POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Civile



GALLERIE ENERGETICHE:

STUDIO DELL'INFLUENZA DELL'ATTIVAZIONE TERMICA SULLA TEMPERATURA DELL'ARIA INTERNA

Relatori:

Prof. Marco BARLA

Ing. Matteo BARALIS

Ing. Alice DI DONNA

Candidato:

Domenico BARRECA

Dicembre 2017

INDICE

CAPITOLO 1 INTRODUZIONE1
CAPITOLO 2 ENERGIA GEOTERMICA
2.1 Premessa
2.2 Natura delle risorse geotermiche
2.2.1 Bilancio termico6 2.2.2 Sistema geotermico e convenzione
2.3 Classificazione delle risorse geotermiche13
2.4 Geotermia superficiale15
2.5 Geostrutture energetiche17
2.5.1 Pali di fondazione
2.6 Gallerie Energetiche 24
2.6.1 Tipologie di conci energetici
METROPOLITANA
3.1 Premessa
3.2 Caratteristiche geologiche e geotecniche di Torino
3.3 Assetto idrogeologico
3.4 La Linea 1 della metropolitana
3.4.1 Caratteristiche dell'infrastruttura
3.5 Prolungamento Sud

3.5.1 Stato di avanzamento	44
CAPITOLO 4 REALIZZAZIONE DEL MODELLO NUMERICO AGLI ELEMENTI FINIT	I.47
4.1 Premessa	47
4.2 Aspetti generali del codice di calcolo	47
4.3 Cenni sul metodo degli elementi finiti	49
4.4 Equazioni che governano il problema termo-idraulico	50
4.5 Modellazione tramite Feflow	53
4.5.1 Interfaccia grafica	53
4.5.2 Costruzione del modello numerico	54
4.5.3 Simulazioni ed interpretazione dei risultati	60
4.6 La realizzazione del modello numerico	61
4.6.1 Geometria del modello	61
.6.2 Proprietà dei materiali	67
4.6.3 Condizioni iniziali e condizioni al contorno	70
4.7 Definizione della condizione al contorno della temperatura interna	72
4.7.1 Condizione di primo tentativo - Heat transfer BC	73
4.7.2 Condizione di secondo tentativo - Temperature BC	75
4.8 Studio dell'influenza della velocità del flusso	77
4.8.1 "Fluid-flux BC" = 0,1 m/s	78
4.8.2 "Temperature BC" = 0,5 m/s	80
CAPITOLO 5 STUDIO DELL'INFLUENZA DELL'ATTIVAZIONE TERMICA D	ELLA
GALLERIA SULLA TEMPERATURA DELL'ARIA INTERNA	85
5.1 Premessa	85
5.2 Simulazione del funzionamento continuo	87
5.2.1 Configurazione "Ground"	87
5.2.2 Configurazione "Air"	90
5.2.3 Configurazione "Ground & Air"	91
5.3 Simulazione del funzionamento stagionale	93

5.4 Attivazione del sistema nei mesi estivi	94
5.4.1 Configurazione "Ground	
5.4.2 Configurazione "Air	
5.4.3 Configurazione "Ground & Air"	
5.5 Attivazione del sistema nei mesi invernali	
5.5.1 Configurazione "Ground	100
5.5.2 Configurazione "Air"	102
5.5.3 Configurazione "Ground & Air"	104
5.6 Studio dell'influenza dell'attivazione termica della galleria in diver	se condizioni
ambientali	
5.6.1 Temperatura interna incrementata (+5°C)	107
5.6.2 Temperatura interna incrementata (-5°C)	109
5.7 Confronto tra i risultati ottenuti	111
CAPITOLO 6 CONCLUSIONI	115

INDICE DELLE FIGURE

Figura 2.1 - Struttura interne del pianeta Terra7
Figura 2.2 - Sezione schematica che mostra il meccanismo della tettonica a zolle (Dickinson-Fanelli,
2004)9
Figura 2.3 - Zolle crostali, dorsali, fosse oceaniche, zone di subduzione e campi geotermici. Le frecce
indicano la direzione del movimento delle zolle. (1) Campi geotermici che producono elettricità;
(2) dorsali dalle faglie trasformi; (3) zone di subduzione (Dickinson-Fanelli, 2004)10
Figura 2.4 - Sistema geotermico11
Figura 2.5 - Modello di un sistema geotermico. La curva 1 è di ebollizione dell'acqua; la curva 2 mostra
l'andamento della temperatura del fluido dal punto di ingresso A a quello di uscita E (Dickinson-
Fanelli, 2004)12
Figura 2.6 - Diagramma dell'utilizzazione dei fluidi geotermici (Lindal, 1973)15
Figura 2.7 - Pompa di calore16
Figura 2.8 - Flusso di energia (Brandtl, 2006)16
Figura 2.9 - Pali energetici
Figura 2.10 - Schema di un impianto di energia geotermica con pali (Brandl, 2006)19
Figura 2.11 - Realizzazione di un diaframma20
Figura 2.12 - Diaframma energeticamente attivo: a) schema del posizionamento dei tubi; b) tubi
geotermici fissati all'armatura del diaframma (Kovačević M. S et al., 2012)
Figura 2.13 - Cut and Cover
Figura 2.14 - Rock TBM23
Figura 2.15 - New Australian Tunneling Method23
Figura 2.16 - Anello universale
Figura 2.17 - Rappresentazione schematica di un rivestimento di una galleria costituito da conci
equipaggiati con tubi scambiatori di calore (Barla et al, 2016)
Figura 2.18 - Concio REHAU (Franzius & Pralle, 2011)27
Figura 2.19 - Concio ENERTUN (Barla & Di Donna, 2016)27
Figura 3.1 - Sezione geologica trasversale. Legenda: 1)Depositi alluvionali attuale; 2) Depositi alluvionali
recenti; 3) Depositi alluvionali antichi; 4) Formazione di Villafranchiano; 5)Deposito di Piacenziano;
6) Marna e arenaria del Miocene (Bottino, G., Civita, M1986)
Figura 3.2 - Formazione degli strati cementati (Barla M. & Barla G., 2012)
Figura 3.3 - Profilo verticale del sottosuolo di Torino basato su test di perforazione e carotaggi prelevati
durante la costruzione della linea I della metropolitana (Parla M. Parla G. 2012) 25

