

1- ENERGIA GEOTERMICA

Breve introduzione

Il termine "geotermia" deriva dal greco "gêo" e "thermòs" ed il significato letterale è "calore della Terra".

Per energia geotermica si intende generalmente la parte di calore terrestre potenzialmente estraibile dal sottosuolo e quindi sfruttabile per le attività umane. L'origine di questo calore è in relazione alla natura interna del nostro pianeta e ai processi fisici che in esso hanno luogo.



Geyser image courtesy U.S. Geological Survey; photo by S. R. Brantley, 1983

La presenza di un energia geotermica è nota fin da tempi remoti, infatti manifestazioni di fenomeni geologici, come vulcani, sorgenti termali, geyser hanno fatto pensare che delle parti dell'interno della terra fossero state calde. Tuttavia la percezione diretta del calore si poté avere solo quando furono scavate le prime miniere profonde (XVI° e XVII° secolo) e la presenza dell'uomo all'interno delle gallerie lo rendeva cosciente di ciò tramite la sensazione dell'aumento della temperatura con la profondità.

Dalla fine del XIX° secolo il calore terrestre è studiato con metodi scientifici, ma la comprensione chiara del bilancio termico della terra è stata possibile soltanto dopo la scoperta del ruolo svolto dal calore radiogenico (XX° secolo). Infatti tutti i moderni modelli termici della Terra devono tener conto del calore prodotto dal decadimento degli isotopi radioattivi (U^{238} , U^{235} , Th^{232} , K^{40}) e da altre fonti come il calore primordiale del pianeta. Modelli termici realistici tengono in considerazione il lento raffreddamento del nostro pianeta.

La temperatura del mantello è scesa di circa 300-350° in tre miliardi di anni con una base di circa 4000 °C. L'energia geotermica della Terra è enorme, ma soltanto una parte della stessa può essere sfruttata. Fino ad oggi è stata utilizzata solo in quelle aree dove le condizioni geologiche permettevano la risalita di flussi di calore da zone calde profonde fino alla superficie (es. sorgenti termali).

Un esempio italiano è rappresentato dalla zona di Larderello dove a partire dai primi anni del XIX° secolo l'industria chimica, nata per estrarre l'acido borico dalle acque calde che sgorgavano naturalmente al suolo o erano estratte da pozzi a piccola profondità, spinse ad utilizzare come energia meccanica l'energia prodotta dal vapore naturale. Nella stessa area dai primi anni del XX secolo si iniziò ad utilizzare il vapore a bassa pressione per il riscaldamento degli edifici; sempre nello stesso periodo di tempo anche a Boise (Idaho, USA) nasce il primo sistema di riscaldamento urbano utilizzando l'energia geotermica così come in Islanda si inizia a sfruttare l'energia geotermica sia per il riscaldamento che per la produzione di acqua calda.

A Larderello nel 1904 si ha il primo tentativo di sfruttare l'energia geotermica per la produzione di energia elettrica, sistema ora diffuso in molti paesi.



Larderello

Il *flusso di calore* q che arriva in superficie si misura in *hfu* (*heat flow unit*) ovvero:

$$1hfu = 10^{-6} \frac{cal}{cm^2s} = 42mW / m^2$$

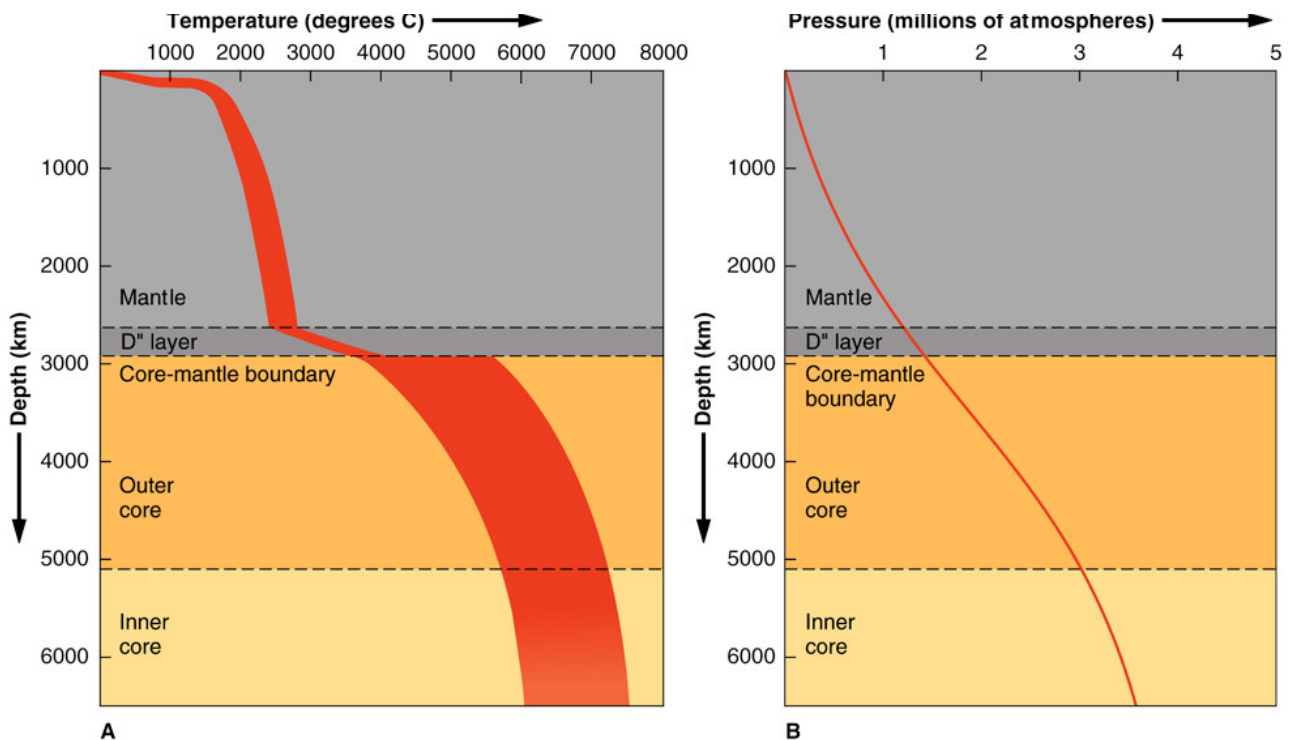
La media terrestre è intorno a $1,5 \text{ hfu} = 63 \text{ mW/m}^2$

Il *gradiente geotermico* (T) rappresenta il rapporto tra il *flusso di calore geotermico* (q) e la *conducibilità termica del terreno* (λ):

$$T = \frac{q}{\lambda} [^{\circ}\text{K}]$$

Considerando costante la conducibilità $\lambda=2,2 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ a profondità superiori a 100m ed essendo $q = 0,063 \text{ mW}$ flusso geotermico medio terrestre.

Il **gradiente geotermico** dà la misura dell'aumento di temperatura con la profondità, il suo valore medio in superficie è di circa **2,5°- 3°C/100 m** a meno di anomalie termiche.

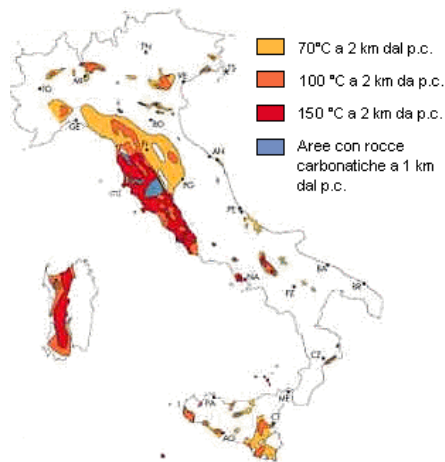


A titolo esemplificativo partendo da una temperatura media di circa 15°C al disotto dei primi metri dalla superficie (circa 12-15 m), la temperatura a 2000 m di profondità è tra 65°-75°C; anche se con l'aumento della profondità questo gradiente non è costante.

In alcune aree il gradiente geotermico si discosta sensibilmente da quello medio.

Così nelle aree geologiche di subduzione (*aree di fossa oceanica*) il gradiente geotermico può essere inferiore 1°C ; mentre in altre zone (zone di assottigliamento

della crosta terrestre, aree oceaniche es. Mar Tirreno e tutte le aree con magmatismo prossimo alla superficie terrestre) può raggiungere valori molto superiori al valore medio (anche 10 volte).



