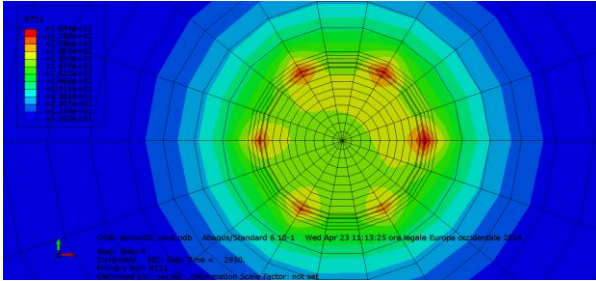


# Le geo-strutture energetiche dal punto di vista dell'ingegnere geotecnico



Francesco Cecinato

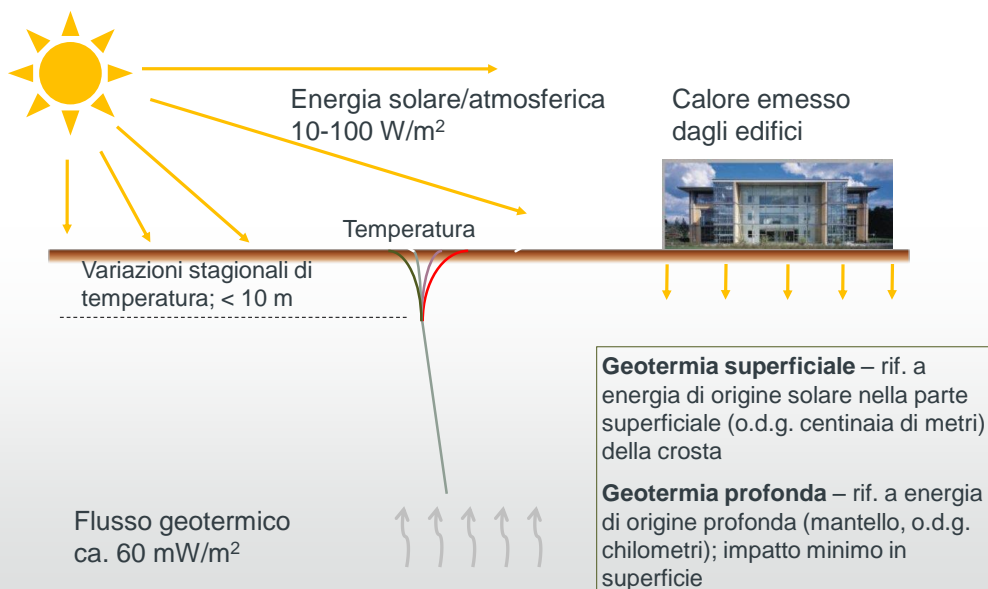
Università di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile,  
Ambientale e Meccanica



UNIVERSITY  
OF TRENTO - Italy

## Introduzione

## Sistemi geotermici

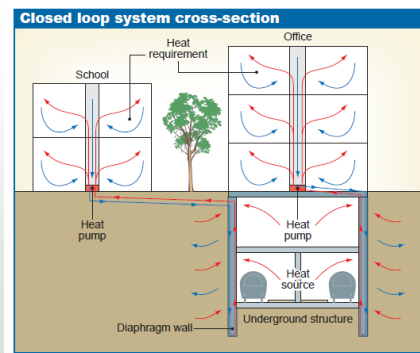
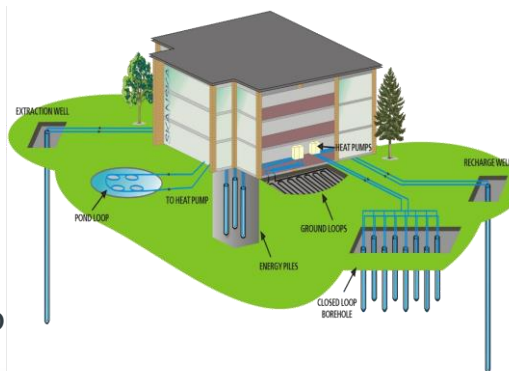


3

(Courtesy of F. Loveridge, Univ. of Leeds)

## Sistemi geotermici superficiali

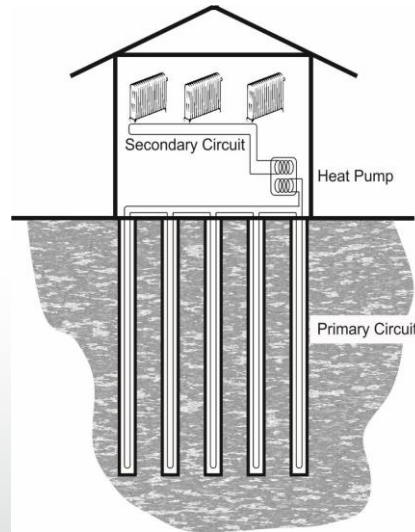
- Tipico funzionamento con pompa di calore
- A circuito aperto o chiuso
- Scambiatori orizzontali
- Scambiatori verticali
  - Sonde
  - Pali
- Altre tipologie



(Courtesy of F. Loveridge, Univ. of Leeds)

## Vantaggi

- Bassi costi d'esercizio
  - possibilità di incentivi
- Spazi occupati ridotti
- Manutenzione limitata
- Basso consumo energetico
- Emissioni di CO<sub>2</sub> ridotte
- Ma: maggiori costi iniziali



5

(Courtesy of F. Loveridge, Univ. of Leeds)