Figura 3.4 - Rete piezometrica della città di Torino	36
Figura 3.5 - Convoglio VAL 208 della GTT.	38
Figura 3.6 - Fermate operative della Linea 1	39
Figura 3.7 - Tracciato Linea 1 e futuri sviluppi	40
Figura 3.8 - Tratta Fermi-Porta Nuova	40
Figura 3.9 - TBM utilizzata per lo scavo della Linea 1	41
Figura 3.10 - Tratta Porta Nuova - Lingotto (Lotto 1).	42
Figura 3.11 - TBM Masha	44
Figura 3.12 - Stazione Italia '61	44
Figura 3.13 - Stazione Bengasi	45
Figura 3.14 - Pozzo terminale	46
Figura 4.1 - Interfaccia grafica.	53
Figura 4.2 - Finestra Problem Setting.	55
Figura 4.3 - Tipologie di mesh	56
Figura 4.4 - Menù per la creazione degli strati del modello 3D	57
Figura 4.5 - Proprietà dei materiali	58
Figura 4.6 - Condizioni al contorno	58
Figura 4.7 - Proprietà delle Discrete Features	59
Figura 4.8 - Problem Settings.	62
Figura 4.9 - Geometria dei punti generata su AutoCad	63
Figura 4.10 - Dominio 2D e particolare rivestimento.	63
Figura 4.11 - Conci ENERTUN in configurazione "Ground".	64
Figura 4.12 - Conci ENERTUN in configurazione "Air".	64
Figura 4.13 - Configurazione del modello 3D.	65
Figura 4.14 - Vista 3D	66
Figura 4.15 - Discrete Features che riproducono le serpentine del circuito idraulico.	67
Figura 4.16 - Posizionamento degli Observational Points.	67
Figura 4.17 - Dettaglio dei diversi materiali considerati nel modello	69
Figura 4.18 - Livello di falda	71
Figura 4.19 - Velocità di flusso dell'acquifero	71
Figura 4.20- Banca dati meteorologica ARPA Piemonte.	72
Figura 4.21 - Condizione di "Heat-transfer BC" applicata sul primo layer del modello numerico	73
Figura 4.22 - Confronto tra temperatura interna misurata e simulata, con condizione "Heat-transfer E	3C"
e velocità di flusso di 5 m/s (t=1 anno)	74
Figura 4.23 - Confronto tra temperatura interna misurata e simulata, con condizione "Heat-transfer E	3C"
e velocità di flusso nulla (t=1 anno)	75
Figura 4.24 - Condizione di "Temperature BC" applicata sul primo layer del modello numerico	75

Figura 4.25 - Confronto tra temperatura interna misurata e simulata, con condizione "Temperature BC"
e velocità di flusso di 5 m/s (t=1 anno)76
Figura 4.26 - Andamento della temperatura interna simulata nel punto C dei 5 anelli in 4 anni, con
condizione "Temperature BC" e velocità di flusso di 5 m/s77
Figura 4.27 - Andamento della temperatura nel punto A con velocità pari a 0,1 m/s
Figura 4.28 - Andamento della temperatura nel punto B con velocità del flusso d'aria pari a 0,1 m/s79
Figura 4.29 - Andamento della temperatura nel punto C con velocità del flusso d'aria pari a 0,1 m/s80
Figura 4.30 - Andamento della temperatura nel punto A con velocità del flusso d'aria pari a 0,5 m/s81
Figura 4.31 - Andamento della temperatura nel punto B con velocità del flusso d'aria pari a 0,5 m/s81
Figura 4.32 - Andamento della temperatura nel punto C con velocità del flusso d'aria pari a 0,5 m/s82
Figura 4.33 - Temperatura dell'aria interna della galleria monitorata
Figura 5.1 - Temperatura di Input del fluido termovettore (funzionamento continuo)86
Figura 5.2 - Andamento delle temperature interne misurate e di ingresso del fluido nell'anello n°3 in
configurazione "Ground"
Figura 5.3 - Andamento delle temperature massime in configurazione "Ground"
Figura 5.4 - Andamento delle temperature minime in configurazione "Ground"
Figura 5.5 - Andamento delle temperature interne misurate e di ingresso del fluido nell'anello n°3 in
configurazione "Air"90
Figura 5.6 - Andamento delle temperature massime in configurazione "Air"
Figura 5.7 - Andamento delle temperature minime in configurazione "Air"91
Figura 5.8 - Andamento delle temperature interne misurate e di ingresso del fluido nell'anello n°3 in
configurazione "Ground & Air"92
Figura 5.9 - Andamento delle temperature massime in configurazione "Ground & Air"
Figura 5.10 - Andamento delle temperature minime in configurazione "Ground & Air"
Figura 5.11 - Temperatura di Input del fluido termovettore (funzionamento stagionale estivo)94
Figura 5.12 - Andamento delle temperature interne misurate e di ingresso del fluido nell'anello n°3 in
configurazione "Ground" (Ciclo estivo)95
Figura 5.13 - Andamento delle temperature massime in configurazione "Ground" - Ciclo estivo96
Figura 5.14 - Andamento delle temperature minime in configurazione "Ground" (Ciclo estivo)96
Figura 5.15 - Andamento delle temperature interne misurate e di ingresso del fluido nell'anello n°3 in
configurazione "Air" (Ciclo estivo)
Figura 5.16 - Andamento delle temperature massime in configurazione "Air" (Ciclo estivo)97
Figura 5.17 - Andamento delle temperature minime in configurazione "Air" (Ciclo estivo)98
Figura 5.18 - Andamento delle temperature interne misurate e di ingresso del fluido nell'anello n°3 in
configurazione "Ground & Air" (Ciclo estivo)
Figura 5.19 - Andamento delle temperature massime in configurazione "Ground & Air" (Ciclo estivo)99
Figura 5.20 - Andamento delle temperature minime in configurazione "Ground & Air" (Ciclo estivo)99

