiesto un incremento della conducibilità termica della malta di circa il 30%.

I risultati delle simulazioni del gruppo #2 mostrano che il flusso termico scambiato tra palo e terreno dipende solo da ΔT_m e non da ΔT_f . Questo significa che, sebbene lungo il fusto del palo la differenza di temperatura ΔT_f vari da un valore massimo alla testa fino a praticamente zero in corrispondenza della base del palo, il flusso termico rimane costante lungo tutta la lunghezza del palo.

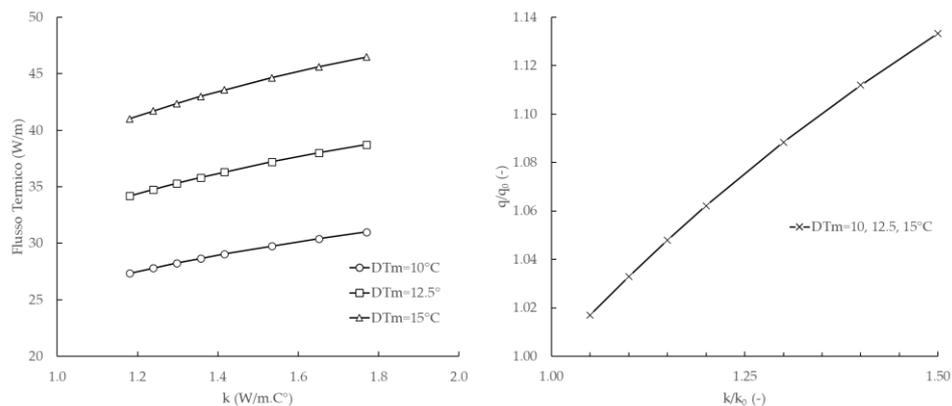


Figura 2. Flusso termico e incremento di flusso termico come risultato delle analisi del gruppo #1

Le simulazioni del gruppo #3 sono state condotte per investigare l'effetto dell'incremento della conducibilità termica del solo volume esterno di malta, mentre la conducibilità della malta nella parte interna del tubo di armatura è stata posta pari alla conducibilità di riferimento k_0 . I risultati di questo gruppo di simulazioni sono sintetizzate in Figura 3a. Dai risultati ottenuti si nota come l'effetto dell'incremento di conducibilità termica sul flusso termico scambiato tra palo e terreno sia molto più rilevante quando i due volumi di malta presentano la stessa conducibilità.

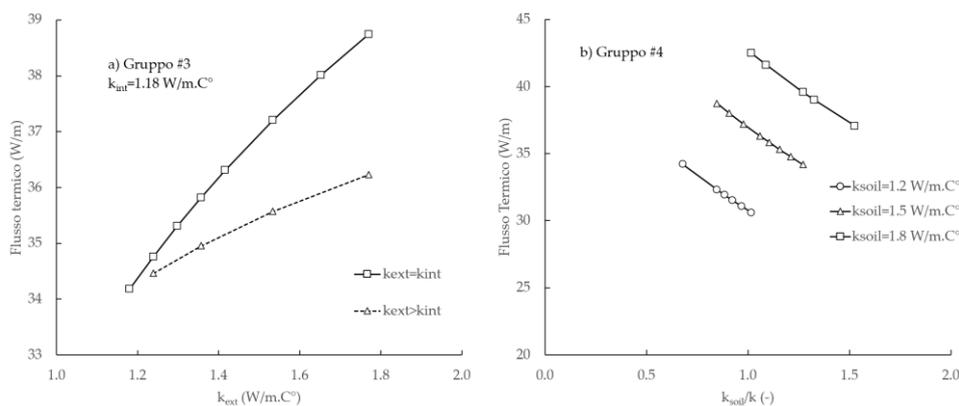


Figura 3. Risultati delle simulazioni dei gruppo #3 e #4: a) flusso termico scambiato tra palo e terreno al variare della conducibilità termica del volume di malta esterno al tubo di armatura, per i casi di conducibilità omogenea e conducibilità differente tra volume di malta esterno ed interno; b) variazione del flusso termico al variare del rapporto k_s/k per tre diversi valori di k_s .