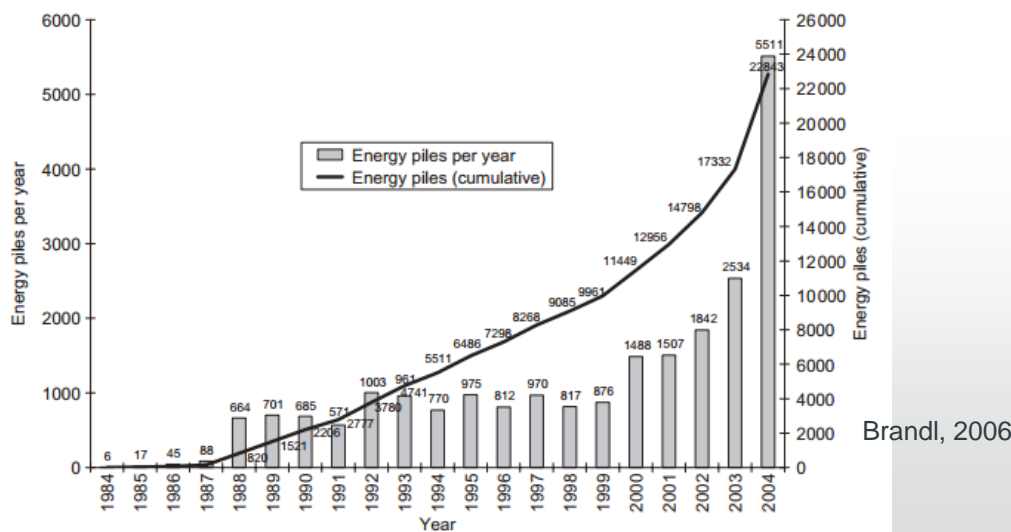
## Sonde vs pali

- **Sonde geotermiche:** scambiatori di calore inseriti nel terreno (in fori di sondaggio)
  - Diametri piccoli (10-20 cm) e profondità elevate (50-200 m)
  - dimensionamento di routine con approccio semplificato (ad es. sorgente lineare infinita, condizioni stazionarie)
- **Pali di fondazione geotermici (o «energetici»):** tubi scambiatori di calore immersi nel calcestruzzo
  - dimensionamento in primis meccanico. L'analisi termica semplificata non è adeguata, in quanto:
    - Le strutture sono più tozze-> l'approssimazione a sorgente lineare e infinita non è rappresentativa
    - Diametri molto maggiori ( $\varnothing = 0.3-2.0$  m)-> importanti effetti in regime transitorio

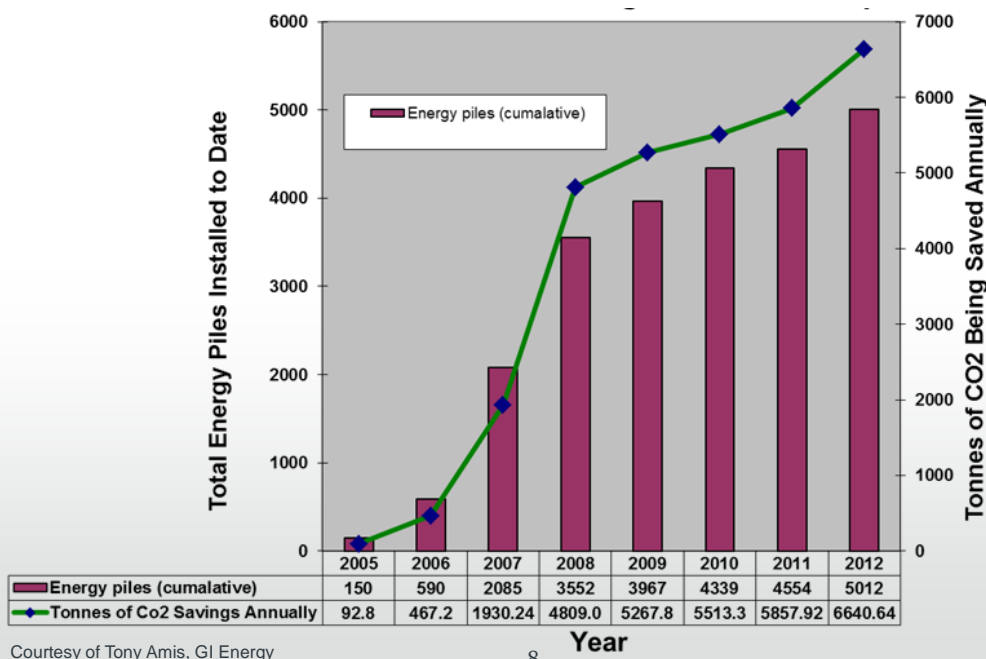
6

# Prime installazioni di pali energetici

- In Austria, dal 1984



# Installazioni nel Regno Unito



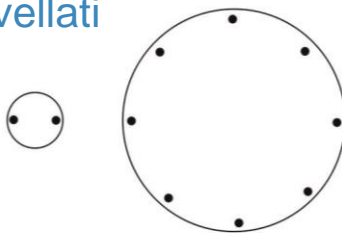
# Tipologie di pali energetici



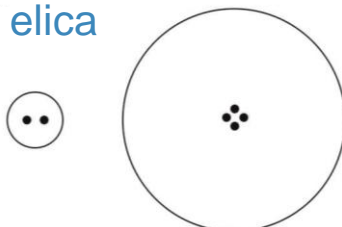
(Courtesy of F. Loveridge, Univ. of Leeds)  
Foto: Cementation Skanska