Figura 5.21 - Temperatura di Input del fluido termovettore (funzionamento stagionale invernale)100
Figura 5.22 - Andamento delle temperature interne misurate e di ingresso del fluido nell'anello n°3 in
configurazione "Ground" (Ciclo invernale)101
Figura 5.23 - Andamento delle temperature massime in configurazione "Ground" (Ciclo invernale)101
Figura 5.24 - Andamento delle temperature minime in configurazione "Ground" (Ciclo invernale)102
Figura 5.25 - Andamento delle temperature interne misurate e di ingresso del fluido nell'anello n°3 in
configurazione "Air" (Ciclo invernale)102
Figura 5.26 - Andamento delle temperature massime in configurazione "Air" (Ciclo invernale)103
Figura 5.27 - Andamento delle temperature minime in configurazione "Air" (Ciclo invernale)
Figura 5.28 - Andamento delle temperature interne misurate e di ingresso del fluido nell'anello n°3 in
configurazione "Ground & Air" (Ciclo invernale)104
Figura 5.29 - Andamento delle temperature massime in configurazione "Ground & Air" (Ciclo invernale).
Figura 5.30 - Andamento delle temperature minime in configurazione "Ground & Air" (Ciclo invernale).
Figura 5.31 - Andamento delle temperature interne imposte
Figura 5.31 - Andamento delle temperature interne imposte
Figura 5.31 - Andamento delle temperature interne imposte
 Figura 5.31 - Andamento delle temperature interne imposte
 Figura 5.31 - Andamento delle temperature interne imposte
 Figura 5.31 - Andamento delle temperature interne imposte
 Figura 5.31 - Andamento delle temperature interne imposte
 Figura 5.31 - Andamento delle temperature interne imposte
 Figura 5.31 - Andamento delle temperature interne imposte
 Figura 5.31 - Andamento delle temperature interne imposte
 Figura 5.31 - Andamento delle temperature interne imposte. Figura 5.32 - Andamento delle temperature interne misurate e di ingresso del fluido nell'anello n°3 in configurazione "Ground & Air" (+5°C). Figura 5.33 - Andamento delle temperature minime in configurazione "Ground & Air" (+5°C). Figura 5.34 - Andamento delle temperature massime in configurazione "Ground & Air" (+5°C). Figura 5.35 - Andamento delle temperature interne misurate e di ingresso del fluido nell'anello n°3 in configurazione "Ground & Air" (-5°C). Figura 5.36 - Andamento delle temperature minime in configurazione "Ground & Air" (-5°C). Figura 5.36 - Andamento delle temperature minime in configurazione "Ground & Air" (-5°C). Figura 5.37 - Andamento delle temperature massime in configurazione "Ground & Air" (-5°C). Figura 5.38 - Andamento delle temperature massime in configurazione "Ground & Air" (-5°C). Figura 5.38 - Andamento delle temperature massime in configurazione "Ground & Air" (-5°C). Figura 5.38 - Andamento delle temperature massime in configurazione "Ground & Air" (-5°C). Figura 5.38 - Andamento delle temperature massime in configurazione "Ground & Air" (-5°C). Figura 5.38 - Andamento delle temperature massime in configurazione "Ground & Air" (-5°C).
 Figura 5.31 - Andamento delle temperature interne imposte
 Figura 5.31 - Andamento delle temperature interne imposte
 Figura 5.31 - Andamento delle temperature interne imposte. 106 Figura 5.32 - Andamento delle temperature interne misurate e di ingresso del fluido nell'anello n°3 in configurazione "Ground & Air" (+5°C). 107 Figura 5.33 - Andamento delle temperature minime in configurazione "Ground & Air" (+5°C). 108 Figura 5.34 - Andamento delle temperature massime in configurazione "Ground & Air" (+5°C). 108 Figura 5.35 - Andamento delle temperature misurate e di ingresso del fluido nell'anello n°3 in configurazione "Ground & Air" (-5°C). 109 Figura 5.36 - Andamento delle temperature minime in configurazione "Ground & Air" (-5°C). 109 Figura 5.37 - Andamento delle temperature massime in configurazione "Ground & Air" (-5°C). 110 Figura 5.38 - Andamento delle temperature massime in configurazione "Ground & Air" (-5°C). 110 Figura 5.37 - Andamento delle temperature massime in configurazione "Ground & Air" (-5°C). 110 Figura 5.38 - Andamento delle temperature minime in configurazione "Ground & Air" (-5°C). 110 Figura 5.39 - Andamento delle temperature minime in funzionamento continuo, invernale ed estivo, nel punto A in configurazione "Ground & Air". 112 Figura 5.39 - Andamento delle temperature minime in funzionamento continuo, invernale ed estivo, nel punto A in configurazione "Ground & Air". 113 Figura 5.40 - Andamento delle temperature massime al variare delle condizioni climatiche, nel punto A

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 2.1 - Classificazione delle risorse geotermiche in base alla temperatura (°C). Rif: (a) Muffler a	nd
Cataldi (1978); (b) Hochstein (1990); (c) Benderitter and Cormy (1990); (d) Nicholson; (e) Axellsor	۱ and
Gunnlaugsson (2000) (Dickinson-Fanelli, 2004)	14
Tabella 4.1 - Parametri termici ed idraulici del terreno	68
Tabella 4.2 - Proprietà del calcestruzzo	69
Tabella 4.3 - Parametri dell'aria interna	69
Tabella 4.4 - Proprietà delle tubazioni	70
Tabella 4.5 - Caratteristiche dei ventilatori	79
Tabella 4.6 - Temperature massime nei 5 anelli	83
Tabella 5.1 - Gradienti massimi di temperatura (Ground)	89
Tabella 5.2 - Gradienti massimi di temperatura (Air)	81
Tabella 5.3 - Gradienti massimi di temperatura (Ground & Air)	93
Tabella 5.4 - Gradienti massimi di temperatura (Ground & Air) (+5°C)	109
Tabella 5.5 - Gradienti massimi di temperatura (Ground & Air) (-5°C)	110
Tabella 5.6 - Gradienti massimi di temperatura al variare delle condizioni climatiche, nel punto A in configurazione "Ground & Air"	114

CAPITOLO 1 INTRODUZIONE

L'energia geotermica è l'energia generata per mezzo di fonti geologiche di calore e può essere considerata una forma di energia alternativa e rinnovabile. Essa si basa sui principi della geotermia ovvero sullo sfruttamento del calore naturale della Terra dovuto all'energia termica rilasciata dai processi di decadimento nucleare naturale degli elementi radioattivi quali l'uranio, il torio e il potassio, contenuti naturalmente all'interno della Terra (nucleo, mantello e crosta terrestre). La risorsa geotermica può essere classificata in base all'entalpia e si possono distinguere risorse geotermiche ad alta e bassa entalpia: le prime vengono solitamente utilizzate per la produzione di energia elettrica, mentre le seconde possono essere sfruttate, con l'ausilio di pompe di calore, per ricavare energia termica.

Alla luce di nuove scoperte in ambito geotecnico, si sono sviluppate nuove tecnologie che consentono di sfruttare questa energia termica. In particolare, si è reso possibile accoppiare alla funzione strutturale delle fondazioni e delle opere in sotterraneo quella di scambiare calore con il terreno. Questa possibilità si concretizza laddove si abbia la necessità di realizzare fondazioni profonde, diaframmi o opere in sotterraneo, in cui è quindi possibile annegare nel calcestruzzo un circuito idraulico che realizzi lo scambio termico con il terreno. Il calore così estratto ha diverse possibilità di utilizzo; se accoppiato ad una pompa di calore, permette di fornire riscaldamento invernale e condizionamento estivo agli edifici di superficie, mentre l'utilizzo diretto del calore a bassa temperatura si sposa spesso con la necessità di mantenere strade e marciapiedi liberi da ghiaccio e neve. Questo porta ad immaginare il terreno come un serbatoio da cui prelevare o in cui depositare energia termica, anche in casi ove non ci siano condizioni particolari di gradienti di temperatura anomali.