Aree di interesse geotermico in funzione della temperatura delle rocce a 2Km di profondità*

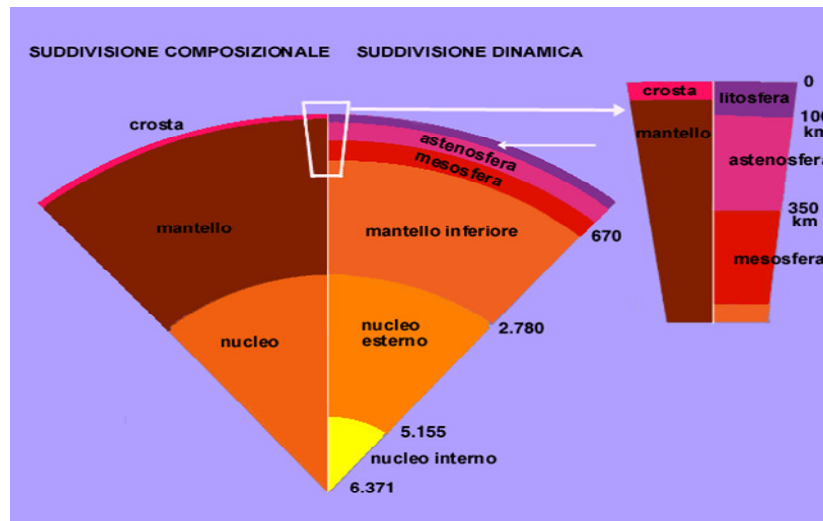
*F. Mongelli, G. Zito, B. della Vedova, G. Pellis, P. Squarci e L. Taffi, Mappa del flusso geotermico in Italia e mari adiacenti. Stato del progetto e prime valutazioni, *GNGTS, Atti del VI convegno*, Roma, 1987.

In Italia le aree con flusso di calore geotermico interessante sono state individuate in Toscana, Lazio, Campi Flegrei in zone della Pianura Padana ed in aree della Sicilia e Sardegna, ma solo alcune di queste aree sono state giudicate valide per la produzione di energia elettrica a causa di una scarsità di fluidi economicamente sfruttabili. Mentre risorse di moderata e bassa temperatura da utilizzare per usi diretti si trovano diffuse in tutta Italia anche se il loro sviluppo risulta ancora molto modesto.

Il flusso di calore terrestre è generato dalla differenza di temperatura tra le zone superficiali fredde e le zone più profonde calde, come già detto nelle aree continentali il flusso di calore medio è di 63 mWm^{-2} mentre nelle aree oceaniche è di 101 mWm^{-2} con una media ponderale di circa 87 mWm^{-2} (Pollak *et al.*, 1993). Manifestazioni superficiali dell'aumento della temperatura con la profondità sono vulcani, geysers, fumarole, sorgenti calde. Questi fenomeni superficiali sono manifestazioni di ciò che avviene all'interno del nostro pianeta spiegato dalla nota teoria della *tettonica a zolle*.

In breve il nostro pianeta è formato dalla crosta, che presenta uno spessore medio di 20-65 Km nelle aree continentali e di 5-6 Km nelle aree oceaniche, dal mantello che ha uno spessore medio di 2900 Km e dal nucleo che ha un raggio di circa 3470 Km.

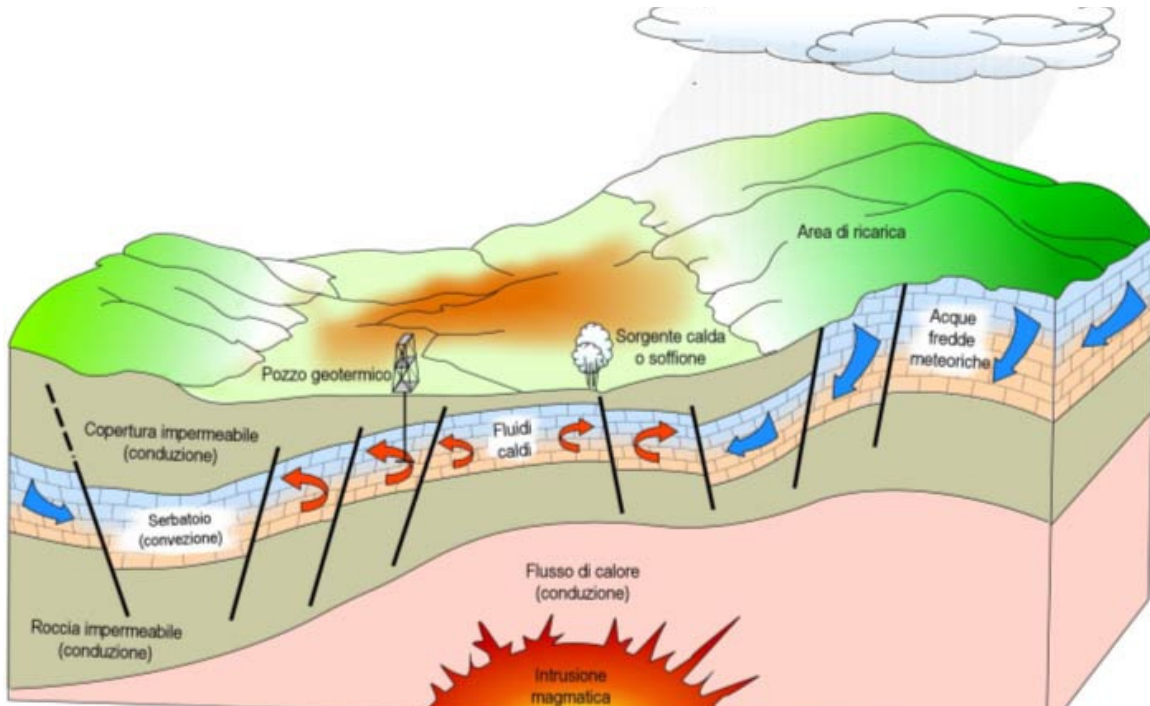
Le proprietà fisico chimiche di crosta, mantello e nucleo variano andando dalla superficie verso l'interno. Pertanto la della terra può essere suddivisa in litosfera, che comprende parte della crosta e del mantello ed ha uno spessore medio di circa 80 Km nelle aree oceaniche e di circa 200 Km nelle aree continentali ed ha un comportamento rigido. Al disotto della litosfera si trova l'astenosfera, una parte del mantello che presenta un comportamento “meno rigido” di fluido viscoso alla scala dei tempi geologici. All'interno dell'astenosfera sono presenti moti convettivi (pochi cm l'anno) dati proprio dalle differenze di temperatura tra le diverse parti e sostenuti dal calore proveniente dalle parti profonde del pianeta e dal decadimento di isotopi radioattivi.



Nelle zone dove si ha assottigliamento delle litosfera (fondi oceanici) si ha risalita dell'astenosfera con materiale che arriva ad emergere lungo le dorsali medio oceaniche. Dove la fuoriuscita di materiale proveniente dall'astenosfera va a creare simmetricamente sui due fianchi della dorsale nuova crosta oceanica. Per contro lungo le fosse oceaniche avviene il meccanismo che porta alla subduzione con sprofondamento della litosfera al disotto della litosfera adiacente, in prossimità delle fosse oceaniche si hanno archi magmatici dovuti alla risalita di materiale fuso durante il processo di subduzione.

I sistemi geotermici si generano sia in zone con flussi geotermici normali con temperature basse di circa 100°C, alle profondità economicamente utili, o più alti, specie in prossimità dei margini delle zolle crostali dove il gradiente geotermico

risulta essere notevolmente superiore a quello medio fino a temperature di 400°C alle profondità economicamente utili.



Schema semplificato di sistema geotermico

Semplificando un **sistema geotermico** è in genere costituito da 3 elementi la **sorgente di calore, il serbatoio ed il fluido che trasporta il calore.**

La **sorgente** può essere o un intrusione magmatica posizionata a profondità piccola 5-10 Km o il normale calore della Terra in sistemi a bassa temperatura.

In genere il **serbatoio** è rappresentato da rocce permeabili nelle quali i fluidi possono circolare assorbendo il calore.

Mentre il **fluido** in genere è rappresentato da acqua meteorica in fase liquida o vapore, che spesso viene arricchito da sostanze chimiche e gas.

La costruzione di un sistema geotermico richiede che la sorgente di calore sia naturale mentre il fluido può essere artificiale come avviene in alcuni impianti dove il fluido sfruttato per l'alimentazione di una turbina per produrre energia elettrica viene poi di nuovo immesso nel serbatoio tramite pozzi di reiniezione in modo da reintegrare la ricarica artificiale e ridurre l'impatto ambientale. La reiniezione di fluidi nel serbatoio può essere anche utilizzata per riattivare campi geotermici dove per mancanza di fluidi sono stati dismessi o non sono produttivi.

Per risorse geotermiche si intendono in genere *risorse di base accessibili* ovvero l'energia geotermica contenuta tra la superficie terrestre e un determinata profondità. *Le risorse di base accessibili* comprendono le *risorse di base accessibili utili* (=Risorse) ovvero quelle risorse che possono essere estratte e sfruttate anche in prossimo futuro. Queste comprendono al loro interno le risorse economicamente individuate (=riserve) ovvero quelle fonti individuate e che possono essere economicamente sfruttate anche nel presente.