# Tipologie di pali energetici

Trivellati



Ad elica

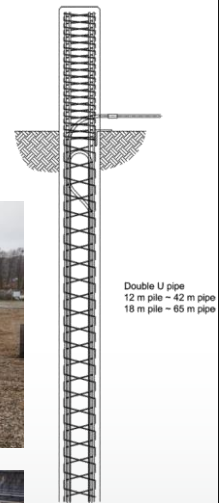
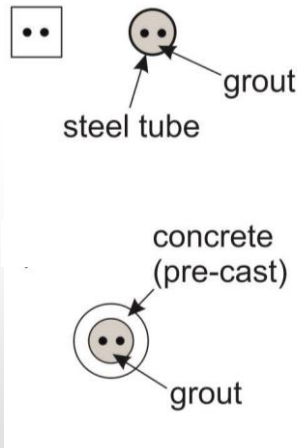


(Courtesy of F. Loveridge, Univ. of Leeds)  
Foto: Cementation Skanska



# Tipologie di pali energetici

## Pali battuti prefabbricati



11

(Courtesy of F. Loveridge, Univ. of Leeds)  
Immagini: Maria Alberdi, Aalborg University

## Aspetti costruttivi (Loveridge et al., 2013)

- Integrazione degli scambiatori nelle varie fasi costruttive senza danneggiarli
  - Pali gettati in opera (trivellati e battuti): rischi durante il getto di calcestruzzo
    - > Utilizzo di tubo-getto
    - > Accorgimenti per mantenere i tubi aderenti alla circonferenza esterna (1)
  - Pali a elica continua: Evitare pieghe eccessive -> Giunti in plastica rinforzata alla base (2)
  - Spezzoni di tubo a testa palo: protetti per operazioni di scapitozzatura/scavo (3)
  - Prove di tenuta raccomandate ad ogni passaggio di consegne



(3)

12

Foto: Cementation Skanska

## Aspetti costruttivi (Loveridge et al., 2013)

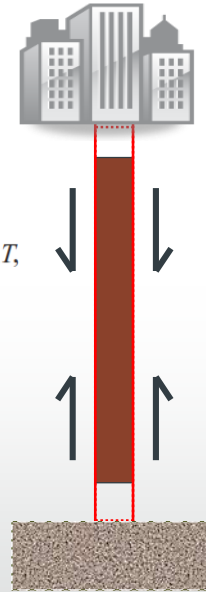
- Integrazione della soluzione geotermica nel programma dei lavori, minimizzando i costi e tempi aggiuntivi
  - Considerazione del progetto geotermico a partire dalle fasi iniziali
  - Coordinamento tra i vari appaltatori (fondazioni, strutture, impianti...) da parte del contrattista geotermico
  - Il progetto geotermico dovrebbe considerare un margine (redundancy) per ovviare a possibili malfunzionamenti/danneggiamenti (rottture, ostruzioni dei tubi ecc.)



## Effetti termo-meccanici

## Effetti termo-meccanici sul singolo palo

- Comportamento termo-elastico del palo
- Se riscaldato:
  - Non vincolato >> allungamento libero  $\varepsilon_T = \alpha\Delta T$ ,
  - Vincolato >> Sforzi assiali aggiuntivi  $P = \varepsilon_T AE$
  - In realtà: palo parzialmente vincolato (alle estremità + resistenza laterale)
- Se raffreddato: si inverte
- Carichi termici sovrapposti a quelli meccanici



15

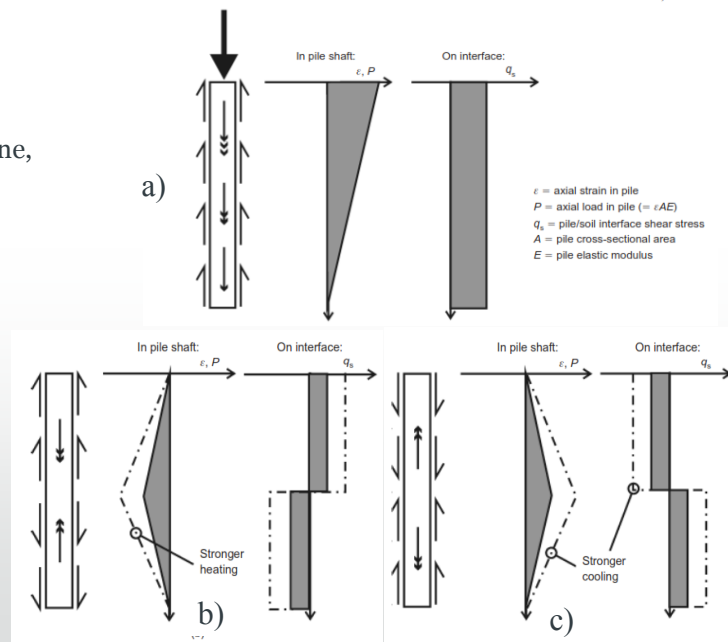
(Courtesy of F. Loveridge, Univ. of Leeds)

## Effetti termo-meccanici sul singolo palo

(solo resistenza laterale, uniforme, per  $\Delta T$  uniforme)

(Bourne-Webb et al. 2009)

- Solo carico meccanico: resistenza laterale uniforme > compressione, riduzione lineare di  $P$
- Solo raffreddamento: trazione
- Solo riscaldamento: compressione





## Effetti termo-meccanici sul singolo palo

(solo resistenza laterale, uniforme, per  $\Delta T$  uniforme)