Un ulteriore passo in avanti nelle possibilità di sfruttamento di energia geotermica si è avuto a seguito della sperimentazione di sistemi che permettano di scambiare calore nelle gallerie sotterranee. Oltre a pali di fondazione e diaframmi,

1

infatti, tra le strutture sotterranee che offrono grandi potenzialità termiche, vi sono le gallerie; in particolar modo risultano molto efficienti le gallerie in ambito urbano che permettono di sfruttare l'energia direttamente sul luogo di produzione, eliminando le problematiche relative al trasporto della stessa. Nel caso di gallerie profonde, si pone un problema aggiuntivo, ovvero quello relativo al trasporto dell'energia prodotta; il vantaggio è invece rappresentato dalla possibilità di poter attingere a sistemi con una temperatura più elevata, arrivando a superare, in certi casi, i 50°C. Negli ultimi anni le gallerie urbane sono state oggetto di particolare attenzione in questo ambito e sono stati effettuati diversi lavori di ricerca e sperimentazione sulla possibilità di integrare un sistema geotermico nella metropolitana di Torino. I principali aspetti risultanti dai dati fin qui raccolti mostrano che, dal punto di vista della produzione di energia, sussistono le condizioni perché un sistema di produzione di energia geotermica nelle nuove linee metropolitane possa essere vantaggioso dal punto di vista economico.

Gli aspetti che riguardano una eventuale implementazione di questi sistemi sono però molteplici, la maggior parte dei quali riguarda le interferenze con la funzionalità del sistema di trasporto. In particolare, questo lavoro di tesi si occupa di verificare quali siano gli effetti sulla temperatura interna della galleria, a seguito dell'attivazione dell'impianto geotermico, per assicurare che essa non subisca variazioni tali da diminuire il comfort dei passeggeri. Ciò potrebbe avvenire sia nei mesi estivi che nei mesi invernali, in cui si potrebbe verificare un aumento o una diminuzione eccessiva delle temperature.

Questa tesi è suddivisa in sei capitoli, di cui il primo è introduttivo. Nel secondo capitolo vengono discussi i concetti base della geotermia, le differenti tipologie di impianto, le principali tipologie di scambiatori di calore utilizzati convenzionalmente per questi scopi, introducendo successivamente soluzioni più innovative come le geostrutture energetiche. In questo capitolo viene descritto il progetto ENERTUN, condotto dal Politecnico di Torino, che rappresenta il sistema che si è ipotizzato di installare nel rivestimento delle gallerie, in particolare nel prolungamento della Linea 1 della metropolitana di Torino. Nel terzo capitolo si introducono le principali

2

caratteristiche idrogeologiche del sottosuolo torinese e della metropolitana di Torino, descrivendo la Linea 1, già esistente ed operativa, e il prolungamento dalla stessa linea verso piazza Bengasi, i cui lavori sono già iniziati. L'ultima sezione di questo capitolo riguarda il software utilizzato per effettuare le simulazioni, ovvero il codice di calcolo FEFLOW, di cui si descrivono le potenzialità e le informazioni necessarie per il suo utilizzo. Il quarto capitolo riguarda la realizzazione del modello attraverso il codice FEFLOW, dalla costruzione della geometria, all'assegnazione delle proprietà termiche ed idrauliche dei materiali, nonché all'imposizione delle condizioni iniziali e di contorno, le quali sono esse stesse il risultato di alcune simulazioni svolte. Nel quinto capitolo vengono presentati i diversi scenari di progetto, considerando le tre diverse configurazioni che il concio ENERTUN può assumere e le diverse modalità di funzionamento con cui l'impianto può funzionare, riportando i risultati delle diverse analisi. Infine si valutano le eventuali conseguenze che occorrerebbero in caso di installazione dell'impianto in ambienti soggetti a condizioni climatiche diverse. Nell'ultimo capitolo si riassumono i risultati ottenuti e se ne discutono le conseguenze che ne derivano.

CAPITOLO 2 ENERGIA GEOTERMICA

2.1 Premessa

Il calore è definito come una forma di energia e, nel caso specifico, il calore contenuto nell'interno della Terra è definito come energia geotermica, che è all'origine di molti fenomeni geologici attivi nel pianeta. Ciononostante, non tutto il calore interno della Terra può essere trasformato in energia, pertanto, dal punto di vista ingegneristico, con l'espressione "energia geotermica" si indica quella parte del calore terrestre che può essere estratta dal suolo e sfruttata dall'uomo. Uno dei principali motivi che rendono questa forma di energia di grande interesse è che può essere considerata una forma di energia alternativa e rinnovabile, generata prevalentemente dai processi di decadimento nucleare naturale degli elementi radioattivi all'interno della Terra (nucleo, mantello e crosta terrestre). Essendo il fenomeno, per sua natura, molto complesso è necessario classificare le diverse forme di questa risorsa, basandosi sull'entalpia dei fluidi. L'entalpia, che può essere considerata più o meno proporzionale alla temperatura, esprime la quantità di energia interna che un sistema termodinamico può scambiare con l'ambiente. In particolare, le applicazioni geotermiche si dividono in opere ad alta, media e bassa entalpia. Queste ultime, che saranno oggetto di studio in questa tesi, hanno avuto un crescente sviluppo grazie alla possibilità di poter accoppiare alla funzione strutturale delle fondazioni e opere in sotterraneo quella di scambiare calore con il terreno. Tali sistemi permettono di sfruttare la costruzione di opere strutturali per produrre energia annegando nel calcestruzzo un circuito idraulico che realizzi lo scambio termico.

Perché si possa produrre energia, il sistema va accoppiato ad una pompa di calore che permette di fornire riscaldamento invernale e condizionamento estivo agli edifici di superficie. È inoltre possibile sfruttare l'utilizzo diretto del calore a bassa temperatura, che si sposa spesso con la necessità di mantenere strade e marciapiedi liberi da ghiaccio e neve. In quest'ottica il terreno rappresenta un serbatoio da cui

5

prelevare o in cui depositare energia termica, anche in casi ove non ci siano condizioni particolari di gradienti di temperatura anomali. Le strutture più comunemente usate in questo campo sono i pali di fondazione e diaframmi, ma ultimamente si sta focalizzando l'attenzione sulle gallerie, che offrono grandi potenzialità termiche, ed in particolar modo le gallerie urbane, che permettono di sfruttare l'energia direttamente sul luogo di produzione, eliminando le problematiche relative al trasporto della stessa. Per le gallerie profonde, si pone il problema del trasporto dell'energia creata ma la temperatura a cui può essere sfruttato il calore geotermico è più elevata, arrivando a superare in certi casi i 50°C.