Una classificazione delle risorse geotermiche prende in considerazione l'entalpia dei fluidi che risulta essere direttamente proporzionale al contenuto termico e dà una idea approssimativa del loro "valore". Pertanto si dividono in risorse a **bassa entalpia** a **media entalpia** e ad **alta entalpia**. (vedi tab. 1)

Entalpia $E = U + P \cdot V$ (KJ/Kg)

U(energia interna) – P(pressione) – V(volume del fluido)

E rappresenta la quantità di energia termica di una data massa di fluido

Tabella 1 Classificazione delle risorse geotermiche in base alla temperatura (°C)

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
Risorse a bassa entalpia	< 90	<125	<100	≤150	≤190
Risorse a media entalpia	90-150	125-225	100-200	-	-
Risorse ad alta entalpia	>150	>225	>200	>150	>190

Rif: (a) Muffler and Cataldi (1978).
 (b) Hochstein (1990).
 (c) Benderitter and Cormy (1990).
 (d) Nicholson (1993).

(e) Axelsson and Gunnlaugsson (2000)

Per *Sviluppo sostenibile* la Commissione Mondiale per l'Ambiente e lo Sviluppo intende uno sviluppo che: 'soddisfa le necessità della presente generazione senza compromettere le necessità delle generazioni future'.

L'energia geotermica è **rinnovabile e sostenibile**:

rinnovabile è una proprietà della sorgente ovvero la ricarica energetica dovuta ai fluidi caldi deve essere contemporanea allo sfruttamento;

sostenibile dipende dallo sfruttamento delle risorse e dalla quantità iniziale, quindi dai tempi in cui si rigenera la risorsa stessa.

A maggior ragione lo sfruttamento dell'energia geotermica a bassa (bassissima) entalpia attuato con i scambiatori geotermici, più avanti trattati, utilizzati nel campo del riscaldamento e raffrescamento degli edifici, si può valere dei requisiti di rinnovabilità e sostenibilità.

Rinnovabile in quanto: non intacca le riserve termiche del pianeta, sia per l'impatto praticamente ininfluenza sulle stesse, sia perché la scala dei tempi geologici (intesi come tempi di raffreddamento dell'interno della Terra) è "qualche ordine di grandezza" sopra a quella dei tempi di evoluzione della società umana. Inoltre le seppur minime interferenze termiche con la parte più superficiale della crosta terrestre prevedono nei sistemi a riscaldamento e raffrescamento una sottrazione di calore in inverno ed in parte una restituzione di calore in estate.

Sostenibile in quanto l'impatto sul terreno e sul sistema idrogeologico è modestissimo o ininfluenza rispettando le procedure tecniche più avanti illustrate; mentre l'impatto visivo è inesistente trattandosi sempre di opere o interrato o in scavo verticale.

2 - GEOTERMIA A BASSA ENTALPIA

2 a - CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICA DI UN SITO PER L'INSTALLAZIONE DI SCAMBIATORI GEOTERMICI

Con la raccolta di dati geologici ed idrogeologici si possono avere gli elementi necessari e sufficienti per operare una scelta tra le tipologie di scambiatori per applicazioni di geotermia a bassa entalpia.

Schematicamente i materiali naturali possono suddividersi in

“terre” e “rocce”

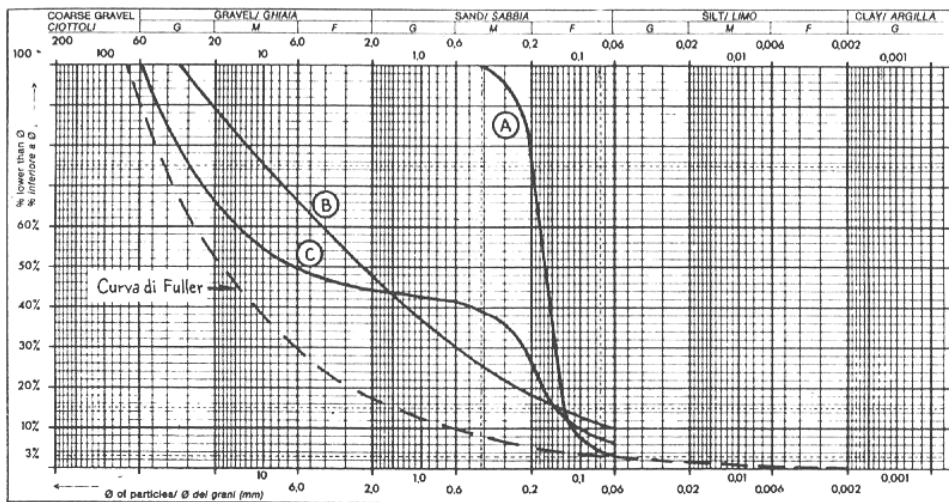
Terre : sono il risultato dei processi di alterazione e disgregazione delle rocce; aggregati naturali di minerali non legati fra loro (forze di coesione a carattere non permanente)

Rocce: aggregati naturali di minerali legati fra loro da forze di coesione a carattere permanente

Le terre possono classificarsi in base alla granulometria

(d = diametro dei granuli in mm):

Ciottoli	$d > 60$
Ghiaia	$2 < d < 60$
Sabbia	$0,06 < d < 2$
Limo	$0.002 < d < 0.06$
Argilla	$d < 0.002$



- A Sabbia uniforme
- B Sabbia e ghiaia ben assortita
- C Sabbia e ghiaia poco assortita

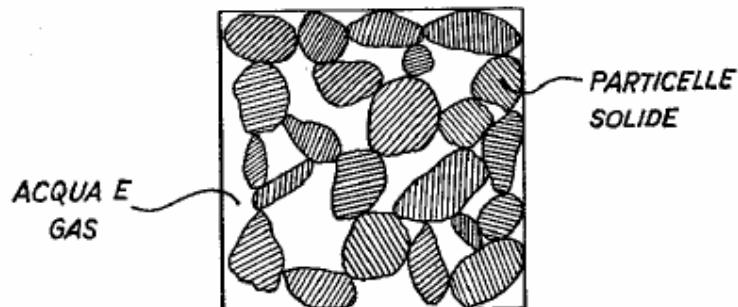
Rappresentazione delle curve granulometriche

Una Terra è un sistema multifase

costituita da una fase solida, una fase liquida ed una fase gassosa:

- Fase solida V_s : particelle solide
- Fase liquida V_w : acqua
- Fase gassosa V_g : aria

$$\text{volume di vuoti } V_v = V_w + V_g$$



Porosità

La porosità esprime il rapporto tra il volume di vuoti presenti e il volume totale.

$$n = \frac{V_v}{V_t} [\%]$$

Permeabilità

Attitudine di un terreno (serbatoio di acquifero) a lasciarsi attraversare dall'acqua sotto l'effetto di un gradiente idraulico. Esprime la resistenza del mezzo al deflusso dell'acqua che lo attraversa.

Possiamo distinguere sinteticamente due tipi di permeabilità una primaria dovuta al tipo di porosità del materiale ed una secondaria dovuta alla fratturazione .

Tabella 1. Permeabilità dei terreni.

k (cm/s)	10 ²	10	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹
k (m/s)	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹
Classi di permeabilità	EE	Elevata	Buona	Discreta	Bassa	BB	Impermeabile					
Tipi di terreno	Ghiaie pulite		Sabbie grossolane pulite e miscele di sabbie e ghiaie		Sabbie fini	Miscele di sabbie e limi		Limi argillosi e argille limose, fanghi argillosi		Argille omogenee e compatte		
Determinazione diretta di K	Prove dirette in situ mediante pompaggio											
	Infiltrimetri - Permeametri a carico costante											
Determinazione indiretta di K	Permeametri a carico variabile											
	Analisi granulometrica (applicabile a sabbie e ghiaie pulite)					Prove di consolidamento						

terreni permeabili per fratturazione (permeabilità secondaria)



Calcari stratificati

terreni permeabili per porosità (permeabilità primaria)



sabbie

Rapporto tra granulometria, porosità e permeabilità dei terreni

Tipo di terreno	d ₁₀ (mm) Diametro passante al 10%	n (%) Porosità	n _e (%) Porosità efficace	K (m/s) Permeabilità
Ghiaia media	2,500	45	40	3*10 ⁻¹
Sabbia grossa	0,250	38	34	2*10 ⁻³
Sabbia media	0,125	40	30	6*10 ⁻⁴
Sabbia fine	0,090	40	28	7*10 ⁻⁴
Sabbia molto fine	0,045	40	24	2*10 ⁻⁵
Sabbia siltosa	0,005	32	5	1*10 ⁻⁹
Silt	0,003	36	3	3*10 ⁻⁸
Silt argilloso	0,001	38	--	1*10 ⁻⁹
Argilla	0,0002	47	--	5*10 ⁻¹⁰