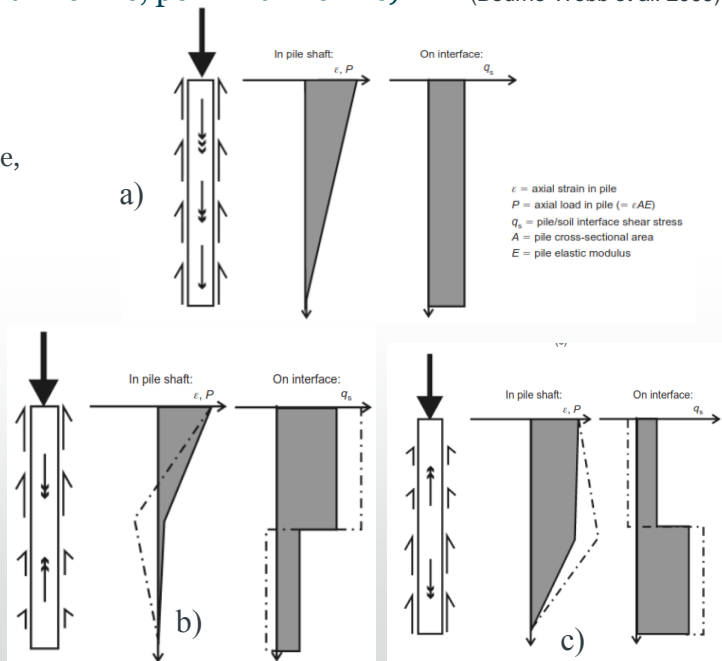
(Bourne-Webb et al. 2009)

a) Solo carico meccanico:  
resistenza laterale  
uniforme  $\rightarrow$  compressione,  
riduzione lineare di  $P$

b) Raffreddamento+carico:  
compressione ridotta,  
eventuale trazione

c) Riscaldamento+carico:  
aumento compressione

$\rightarrow$  Possibilità di sviluppo di  
trazione durante il  
raffreddamento e aumento  
della compressione durante  
il riscaldamento



## Ordini di grandezza effetti termici

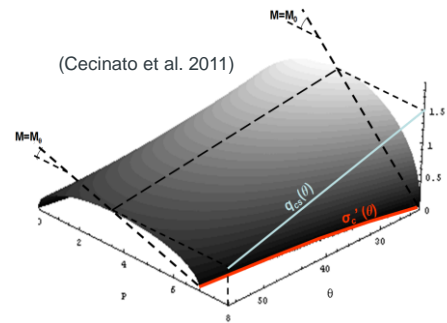
(Di Donna & Laloui 2015)

- Palo libero (es. vincolato solo alla base)  $L=30\text{m}$ ,  $\Delta T= 30^\circ\text{C}$ , calcestruzzo ( $\alpha=3.6 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ )  $\rightarrow$  Spostamento in testa = 10mm (3.6 mm/  $^\circ\text{C}$ )
- Palo completamente vincolato  $L=30\text{m}$ ,  $\Delta T= 30^\circ\text{C}$ , calcestruzzo ( $E=30 \text{ GPa}$ )  $\rightarrow$  Sforzo termicamente indotto = 10 Mpa
- Condizioni reali (da esperimenti in sito):
  - Max sforzo termicamente indotto = 100-300 kPa/  $^\circ\text{C}$
  - Max spostamento in testa = 0.1-0.16 mm/  $^\circ\text{C}$
- Dimensionamento di routine: cautelativo (assumendo max spostamento e max sforzo come A e B sopra)
- Studi più dettagliati tramite approcci numerici
  - Metodo delle curve di trasferimento adattato al caso termo-meccanico (cfr. Knellwolf et al. 2011)
  - Modellazione termo-meccanica agli elementi finiti (cfr. Di Donna e Laloui 2015)

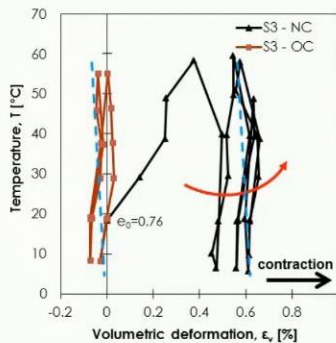
## Aspetti geotecnici

- Comportamento termo-elastico o termo-plastico di terreni argillosi

– Argille NC-> possibile “consolidazione termica”

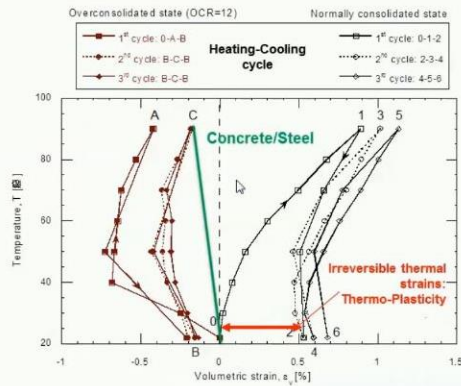


(Di Donna and Laloui, 2015)



(Immagini da Laloui, 2016)

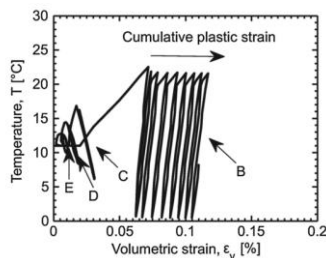
(Laloui and Cekerevac, 2008)



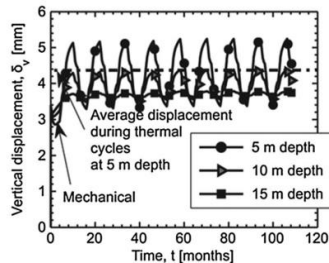
## Aspetti geotecnici (Di Donna & Laloui 2015)