2.2 Natura delle risorse geotermiche

2.2.1 Bilancio termico

È ormai noto che la temperatura all'interno della Terra aumenta all'aumentare della profondità. Per studiare il fenomeno è necessario introdurre il concetto di gradiente geotermico; esso viene definito come la variazione di temperatura all'incremento della profondità entro la crosta terrestre. Le migliaia di misurazioni effettuate evidenziano che, mediamente, l'aumento di temperatura è pari a circa 3°C ogni 100 m; si definisce inoltre grado geotermico come l'intervallo di profondità al quale corrisponde un incremento di temperatura pari a 1°C. Perciò, sapendo che la temperatura nei primi metri sotto la superficie corrisponde, con buona approssimazione, alla temperatura sarà 65°-75°C a 2000 m di profondità, 90°-105°C a 3000 m e via di seguito per alcune migliaia di metri. Bisogna comunque affermare che il valore del gradiente geotermico indicato è molto variabile; in determinate zone può essere anche 10 volte superiore o significativamente inferiore. Tali variazioni dipendono dalla diversa costituzione del sottosuolo; laddove sono presenti camere magmatiche il valore è superiore, mentre in altre, dove è presente un forte sprofondamento della crosta, è molto più basso.

La differenza di temperatura tra le zone profonde, più calde, e quelle superficiali, più fredde, dà origine ad un flusso di calore dall'interno verso l'esterno della Terra, tendente a stabilire le condizioni di uniformità, condizioni che non saranno mai raggiunte. Il flusso di calore terrestre medio è 65 mWm⁻² nelle aree continentali e 101 mWm⁻² nelle aree oceaniche, con una media ponderale di 87 mWm⁻². Questi valori sono basati su 24774 misure eseguite su 20201 siti, che coprono circa il 62% della superficie terrestre. Il flusso di calore delle aree non coperte da misure è stato stimato tenendo conto della distribuzione delle unità geologiche. I dati di flusso di calore terrestre si possono ottenere dall'analisi di Pollock et al. (1993). L'aumento della temperatura con la profondità porta a manifestazioni tangibili e visibili del calore interno della Terra, come i vulcani, i geysers, le fumarole, le sorgenti calde, e a fenomeni meno percettibili dagli uomini, ma con effetti tali da paragonare la Terra ad un enorme "motore termico". Questi fenomeni rientrano nella teoria della tettonica a zolle, strettamente legata all' energia geotermica (Dickinson & Fanelli,2004).

Il nostro pianeta è formato dalla crosta (che ha uno spessore medio di 35 km nelle aree continentali e di 6 km in quelle oceaniche), dal mantello (spesso circa 2900 km) e dal nucleo (che ha un raggio di circa 3470 km) (Figura 2.1).



Figura 2.1 - Struttura interne del pianeta Terra.

L'involucro esterno del globo, che prende il nome di litosfera, è formato dalla crosta e dalla parte più esterna del mantello. La litosfera, che ha uno spessore che va da meno di 80 km nelle aree oceaniche a più di 200 km in quelle continentali, si comporta come un corpo rigido. Sotto la litosfera si trova l'astenosfera, formata dalla parte bassa del mantello, che, rispetto alla prima, ha un comportamento "meno rigido" o "più plastico". In altre parole, sulla scala geologica, ove i tempi si misurano in milioni di anni, in certi fenomeni, l'astenosfera si comporta in modo simile a quello di un fluido viscoso. La trasmissione del calore all'interno della terra avviene per conduzione negli strati dove è massimo il gradiente termico, come la litosfera, e per convenzione nel mantello, dove per convenzione si intende il processo di trasferimento di calore verso la zona di assorbimento. Il mantello si comporta su scale di tempo geologiche come un fluido molto viscoso e mantiene celle di convenzione con velocità media di alcuni centimetri all'anno. Il gradiente termico è molto elevato negli strati dove la trasmissione di calore avviene per conduzione, come la crosta; la presenza di convenzione attiva fa sì che il gradiente si riduca notevolmente all'interno della Terra. Tra le principali sorgenti di calore all'interno della Terra, la più significativa è dovuta al decadimento degli elementi radioattivi (Cassinis, 2005).

Enormi volumi di rocce profonde, allo stato fuso o semifuso, più calde, meno dense e più leggere dei materiali sovrastanti, risalgono verso la superficie, mentre le rocce più vicine alla superficie, più fredde, più dense e più pesanti, tendono a scendere per riscaldarsi e risalire di nuovo. Nelle zone dove è più sottile, e soprattutto nelle aree oceaniche, la litosfera è spinta verso l'alto e fratturata dal materiale molto caldo e parzialmente fuso, che risale dall'astenosfera in corrispondenza dei rami ascendenti delle celle convettive. É questo meccanismo che ha formato, e tuttora forma, le dorsali, che si estendono per oltre 60000 km sotto gli oceani, emergendo in alcune zone (Azzorre, Islanda), talvolta insinuandosi tra i continenti come nel Mar Rosso. Una frazione relativamente piccola di rocce fuse, che risale dall'astenosfera, emerge dalla cresta delle dorsali e, a contatto con l'acqua marina, solidifica e forma nuova crosta oceanica. La maggior parte del materiale che risale dall'astenosfera, tuttavia, si divide in due rami che scorrono in direzioni opposte e fanno in modo che i fondali oceanici, situati sui due lati delle dorsali, si allontanino l'uno dall'altro ad una velocità di pochi centimetri l'anno, come si evince dalla Figura 2.2. Di conseguenza, la superficie dei fondali oceanici (litosfera oceanica) tenderebbe ad aumentare. Le dorsali sono tagliate



perpendicolarmente da enormi fratture, talvolta lunghe qualche centinaio di chilometri, chiamate faglie trasformi (Dickinson & Fanelli, 2004).

Figura 2.2 - Sezione schematica che mostra il meccanismo della tettonica a zolle (Dickinson-Fanelli, 2004).