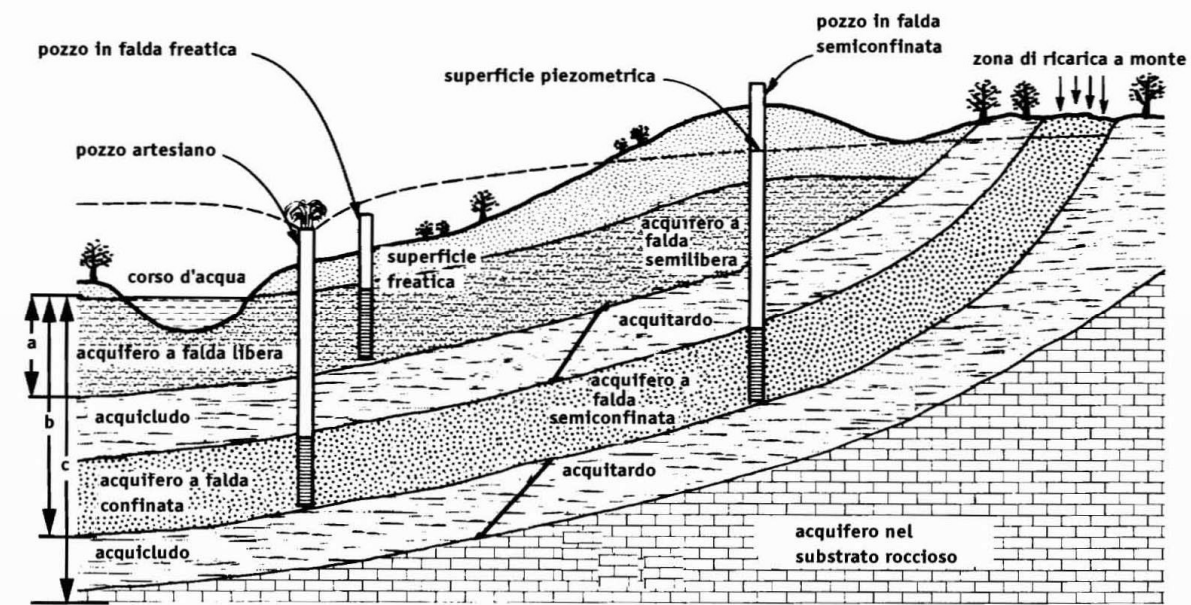
U.S. Geological Survey

Acquifero

Un **acquifero** è un sistema idrologico sotterraneo, finito e continuo, identificato con un **serbatoio** e da **acqua sotterranea (di falda)**. Le caratteristiche dell'acquifero variano in funzione della natura dei limiti geologici, delle dimensioni, della sua localizzazione nel sottosuolo (profondità), della struttura del serbatoio, natura dei materiali e caratteristiche fisiche ovvero litologia presente, dei processi geochimici e della presenza di deformazioni e fratturazione dei materiali.

La base dell'acquifero chiamata substrato è costituita da una formazione idrogeologica impermeabile. Mentre il limite superiore è di tre tipi :

- a falda libera(freatico) : idrodinamico con fluttuazioni libere;
- a falda imprigionata (confinata): impermeabile;
- a falda semimprigionata: semipermeabile



Indagini per ricostruzione stratigrafica ed idrogeologia :

- ***Rilievo Geologico*** : costruzione di carte geologiche.
- ***Sondaggi geognostici meccanici*** : ricostruzione stratigrafica e misure del livello statico della falda freatica, prove di permeabilità in foro, prelievo di campioni per analisi di laboratorio.
- ***Indagini geofisiche*** : geoelettriche e sismiche (ricostruzione stratigrafica e indicazioni sulla permeabilità dei terreni e presenza di falde freatiche).
- ***Stratigrafie di pozzi esistenti*** : dato stratigrafico e misura livello statico della falda.
- ***Dati piezometrici e prove di portata su pozzi esistenti*** : ricostruzione della falda freatica, direzione di scorrimento dell'acquifero (carte isopiezometriche) e prove di pompaggio su pozzi valutazione della portata di esercizio del pozzo).

L'insieme dei dati geologici permette di fornire elementi fondamentali per la scelta del sistema di scambiatore, eventualmente verificando la praticabilità di diverse opzioni di scelta .

Ad esempio per progettare un sistema di scambiatore ad acqua di falda è indispensabile avere informazioni precise sulla portata di esercizio di un opera di captazione verificata sia nel periodo di massima che di minima della falda acquifera per verificare se questa è compatibile con la portata richiesta dal sistema in progetto.

Altresì una conoscenza sufficientemente dettagliata della situazione idrogeologica locale permette di ottimizzare il progetto di sonde geotermiche verticali la cui resa (o potenza di estrazione) a metro lineare di sonda è proporzionale alla conducibilità termica del terreno ed è correlata alla presenza di acqua di falda.

Una conoscenza della stratigrafia dei terreni permette anche di ottimizzare la scelta del metodo di perforazione ; quindi attenuare l'impatto del cantiere sui luoghi e ridurre al minimo le possibilità di imprevisti nella perforazione e valutare anche soluzioni per attenuare il rischio di dispersione della boiaccia da iniettare in fratture delle formazioni geologiche attraversate.

2b - SCAMBIATORI GEOTERMICI

Un impianto geotermico a bassa temperatura (bassa entalpia) è costituito da una pompa di calore ed uno scambiatore geotermico

Scambio termico con il suolo

Il terreno scambia calore per conduzione con dei corpi posti al suo interno (come ad esempio per i tubi in polietilene) fino alla stabilizzazione delle temperature. La presenza di un fluido freddo all'interno delle tubazioni accentua tale processo; così il fluido che si riscalda torna poi in superficie ed una volta raffreddato riprende il ciclo.

Tipologie di scambiatori :

- a) sonde verticali
- b) sonde orizzontali
- c) ad acqua di falda
- d) altri (scambiatori a spirale, ad acqua di superficie, pali energetici,..)

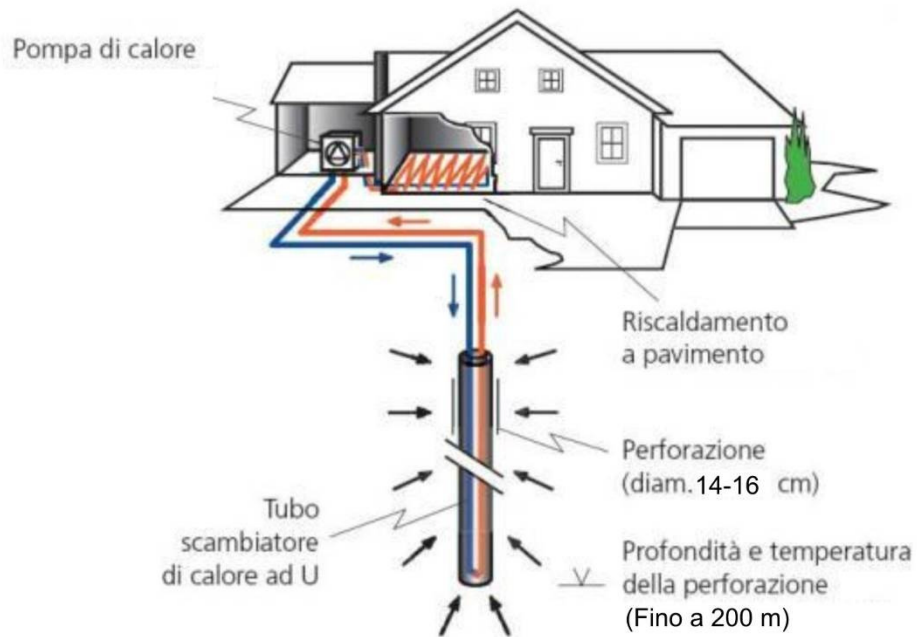


Figura a sonda verticale

*Particolarmente usate quando: servono lunghi periodi di attivazione dell'impianto
minimo ingombro dello scambiatore per scarso spazio esterno disponibile.*

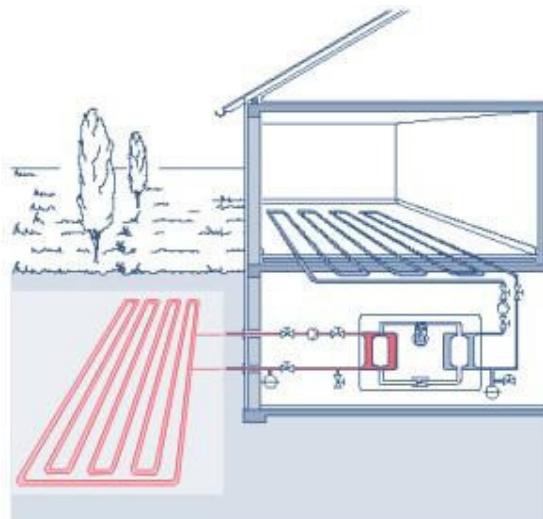


Figura b Scambiatore a tubi orizzontali

Costo di installazione conveniente rispetto alle sonde verticali, richiede ampia disponibilità di spazio per la messa in opera e presenza nei primi 1,5-2,0 m dal piano campagna di terreno facilmente escavabile.

