

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

**Studio dell'attivazione termica
di un parcheggio interrato**



Relatori:

prof. Marco Barla

ing. Matteo Baralis

Candidato:

Daniele Carosso

Ottobre 2019

*Alla mia famiglia
fondamenta,
pilastro
e trave portante
di quella arditissima struttura
chiamata vita*

INDICE

Indice delle figure.....	ix
Indice delle tabelle	xiii
1 Introduzione	1
1.1 Obiettivi.....	1
1.2 Struttura della tesi.....	2
2 Geotermia e geostrutture energetiche	3
2.1 Cenni storici.....	3
2.2 Geotermia	4
2.2.1 Impianti a vapore dominante.....	6
2.2.2 Impianti ad acqua dominante	6
2.2.3 Impianto a ciclo binario.....	7
2.3 Geotermia superficiale.....	8
2.3.1 Il profilo di temperatura nel terreno	9
2.4 Sistemi di scambio termico.....	10
2.4.1 Sistemi a circuito chiuso o closed – loop	10
2.4.2 Sistemi a circuito aperto o open – loop.....	13
2.4.3 Il fluido termovettore	14
2.5 Geostrutture energetiche.....	15
2.5.1 Pali energetici.....	16
2.5.2 Fognature energetiche	18
2.5.3 Tiranti e ancoraggi energetici.....	19
2.5.4 Gallerie energetiche: ENERTUN.....	19

2.5.5	Diaframmi energetici.....	22
3	Realizzazione di diaframmi in calcestruzzo armato	25
3.1	Tiranti di ancoraggio	27
3.2	Cenni sull'analisi di stabilità	29
3.2.1	Diaframma a sbalzo.....	29
3.2.2	Diaframma in condizioni di estremo libero (free earth support).....	30
3.2.3	Diaframma in condizioni di estremo vincolato (fixed earth support).....	31
3.3	Verifiche di un diaframma e degli ancoraggi	32
3.3.1	Diaframmi	32
3.3.2	Tiranti di ancoraggio	33
3.4	Realizzazione dei diaframmi	34
4	Caso di studio.....	43
4.1	Descrizione dell'opera.....	43
4.1.1	Il Masterplan di Ateneo.....	43
4.1.2	Geometria dell'opera.....	45
4.1.3	Materiali e realizzazione	48
4.2	Fasi costruttive.....	48
4.2.1	Fase 1 – Allestimento cantiere, scavo e realizzazione dei diaframmi.....	48
4.2.2	Fase 2 – Realizzazione delle fondazioni, degli impianti e rinterro	51
4.2.3	Fase 3 – Realizzazione delle elevazioni tra piano -4 e -3	51
4.2.4	Fase 4 – Realizzazione del solaio del livello -3	52
4.2.5	Fase 5 – Realizzazione delle elevazioni tra piano -3 e -2	54
4.2.6	Fase 6 – Realizzazione del solaio del livello -2	54
4.2.7	Fase 7 – Realizzazione delle elevazioni tra piano -2 e -1	54
4.2.8	Fase 8 – Realizzazione del solaio del livello -1	54
4.2.9	Fase 9 – Realizzazione delle elevazioni tra piano -1 e 0.....	54
4.2.10	Fase 10 – Costruzione solaio di copertura e realizzazione delle opere di finitura.....	55
4.3	Descrizione dell'attivazione termica dell'opera	56
4.3.1	Il sottosuolo di Torino dal punto di vista geotermico	56
4.3.2	Linee guida per i diaframmi energetici	58
4.3.3	Attivazione energetica dei diaframmi	60
5	Modello numerico.....	67
5.1	Il Metodo agli Elementi Finiti	67
5.1.1	Discretizzazione del dominio e identificazione della variabile primaria	68
5.1.2	Equazioni degli elementi ed equazioni globali	68

5.1.3	Condizioni al contorno e risoluzione delle equazioni globali	69
5.2	Problema accoppiato.....	70
5.2.1	Processo Idraulico	71
5.2.2	Processo di trasferimento del calore.....	72
5.2.3	Condizioni al contorno	75
5.3	Il programma Feflow	76
6	Simulazione numerica dell'attivazione termica dei diaframmi	77
6.1	Realizzazione del modello numerico.....	77
6.1.1	Geometria del modello e realizzazione del modello bidimensionale.....	77
6.1.2	Suddivisione del modello in elementi finiti tridimensionali	79
6.1.3	Parametri dei materiali	81
6.1.4	Condizioni iniziali e al contorno	84
6.2	Simulazioni.....	88
6.2.1	Inizializzazione della temperatura all'interno del dominio.....	89
6.2.2	Valutazione della configurazione più performante	90
6.2.3	Valutazioni sul lungo periodo	96
6.2.4	Andamento della temperatura nel terreno	103
7	Conclusioni	105
8	Bibliografia	109

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 Rappresentazione schematica degli strati interni della Terra	5
Figura 2 Impianto geotermico a ciclo binario. Si notino i circuiti del fluido dell'acquifero (in rosso) e del fluido secondario (in verde). (www.cosvig.it).....	7
Figura 3 Esempio di andamento della temperatura nel terreno.....	10
Figura 4 Schema di disposizione delle sonde geotermiche verticali (1) e orizzontali (2) nel sistema closed-loop (Tinti, 2008).....	11
Figura 5 Sonde geotermiche verticali collegate in parallelo (Tinti,2008).....	11
Figura 6 Disposizioni dei tubi a "singolo U" e "doppio U" in sezione (Tinti,2008).....	12
Figura 7 Disposizione degli scambiatori a "tubi coassiali semplici" e a "tubi coassiali complessi" in sezione (Tinti, 2008)	12
Figura 8 Disposizione delle sonde geotermiche orizzontali (www.greenel.it)	13
Figura 9 Sistema open-loop a due pozzi (Tinti, 2008).....	14
Figura 10 Parti che compongono il sistema open-loop a due pozzi (Basta et al., 2008)	14
Figura 11 Gabbia di armatura per palo energetico equipaggiato con tubi per lo scambio termico. Si noti la parte finale dei tubi protetta in prossimità della testa del palo (Brandl, 2006).....	17
Figura 12 Configurazione delle tubazioni a "meandro doppio" e "a U" (Basta et al., 2008).....	17
Figura 13 Condotta fognaria con scambiatore integrato (Basta et al., 2008).....	18
Figura 14 Schema del tunnel energetico Lainzer (Vienna). Si noti l'impiego di tiranti energetici predisposti lungo la corona (Brandl, 2006).....	19
Figura 15 Rappresentazione schematica dell'attivazione energetica del sostegno della galleria della metro Linea 1 di Torino (Barla & Di Donna, 2018).....	20
Figura 16 Rappresentazione schematica dei conci prefabbricati in calcestruzzo armato equipaggiati con i tubi per lo scambio termico (Barla & Di Donna, 2018)	20
Figura 17 Rappresentazione del prolungamento Sud della Linea 1 della metropolitana di Torino, con l'ipotesi di connessione degli scambiatori termici con le pompe di calore della torre della Regione Piemonte (Barla & Perino, 2014).....	21
Figura 18 Differenti configurazioni del concio energetico ENERTUN: Ground (a), Air (b), Ground & Air (c) (Barla & Di Donna, 2018).....	22

Figura 19 Sezione trasversale della stazione U2/2 della metropolitana di Vienna. La porzione di diaframma evidenziata è quella equipaggiata con i sensori di misurazione (Brandl, 2006)	23
Figura 20 Sezione trasversale dell'Arts Centre di Bregenz con il sistema di diaframmi energetici (Brandl, 2006)	24
Figura 21 Diaframma in calcestruzzo armato gettato in opera (www.scstn.it)	25
Figura 22 Paratie in calcestruzzo armato con puntelli (www.scstn.it)	26
Figura 23 Paratie in calcestruzzo armato con tiranti in acciaio (www.scstn.it)	26
Figura 24 Elementi principali di un tirante di ancoraggio	28
Figura 25 Analisi di stabilità di un diaframma a mensola (a) con deformata (c), diagramma di taglio (d), diagramma di momento (e). Semplificando il problema (b ₁), si ottiene lo schema (b ₂). (Lancellotta & Calavera, 1999)	29
Figura 26 Analisi di stabilità di una paratia con ancoraggio in testa e sezione libera alla base (free earth support). (Lancellotta & Calavera, 1999)	30
Figura 27 Analisi di stabilità di una paratia con ancoraggio in testa e sezione di base fissa (fixed earth support). (Lancellotta & Calavera, 1999)	31
Figura 28 Fase di scavo e sistemazione della gabbia di armatura	34
Figura 29 Fase di getto del calcestruzzo	34
Figura 30 Realizzazione dello scavo mediante i mezzi movimento terra	35
Figura 31 Fase di scavo e sistemazione della gabbia di armatura	35
Figura 32 Fase di getto del calcestruzzo	36
Figura 33 Prima fase di scavo a valle del diaframma	36
Figura 34 Messa in opera ed in esercizio dei tiranti	37
Figura 35 Si esegue l'ulteriore operazione di scavo a valle del diaframma	37
Figura 36 Benna mordente per lo scavo in vista della realizzazione di un diaframma (www.scstn.it)	38
Figura 37 Impiego di un'idrofresa per la realizzazione di uno scavo	39
Figura 38 Operazioni di posizionamento di una gabbia di armatura in acciaio per diaframma. Si notino i ferri disposti diagonalmente, il cui scopo è impedire eccessive deformazioni della gabbia durante le operazioni di spostamento mediante gru (www.scstn.it)	40
Figura 39 Giunti maschiati laterali tra i moduli di diaframma (Mancinelli, 2008)	41
Figura 40 Esempio di diaframma a T (www.scstn.it)	42
Figura 41 Preparazione delle gabbie di armatura (www.scstn.it)	42
Figura 42 Rappresentazione dell'area della Cittadella Politecnica con le date di fine presunta dei lavori di ogni opera. L'area di nostro interesse è quella denominata "parcheggio interrato"	44
Figura 43 Rappresentazione tridimensionale della Cittadella Politecnica con evidenziata l'area dove sarà realizzato il parcheggio interrato (www.google.it/maps)	45
Figura 44 Sezione trasversale del parcheggio interrato.	46
Figura 45 Particolare della sezione longitudinale del parcheggio interrato	47
Figura 46 Planimetria della fase 1 del cantiere (allestimento cantiere)	50
Figura 47 Particolare della planimetria della fase 2 del cantiere (fondazioni e vasche di accumulo)	51
Figura 48 Planimetria della fase 4 del cantiere	53
Figura 49 Planimetria della fase 10 del cantiere	55
Figura 50 Ubicazione geografica del piezometro PZ_27 utilizzato per stabilire l'altezza di falda (www.arpa.piemonte.it). L'area evidenziata in rosso sarà quella di interesse per la costruzione dell'opera	57

Figura 51 Misure semestrali effettuate negli ultimi anni sul livello del piezometro PZ_27 (www.arpa.piemonte.it).....	58
Figura 52 Sezione del modulo di diaframma con armatura. (Dimensioni in cm).....	61
Figura 53 Sezione del modulo di diaframma con l'equipaggiamento per lo scambio termico. Il lato contro terra è quello inferiore. (Dimensioni in cm)	61
Figura 54 Schema della configurazione 1, a "doppio U" (dimensioni in cm).....	62
Figura 55 Schema della configurazione, a "W" (dimensioni in cm).....	63
Figura 56 Schema della configurazione 3, a "serpentina" (dimensioni in cm).....	64
Figura 57 Schematizzazione delle relazioni che intercorrono tra le componenti del problema Termo - Idro - Meccanico	70
Figura 58 Rappresentazione del modello bidimensionale utilizzato su FEFLOW (dimensioni in metri).....	78
Figura 59 Realizzazione del modello tridimensionale tramite la creazione degli "slices" e dei "layers"	79
Figura 60 Rappresentazione del modello tridimensionale ottenuto con FEFLOW	80
Figura 61 Interfaccia delle impostazioni del problema	80
Figura 62 Banca dati meteorologica dell'Arpa relativa alla stazione "Torino Giardini Reali" ..	84
Figura 63 Andamento delle temperature medie mensili dell'anno 2018.....	85
Figura 64 Interfaccia della Time series di FEFLOWLa curva in questione viene ripetuta ciclicamente nel tempo, dato che successivamente si eseguiranno delle analisi su più anni consecutivi.....	85
Figura 65 Rappresentazione delle condizioni al contorno termiche utilizzate per l'inizializzazione del modello FEFLOW	86
Figura 66 Rappresentazione delle condizioni al contorno idrauliche del modello	88
Figura 67 Inizializzazione di 10 anni del modello	89
Figura 68 Rappresentazione della distribuzione della temperatura all'interno del modello inizializzato (le dimensioni non sono in scala per quanto riguarda lo spessore del modello) ...	90
Figura 69 Modello FEFLOW con le tubazioni disposte a "doppio U" (lo spessore del modello è in una scala maggiore per far risaltare la geometria delle tubazioni).....	91
Figura 70 Modello FEFLOW con le tubazioni disposte a "W" (lo spessore del modello è in una scala maggiore per far risaltare la geometria delle tubazioni)	92
Figura 71 Modello FEFLOW con le tubazioni disposte a "serpentina" (lo spessore del modello è in una scala maggiore per far risaltare la geometria delle tubazioni).....	92
Figura 72 Particolare della disposizione delle tubazioni a "serpentina" (lo spessore del modello è in una scala maggiore per far risaltare la geometria delle tubazioni).....	93
Figura 73 Simulazione dell'attivazione invernale e confronto tra le tre configurazioni	93
Figura 74 Simulazione dell'attivazione estiva e confronto tra le tre configurazioni.....	94
Figura 75 Andamento della temperatura di input impostata sul programma FEFLOW	97
Figura 76 rappresentazione della distribuzione delle temperature nel modello dopo 5 anni di attività delle serpentine con $v = 0.4$ m/s e temperatura sul diaframma = 14 °C	97
Figura 77 Grafico delle temperature per 5 anni di attivazione delle serpentine con $v = 0,4$ m/s	98
Figura 78 Grafico delle temperature per 5 anni di attivazione delle serpentine con $v = 0,8$ m/s	99
Figura 79 Grafico della potenza a metro lineare di diaframma estratta per 5 anni di attivazione delle serpentine con $v = 0,4$ m/s.....	100

Figura 80 Grafico della potenza a metro lineare di diaframma estratta per 5 anni di attivazione delle serpentine con $v = 0,8$ m/s.....	102
Figura 81 Temperatura a diverse profondità di punti distanti 1,5 m dal diaframma nel caso di diaframma con tubazioni a “doppio U” e temperatura sul lato interno del diaframma di 14 °C	103

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 Fasi di realizzazione di un diaframma mediante l'utilizzo di benna bordente (Mancinelli, 2008).....	38
Tabella 2 Fasi di realizzazione di un diaframma mediante l'utilizzo di idrofresa (Mancinelli, 2008).....	39
Tabella 3 Classificazione dei diaframmi in base alla geometria (Botto, 1979)	41
Tabella 4 Parametri del terreno nella zona di Torino (Barla et al., 2013).....	82
Tabella 5 Parametri dell'aria (Di Donna & Barla, 2016).....	83
Tabella 6 Parametri del calcestruzzo (Di Donna & Barla, 2016).....	83
Tabella 7 Parametri relativi ai tubi utilizzati per lo scambio termico (Di Donna & Barla, 2016)	83
Tabella 8 Lunghezza delle serpentine nelle varie configurazioni	91
Tabella 9 Parametri utilizzati per il calcolo della potenza estratta.....	95
Tabella 10 Calcolo della potenza estratta nelle simulazioni a 30 giorni	95
Tabella 11 Calore estratto di picco e a regime nelle diverse configurazioni	100
Tabella 12 Valori di potenza estratta nel funzionamento invernale ed estivo nella configurazione con $v = 0,4$ m/s e temperatura interna del diaframma = 14 °C	102
Tabella 13 Picchi di temperatura massimi e minimi nei punti considerati e differenze tra la condizione inattiva e quella attiva.....	104

1 INTRODUZIONE

1.1 OBIETTIVI

Lo scopo principale che si propone questa Tesi di Laurea Magistrale è quello di valutare mediante un'analisi agli elementi finiti, la quantità di calore che si può estrarre da un'opera geotecnica superficiale, sfruttando il calore naturale presente nel terreno, cioè l'energia geotermica. La geotermia a bassa entalpia permette, grazie alla conformazione e alle caratteristiche dei terreni di avere già a basse profondità una temperatura costante, che non risente dei cicli stagionali e consente di utilizzare il sottosuolo come un "serbatoio geotermico". L'opera di cui si occuperà questo studio è un parcheggio interrato di futura realizzazione, che sarà ubicato nei pressi della sede centrale del Politecnico di Torino.

L'idea e il fondamento di questo studio è la valutazione dell'efficienza di un eventuale impianto di estrazione del calore integrata con le strutture portanti di fondazione del parcheggio.

Si considererà l'attivazione energetica dei diaframmi in calcestruzzo armato del parcheggio mediante la predisposizione di tubi al loro interno, in modo che le pareti possano ricevere o disperdere calore a seconda della stagione di utilizzo o della provenienza del fluido vettore.

Il calore scambiato con il terreno può essere impiegato per molteplici usi, ad esempio per il funzionamento delle pompe di calore, le quali mediante un ciclo di lavoro del tutto simile a quello di un sistema frigorifero, sono in grado di scambiare calore da un sistema a temperatura più bassa ad un altro a temperatura più alta e in ultima analisi, a contribuire al riscaldamento o raffrescamento di edifici ad uso civile.

La modellazione di questo tipo di problemi è utile principalmente per la possibilità di poter prevedere tramite analisi al calcolatore la risposta dei vari modelli ottenuti mediante analisi parametrica, con lo scopo finale di selezionarne il più efficiente o il più adatto al problema in questione; infatti una parte di questo studio sarà incentrata sulla ricerca della migliore configurazione delle tubazioni contenute all'interno delle strutture portanti del parcheggio. Questo tipo di analisi risulta molto utile in un campo che negli ultimi anni si sta sviluppando

velocemente, come quello dello sfruttamento della risorsa geotermica, che ha l'importante vantaggio di essere una fonte di energia pulita e rinnovabile.

1.2 STRUTTURA DELLA TESI

La tesi avrà una struttura suddivisa tra i seguenti macroargomenti:

- Introduzione
- Geotermia e geostrutture energetiche
- Realizzazione dei diaframmi in calcestruzzo armato
- Caso di studio
- Modello numerico
- Simulazione numerica dei diaframmi
- Conclusioni

Il primo capitolo dà una visione globale degli obiettivi e di come è strutturata questa tesi.

Il secondo capitolo verte sulla presentazione e spiegazione della geotermia in generale, dando uno sguardo alla sua storia, alle sue applicazioni moderne e alle tecnologie che fanno in modo che essa possa essere sfruttata; si parla della differenza tra la geotermia propriamente detta e la geotermia a bassa entalpia o geotermia superficiale, che risulta essere la parte di interesse di questo studio.

Il terzo capitolo è anch'esso bibliografico ed è incentrato sulle tecnologie, i metodi di calcolo e le lavorazioni utilizzati per realizzare i diaframmi in calcestruzzo armato, un tipo di opera geotecnica molto importante per quanto riguarda sia gli scavi provvisori che la creazione di spazi sotterranei o il contenimento di pendii definitivi.

Il quarto capitolo riguarda più specificatamente il caso studio trattato da questa tesi, ovvero il parcheggio interrato di futura realizzazione nell'ambito territoriale del Politecnico di Torino. Qui viene descritto il progetto globale, cioè il Masterplan di Ateneo, all'interno del quale la realizzazione del parcheggio interrato è prevista, la descrizione dell'opera e della sua attivazione energetica, le caratteristiche del sottosuolo di Torino e alcune linee guida per l'installazione degli impianti.

Il quinto capitolo riguarda il modello numerico del diaframma e del terreno circostante realizzato con il programma agli elementi finiti FEFlow, che servirà per risolvere numericamente il problema termo – idraulico accoppiato al fine di calcolare la potenza termica estraibile.

Il sesto capitolo si concentra sulle simulazioni numeriche eseguite sul modello agli elementi finiti predisposto nel capitolo precedente e descrive i risultati ottenuti dalle analisi al calcolatore.

Il settimo capitolo chiude la tesi mostrando e descrivendo i principali risultati ottenuti nei punti precedenti

2 GEOTERMIA E GEOSTRUTTURE ENERGETICHE

2.1 CENNI STORICI

L'energia geotermica, intesa come calore naturale della terra, viene sfruttata sotto forma di terme fin dai tempi più antichi. L'uomo, infatti, si accorse ben presto che esistevano punti particolari sulla superficie terrestre dai quali si poteva apprezzare e utilizzare parte del calore prodotto dal pianeta in profondità: vulcani, sorgenti termali, fumarole e geysir sono, infatti, punti nei quali è più evidente la presenza di calore all'interno del nostro pianeta.

Tra i primi sfruttamenti dell'energia geotermica, si annoverano i centri termali in Cina nel III secolo a.C.; dal II secolo a.C. anche gli antichi romani utilizzarono questa risorsa costruendo terme e bagni ad uso pubblico.

Le prime misure mediante l'utilizzo di termometri furono eseguite nel 1740 da M. De Gensanne in una miniera vicino a Belfort in Francia (Buffon, 1778).

Il primo sfruttamento industriale è iniziato nel 1827 in Italia da parte di Francesco Giacomo De Larderel, il quale utilizzò il vapore di un geysir per estrarre l'acido borico da un vulcano di fango, presso i soffioni boraciferi di Larderello, chiamati così in suo onore, per ottenere boro a scopi chimici e farmaceutici.

Nel 1892, il primo sistema di teleriscaldamento statunitense a Boise, nello Stato dell'Idaho, fu alimentato direttamente da energia geotermica e in seguito un profondo pozzo geotermico è stato usato per riscaldare le serre, come anche in Islanda e in Toscana nello stesso periodo.

Il vapore e l'acqua calda dal geysir iniziarono ad essere utilizzati per il riscaldamento domestico in Islanda a partire dal 1943.

Nel XX secolo, si iniziò a considerare la geotermia come fonte di generazione di energia elettrica, in quanto ne era aumentata di molto la richiesta. Il principe Piero Ginori Conti, erede della ditta di De Larderel, sperimentò il primo generatore geotermico il 4 luglio 1904, presso lo stesso campo di Larderello dove era iniziata l'estrazione degli acidi borici. Conti accese cinque lampadine grazie ad una dinamo azionata da un motore alternato utilizzando il vapore.

Più tardi, nel 1911, il primo impianto geotermico commerciale del mondo è stato costruito nei pressi di Larderello. Questo sistema migliorerà fino ad arrivare, nel 1916, alla distribuzione di energia elettrica in tutta la zona circostante.

Anche all'estero lo sfruttamento della risorsa geotermica si è sviluppato in misura importante: un esempio è la centrale "The Geysers", a Nord di San Francisco in California (USA), che con i suoi 800 MW detiene il primato mondiale per potenza totale; l'Islanda è uno stato che sfrutta molto il suo "patrimonio" geotermico ad alta entalpia, producendo corrente o utilizzando il calore per il riscaldamento.

2.2 GEOTERMIA

Con Energia Geotermica o Geotermia (dal Greco antico "geo", terra, e "thermos", calore) si indica, nella sua definizione più generale, il calore naturale della Terra. In senso stretto, essa è associata a quella parte di calore terrestre che può essere estratta e utilizzata dall'uomo.

L'energia geotermica proviene principalmente e continuamente dal decadimento nucleare naturale degli isotopi radioattivi a lunga vita contenuti all'interno della Terra, come l'uranio (U238, U235), il torio (Th 232) e il potassio (K40), e in misura minore da energia solare assorbita in superficie e da calore primordiale della Terra (Lubimova, 1968). Il bilancio energetico del nostro pianeta, dimostrato negli anni '80, asserisce comunque che non vi sia equilibrio tra il calore prodotto dal decadimento nucleare e quello disperso dalla superficie verso lo spazio e che la Terra si stia lentamente raffreddando.

La radioattività naturale delle componenti contenute all'interno del pianeta Terra e i vari processi fisici che avvengono all'interno di essa sono le cause principali dell'energia geotermica. Il flusso di calore che arriva sulla superficie terrestre viene detto flusso geotermico e la sua unità di misura è l'heat flow unit [hfu]:

$$1 \text{ hfu} = 42 \frac{\text{mW}}{\text{m}^2}$$

Si stima che il flusso termico terrestre sia $1,5 \text{ hfu} = 63 \text{ mW/m}^2$ nelle aree continentali e 101 mW/m^2 nelle aree oceaniche, con una media di 87 mW/m^2 (Pollock et al., 1993). Per confronto l'irraggiamento solare medio alle latitudini europee è di circa 200 W/m^2 .

Riferendoci al flusso di calore relativo all'intera superficie dovuto a conduzione, convezione e irraggiamento, esso è valutato in $42 \times 10^{12} \text{ W}$ (Stacey & Loper, 1988). Di questa grandezza, $8 \times 10^{12} \text{ W}$ provengono dalla crosta terrestre, che rappresenta soltanto il 2% del volume totale della Terra, ma è ricca di isotopi radioattivi, $32,3 \times 10^{12} \text{ W}$ derivano dal mantello, che è l'82% del

volume totale della Terra, e $1,7 \times 10^{12}$ W provengono dal nucleo, che costituisce il 16% del volume totale del pianeta e non contiene isotopi radioattivi. In Figura 1 si può vedere una schematizzazione degli strati interni del pianeta Terra.

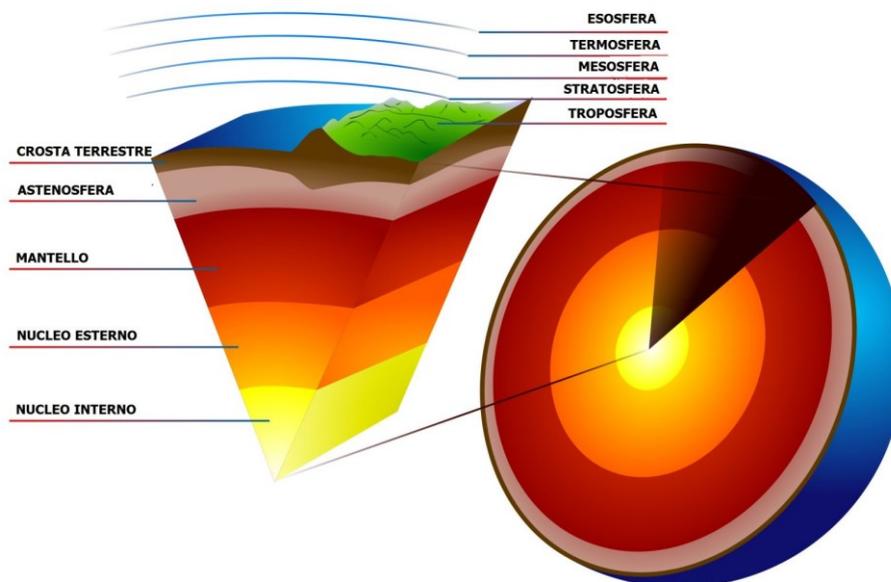


Figura 1 Rappresentazione schematica degli strati interni della Terra

In generale la potenza è sensibilmente maggiore vicino ai limiti delle fratture tettoniche dove la crosta terrestre è meno spessa.

Il suolo è un mezzo multifase che coinvolge molteplici meccanismi di scambio termico (Brandl, 2006):

- conduzione (senza trasporto di materia);
- convezione (con trasporto di materia);
- irraggiamento (quantità di calore trascurabile);
- processi di vaporizzazione e condensazione;
- scambio di ioni;
- processi di gelo e disgelo.

Il calore si diffonde principalmente mediante conduzione, secondariamente con fenomeni di convezione e in misura minore mediante gli altri processi.

Il trasferimento di calore per convezione si attiva solo se una fase del terreno si muove rispetto all'altra, quindi quando siamo in presenza di flussi delle falde acquifere (o anche di gas) (Brandl, 2006), infatti la circolazione di acqua in profondità può aumentare ulteriormente la potenza termica per unità di superficie.

La temperatura, aumentando dall'esterno verso l'interno del pianeta, genera un gradiente di circa 25-30°C per ogni Km. Questi valori si riferiscono a una media: infatti in aree nelle quali il basamento rigido sprofonda e si forma un bacino che si riempie velocemente di sedimenti geologicamente giovani, il gradiente geotermico può essere anche inferiore di 1 °C ogni 100 m;

in altre aree la presenza di faglie, vulcani o altri “punti caldi”, fanno sì che il gradiente possa raggiungere anche valori superiori a dieci volte il valore medio.

Considerando solamente l’energia dovuta all’attività interna del nostro pianeta, si nota come la quota maggiore di energia termica sia generata e conservata nel nucleo, nel mantello e nella crosta terrestre. Alla base della crosta continentale, si suppone che le temperature varino tra i 200 e i 1000 °C; al centro della Terra esse si stima siano nell’intervallo di 3500-4000°C.

Uno studio del MIT (Massachusetts Institute of Technology) valuta la quantità totale di calore contenuto nel nostro pianeta, assumendo una temperatura superficiale media di 15 °C, in $12,6 \times 10^{24}$ MJ mentre quello nella crosta terrestre è stimato in $5,4 \times 10^{21}$ MJ (Armstead, 1983): un valore enorme, se confrontato con la quantità di energia elettrica prodotta a livello mondiale nel 2015, ovvero circa $8,7 \times 10^{13}$ MJ (BP statistical review of world energy, 2016).

L’applicazione della geotermia, intesa come lo sfruttamento del calore naturale del suolo, è stata però limitata, in passato, a zone prossime a bordi di placche tettoniche o in aree vicine ai cosiddetti “hot spots” (punti caldi). Lo sfruttamento della geotermia mediante la realizzazione di grosse centrali si può suddividere in tre principali tipi di impianti, gli impianti a vapore dominante, quelli ad acqua dominante e quelli a ciclo binario.

2.2.1 Impianti a vapore dominante

Gli impianti di questo tipo sfruttano la pressione naturale del vapore contenuto all’interno degli acquiferi sotterranei (che può avere temperature di 200 - 300 °C) al fine di azionare il movimento di una turbina collegata ad un generatore. La pressione naturale del vapore all’interno degli acquiferi può creare getti che raggiungono altezze comprese tra i 20 e i 70 metri; questa tecnologia sfrutta l’energia naturale di questi getti per generare, in ultima analisi, energia elettrica.

Gli impianti che utilizzano tale tipo di sfruttamento dell’energia geotermica sono le già citate centrale di Larderello, in Toscana, e “The Geysers” a San Francisco (USA), oltre che la maggior parte delle centrali islandesi (Basta et al., 2008).

2.2.2 Impianti ad acqua dominante

In questo tipo di sfruttamento, l’acquifero produce acqua calda anziché vapore surriscaldato. Questo è possibile perché l’acqua, ad una temperatura compresa tra 200 e 350 °C, viene mantenuta allo stato liquido dalla alta pressione presente nell’acquifero. Quando l’acqua arriva in superficie, perde la pressione iniziale e genera una quota di vapore, utilizzata direttamente in centrale per la produzione di energia elettrica, e una quota di liquido che viene reiniettato in profondità per andare a far parte dei cicli successivi.

Le centrali elettriche che sfruttano questo tipo di acquifero sono dette “a flash” o “a separazione”. Due esempi di campi geotermici ad acqua dominante sono quelli di Travale, e dell’Amiata (entrambi in Toscana) (Basta et al., 2008).

2.2.3 Impianto a ciclo binario

Gli impianti a ciclo binario utilizzano acqua a temperature più basse rispetto al sistema descritto in precedenza, in generale con temperature comprese tra i 110 e i 200 °C. L'acqua a queste temperature viene utilizzata per scaldare un fluido secondario con temperatura di evaporazione inferiore ai 100 °C attraverso uno scambiatore di calore. Il fluido secondario si espande in turbina e ritorna allo scambiatore restando sempre all'interno del proprio circuito chiuso. (Basta et al., 2008).

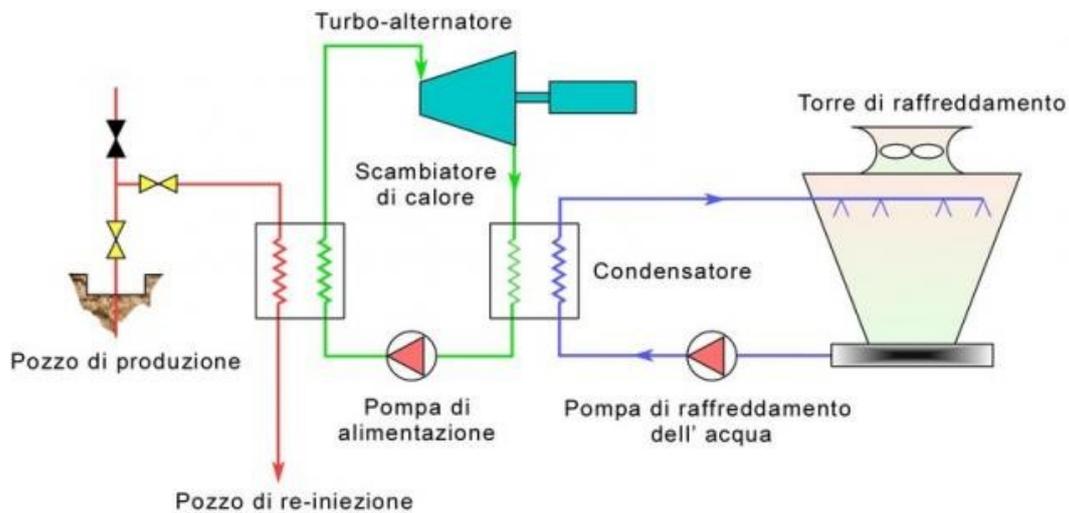


Figura 2 Impianto geotermico a ciclo binario. Si notino i circuiti del fluido dell'acquifero (in rosso) e del fluido secondario (in verde). (www.cosvig.it)

Oggi la geotermia si è progressivamente caratterizzata da nuovi sviluppi tecnologici, che hanno permesso di ampliare enormemente le potenzialità di utilizzo, in alcuni casi in modo indipendente dal territorio geografico, soprattutto per sistemi di riscaldamento degli edifici, come ad esempio accade per le pompe di calore geotermiche. Circa 10 GW di produzione elettrica attraverso geotermia sono installati nel mondo dal 2007 e sono stimati altri 28 GW di riscaldamento geotermico diretto (teleriscaldamento, singoli edifici, terme, processi industriali, agricoltura) (Fridleifsson et al., 2009).

2.3 GEOTERMIA SUPERFICIALE

Un sistema che ultimamente si sta diffondendo per lo sfruttamento dell'energia dovuta alla differenza di temperatura tra fluido vettore e sottosuolo, è la geotermia superficiale o geotermia a bassa entalpia.

Essa, a differenza dello sfruttamento classico dell'energia geotermica, che necessita di luoghi che abbiano anomalie termiche di notevole entità (temperature maggiori di 100 °C), è applicabile in qualunque luogo della crosta terrestre, ossia sfrutta quella naturale temperatura che si mantiene costante lungo l'anno a circa 12 - 15 °C a partire dai 10 m fino ai 100 m di profondità nel suolo. Nei paesi dell'Europa del nord la geotermia superficiale è già sviluppata e utilizzata, mentre nei paesi mediterranei, questa tecnologia sta iniziando a vedere una certa diffusione da pochi anni a questa parte.

Il principio consiste nel ricercare e sfruttare con sonde o pozzi e mediante diversi tipi di tecnologie, il salto termico che si può ricavare dalla temperatura naturale del terreno. Il sistema che si utilizza per ricavare o cedere calore al terreno è la pompa di calore. La pompa di calore è una macchina termica che ha il compito letteralmente di “pompare” il calore da un livello termico più basso ad uno più alto; questo passaggio non può avvenire in maniera spontanea in natura, perché verrebbe violato il secondo principio della termodinamica, ma avverrà mediante la somministrazione di energia elettrica al sistema.

Il funzionamento diretto della pompa di calore consente di ottenere il riscaldamento degli edifici nel periodo invernale, mentre se si inverte il ciclo della pompa di calore si possono raffrescare gli edifici d'estate. Nel caso estivo si assorbe il calore dalla superficie degli elementi scambianti nell'edificio e lo si trasferisce al sottosuolo. Viceversa, nel periodo invernale, si utilizza il salto termico ricavando calore dal sottosuolo e trasferendolo all'edificio. Il vantaggio della pompa di calore nell'utilizzo sia invernale che estivo impedisce un raffreddamento della porzione di terreno interessata dal posizionamento degli scambiatori. L'energia termica, che viene ricavata dal sistema geotermico a bassa entalpia, è impiegata maggiormente per l'acqua calda sanitaria e per il riscaldamento degli edifici.

In relazione al riscaldamento degli edifici, si possono percorrere due strade: ricercare alte temperature con pochi sondaggi profondi, oppure eseguire molti piccoli pozzi per aumentare la portata di fluido circolante. Infatti, la potenza termica ceduta da un fluido è valutata dalla seguente relazione:

$$P = C_p \cdot Q \cdot \Delta T$$

dove:

P = potenza termica scambiata [kcal/h];

C_p = calore specifico del fluido [kcal/(°C*l)];

Q = portata [l/h]

ΔT = variazione di temperatura [°C].

Come si può vedere, per aumentare la potenza termica, l'unico elemento su cui si può agire è la portata del fluido.

Tralasciando luoghi con temperature particolarmente elevate (anomalie termiche), non conviene realizzare impianti a profondità eccessive sia perché il percorso in risalita vanificherebbe parte del calore recuperato, sia perché, nel periodo estivo estrarre un fluido a temperatura elevata non risulta conveniente dal punto di vista dell'efficienza del sistema.