D=0.8m  
L=20m  
P=750 kN

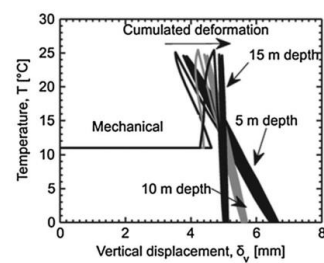
- Modellazione FE THM per singolo palo in argilla NC



$\epsilon_{vol}$  vs T in diversi punti del terreno (B vicino al palo)



Cedimenti terreno vs tempo a 0.8 m dal palo (3 profondità)



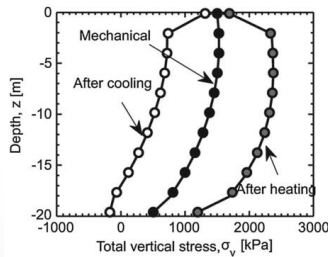
Spostamenti palo vs T (3 profondità)

- Contrazione termo-plastica nel terreno indotta dal primo ciclo termico
- Comportamento termo-elastico (reversibile) per i cicli termici successivi -> risposta reversibile a lungo termine (e per materiali OC)

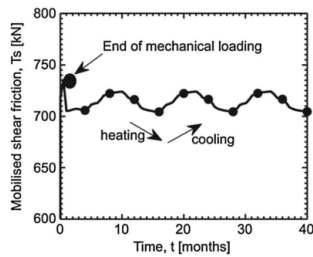
## Aspetti geotecnici (Di Donna & Laloui 2015)

D=0.8m  
L=20m  
P=750 kN

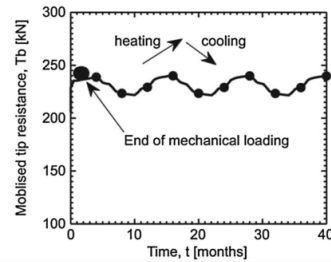
- Modellazione FE THM per singolo palo in argilla NC



Sforzi verticali nel palo



Resistenza laterale mobilitata



Resistenza di punta mobilitata

- Applicando cicli termici stagionali ( $\pm 15^\circ \text{C}$ ) per 10 anni
  - Cedimento aggiuntivo della fondazione dell'ordine di 1 mm durante il primo ciclo (primo anno), successive deformazioni reversibili di  $\pm 2\text{mm}$  in testa
  - Possibile trazione vicino alla punta (dip. da cond. contorno e carico applicato)
  - Compressione aggiuntiva di circa 700 kPa

21

## Effetti termo-meccanici aggiuntivi da considerare

- Nella sezione del palo (Di Donna & Laloui 2015, Knellwolf et al. 2011)

- Compressione aggiuntiva durante riscaldamento
- Possibile trazione vicino alla base durante raffreddamento

- Nel terreno

- Consolidazione termica nei terreni argillosi NC, cedimenti ciclici reversibili
- Degradazione termica resistenza del terreno ( $\phi(T)$ )? (Hueckel et al. 2009)
- Possibile sviluppo di pressurizzazione termica? (Cecinato et al. 2011)
- Degradazione resistenza laterale all'interfaccia?

22

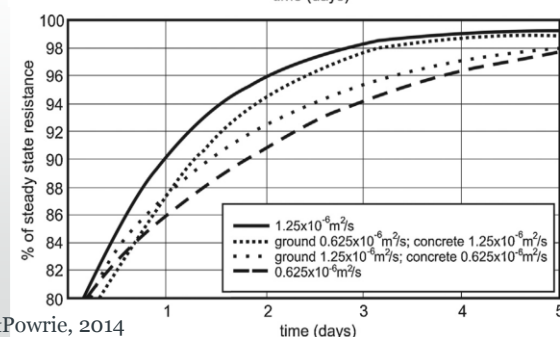
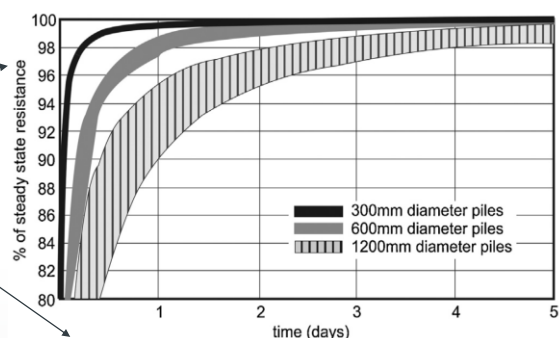
# Temi di ricerca

## Comportamento dei pali geotermici

- Il raggiungimento dello *steady-state* dipende da
  - $\varnothing$  palo, numero e posizione dei tubi, conducibilità termica
  - Tipo di input termico nei tubi

- Temperatura sulla superficie non costante né in senso orizzontale né in verticale : Effetti 3D

-> Per studiare i pali dal punto di vista energetico è opportuno utilizzare un approccio numerico



Loveridge&Powrie, 2014

# Modello numerico FEM

(Cecinato et al. 2015, Cecinato & Loveridge 2015)

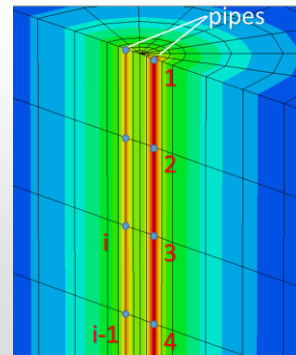
- Uso del software ABAQUS:
  - calcolo diffusione termica in regime transitorio nel terreno e calcestruzzo

$$\rho_s c_{ps} \dot{T} = \nabla (\lambda_s \nabla T)$$

- accoppiamento al trasporto convettivo di calore lungo i tubi scambiatori tramite *user subroutine*

$$\dot{m} c_{pf} \nabla T = h_{eq} \Delta T$$

- Rappresentazione tubi in 1D, tenendo conto di diametro, spessore e conducibilità termica tramite *user subroutine*
- Mesh 3D creata manualmente per minimizzare l'onere computazionale
- Flessibilità di utilizzo (es. input con data storia termica o potenza costante)