Questi fenomeni portano ad una semplice osservazione: poiché non c'è evidenza di un aumento della superficie della Terra nel tempo, la formazione di nuova litosfera lungo le dorsali e l'espansione dei fondi oceanici devono necessariamente essere compensate da una riduzione (o assorbimento) della litosfera, di pari entità, in altre parti del pianeta. In effetti, questo è quello che avviene nelle zone di subduzione, le maggiori delle quali si trovano in corrispondenza delle grandi fosse oceaniche, come quelle che si estendevano lungo il margine occidentale dell'Oceano Pacifico e lungo la costa occidentale dell'America Meridionale. Nelle zone di subduzione la litosfera si inflette verso il basso, si immerge sotto la litosfera adiacente e scende nelle zone profonde molto calde, dove viene inglobata nel mantello, e il ciclo ricomincia nuovamente. Durante la discesa, parte del materiale litosferico ritorna allo stato fuso e può risalire in superficie attraverso fratture della crosta. Come risultato parallelamente alle fosse, dal lato opposto a quello in cui si allungano le dorsali, si sono formati archi magmatici con molti vulcani. Le dorsali, le faglie trasformi e le zone di subduzione formano un enorme reticolato, che divide la Terra in placche litosferiche o zolle: sei di grandi dimensioni e numerose altre più piccole.



Figura 2.3 - Zolle crostali, dorsali, fosse oceaniche, zone di subduzione e campi geotermici. Le frecce indicano la direzione del movimento delle zolle. (1) Campi geotermici che producono elettricità; (2) dorsali dalle faglie trasformi; (3) zone di subduzione (Dickinson-Fanelli, 2004).

A causa delle grandi tensioni prodotte dai fenomeni descritti precedentemente, le zolle si muovono, scivolano lentamente l'una contro l'altra, collidono e cambiano continuamente la loro reciproca posizione. La Figura 2.3 mostra le zolle ed il loro movimento. I margini delle zolle corrispondono a zone di fragilità e di forte fratturazione della crosta, caratterizzate da un'elevata sismicità, dalla presenza di molti vulcani e, a causa della risalita di materiali fusi molto caldi verso la superficie, da un flusso di calore terrestre elevato. Le più importanti aree geotermiche si trovano nei pressi dei margini delle discontinuità.

2.2.2 Sistema geotermico e convenzione

La formazione di un sistema geotermico può avvenire sia in zone in cui il gradiente geotermico è considerato normale, o leggermente più alto, sia in quelle zone che sono vicine ai margini delle cosiddette zolle crostali; in queste zone infatti il valore del gradiente geotermico può essere decisamente più elevato di quello medio. Solitamente il sistema geotermico, nelle zone in cui il gradiente è normale o lievemente superiore, a profondità che possono essere tecnicamente sfruttate, non supera i 100°C. Vi sono, però, anche delle zone in cui tale gradiente è molto più alto ed

in queste zone si registra un'estrema variabilità di temperature (da temperature "basse" a temperature oltre i 400°C). Un sistema geotermico (Figura 2.4) può essere definito schematicamente come "un sistema acqueo convettivo, che, in uno spazio confinato della parte superiore della crosta terrestre, trasporta il calore da una sorgente termica al luogo, generalmente la superficie, dove il calore stesso è assorbito (disperso o utilizzato)" (Hochstein, 1990). Tre sono gli elementi che lo compongono: la sorgente di calore, il serbatoio ed il fluido, che è il mezzo che trasporta il calore. La sorgente di calore può essere rappresentata dal normale calore della Terra, come in certi sistemi a bassa temperatura, oppure da un fenomeno localizzato, come un'intrusione magmatica a temperatura molto alta (>600°C), che si è posizionata a profondità relativamente piccola (5-10 km). Il serbatoio è un complesso di rocce calde permeabili nel quale i fluidi possono circolare assorbendo il calore.



Figura 2.4 - Sistema geotermico.

Il serbatoio generalmente è ricoperto da rocce impermeabili e connesso a zone di ricarica superficiali dalle quali le acque meteoriche possono sostituire, totalmente o parzialmente, i fluidi perduti attraverso vie naturali (per esempio sorgenti) o che sono estratti mediante pozzi. Il fluido geotermico, nella maggioranza dei casi, è acqua meteorica in fase liquida o vapore, in dipendenza dalla sua temperatura e pressione. Quest'acqua spesso trascina con se sostanze chimiche e gas, come CO₂, H₂S ed altri.

Le leggi che regolano la convezione dei fluidi sono alla base del meccanismo dei sistemi geotermici. La convenzione si instaura quando viene applicata una sorgente di calore da sotto o un assorbimento di calore al bordo superiore; il calore che si accumula nello strato inferiore del fluido ne provoca l'espansione termica e una diminuzione di densità; il fluido diviene gravitazionalmente instabile rispetto agli strati soprastanti e migra verso l'alto, sino a raggiungere lo strato superiore, dove rilascia il calore. Si formano perciò celle di convenzione in cui il fluido surriscaldato risale lungo un lato della cella e ridiscende, raffreddato, lungo l'altro (Figura 2.5). Per contro il volume centrale della cella partecipa solo marginalmente alla convenzione. È possibile creare un regime convettivo anche con una sorgente di calore distribuita all'interno del fluido, in questo caso si produrrà una risalita di materiale caldo più diffusa e una ridiscesa localizzata (Cassinis, 2005).



Figura 2.5 - Modello di un sistema geotermico. La curva 1 è di ebollizione dell'acqua; la curva 2 mostra l'andamento della temperatura del fluido dal punto di ingresso A a quello di uscita E (Dickinson-Fanelli, 2004).

In natura, inoltre, si possono formare sistemi geotermici in varie combinazioni di situazioni geologiche, fisiche e chimiche, dando origine a tipi diversi di sistemi. La sorgente di calore è l'unico dei tre elementi di un sistema geotermico che deve essere naturale. Gli altri due elementi, se esistono le condizioni adatte, possono essere "artificiali". Per esempio, i fluidi geotermici estratti dal serbatoio per alimentare la

turbina di una centrale elettrica, dopo averne sfruttato l'energia, possono essere immessi di nuovo nel serbatoio attraverso appositi pozzi di reiniezione. In questo modo la ricarica naturale del serbatoio è integrata dalla ricarica artificiale. Da diversi anni, inoltre, la reiniezione dei fluidi sfruttati è stata adottata per ridurre drasticamente l'impatto ambientale degli impianti geotermici.

2.3 Classificazione delle risorse geotermiche

Non esiste ancora una terminologia standard adottata in campo internazionale da scienziati e tecnici geotermici. Quelle che seguono sono alcune delle definizioni e classificazioni più diffusamente usate nel settore delle risorse geotermiche. Quando si parla genericamente di risorse geotermiche, di solito ci si riferisce a quelle che più precisamente dovrebbero essere chiamate risorse di base accessibili, intendendo con questo termine tutta l'energia termica contenuta tra la superficie terrestre ed una determinata profondità, in un'area definita e misurata partendo dalla temperatura media annua locale. Le risorse di base accessibili comprendono le risorse di base accessibili utili (= Risorse) corrispondenti a quella parte delle risorse di base accessibili che potrebbe essere estratta, economicamente in accordo con la legislazione locale, entro un periodo di tempo definito (meno di 100 anni). Questa categoria comprende le risorse economiche individuate (= Riserve) corrispondenti a quella parte delle risorse di una determinata area, che può essere estratta legalmente ad un costo competitivo con altre fonti commerciali di energia e che è stata confermata da perforazioni o dai risultati dell'esplorazione geologica, geochimica e geofisica.