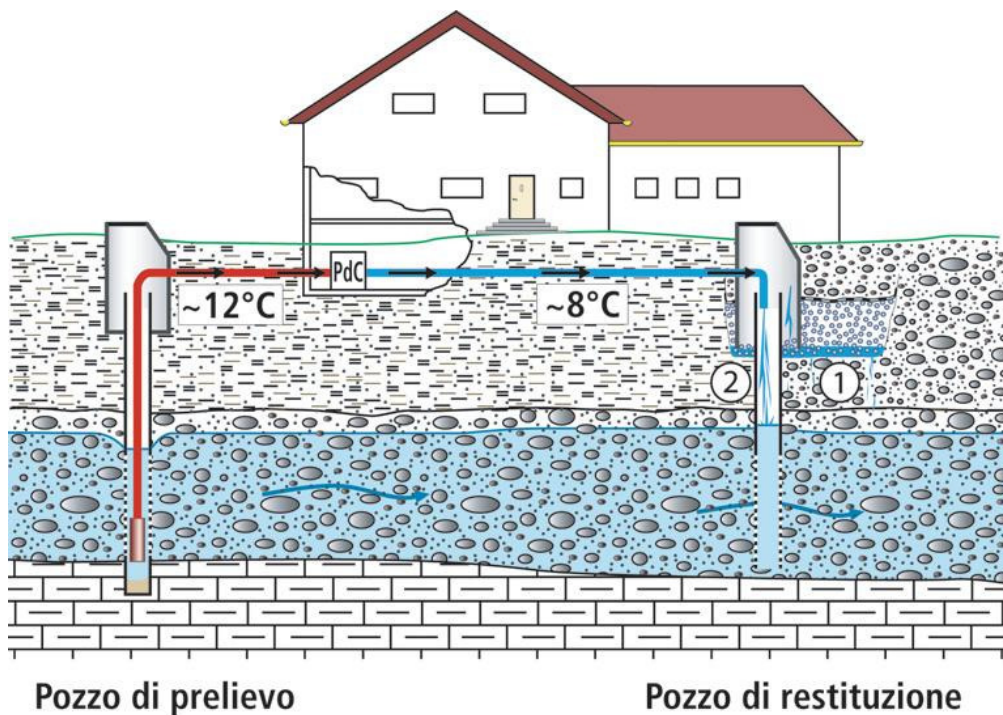


Figura c Scambiatori ad acqua di falda

Ottimo rendimento , valutazione preventiva della falda (sia la portata che il chimismo delle acque), valutazione delle autorizzazioni da richiedere sia per la realizzazione dei pozzi che per il pompaggio della acqua e per la sua successiva immissione in falda (variabili a seconda delle norme locali)

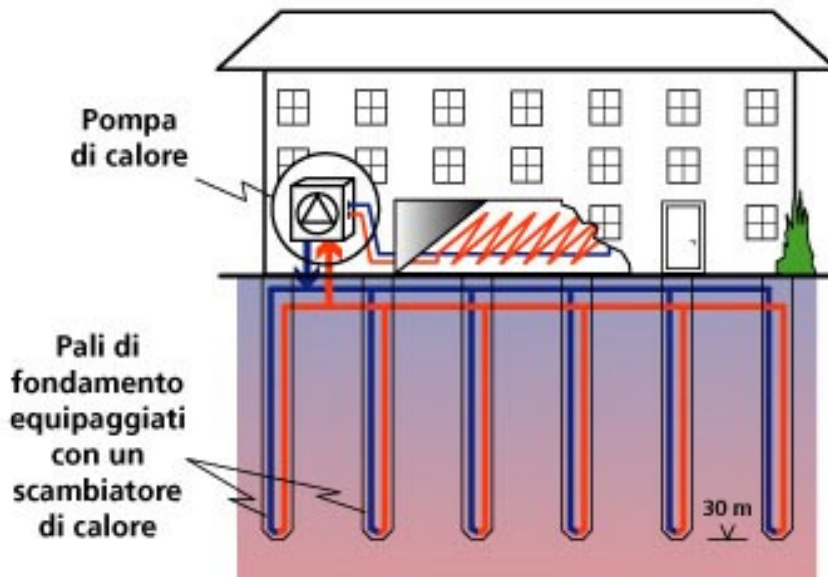
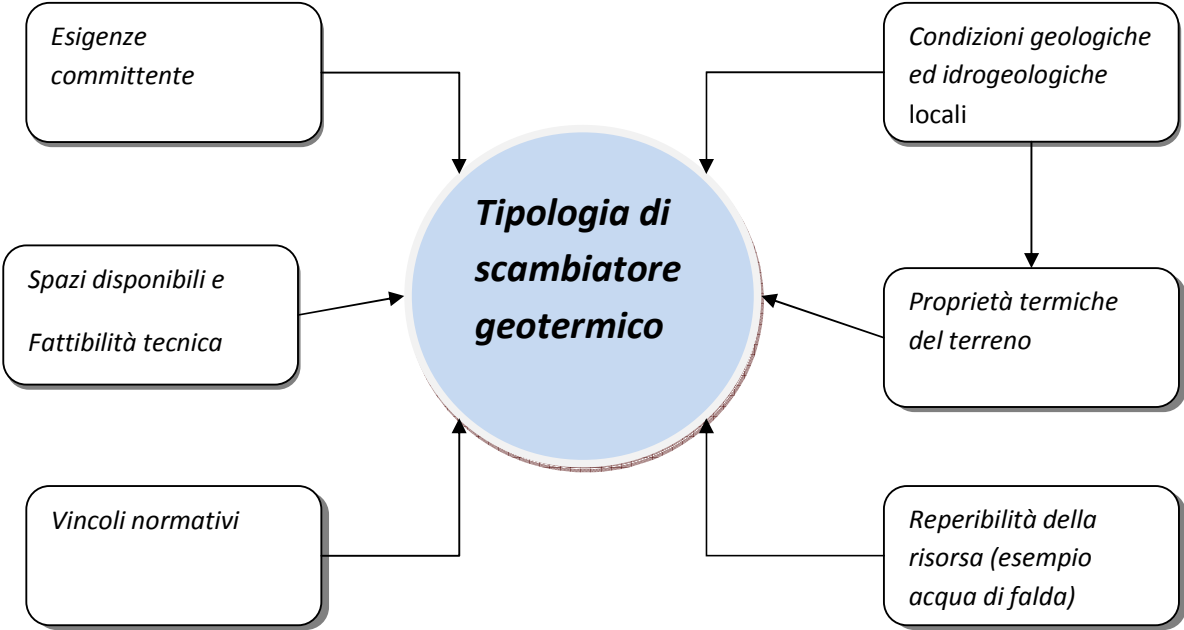


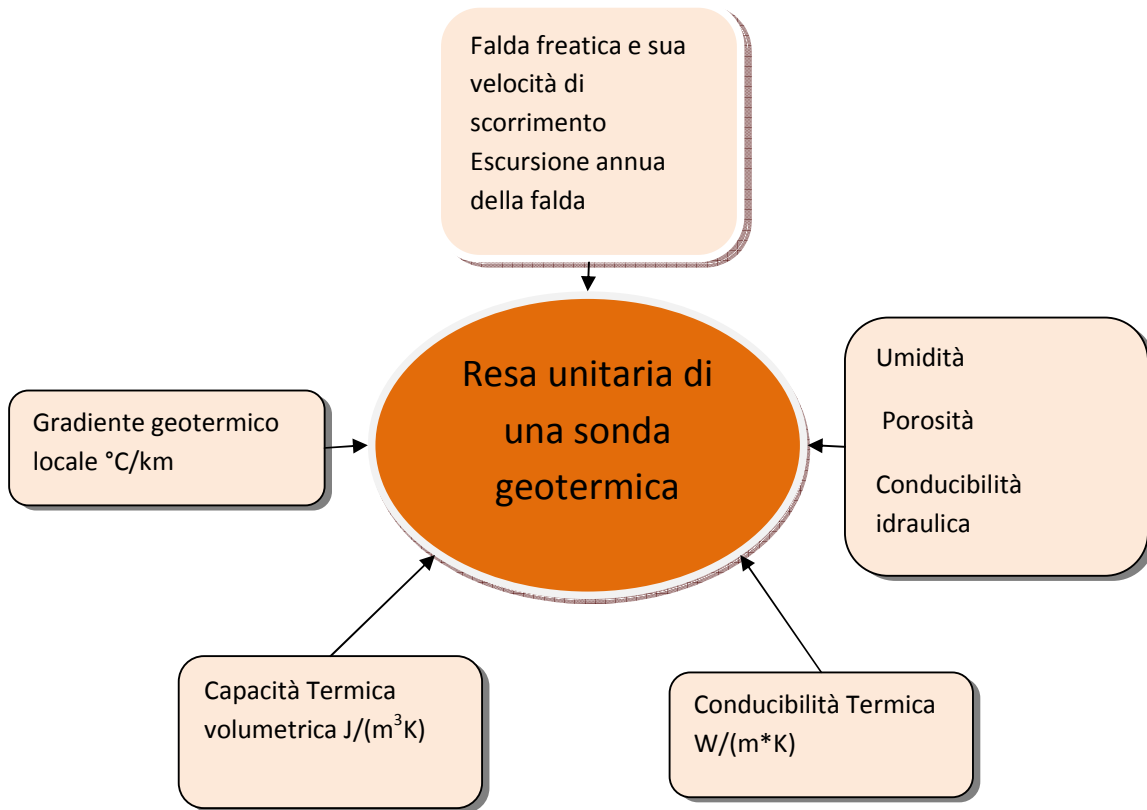
Figura d Pali energetici

Applicazione particolare legata all'esistenza di un progetto edilizio che richieda la realizzazione di pali trivellati abbastanza profondi (intorno a 20 m), resa sicuramente inferiore alle sonde verticali; ma si annulla il costo della perforazione e getto avendolo già a disposizione.