La Figura 3b mostra i risultati delle simulazioni del gruppo #4, nel quale la conducibilità termica del terreno k_s è stata fatta variare nel campo $[1.2, 1.8] \text{ W/m}^\circ\text{C}$, e la conducibilità della malta, $k_{ext} = k_{int} = k$, è stata fatta variare nel campo $[1.18, 1.77] \text{ W/m}^\circ\text{C}$. I risultati ottenuti mostrano che, a parità di rapporto

k_s/k , il flusso termico scambiato aumenta all'aumentare della conducibilità termica del terreno, mentre l'incremento di flusso termico ottenibile aumentando la conducibilità termica della malta da 1.18 W/m°C a 1.77 W/m°C aumenta leggermente al crescere di k_s .

3. Conducibilità termica di malte di cemento additivate

Alla luce dei risultati ottenuti nelle simulazioni numeriche, risulta molto importante valutare quale possa essere l'incremento della conducibilità termica delle malte utilizzate per la realizzazione dei micropali ottenibile mediante l'impiego di additivi specifici. A tale proposito, parallelamente alle attività di simulazione numerica, è stata condotta una estesa campagna sperimentale volta ad investigare le caratteristiche di conducibilità termica delle malte comunemente impiegate nella pratica corrente, al variare del loro rapporto acqua/cemento in peso (w/c), così come l'effetto che l'impiego di miscele additivate può avere sulla conducibilità al variare della percentuale di additivo impiegata. I dettagli della campagna sperimentale sono riportati nella Tabella 2.

Le malte di cemento tipicamente impiegate nella realizzazione di micropali hanno un rapporto w/c compreso tra 0.4 e 0.5, valore quest'ultimo che corrisponde ad una malta di elevata fluidità. Per le miscele additivate si è scelto di mantenere lo stesso livello di fluidità, essenziale per garantire la efficacia del processo di iniezione. Tutte le malte impiegate sono prive di aggregati.

Nella formulazione della malta non additivata (miscela di riferimento) è stato utilizzato cemento Portland al calcare 32.5 R. Per le miscele additivate sono stati impiegati quattro diversi additivi commerciali (indicati nel seguito con le lettere A, B, C e D), la cui formulazione è protetta da brevetto. Gli additivi A-C sono in forma liquida, mentre l'additivo D è in polvere. Nella sperimentazione sono stati prese in esame diverse concentrazioni di additivo nei casi A e C, come indicato nella Tabella 2, aumentando del 50% la concentrazione iniziale.

Per le misure di conducibilità termica sono stati realizzati dei provini cilindrici di diametro pari a 78 mm ed altezza di 42 mm. Per garantire la ripetibilità delle misure, per ciascun caso preso in esame sono stati realizzati 3 diversi provini. Dopo la miscelazione, a 24h dal getto, i provini sono stati posti a maturare in acqua. Le misure di conducibilità termica sono state eseguite dopo 7gg dal getto, su provini estratti dall'acqua immediatamente prima della prova. Risultati preliminari di prove eseguite su provini realizzati con diversi tempi di maturazione, non presentati in questa sede, hanno mostrato che il tempo di maturazione ha un'influenza molto modesta sulla conducibilità termica misurata, come riportato da Kim et al. (2003).

Tabella 2. Caratteristiche delle miscele prese in esame

Additivo	Miscela #	w/c (-)	Additivo/cemento (mL/kg)
assente	1	0.40	-
assente	2	0.50	-
A (liquido)	3	0.40	8.0
	4	0.32	8.0
	5	0.28	12.0
B (liquido)	6	0.40	1.0
C (liquido)	7	0.40	8.0
	8	0.35	12.0
D (polvere)	9	0.40	5% (in peso)

La conducibilità termica è stata misurata impiegando uno strumento portatile (ISOMET 2014, Applied Precision Ltd.) che sfrutta una tecnica di misura di tipo transitorio. Per la misura è stata utilizzata una sonda di capacità 0.3-2.0 W/m°C e precisione del 10%.