Il più comune criterio di classificazione delle risorse geotermiche si basa sull'entalpia dei fluidi, che trasferiscono il calore dalle rocce calde profonde alla superficie. L'entalpia, che può essere considerata più o meno proporzionale alla temperatura, è usata per esprimere il contenuto termico (energia termica) dei fluidi, e dà un'idea approssimativa del loro "valore". Le risorse sono divise in risorse a bassa, media ed alta entalpia (o temperatura), secondo diversi criteri. La Tabella 2.1 riporta le classificazioni proposte da alcuni esperti (Dickinson-Fannelli,2004).

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

Tabella 2.1 - Classificazione delle risorse geotermiche in base alla temperatura (°C). Rif: (a) Muffler and Cataldi (1978); (b) Hochstein (1990); (c) Benderitter and Cormy (1990); (d) Nicholson; (e) Axellson and Gunnlaugsson (2000) (Dickinson-Fanelli, 2004).

L'energia geotermica è generalmente definita rinnovabile e sostenibile. Il termine rinnovabile si riferisce ad una proprietà della sorgente di energia, mentre il termine sostenibile descrive come la risorsa è utilizzata. Per rinnovabile si intende che la ricarica energetica avviene attraverso l'apporto al sistema di fluidi caldi contemporaneamente (o in tempi comparabili) allo sfruttamento. La sostenibilità dell'utilizzazione di una risorsa dipende dalla sua quantità iniziale, dalla velocità con cui si rigenera e dalla velocità con cui si consuma. In questo caso non si pongono limitazioni sul tempo di utilizzo purché la risorsa si rigeneri ad un velocità maggiore di quanto non sia sfruttata. Quando si parla di fluidi geotermici è bene, comunque, indicare la loro temperatura, o almeno un intervallo di temperatura, perché i termini bassa, media o alta possono avere significati diversi e creare errori di interpretazione. I fluidi con temperatura inferiore a 20°C sono usati raramente ed in casi particolari oppure per il funzionamento di pompe di calore. Il diagramma di Lindal (Figura 2.6) mette in evidenza due aspetti importanti dell'utilizzazione delle risorse geotermiche: (a) con progetti a cascata o combinati è possibile estendere lo sfruttamento delle risorse e (b) la temperatura dei fluidi costituisce il principale fattore limitante la possibile utilizzazione. L'ingegneria degli impianti industriali già esistenti, che utilizzano processi termici, può, in alcuni casi, essere modificata ed adattata ai fluidi geotermici, estendendone le possibili applicazioni.



Figura 2.6 - Diagramma dell'utilizzazione dei fluidi geotermici (Lindal, 1973).

2.4 Geotermia superficiale

Le pompe di calore geotermiche utilizzano il terreno o l'acqua che si trova nel terreno come fonte o dispersore di calore. Come accennato in precedenza, la temperatura del terreno, fino a pochi metri sotto la superficie, rimane pressoché invariata nel corso delle stagioni, non segue perciò il comportamento dell'aria ambientale che subisce notevoli escursioni termiche. Proprio per questo motivo, si ha a disposizione una differenza di temperatura che consente di estrarre calore dal terreno d'inverno e cedere calore al medesimo in estate, utilizzandolo rispettivamente per riscaldare e raffrescare.

L'utilizzo di pompe di calore geotermiche non è quindi necessariamente legato ad un gradiente geotermico anomalo e non richiede perforazioni profonde. Il metodo più semplice ed immediato di ottenere energia termica è quello di estrarre il calore dall'acqua di una falda sotterranea, estraendola e scaricandola in un corso d'acqua, o reiniettandola in falda. È però possibile estrarre il calore dal terreno per mezzo di una tubazione continua sotterrata, con al suo interno un fluido refrigerante o un liquido antigelo mantenuto a bassa temperatura e pressurizzato (Figura 2.7).



Figura 2.7 - Pompa di calore.

Le pompe di calore funzionano in linea di principio come un frigorifero con ciclo invertito. Una pompa di calore è caratterizzata da un coefficiente di performance COP, corrispondente al rapporto tra la produzione di energia di una pompa di calore e l'energia necessaria al funzionamento del sistema, entrambi espressi in kW. Un valore di COP pari a 4 rappresenta un flusso complessivo di energia composto per $\frac{1}{4}$ da energia elettrica esterna, e per $\frac{3}{4}$ da energia ricavata al terreno (Figura 2.8).



Figura 2.8 - Flusso di energia (Brandtl, 2006).

L'efficienza di una pompa di calore è fortemente influenzata dalla differenza tra la temperatura estratta e quella utilizzata. Un'alta temperatura di utilizzo ed una bassa temperatura di estrazione nello scambiatore di calore causano una riduzione di efficienza. Perché sia economicamente vantaggioso, il sistema deve raggiungere un $COP \ge 4$. È inoltre necessario definire il fattore di prestazione stagionale (SPF) del sistema attivo termicamente, il quale coincide con il rapporto tra tutta l'energia termica fornita durante il periodo invernale e l'energia elettrica richiesta dalla macchina durante lo stesso periodo (Kovačević M. S et al., 2012).

2.5 Geostrutture energetiche

Le geostrutture energetiche sono una forma di sfruttamento dell'energia geotermica a bassa profondità. Le geostrutture sono elementi costruttivi di edifici che si trovano a diretto contatto con il terreno e sono in grado di trasmettere il calore. Ne fanno parte, ad esempio, i cosiddetti pali energetici, le solette di fondazione e i diaframmi. Queste strutture sfruttano il terreno sottostante gli edifici. Il loro vantaggio, rispetto ai classici scambiatori geotermici, risiede principalmente nei minori costi di realizzazione dell'impianto, dal momento che vengono utilizzate opere già previste per scopi strutturali. Inoltre, annegando gli scambiatori nel calcestruzzo, si sfruttano le ottime proprietà termiche di questo materiale, caratterizzato da una conducibilità termica maggiore di quella del terreno. Il principale limite risiede nell'applicabilità quasi esclusiva alle strutture di nuova realizzazione. La maggior parte delle applicazioni pratiche è relativa a fondazioni (pali energetici) o strutture di contenimento. Sono pochi gli esempi documentati di applicazioni in galleria (Barla & Di Donna, 2016).