Scelta tipologia di scambiatore funzione di :



Fattori che determinano la resa di una sonda geotermica



La **resa unitaria di una sonda geotermica** è influenzata dai parametri e dalle caratteristiche geologiche ed idrogeologiche indicati nel grafico. In dettaglio questa è direttamente proporzionale al gradiente geotermico (funzione dell'intensità del flusso di calore locale); inoltre aumenta con la presenza di una falda freatica, terreni ad elevata conducibilità idraulica (aumento del parametro conducibilità termica del terreno).

Tabella tipo terreno – valori di conducibilità termica

Tipo di roccia	Conducibilità termica λ [W / (m · K)]			Capacità termica volumetrica ρC [MJ / (m ³ · K)]
	Min.	Medio	Max.	
Rocce magmatiche				
Basalto	1.3	1.7	2.3	2.3 – 2.6
Diorite	2.0	2.6	2.9	2.9
Gabbro	1.7	1.9	2.5	2.6
Granito	2.1	3.4	4.1	2.1 – 3.0
Peridotite	3.8	4.0	5.3	2.7
Riolite	3.1	3.3	3.4	2.1
Rocce metamorfiche				
Gneiss	1.9	2.9	4.0	1.8 – 2.4
Marmo	1.3	2.1	3.1	2.0
Metaquarzite	5.8	5.8	5.8	2.1
Micascisti	1.5	2.0	3.1	2.2
Scisti argillosi	1.5	2.1	2.1	2.2 – 2.5
Rocce sedimentarie				
Calcere	2.5	2.8	4.0	* 2.1 – 2.4
Marna	1.5	2.1	3.5	2.2 – 2.3
Quarzite	3.6	6	6.6	2.1 – 2.2
Salgemma	5.3	5.4	6.4	1.2
Arenaria	1.3	2.3	5.1	1.6 – 2.8
Rocce argillose/limose	1.1	2.2	3.5	2.1 – 2.4
Materiale non consolidato				
Ghiaia secca	0.4	0.4	0.5	1.4 – 1.6
Ghiaia satura d'acqua	1.8	1.8	1.8	2.4
Morera	1.0	2.0	2.5	1.5 – 2.5
Sabbia secca	0.3	0.4	0.8	1.3 – 1.6
Sabbia satura d'acqua	1.7	2.4	5.0	2.2 – 2.9
Argilla/limo secco	0.4	0.5	1.0	1.5 – 1.6
Argilla/limo satura d'acqua	0.9	1.7	2.3	1.6 – 3.4
Torba	0.2	0.4	0.7	0.5 – 3.8
Altre sostanze				
Bentonite	0.5	0.6	0.8	3.9
Cemento	0.9	1.6	2.0	1.8
Ghiaccio (- 10°C)	-	2.32	-	1.87
Plastica	-	0.39	-	-
Aria (0 - 20°C, secca)	-	0.02	-	0.0012
Acciaio	-	60	-	3.12
Acqua (+ 10°C)	-	0.58	-	4.19

Tabella tipo terreno – valori di conducibilità termica e resa unitaria di una sonda verticale (potenza estraibile)

RESE UNITARIE PER METRO LINEARE DI SONDA GEOTERMICA PER METRO DI PERFORAZIONE		
TIPO DI TERRENO	ORE DI FUNZIONAMENTO DELL'IMPIANTO DI RISCALDAMENTO E CLIMATIZZAZIONE	
	1800 ore / bivalente	2400 ore / solo riscaldamento
Valori generali di riferimento		
Terreni sedimentari secchi ($\lambda < 1,5$ W/m K)	25 W/m	20 W/m
Rocce compatte o terreni saturi d'acqua ($\lambda = 1,5 - 3,0$ W/m K)	60 W/m	50 W/m
Roccia compatta con elevata conducibilità termica ($\lambda > 3,0$ W/m K)	84 W/m	70 W/m
Tipi di terreno		
Ghiaie e sabbie secche	< 25 W/m	< 20 W/m
Ghiaie e sabbie interessate da acquiferi sotterranei	65+80 W/m	55+65 W/m
Argilla, limo, terreni umidi	35+50 W/m	30+40 W/m
Calcere compatto	55+70 W/m	45+60 W/m
Arenarie	65+80 W/m	55+65 W/m
Rocce ignee acide (Es. Granito)	65+80 W/m	55+70 W/m
Rocce ignee basiche (Es. Basalto)	40+65 W/m	35+55 W/m
Rocce metamorfiche (Es. Gneiss)	70+85 W/m	60+70 W/m

Rif. Norma VDI 4640 - Verein Deutscher Ingenieure

Dati per la progettazione di un impianto a sonde geotermiche verticali

Per impianti modesti di singoli edifici o comunque fino ad una potenza termica non superiore a 30 – 40 KW (questo dato è puramente indicativo e dipende da molti fattori tra cui la sensibilità dei progettisti o la conoscenza del contesto locale e dell'affidabilità degli esecutori delle opere, ecc) i parametri termici vengono stimati dalla ricostruzione stratigrafica e dai dati idrogeologici locali, mentre per impianti superiori è consigliabile eseguire il GRT (Ground Response Test o Thermal Response Test).

Questo test permette la definizione delle proprietà termofisiche di scambio del sottosuolo ottenendo i parametri per un corretto dimensionamento del campo di sonde geotermiche.

Per eseguire i GRT si deve prima realizzare una sonda geotermica di prova (che comunque diverrà parte integrante del campo sonde). Detto test consiste nell'immissione di un quantità di calore nota e costante all'interno della sonda stessa (fino a circa 72 ore) , misurando le temperature di mandata e ritorno del fluido. Con il test si determina il valore della conducibilità termica media del terreno e la resistenza della sonda.



Esecuzione di GRT

3 - SONDE GEOTERMICHE VERTICALI

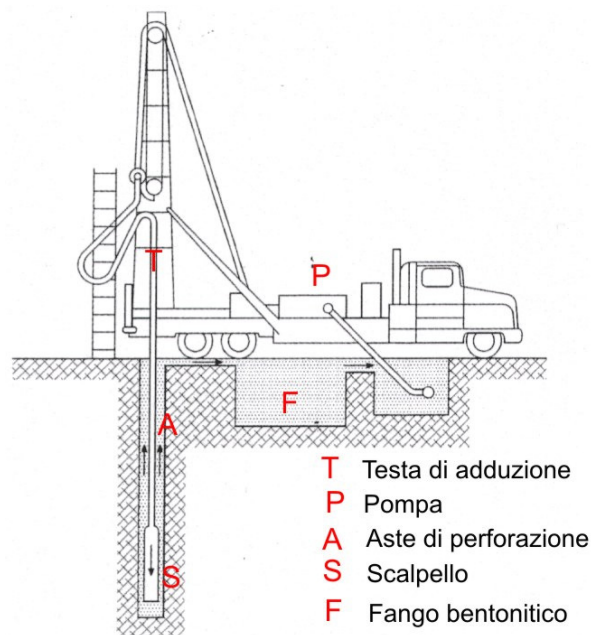
3 a - SISTEMI DI PERFORAZIONE

La tecnica delle perforazioni nel campo delle sonde geotermiche verticali è derivata dai sistemi a rotazione sviluppati ormai da decenni per i settori della perforazione pozzi per acqua ed in parte anche da quella per ricerche idrocarburi.

Sostanzialmente i lavori vengono eseguiti con due metodi di perforazione a rotazione:

- a) *circolazione diretta di fanghi e/o acqua*,
- b) *rotopercussione - con martello fondo foro*, circolazione diretta di aria.

Circolazione diretta di fanghi e/o acqua



Questo sistema di perforazione è usato di norma su terre (argille, limi, sabbie e ghiaie) sia sciolte che addensate e comunque genericamente quando non si è in presenza di roccia.