La Figura 4 mostra alcuni dei risultati ottenuti nella campagna sperimentale. Per quanto riguarda la

malta non additivata (mix #1-2), la riduzione del rapporto w/c aumenta la conducibilità termica del materiale, come effetto della minore porosità. A parità di w/c, l'impiego di additivo nelle quantità impiegate produce incrementi di k fino ad un massimo del $\approx 5\%$ (Figura 4b). L'incremento più alto è stato ottenuto impiegando l'additivo D.

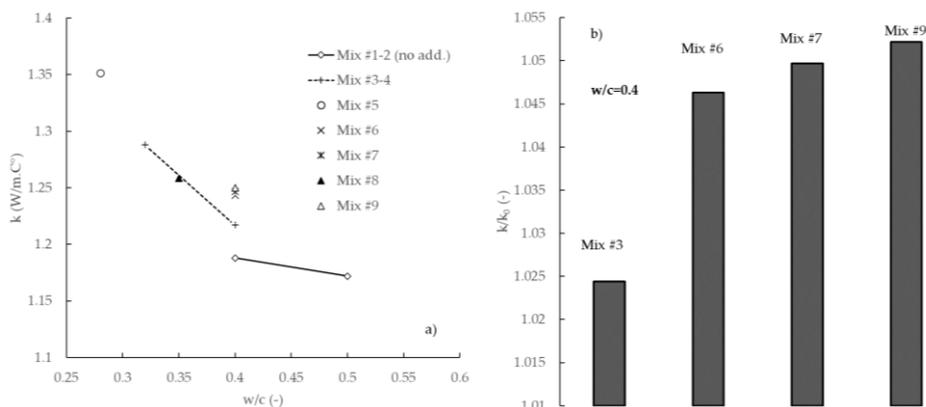


Figura 4. Risultati delle prove di conducibilità termica: a) conducibilità di delle malte prese in esame al variare del rapporto w/c; b) incrementi di conducibilità ottenuti per le diverse miscele impiegate.

4. Prosecuzione delle attività di ricerca

Le attività di ricerca sul fronte numerico verranno sviluppate prendendo in esame un modello 3d del sistema circuito scambiatore/micropalo/terreno finalizzato alla valutazione di alcuni aspetti essenziali per il funzionamento del micropalo energetico, quali la effettiva distribuzione della temperatura lungo il tubo scambiatore e l'effetto su tale distribuzione della portata imposta nel circuito scambiatore.

Per quanto riguarda le attività sperimentali, queste verranno estese prendendo in esame diversi possibili combinazioni di rapporto w/c e percentuali di additivo, fattori che influenzano la conducibilità della malta in misura confrontabile, nonché altri possibili strategie di additivazione che permettano di raggiungere incrementi di conducibilità termica dell'ordine del 30%.

Bibliografia

- Allan, M.L., Kavanaugh, S.P. (1999). "Thermal conductivity of cementitious grouts and impact on heat exchanger length design for ground source heat pumps", HVAC&R Research, 5(2), 85-96.
- Brandl H. (2006). "Energy foundations and other thermo active ground structures", Géotechnique, 56(2), 81-122.
- Faizal, M., Bouazza, A., Singh, R.M. (2016). "Heat transfer enhancement of geothermal energy piles", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 57, 16-33.
- Kim, K.H., Jeon, S.E., Kim, J.K., Yang, S. (2003). "An experimental study on thermal conductivity of concrete", Cement and concrete research, 33(3), 363-371.
- Mohamad, Z., Fardoun, F., Meftah, F. (2021). "A review on energy piles design, evaluation, and optimization", Journal of Cleaner Production, 292, 125802.
- Laloui, L., Rotta Loria, A. (2019). Analysis and design of energy geostructures: theoretical essentials and practical application. Academic Press.
- Ronchi, F., Salciarini, D., Cavalagli, N., Tamagnini, C. (2018). "Thermal response prediction of a prototype Energy Micro-Pile", Geomechanics for Energy and the Environment, 16, 64-82.
- Sanchez M., Falcão F., Mack M., Pereira J.-M., Narsilio G., Guimarães L. (2017). "Salient comments from an expert panel on energy geotechnics", Environmental Geotechnics, 4(EG2), 35-142.