Dunque, la soluzione più adottata, risulta essere quella di un impianto non troppo profondo, capace di creare una piccola differenza di temperatura e avente portate elevate. (Tinti, 2008)

2.3.1 Il profilo di temperatura nel terreno

La stabilità della temperatura del sottosuolo da una certa profondità in poi è la caratteristica principale che consente alle sonde geotermiche di cedere calore in estate e assorbirne durante l'inverno. Generalmente, una volta scesi fino a 10 m di profondità si trova la cosiddetta "neutral zone", ovvero quella zona non influenzata dalle variazioni stagionali della temperatura esterna. La temperatura del suolo indisturbato, cioè non ancora soggetto all'attivazione delle sonde o delle strutture di scambio termico, è pari, in prima approssimazione, alla media annua della temperatura dell'aria esterna, che è la stessa dell'acqua di falda non termale (Basta et al., 2008). La temperatura del terreno indisturbato alle varie profondità si valuta con la seguente formula:

$$T = T_m + A_s \cdot e^{-\beta z} \cdot \text{sen}(\omega t - \beta z)$$

dove:

T_m : temperatura media del terreno, [$^{\circ}\text{C}$];

A_s : semi ampiezza della variazione annua della temperatura superficiale, [$^{\circ}\text{C}$];

z : profondità, [m];

t : tempo, [g];

β : smorzamento, [$\frac{1}{\text{m}^2}$];

$\beta = \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}$, dove ω è la pulsazione in [$\frac{\text{rad}}{g}$] e α è la diffusività termica in [$\frac{\text{m}^2}{g}$];

L'andamento della temperatura nel sottosuolo valutata in diversi momenti è quello mostrato in Figura 3:

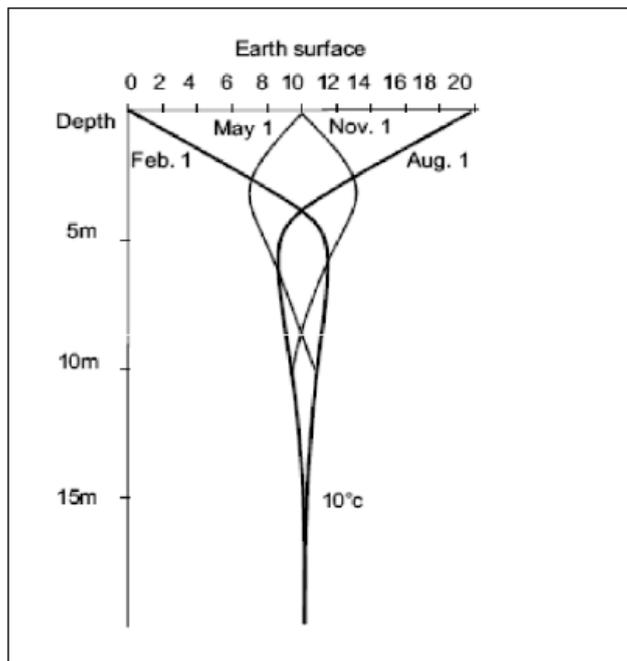


Figura 3 Esempio di andamento della temperatura nel terreno

2.4 SISTEMI DI SCAMBIO TERMICO

2.4.1 Sistemi a circuito chiuso o closed – loop

Il sistema consiste nel far circolare un fluido composto da acqua e antigelo, a temperatura minore o maggiore rispetto al terreno, in sonde geotermiche costituite da tubi di mandata e ritorno preventivamente installati, in modo da essere successivamente estratto a temperatura più alta o più bassa rispetto a quella di partenza; parte di questo calore estratto (o ceduto) potrà essere utilizzato in diversi modi: un esempio può essere l'impiego di una pompa di calore per il riscaldamento o il raffreddamento di edifici di civile abitazione.

La caratteristica principale di questi sistemi è quella di avere il circuito dove scorre il fluido termovettore separato dalla falda acquifera naturale del terreno. Questo comporta il solo scambio termico e non altera l'equilibrio naturale del terreno e della falda.

Senza dubbio le sonde geotermiche rappresentano la parte principale di un sistema per lo sfruttamento dell'energia geotermica. Esse sono solitamente costituite da tubi in polietilene ad alta densità variamente disposti. Si potranno avere sonde geotermiche verticali e orizzontali a seconda della disposizione dei tubi all'interno del terreno.

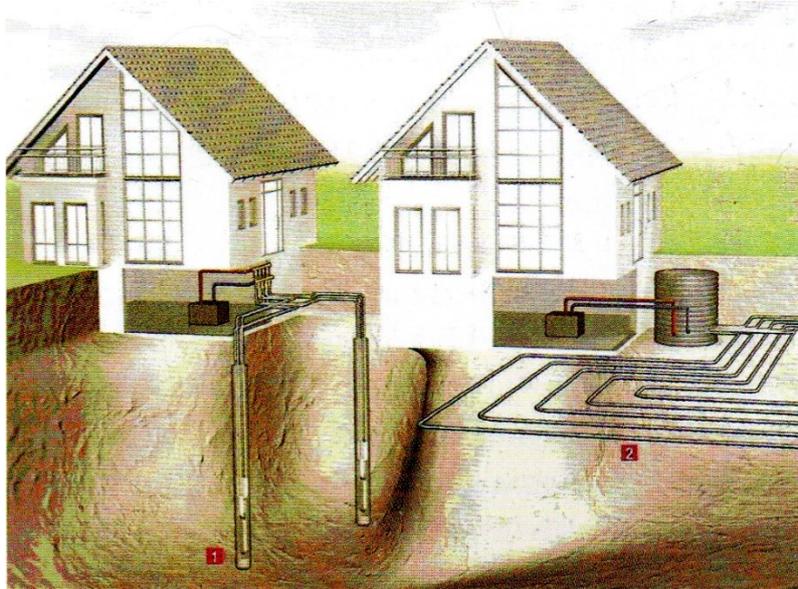


Figura 4 Schema di disposizione delle sonde geotermiche verticali (1) e orizzontali (2) nel sistema closed-loop (Tinti, 2008)

Le sonde geotermiche verticali sono composte da tubi disposti verticalmente all'interno di pozzi appositamente scavati nel terreno. Le profondità massima raggiungibile e la disposizione delle sonde variano a seconda di diversi fattori, come ad esempio il tipo di suolo o le normative in materia di sfruttamento della risorsa geotermica vigenti nel luogo di installazione.

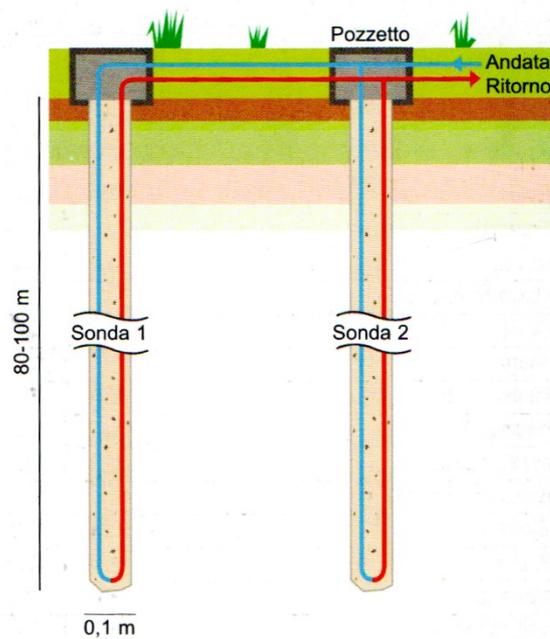


Figura 5 Sonde geotermiche verticali collegate in parallelo (Tinti, 2008)

I tipi di scambiatori esistenti per le sonde verticali sono principalmente due:

- a U (a singolo U e doppio U)
- scambiatori coassiali (tubi coassiali semplici o complessi)

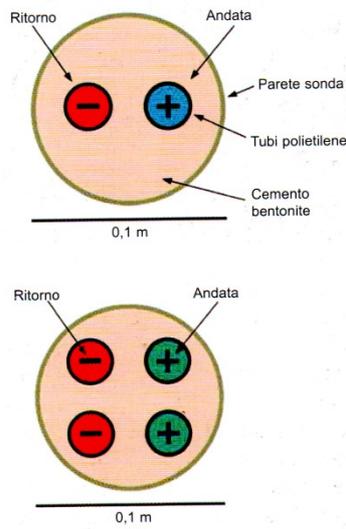


Figura 6 Disposizioni dei tubi a "singolo U" e "doppio U" in sezione (Tinti,2008)

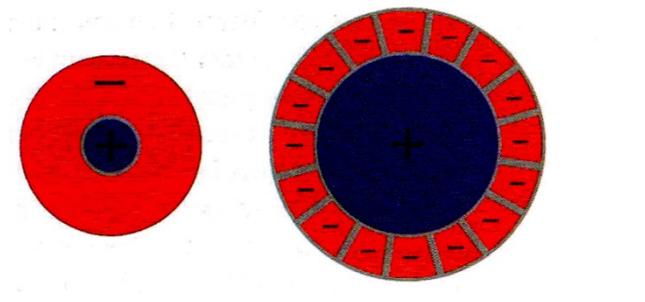


Figura 7 Disposizione degli scambiatori a "tubi coassiali semplici" e a "tubi coassiali complessi" in sezione (Tinti, 2008)

Le sonde geotermiche orizzontali sono solitamente disposte a profondità che non superano i 2,5 m. A questa profondità si risente ancora della variazione di temperatura stagionale. Il funzionamento di questo tipo di sonde si basa sui flussi termici derivanti dalla radiazione solare e dallo scambio termico convettivo con l'aria, essendo l'impianto stesso prossimo alla superficie. Il contributo dovuto al flusso geotermico è, con questo sistema, pressoché trascurabile.

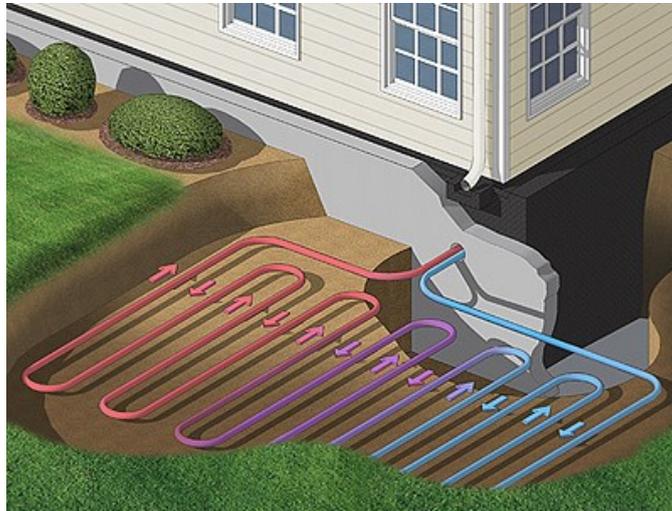


Figura 8 Disposizione delle sonde geotermiche orizzontali (www.greenel.it)

2.4.2 Sistemi a circuito aperto o open – loop

I sistemi di scambio termico con il sottosuolo possono essere realizzati anche sfruttando direttamente l'acqua presente all'interno della falda acquifera, naturalmente presente nel terreno. A differenza dei sistemi closed-loop, questa tecnologia non è ovunque disponibile, in quanto la presenza di una falda a profondità ragionevoli non sempre è scontata; inoltre tale sistema è sottoposto a norme più o meno stringenti in base al luogo in cui si sta operando.

Alcuni paesi dell'Europa del Nord, quali Olanda e Germania, hanno già da tempo sperimentato i sistemi a circuito aperto, anche in virtù del fatto che la presenza di acqua sotterranea è maggiormente rilevante.

Il primo sistema di climatizzazione di un edificio con pompa di calore e sfruttamento di acque sotterranee si è effettuato negli anni '40. Dagli anni '80 in poi, a questa tecnologia si sono affiancate le sonde geotermiche orizzontali e verticali dei sistemi chiusi.

I sistemi a circuito aperto utilizzano pozzi scavati nel terreno per l'emungimento e la successiva reiniezione in falda. Nello specifico si possono avere tre impostazioni diverse:

- Estrazione tramite un pozzo e re-immissione in un altro (sistema a due pozzi);
- Estrazione tramite un unico pozzo e scarico dell'acqua in superficie;
- Estrazione e re-immissione tramite lo stesso pozzo.

Un indubbio vantaggio dei sistemi a circuito aperto è l'economicità della realizzazione; Occorre, però, anche considerare i costi per il funzionamento degli impianti di pompaggio, che incidono negativamente sulla gestione ordinaria del sistema.

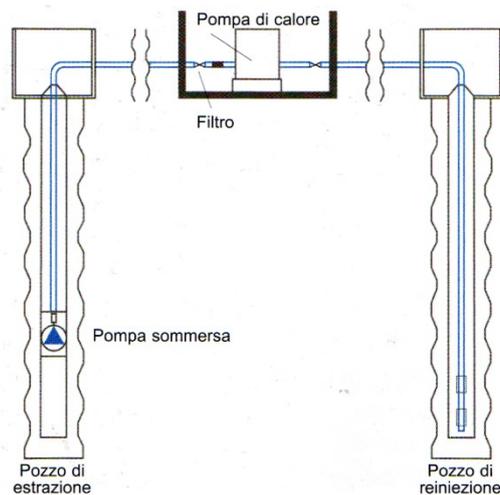


Figura 9 Sistema open-loop a due pozzi (Tinti, 2008)

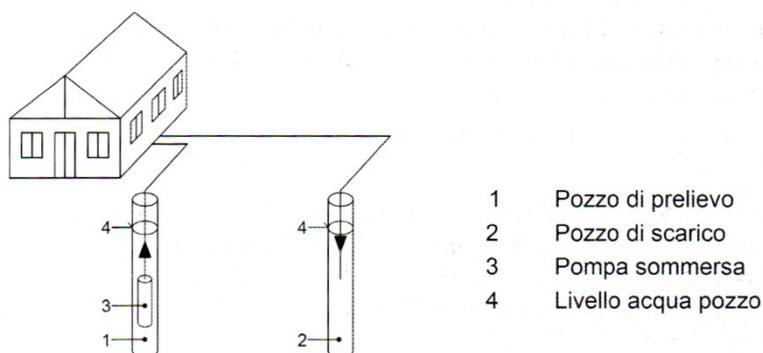


Figura 10 Parti che compongono il sistema open-loop a due pozzi (Basta et al., 2008)

2.4.3 Il fluido termovettore

Il compito principale del fluido termovettore è lo scambio di calore tra il circuito delle sonde geotermiche e il terreno all'interno del quale esse sono disposte e di conseguenza anche tra il circuito delle sonde e la pompa di calore utilizzata per il riscaldamento o raffreddamento dei locali cui l'impianto è dedicato.

I fluidi più utilizzati per lo scambio termico all'interno di un sistema geotermico sono rappresentati da soluzioni di:

- glicole etilenico: la formula bruta è $C_2H_6O_2$, è un liquido incolore, dal sapore dolciastro, inodore, igroscopico, dotato di bassa volatilità e bassa viscosità, miscibile in acqua in tutte le proporzioni e in molte sostanze organiche come metanolo, fenolo e acetone. Il suo uso più noto è quello di antigelo infatti una miscela costituita dal 60% di glicole etilenico e dal 40% di acqua cristallizza alla temperatura di circa $-45^\circ C$. Il glicole etilenico è nocivo per ingestione e può provocare danni alla salute per esposizione prolungata.

- glicole propilenico: la formula bruta è $C_3H_8O_2$, è un liquido inodore e incolore, chiaro e viscoso dal sapore dolciastro, altamente igroscopico e miscibile con acqua, acetone, e cloroformio. Ha molte applicazioni, tra le quali l'uso come solvente per preparati farmaceutici, come additivo alimentare, per la produzione di poliesteri e come liquido decongelante e di raffreddamento.
- cloruro di calcio: la formula chimica è $CaCl_2$, è strutturalmente simile al sale da cucina e a temperatura ambiente si presenta come una polvere bianca altamente solubile in acqua. L'impiego maggiore che si fa di questa sostanza è quella di liquido anticongelante in soluzione acquosa, come conservante alimentare e come sale per prevenire il congelamento delle acque sulle reti stradali.

Le concentrazioni delle soluzioni sono differenti a seconda delle temperature minime previste durante il funzionamento dell'impianto; essi devono avere un basso punto di solidificazione (per evitare problemi di congelamento nelle stagioni più fredde), una bassa viscosità, un'elevata conducibilità termica e una ridotta tossicità. In generale, aumentando la concentrazione di antigelo, diminuisce la temperatura di solidificazione ma aumenta la viscosità e conseguentemente il costo energetico di circolazione del fluido. Per gli usi all'interno delle sonde geotermiche poste alle nostre latitudini, basta una temperatura di congelamento non inferiore ai $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Uno dei fluidi termovettori più utilizzati è il glicole etilenico. Esso è un fluido poco costoso, di media viscosità e con una buona conducibilità termica, ma la sua forte tossicità lo rende pericoloso nell'ipotesi di un suo sversamento in falda o di una fuoriuscita dal circuito delle sonde. Per questo motivo, talvolta si ricorre al glicole propilenico 1,2 propandiolo, che è atossico (è utilizzato anche nell'industria alimentare e farmaceutica), ma ha un costo maggiore ed è più viscoso. La degradazione in falda del glicole etilenico e propilenico è rapida, tuttavia la presenza di additivi anticorrosione e antimuffa può inibirla fortemente.

Le soluzioni di cloruro di calcio, a parità di temperatura di solidificazione, hanno valori di viscosità molto inferiori rispetto a quelle dei glicoli e costi molto inferiori. Esse presentano tuttavia lo svantaggio di essere corrosive e richiedono, pertanto, che le componenti dell'impianto siano appositamente progettate.

L'utilizzo di acqua pura richiede un sovradimensionamento dell'impianto, per mantenere la temperatura del fluido ad un sufficiente margine di sicurezza rispetto alla temperatura di solidificazione (0°C): in genere non si utilizza acqua pura a meno di particolari condizioni.

2.5 GEOSTRUTTURE ENERGETICHE

La geotermia, ed in particolare la geotermia a bassa entalpia, come precedentemente visto, necessita di sistemi, detti anche sonde, che hanno la funzione di scambiare calore tra il fluido circolante all'interno dei tubi dell'impianto e il terreno posto a contatto ad essi.

I sistemi già accennati, come le sonde geotermiche verticali e orizzontali, presuppongono la realizzazione di scavi e trivellazioni, impiegando lavoro e risorse economiche per la realizzazione di questi sistemi che hanno il solo scopo dello sfruttamento dell'energia geotermica.

Con il tempo si è pensato di accoppiare la funzione strutturale degli elementi geotecnici (fondazioni, diaframmi, pali...) delle opere civili con la funzione energetica, iniziando a sperimentare le cosiddette geostrutture energetiche. Negli ultimi decenni questa soluzione ha cominciato a diffondersi: Dall'inizio degli anni '80, l'energia geotermica da strutture geotecniche è stata prodotta in quantità sempre più importanti in Austria e Svizzera dapprima mediante fondazioni superficiali come le piastre, poi sfruttando i pali di fondazione (1984) e infine utilizzando i diaframmi (1996) (Brandl, 2006).

L'utilizzo delle strutture sotterranee come fonti di energia geotermica è iniziato una trentina di anni fa in Austria e si è poi esteso ad altri paesi europei: Svizzera, Germania, Gran Bretagna, Francia, Russia. In linea di principio, qualsiasi struttura sotterranea (pali e platee di fondazione, diaframmi, rivestimenti delle gallerie, tiranti) può essere attrezzata in modo da diventare uno scambiatore di calore (Brandl 2006, Adam & Markiewicz 2009).

Una definizione più rigorosa di geostrutture energetiche è quella di opere geotecnico-strutturali capaci di coniugare in un unico elemento la duplice finalità di stabilità strutturale e di scambio di calore con il terreno circostante (Barla et al., 2016).

Le fondazioni energetiche, o geostrutture energetiche, sono innanzitutto delle strutture portanti, il cui scopo fondamentale è la resistenza strutturale e la stabilità propria del manufatto e degli oggetti interagenti con esso (come ad esempio il terreno sostenuto dall'opera stessa). A questa funzione si aggiunge la funzione energetica, ovvero la capacità di scambiare calore con il terreno posto a contatto con tali strutture e successivamente poter trasferire tale calore al fluido circolante nei tubi appositamente predisposti all'interno della geostruttura. Viene dunque a delinearsi la duplice funzionalità di questi manufatti che, a seconda dell'utilizzo finale, delle caratteristiche dell'opera e di altre variabili in gioco, possono essere costituiti da elementi realizzati in opera, come ad esempio i diaframmi in calcestruzzo armato, oppure da elementi prefabbricati, tra i quali possiamo annoverare i conci impiegati per il rivestimento finale delle gallerie. Il sistema di tubi deputato allo scambio di calore con il terreno e dunque installati all'interno di queste strutture viene detto "circuito primario", mentre il circuito direttamente collegato con gli edifici, che servirà per il riscaldamento o raffrescamento degli stessi, viene chiamato "circuito secondario". Questi due circuiti, indipendenti tra loro, saranno collegati dal punto di vista termico con il circuito di una pompa di calore, che permetterà lo scambio termico tra i fluidi a differente temperatura. (Brandl, 2006).

Il vantaggio economico finale, che è quello proprio di tutte le geostrutture energetiche, è accoppiare un elemento strutturale ad un elemento termicamente attivo e ricavarne un beneficio energetico.

2.5.1 Pali energetici

Nell'ambito delle fondazioni profonde delle strutture civili, i pali costituiscono un'importante soluzione per ovviare ai cedimenti delle strutture e alla presenza di terreni con scarse qualità meccaniche.

Essi vengono progettati, eventualmente testati e realizzati quando ci si trova in presenza di un terreno poco portante e si vogliono distribuire le tensioni trasmesse dal carico gravitazionale dell'edificio su una superficie più ampia possibile (l'area laterale del palo), oppure quando il terreno più superficiale ha portanza nulla e si tenta di raggiungere lo strato profondo (avente caratteristiche meccaniche migliori) con la parte terminale dei pali.

L'idea di rendere "energetiche" queste strutture geotecniche risale ai primi anni '80, e la realizzazione consiste nel posizionare la tubatura in polietilene (o polietilene reticolato) all'interno del palo insieme all'armatura di acciaio e infine gettare il calcestruzzo. Queste fondazioni così equipaggiate, vengono dette "pali energetici" o "pali freddi" (Basta et al., 2008). La realizzazione di queste strutture ha raggiunto le 100000 unità nel 2013 e si calcola che sta crescendo di anno in anno (Brandl, 2016).

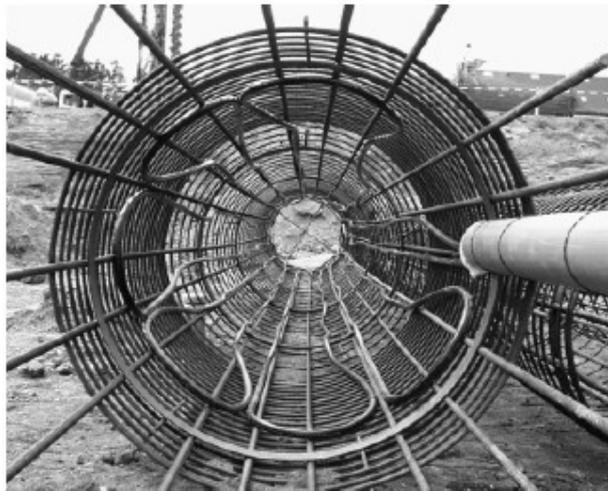


Figura 11 Gabbia di armatura per palo energetico equipaggiato con tubi per lo scambio termico. Si noti la parte finale dei tubi protetta in prossimità della testa del palo (Brandl, 2006)

La disposizione delle tubazioni all'interno del palo può essere a "meandro doppio" o "ad U".

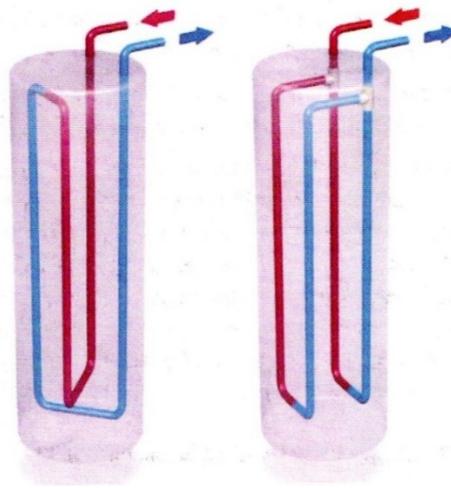


Figura 12 Configurazione delle tubazioni a "meandro doppio" e "a U" (Basta et al., 2008)

Inizialmente utilizzati per edifici di piccola entità, come abitazioni monofamiliari e piccoli condomini, questa tecnologia viene oggi impiegata per grandi edifici pubblici e centri commerciali, perché il dimensionamento risulta essere piuttosto complicato.

Il principio di funzionamento del fluido termovettore è del tutto simile alle sonde geotermiche a circuito chiuso viste in precedenza. Le pressioni in gioco sono in generale inferiori rispetto alle sonde geotermiche verticali e si attestano nell'intervallo dei 3-6 bar (Basta et al., 2008).

Tinti (2008) fa notare che la progettazione di un palo energetico deve tenere in conto delle sollecitazioni termiche, che potrebbero indurre un deterioramento della struttura. In particolare, si deve evitare il congelamento del fluido termovettore all'interno delle tubazioni. Inoltre, alcuni studi mostrano che un palo energetico subisce deformazioni superiori rispetto ad un palo ordinario, perciò il controllo delle deformazioni indotte dal salto termico risulta piuttosto importante.

Un punto a sfavore della tecnologia dei pali energetici è l'efficienza nel periodo estivo (quando il fluido cede calore al terreno) che risulta inferiore rispetto a quella del periodo invernale. Questo accade perché il terreno riceve calore dall'edificio esterno e se si cercasse di estrarre la medesima potenza in estate, come in inverno, si tenderebbe a scaldare troppo il terreno nel periodo estivo, compromettendone anche l'efficienza in periodo invernale (Tinti, 2008).

2.5.2 Fognature energetiche

Una recente frontiera nello sfruttamento del calore nel sottosuolo risiede nei tentativi di scambiare calore con le acque reflue degli ambienti urbani.

Le acque reflue si differenziano in quattro tipi:

- Acque nere: che contengono anche elementi solidi organici;
- Acque bianche: derivanti dalla raccolta delle acque meteoriche;
- Acque grigie: costituite da acque miste a prodotti detergenti provenienti da scarichi civili;
- Acque industriali: inquinate da prodotti dell'industria e destinate ad uno smaltimento in reti specifiche.

Le acque reflue rappresentano una fonte di calore non trascurabile, in quanto possono raggiungere i 15 °C d'inverno e i 20 °C d'estate (Basta et al., 2008).

Un esempio dell'applicazione di questa tecnologia si è avuto a Oslo, ricavando circa 20 MW termici, sufficienti per 9000 abitazioni (Basta et al., 2008).

Uno svantaggio è rappresentato dal fatto che si può installare questa tecnologia solamente su tratti di fognatura di nuova realizzazione. Una sezione tipica può essere quella rappresentata in Figura 13.

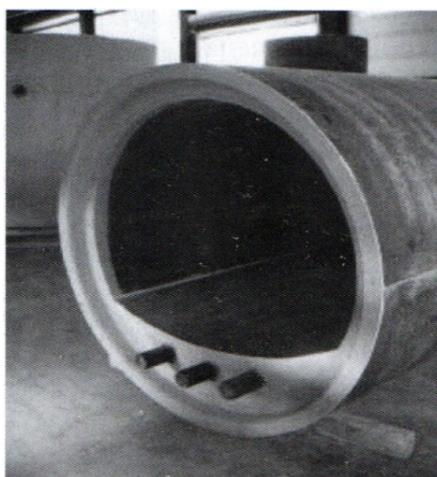


Figura 13 Condotta fognaria con scambiatore integrato (Basta et al., 2008)

2.5.3 Tiranti e ancoraggi energetici

Nell'ambito dello scavo delle gallerie, si è cercato anche di sperimentare l'attivazione energetica dei tiranti, disposti trasversalmente rispetto all'asse longitudinale della galleria e atti a garantirne un'adeguata stabilità.

Un caso particolare di questa applicazione si è studiato e realizzato nel Lainzer Tunnel di Vienna. Questa galleria è stata realizzata mediante diversi metodi di scavo (Cut and cover e NATM).

La sezione scavata con il metodo NATM (New Austrian Tunnelling Method), presentava più di un impianto per la circolazione del fluido termovettore: tra questi si è scelto anche di dotare i tiranti e i chiodi di scambiatori di calore, in quanto risultano essere infissi per diversi metri in terreno o in roccia (Brandl, 2006).

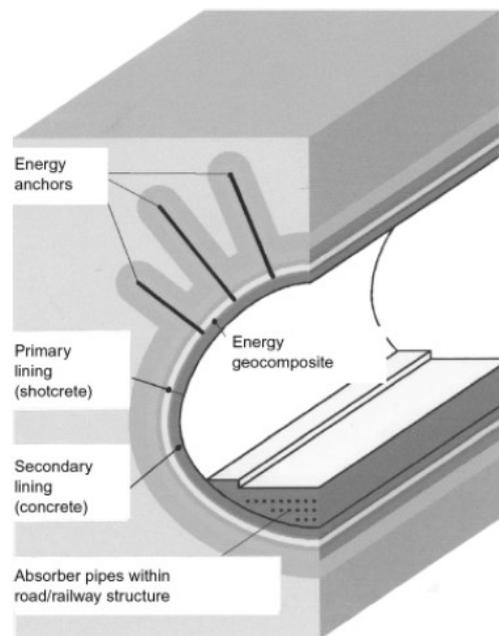


Figura 14 Schema del tunnel energetico Lainzer (Vienna). Si noti l'impiego di tiranti energetici predisposti lungo la corona (Brandl, 2006)

2.5.4 Gallerie energetiche: ENERTUN

Tra le geostrutture energetiche che non hanno ancora avuto modo di essere studiate e impiegate in maniera approfondita rispetto alle precedenti (Barla & Perino, 2014), troviamo le gallerie energetiche. Questa tecnologia riguarda lo sfruttamento del calore del terreno o dell'ammasso roccioso entro a cui è scavata la galleria, mediante scambiatori di calore posti nel rivestimento in calcestruzzo armato posto a sostegno della stessa. Fondamentalmente il principio è lo stesso delle altre geostrutture energetiche.

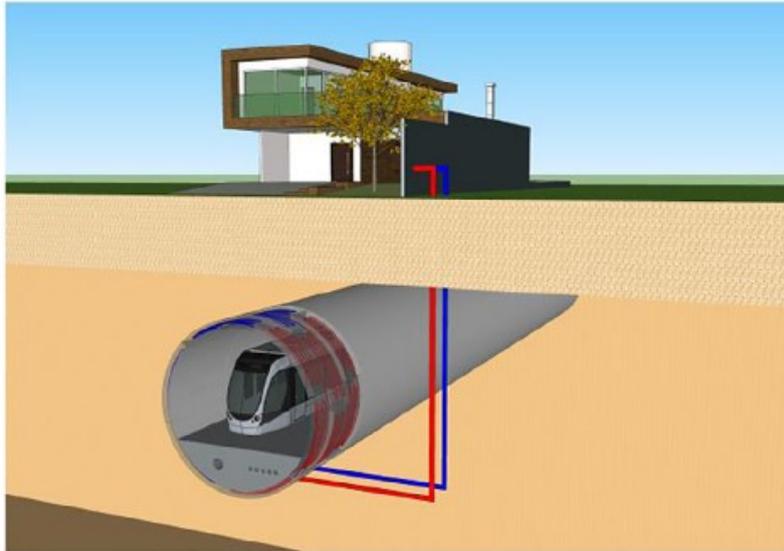


Figura 15 Rappresentazione schematica dell'attivazione energetica del sostegno della galleria della metro Linea 1 di Torino (Barla & Di Donna, 2018)

Questa tecnologia, comparata con le altre geostrutture energetiche, coinvolge un volume ed un'area maggiore di terreno per lo scambio termico, dato che in genere le gallerie si sviluppano su grandi lunghezze nella direzione del loro asse.

Quando vengono utilizzati conci prefabbricati in calcestruzzo armato per il rivestimento definitivo della galleria essi vengono preparati in stabilimento e equipaggiati con le tubazioni entro le quali circolerà il fluido termovettore (Barla & Di Donna, 2018).

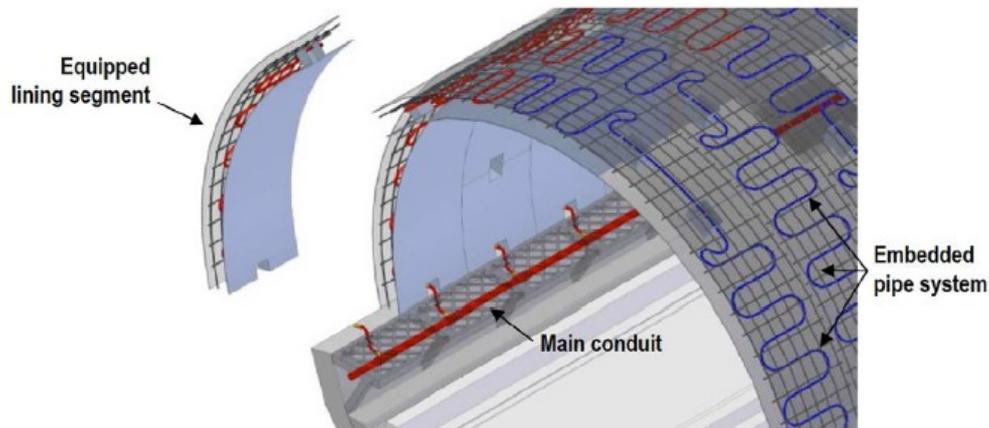


Figura 16 Rappresentazione schematica dei conci prefabbricati in calcestruzzo armato equipaggiati con i tubi per lo scambio termico (Barla & Di Donna, 2018)

Secondo Barla & Di Donna (2018), possiamo suddividere le gallerie in “fredde” e “calde”.

- Le gallerie fredde hanno una temperatura costante lungo tutto l’anno di circa 15 °C. Inoltre, se sono gallerie ferroviarie, non presentano passaggi frequenti dei convogli e hanno diametro interno di 10-12 m
- Le gallerie calde hanno, invece, una più alta temperatura interna. I tunnel ferroviari urbani con diametro interno di circa 7 m possono anche raggiungere i 30°C di temperatura nel periodo estivo. Inoltre, un’alta frequenza di frenate e partenze dei convogli tende a innalzarla ulteriormente. Inoltre, i tunnel alpini possono raggiungere temperature interne tra i 30 °C e i 50 °C, in virtù della profondità alla quale sono ubicati.

L’attivazione termica di una galleria può essere realizzata secondo due finalità: la prima consiste nell’estrarre o cedere calore allo scopo di riscaldare o raffreddare edifici (con l’ausilio di una pompa di calore). La seconda consiste nel far circolare un fluido nelle tubazioni poste, però, verso il vuoto della galleria, con il fine di raffreddare l’aria circolante all’interno della stessa. Quest’ultima modalità può trovare impiego in quei tunnel molto profondi (ad esempio i lunghi tunnel alpini) dove le temperature interne possono raggiungere oltre i 40 °C.

Tra i vari esempi applicativi che si possono fare riguardo a questa tecnologia, si può citare il progetto ENERTUN, sviluppato al Politecnico di Torino. Si tratta di un concio prefabbricato in calcestruzzo armato al cui interno si sono inserite le tubazioni in polietilene atte alla circolazione del fluido termovettore. Il primo studio e la prima installazione di questo tipo di tecnologia sono stati eseguiti nel prolungamento Sud della metropolitana automatica di Torino (tratta Lingotto-Bengasi).

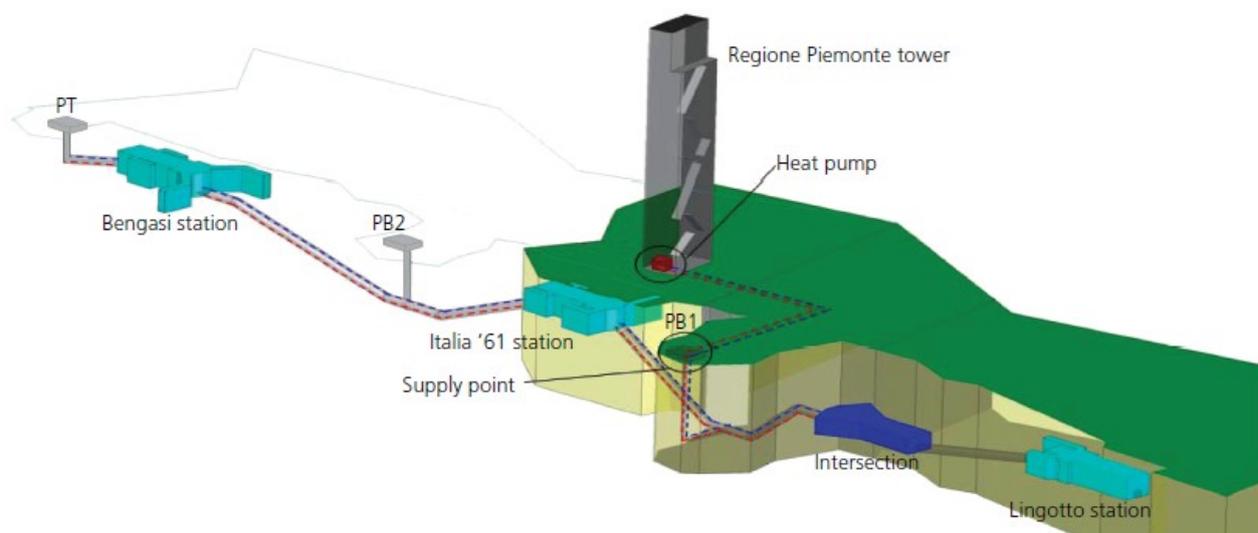


Figura 17 Rappresentazione del prolungamento Sud della Linea 1 della metropolitana di Torino, con l’ipotesi di connessione degli scambiatori termici con le pompe di calore della torre della Regione Piemonte (Barla & Perino, 2014)

Al fine di poter validare i risultati delle simulazioni numeriche, è stato eseguito un solo anello ENERTUN, dotato anche di sensori per la misurazione da remoto delle temperature in vari punti della struttura.

Lo scavo è stato eseguito con una TBM EPB ed è avvenuto alla profondità media di 21,5 m, interamente sotto al livello della falda acquifera (Barla & Di Donna, 2015).

La particolarità di questi conci risiede nella disposizione delle tubazioni, posti in direzione trasversale rispetto alla direzione longitudinale della galleria. Ciò permette una diminuzione delle perdite di carico e un aumento del calore scambiato del fluido circolante.

Inoltre, l'anello prefabbricato può presentare tre configurazioni:

- Ground: progettato per scambiare calore con il terreno;
- Air: concepito per scambiare calore con l'aria all'interno del tunnel;
- Ground & Air: permette lo scambio di calore con entrambi i mezzi (terreno e aria).

A seconda del requisito, la configurazione più appropriata può essere adottata permettendo l'ottimizzazione dello scambio termico (Barla & Di Donna, 2018).