Si perfora mediante uno scalpello (trilama o tricono) raccordato mediante la batteria di aste di perforazione alla testa di rotazione della trivella.



Tricono



Trilama

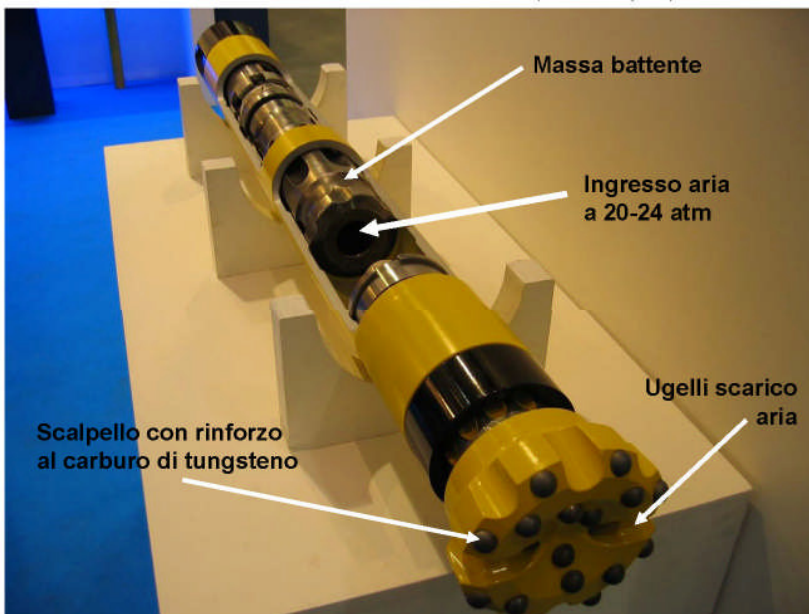
Il fluido di circolazione azionato dalla pompa fanghi (normalmente a pistoni o a vite) passa tramite le aste cave fino allo scalpello contribuendo con la sua pressione (in genere da 20 a 40 bar) alla disgregazione della terra nel foro oltre che al raffreddamento dell'utensile. Mediante il fluido (fanghi bentonitici) viene portato in superficie il detrito di perforazione che passa nell'intercapedine tra foro e aste di perforazione (circolazione diretta) contribuendo a tenere il foro libero.

Rotopercolazione (con martello fondo foro)



Perforazione a rotopercussione

Questo sistema di perforazione è usato di norma quando si è in presenza di roccia. Si perfora mediante un martello fondo foro raccordato mediante la batteria di aste di perforazione alla testa di rotazione della trivella. Il fluido di circolazione è in questo caso aria compressa fornita da un motocompressore (a vite) passa tramite le aste cave fino al martello contribuendo con la sua pressione (in genere da 12 a 27 bar) al funzionamento dello stesso.



martello fondo foro

Il martello è costituito da una camicia esterna su cui scorre internamente un pistone che mediante l'aria compressa compie un moto alternato con frequenza molto elevata (fino a 1000 colpi/min) andando ogni volta a colpire con la sua massa una punta dotata di bottoni di acciaio ; detta azione meccanica disgrega con facilità anche una roccia particolarmente compatta (realizzando velocità di avanzamento della perforazione anche di 20-30 metri /ora).

Mediante il fluido (aria) viene portato in superficie il detrito di perforazione che passa nell'intercapedine tra foro e aste di perforazione (sempre una circolazione diretta) contribuendo a tenere il foro libero.

Sistemi di rivestimento del foro

Nel campo delle sonde geotermiche tranne pochi casi (fori in rocce integre) è opportuno installare le sonde stesse su fori rivestiti con tubazione di rivestimento provvisorio in acciaio; questo garantisce una operazione di posizionamento che non compromette lo stato delle tubazioni in polietilene costituenti la sonda e permette di raggiungere la quota di progetto con facilità.



tubazione di rivestimento messa in opera

Per quanto detto si sono sviluppate tecniche che prevedono l'utilizzo di attrezzature specifiche per l'esecuzione di questi lavori.

Alcuni produttori di trivelle idrauliche hanno posto sul mercato, ormai da qualche anno degli *impianti di perforazioni dotati di doppia testa di rotazione* che consente il posizionamento contestualmente alla perforazione del rivestimento provvisorio del foro.



impianti di perforazioni dotati di doppia testa di rotazione

Questi macchinari sicuramente efficienti hanno come controindicazione, oltre i costi molto elevati (quindi scarsa diffusione), generalmente anche delle dimensioni ed una massa elevate e quindi la richiesta di spazi di manovra superiori a quelli di trivelle tradizionali a singola testa di rotazione.

Trattamento dei residui di perforazione

Altro aspetto importante è il **trattamento dei residui di perforazione** che sono distinti a secondo del metodo di perforazione adottato e se pur lentamente si stanno diffondendo sistemi che prevedono l'invio dei terreni di scavo verso container nel caso di rotopercussione o vasche stagne nel caso di circolazione di fanghi :



Perforazione con vasca stagna

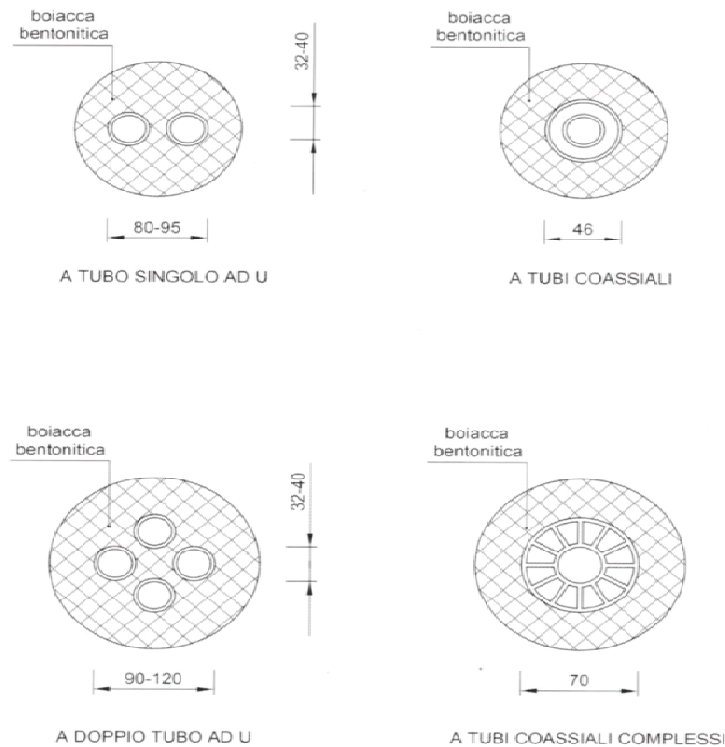
Detti residui di perforazione vanno trattati secondo quanto previsto dalle norme sulle “terre e rocce da scavo” che spesso hanno applicazioni distinte dettate da regolamenti locali (regionali e comunali) .

E' opportuno precisare che qual'ora i detriti non siano "contaminati" da prodotti usati in perforazione (come di norma succede nella perforazione a rotopercolazione a foro rivestito) questi non richiedono di essere portati a rifiuto e quindi visti i modesti volumi in gioco (per un foro di 100 m si tratta al massimo di circa 1,5-2,0 mc di detrito), sono gestibili nei normali lavori di livellamento scavo e rinterro da effettuare durante il completamento dei lavori.

Può essere in questo caso richiesta (come nel caso della normativa per i pozzi per acqua) una dichiarazione di geologo abilitato per asserire che lo stato dei terreni di scavo è assimilabile ad un terreno naturale.

3 b -Tipi di sonde verticali

La sonda geotermica verticale è parte integrante dell'impianto geotermico comunemente definito e realizza lo scambio termico con il sottosuolo con sistema closed-loop (a circuito chiuso).Di seguito si descrivono brevemente le sonde geotermiche in polietilene a singolo o doppio U, che vengono alloggiare in fori aventi di norma diametro tra 130-150 mm e profondità fino a 200 m.



Schema dei vari tipi di sonde verticali

Tra i tipi dello schema è ormai adottata largamente la soluzione ad U per la sua praticità, affidabilità e ottimizzazione del costo.

Nei riguardi delle due tipologie a U si può osservare il principale vantaggio della sonda a doppia U, consistente nel caso di occlusione o rottura di uno dei circuiti, nella funzionalità dell'impianto, a seconda delle condizioni geologiche, con una resa dal 70 -80 % di quella di origine.

Ovviamente la sonda a singola U permette una facilità di installazione superiore permettendo di eseguire diametri di perforazione ridotti utilizzando anche impianti di perforazione più piccoli (può essere una soluzione ove ci siano particolari condizioni logistiche di difficile accesso o con ridotti spazi operativi).

Attualmente la quasi totalità delle installazioni utilizza scambiatori in polietilene ad alta densità PEAD o HDPE, PE100 PN 16, normalmente usati in acquedottistica.