25

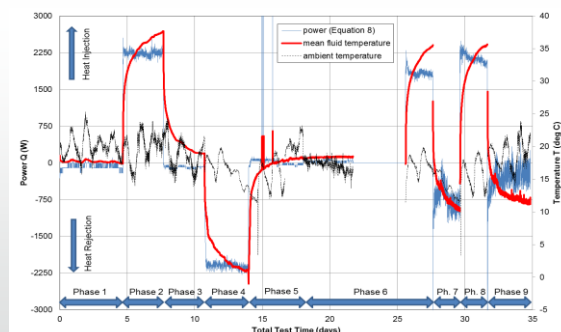
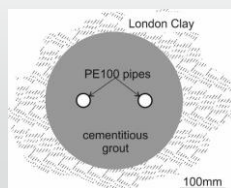
## Validazione del mod. FEM vs dati di campo

(Cecinato et al. 2015, 2016)

- Riproduzione dei risultati di un test di risposta termica (TRT) eseguito su palo singolo a Londra (terreno: *london clay*)

- $\varnothing=30$  cm, L= 27m, singolo tubo a «U» equipaggiato con sensori di misura (a corda vibrante e a fibre ottiche) della T del palo e del fluido

- Dati in input:
  - \* Temperatura fluido in ingresso
  - \* Proprietà geometriche e termo-fisiche

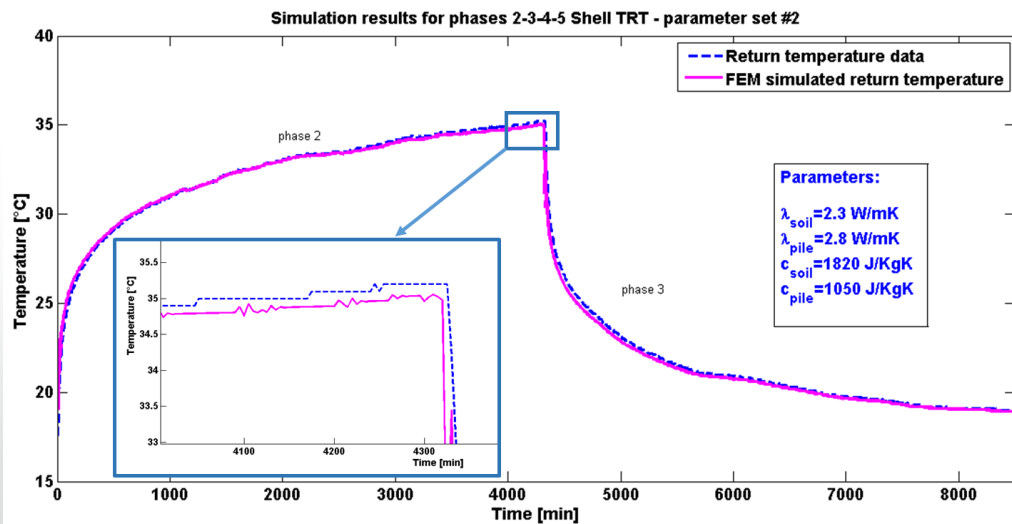


26

## Validazione del mod. FEM vs dati di campo

(Cecinato et al. 2015)

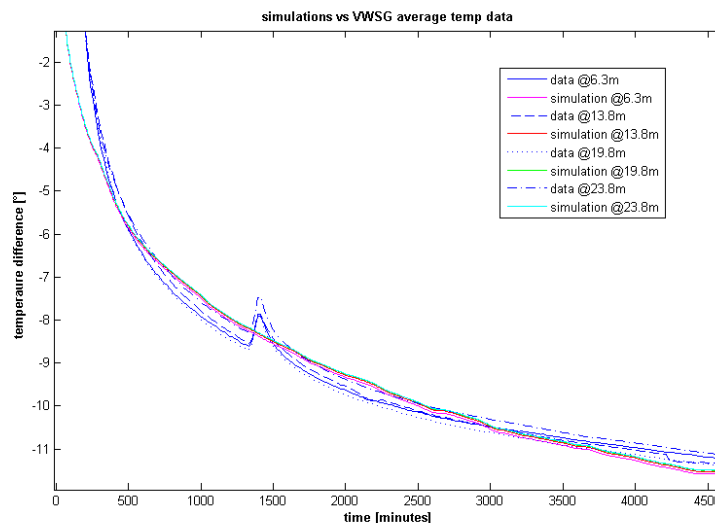
- Simulazione dell'evoluzione della temperatura del fluido in uscita a confronto con quella misurata