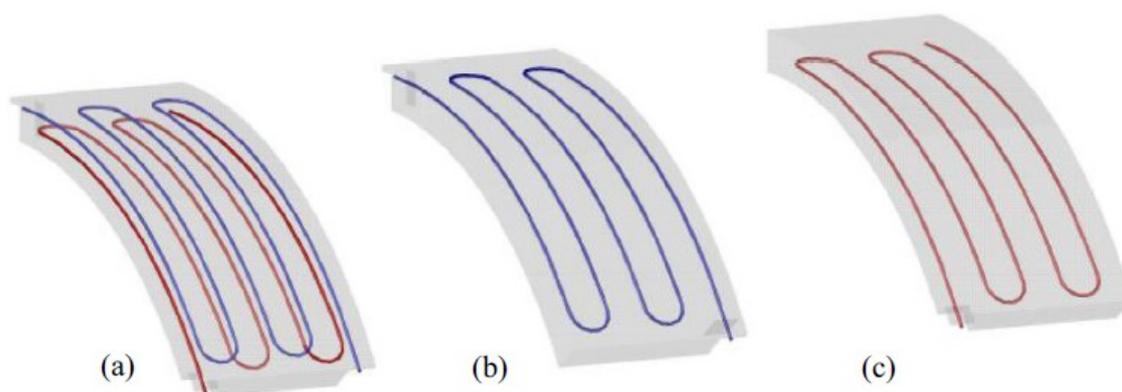


Figura 18 Differenti configurazioni del conco energetico ENERTUN: Ground (a), Air (b), Ground & Air (c) (Barla & Di Donna, 2018)

2.5.5 Diaframmi energetici

L'idea di installare un sistema di tubazioni per lo scambio termico all'interno dei diaframmi in calcestruzzo armato si è diffusa dalla seconda metà degli anni '90, per la precisione il primo muro energetico è stato realizzato nel 1996 (Brandl, 2006). Il principio secondo il quale si è iniziato a realizzare queste strutture è lo stesso che si è discusso a proposito delle altre geostrutture energetiche.

Una prima sostanziale differenza che si nota rispetto, ad esempio, ai pali energetici è il fatto che un diaframma energetico sarà suddiviso in due parti: una completamente immersa nel terreno (lunghezza di infissione) e l'altra a contatto da un lato con il terreno di monte, dall'altro con l'aria contenuta nella parte scavata; come si evince queste sono condizioni da tenere presenti nel momento in cui si debbano eseguire delle analisi su una situazione del genere (Sun et al., 2013). Grazie ai dati reperiti dalle prime realizzazioni di questa tecnologia e il loro confronto con le analisi numeriche agli elementi finiti, si sta procedendo a realizzare modelli sempre più accurati, validando questi ultimi sul dato reale, in modo da poter eseguire successivamente un'analisi parametrica. I parametri inclusi in quest'ultima sono relativi alle dimensioni del diaframma e dell'approfondimento dello scavo, la spaziatura tra i tubi contenuti nel diaframma, la copertura, le proprietà termiche del calcestruzzo, la velocità del fluido termovettore, la differenza di temperatura tra l'aria dell'ambiente scavato e quella del terreno a contatto con il muro. I risultati

di analisi così impostate hanno mostrato come la riduzione di spaziatura tra le tubazioni aumenti l'efficienza termica del sistema nel breve periodo, mentre l'eccesso di temperatura nello spazio di scavo diventa determinante del medio e lungo periodo (Di Donna, Cecinato, Loveridge, Barla, 2016).

Esempi di applicazioni di diaframmi energetici sono stati realizzati nel Regno Unito, in Austria e in Cina. Tra questi troviamo la stazione U2 Staborstraße (Brandl et al., 2010; Markiewicz, 2004). Il Museo di Storia Naturale di Shanghai (Sun et al., 2013; Xia et al., 2012), il Bulgari Hotel di Londra (Amis et al., 2010), la Stazione Dean Street di Londra (Rui, 2014), la Stazione Tottenham Court Road di Londra, il Moorgate shaft di Londra e l'Arts Centre di Bregenz in Austria (Brandl, 1998).

Fra questi si può citare il prolungamento della linea U2 della metropolitana di Vienna (Brandl, 2006) che ha visto la realizzazione di quattro nuove stazioni energeticamente attive al fine di scambiare calore per il riscaldamento e il raffrescamento dell'ambiente interno. Si tratta della prima applicazione di elementi termicamente attivi applicati allo scavo di una metropolitana nel mondo.

Il metodo di scavo è stato il cut and cover, realizzando diaframmi di spessore 0,8 m che hanno raggiunto i 31 m di profondità e le tubazioni sono state installate sia nei diaframmi verticali che nella platea di base, oltre che nel tunnel della metro. Nel caso della singola stazione U2/2 si tratta di 1865 m² di diaframmi verticali e 1640 m² di piastra di fondazione. Si sono impiegate tubazioni del diametro di 25 mm e spaziatura 0,53 m. (Di Donna, Cecinato, Loveridge, Barla, 2016)

Dalle analisi effettuate si è valutato che il fluido termovettore fornisce una capacità di scambio termico massima di 81 kW e che esso può avere temperatura, lungo l'intero anno, variabile tra 10°C e 28°C. In più l'analisi dell'energia mensile richiesta dagli ambienti e quella fornita dal sistema geotermico consente un regime autonomo per quanto riguarda il condizionamento.

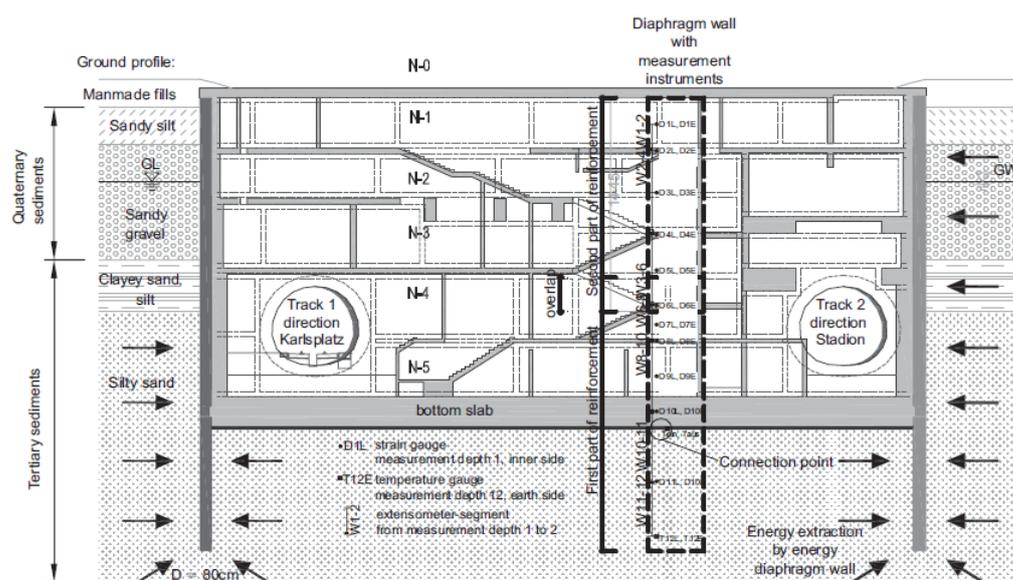


Figura 19 Sezione trasversale della stazione U2/2 della metropolitana di Vienna. La porzione di diaframma evidenziata è quella equipaggiata con i sensori di misurazione (Brandl, 2006)

Altro esempio è l'Arts Centre di Bregenz (Austria). Questa struttura necessitava di fondazioni che superassero 11 m di profondità. Si sono dunque realizzati diaframmi e palificate lungo il perimetro della costruzione gettate dopo aver disposto l'armatura in acciaio e le tubazioni. L'attivazione energetica di queste strutture è stata fatta con lo scopo di riscaldare e raffrescare, a seconda della stagione, i locali del museo. All'interno di tutti i diaframmi, sono stati installati 24000 m di tubi del diametro di 25 mm e l'intero sistema fornisce una capacità di scambio termico massima di 120 kW. I vantaggi ambientali si sommano a quelli economici: infatti comparando la spesa di funzionamento del sistema geotermico con il condizionamento dei locali con metodi convenzionali, si ha avuto un risparmio di 22700 € all'anno.

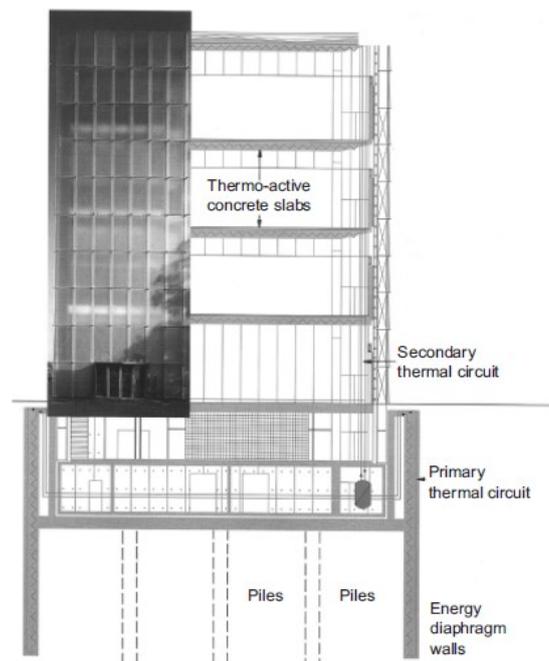


Figura 20 Sezione trasversale dell'Arts Centre di Bregenz con il sistema di diaframmi energetici (Brandl, 2006)

3 REALIZZAZIONE DI DIAFRAMMI IN CALCESTRUZZO ARMATO

Il diaframma, o paratia, è una “lastra in calcestruzzo armato, gettata in opera, la cui stabilità è garantita dalla mobilitazione della resistenza passiva e dalla eventuale presenza di uno o più vincoli”. (Fondazioni, Lancellotta Calavera, pag. 239).

In sostanza il diaframma è una struttura di sostegno in cui una dimensione, lo spessore, è molto minore rispetto alle altre due; sono strutture inserite ad una profondità sufficiente a contrastare le spinte del terreno, dell’acqua e degli eventuali sovraccarichi. L’equilibrio è reso possibile dall’alternarsi della spinta attiva, prevalentemente agente sulla porzione fuori terra, e della resistenza passiva, prevalentemente agente sulla parte infissa nel terreno.

Solitamente si realizza gettata in opera, o altrimenti prefabbricata, e viene utilizzata per sostenere scavi artificiali in maniera provvisoria (durante certi tipi di lavorazione) o definitiva (ad esempio per opere lungo fiumi, canali o porti). Può essere vincolata mediante opportune strutture in acciaio che forniscono stabilità all’opera, dette tiranti, oppure mediante puntelli.

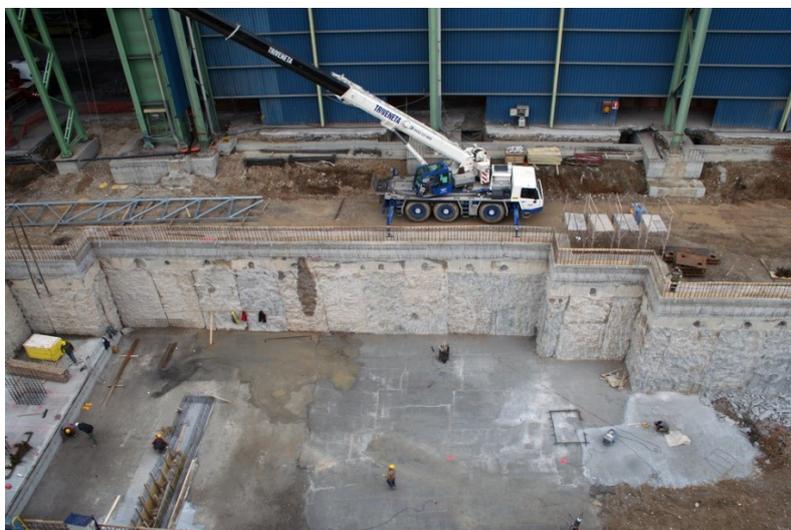


Figura 21 Diaframma in calcestruzzo armato gettato in opera (www.scstn.it)



Figura 22 Paratie in calcestruzzo armato con puntelli (www.scstn.it)



Figura 23 Paratie in calcestruzzo armato con tiranti in acciaio (www.scstn.it)

Il diaframma viene generalmente realizzato con moduli da 2,5 m. Lo spessore può variare da 0,4 m fino a 1,5 m. La profondità può raggiungere anche i 50 m. I diaframmi in generale si realizzano per far fronte a diverse necessità di tipo ingegneristico:

- Per la protezione di uno scavo, soprattutto in ambito urbano, dove lo spazio è limitato e occorre limitare i cedimenti degli edifici nelle vicinanze;
- Realizzazione di fondazioni scatolari per pile da ponte;
- Realizzazione delle spalle da ponte e le opere di difesa della sponda;
- Realizzazione di strutture per l'intercettazione dei moti di filtrazione di falda al di sotto di sbarramenti idraulici;
- Realizzazione di pozzi profondi a pianta poligonale.

3.1 TIRANTI DI ANCORAGGIO

I tiranti di ancoraggio sono degli elementi strutturali realizzati principalmente in acciaio, svolgono la loro funzione operando sotto sforzo di trazione e consentono di trasmettere le azioni alla quale la struttura è soggetta alle zone in cui il terreno o la roccia siano in grado di assorbirle. Vengono generalmente impiegate per stabilizzare opere di sostegno geotecniche come diaframmi o muri di sostegno e tutte quelle strutture naturali o artificiali che di per sé non riescono a garantire l'equilibrio.

Gli elementi principali di un sistema di ancoraggio sono:

- Testata di ancoraggio: è la parte terminale del sistema ed è la zona dove avviene la diffusione delle tensioni all'interno dell'elemento strutturale (paratia, muro di sostegno o roccia); la testata è composta da tutti gli elementi necessari a garantire una corretta ripartizione di tali tensioni;
- lunghezza libera: è la parte non vincolata del tirante di ancoraggio; permette il passaggio delle sollecitazioni dalla testata alla fondazione;
- lunghezza della fondazione: permette il trasferimento della sollecitazione che viene impressa dall'ancoraggio al terreno;

Si veda la Figura 24 per una maggiore chiarezza sugli elementi di un ancoraggio.

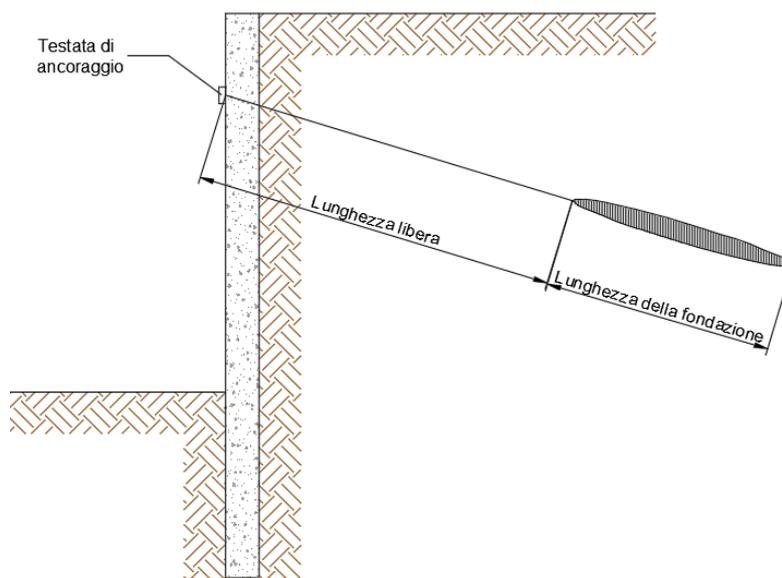


Figura 24 Elementi principali di un tirante di ancoraggio

I tiranti si possono classificare a seconda se viene imposta una pretensione di trazione all'elemento o se la tensione di trazione nasce per effetto dell'equilibrio. Si possono così distinguere:

- Tiranti attivi: in questi tiranti, all'elemento strutturale inserito nel terreno o nella roccia viene imposto un pretensionamento maggiore di quello necessario attraverso un martinetto idraulico in modo da trasferire al terreno o roccia di fondazione cui è collegato una forza aggiuntiva;
- tiranti parzialmente attivi: questi tiranti sono pretensionati in maniera analoga rispetto ai primi, cambia solo il fatto che il pretensionamento è inferiore al carico di esercizio;
- tiranti passivi: a questo tipo di tiranti non viene indotta nessuna pretensione. Essi lavoreranno ed entreranno in tensione quando vi saranno spostamenti della struttura considerata.

Una seconda classificazione può essere fatta sulla base della durata di utilizzo, in tal caso si distinguono:

- Ancoraggi temporanei: hanno un ruolo temporaneo relativo all'esecuzione dei lavori. Diventano superflui nelle fasi successive a determinate lavorazioni;
- ancoraggi permanenti: essi hanno un ruolo fondamentale, in quanto sono necessari per assicurare la stabilità in tutte le fasi di vita dell'opera.

3.2 CENNI SULL'ANALISI DI STABILITÀ

L'analisi della stabilità di una paratia, a rigore dovrebbe eseguirsi prendendo in considerazione la deformabilità della struttura; ciò porterebbe ad un'analisi dell'interazione terreno-struttura, in quanto la distribuzione delle azioni all'interfaccia (spinta attiva e resistenza passiva) è influenzata dai movimenti dell'opera.

Nella pratica si preferisce semplificare la procedura affidandosi ai metodi dell'equilibrio limite, supponendo che il terreno si trovi in una condizione di scorrimento plastico e assumendo che le azioni all'interfaccia siano note a priori.

3.2.1 Diaframma a sbalzo

Il primo caso, più semplice, riguarda il diaframma a sbalzo o a mensola (Figura 25): il meccanismo di rottura è rappresentato da una rotazione intorno al punto O, prossimo alla base, e la stabilità dell'opera è assicurata dalla mobilitazione della resistenza passiva, sia a monte che a valle.

Solitamente si pratica una semplificazione considerando la distribuzione di spinta attiva e resistenza passiva agenti al di sotto del punto O con una forza R applicata nel medesimo punto. Ciò porta a non considerare tale forza nell'equilibrio alla rotazione.

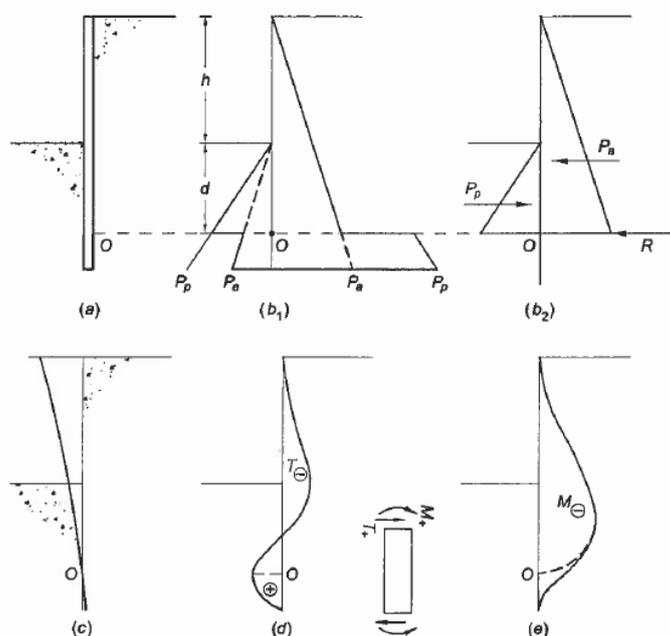


Figura 25 Analisi di stabilità di un diaframma a mensola (a) con deformata (c), diagramma di taglio (d), diagramma di momento (e). Semplificando il problema (b1), si ottiene lo schema (b2). (Lancellotta & Calavera, 1999)

In questa condizione abbiamo pari numero di equazioni risolventi e incognite, per cui il problema risulta essere isostatico.

L'incognita fondamentale del problema è rappresentata dalla lunghezza d , ovvero dall'approfondimento del punto O al di sotto del piano di scavo, e si ottiene imponendo l'equilibrio alla rotazione intorno ad O. Successivamente si esegue l'equilibrio alla traslazione orizzontale dell'opera che consente di ricavare la forza R quindi l'ulteriore lunghezza di

infissione al di sotto del punto O (in prima approssimazione si definisce tale tratto di lunghezza pari al 20% della lunghezza di infissione d).

Nel caso si sia inserito un ancoraggio o un puntone per incrementare la stabilità dell'opera, la stabilità dell'opera è garantita da tali vincoli e dalla resistenza passiva mobilitata si perviene a due possibili ipotesi per la condizione di infissione nel terreno del diaframma: Condizione di estremo libero (free earth support) e condizione di estremo vincolato (fixed earth support):

3.2.2 Diaframma in condizioni di estremo libero (free earth support)

È un'ipotesi che genera un modello la cui base è semplicemente appoggiata al suolo e la struttura risulta isostatica. Questo significa che le equazioni di equilibrio statico sono sufficienti a ricavare le due incognite del problema: l'infissione del diaframma d e la reazione del vincolo F (Figura 26). Si esegue l'equilibrio alla rotazione intorno al punto di applicazione della forza F e si ricava d ; in seguito l'equilibrio alla traslazione orizzontale consente di ricavare F .

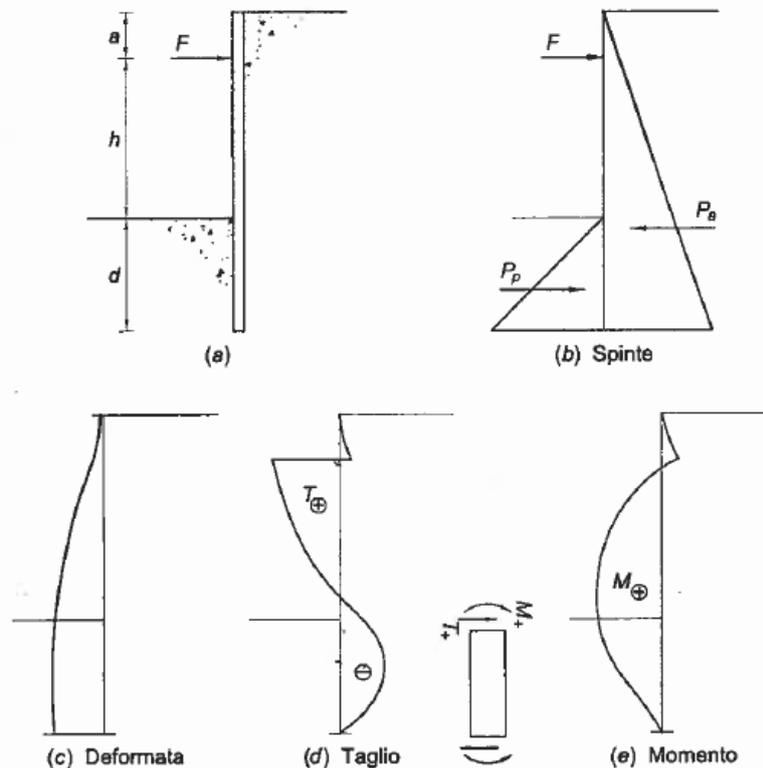


Figura 26 Analisi di stabilità di una paratia con ancoraggio in testa e sezione libera alla base (free earth support).
(Lancellotta & Calavera, 1999)

3.2.3 Diaframma in condizioni di estremo vincolato (fixed earth support)

Questa ipotesi genera un modello con una struttura iperstatica, configurazione che non permette di trascurare la condizione di congruenza della struttura (Figura 27). Ma osservando che nel punto C si ha momento nullo, è lecito porre una cerniera in detto punto, “spezzando” il diaframma in due porzioni: quella inferiore costituita da una mensola e l’altra semplicemente appoggiata. Il metodo semplificato a cui si perviene è detto “metodo della trave equivalente” (Blum, 1950).

Si pone la cerniera C ad una profondità ipotetica di $0,1 h$ senza commettere grandi errori, a partire dal fondo scavo. L’equilibrio alla rotazione intorno al punto A consente di ricavare la reazione R_D e in seguito, l’equilibrio alla rotazione intorno al punto D consente di trovare la lunghezza del tratto infisso. Come visto in precedenza, la lunghezza della parte infissa viene aumentata del 20%.

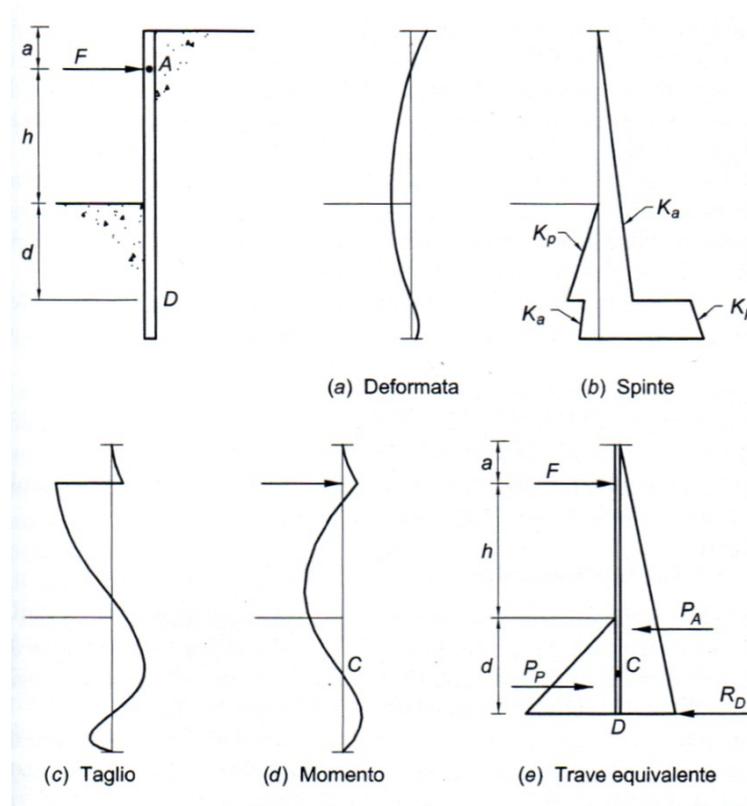


Figura 27 Analisi di stabilità di una paratia con ancoraggio in testa e sezione di base fissa (fixed earth support). (Lancellotta & Calavera, 1999)

In base all’ipotesi di infissione del diaframma, si avranno diverse distribuzioni delle caratteristiche della sollecitazione agenti sulla struttura, come si può vedere dalle precedenti figure.

I diaframmi vengono opportunamente armati con barre in acciaio ad aderenza migliorata disposte lungo i lati maggiori per assorbire i momenti sollecitanti e trasversalmente per gli sforzi di taglio e i fenomeni torsionali. Tali barre a flessione e taglio sono spesso realizzate in cantiere o in stabilimento sotto forma di gabbie prefabbricate per un più celere posizionamento all’interno dello scavo.

3.3 VERIFICHE DI UN DIAFRAMMA E DEGLI ANCORAGGI

3.3.1 Diaframmi

Secondo la Normativa Italiana NTC 2018 le verifiche di un diaframma o paratia devono essere condotte secondo il Metodo semiprobabilistico agli Stati Limite (MSL).

Nelle verifiche di sicurezza devono essere presi in considerazione tutti i meccanismi di stato limite ultimo, sia a breve sia a lungo termine. Gli stati limite ultimi delle opere di sostegno si riferiscono allo sviluppo di meccanismi di collasso determinati dalla mobilitazione della resistenza del terreno, e al raggiungimento della resistenza degli elementi strutturali che compongono le opere stesse.

Gli Stati Limite Ultimi (SLU) da verificare per i diaframmi sono tre: geotecnico, idraulico e strutturale:

- SLU di tipo geotecnico:
 1. Collasso per rotazione intorno a un punto dell'opera (atto di moto rigido);
 2. Collasso per carico limite verticale;
 3. Sfilamento di uno o più ancoraggi;
 4. Instabilità globale del complesso opera di sostegno-terreno;
 5. Instabilità del fondo scavo in terreni a grana fine in condizioni non drenate.

- SLU di tipo idraulico:
 1. Instabilità del fondo scavo per sollevamento;
 2. Sifonamento del fondo scavo.

- SLU strutturale:
 1. Raggiungimento della resistenza in uno o più ancoraggi;
 2. Raggiungimento della resistenza in uno o più puntoni o sistemi di contrasto;
 3. Raggiungimento della resistenza strutturale del diaframma.

Non meno importante è la verifica degli Stati Limite di Esercizio (SLE)

- SLE:
 1. Incompatibilità degli spostamenti dell'opera di sostegno e la sua funzionalità;
 2. Incompatibilità tra gli spostamenti indotti nel terreno circostante e la sicurezza e funzionalità dei manufatti adiacenti, anche a seguito di modifiche indotte sul regime delle pressioni interstiziali.

In presenza di manufatti particolarmente sensibili agli spostamenti dell'opera di sostegno, deve essere sviluppata una specifica analisi dell'interazione tra opere e terreno, tenendo conto della sequenza delle fasi costruttive.

3.3.2 Tiranti di ancoraggio

I tiranti di ancoraggio sono elementi strutturali opportunamente collegati al terreno, in grado di sostenere forze di trazione.

3.3.2.1 Criteri di progetto

Ai fini del progetto, gli ancoraggi si distinguono in provvisori e permanenti. Gli ancoraggi possono essere ulteriormente suddivisi in attivi o presollecitati, quando nell'armatura viene indotta una forza di tesatura iniziale, e passivi o non presollecitati.

Nella scelta del tipo di ancoraggio si deve tenere conto delle sollecitazioni prevedibili, delle caratteristiche del sottosuolo, dell'aggressività ambientale.

Nel progetto devono indicarsi l'orientazione, la lunghezza e il numero degli ancoraggi; la tecnica e le tolleranze di esecuzione; la resistenza di progetto R_{ad} e l'eventuale programma di tesatura.

Nel caso di ancoraggi attivi impiegati per una funzione permanente, devono essere adottati tutti gli accorgimenti costruttivi necessari a garantire la durabilità e l'efficienza del sistema di testata dei tiranti, soprattutto per quelli a trefoli, in particolare nei riguardi della corrosione, per tutta la vita nominale della struttura. Inoltre, si devono prevedere efficaci dispositivi di contenimento locale dell'armatura nei confronti del possibile tranciamento in corso di esercizio. Nel progetto deve essere definito un programma di manutenzione ordinaria che può comprendere anche successivi interventi di regolazione e/o sostituzione dei dispositivi di ancoraggio. Deve inoltre essere predisposto un piano di monitoraggio per verificare il comportamento dell'ancoraggio nel tempo. Se la funzione di ancoraggio è esercitata da piastre, da pali accostati o simili, è necessario evitare ogni sovrapposizione tra la zona passiva di pertinenza dell'ancoraggio e quella attiva a tergo dell'opera di sostegno. Per la valutazione della resistenza a sfilamento di un ancoraggio si può procedere in prima approssimazione con formule teoriche o con correlazioni empiriche. La conferma sperimentale con prove di trazione in sito nelle fasi di progetto e in corso d'opera è sempre necessaria.

3.3.2.2 Verifiche di sicurezza (SLU)

Nelle verifiche di sicurezza devono essere presi in considerazione tutti i meccanismi di stato limite ultimo, sia a breve sia a lungo termine.

Gli stati limite ultimi dei tiranti di ancoraggio si riferiscono allo sviluppo di meccanismi di collasso determinati dalla mobilitazione della resistenza del terreno e al raggiungimento della resistenza degli elementi strutturali che li compongono.

Dunque, lo stato limite ultimo da prendere in considerazione è quello relativo allo sfilamento, ovvero alla rottura del terreno presente nell'intorno del bulbo del tirante.

3.4 REALIZZAZIONE DEI DIAFRAMMI

I diaframmi sono strutture in calcestruzzo armato gettate prima di realizzare lo scavo che dovranno in seguito andare a sostenere.

Le fasi di realizzazione di un diaframma in calcestruzzo armato sono le seguenti:

- Scavo e realizzazione del diaframma nel terreno:

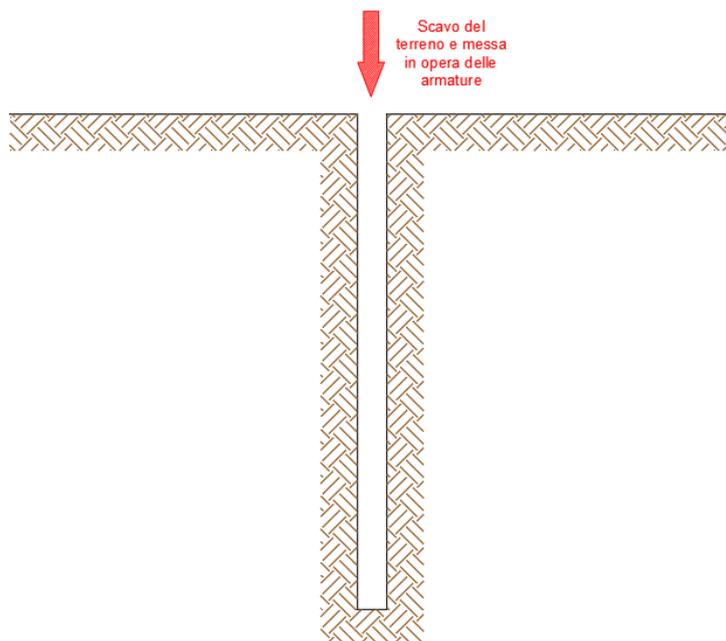


Figura 28 Fase di scavo e sistemazione della gabbia di armatura

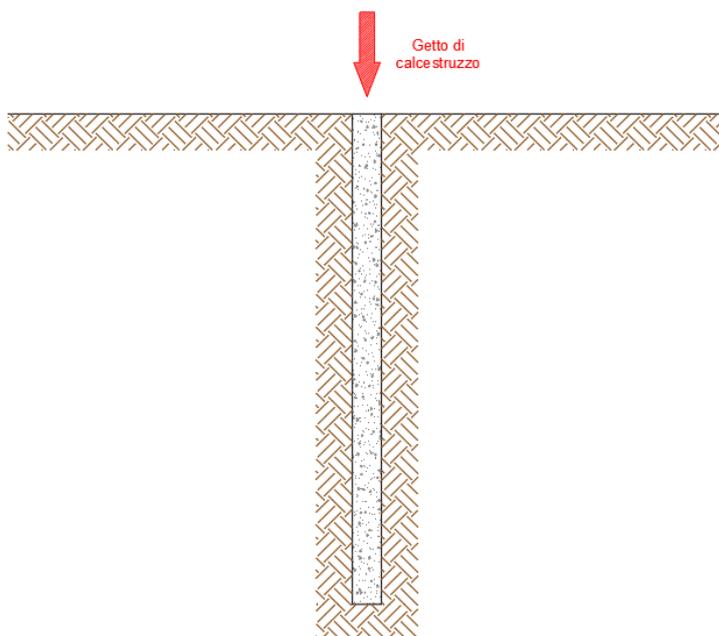


Figura 29 Fase di getto del calcestruzzo

- Realizzazione dello scavo dal lato prescelto. Il terreno a tergo sarà sostenuto dalla struttura:

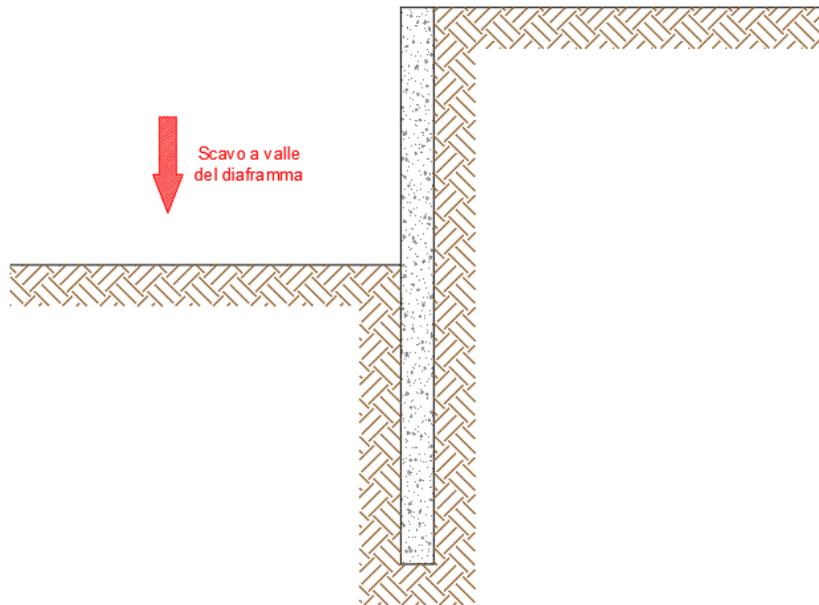


Figura 30 Realizzazione dello scavo mediante i mezzi movimento terra

Nel caso di un diaframma con tirante in acciaio le fasi differiscono leggermente:

- Scavo e realizzazione del diaframma nel terreno:

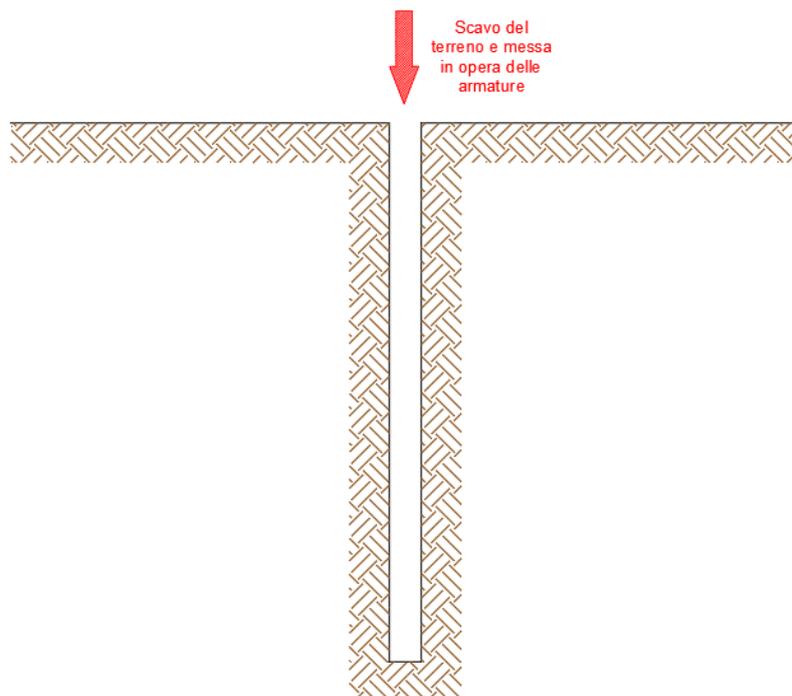


Figura 31 Fase di scavo e sistemazione della gabbia di armatura

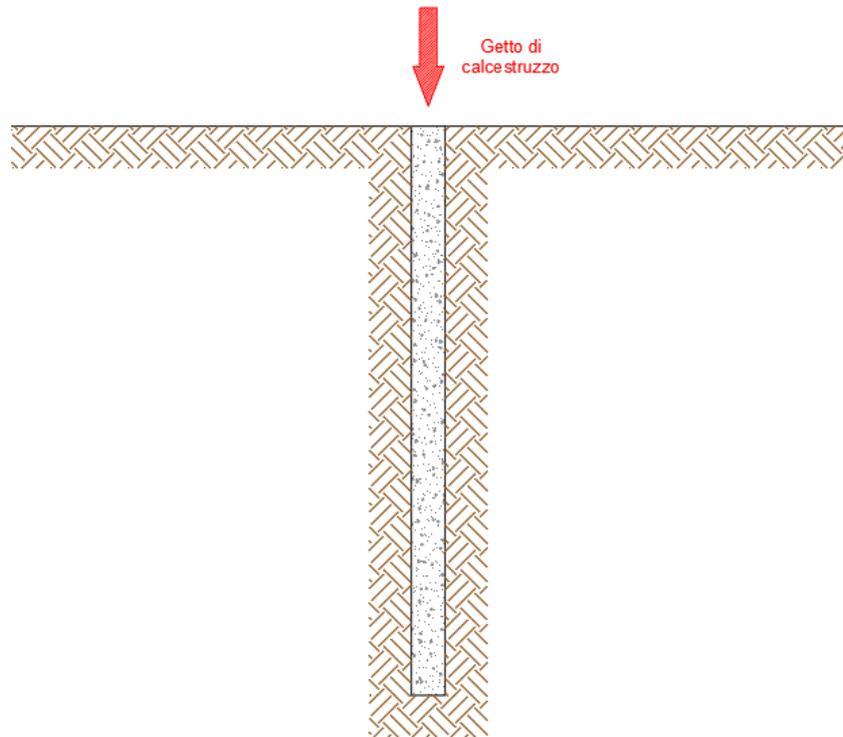


Figura 32 Fase di getto del calcestruzzo

- Realizzazione di una prima fase di scavo dal lato prescelto:

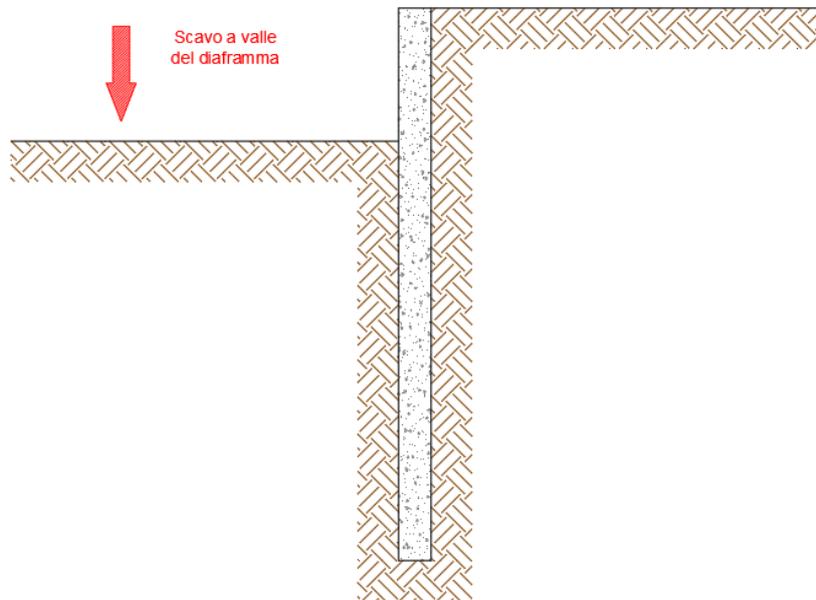


Figura 33 Prima fase di scavo a valle del diaframma

- Messa in opera dei tiranti:

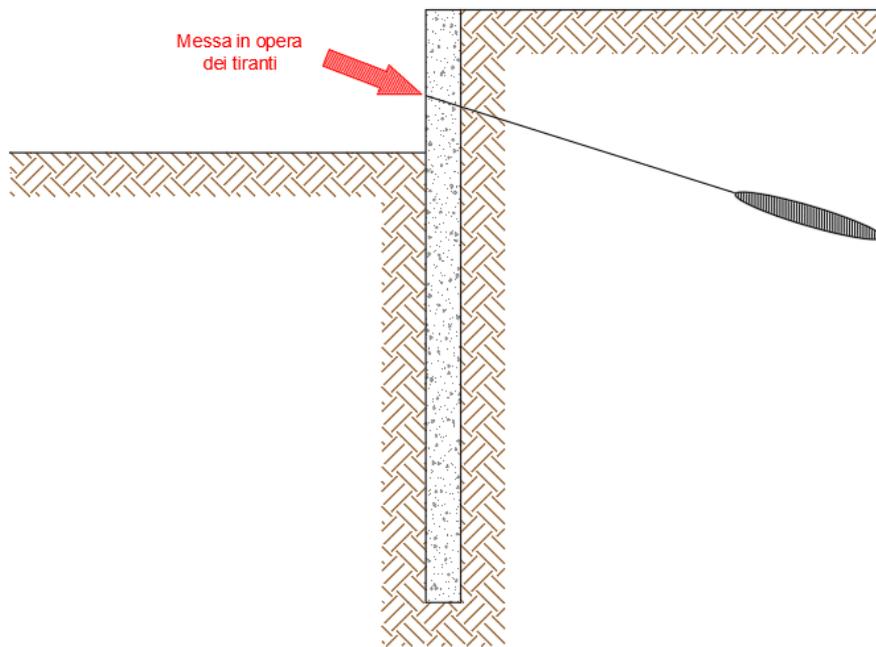


Figura 34 Messa in opera ed in esercizio dei tiranti

- prosecuzione dello scavo fino alla quota stabilita:

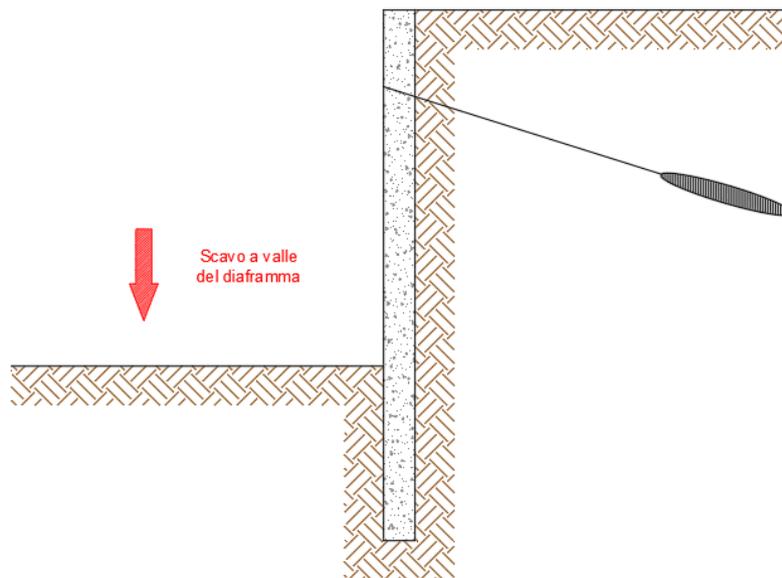


Figura 35 Si esegue l'ulteriore operazione di scavo a valle del diaframma

Le paratie in calcestruzzo armato si possono realizzare mediante due possibilità, la prima delle quali è l'impiego di una benna mordente, più utilizzata nei terreni più o meno compatti:



Figura 36 Benna mordente per lo scavo in vista della realizzazione di un diaframma (www.sestn.it)

Le fasi realizzative di un diaframma scavato mediante l'impiego di una benna mordente sono riportate in Tabella 1:

N° Fase	Operazione
1	Preparazione dell'area
2	Realizzazione dei cordoli guida in calcestruzzo armato
3	Scavo con sostegno in bentonite
4	Calaggio della gabbia di armatura
5	Getto del calcestruzzo con recupero della bentonite
6	Realizzazione della trave di testa

Tabella 1 Fasi di realizzazione di un diaframma mediante l'utilizzo di benna mordente (Mancinelli, 2008)

La seconda possibilità consiste nell'impiego di un'idrofresa, più utilizzata in terreni di natura rocciosa:



Figura 37 Impiego di un'idrofresa per la realizzazione di uno scavo

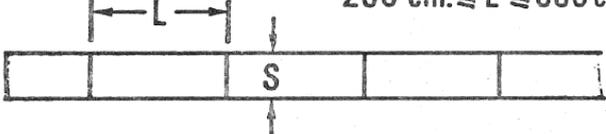
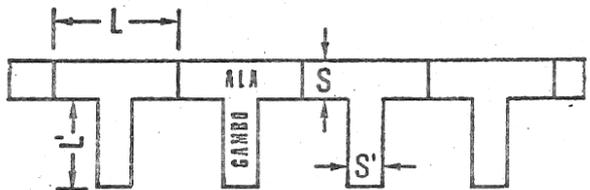
Nel caso di impiego di un'idrofresa, le fasi sono quelle riportate in Tabella 2:

N° Fase	Operazione
1	Preparazione dell'area
2	Attività di prescavo e sostegno
3	Fresatura
4	Calaggio della gabbia di armatura
5	Getto del calcestruzzo
6	Realizzazione della trave di testa

Tabella 2 Fasi di realizzazione di un diaframma mediante l'utilizzo di idrofresa (Mancinelli, 2008)



Figura 38 Operazioni di posizionamento di una gabbia di armatura in acciaio per diaframma. Si notino i ferri disposti diagonalmente, il cui scopo è impedire eccessive deformazioni della gabbia durante le operazioni di spostamento mediante gru (www.scstn.it)

<p>Diaframma lineare</p>	<p>DIAFRAMMA LINEARE</p> <p>$50 \text{ cm.} \leq S \leq 120 \text{ cm.}$ $200 \text{ cm.} \leq L \leq 600 \text{ cm.}$</p> 
<p>Diaframma a T</p>	<p>DIAFRAMMA A 'T'</p> <p>$L = 300 \div 500 \text{ cm.}$ $S = 50 \div 100 \text{ cm.}$ $L' = 200 \div 400 \text{ cm.}$ $S' = 50 \div 100 \text{ cm.}$</p> 

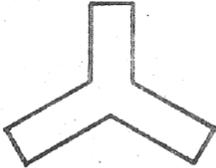
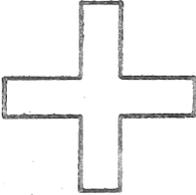
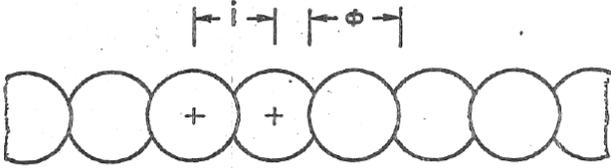
<p>Diaframma a stella o a croce</p>	<p style="text-align: center;">DIAFRAMMA</p> <p style="text-align: center;">A STELLA A CROCE</p> <p style="text-align: center;">Le dimensioni sono simili indicate per i diaframmi a 'T'</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div>
<p>Diaframma a pali secanti</p>	<p style="text-align: center;">DIAFRAMMA A PALI SECANTI</p> <div style="text-align: center;">  <p>$\phi = 60 + 80 \text{ cm.}$ $i = 50 + 60 \text{ cm.}$</p> </div>

Tabella 3 Classificazione dei diaframmi in base alla geometria (Botto, 1979)

Se si lavora con la benna mordente è possibile dotare i moduli di diaframma prefabbricati con giunti maschiati, che migliorano le caratteristiche meccaniche del manufatto aumentando la collaborazione tra pannello e pannello (Figura 39):



Figura 39 Giunti maschiati laterali tra i moduli di diaframma (Mancinelli, 2008)

Il grosso vantaggio delle paratie a T (Figura 40), è che si avrà un aumento notevole dell'inerzia della sezione resistente.



Figura 40 Esempio di diaframma a T (www.scstn.it)

Riguardo all'approfondimento dei diaframmi, Mancinelli, 2008 asserisce che le idrofresse garantiscono, in generale, una maggiore profondità di infissione.

Le gabbie di armatura, solitamente, vengono fornite in moduli di lunghezza massima di 12 m (per motivi di trasporto). Per diaframmi più lunghi si procede ad un assemblaggio fra le gabbie prima della posa in opera. Le gabbie possono essere prefabbricate in stabilimento o realizzate in sito.



Figura 41 Preparazione delle gabbie di armatura (www.scstn.it)

4 CASO DI STUDIO

4.1 DESCRIZIONE DELL'OPERA

4.1.1 Il Masterplan di Ateneo

Il Masterplan di ateneo è un progetto che coinvolge una moltitudine di soggetti e che mira allo sviluppo e alla realizzazione di nuovi spazi di aggregazione, di utilità e di servizio del Politecnico di Torino. Questo progetto nasce nel 2017 e rappresenta una prosecuzione ideale del programma di espansione nato alla fine degli anni '90 e terminato nel 2009 per dotare l'ateneo di nuovi spazi e aule (nel caso specifico si trattò della rifunzionalizzazione delle Ex-tornerie, delle Ex-fucine, della realizzazione di un parcheggio multipiano ed altri spazi, tutto realizzato nell'area Ex-Officine Grandi Riparazioni).

Il Masterplan nasce, dunque, come un tavolo dove le istanze e le necessità delle numerose entità che gravitano intorno al Politecnico vengono analizzate, discusse, modificate, approvate se vi sono i pareri e le condizioni favorevoli e, in ultima analisi, realizzate, al fine di proseguire l'opera di miglioramento delle infrastrutture di ateneo, elemento imprescindibile per una sempre migliore vivibilità dell'Ateneo da parte di tutti.

Il parcheggio interrato oggetto di discussione di questa tesi, fa parte di una serie di opere che verranno realizzate all'interno della Cittadella Politecnica (area compresa tra Corso Francesco Ferrucci e Via Pier Carlo Boggio). L'arco temporale su cui si estenderanno questi interventi sarà compreso tra il 2019 e il 2022 (al netto dei tempi di approvazione e di gare d'appalto). L'inizio dei lavori per il parcheggio è previsto per il mese di Ottobre 2019 e la conclusione per Febbraio 2021 (dati cronoprogramma EDILOG – Area Edilizia e Logistica, Politecnico di Torino).

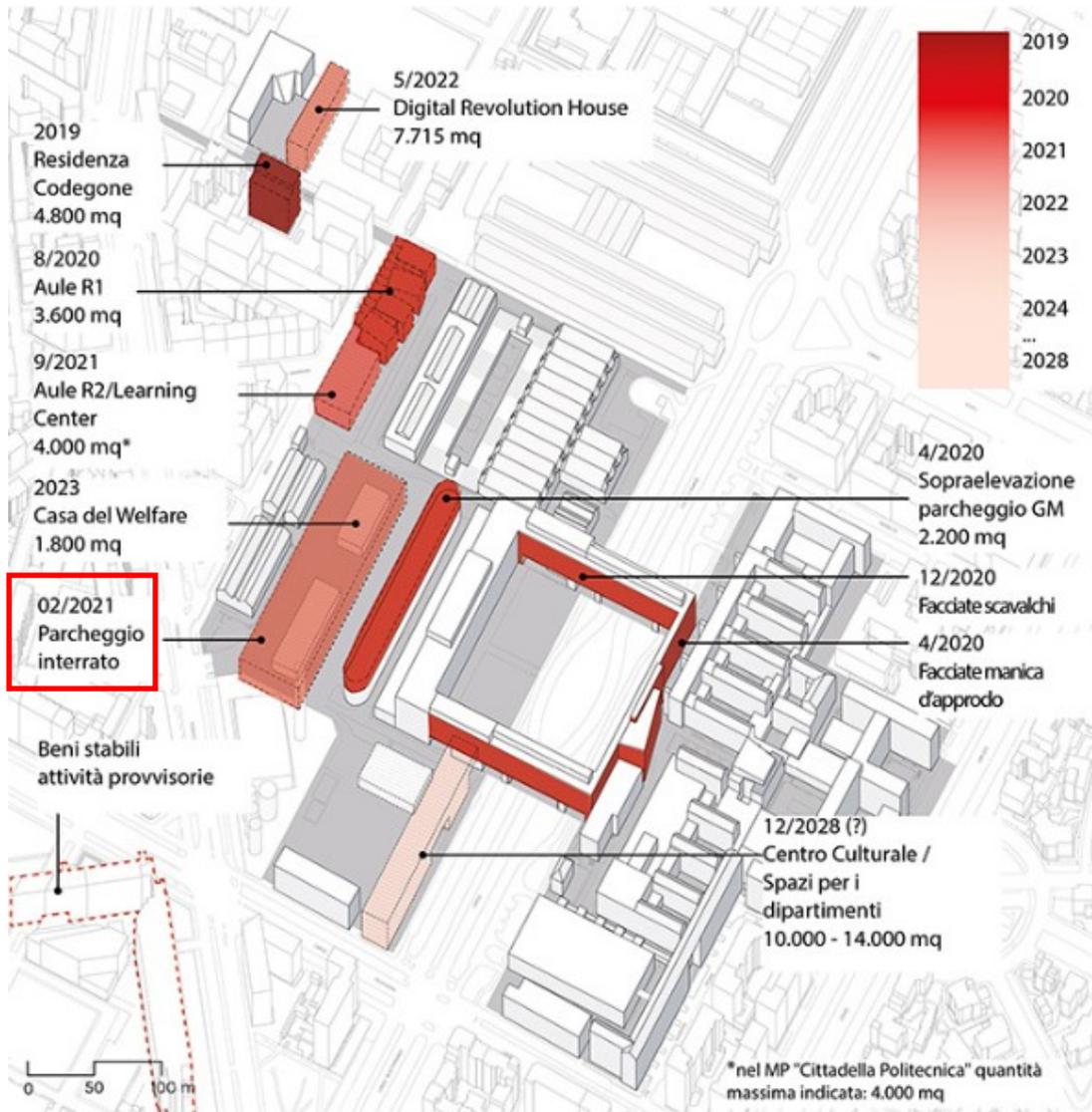


Figura 42 Rappresentazione dell'area della Cittadella Politecnica con le date di fine presunta dei lavori di ogni opera. L'area di nostro interesse è quella denominata "parcheggio interrato"

4.1.2 Geometria dell'opera

Il parcheggio in oggetto sarà realizzato nell'area compresa tra il fabbricato delle aule M ed N (fabbricato denominato con la sigla TO_CIT02) e il parcheggio multipiano a servizio della General Motors, entrambi esistenti (Figura 43).

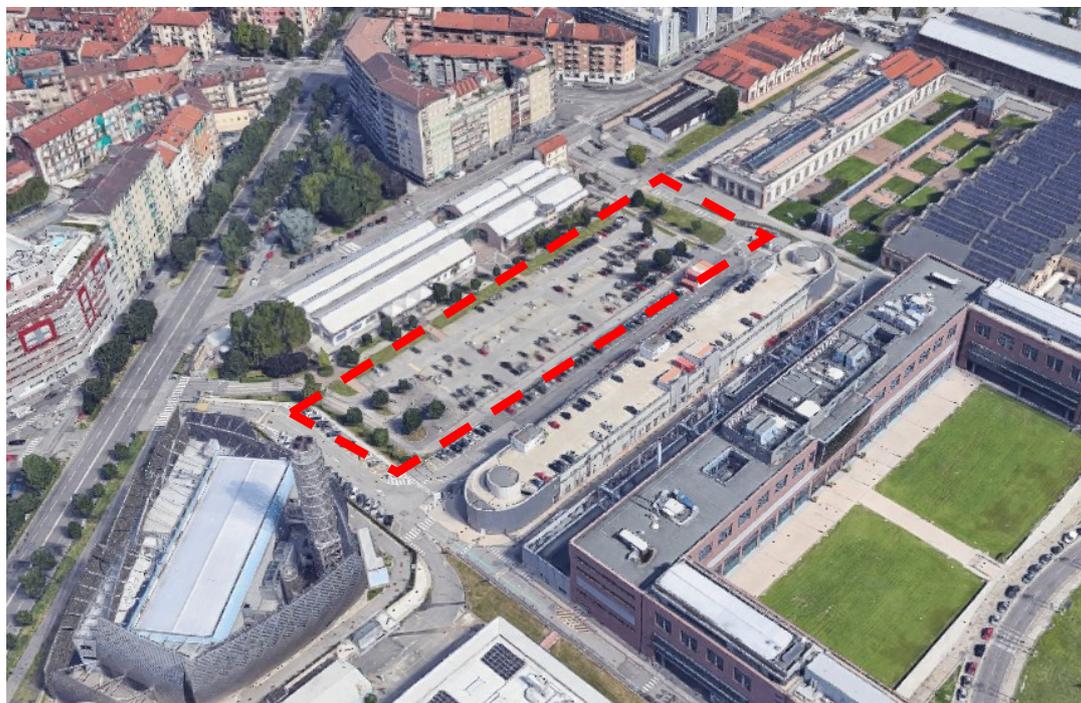


Figura 43 Rappresentazione tridimensionale della Cittadella Politecnica con evidenziata l'area dove sarà realizzato il parcheggio interrato (www.google.it/maps)

Esso si svilupperà su quattro livelli al di sotto del piano campagna, e interesserà un'area rettangolare di dimensioni 176,30 m e 38,10 m, dunque una superficie totale di 6717,03 m² in proiezione. La superficie netta di un piano tipo (senza considerare i diaframmi verticali) ammonta a 6376,55 m², per un totale di 25506,20 m² di superficie sui quattro livelli. Allo stato attuale non è nota la destinazione dell'area in superficie, che tuttavia dovrebbe ospitare sovrastrutture leggere a 1 o 2 piani fuori terra.

Lo scavo dei diaframmi di sostegno avrà una profondità massima di 17,65 m, computati a partire dall'estradosso della soletta di superficie fino al punto inferiore di infissione del diaframma.

Si renderanno necessari degli scavi a sezione obbligata in prossimità del centro del parcheggio per la posa di vasche di accumulo ed altri impianti durante le prime fasi delle lavorazioni. I diaframmi avranno spessore di 0,80 m. La quota al finito del 4° livello interrato sarà di -12,85 m. L'altezza utile di ogni piano sarà di 2,86 m.

L'accesso dei veicoli al parcheggio avverrà tramite due rampe per ogni senso di marcia per ogni piano. La fruizione degli spazi da parte dei pedoni sarà possibile grazie a tre vani scala dotati di ascensore e alla presenza di parcheggi per disabili in numero adeguato e posizionati nel primo livello, completati da tutte le necessarie infrastrutture.

La Figura 44 e la Figura 45 mostrano in dettaglio le sezioni dell'opera in progetto.

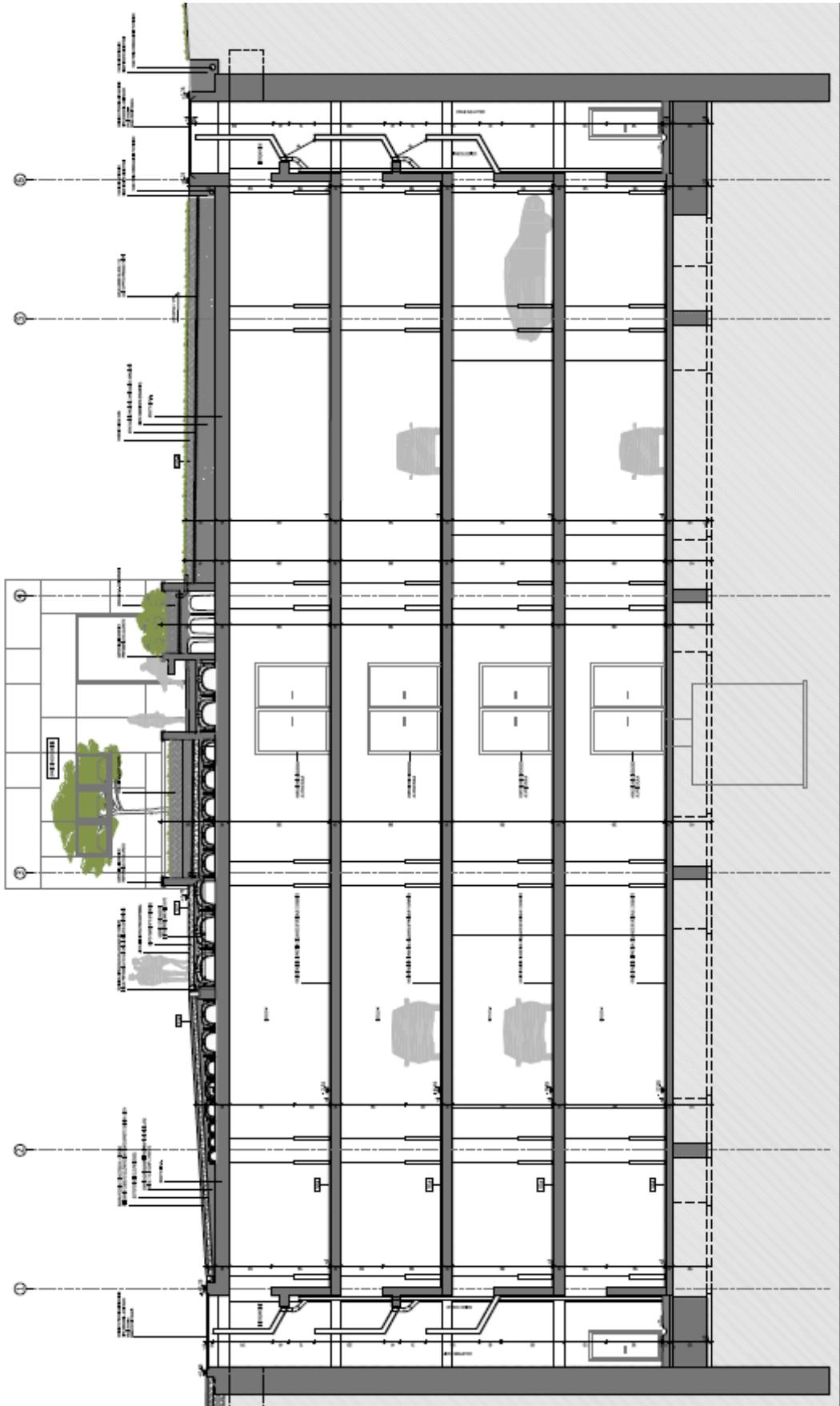


Figura 44 Sezione trasversale del parcheggio interrato.

4.1.3 Materiali e realizzazione

I diaframmi di contenimento del terreno e le strutture portanti in genere saranno tutti realizzati in calcestruzzo armato gettato in opera, mentre le solette saranno realizzate con predalles prefabbricate con getto di completamento in opera.

La realizzazione dei diaframmi in calcestruzzo armato è compresa tra le prime fasi del programma delle lavorazioni. Verrà eseguito uno scavo con idrofresa fino alla profondità di progetto, opportunamente sostenuto da fanghi bentonitici, seguito dalla posa delle armature in acciaio e dal getto di calcestruzzo. Lo scavo interno del parcheggio sarà realizzato in vari step seguiti dalla realizzazione e tesatura di tiranti in acciaio in opportuni numero e disposizioni.

4.2 FASI COSTRUTTIVE

Qualunque cantiere, specialmente quelli più complessi, necessitano di un progetto che scandisca e disponga in maniera ottimale le fasi di lavorazione, al fine di evitare il più possibile interferenze che potrebbero causare errori o ritardi nelle realizzazioni, infortuni degli addetti al cantiere o altri aspetti critici.

Per la realizzazione del parcheggio interrato oggetto di questa tesi, vengono riportate le fasi costruttive progettate; esse descrivono, con ordine di esecuzione, le lavorazioni che verranno eseguite.

4.2.1 Fase 1 – Allestimento cantiere, scavo e realizzazione dei diaframmi

La prima fase comprende i passaggi preliminari per l'allestimento dell'area di cantiere e per le prime lavorazioni. L'obiettivo di questa fase è la realizzazione di tutti i diaframmi in calcestruzzo armato e lo sbancamento interno del parcheggio interrato.

Le sottofasi dettagliate sono le seguenti:

- **Delimitazione ed allestimento aree di cantiere:** come si può vedere in Figura 46, si esegue la delimitazione e la realizzazione e adattamento degli ingressi al cantiere, realizzando le apposite piste carrabili osservando le normative sulla sicurezza. Sono stati individuati anche i luoghi che saranno utilizzati per il deposito dei materiali e la successiva lavorazione degli stessi, nonché gli appositi punti di stazionamento dei mezzi di cantiere. La viabilità di uomini e mezzi è stata studiata in modo da garantire la sicurezza a lavoratori e fruitori degli edifici esistenti nelle adiacenze. Verranno eseguiti i collegamenti per l'approvvigionamento di acqua e corrente elettrica.
- **Esecuzione della bonifica bellica:** lo scavo che dovrà essere eseguito necessita di una bonifica bellica del sito al fine di intercettare e rimuovere ordigni inesplosi. Questo

passaggio risulta essere molto importante nell'area urbana di Torino, in quanto è frequente il ritrovamento di materiale esplosivo risalente all'epoca della Seconda Guerra Mondiale. All'eventuale ritrovamento di ordigni, dovrà seguire l'intervento delle autorità competenti in materia (artificieri).

- **Tracciamento e realizzazione dei diaframmi:** il perimetro interessato dalla costruzione dei diaframmi in calcestruzzo armato è rappresentato dalla linea verde nella Figura 46. Lo scavo verrà eseguito con un'idrofresa e i diaframmi successivamente armati e gettati avranno lo spessore costante di 0,8 m.
- **Realizzazione locale tecnico per gruppo elettrogeno:** si realizzerà un apposito locale atto ad accogliere il gruppo elettrogeno, che servirà a fornire l'energia elettrica ai macchinari per le lavorazioni del cantiere.
- **Scavo di sbancamento interno ai diaframmi:** dopo la realizzazione dei diaframmi si può procedere allo scavo interno, realizzato mediante macchina escavatrice per creare la volumetria che sarà occupata dal parcheggio interrato.

4.2.2 Fase 2 – Realizzazione delle fondazioni, degli impianti e rinterro

La seconda fase riguarda la realizzazione delle opere di fondazioni, che verranno costruite all'interno dello scavo precedentemente realizzato. Successivamente, si eseguiranno le opere impiantistiche interne e i rinterri delle fondazioni.

Le sottofasi saranno le seguenti:

- **Realizzazione delle fondazioni:** Le fondazioni sono in parte realizzate con plinti quadrati collegati con travi, il resto con porzioni di platea.
- **Posa vasche di accumulo e predisposizione impianti:** si prevede di realizzare uno scavo ubicato all'incirca al centro del parcheggio interrato per la posa di vasche di accumulo e la predisposizione di impianti vari (si veda la Figura 47).
- **Rinterri:** terminate tutte le attività di allestimento delle fondazioni e degli impianti si procede a ricoprire le parti di strutture sulle quali è stato previsto un rinterro.

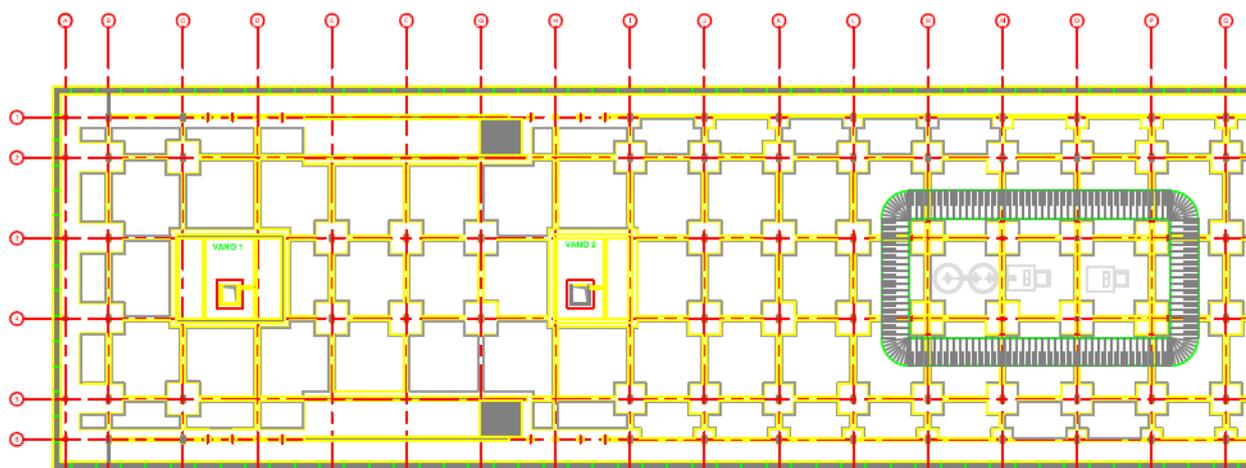


Figura 47 Particolare della planimetria della fase 2 del cantiere (fondazioni e vasche di accumulo)

4.2.3 Fase 3 – Realizzazione delle elevazioni tra piano -4 e -3

La terza fase riguarderà la realizzazione delle elevazioni tra piano fondazione -4 e solaio livello -3, comprese le solette delle rampe, ovvero le strutture in elevazione che partiranno dalle fondazioni precedentemente gettate.

In seguito, ci si occuperà della realizzazione della pavimentazione strutturale al livello -4: questa fase riguarda la realizzazione di tutte le strutture, i sottoservizi e gli isolamenti del livello più basso, ovvero il -4 e in ultima analisi, del piano viabile vero e proprio.

4.2.4 Fase 4 – Realizzazione del solaio del livello -3

In questa fase si realizzerà il solaio del livello -3 (in tre riprese differenti); esso verrà realizzato disponendo le travi prefabbricate di tipo predalles sulle strutture in elevazione esistenti, aggiungendo l'armatura richiesta dal progetto strutturale ed eseguendo il getto finale di calcestruzzo. Si veda in Figura 48 l'ordine temporale di esecuzione dei settori: prima verrà realizzato il settore di colore rosso, poi quello in verde e infine quello in giallo (questo ordine sarà lo stesso per le successive fasi di realizzazione dei solai).

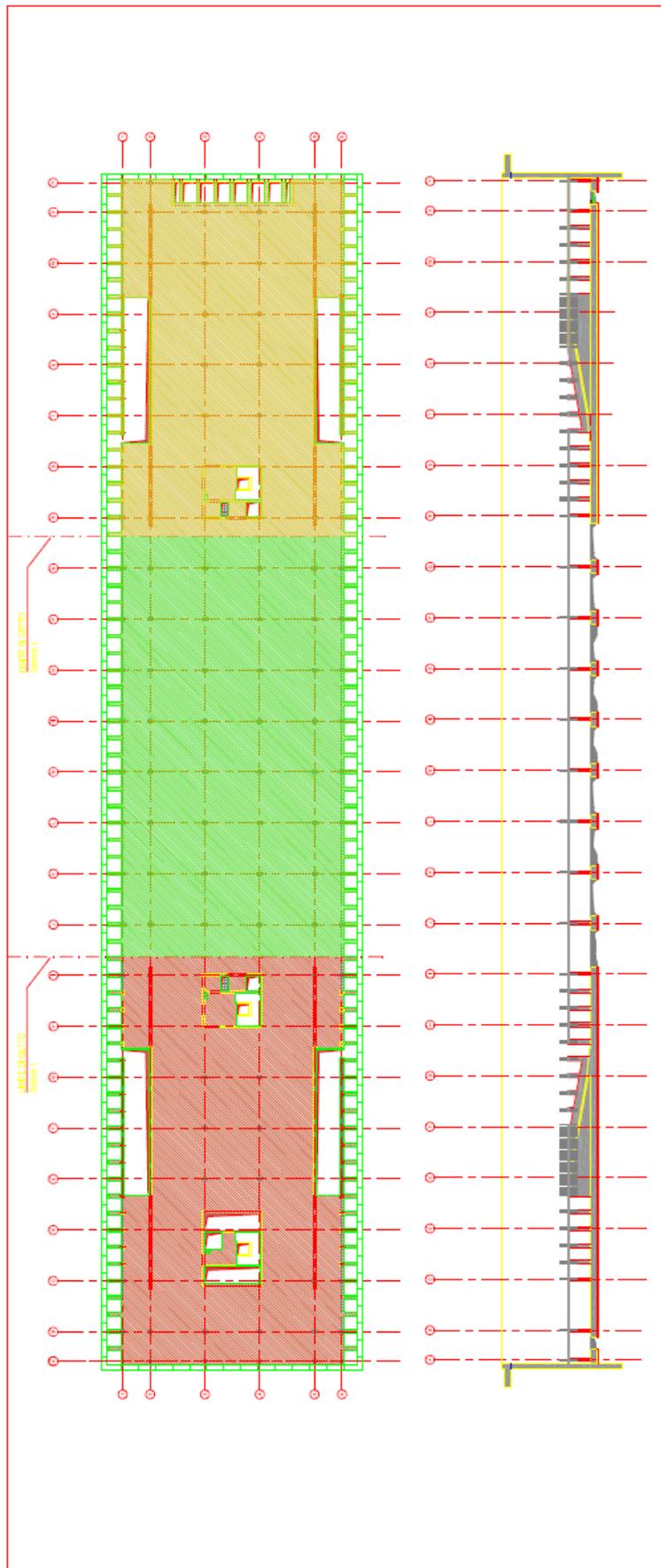


Figura 48 Planimetria della fase 4 del cantiere

4.2.5 Fase 5 – Realizzazione delle elevazioni tra piano -3 e -2

In questa fase si realizzeranno le strutture in elevazione, dunque pilastri, travi e rampe in calcestruzzo armato gettato in opera tra livello -3 e livello -2. Queste opere saranno eseguite in calcestruzzo armato ordinario e prevederanno pilastri e travi di sezione quadrata o rettangolare opportunamente armati e dimensionati in base al progetto strutturale dell'opera.

4.2.6 Fase 6 – Realizzazione del solaio del livello -2

In questa fase si realizzerà il solaio del livello -2 (in tre riprese differenti); esso verrà realizzato disponendo le travi prefabbricate di tipo predalles sulle strutture in elevazione esistenti, aggiungendo l'armatura richiesta dal progetto strutturale ed eseguendo il getto finale di calcestruzzo. L'ordine temporale di esecuzione dei settori è lo stesso per tutti i solai e visibile in Figura 48.