Ovviamente un PN16 è idoneo a lavorare fino a 16 bar quindi risulta utilizzabile fino a profondità di installazione di 120 -150 m.

Sono presenti sul mercato anche altri prodotti come il polietilene reticolato ad alta pressione che sicuramente garantisce migliori prestazioni (sia meccaniche che di scambio termico) ma è poco utilizzato a causa del suo costo .

Il *piede della sonda ad U* è sicuramente il punto critico dello scambiatore di prassi si preferisce utilizzare la sonda geotermica completa di terminale con certificato di collaudo.



Piede di sonda ad U

Inserimento sonde sul foro

L'operazione di inserimento delle sonde nel foro viene normalmente eseguita collocando le stesse prima in un tamburo che permette di svolgere le bobine di tubi in modo corretto inserendole nel foro.

Durante l'inserimento delle bobine nel tamburo è opportuno verificare visivamente che il tubo non presenti danneggiamenti imputabili ai trasporti.

Si applica a questo punto il peso alle sonde e se necessario (in particolar modo in fori ove è presente una falda acquifera) si riempiono le stesse con acqua onde evitarne galleggiamento nel foro.



Inserimento sonde sul foro

Durante questa operazione è da porre attenzione al rischio di abrasione delle sonde stesse dovuto ad eventuale struscio contro i bordi metallici delle camice e/ contro strutture metalliche della macchina di perforazione (morse, ecc.)

Cementazione del foro

Quando la sonda geotermica è stata collocata nel foro alla profondità prevista si deve procedere alla iniezione nel foro di una boiaccia costituita da : cemento-bentonite-acqua o in alternativa una boiaccia costituita da: prodotto specifico premiscelato –acqua.

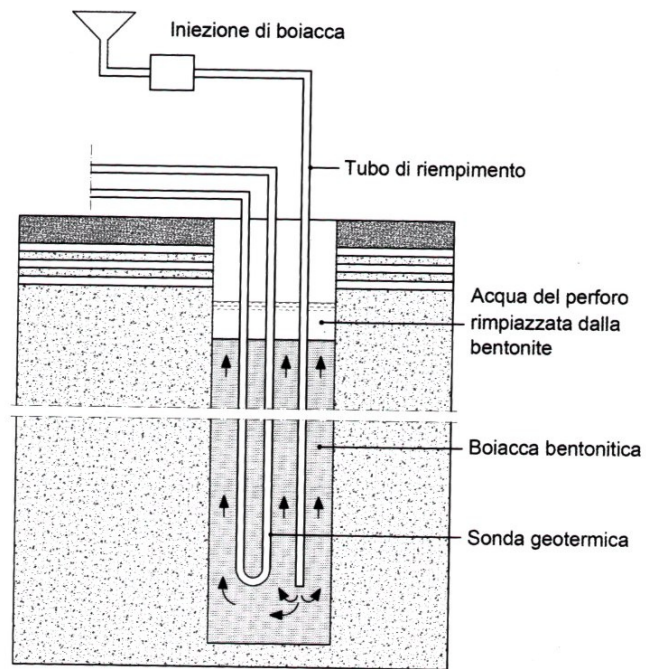
Un prodotto specifico premiscelato è composto da bentonite, leganti minerali cementizi e composti stabilizzatori della conducibilità termica.

Detta iniezione viene effettuata dal fondo foro collegando l'iniettore ad un tubo di polietilene di diametro normalmente da 1/2 e 3/4 di pollice che è stato calato nel foro stesso insieme alla sonda geotermica.

La cementazione per risalita consente di ottenere un ottimo riempimento dello spazio rimasto tra la sonda geotermica ed il foro evitando di lasciare dei vuoti; questo ovviamente consente uno scambio termico ottimale tra il fluido che circola nella sonda ed il terreno per tutta la lunghezza della stessa.



Iniettore di boiaccia premiscelato-acqua



Caratteristiche del materiale di riempimento:

conducibilità termica più vicino possibile a quella del terreno (intorno a $2\text{W/m}^\circ\text{K}$) ;

leggermente espansivo per sigillare meglio il foro;

moderatamente elastico in modo da non fratturarsi una volta solidificato intorno ai tubi della sonda per lievi sollecitazioni meccaniche;



Dettaglio del premiscelato da iniettare

Schematizzazione di tre tipologie di cantiere in funzione degli spazi disponibili e della collocazione del cantiere stesso:

a) Cantieri con ampio spazio e collocazione al di fuori di centri abitati



Bettona (PG) - cantiere a rotopercolazione con rivestimento del foro-



Gualdo Cattaneo (PG)- perforazione a rotopercolazione senza rivestimento del foro-

Valutazioni pratiche per cantieri con ampio spazio:

Quando non ci sono vincoli di spazio ridotto o limitazione di accessi al cantiere sono utilizzabili normalmente attrezzature di maggiore prestazioni (e dimensioni) e quindi si abbreviano i tempi di esecuzione delle sonde verticali. Si deve comunque porre attenzione all'immissione in atmosfera di particelle solide – polveri qual'ora si lavori a rotopercolazione, quindi utilizzando aria ad alta pressione (fino a 27 bar) ed elevata portata (fino a 25 mc/min). Nel caso di perforazione a circolazione di acqua o fanghi anche se si rende possibile l'esecuzione della buca si deve verificare che questa non permetta l'infiltrazione o perdita nel suolo dell'acqua di perforazione (in questo caso o si riveste con un telo impermeabile la buca o si usa bentonite in polvere).

b) Cantiere con spazio vincolato posto in centro urbano



Montevarchi centro urbano (cantiere asilo comunale) - perforazione a circolazione di fanghi e rivestimento del foro-

Valutazioni pratiche per cantieri con spazio vincolato :

Verificare bene l'attrezzatura in funzione degli spazi disponibili e delle limitazioni degli accessi al cantiere . Qual'ora si lavori a circolazione diretta di fanghi va verificata la possibilità di realizzare la buca o in alternativa il collocamento della vasca stagna . Porre comunque maggiore attenzione all'immissione in atmosfera di particelle solide – polveri qual'ora si lavori a rotopercolazione e specialmente se in corrispondenza del cantiere ci sono altre abitazioni o spazi di utilizzo pubblico (giardini, piazze , scuole, edifici di culto, ecc).

c) Cantiere con ridotto spazio posto in centro urbano



(Macerata centro) -Perforazione a circolazione di fanghi con vasca stagna e rivestimento del foro-

Valutazioni pratiche per cantieri con ridotto spazio posti in centro urbano :

Verificare e misurare l'attrezzatura in funzione degli spazi disponibili e delle limitazioni degli accessi al cantiere. Più che in altri casi è necessaria la verifica del passaggio di eventuali sottoservizi interrati, presenza di cavità e locali interrati (in centri storici più frequente di quanto si possa immaginare) . A questo scopo nei casi dubbi è utile predisporre un'indagine con georadar che consente una individuazione sufficientemente attendibile (nei primi metri dal piano campagna) di qualsiasi anomalia presente nel sottosuolo anche di dimensioni di pochi decimetri. Prevenire (con più accurate informazioni sulla geologia locale) anche eventuali imprevisti di perforazione che possono compromettere l'esecuzione delle sonde verticali lavorando di norma con macchinari più piccoli che facilmente arrivano al limite operativo . Qual'ora si lavori a circolazione diretta di fanghi va utilizzata una vasca stagna . Lavorando a rotopercolazione va attenuata o eliminata l'immissione in atmosfera di particelle solide – polveri (utilizzo di container). Al di sotto della perforatrice va collocato un telo impermeabile a protezione di eventuali perdite di combustibile, olio motore, olio idraulico ed in ogni caso tenere a disposizione prodotti olio assorbenti.

BIBLIOGRAFIA

- Società Svizzera per la Geotermia SSG – Documentazione Tecnica
- Norma VDI 4640 Verein Deutscher Ingenieure Thermische Nutzung des Untergrundes - 2000-2004
- Tinti F. Geotermia per la climatizzazione - 2008
- Commissione Europea Una politica energetica per l'Europa – 2007
- Basta S. – Minchio F. Geotermia e pompe di calore – 2008
- Acque Sotterranee Geotermia e sonde Geotermiche – 2008
- Enea Rapporto energia e ambiente 2006 - 2007
- Geologia Tecnica e Ambientale “La geotermia ieri oggi domani”, Allegato N1-2/2007
- Castany G. Idrogeologia principi e metodi 1985

INDICE

Energia geotermica introduzione.....	pag 1
Geotermia a bassa entalpia- caratterizzazione geologica di un sito per l'installazione di scambiatori geotermici.....	pag 9
Scambiatori geotermici.....	pag 15
Tabella conducibilità termica dei terreni.....	pag 20
Tabella resa unitaria di una sonda geotermica.....	pag 21
G.R.T. (Ground Response Test).....	pag 22
Sonde geotermiche verticali	pag 23
Schematizzazione tipologie cantieri.....	pag 34
Bibliografia.....	pag 38