## Validazione del mod. FEM vs dati di campo

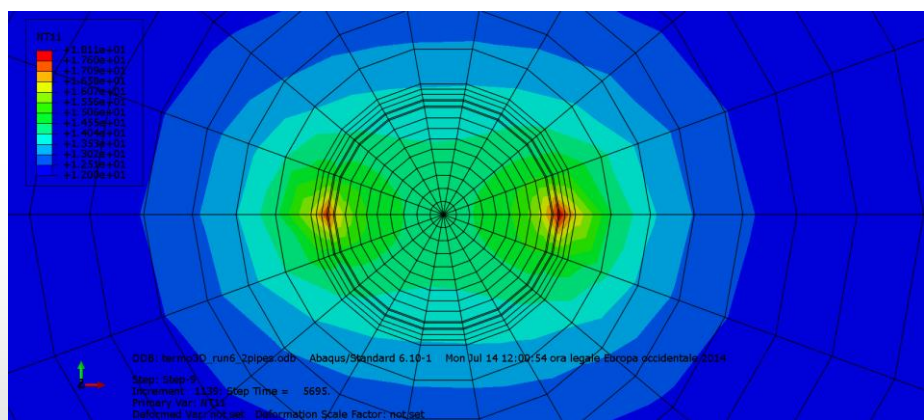
(Cecinato & Loveridge 2015)

- Simulazione dell'evoluzione della temperatura del calcestruzzo a confronto con quella misurata





# Esempio di output dei calcoli



t=5695 min

## Efficienza energetica dei pali trivellati

(Cecinato & Loveridge 2015)

- Analisi parametrica per individuare i parametri più importanti nel massimizzare l'efficienza energetica
- 7 parametri con 2 livelli ciascuno
- 8 simulazioni per esplorare combinazioni significative (metodo Taguchi)
- Elaborazione statistica dei risultati.

	Parameter	Lower bound	Upper bound	Units
1	Pile diameter	500	1000	mm
2	Pipe diameter	20	30	mm
3	No. of pipes	2	6	
4	Fluid velocity	0.2	1.2	m/s
5	Pile length	15	25	m
6	Concrete thermal Conductivity	1.5	3	W/m K
7	Concrete cover	50	75	mm

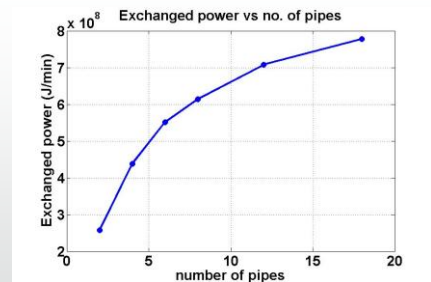
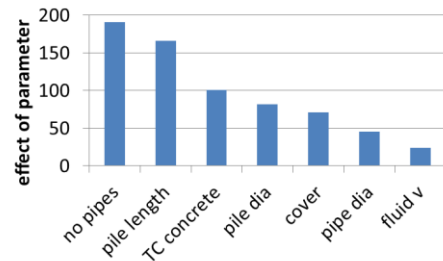
RESPONSE TABLE (Total exchanged energy in 4 days, MJ)							
Level/parameter	pile dia	pipe dia	no. pipes	fluid velocity	pile length	concrete conductivity	concrete cover
Min	336.82	400.30	282.63	366.13	295.06	327.61	413.56
Max	419.25	355.77	473.43	389.94	461.01	428.45	342.50
Effect of parameter	82.43	44.53	190.80	23.81	165.95	100.84	71.06
Ranking	4	6	1	7	2	3	5

# Efficienza energetica dei pali trivellati

(Cecinato & Loveridge 2015)

Risultati: classifica di importanza dei parametri nel massimizzare E

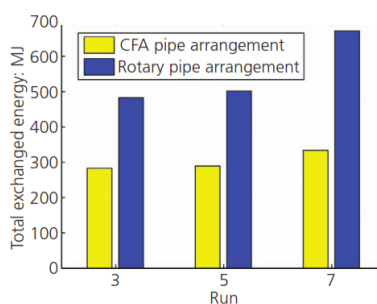
1. Numero dei tubi: da massimizzare, compatibilmente con (a) il diametro del palo e (b) le possibili interazioni (aumento E con n. tubi non lineare)
  2. Lunghezza palo: non modificabile in base a progetto termico
  3. Conducibilità calcestruzzo: modificabile in qualche caso (additivi o scelta inerti)
- Velocità fluido poco influente: purchè sia mantenuto flusso turbolento



31

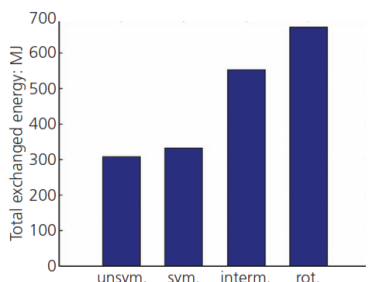
## Confronto con i pali ad elica continua (CFA)

(Loveridge & Cecinato 2015)

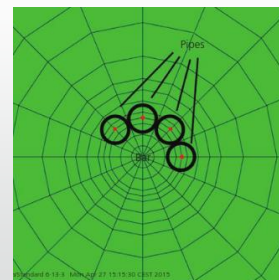


Run 3: 2 tubi,  $v=0.8$  m/s  
Run 5: 4 tubi,  $v=0.2$  m/s  
Run 7: 4 tubi,  $v=0.8$  m/s

-> Palo ad elica continua meno efficiente, a parità di n. di tubi e di altre condizioni



- La disposizione asimmetrica dei tubi peggiora l'efficienza energetica -> consigliabile uso di distanziatori
- La presenza della barra centrale non influenza le prestazioni termiche



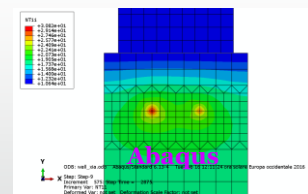
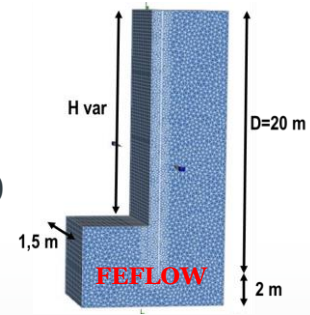
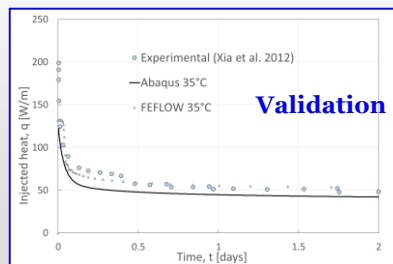
32