4.2.7 Fase 7 – Realizzazione delle elevazioni tra piano -2 e -1

In questa fase si realizzeranno le strutture in elevazione, dunque pilastri, travi e rampe in calcestruzzo armato gettato in opera tra livello -2 e livello -1. Queste opere saranno eseguite in calcestruzzo armato ordinario e prevederanno pilastri e travi di sezione quadrata o rettangolare opportunamente armati e dimensionati in base al progetto strutturale dell'opera.

4.2.8 Fase 8 – Realizzazione del solaio del livello -1

In questa fase si realizzerà il solaio del livello -1 (in tre riprese differenti); esso verrà realizzato disponendo le travi prefabbricate di tipo predalles sulle strutture in elevazione esistenti, aggiungendo l'armatura richiesta dal progetto strutturale ed eseguendo il getto finale di calcestruzzo. L'ordine temporale di esecuzione dei settori è lo stesso per tutti i solai e visibile in Figura 48.

4.2.9 Fase 9 – Realizzazione delle elevazioni tra piano -1 e 0

In questa fase si realizzeranno le strutture in elevazione, dunque pilastri, travi e rampe in calcestruzzo armato gettato in opera tra livello -1 e livello 0. Queste opere saranno eseguite in calcestruzzo armato ordinario e prevederanno pilastri e travi di sezione quadrata o rettangolare opportunamente armati e dimensionati in base al progetto strutturale dell'opera.

4.2.10 Fase 10 – Costruzione solaio di copertura e realizzazione delle opere di finitura

Questa fase rappresenta l'ultimo passaggio costruttivo del parcheggio sotterraneo. Si realizzerà il solaio di copertura (con le stesse tecniche e operazioni dei solai visti in precedenza) che consentirà all'opera di raggiungere il piano campagna originario (Figura 49). Il solaio sarà realizzato in tre riprese differenti.

L'ultimo passaggio consisterà nella realizzazione delle opere finali che consentiranno alla struttura di diventare veramente funzionale al suo scopo. In particolare, verranno realizzati le impermeabilizzazioni, i cordoli di delimitazione in tutta l'area, le strutture atte ad accogliere la sala di controllo, la vasca antincendio e tutte le opere di finitura, quali manti di usura, intonaci e segnaletiche orizzontali, verticali e luminose.

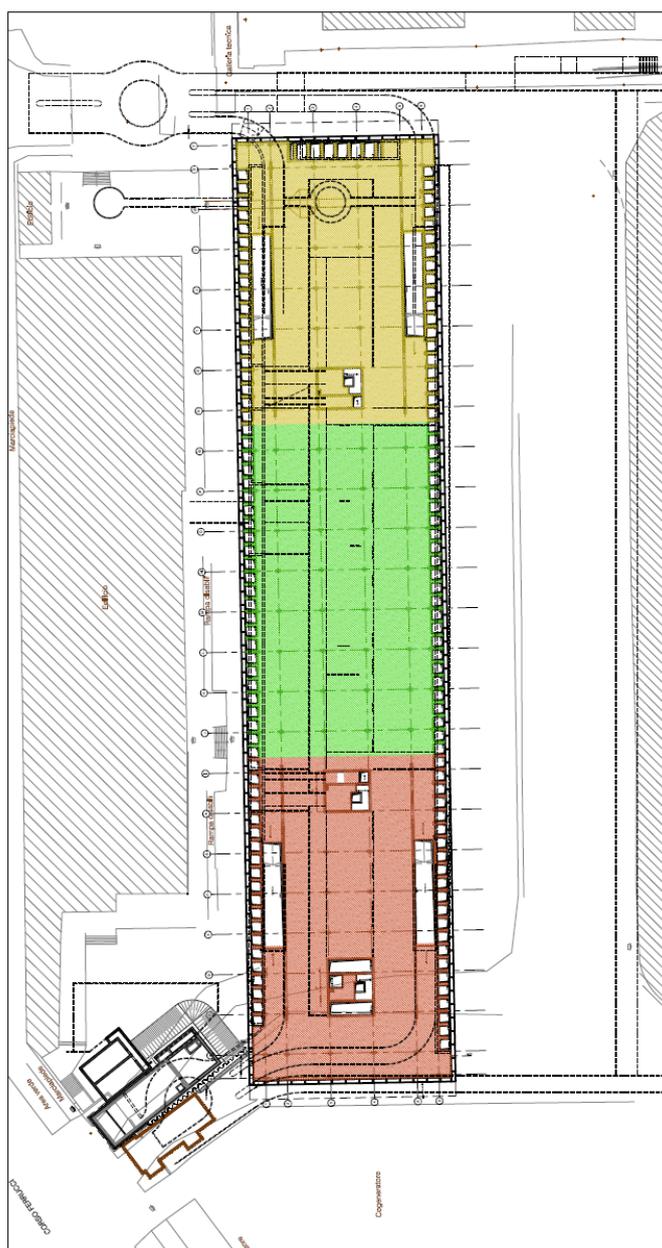


Figura 49 Planimetria della fase 10 del cantiere

4.3 DESCRIZIONE DELL'ATTIVAZIONE TERMICA DELL'OPERA

L'attivazione energetica dei diaframmi del parcheggio interrato oggetto di questa tesi, è un esempio di realizzazione di una geostruttura energetica, cioè un sistema composto da elementi che possono scambiare calore con il terreno integrati all'interno di strutture portanti di fondazione, come già descritto diffusamente in precedenza. L'installazione di questi impianti integrati necessita di una progettazione per fare in modo che l'efficienza dell'opera sia la massima possibile e per avere una valutazione della quantità di calore scambiabile con il sottosuolo.

La costruzione dei diaframmi avverrà con la procedura descritta nel paragrafo 4.1, quindi si eseguirà lo scavo mediante idrofresa, la sistemazione di una gabbia di armatura prefabbricata e il getto di calcestruzzo. La differenza che avremo sarà nella fase di installazione delle gabbie d'armatura; infatti all'interno delle stesse si installeranno i tubi di polietilene dove scorrerà il fluido termovettore.

Questo circuito geotermico, che sarà del tipo "closed loop", potrà essere sfruttato in diversi modi: uno di questi è l'utilizzo del salto termico da parte di una pompa di calore, la quale permette, tramite un certo consumo di energia elettrica, di climatizzare edifici e strutture in genere sia in condizioni di raffrescamento estivo sia di riscaldamento invernale.

Nelle geostrutture energetiche si opera lo sfruttamento del terreno di fondazione per ricavare del calore in inverno e disperderne in estate. La presenza di carichi termici bilanciati nell'arco annuale permette un'ottimizzazione dell'efficienza dell'impianto nel susseguirsi delle stagioni di utilizzo ed evitano l'accumulo di alterazioni termiche nel terreno.

4.3.1 Il sottosuolo di Torino dal punto di vista geotermico

4.3.1.1 Geologia

Dal punto di vista geomorfologico, il territorio della Provincia di Torino è caratterizzato da un settore più esterno di montagna, uno di pianura e uno più interno di collina. Il bordo alpino e quello collinare rappresentano due barriere impermeabili che delimitano il serbatoio delle acque sotterranee della pianura piemontese, condizionandone il deflusso idrico sotterraneo.

Il corso d'acqua principale è rappresentato dal Fiume Po che funziona da livello di base di tutto il reticolato idrografico, formato da numerosi fiumi e torrenti secondari.

L'area della città di Torino sorge al fondo del conoide alluvionale del torrente Dora Riparia. Dal punto di vista morfologico quest'area si presenta molto piatta con una leggera pendenza da ovest verso est con quote da 260 - 270 m s.l.m. a circa 220 m s.l.m. (Bottino & Civita, 1986; Civita & Pizzo, 2001).

Il sottosuolo di Torino è composto da un deposito di sabbie e ghiaie di diverse granulometrie che vanno da una media ad un'alta densità, fino a una profondità di 8 - 10 m. Sotto questo deposito sono spesso presenti lenti di terreno cementato (conglomerato). (Di Donna, 2016). Tra questi depositi più o meno permeabili sono presenti varie falde acquifere.

Il modello geotecnico del sottosuolo di Torino è stato definito avendo a disposizione numerose prove e indagini geotecniche e analisi numeriche eseguite in passato (Barla & Vai 1999, Barla & Barla 2005, Barla & Barla 2012).

4.3.1.2 Acque sotterranee

Il livello della falda acquifera nel territorio di Torino varia da un massimo di 10 m a un minimo di 60 m sotto il piano campagna (Carta della base dell'acquifero superficiale Regione Piemonte). Per una più precisa stima della posizione della falda nel sito interessato dall'opera, si è consultato il Geoportale dell'Arpa Piemonte (Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale), dove si sono ricavati i dati relativi al piezometro denominato PZ_27, ubicato nell'incrocio tra Corso Francesco Ferrucci e Via Pier Carlo Boggio, a pochi metri in linea d'aria dal sito di interesse.

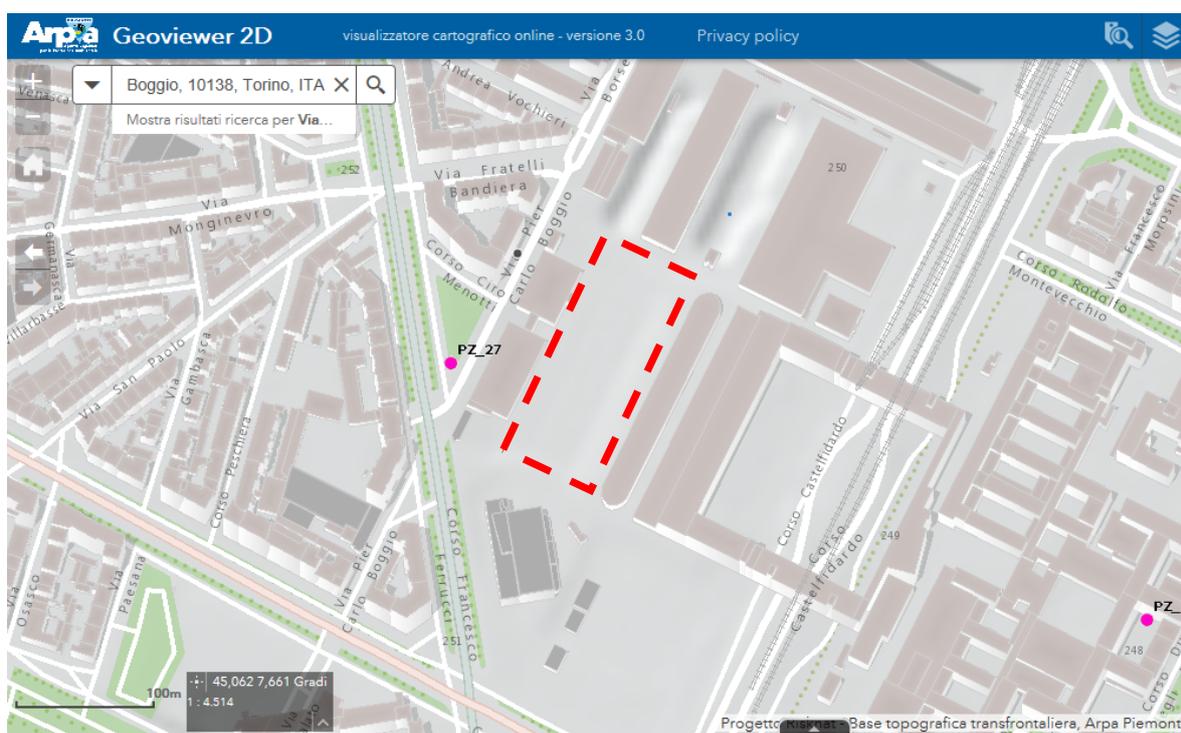


Figura 50 Ubicazione geografica del piezometro PZ_27 utilizzato per stabilire l'altezza di falda (www.arpa.piemonte.it). L'area evidenziata in rosso sarà quella di interesse per la costruzione dell'opera.

Codice piezometro	Comune	Sito	Indirizzo	Località
PZ_27	TORINO			Corso Ferrucci

Data misura	Soggiacenza (m su p.c.)	Grado attendibilità della misura
2012-05-09	22.49	Attendibile
2012-09-21	22.54	Attendibile
2013-07-04	22.33	Attendibile
2013-10-17	22.32	Attendibile
2014-04-10	22.06	Attendibile
2014-10-01	22.24	Attendibile
2015-09-29	22.06	Attendibile
2016-07-14	22.37	Attendibile
2016-12-01	22.48	Attendibile
2017-05-15	22.56	Attendibile
2017-11-02	22.80	Attendibile

Figura 51 Misure semestrali effettuate negli ultimi anni sul livello del piezometro PZ_27 (www.arpa.piemonte.it)

Dai dati ricavati dal Geoportale si è visto che negli anni, la soggiacenza della falda nel sito dell'opera, misurata a partire dal piano campagna, è variata da un massimo di 22,06 m a un minimo di 22,80 m; nel caso dell'opera discussa in questa tesi la falda acquifera si attesta interamente al di sotto dell'opera, in quanto essa arriva alla profondità massima di 17,65 m.

4.3.2 Linee guida per i diaframmi energetici

In questo paragrafo si riportano una serie di raccomandazioni e buone pratiche da usarsi durante il progetto, l'installazione e la realizzazione dei diaframmi energetici in calcestruzzo armato dotati di tubazioni in polietilene. Tali indicazioni sono tratte da un documento del CMFS (Comité Français de Mécanique des Sols).

4.3.2.1 Criteri di progettazione

Un diaframma in calcestruzzo armato ha diverse gabbie di armatura. L'equipaggiamento geotermico è obbligatoriamente montato su ogni gabbia singola, non è possibile avere una tubazione comune su più gabbie.

La distanza tra i tubi geotermici deve essere di almeno 15 cm.

Allo scopo di tenere conto degli scambi di calore tra tubi adiacenti, laddove sia possibile, i tubi di ingresso e di ritorno (quindi aventi due temperature differenti) devono essere tenuti lontani.

Quando i rinforzi non hanno una funzione strutturale definitiva, i tubi devono essere posizionati tenendo conto della successiva messa in opera del calcestruzzo. La distanza minima di 4 volte il diametro del più grande aggregato tra elementi incorporati nel calcestruzzo è da mantenere per una corretta operazione di getto.

Quando i rinforzi hanno una funzione strutturale definitiva, si raccomanda di rispettare la stessa distanza di cui sopra tra le barre longitudinali e i tubi (e quindi occorrerà fissarli alle barre trasversali).

Le eventuali curve della tubazione presente nella parte alta del diaframma devono essere situate ad almeno 20 cm sotto il livello superiore di getto e le curve delle tubazioni alla base devono essere posizionata in modo da non provocare problemi con il getto e il costipamento del calcestruzzo. Si raccomanda che sia almeno 25 cm sopra alla base della gabbia nel caso dell'uso della pompa di betonaggio. In tutti i casi, i tubi devono rimanere protetti ai piedi dalla gabbia di rinforzo.

4.3.2.2 Fissaggio delle tubazioni

I tubi vengono installati ancorandoli con strutture rigide temporanee o permanenti (nel nostro caso le gabbie di armatura in acciaio) le quali consentono il fissaggio degli stessi in conformità con le disposizioni progettuali.

Il fissaggio del tubo a contatto con il rinforzo longitudinale è possibile se esso è compatibile con la funzione strutturale definitiva delle barre. I tubi geotermici devono essere fissati trasversalmente per evitare spostamenti eccessivi. Le spaziature minime da mettere in atto tra una legatura e l'altra sono 1 m nel caso di legature metalliche e 0,5 m nel caso di collari di plastica.

Per una lunghezza di 1 m dalla zona dove vi sono delle curve nel circuito di tubazioni, le legature devono essere fissate ogni 25 cm.

4.3.2.3 Fasi di getto del calcestruzzo

Il calcestruzzo da utilizzarsi deve essere almeno di consistenza S4.

Le gabbie di rinforzo devono essere conformi alle norme vigenti in materia di spaziatura minima e massima tra le barre.

Nel caso di fondazioni gettate sul posto mediante pompa per calcestruzzo, la distanza minima tra il tubo di fuoriuscita del conglomerato e il primo ostacolo è fissata in 4 volte il diametro del più grande aggregato per evitare problemi di costipamento nella parte di fondo scavo.

Nel caso di rinforzi messi in opera dopo il calcestruzzo, si raccomanda di eseguire un test della corretta discesa della gabbia con il suo equipaggiamento geotermico.

I tubi di ingresso e uscita del fluido termovettore devono fuoriuscire dal getto per rendere fattibili i test che si faranno a getto avvenuto.

Il tubo della pompa, durante il getto, non deve essere fatto risalire troppo velocemente, perché potrebbe dare problemi alle tubazioni geotermiche, in particolare in prossimità delle curve.

Il posizionamento di gabbia d'armatura e tubi deve essere controllato durante il getto. È consigliabile riempire i tubi geotermici con acqua durante la fase di getto.

4.3.2.4 Connessioni orizzontali con il collettore generale

La connessione dei tubi che escono dalle geostrutture si farà dopo il completamento di tutte le opere di fondazione da realizzarsi nella zona. I materiali su cui poggeranno le tubazioni devono essere scevri da spigoli vivi; è opportuno adagiarle su un letto di sabbia.

In caso di interro del collettore, è necessario prevedere la posa di apposito cartello segnalatore, riportante dicitura “Tubo geotermico” per l’individuazione del sottoservizio durante eventuali successive fasi di scavo che si rendessero necessarie per qualsiasi esigenza durante la vita utile dell’impianto.

4.3.3 Attivazione energetica dei diaframmi

La planimetria dell’opera si presenta di forma rettangolare, con dimensioni massime di 176,30 m x 38,10 m. La struttura si compone di 4 piani interrati adibiti ad autorimessa. Allo stato attuale non è nota la destinazione dell’area in superficie che, tuttavia, dovrebbe ospitare sovrastrutture leggere a 1 o 2 piani fuori terra.

La profondità massima raggiunta dalle paratie, tenuto conto della revisione dei volumi operata rispetto alle precedenti fasi progettuali, risulta di circa 17,65 m sotto l’attuale piano campagna.

A livello di impianto, lo scambio di calore viene garantito dall’introduzione all’interno delle strutture di una serie di condotti di diametro ridotto per la circolazione di un fluido termovettore secondo le indicazioni fornite di seguito. Tali condotte costituiscono il circuito lato terreno a servizio delle eventuali pompe di calore da installarsi ai fini dello scambio termico estivo ed invernale. Essi avranno diametro esterno 32 mm e saranno in polietilene reticolato ad alta densità. Verranno fissati opportunamente alle armature in acciaio prima dell’esecuzione del getto di calcestruzzo.

Il punto dal quale si può partire operando con un diaframma in calcestruzzo armato è la modularità dello stesso: infatti possiamo suddividere la nostra opera in molti moduli affiancati, all’interno dei quali la disposizione delle serpentine di scambio termico si ripetono uguali tra di loro. Ciò rappresenta, oltre a una notevole semplificazione dai punti di vista meramente tecnici e manutentivi, anche l’impiego di un modello numerico più semplice e contenuto, caratteristiche che facilitano l’implementazione dello stesso in ambiente FEM, e accorciano i tempi computazionali.

4.3.3.1 Scelta del modulo e della disposizione dei tubi

Il modulo che è stato scelto per i calcoli è rappresentato da una sezione rettangolare di dimensioni 2,5 m x 0,8 m. In Figura 52 si può vedere la sezione orizzontale di un modulo di diaframma non equipaggiato con le tubazioni. In Figura 53 la stessa sezione è rappresentata con le tubazioni del sistema geotermico al suo interno (a seconda della diversa configurazione di cui si parlerà in seguito, i due tubi centrali possono essere presenti o no).

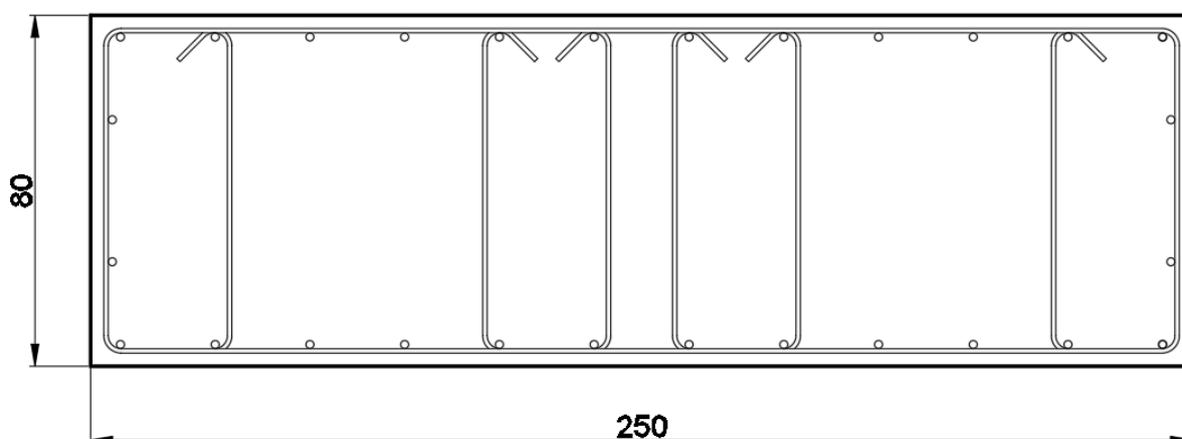


Figura 52 Sezione del modulo di diaframma con armatura. (Dimensioni in cm)

La disposizione dei tubi può essere effettuata in diverse modalità. Vengono qui di seguito proposte alcune disposizioni possibili, partendo dal presupposto che i collettori dei circuiti vengano collocati in testa ai diaframmi, ovvero in appositi pozzetti ispezionabili dal piano campagna. A parità di parametri quali ricoprimento di calcestruzzo delle tubazioni, spessori e diametri delle stesse, la diversa disposizione dei circuiti è un fattore piuttosto influente sulla quantità di calore estraibile dal sottosuolo.

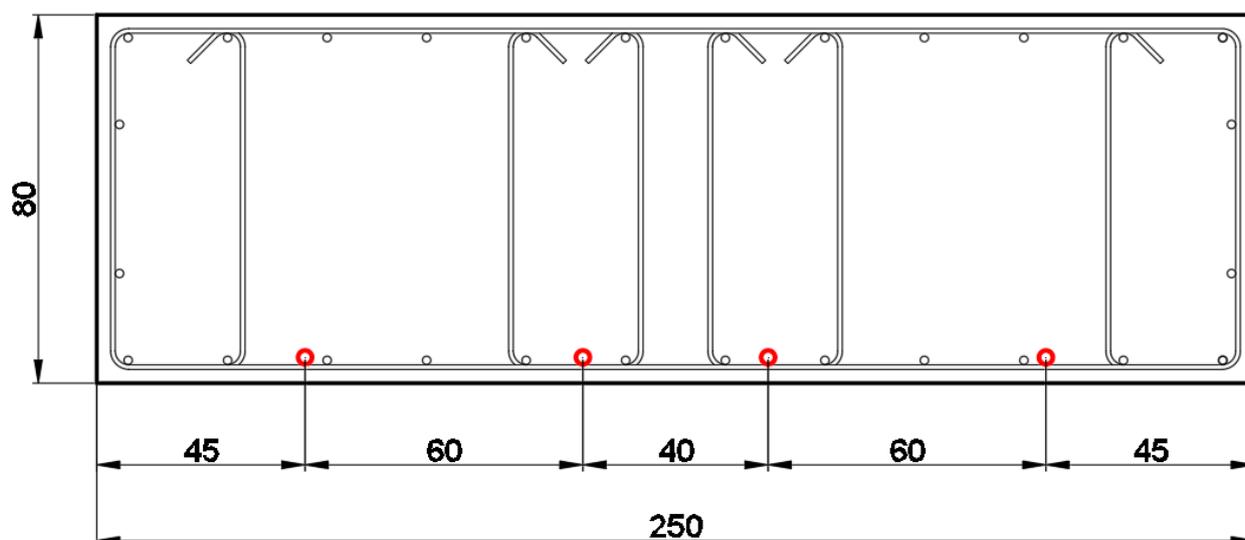


Figura 53 Sezione del modulo di diaframma con l'equipaggiamento per lo scambio termico. Il lato contro terra è quello inferiore. (Dimensioni in cm)

4.3.3.2 Configurazione 1 – “a doppio U”

La prima disposizione prevede che per ogni modulo di diaframma di larghezza 2,5 m siano installati due tubi a U (2 mandate e 2 ritorni) indipendenti tra loro e collegati al collettore principale. Dal punto di vista puramente tecnologico questa è un’ottima disposizione, in quanto il montaggio e l’installazione sulle gabbie di armatura risultano semplici e veloci, dato il limitato numero di curve. L’ingresso del fluido avverrà tramite i tubi esterni, mentre sarà estratto dai tubi più interni.

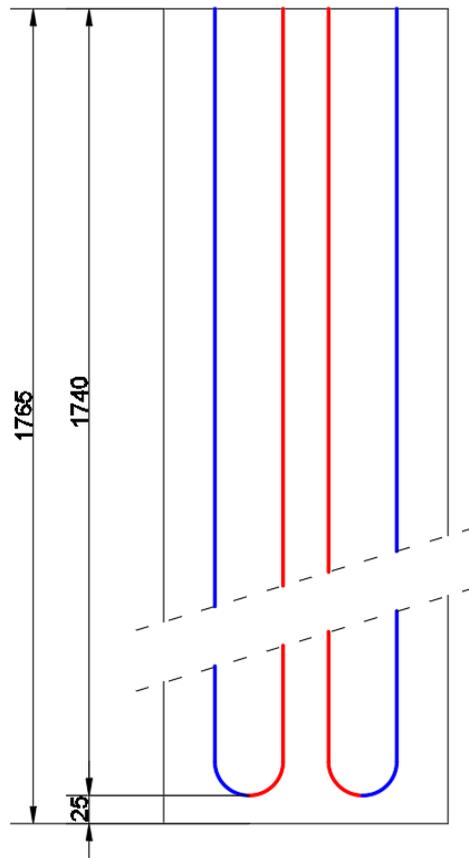


Figura 54 Schema della configurazione 1, a "doppio U" (dimensioni in cm)

4.3.3.3 Configurazione 2 – “a W”

La seconda disposizione è molto simile alla precedente, ma il tubo risulta essere unico, avendo tre curve, una sola mandata e un solo ritorno, creando una forma simile a una “W”. Tecnologicamente è poco più complessa della disposizione 1 e permette di avere meno tubi che fuoriescono in testa ad ogni diaframma (due tubi per ogni diaframma).

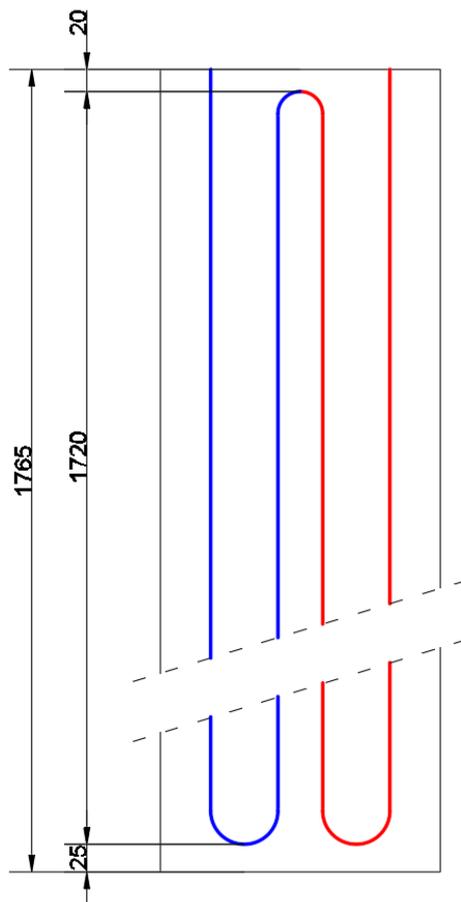


Figura 55 Schema della configurazione, a "W" (dimensioni in cm)

4.3.3.4 Configurazione 3 – “a serpentina”

La terza disposizione prevede, come nella seconda, un unico tubo e due soli tubi che fuoriescono in testa e che raggiungono il collettore (mandata e ritorno). Dal punto di vista tecnologico ci troviamo di fronte ad una disposizione piuttosto complicata, in quanto essa prevede la costruzione di un percorso dei tubi tortuoso con molti tratti rettilinei molto corti e molte curve che li collegano. Senza dubbio il montaggio e l’installazione di un sistema simile comporterebbe un onere pecuniario maggiore rispetto agli altri due.

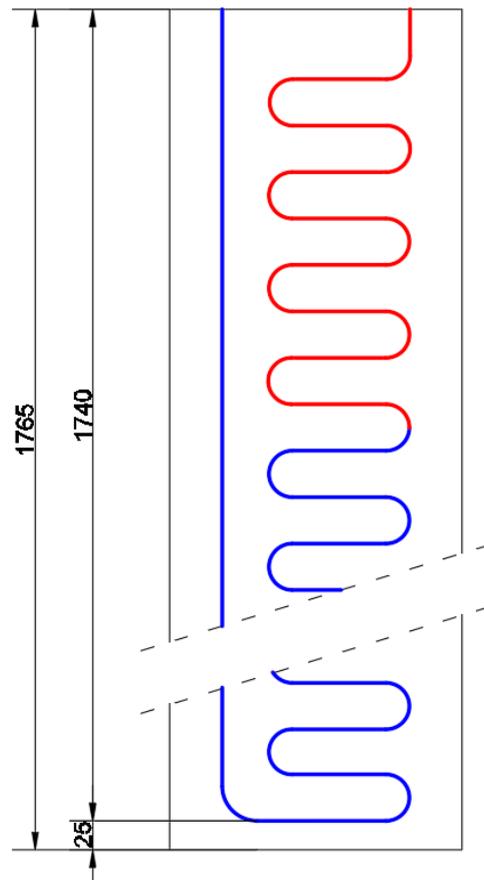


Figura 56 Schema della configurazione 3, a “serpentina” (dimensioni in cm)

Al fine di scegliere la migliore disposizione, possiamo seguire due ragionamenti:

- Scegliere la disposizione migliore dal punto di vista tecnico e di installazione;
- Scegliere la disposizione migliore dal punto di vista di efficienza energetica.

Seguendo la prima idea, si è immediatamente portati a scartare le soluzioni 2 e 3, in quanto la presenza di un numero di curve più elevato rispetto alla 1 e la tortuosità dei tracciati, rendono senza dubbio più difficoltosa nonché onerosa l'installazione da parte degli operai specializzati. Per quanto riguarda il secondo ragionamento, esso non si potrà decidere a priori, ma ci si affiderà al responso dell'analisi di un programma agli elementi finiti su cui saranno implementate le tre configurazioni. Questo passaggio sarà effettuato nel capitolo 5 e 6 di questa tesi.

Sono state seguite le linee guida CMFS seguenti, alcune già citate nel paragrafo 4.2.2:

- Si è mantenuta una spaziatura di non meno di 15 cm tra i singoli rami di tubazione (la minore distanza che si ha è 40 cm);
- Lo schema di circolazione dei fluidi termovettori è stato scelto in maniera tale da allontanare le mandate e i ritorni di flussi, al fine di ridurre le dispersioni termiche tra i rami del circuito stesso;
- Le tubazioni dello scambiatore vanno posizionate all'interno della gabbia di armatura di ogni singolo pannello di diaframma. È fortemente sconsigliata la connessione in serie dei diversi moduli di paratia aventi diverse gabbie di armatura (sono stati previsti, infatti, tutti pannelli indipendenti);
- La tubazione deve rimanere protetta nella parte inferiore della gabbia di armatura per un'altezza pari almeno a 25 cm;
- Il posizionamento della tubazione atta allo scambio termico deve essere fatta mediante legatura con filo di ferro alle armature trasversali nella quantità di n. 1 legatura/metro;
- Nelle zone sommitali e ove il tracciato delle tubazioni prevede andamento non rettilineo la legatura all'armatura deve essere resa più fitta e comunque in quantità non inferiore a n. 4 legature/metro.

Le ultime due raccomandazioni si seguono per fare in modo che durante il getto la tubazione non subisca spostamenti e rimanga ancorata alla sua posizione originale.

5 MODELLO NUMERICO

5.1 IL METODO AGLI ELEMENTI FINITI

Il Metodo agli Elementi Finiti (o Finite Element Method, FEM) è un metodo numerico che consente la risoluzione di un problema fisico che abbia un dominio relativamente complesso, cioè quando risulta complicato, se non impossibile trovare una soluzione analitica in forma chiusa. Il problema nasce dal fatto che solamente in pochi casi si riescono a trovare soluzioni analitiche per i problemi della fisica matematica, perché le condizioni al contorno non sono facili da descrivere, le equazioni differenziali alle derivate parziali non sono lineari, il dominio del problema non è omogeneo e non si ha una regolarità geometrica o le leggi costitutive dei materiali sono non lineari.

Il Metodo agli Elementi Finiti ha una posizione dominante nel panorama delle tecniche numeriche di approssimazione e rappresenta il kernel (cioè il nucleo fondamentale) di gran parte dei codici di analisi automatici disponibili in commercio e si affianca e in certi casi compete con altri metodi numerici con caratteristiche simili, ma applicazioni diverse, ad esempio: il Metodo delle Differenze Finite (FDM), il Metodo dei Volumi Finiti (FVM), il Metodo degli Elementi al Contorno (BEM).

La natura dei problemi che è possibile risolvere con il FEM è vasta: meccanica dei solidi, fluidodinamica, conduzione del calore, elettrostatica...

Esso si occupa di tutti quei problemi della fisica matematica governati da equazioni alle derivate parziali (o Partial Differential Equation, PDE).

La risoluzione di un problema della fisica matematica si riduce all'analisi di una o più variabili. L'analisi di una variabile di interesse ingegneristico (come può essere lo spostamento, la temperatura o la pressione) mediante il metodo FEM di un problema è composta dalla suddivisione del dominio del problema in elementi finiti, dalla rappresentazione del problema mediante equazioni trattabili, e dalla risoluzione di tali equazioni.

5.1.1 Discretizzazione del dominio e identificazione della variabile primaria

La discretizzazione del dominio consiste nella suddivisione del dominio fisico del problema in piccole regioni geometricamente definite da nodi, spigoli, facce o volumi di forma geometricamente semplice, dette elementi finiti. Questa operazione definisce la cosiddetta “mesh” del dominio. Vi possono essere diversi tipi di mesh, sia nell’ambito bidimensionale che tridimensionale.

Una volta discretizzato il dominio del problema, si identifica la variabile primaria che sarà valutata sui nodi, e in seguito, sull’intero dominio. La variabile primaria rappresenta il risultato dei calcoli del metodo FEM e si utilizza per fare valutazioni sul comportamento del modello.

In un problema meccanico si può scegliere come variabile primaria lo spostamento (dal quale si possono ricavare i campi di deformazione e tensione), in un problema termico la temperatura e così via.

Possiamo quindi scrivere la variabile primaria in una formulazione tridimensionale (dipendente dalle coordinate spaziali x, y, z):

$$[u(x, y, z)] = [H(x, y, z)][u]_e$$

Dove H è la funzione di forma, cioè quella che interpola la soluzione tra i valori discreti ottenuti su ogni nodo della mesh. Ora, attraverso la derivazione degli spostamenti e prendendo in considerazione le equazioni costitutive, si possono scrivere le equazioni dell’elemento, ovvero le espressioni di deformazioni e tensioni:

$$[\varepsilon] = [B][u]_e$$

$$[\sigma] = [C][\varepsilon]$$

Dove $[B]$ e $[C]$ sono rispettivamente la matrice delle deformazioni e la matrice costitutiva.

5.1.2 Equazioni degli elementi ed equazioni globali

Si ricavano le matrici di rigidezza che vanno a costituire le equazioni che governeranno ogni singolo elemento, mediante l’utilizzo del Principio dei Lavori Virtuali.

$$[F]_e = [k]_e[u]_e$$

Dove:

$$[k]_e = \int_{V_e} [B]_e^T [C]_e [B]_e dV_e$$

Successivamente, le equazioni di ogni elemento vengono assemblate in un unico sistema lineare con una unica matrice di rigidezza globale.

$$[R] = [K][u]$$

Dove:

$$[K] = \sum_e \int_{V_e} [B]_e^T [C]_e [B]_e dV_e$$

e $[R]$ è il vettore delle forze al nodo.

5.1.3 Condizioni al contorno e risoluzione delle equazioni globali

Il problema fisico deve essere corredato dalle condizioni al contorno assegnate sul dominio in questione. Esse andranno a integrare il sistema lineare trovato in precedenza e soprattutto consentiranno di ottenere un'unica soluzione al problema. Tra le condizioni al contorno utilizzate nel nostro ambito, possiamo trovare le condizioni di Dirichlet, Neuman e Cauchy, più diffusamente spiegate nel paragrafo 5.2.3.

La risoluzione del sistema lineare globale consentirà di ottenere il valore della variabile in ogni nodo del dominio discretizzato. In seguito, mediante le funzioni interpolanti sarà possibile estendere la soluzione in maniera continua sul dominio, mentre grazie alle equazioni costitutive si potranno ricavare altre grandezze utili ai fini dell'analisi.

Come si è visto, il FEM permette di ridurre un problema governato da equazioni complesse e non lineari e relativo a un dominio irregolare e non omogeneo, nella scrittura e successiva risoluzione di un sistema lineare di equazioni, facilmente computabile da un calcolatore elettronico.

5.2 PROBLEMA ACCOPPIATO

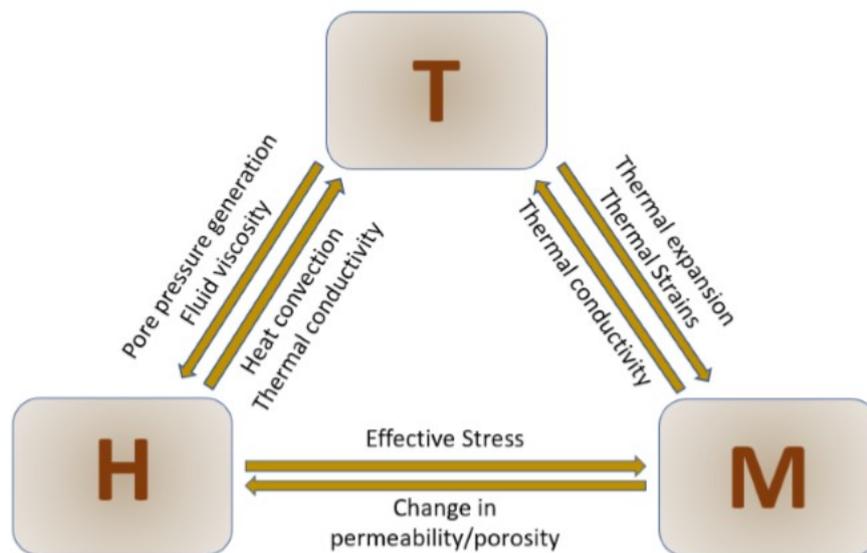


Figura 57 Schematizzazione delle relazioni che intercorrono tra le componenti del problema Termo - Idro - Meccanico

I processi termoidro-meccanici (THM) accoppiati con flusso multifase sono presenti in molti ambiti delle scienze applicate. Alcuni esempi sono lo smaltimento mediante lo stoccaggio sotterraneo dei rifiuti residui delle centrali nucleari, l'iniezione sotterranea profonda di rifiuti pericolosi, l'estrazione dai giacimenti di petrolio e gas, lo stoccaggio sotterraneo di gas naturale e, nel nostro caso, l'estrazione di energia geotermica. Sono stati condotti numerosi studi sugli aspetti teorici e sperimentali dell'accoppiamento THM. Seguendo gli studi di Biot, il primo a indagare la teoria poroelastica, molti ricercatori hanno studiato una varietà di problemi quasi-statici e dinamici e analizzato i comportamenti di accoppiamento THM di mezzi saturi. Questi studi erano basati su ipotesi di bassa temperatura, incomprimibilità, equilibrio termico di fasi solide e fluide, comportamento elastico lineare della fase solida, flusso di calore non convettivo, assenza di cambio di fase dei fluidi e proprietà costanti del materiale.

Sono state trovate alcune soluzioni analitiche per modelli THM con proprietà costanti del materiale soggetti a piccoli cambiamenti dallo stato iniziale. Queste soluzioni sono tutte basate sulle leggi classiche di Darcy e di Fourier per il flusso del fluido e flusso di calore.

I mezzi porosi incontrati in molti settori ingegneristici sono da considerarsi, però, insaturi. Vi sono stati sviluppi recenti relativi ai suoli insaturi, in parte realizzati mediante esperienze di laboratorio, in parte grazie a simulazioni numeriche.

Un approccio comunemente usato per la modellazione del flusso d'acqua nel mezzo insaturo è l'approccio del continuo. Armero et al. ha decomposto il fluido contenuto in parti elastiche e plastiche, estendendo la teoria di Biot. Borja e Alarc hanno ottenuto un modello basato sulla teoria della miscela combinata mediante il concetto di frazione di volume. Diebels e Ehlers hanno sviluppato un modello considerando l'effetto dinamico. Un modello leggermente diverso di Wilmanski e Kempa ha introdotto la porosità nell'equazione di equilibrio (Weizong et al. 2009).

Il problema completo (THM) comprendente la parte termica (T), la parte idraulica (H) e la parte meccanica (M) può essere ricondotto e semplificato nei seguenti problemi accoppiati:

- Problema termoidraulico (TH);
- problema termomeccanico (TM);
- problema idromeccanico (HM).

Il problema che andremo ad analizzare all'interno di questa tesi appartiene alla categoria dei problemi termoidraulici (TH); le equazioni che governano questo problema sono le seguenti:

- Equazione di conservazione della massa;
- Legge di Darcy;
- Equazione di conservazione dell'energia.

Si suddivide il problema nelle due componenti principali: il processo idraulico e il processo di trasferimento del calore.

5.2.1 Processo Idraulico

Le equazioni di conservazione della massa della fase fluida e della fase solida del terreno sono espresse dalle seguenti relazioni:

$$\frac{\partial}{\partial t}(n\rho_w) = -\nabla \cdot (n\rho_w \mathbf{v}_w)$$

$$\frac{\partial[(1-n)\rho_s]}{\partial t} = -\nabla \cdot [(1-n)\rho_s \mathbf{v}_s]$$

dove:

t : variabile temporale

\mathbf{v} : velocità dell'acqua (w) o dello scheletro solido (s), $\left[\frac{m}{s}\right]$

ρ_w : densità dell'acqua, $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

n : porosità del terreno, $[-]$

Concentrandoci sulla fase fluida del mezzo e considerando il fluido incomprimibile, l'equazione si semplifica:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\nabla \cdot (n\mathbf{v}_w)$$

La Legge di Darcy è espressa dalla seguente relazione:

$$\mathbf{v} = -K\nabla h$$

Dove:

v : velocità di filtrazione, $\left[\frac{m}{s}\right]$

h : quota piezometrica, $h = z + \frac{p}{\rho_w g}$, $[m]$

in cui:

z : quota geometrica, $[m]$

p : pressione, $[Pa]$

g : accelerazione gravitazionale, $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

ρ_w : densità dell'acqua, $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

K : matrice di conduttività idraulica, $\left[\frac{m}{s}\right]$.

La conduttività idraulica K di solito mostra una variabilità spaziale a causa della non omogeneità dei mezzi porosi. Inoltre, può mostrare un comportamento direzionale che causa quindi condizioni anisotrope. Tali condizioni prevalgono nelle falde acquifere in cui si osserva la stratificazione orizzontale, riducendo così le componenti di conduttività idraulica a due, le conduttività idrauliche orizzontali e verticali. Combinando le due equazioni precedenti, otteniamo:

$$\nabla \cdot (nK\nabla h) = \frac{\partial n}{\partial t}$$

5.2.2 Processo di trasferimento del calore

Per quanto riguarda il trasferimento del calore, è necessario ricordare che esso può avvenire attraverso tre meccanismi principali: conduzione, convezione e radiazione.

La **conduzione** del calore è il meccanismo principale di scambio termico e descrive il processo attraverso il quale il calore si diffonde attraverso un solido, liquido o gas da processi di interazione molecolare e senza scambio di materia. Secondo la teoria cinetica, la temperatura è proporzionale all'energia cinetica molecolare media e l'energia interna di un corpo altro non è che la somma delle energie cinetiche e potenziali delle molecole che lo costituiscono.

La conduzione si verifica quando c'è un contatto tra due corpi a diversa temperatura ed è strettamente collegato alla conduttività termica, la quale descrive quanto è buono il mezzo nel condurre il calore. Il trasferimento di calore può essere definito con la legge di Fourier:

$$\dot{Q}_{cond} = -\lambda \cdot A \cdot \nabla T$$

dove:

\dot{Q} : calore trasferito per conduzione, [W]

A : Area della superficie di passaggio del flusso termico, [m²]

λ : conduttività termica, $\left[\frac{W}{mK}\right]$

∇T : gradiente di temperatura, $\left[\frac{K}{m}\right]$

La Legge di Fourier esprime la dipendenza diretta tra il flusso di calore e la differenza o gradiente di temperatura all'interno di un corpo: tanto più è intenso tale gradiente, tanto più calore fluirà dalle regioni a temperatura maggiore verso quelle a temperatura minore come previsto dal 2° Principio della Termodinamica; il segno negativo nell'equazione si ha perché il flusso termico è diretto nel verso delle temperature decrescenti, e quindi ha segno opposto al gradiente termico.

La **convezione** è il meccanismo alla base dello scambio di calore tra una superficie solida e un fluido. Comprende diversi meccanismi della termocinetica, come conduzione, irraggiamento, accumulo termico e trasporto di massa. Infatti, ad esempio, le particelle del fluido a diretto contatto con la parete solida scambiano con essa calore per mezzo della conduzione, in quanto esse sono localmente ferme sulla superficie. Quando esse sono trasportate in un'altra regione dello spazio con particelle a temperatura diversa, scambiano calore con queste ultime tramite convezione.

La convezione si può distinguere tra naturale e forzata: nella convezione naturale il movimento delle particelle del fluido è unicamente dovuto ai gradienti di densità innescati dalla differenza di temperatura nelle varie regioni del fluido stesso; la convezione forzata si ha quando il moto è indotto da azioni esterne.

La convezione non è trascurabile quando abbiamo a che fare con mezzi porosi saturi con flusso di acqua. Fluidi come l'acqua immagazzinano calore, quindi spostare l'acqua significa trasferire e scambiare il calore.

In questo lo scambio di calore tra una parete e un fluido si valuta mediante la Legge di Newton:

$$\dot{Q}_{conv} = c_w \rho_w \mathbf{v} \cdot A(\Delta T)$$

Dove:

\dot{Q}_{conv} : flusso termico trasferito per convezione, [W]

c_w : calore specifico dell'acqua, $\left[\frac{J}{kgK}\right]$

ρ_w : densità dell'acqua, $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

\mathbf{v} : velocità dell'acqua, $\left[\frac{m}{s}\right]$

A : area della superficie di passaggio del flusso termico, [m^2]

ΔT : differenza di temperatura, [K]

L'**irraggiamento** è fondamentalmente la trasmissione del calore attraverso le onde elettromagnetiche, avviene alla velocità della luce (≈ 299792458 m/s) sotto forma di quanti di energia che si propagano con leggi che fanno capo alla Teoria Ondulatoria. Le onde elettromagnetiche si propagano in qualunque mezzo, anche nel vuoto.

Il calore trasferito per irraggiamento può essere trascurato quando si tratta di energia geotermica superficiale. Le temperature coinvolte sono basse e l'energia irradiata è proporzionale alla quarta potenza della temperatura assoluta (Stefan-Boltzmann, 1884):

$$\dot{Q}_{irr} = A_1 F_{12} \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

Dove:

\dot{Q}_{irr} : Flusso termico trasferito per irraggiamento, [W]

A_1 : area della superficie di uno dei due corpi scambianti calore per irraggiamento, [m^2]

F_{12} : fattore di vista tra la superficie 1 e la superficie 2 (è un fattore che si valuta mediante considerazioni sulla geometria e la disposizione spaziale delle superfici considerate, [-])

σ : costante di Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$)

T_1, T_2 : temperatura del corpo 1 e temperatura del corpo 2, [K].

Il principio di conservazione dell'energia afferma che la variazione del contenuto energetico è uguale all'afflusso di energia meno il deflusso su un volume di controllo unitario aumentato della produzione di energia in quel volume. Quindi tenendo conto dei meccanismi di scambio termico di conduzione e di convezione, si può scrivere la seguente relazione:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + c_w \rho_w \nabla \cdot (\mathbf{v} \Delta T)$$

Dove:

$c\rho \frac{\partial T}{\partial t}$: parte relativa all'accumulo di calore nel volume di controllo, [$\frac{J}{m^3 s}$]

in cui:

$c\rho$: capacità termica del terreno, [$\frac{J}{m^3 K}$] è un termine che comprende sia lo scheletro solido che la parte liquida, secondo l'espressione $c\rho = n c_w \rho_w + (1 - n) c_s \rho_s$, dove i pedici dei calori specifici e delle densità si riferiscono all'acqua (w) e alla parte solida (s).

Il termine n indica la porosità del terreno, [-]

$\frac{\partial T}{\partial t}$: derivata della temperatura rispetto al tempo, $\left[\frac{K}{s}\right]$

$\nabla \cdot (\lambda \nabla T)$: termine relativo alla conduzione, $\left[\frac{J}{m^3 s}\right]$

in cui:

λ : conduttività termica del terreno, $\left[\frac{W}{mK}\right]$: secondo l'espressione $\lambda = n\lambda_w + (1 - n)\lambda_s$

$c_w \rho_w \nabla \cdot (v \Delta T)$: termine relativo alla convezione, $\left[\frac{J}{m^3 s}\right]$.

5.2.3 Condizioni al contorno

La soluzione delle equazioni differenziali alle derivate parziali presentate in precedenza descrive il campo delle temperature o delle pressioni su tutto il dominio considerato. Per arrivare al risultato ricercato, vi è la necessità di stabilire le opportune condizioni al contorno e iniziali del problema. Mentre le condizioni iniziali sono quelle relative all'istante iniziale di analisi del problema (al tempo t_0), le condizioni al contorno riguardano la frontiera esterna del dominio e possono essere di tre tipi diversi:

- Condizione al contorno di Dirichlet;
- Condizione al contorno di Neumann;
- Condizione al contorno di Cauchy.

La condizione al contorno di Dirichlet implica la conoscenza del valore esatto e costante della variabile incognita considerata (ad esempio la temperatura o la pressione) su tutto o parte del dominio.

La condizione di Neumann presuppone la conoscenza della derivata temporale della variabile incognita considerata rispetto al tempo (dunque ne considera il flusso).

Nella condizione di Cauchy in sono dati il valore della funzione incognita sui bordi del dominio di definizione del problema differenziale, e il valore della sua derivata direzionale normale a tale superficie. Ciò corrisponde a imporre sia una condizione al contorno di Dirichlet che una condizione al contorno di Neumann.

5.3 IL PROGRAMMA FEFLOW

FEFlow (Finite Element subsurface Flow system) è un codice numerico agli elementi finiti utilizzato per la simulazione dei processi di flusso e trasporto in mezzi porosi, in condizioni sature ed insature. Questo programma permette di simulare le dinamiche di flusso sotterraneo in situazioni complesse ed utilizza un approccio agli elementi finiti consentendo la discretizzazione spaziale del dominio e la rappresentazione degli elementi naturali e delle condizioni di anisotropia.

Esso viene utilizzato per simulare tutti i tipi di flusso in due o in tre dimensioni relativi a processi di trasporto nel sottosuolo e nei mezzi porosi su scale che vanno dai millimetri alle centinaia di chilometri.

Le diverse applicazioni trattate da Feflow comprendono il flusso del fluido nelle falde acquifere, i processi di trasporto del calore e del contaminante, la gestione delle acque sotterranee, la bonifica, l'energia geotermica estraibile, la gestione delle miniere, l'intrusione di acqua salata nelle falde e la fisica dei mezzi porosi di uso industriale.

6 SIMULAZIONE NUMERICA DELL'ATTIVAZIONE TERMICA DEI DIAFRAMMI

6.1 REALIZZAZIONE DEL MODELLO NUMERICO

Passando dalla geostruttura energetica reale al modello utilizzato per eseguire le analisi al calcolatore, occorrerà fare delle semplificazioni, sia dal punto di vista delle dimensioni geometriche, sia da quello riguardante le leggi della fisica matematica che si andranno ad applicare per simulare i fenomeni termici di nostro interesse. Queste operazioni faranno scaturire il cosiddetto modello di calcolo, cioè una struttura tridimensionale creata dall'operatore, in questo caso mediante il software FEFlow, che dovrà ricreare più fedelmente possibile il comportamento della struttura durante l'espletamento delle sue funzioni. Il modello, dovrà per forza di cose essere semplificato, sia per motivi meramente computazionali, ovvero dovuti ai limiti delle macchine e dei programmi utilizzati per eseguire i calcoli, sia perché il modello va concepito in maniera più o meno raffinata a seconda del problema proposto, in quanto, in alcuni casi, i modelli troppo raffinati fanno perdere di vista l'obiettivo principale dello specifico problema, ovvero simulare il problema in modo da ricavarne dei valori quantitativamente corretti, senza dilungare immotivatamente i tempi computazionali.

6.1.1 Geometria del modello e realizzazione del modello bidimensionale

Il modello bidimensionale proposto riguarda una sezione trasversale del diaframma che sostiene il terreno del parcheggio interrato. Tale sezione prenderà in considerazione il diaframma in calcestruzzo armato, il terreno a monte, pianeggiante e coincidente con il piano campagna esistente, e il livello del terreno di valle, coincidente con la massima profondità di scavo del parcheggio. Si considerano trascurabili nel modello le presenze delle solette dei piani e la soletta

di base dell'opera. Dunque, l'unico elemento in calcestruzzo armato presente sarà il diaframma. Esso sarà modellato come un rettangolo avente un'altezza di 17,65 m e spessore di 0,80 m. I contorni del modello sono stati eseguiti ad una distanza di 50 m per quanto riguarda il terreno a monte, 30 m per il terreno a valle e si estendono a 20 m al di sotto del piede del diaframma.

La falda acquifera è stata posizionata a 22,50 m di profondità rispetto al piano campagna, in accordo con il paragrafo 4.3.1 e con i dati dell'Arpa Piemonte.

Il modello si estende, nel senso della profondità, per 2,5 m; questa quantità rappresenta la larghezza di un modulo di diaframma contenente una determinata geometria delle serpentine in polietilene.

Al fine di una più comoda modellazione con il programma usato nei punti successivi, si sono già disegnate le tubazioni le quali, viste dalla sezione del modello, risultano composte da una linea lungo il diaframma. la geometria del modello bidimensionale è visibile in Figura 58.

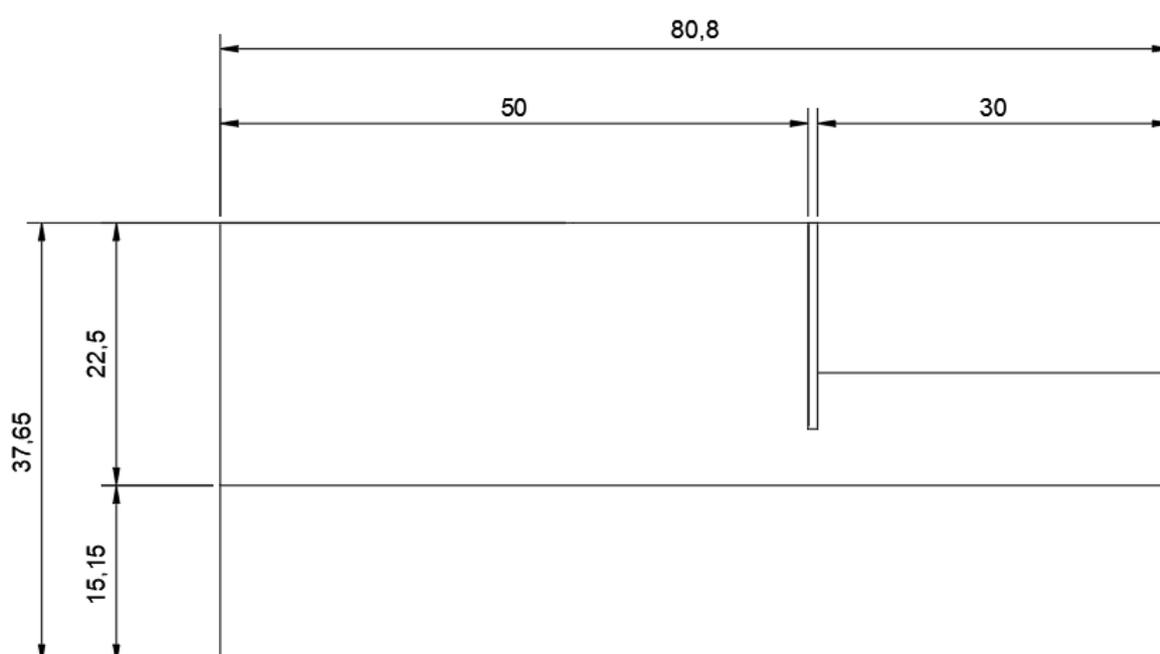


Figura 58 Rappresentazione del modello bidimensionale utilizzato su FEFLOW (dimensioni in metri)

La rappresentazione del modello è stata realizzata con il programma AutoCad, in formato vettoriale .dxf, e successivamente importata nel programma FEFLOW. Attraverso i comandi "line" e "polygon" si sono ripassate le entità esistenti del modello al fine di ottenere la cosiddetta "supermesh", cioè l'oggetto che andrà suddiviso in elementi finiti e successivamente utilizzato per le simulazioni.

FEFLOW permette una discretizzazione del modello automatica secondo vari tipi di elementi:

- Triangle;
- GridBuilder;
- Advancing Front.

Si possono scegliere sia elementi triangolari, che quadrangolari. Per questa analisi la scelta ricade su elementi Triangle, più adatti per le analisi di flusso. La mesh, automaticamente creata da

FEFlow, viene infittita nelle aree del modello dove sono situati il diaframma e le tubazioni poste al suo interno. Per fare ciò si è variato il fattore “refine factor” e si è portato a 8. L’infittimento vicino alle zone di interesse è necessario per operare delle simulazioni con risultati più precisi.

6.1.2 Suddivisione del modello in elementi finiti tridimensionali

Il modello bidimensionale descritto nel paragrafo precedente viene ricondotto ad un modello tridimensionale mediante l’utilizzo degli “slices” e dei “layers”. In sostanza FEFLOW crea delle copie del modello discretizzato bidimensionale, gli “slices”, e le pone parallelamente ad esso alle distanze volute. Tra questi “slices” saranno posti i “layers” formati dagli elementi tridimensionali. Al termine di questo processo si avrà il modello tridimensionale con la discretizzazione già ottenuta, formato da prismi a base triangolare. Si è deciso in questo passaggio di eseguire gli “slices” in corrispondenza della posizione delle tubazioni, che andremo a modellare successivamente.

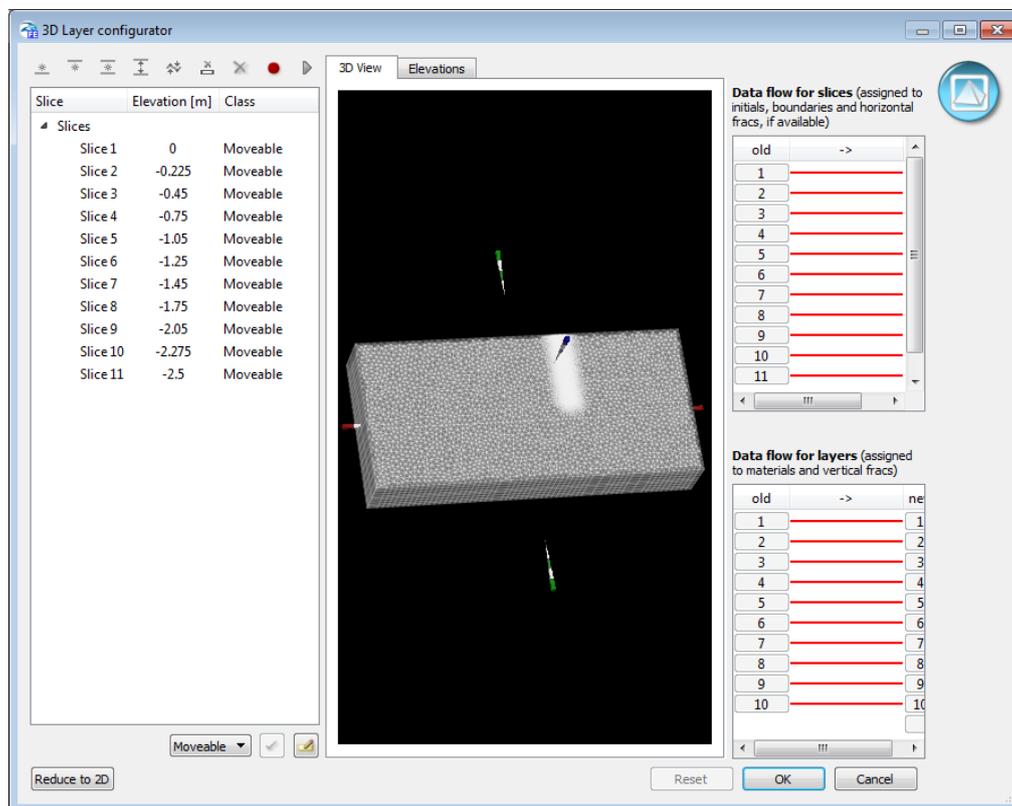


Figura 59 Realizzazione del modello trimidimensionale tramite la creazione degli "slices" e dei "layers"

Le tre configurazioni che si tratteranno in questo studio saranno rappresentate in modelli che si sviluppano in profondità per 2,50 m. Mentre le prime due configurazioni avranno 11 “slices” e 10 “layers”, la terza sarà composta da 13 “slices” e 14 “layers” per motivi di diverse geometrie delle tubazioni.

Il modello tridimensionale che si ottiene è rappresentato in Figura 60 ed è costituito da 123840 elementi e 69135 nodi.

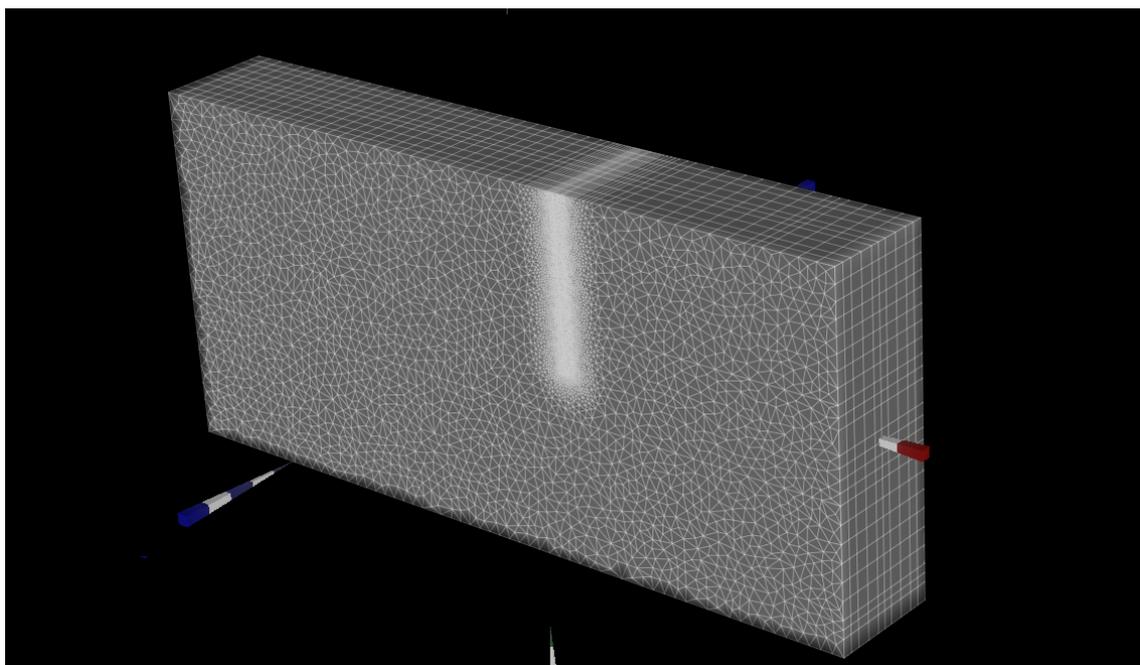


Figura 60 Rappresentazione del modello tridimensionale ottenuto con FEFLOW

In seguito, tramite l'interfaccia "Problem settings" si sono scelte le impostazioni relative alla risoluzione del problema.

L'acquifero è stato posto in condizioni sature, si è incluso nel problema il trasporto di calore e si sono scelti gli stati transitori sia per il flusso di falda che per il trasporto di calore (Figura 61).

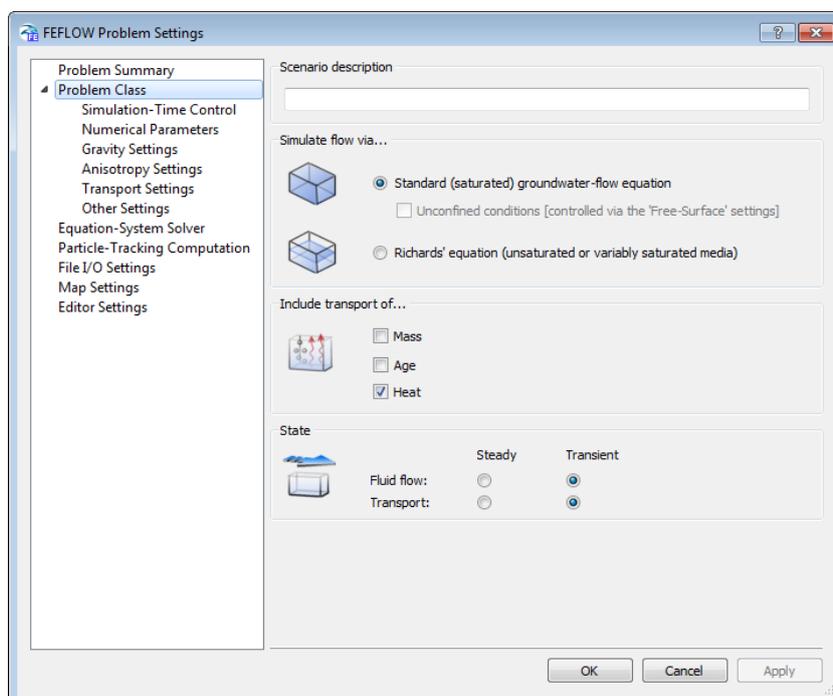


Figura 61 Interfaccia delle impostazioni del problema

6.1.3 Parametri dei materiali

I parametri utilizzati per la modellazione del problema affrontato da questa tesi, sono i classici parametri della geotecnica, dell'idraulica e dell'ambito termico. Di seguito ne vengono descritti la loro natura matematica e il ruolo che hanno all'interno nell'analisi numerica.

6.1.3.1 Porosità n

La porosità si definisce come il rapporto tra il volume dei vuoti V_v e il volume totale V . È un rapporto adimensionale che indica la percentuale di vuoti sul volume di materiale poroso preso in considerazione.

$$n = \frac{V_v}{V} [-]$$

6.1.3.2 Coefficiente di conducibilità idraulica K

La conducibilità idraulica si definisce come la capacità di un mezzo poroso di lasciarsi attraversare dai fluidi. Dipende sia dalla natura del mezzo poroso, sia dalle proprietà del fluido permeante (come densità e viscosità). Dimensionalmente è rappresentato da una velocità ed è definita come:

$$K = k \frac{\rho g}{\mu} \left[\frac{m}{s} \right]$$

Dove:

ρ è la densità del fluido, μ è la viscosità del fluido, g è l'accelerazione di gravità e k la permeabilità del mezzo poroso.

6.1.3.3 Coefficiente di immagazzinamento S

Il coefficiente di immagazzinamento è definito come la quantità di acqua per unità di volume. L'unità di volume considerata è di natura satura e l'acqua in oggetto è quella che viene immagazzinata o espulsa a causa della comprimibilità dello stesso scheletro minerale. Tale parametro viene espresso nell'unità di misura $[m^{-1}]$.

6.1.3.4 Capacità termica C

La capacità termica si definisce come la quantità di calore necessario per elevare di un grado la temperatura di un determinato corpo. La relazione è la seguente:

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \left[\frac{J}{K} \right]$$

6.1.3.5 Conducibilità termica λ

La conducibilità termica si definisce come la potenza termica che si trasmette attraverso uno spessore unitario del materiale per unità di superficie e per differenza di temperatura unitaria. essa misura l'attitudine di una sostanza a farsi attraversare e a trasmettere il calore.

La conducibilità termica viene espressa con l'unità di misura $\left[\frac{W}{mK} \right]$.

6.1.3.6 Dispersione termica

La dispersione termica quantifica, durante i processi di filtrazione, il trasporto di massa. Questo parametro viene espresso mediante l'unità di misura di lunghezza lineare m .

Il parcheggio interrato di prossima costruzione sarà ubicato a Torino. Si sono raccolti i parametri di interesse per la realizzazione e impostazione del problema numerico sul software FEFlow. I parametri idraulici e idrodispersivi sono riportati in Tabella 4 e sono il risultato di prove di pompaggio, con monitoraggio della temperatura, eseguite per tre mesi consecutivi (Barla et al., 2013).

L'acqua dell'acquifero ha una temperatura media durante l'anno di 14°C.

Conduttività idraulica orizzontale	k_h [m/s]	$4,15 \cdot 10^{-3}$
Conduttività idraulica verticale	k_v [m/s]	$2,074 \cdot 10^{-4}$
Porosità	n [-]	0,25
Capacità termica dell'acqua	$\rho_w c_w$ [MJ/m ³ /K]	4,2
Capacità termica della fase solida	$\rho_s c_s$ [MJ/m ³ /K]	2,0
Conduttività termica dell'acqua	λ_w [W/m/K]	0,65
Conduttività termica della parte solida	λ_s [W/m/K]	2,8
Dispersione longitudinale	α_L [m]	3,1
Dispersione trasversale	α_T [m]	0,3
Coefficiente di immagazzinamento	S [m ⁻¹]	10^{-4}

Tabella 4 Parametri del terreno nella zona di Torino (Barla et al., 2013)

Nella Tabella 5 si sono riportati i parametri relativi all'aria, in quanto si considera che il diaframma in oggetto sia a contatto sia con il terreno che con l'aria presente nello spazio creato dall'opera.

Nella Tabella 6 sono riportati i parametri relativi al calcestruzzo mentre nella Tabella 7 quelli relativi alle tubazioni in polietilene ad alta densità.

Conduttività idraulica isotropa	$k_x = k_y = k_z$ [m/s]	10^{-2}
Porosità	n [-]	1
Capacità termica dell'aria	$\rho_a c_a$ [MJ/m ³ /K]	10^{-3}
Conduttività termica dell'aria	λ_a [W/m/K]	0,53
Dispersione longitudinale	α_L [m]	5
Dispersione trasversale	α_T [m]	0,5
Coefficiente di immagazzinamento	S [m ⁻¹]	10^{-4}

Tabella 5 Parametri dell'aria (Di Donna & Barla, 2016)

Conduttività idraulica isotropa	$k_x = k_y = k_z$ [m/s]	10^{-16}
Porosità	n [-]	0
Capacità termica del calcestruzzo	$\rho_c c_c$ [MJ/m ³ /K]	2,19
Conduttività termica del calcestruzzo	λ_c [W/m/K]	2,3
Coefficiente di immagazzinamento	S [m ⁻¹]	10^{-4}

Tabella 6 Parametri del calcestruzzo (Di Donna & Barla, 2016)

Diametro esterno	d [mm]	32
Spessore pareti del tubo	s [mm]	2,3
Area trasversale	A [cm ²]	5,89
Raggio idraulico	R [cm]	6,85
Capacità termica del fluido	$\rho_w c_w$ [MJ/m ³ /K]	4,2
Conduttività termica del fluido	λ_w [W/m/K]	0,65
Coefficiente di immagazzinamento	S [m ⁻¹]	10^{-4}

Tabella 7 Parametri relativi ai tubi utilizzati per lo scambio termico (Di Donna & Barla, 2016)

6.1.4 Condizioni iniziali e al contorno

Il programma FEFlow permette di impostare i diversi tipi di condizioni iniziali e al contorno degli ambiti termico e idraulico del problema.

6.1.4.1 Condizioni termiche

All'interno del problema preso in considerazione, si hanno regioni poste a temperatura costante e altre che avranno delle variazioni in base all'andamento del tempo della simulazione.

La temperatura del sottosuolo di Torino a partire dalla profondità di 15 m sotto il piano campagna e andando in profondità è pari a 14 °C, quindi si utilizza la condizione "Temperature BC" (BC corrisponde a Boundary Condition) sui nodi della parte inferiore del dominio e parte del dominio laterale, ove la falda acquifera fluisce all'interno del modello (Figura 65). Per quanto riguarda la parte di terreno posta a contatto dell'atmosfera, si dovrà imporre un andamento di temperatura variabile: ciò è possibile ricorrendo all'uso della "Time series" proposta dal programma, la quale permette la creazione di una funzione di temperatura variabile sui vari giorni di simulazione. Nel caso trattato da questa tesi si è consultato il portale dell'Arpa Piemonte (Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale del Piemonte) e si sono ricavati i dati relativi alle temperature medie sui vari mesi dell'anno registrate dalla stazione "Torino Giardini Reali" della banca dati meteorologica (Figura 62). L'anno di riferimento è il 2018. Nelle immagini seguenti si riportano la tabella con le temperature di interesse e il grafico a linee che ne mostra visivamente l'andamento durante l'anno.

Valori aggregati mensili												
	Giornalieri	Mensili	Precipitazioni intense									
Parametro	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
Precipitazione dalle 9 alle 9 (mm)	96,4			86,6	178,4	76,6	136,6	30,4	47,0	125,8	134,0	
Giorni piovosi pioggia dalle 9 alle 9	6			9	23	7	11	4	7	8	11	
Precipitazione dalle 0 alle 0 (mm)	96,4			86,6	178,6	76,4	136,6	31,6	47,4	152,2	106,0	
Giorni piovosi pioggia dalle 0 alle 0	7			7	22	7	12	5	7	8	15	
Temperatura media (°C)	5,5	3,4	7,6	15,5	18,1	23,0	25,3	25,0	20,7	14,9	9,4	3,9
Temperatura media dei massimi (°C)	10,6	7,9	12,9	21,9	25,0	29,8	32,7	33,1	28,8	21,7	13,1	10,2
Temperatura media dei minimi (°C)	1,9	-0,1	3,3	9,6	13,3	16,8	18,7	18,5	14,8	10,2	6,8	0,0
Temperatura massima (°C)	16,5	12,7	19,8	30,2	30,6	35,2	36,9	36,6	33,5	28,9	17,9	17,2
Temperatura minima (°C)	-1,0	-6,3	-4,0	3,5	9,2	13,5	15,0	12,5	7,1	5,7	-0,3	-3,8
Umidita' media (%)	73	73	73	64	73	63	64	62	70	78	89	80
Umidita' massima (%)	96	97	97	97	97	97	96	95	96	99	100	100
Umidita' minima (%)	16	16	16	11	30	18	24	18	20	17	32	18
Velocita' media del vento (m/s)												
Velocita' massima raffica di vento (m...												
Direzione massima raffica (°)												
Calma di vento (min)												
Settore Prevalente												
Tempo di permanenza nel settore (mi...												
Radiazione totale (MJ/mq)		172	310	475	502	674	712	602	456	267		118

Figura 62 Banca dati meteorologica dell'Arpa relativa alla stazione "Torino Giardini Reali"

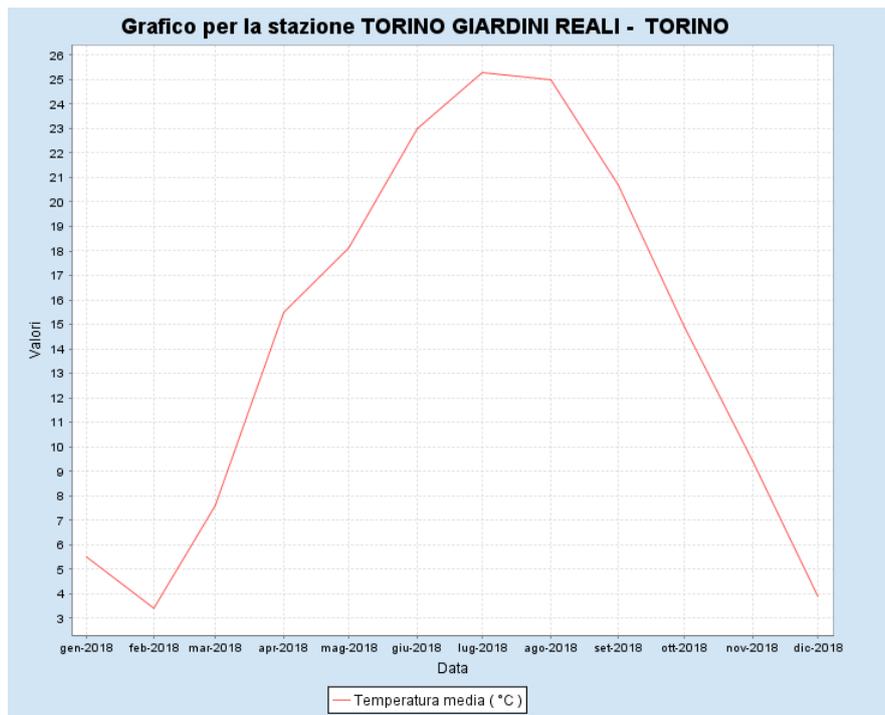


Figura 63 Andamento delle temperature medie mensili dell'anno 2018

I valori ricavati dalla banca dati dell'Arpa sono stati inseriti all'interno di una "Time series" di FEFLOW, imponendo una interpolazione della curva del tipo Akima1, disponibile nel programma. Il risultato ottenuto è la curva visibile nella Figura 64. Si noti che in certi intervalli temporali i grafici presentano un andamento che si discosta dall'andamento periodico sinusoidale, formando una sorta di massimo locale nei mesi di dicembre – gennaio. Ciò è dovuto al fatto che nell'anno scelto, il 2018, si presenti la particolarità di una temperatura media più alta nel mese di gennaio e più bassa nel mese di febbraio.