# Efficienza dei diaframmi energetici

(In collaborazione con A. Di Donna, F. Loveridge, M. Barla  
– STSM COST Action GABI 1405)

- Modello numerico per diaframmi energetici
  - Implementato sia in **FEFLOW** che in **Abaqus**
  - Validato riproducendo **dati reali** (Xia et al. 2012)
  - Studio parametrico per identificare i parametri di progetto più importanti
    - Geometria e condizioni al contorno molto diverse da quelle dei pali energetici

Parameters	Lower (1)	Upper (2)
Panel width - W	0.8 m	1.2 m
Depth/excavation ratio – D/H	1.25	2
Spacing of pipes	25 cm	75 cm
Concrete cover to pipes	50 mm	100 mm
Fluid velocity	0.2 m/s	1.2 m/s
Difference in temperature between the soil and external air *	2 °C	6 °C
Concrete conductivity	1.5 W/mK	3 W/mK



# Efficienza dei diaframmi energetici

(In collaborazione con A. Di Donna, F. Loveridge, M. Barla  
– STSM, COST Action GABI 1405)

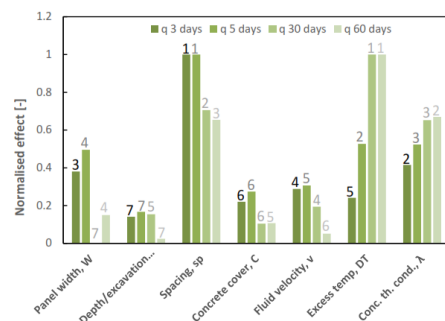
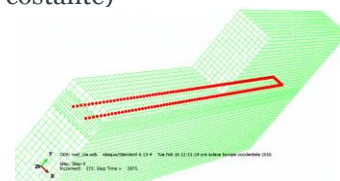
- Valutazione dell'importanza dei parametri nel massimizzare  $q$  ( $W/m^2$ ) sia a breve che a lungo termine (3, 5, 30 e 60 gg di iniezione di calore a  $T$  costante)

## Fattori più importanti

1) *Breve termine*: spaziatura dei tubi (s piccolo)  
-> massimizzare il n. di tubi

1) *Lungo termine*: differenza  $\Delta T = T_{air} - T_{soil}$  ( $\Delta T$  piccolo)  
-> scavi "caldi" come tunnel di metro sono adatti per estrazione di calore, non per iniezione  
-> miglior rendimento equipaggiando con tubi entrambe le pareti

2) Conducibilità del calcestruzzo  
-> modificabile in qualche caso (es. scelta aggregati, riduzione additivi)



## Ricerca in corso / sviluppi futuri

- Pali energetici: modellazione termo-meccanica per valutare possibili effetti al contatto palo-terreno e sulla capacità portante (caso TRT di Londra)
- Diaframmi energetici: studi numerici più ampi per valutare efficienza tenendo conto di diversi usi e condizioni al contorno (tunnel ferroviari, stazioni di metropolitane o sotterranei di edifici)
- Studio di altre geo-strutture energetiche (es. rivestimenti tunnel termo-attivi)
- Sviluppi numerici: scrittura di codice FEM “su misura” per:
  - Accoppiamenti termo-idro-meccanici, per valutare gli effetti sulle pressioni interstiziali e convezione in presenza di acquifero in movimento
  - Possibili cambiamenti di fase nei sistemi aperti (geotermia profonda, iniezione di CO<sub>2</sub>)
  - Altri problemi accoppiati (es. chemo-idro-meccanici - iniezione di CO<sub>2</sub>)

35

## Ringraziamenti

- F. Loveridge, University of Leeds (UK)
- A. Gajo, DICAM, Università di Trento
- W. Powrie, University of Southampton (UK)
- A. Di Donna e M. Barla, Politecnico di Torino
- COST Action UE “GABI” TU1405

36

# Grazie per l'attenzione!

## Bibliografia

Cecinato, F., Loveridge, F., Gajo, A., Powrie, W. (2015). *A new modelling approach for piled and other ground heat exchanger applications*. XVI ECSMGE, Edimburgh, UK.

Cecinato, F., Loveridge, A. (2015). "Influences on the thermal efficiency of energy piles". *Energy* (82) : 1021-1033.

Cecinato, F., Piglialepre R., Loveridge, F., Nicholson D. (2016). *Numerical analysis of thermal cycling during a multi-stage energy pile thermal response test*. International Conference on Energy Geotechnics ICEGT, Kiel, Germany.

Di Donna, A., Cecinato, F., Loveridge, F., Barla, M. (in press). Energy performance of diaphragm walls used as heat exchangers. *Proc. of the ICE – Geotechnical Engineering*.

Di Donna, A., & Laloui, L. (2015). Numerical analysis of the geotechnical behaviour of energy piles. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 39(8), 861-888.

Loveridge, F. & Powrie, W., Smith, P. (2013) "A review of the design and construction aspects for bored thermal piles". *Ground Engineering*, p. 28-31.

Loveridge, A., Cecinato, F. (2015). "Thermal performance of thermo-active CFA piles". *Environmental Geotechnics*. DOI: 10.1680/jenge.15.00023