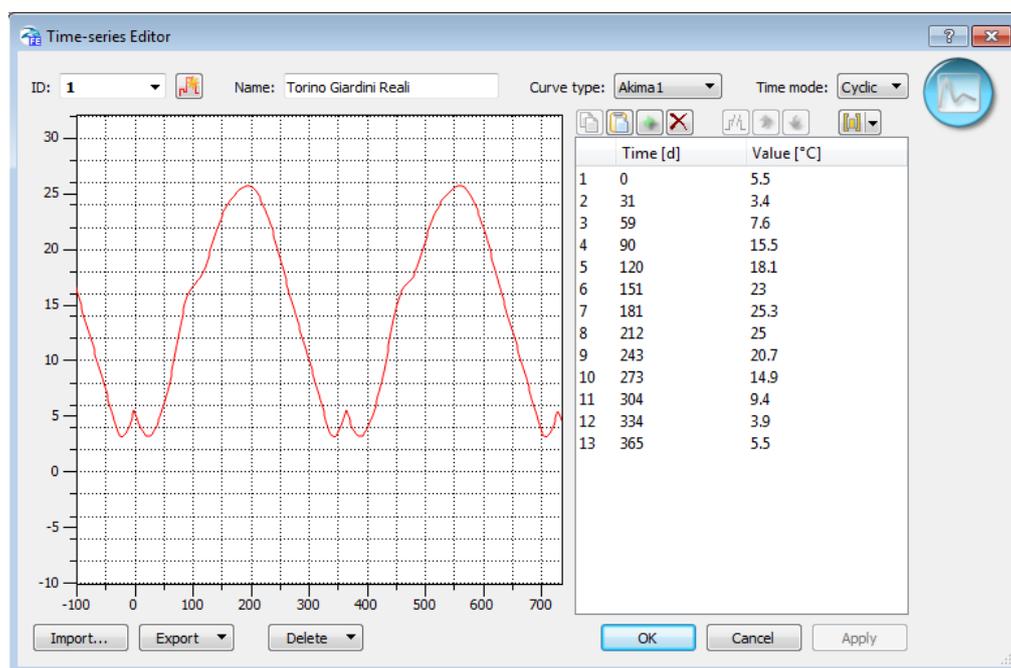


Figura 64 Interfaccia della Time series di FEFLOW. La curva in questione viene ripetuta ciclicamente nel tempo, dato che successivamente si eseguiranno delle analisi su più anni consecutivi.

Le operazioni di calcolo avverranno in due fasi diverse: la prima prevederà una inizializzazione della durata di 10 anni con le tubazioni disattivate, per portare la temperatura del dominio ai valori attuali, dunque con una affidabile distribuzione delle temperature nel senso della profondità, considerando lo scavo come non ancora realizzato; la seconda parte riguarderà l'analisi vera e propria della quantità di energia geotermica estraibile dall'impianto oggetto della tesi.

In questa seconda parte, nella quale consideriamo la costruzione del diaframma energetico e la realizzazione dello scavo come avvenute, dev'essere imposta un'altra condizione in corrispondenza del muro lato scavo e del piano orizzontale dello scavo. Questo viene fatto perché, in fase di esercizio, la temperatura all'interno del parcheggio interrato sicuramente non seguirà l'andamento e gli sbalzi stagionali dell'ambiente esterno. La condizione al contorno più appropriata per questa parte del modello è piuttosto complessa da decidere; rispetto ai pali energetici, infatti, questa parte dei diaframmi è esposta all'aria e dalla letteratura scientifica a riguardo, emergono due soluzioni: l'adozione della temperatura costante sulla parte di dominio interessato o di un flusso termico convettivo determinato da un coefficiente di trasferimento termico. La seconda soluzione viene utilizzata soprattutto per le gallerie ferroviarie o metropolitane dove vi è un'intensa circolazione di aria, mentre la prima si usa principalmente per stazioni e parcheggi sotterranei (Di Donna, 2016). Dunque, la condizione a temperatura costante sarà quella scelta per il nostro problema.

Per quanto riguarda l'attivazione delle serpentine, è stata imposta una temperatura costante sul solo nodo di ingresso di ogni tubatura, mentre i nodi in uscita saranno monitorati con degli "Observation point" che valuteranno la temperatura del fluido in uscita, il quale sarà il parametro utilizzato per la valutazione del calore estratto.

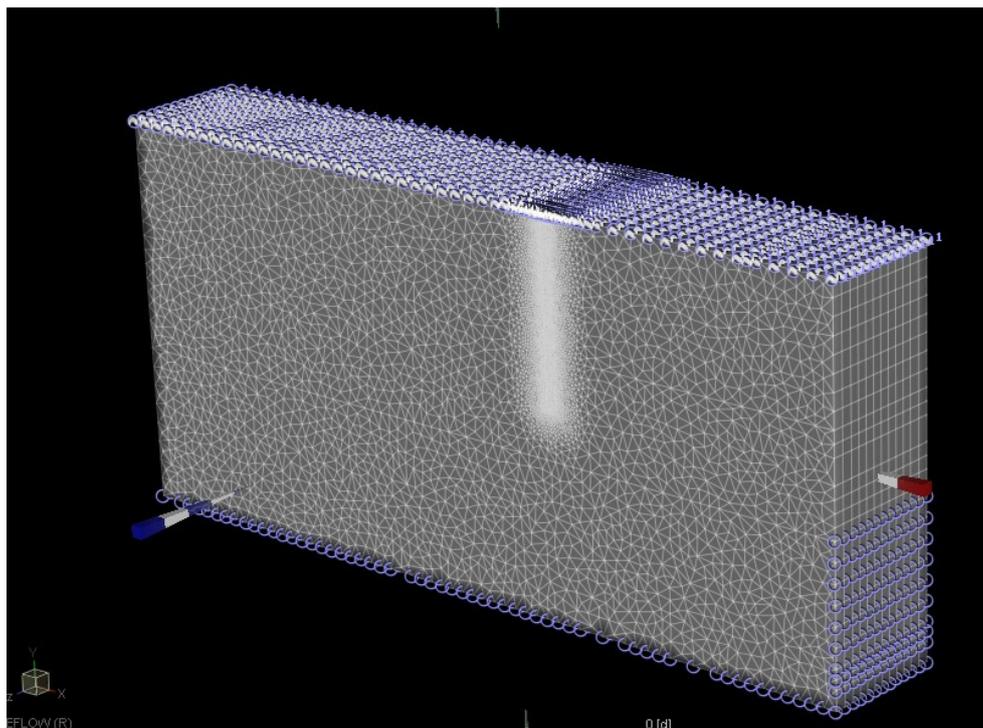


Figura 65 Rappresentazione delle condizioni al contorno termiche utilizzate per l'inizializzazione del modello FEFLOW

6.1.4.2 Condizioni idrauliche

Per quanto riguarda le condizioni idrauliche, come già descritto in precedenza, si considera una falda in quiete posta alla profondità di 22,5 m dal piano campagna. L'altezza della falda del modello numerico, misurata a partire dalla parte inferiore, ha uno spessore di 15,15 m.

Le condizioni al contorno assegnate al modello, vengono distribuite sulla parte destra e la parte sinistra del modello, al fine di valutare le variazioni che avvengono all'interno del dominio, e sono del tipo "Hydraulic head BC".

Allo scopo di simulare un movimento di falda che abbia una velocità media di 1,5 m/g, misura utilizzata per eseguire calcoli sulle acque sotterranee di Torino, si è deciso di assegnare una differenza di altezza tra le due condizioni. Per valutare questa differenza si è utilizzata la legge di Darcy:

$$V = k \cdot i$$

V : velocità apparente di filtrazione della falda, $\left[\frac{m}{s}\right]$

k : conduttività idraulica orizzontale del terreno, $\left[\frac{m}{s}\right]$

i : gradiente idraulico, valutato come $i = \frac{\Delta h}{L}$, [-]

Conoscendo la velocità di filtrazione voluta e la conduttività idraulica, si può ricavare il gradiente idraulico:

$$i = \frac{V}{k} = \frac{1,5 \frac{m}{g} \cdot \frac{1}{86400} \frac{g}{s}}{4,15 \cdot 10^{-3} \frac{m}{s}} = 0,0042$$

Dal gradiente idraulico si può ricavare la differenza di quota piezometrica da impostare al fine di ottenere la velocità di filtrazione nel modello:

$$\Delta h = i \cdot L = 0,0042 \cdot 80,8 \text{ m} = 0,34 \text{ m}$$

Dunque, al lato destro del modello sarà assegnata una quota piezometrica di 15,15 m, mentre al lato sinistro si assegnerà la stessa quantità a cui si sottrae la Δh , ovvero 14,81 m (Figura 66).

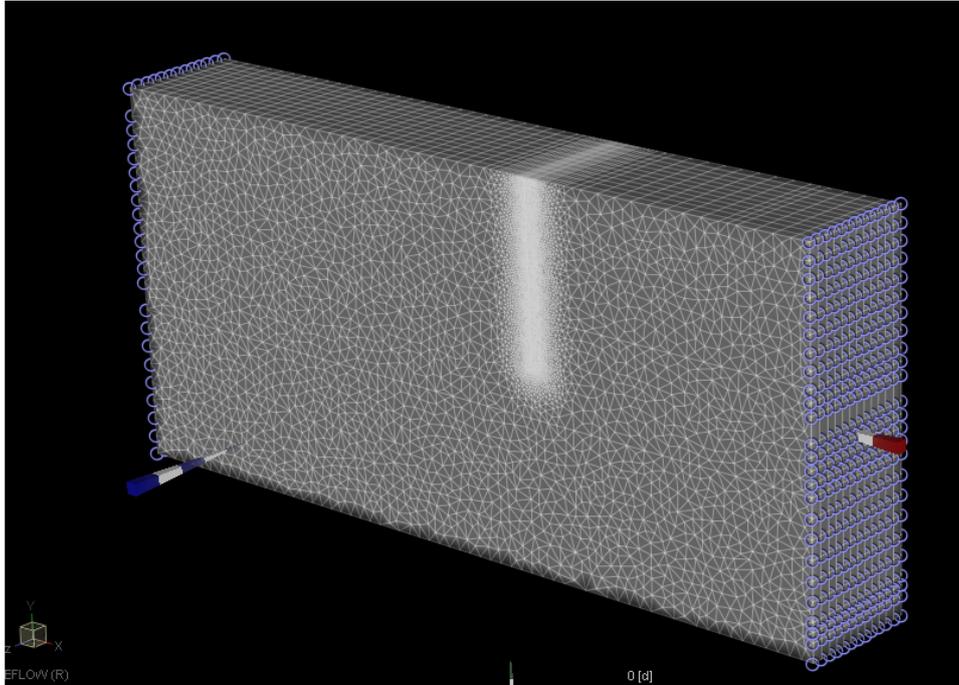


Figura 66 Rappresentazione delle condizioni al contorno idrauliche del modello

6.2 SIMULAZIONI

Le simulazioni numeriche sono state svolte con il programma FEFLOW. Lo scopo di queste simulazioni è l'individuazione della migliore configurazione delle tubazioni, la quantificazione del calore estratto e lo studio del terreno posto nell'intorno del diaframma.

Nello specifico si sono eseguite le seguenti simulazioni:

- Inizializzazione: consiste nel creare la condizione iniziale di temperatura all'interno del dominio, ovvero una distribuzione di temperatura che più si avvicina a quella esistente nel sito di interesse prima della realizzazione dell'opera. Il risultato finale è un modello inizializzato utilizzato come condizione di partenza per tutte le simulazioni fatte nel seguito;
- Valutazione della configurazione più performante: si sono svolte delle simulazioni di funzionamento delle tubazioni nella stagione invernale ed estiva, in entrambi i casi per 30 giorni di utilizzo. Calcolando la differenza di temperatura tra fluido in ingresso e fluido in uscita è stato possibile individuare quale tra le tre configurazioni ipotizzate avesse l'efficienza maggiore in termini di potenza estraibile;
- Valutazioni nel lungo periodo: queste simulazioni si sono svolte per valutare il funzionamento dell'impianto su un periodo di più anni di funzionamento. Si sono eseguiti i calcoli per diverse condizioni di lavoro, variando la velocità del fluido termovettore circolante all'interno delle tubazioni e la temperatura dell'interno del parcheggio interrato, la quale è una condizione al contorno del problema. Il risultato finale sono i

diagrammi di andamento della temperatura del fluido estratto e quelli della potenza estratta per tutti i casi e le quantità di calore estratte a regime;

- Andamento della temperatura nel terreno: questa simulazione si è svolta con il fine di osservare le variazioni di temperatura dovute all'attivazione termica dei diaframmi nel terreno da essi sostenuto.

6.2.1 Inizializzazione della temperatura all'interno del dominio

Il modello che si è creato con il programma agli elementi finiti FEFLOW va inizializzato; l'inizializzazione del modello consiste nel calcolare la distribuzione all'interno del dominio della temperatura in condizioni indisturbate, cioè la temperatura naturale del terreno senza opere. Per fare ciò si eseguono 10 anni di analisi sui modelli senza la presenza del diaframma e del muro, impostando il modello con i parametri del solo terreno con la falda acquifera. Le condizioni iniziali e al contorno sono quelle descritte nel paragrafo 6.1.4.

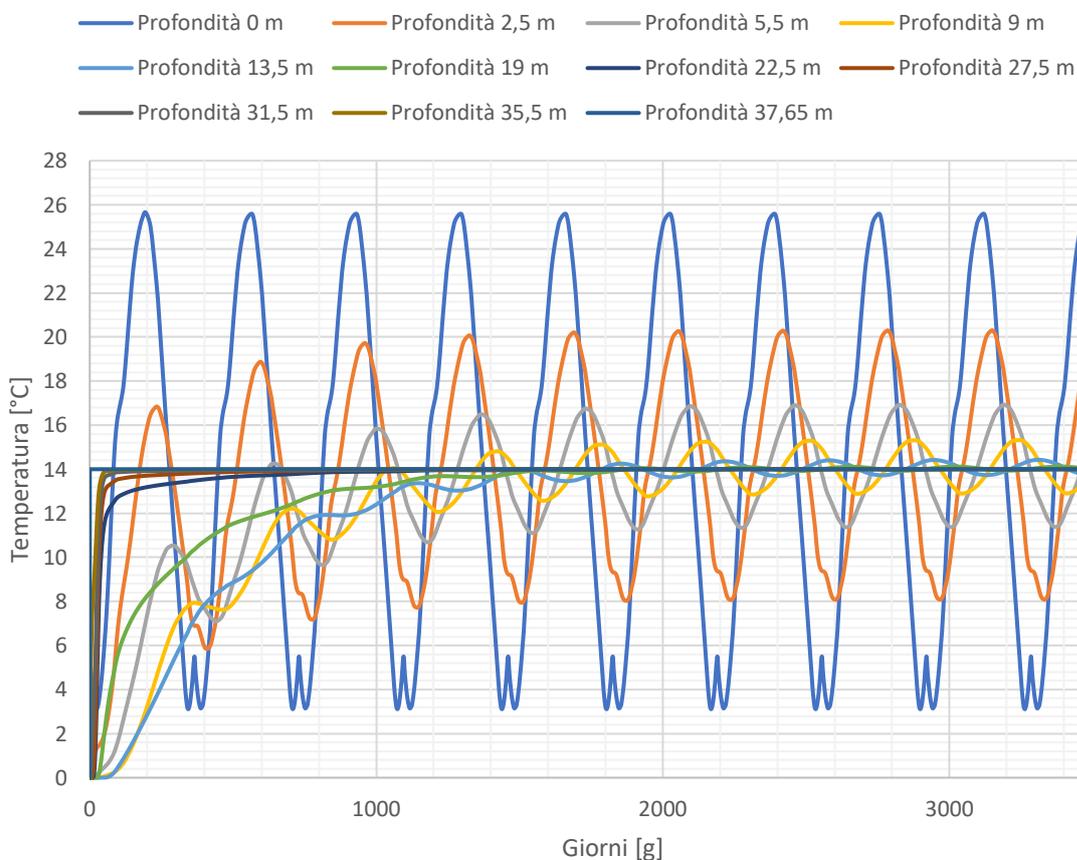


Figura 67 Inizializzazione di 10 anni del modello

Il grafico in Figura 67 mostra come negli strati più superficiali del modello vi siano gli ampi sbalzi termici dovuti al susseguirsi delle stagioni durante l'anno, mentre andando in profondità si nota un'attenuazione di tali sbalzi. Dopo una fase di transizione, il modello passa dalla

temperatura di default (0 °C) ad una ciclica oscillazione intorno al valore di 14 °C; oscillazione sempre meno marcata man mano che si analizzano gli strati più profondi.

Nella Figura 68 si può vedere anche la distribuzione di temperatura all'interno del modello alla fine della simulazione di inizializzazione; come si può notare la superficie superiore (che rappresenta quella esposta all'atmosfera) presenta una temperatura di 5,5 °C in quanto la simulazione è terminata esattamente alla fine del decimo anno (quindi a fine dicembre).

Si può anche notare che da una profondità di 14-15 m in poi la temperatura diventa costante nell'intorno del valore di 14°C (volume colorato in arancione nel modello), esattamente come mostrano le misure sperimentali.

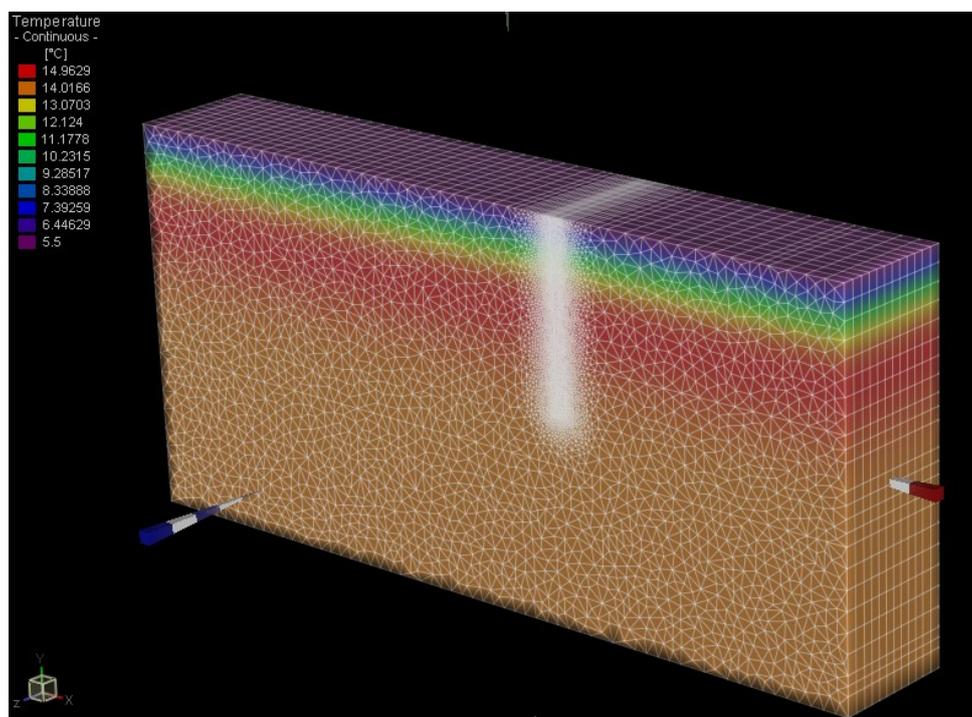


Figura 68 Rappresentazione della distribuzione della temperatura all'interno del modello inizializzato (le dimensioni non sono in scala per quanto riguarda lo spessore del modello)

6.2.2 Valutazione della configurazione più performante

Dopo la fase di inizializzazione del modello, che consente di ottenere le temperature iniziali interne al dominio di nostro interesse, si prosegue impostando le simulazioni con le tubazioni attivate. A tale scopo si esegue l'attivazione degli elementi "Discrete Features Element" di FEFLOW, che simulano il percorso delle serpentine all'interno del diaframma. Tramite le condizioni al contorno si impongono le condizioni "Fluid flux" nei nodi di entrata e uscita del fluido termovettore, impostando per l'ingresso una velocità di -0,4 m/s e per l'uscita 0,4 m/s (si noti che la convenzione del programma prevede che i flussi negativi corrispondano ad un ingresso all'interno del modello, viceversa quelli positivi). L'altra condizione che si impone è la temperatura del fluido in ingresso nelle tubazioni: essa si imposterà mediante una condizione "Temperature BC" sul nodo di ingresso e sarà quindi considerata costante per tutta la

simulazione che si eseguirà. Per il periodo invernale avremo una temperatura di ingresso di 4 °C, mentre nel periodo estivo sarà pari a 28 °C. Le lunghezze delle serpentine nelle varie configurazioni, valutate sul modello realizzato con il programma FEFLOW, sono riportate in Tabella 8

Configurazione	Lunghezza [m]
1	70,8
2	69,6
3	84,0

Tabella 8 Lunghezza delle serpentine nelle varie configurazioni

La simulazione avverrà per le tre configurazioni delle serpentine interne al diaframma in calcestruzzo armato (si veda il paragrafo 4.3.3), le quali si riportano nelle immagini dei modelli mostrate in seguito:

- Configurazione 1: Tubi disposti a “doppio U”:

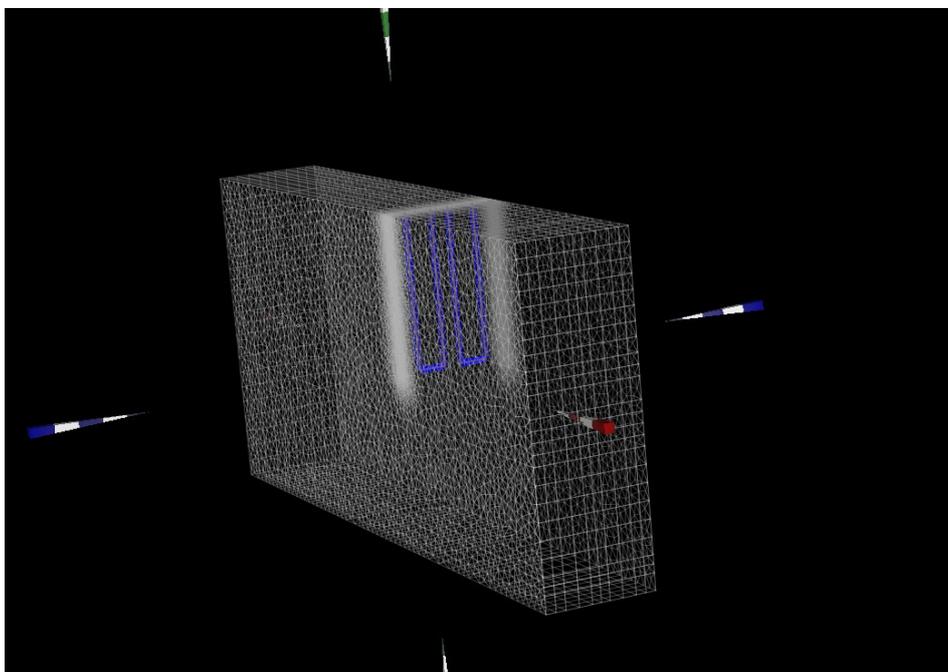


Figura 69 Modello FEFLOW con le tubazioni disposte a "doppio U" (lo spessore del modello è in una scala maggiore per far risaltare la geometria delle tubazioni)

- Configurazione 2: Tubi disposti a “W”:

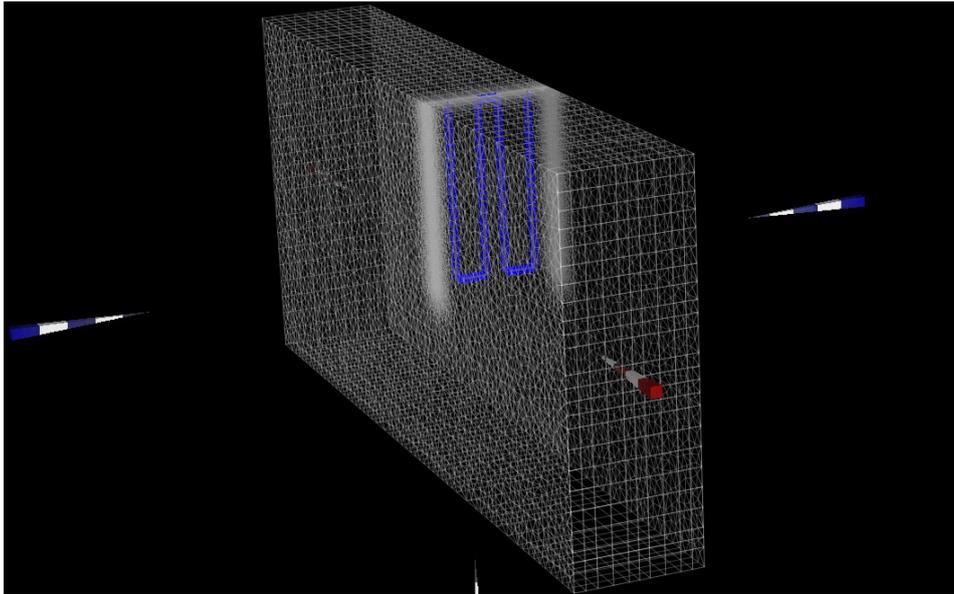


Figura 70 Modello FEFLOW con le tubazioni disposte a "W" (lo spessore del modello è in una scala maggiore per far risaltare la geometria delle tubazioni)

- Configurazione 3: Tubi disposti a “serpentina”:

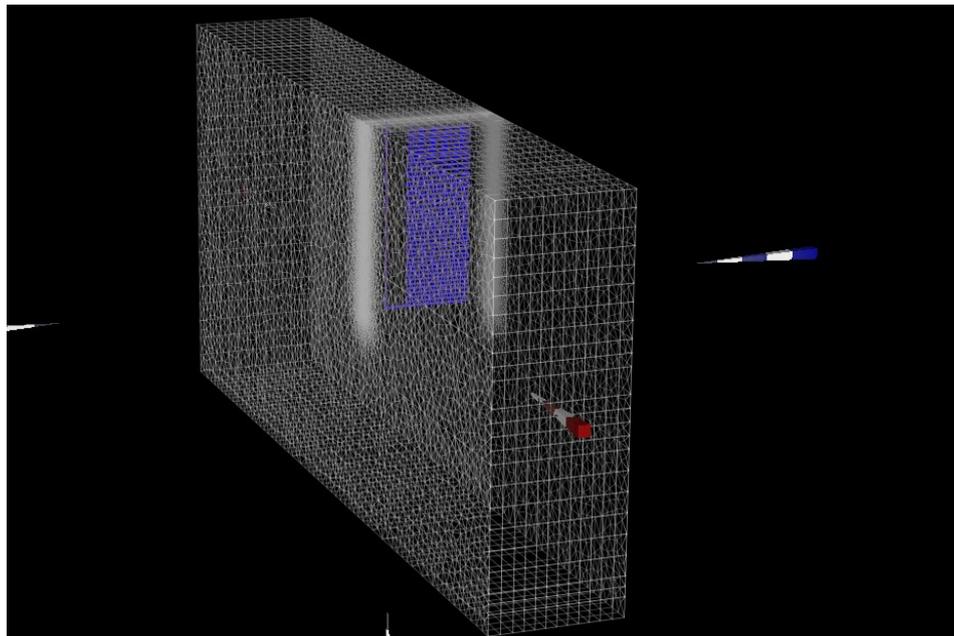


Figura 71 Modello FEFLOW con le tubazioni disposte a "serpentina" (lo spessore del modello è in una scala maggiore per far risaltare la geometria delle tubazioni)

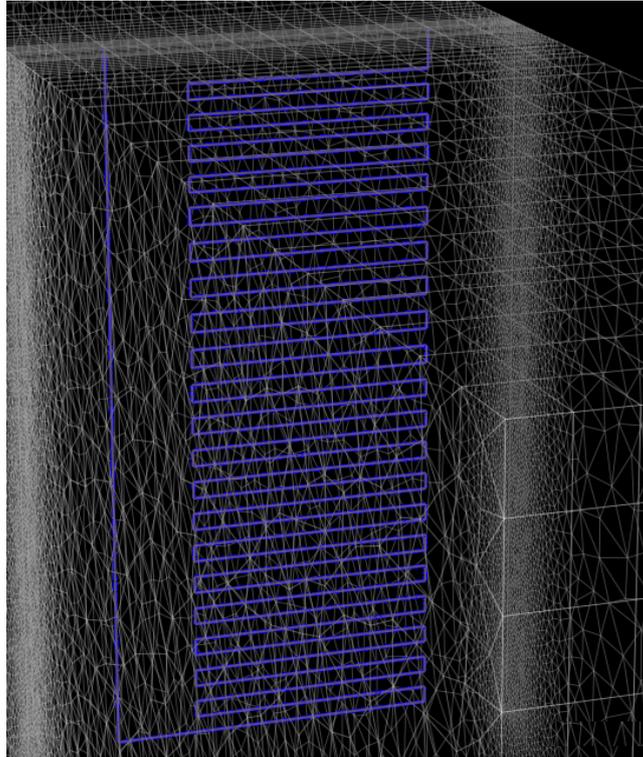


Figura 72 Particolare della disposizione delle tubazioni a "serpentina" (lo spessore del modello è in una scala maggiore per far risaltare la geometria delle tubazioni)

Sulle 3 configurazioni delle tubazioni si sono valutate le temperature di uscita del fluido termovettore eseguendo una simulazione sul mese di gennaio per il caso invernale e sul mese di luglio per quello estivo, tenendo costanti le temperature di input dell'impianto, cioè 4°C nel caso invernale e 28 °C nel caso estivo.

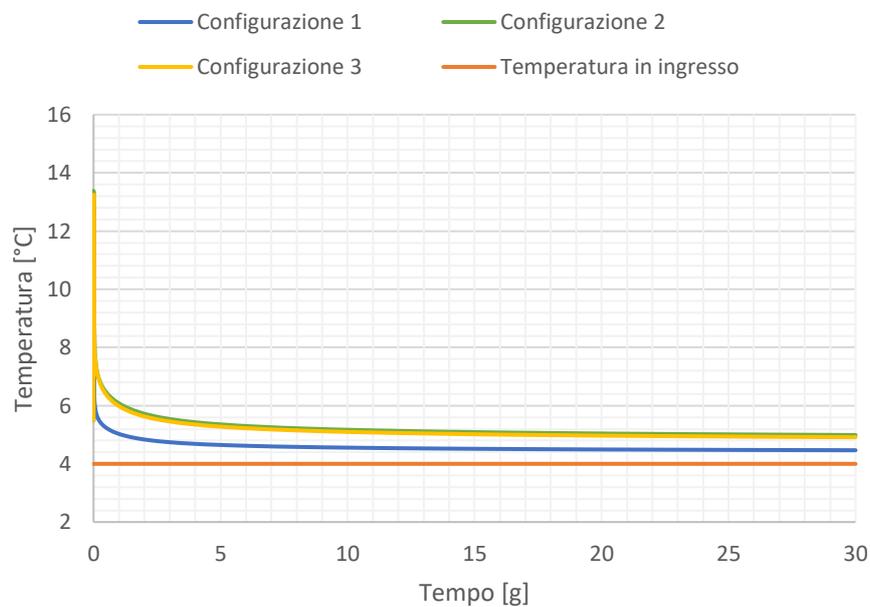


Figura 73 Simulazione dell'attivazione invernale e confronto tra le tre configurazioni

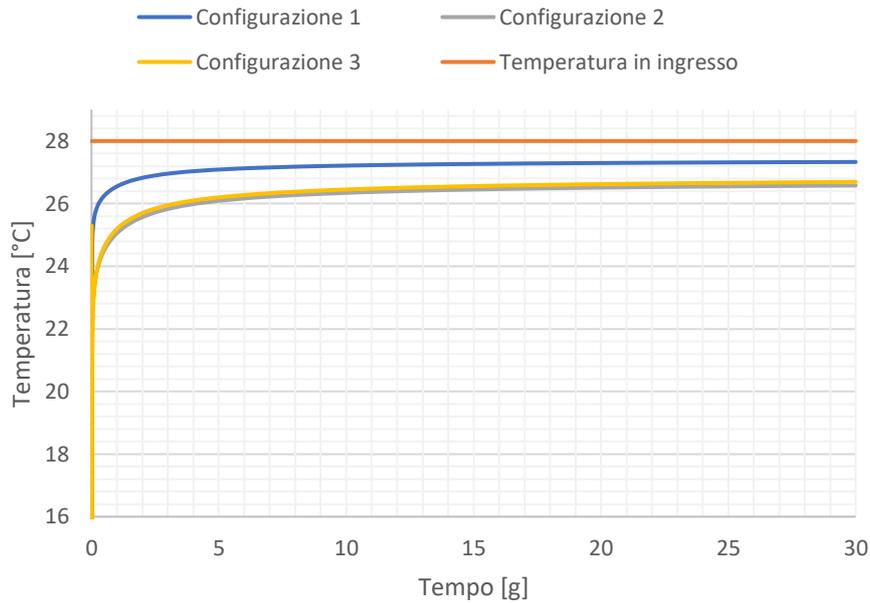


Figura 74 Simulazione dell'attivazione estiva e confronto tra le tre configurazioni

Una volta valutato la temperatura in uscita ottenibile da ogni configurazione, si può calcolare la potenza estraibile con la seguente relazione:

$$Q = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T$$

Dove:

Q : è la potenza estraibile, [kW];

$\dot{m} = \rho_w v A$: è la velocità di flusso massica, $\left[\frac{kg}{s}\right]$;

in cui:

ρ_w : densità dell'acqua, $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$;

v : velocità del fluido in ingresso (uguale alla velocità in uscita), $\left[\frac{m}{s}\right]$;

A : area della sezione del tubo, $[m^2]$;

c : è il calore specifico dell'acqua, $\left[\frac{kJ}{kg \cdot K}\right]$;

ΔT : differenza di temperatura tra fluido termovettore entrante e uscente.

I valori utilizzati per il computo della potenza sono raccolti nella seguente tabella:

Simbolo	Valore numerico	Unità di misura
ρ_w	1000	[kg/m ³]
v	0,4	[m/s]
A	0,000589	[m ²]
c	4,186	[kJ/kg/K]
\dot{m}	0,2349	[kg/s]

Tabella 9 Parametri utilizzati per il calcolo della potenza estratta

Il calcolo effettuato per valutare la velocità massica è il seguente:

$$\dot{m} = \rho_w v A = 997 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,4 \frac{m}{s} \cdot 0,000589 m^2 = 0,2349 \frac{kg}{s}$$

Si evince che vi è una proporzione diretta tra il salto termico e la potenza estratta, per cui maggiore è la ΔT , maggiore è la potenza estratta.

Nella Tabella 10 si sono valutati: la potenza estratta Q espressa in kW, riferita ad un modulo di diaframma della lunghezza di 2,5 m, avendo calcolato le differenze tra le temperature di uscita e i valori di temperatura in ingresso.

Si noti che la potenza estratta dalla configurazione 1 è stata ottenuta sommando i contributi dei due rami di tubazioni a U indipendenti, che presentano la stessa differenza di temperatura estratta (fatto dovuto alla simmetria del modulo in esame), la quale è ovviamente inferiore rispetto alle altre configurazioni in quanto il percorso del singolo tubo a U è molto più breve. Le altre quantità calcolate sono le seguenti:

- **Potenza q [kW/m]:** è stata ottenuta dividendo per 2,5 m (larghezza di un modulo di diaframma) la potenza estratta, dunque è una potenza a metro lineare di struttura.
- **Potenza q_a [W/m²]:** è stata ottenuta dividendo la potenza per l'area di un singolo modulo di diaframma:

$$A = 2,5 m \cdot 17,65 m = 44,13 m^2$$

- **Potenza q_{tot} [kW]:** è la quantità di calore totale, cioè quella riferita all'attivazione termica dell'intero parcheggio oggetto dello studio (il perimetro totale dell'opera attivabile energeticamente è 422,4 m).

Configurazione	Stagione	T input [°C]	T output [°C]	ΔT [°C]	Q [kW]	q [kW/m]	q_a [W/m ²]	Q_{tot} [kW]
1	Inverno	4	4,47	0,47	0,92	0,37	20,96	156,23
	Estate	28	27,33	0,67	1,32	0,53	29,94	223,23
2	Inverno	4	4,99	0,99	0,98	0,39	22,16	165,22
	Estate	28	26,58	1,42	1,40	0,56	31,78	236,95
3	Inverno	4	4,92	0,92	0,90	0,36	20,46	152,50
	Estate	28	26,69	1,31	1,29	0,51	29,17	217,49

Tabella 10 Calcolo della potenza estratta nelle simulazioni a 30 giorni

Da queste valutazioni si desume che la configurazione più performante valutata su 30 giorni di attivazione è la numero 2 (configurazione a “W”) sia nella condizione di funzionamento estiva che in quella invernale.

6.2.3 Valutazioni sul lungo periodo

Al fine di valutare l’impianto geotermico installato, si sono eseguite delle analisi su più anni con le serpentine attivate. Per lo svolgimento di queste analisi si è presa in considerazione la sola configurazione 1 (a “doppio U”) in quanto essa è la scelta privilegiata in sede di installazione perché presenta un numero limitato di curve e una minore difficoltà di montaggio rispetto alle altre due configurazioni.

Si sono eseguite più analisi, in quanto sono stati variati i seguenti parametri:

- Velocità del fluido termovettore: si è scelto di valutare, oltre la velocità già utilizzata nei paragrafi precedenti di 0,4 m/s, anche il valore di 0,8 m/s;
- Temperatura sulla faccia a valle del diaframma e sul fondo scavo: oltre alla temperatura già indagata (14 °C), si è deciso di indagare anche una temperatura più alta, cioè 18°C e anche una condizione di parete non scambiante, impostando un bordo adiabatico.

Per queste analisi, si è deciso di operare su 5 anni al fine di vedere se vi siano differenze sostanziali nella temperatura in uscita dall’impianto.

La temperatura in ingresso è stata impostata mediante una funzione continua, nella quale si è stabilito un periodo invernale di attivazione delle serpentine (dal 15 ottobre al 15 aprile) come imposto dal D.P.R. 412/93 - Limiti di esercizio degli impianti termici. Per quanto concerne la stagione estiva, è stata scelta un’attivazione sui tre mesi più caldi dell’anno (giugno, luglio e agosto). Si è infine collegato la funzione con tratti lineari in modo da ottenere una funzione continua e ciclica (Figura 75).

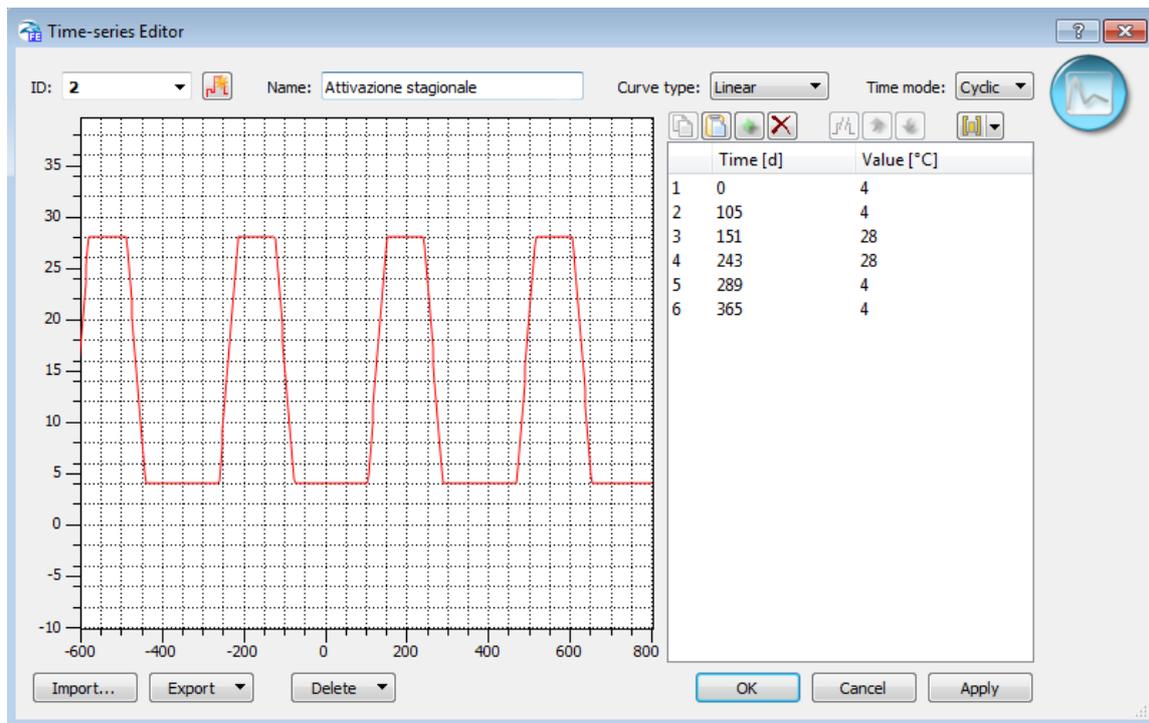


Figura 75 Andamento della temperatura di input impostata sul programma FEFLOW

Le altre condizioni si sono tenute uguali ai paragrafi precedenti.

In Figura 76 si può vedere la distribuzione della temperatura nel modello dopo 5 anni di attivazione del sistema geotermico.

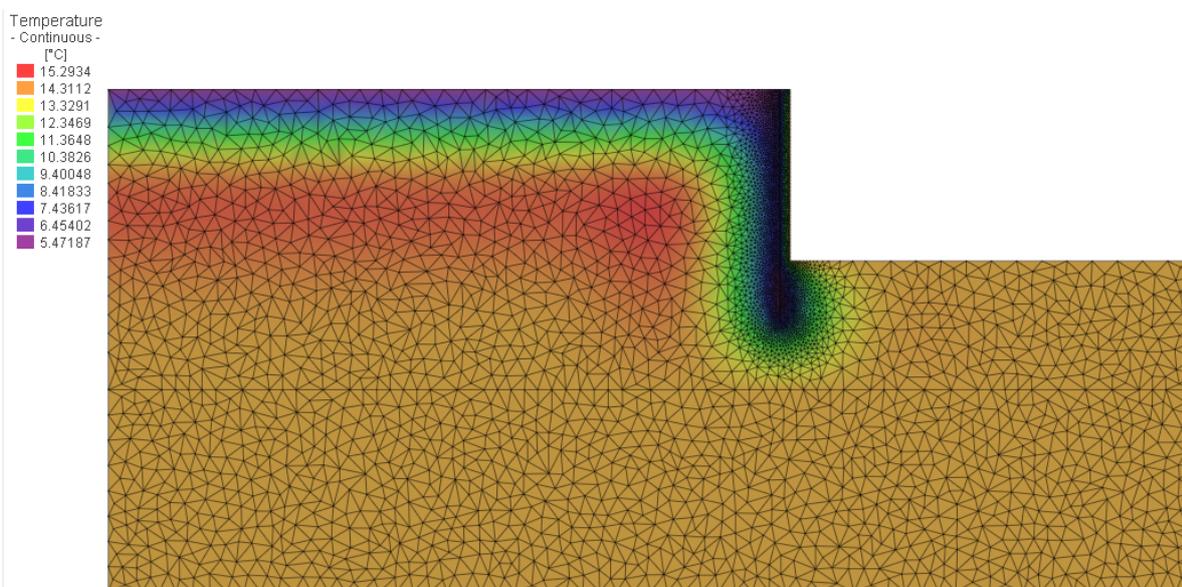


Figura 76 rappresentazione della distribuzione delle temperature nel modello dopo 5 anni di attività delle serpentine con $v = 0.4 \text{ m/s}$ e temperatura sul diaframma = 14 °C

I grafici seguenti mettono a confronto la temperatura estratta nelle varie condizioni di temperatura imposta sulla parte esterna del diaframma e sul fondo scavo, separando il caso con velocità del fluido termovettore pari a 0,4 m/s e quello con velocità pari a 0,8 m/s (Figura 77 e Figura 78).

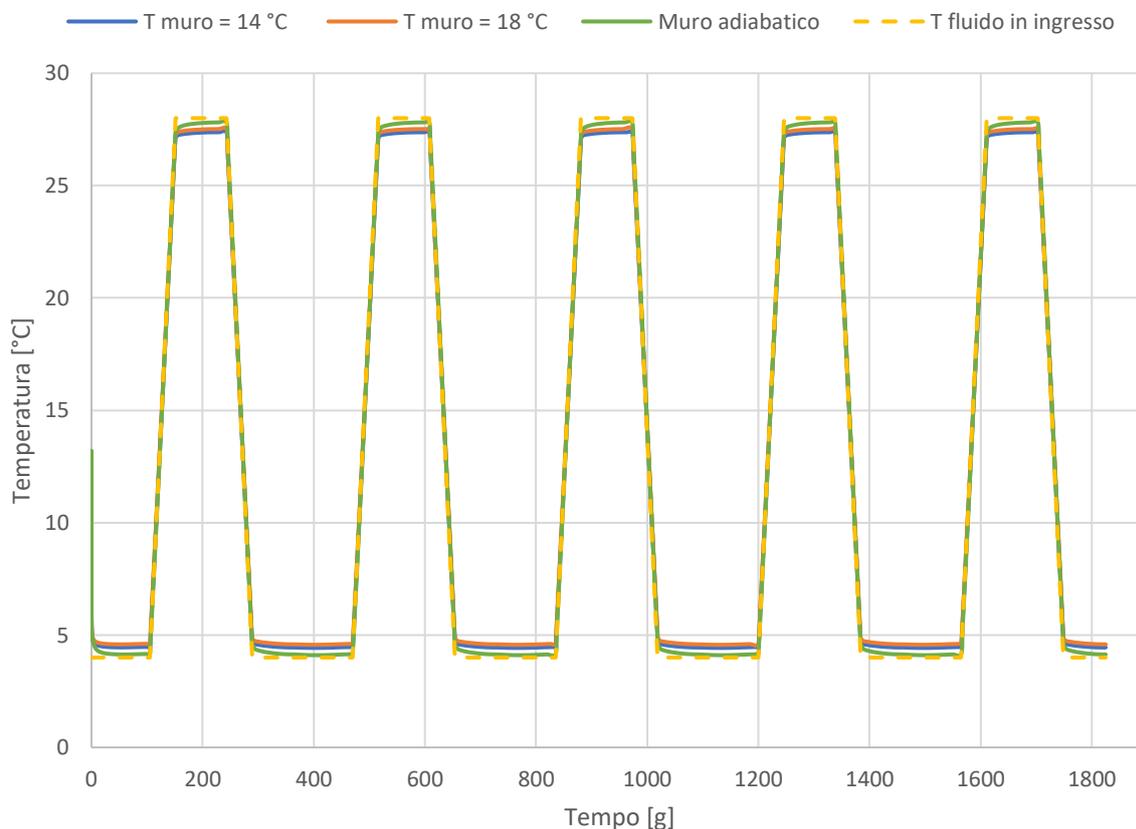


Figura 77 Grafico delle temperature per 5 anni di attivazione delle serpentine con $v = 0,4$ m/s

Come si può notare in Figura 77, nella stagione estiva vi è più scambio termico con la faccia esterna del diaframma e il fondo scavo impostati su 14 °C, mentre nella stagione estiva ciò è vero per la temperatura di 18 °C. Questo è dovuto al fatto che lo scambio termico del fluido passante all'interno delle tubazioni non avviene solamente verso il terreno a monte del diaframma, ma anche, verso l'ambiente scavato a valle, cioè il volume occupato effettivamente dal parcheggio.

La condizione di parete adiabatica è la meno efficiente di tutte, in quanto non si ha scambio termico con il lato di valle; questa condizione perciò è la più conservativa e potrebbe essere utilizzata eventualmente nelle procedure di progettazione nelle quali si vuole rimanere a favore di sicurezza dal punto di vista del calore estratto. Questi risultati si trovano anche in altri studi simili, in particolare Di Donna, 2016.

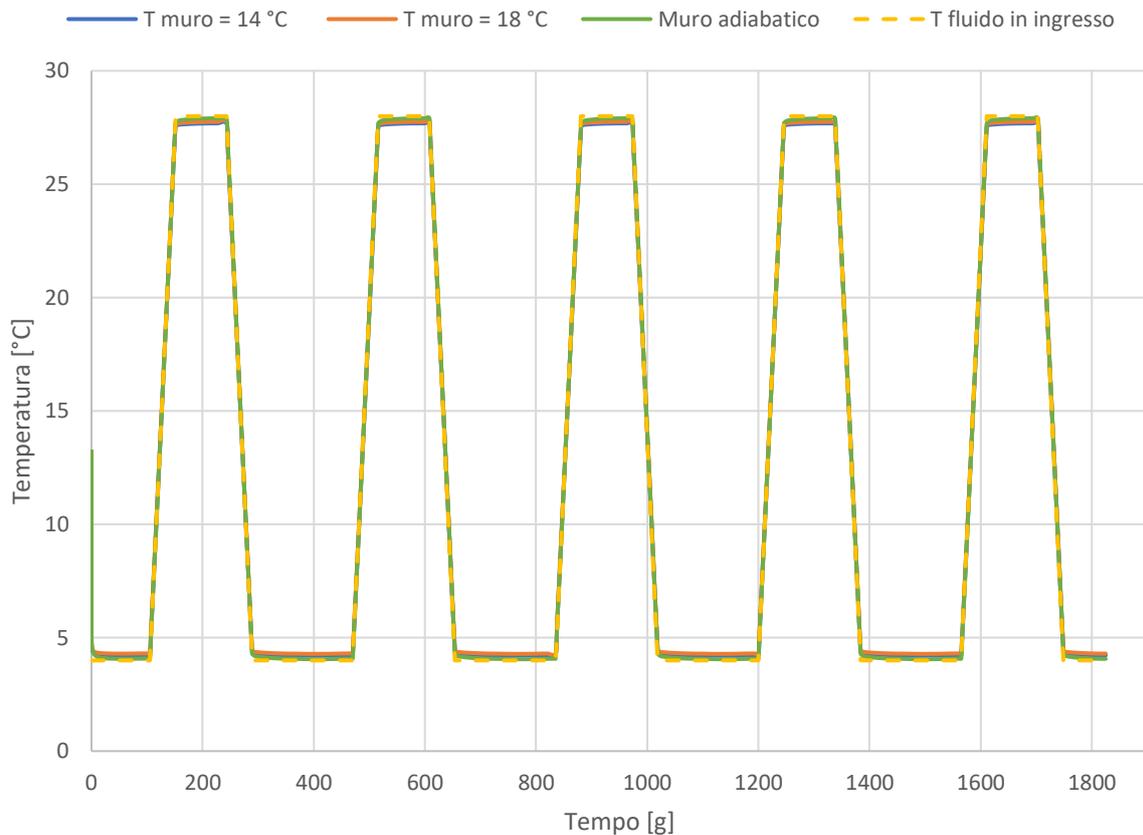


Figura 78 Grafico delle temperature per 5 anni di attivazione delle serpentine con $v = 0,8 \text{ m/s}$

Nella Figura 78 si valuta la condizione di velocità del fluido parti a $0,8 \text{ m/s}$. L'efficienza diminuisce di circa la metà rispetto al caso precedente. Ciò è visibile dall'avvicinarsi delle curve verso le temperature di ingresso (in giallo nel grafico); questo è dovuto al fatto che la velocità, quindi la portata del fluido termovettore, è doppia: dunque ci si potrà aspettare una quantità di calore estratta molto simile al caso con la velocità fissata a $0,4 \text{ m/s}$. L'ordine di efficienza rispetto ai tre casi relativi alla temperatura all'interno dello scavo rimane lo stesso rispetto al caso precedente.

Dopo avere valutato l'andamento delle temperature del fluido estratto nelle condizioni precedenti, si calcolano i grafici della potenza estratta. Essi si sono valutati a partire dalla differenza di temperatura tra il fluido in ingresso e quello in uscita e si è eseguito lo stesso calcolo visto in precedenza per il calcolo della potenza, ma in questa fase si è ripetuto per tutto il periodo di funzionamento dell'impianto. Nei grafici si è riportato l'andamento della potenza estratta a metro lineare di diaframma (Figura 79 e Figura 80).

Come visto in precedenza, la relazione utilizzata per la valutazione della potenza estratta è la seguente:

$$Q = \dot{m} \cdot c \cdot (T_{out} - T_{in})$$

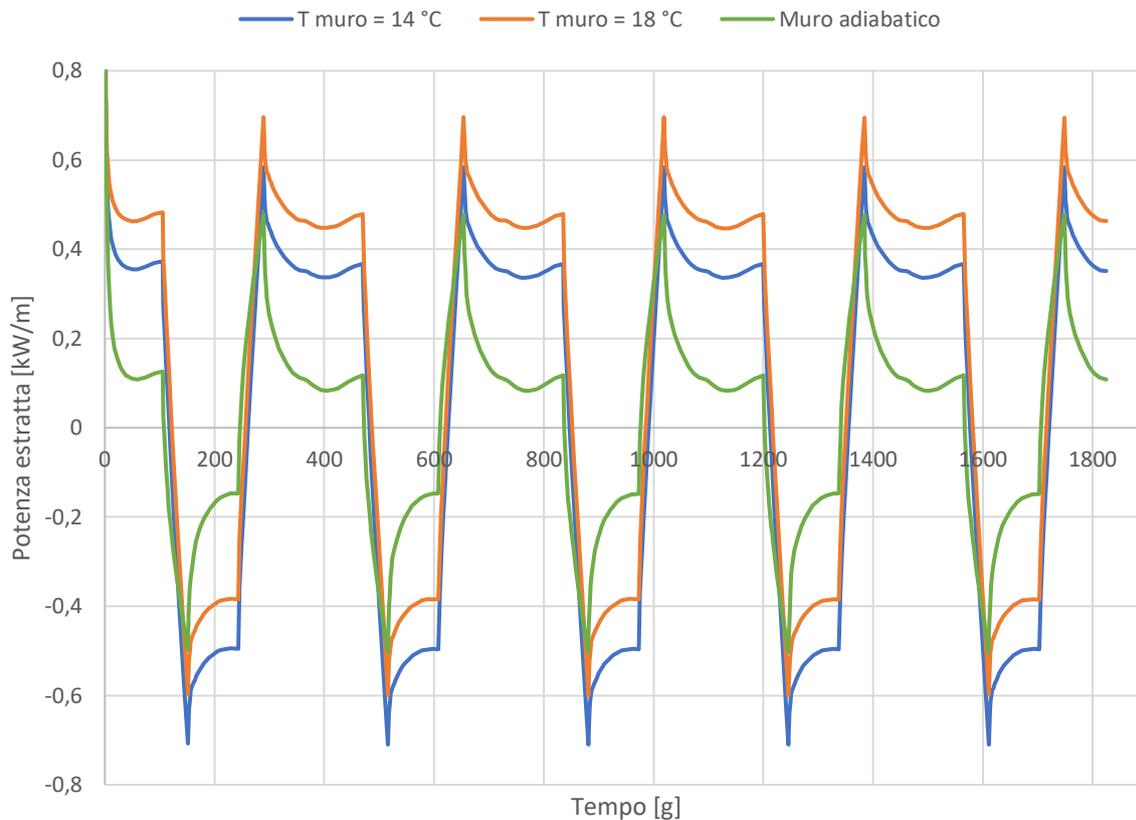


Figura 79 Grafico della potenza a metro lineare di diaframma estratta per 5 anni di attivazione delle serpentine con $v = 0,4$ m/s

In Figura 79 si possono notare gli andamenti della potenza estratta sui vari casi sopra descritti (i valori di potenza negativi sono riferiti al periodo estivo, quando cioè il calore è ceduto dal fluido termovettore al terreno. Si nota che le considerazioni inerenti all'efficienza descritte in precedenza vengono mantenute: il diaframma impostato su 14 °C ha la sua massima efficienza in estate, mentre quello impostato su 18 °C è più efficiente d'inverno. Il modello con diaframma adiabatico risulta essere quello che scambia meno calore.

Nella Tabella 11 si possono osservare i valori di picco e a regime di potenza a metro lineare di diaframma estratti:

Temperatura diaframma	Inverno		Estate	
	Picco [kW/m]	Regime [kW/m]	Picco [kW/m]	Regime [kW/m]
14 °C	0,58	0,34	0,71	0,50
18 °C	0,70	0,45	0,60	0,38
Adiabatico	0,48	0,08	0,50	0,15

Tabella 11 Calore estratto di picco e a regime nelle diverse configurazioni

6.2.3.1 Valutazione sul possibile uso civile della potenza estratta

Al fine di valutare in termini quantitativi il potenziale numero di utenze eventualmente collegabili al sistema geotermico trattato, si è deciso di svolgere una breve valutazione incentrata sul periodo di riscaldamento invernale.

Il consumo in termini energetici per il riscaldamento annuale di un edificio sito in Italia, si può assumere pari a 50 kWh/m² (Corrado et al., 2012). Prendendo il valore più conservativo a regime del periodo invernale, cioè 0,83 kW/m e ipotizzando il funzionamento dell'impianto di riscaldamento per 1800 h/anno possiamo valutare quante unità abitative può soddisfare la geostruttura energetica analizzata:

- Calcolo della potenza totale estratta da tutto il diaframma:

$$Q_{tot} = 0,083 \frac{kW}{m} \cdot 422,4 m = 35,2 kW$$

- Calcolo dell'energia annua ricavabile nel periodo invernale dall'impianto:

$$E = 35,2 kW \cdot 1800 \frac{h}{anno} = 63360 \frac{kWh}{anno}$$

- Calcolo della superficie abitabile che si può soddisfare:

$$A = \frac{63360 \frac{kWh}{anno}}{50 \frac{kWh}{m^2 \cdot anno}} = 1567,2 m^2$$

Se si considerano unità abitative da 70 m² di superficie, l'energia estratta è in grado di riscaldarne 22.

Ovviamente questa valutazione è stata eseguita per la condizione più sfavorevole dal punto di vista della potenza estratta. Se si considerasse il diaframma e il fondo scavo alla temperatura di 14 °C, le unità abitative che la geostruttura sarebbe in grado di soddisfare salirebbero a 73.

In Figura 80 si può vedere l'andamento della potenza estratta nel caso di velocità del fluido termovettore di 0,8 m/s nei tre casi indagati. Si nota che la differenza rispetto al caso con fluido più lento è molto piccola, quasi trascurabile.

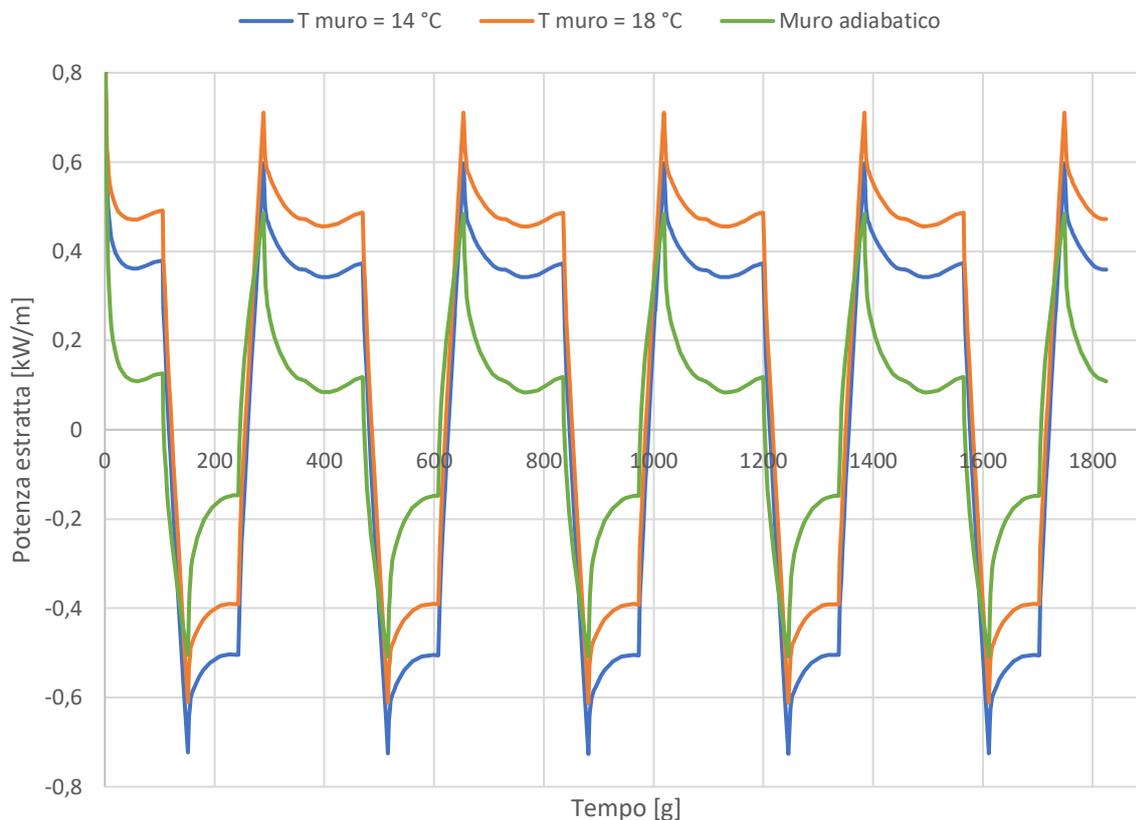


Figura 80 Grafico della potenza a metro lineare di diaframma estratta per 5 anni di attivazione delle serpentine con $v = 0,8 \text{ m/s}$

Da queste analisi si può dedurre la potenza estratta a regime durante l'esercizio dell'impianto. Nella Tabella 12 si possono osservare i valori di potenza a metro lineare di struttura estratti durante il funzionamento estivo e invernale con velocità del fluido termovettore pari a 0,4 m/s e temperatura interna del parcheggio pari a 14°C e la potenza complessiva valutata sul perimetro della struttura di 422,4 m:

		Inverno	Estate
Potenza a m.l. di diaframma	q [kW/m]	0,34	0,5
Potenza totale	Q [kW]	143,62	211,2

Tabella 12 Valori di potenza estratta nel funzionamento invernale ed estivo nella configurazione con $v = 0,4 \text{ m/s}$ e temperatura interna del diaframma = 14 °C

6.2.4 Andamento della temperatura nel terreno

Dal punto di vista delle variazioni di temperatura nell'intorno del diaframma, si è deciso di valutare l'andamento della temperatura ad una distanza di 1,5 m dal diaframma alle seguenti profondità:

- 5 m;
- 9,5 m;
- 17,5 m.

Il modello preso in considerazione per effettuare questa analisi è quello equipaggiato con la configurazione 1 a "doppio U".

In Figura 81 si sono riportati i grafici delle simulazioni effettuate: si sono calcolati due anni a impianto geotermico spento e cinque anni di funzionamento stagionale, al fine di apprezzare le differenze sull'andamento ciclico delle temperature nei punti scelti.

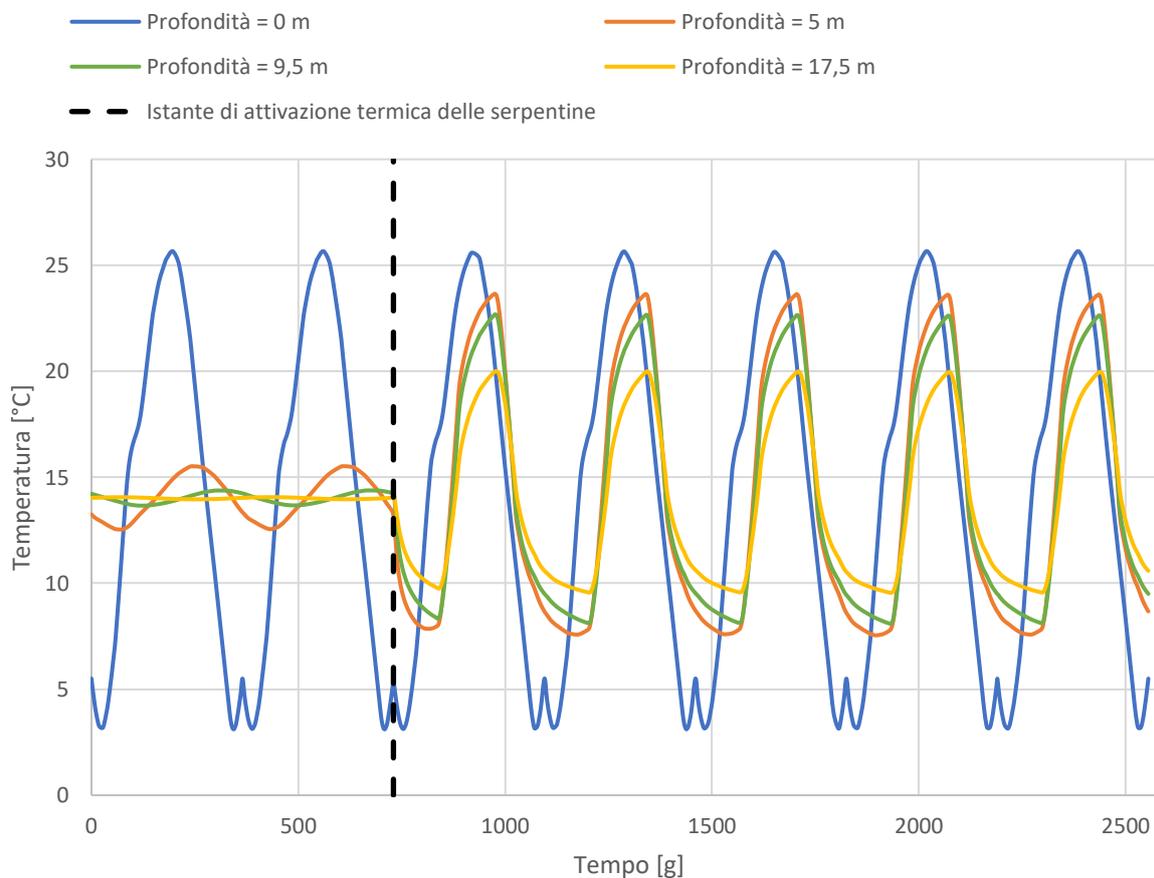


Figura 81 Temperatura a diverse profondità di punti distanti 1,5 m dal diaframma nel caso di diaframma con tubazioni a "doppio U" e temperatura sul lato interno del diaframma di 14 °C

Profondità [m]	Impianto spento		Impianto acceso		Differenza	
	T max [°C]	T min [°C]	T max [°C]	T min [°C]	T max [°C]	T min [°C]
5	15,52	12,54	23,66	7,54	8,13	-4,99
9,5	14,38	13,66	22,68	8,09	8,30	-5,57
17,5	14,06	13,96	20,01	9,55	5,95	-4,41

Tabella 13 Picchi di temperatura massimi e minimi nei punti considerati e differenze tra la condizione inattiva e quella attiva

Dai dati delle simulazioni si può vedere che la massima e la minima temperatura durante l'esercizio dell'impianto si raggiunge alla profondità di 5 m (23,66 °C la massima e 7,54 °C la minima), mentre la massima differenza in valore assoluto tra la situazione ad impianto spento e quella ad impianto acceso si ha a 9,5 m, con un incremento della temperatura massima di 8,30 °C e una diminuzione della temperatura minima di 5,57 °C.

7 CONCLUSIONI

Questo studio è stato svolto con lo scopo di valutare l'efficienza termica di una geostruttura energetica di futura costruzione, ovvero il parcheggio interrato che sarà sito nell'area di Via Boggio all'interno del perimetro del Politecnico di Torino.

Per valutare l'efficienza energetica si sono eseguite delle analisi numeriche, utilizzando il metodo degli elementi finiti implementato all'interno del programma FEFlow, specializzato nel trasporto di massa e calore in ambito geotecnico.

Una prima valutazione è stata svolta per confrontare tre possibili configurazioni geometriche delle tubazioni che percorreranno l'interno dei diaframmi di calcestruzzo armato del parcheggio; questo confronto è stato svolto costruendo un opportuno modello agli elementi finiti e utilizzando come parametri in ingresso i risultati di vari studi precedenti, validati dalle prove in situ e dall'esperienza e in seguito ricavando i salti termici tra la temperatura del fluido in ingresso e quella del fluido in uscita e valutandone conseguentemente il calore estratto. I risultati di questa prima analisi hanno portato alla conclusione che la seconda configurazione, cosiddetta a "W", sia la più performante sia in ambito estivo che invernale.

In seguito, si è voluta valutare l'estrazione del calore su un periodo più lungo e continuativo di attivazione delle serpentine, si è dunque attivato il modello su un periodo di 5 anni, variando vari parametri relativi alla temperatura al contorno del bordo e del fondo scavo per vedere le differenze. La configurazione usata non è stata la più performante, ma quella più semplice da realizzare dal punto di vista tecnologico, cioè la prima configurazione, cosiddetta a "doppio U". Le conclusioni sono che i cicli stagionali effettuati evidenziano la stazionarietà delle fluttuazioni del calore estratto lungo l'anno, sin dall'inizio dell'attivazione termica. Ciò significa che il serbatoio termico rappresentato dal sistema terreno, muro, interno del parcheggio e falda acquifera consentono di assorbire e cedere a seconda della domanda che gli è stata imposta dalle condizioni imposte sul modello, senza subire diminuzioni di efficienza.

Si è provato ad eseguire anche una simulazione imponendo una velocità del fluido all'interno delle serpentine doppia rispetto alla normale velocità di esercizio, evidenziando una scarsa differenza in termini di potenza estratta.

Nelle condizioni standard di utilizzo, dunque 14 °C imposti all'interno del parcheggio, 0,4 m/s di velocità del fluido termovettore, si sono calcolati i valori di potenza estratti o ceduti in condizione di regime dell'impianto: in inverno 143,6 kW e in estate 211,2 kW. Considerando un funzionamento durante il periodo di riscaldamento invernale di 1800 h sui sei mesi previsti (10

ore al giorno) si ottiene un'energia estratta pari a 258,5 MWh, che confrontata con il consumo di energia invernale da teleriscaldamento della sede centrale e della cittadella politecnica valutato in 12355,5 MWh (da Masterplan di Ateneo, anno 2016) rappresenta circa il 2 %.

In ultima analisi si sono fatte delle considerazioni inerenti alle variazioni di temperatura che si vengono a creare tra la condizione di sistema di scambio termico spento e acceso. Si è svolta un'analisi di due anni senza funzionamento delle serpentine, le quali sono state poi attivate per un periodo di 5 anni. Si è valutata la temperatura di tre punti distanti 1,5 m dal diaframma, posti a diverse profondità: le massime differenze in valore assoluto si hanno alla profondità di 9,5 m, ovvero all'incirca a metà dell'altezza del diaframma, con un incremento della temperatura massima di 8,30 °C nella stagione estiva e una diminuzione della temperatura minima di 5,57 °C nella stagione invernale. Queste variazioni termiche non pregiudicano il comportamento del terreno dal punto di vista idromeccanico. Il fatto di avere, durante il funzionamento dell'impianto, un andamento ciclico sul lungo periodo, senza progressive diminuzioni o aumenti delle semiampiezze degli andamenti della temperatura, assicura il continuo funzionamento del serbatoio geotermico che così evita un depauperamento dell'efficienza termica.

In conclusione la predisposizione di un impianto geotermico integrato con la struttura portante, rappresenta certamente un incremento di spesa iniziale, dovuto all'acquisto del materiale, all'impiego di operai specializzati e alle maggiori attenzioni da porsi nelle fasi critiche della realizzazione (legatura delle tubazioni alle gabbie di armatura, posizionamento delle stesse all'interno dello scavo e getto del calcestruzzo), ma consente di realizzare un sistema di scambio termico all'interno di una struttura che andrebbe comunque realizzata (in quanto portante) evitando ad esempio la trivellazione di sonde verticali, o lo scavo di sonde orizzontali, le quali avrebbero avuto solamente la funzione di scambiatori. In termini di potenza, l'installazione del sistema di scambio termico all'interno di quest'opera rappresenta una scelta economicamente valida, in quanto la superficie di scambio termico è elevata rispetto alle opere geotecniche normalmente eseguite in un ambiente già fortemente urbanizzato come Torino. L'ultimo, ma non meno importante vantaggio è rappresentato dalla questione della sostenibilità ambientale: grazie a questo impianto che sfrutta un'energia rinnovabile, si può cedere o estrarre calore per molteplici usi, in molti casi risparmiando l'utilizzo di combustibili fossili o energia elettrica utilizzati per ottenere lo stesso risultato.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare la mia famiglia, per avere reso possibile questo importante traguardo;
gli amici di sempre, quelli che mi hanno visto spesso latitante per motivi di studio, ma che in un modo o nell'altro ci sono sempre stati, in particolare Giovanni e Simone;
gli amici delle bande musicali, fonti inesauribili di note e buon'umore;
gli amici de "I Controcorrente", che mi hanno consentito di finire gli studi a suon di «Va a travajè!»;
gli amici dell'aula studio del Politecnico, in particolare Marco: «“oggettivamente” è stato un percorso difficile, ma ce l'abbiamo fatta!».

8 BIBLIOGRAFIA

Adam D.; Markiewicz R. (2009). Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers. In *Géotechnique*, volume 59, pp. 229–236. Thomas Telford Ltd.

Barla, M.; Barla, G.: “Torino subsoil characterization by combining site investigations and numerical modelling”, *Geomechanik und Tunnelbau 3* (Vol. 5), pp. 214-231, 2012.

Basta S.; Minchio F. (2008). *Geotermia e pompe di calore*. Edizioni A. Geotermia.Org.

Bourne-Webb P.; Burlon S.; Javed S.; Kürten S.; Loveridge F. (2016). *Analysis and design methods for energy geostructures*. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, volume 65, pp. 402–419. Elsevier.

Brandl H. (2006). *Energy foundations and other thermo-active ground structures*. In *Géotechnique*, volume 56, pp. 81–122. Thomas Telford Ltd.

Çengel Y.A. (1998). *Termodinamica e trasmissione del calore*. McGraw-Hill Libri Italia srl.

Corrado V.; Ballarini I.; Corgnati SP. (2012). *National scientific report on the TABULA activities in Italy*.

Dickson M.H.; Fanelli M. (2004). *Che cos'è l'energia geotermica?* Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR.

Di Donna A.; Cecinato F.; Barla M.; Loveridge F; (2016), *Energy performance of diaphragm walls used as heat exchangers*. Proceedings of the Institution of Civil Engineering, ICE Publishing, London, UK.

Di Donna A. (2016). *Energy walls for an underground car park*. The 25th European Young Geotechnical Engineers Conference, Sibiu, Romania.

Fracastoro G.V. (2003). *Fisica tecnica ambientale*. Otto editore.

Ilievski N. (2018). *Attivazione termica di muri contro terra*. Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino.

Lancellotta R. (2012). *Geotecnica*. Zanichelli

Lancellotta R.; Calavera J. (1999). *Fondazioni*. McGraw-Hill

Mancinelli L. (2008). *Paratie in diaframmi di calcestruzzo*. D. Flaccovio Editore.

NTC 2018. (2018). *Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018. Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»*.

Steffan A. (2018). *Attivazione energetica delle gallerie scavate con metodo convenzionale*. Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino.

Tinti F. (2008). *Geotermia per la climatizzazione*. D. Flaccovio Editore.