2.5.1 Pali di fondazione

I pali di fondazione sono delle strutture in calcestruzzo armato che vengono impiegate quando la soluzione con fondazioni superficiali non è in grado di soddisfare le esigenze del problema geotecnico. In particolare si ricorre a queste fondazioni profonde per:

a) trasferire il carico a strati di terreno profondi più resistenti;

b) trasferire il carico anche attraverso tensioni tangenziali d'attrito o d'aderenza lungo il fusto;

- c) resistere ad azioni di trazione;
- d) resistere ad azioni orizzontali;
- e) resistere in gruppo a carichi inclinati;
- f) assicurare la stabilità anche in caso di scalzamento degli strati superficiali;
- g) trasferire il carico al di sotto di un futuro piano di scavo;
- h) attraversare strati di terreno rigonfiante.

Se i pali sono opportunamente equipaggiati, questo sistema prevede che il geoscambio avvenga attraverso la struttura di fondazione dell'edificio da climatizzare. Si parla in tal caso di geostrutture o di pali energetici. La conduttività termica e la capacità di stoccaggio fanno del calcestruzzo un materiale da costruzione ideale per accumulatori d'energia termica. I pali e le pareti in calcestruzzo a contatto con il terreno contengono condotti in materiale sintetico, per scambiare calore con il terreno.

Il diametro dei pali in calcestruzzo armato varia tipicamente tra i 0.4-1.5 m e la lunghezza da qualche metro fino a più di 30 m. All'interno di questi pali è installato un tubo o un fascio di tubi in polietilene (Figura 2.9), il cui tipo dipende anche dallo spessore del palo stesso. Questi tubi sono poi annegati nel calcestruzzo per assicurare un buon contatto termico (Brandl, 2006).



Figura 2.9 - Pali energetici.

Questa soluzione consente di integrare la funzione energetica ad un costo basso, ma necessita, da una parte, la propria integrazione nel progetto fin dall'inizio e, dall'altra, una considerazione globale per quelli che sono gli aspetti costruttivi e di consumo energetico. Per tutta la lunghezza del palo, è molto importante che i tubi siano distanziati omogeneamente tra di loro lungo la circonferenza per evitare reciproche interferenze. Come fluido termovettore spesso si utilizza unicamente dell' acqua, ma è anche possibile utilizzare una miscela di acqua e glicole, che circola in un circuito chiuso tra i pali e la pompa di calore/macchina frigorifera (Figura 2.10). Gli elementi che connettono i pali ad un distributore posto in superficie sono dei tubi orizzontali, normalmente posti sotto la base di cemento dello stabile. A volte è possibile che queste connessioni attraversino la base stessa nel punto in cui è posto il distributore. Inoltre, se la platea di fondazione è situata sotto il livello dell'acqua, è necessario assicurare che questo punto di attraversamento dei tubi risulti ermetico.



Figura 2.10 - Schema di un impianto di energia geotermica con pali (Brandl, 2006).

2.5.2 Paratie

Una paratia o diaframma è una struttura prefabbricata o gettata in opera che viene utilizzata per sostenere scavi artificiali di natura provvisoria o definitiva, impedendo lo scivolamento del terreno all'interno dello scavo. Talvolta la sola paratia non è in grado di reggere la spinta del terreno e si rende necessario l'inserimento al suo interno di tiranti: queste opere sono dette paratie tirantate. Una paratia è realizzata con apposite macchine provviste di ganasce o frese che, calate nel terreno attraverso dei cordoli guida, scavano una sezione verticale: per evitare crolli di materiale della parete cui viene a mancare il sostegno, lo scavo è realizzato tramite impiego di fanghi bentonitici. Eseguito lo scavo il diaframma prefabbricato è collocato nella sede (Figura 2.11); se invece il manufatto è gettato in opera, viene realizzato in calcestruzzo armato (l'armatura è solitamente costituita da una gabbia d'acciaio) oppure con un composto detto "plastico", costituito da bentonite e calcestruzzo (Lancellotta, 2014).



Figura 2.11 - Realizzazione di un diaframma.

I diaframmi energeticamente attivi presentano fasci di tubi in polietilene che vengono normalmente posati a meandro e serrati all'armatura tramite elementi di fissaggio o fascette; sono poi immerse nel calcestruzzo per assicurare un buon contatto termico. Un esempio di struttura di questo tipo è riportata nella Figura 2.12 in cui è mostrata una paratia per il sostegno di uno scavo profondo.



Figura 2.12 - Diaframma energeticamente attivo: a) schema del posizionamento dei tubi; b) tubi geotermici fissati all'armatura del diaframma (Kovačević M. S et al., 2012).

Da uno studio di analisi termica condotta su un diaframma reale sono stati estrapolati i seguenti risultati:

 la disposizione ideale della serpentina, che ottimizza lo scambio termico, è quella che evita la vicinanza di tratti di tubo che creano elevati gradienti di temperatura;

 per ogni disposizione della serpentina esiste una velocità ottimale del fluido termovettore;

• si è dimostrato che l'utilizzo "duale" del sistema geotermico, ovvero nella doppia modalità di riscaldamento invernale e raffrescamento estivo, attraverso il ricarico periodico di energia termica nel terreno consente di evitare la deriva termica, che si osserverebbe nel caso di utilizzo in modalità "singola".

La deriva termica, ovvero la variazione irreversibile del campo di temperatura nel terreno, comporta una perdita di efficienza dell'impianto e conseguenze negative di natura ambientale.

Ulteriori approfondimenti su analisi termo-meccaniche atte a valutare gli effetti geotecnici e strutturali sul sistema diaframma/terreno, mostrano che gli effetti delle sollecitazioni termiche determinano la nascita di azioni interne non previste per i comuni diaframmi, che richiedono un'analisi specifica. In merito alle azioni interne al diaframma, mentre per il momento flettente si registrano variazioni trascurabili rispetto alla situazione precedente l'azione termica, la sollecitazione assiale subisce una considerevole variazione, per effetto della resistenza del terreno al libero allungamento (Mauri L. & Sterpi D., 2015).

Gradi di vincolo diversi, applicati fra il diaframma e gli altri elementi strutturali (tiranti, puntoni, elementi della sovrastruttura), possono ulteriormente modificare la risposta dell'opera alle sollecitazioni termiche. Rimane quindi raccomandabile, in generale, l'utilizzo di strumenti di simulazione numerica in fase di progettazione per una previsione accurata della risposta del diaframma e delle strutture connesse.

2.5.3 Gallerie superficiali

Le gallerie sono strutture lineari caratterizzate da lunghezze che possono arrivare a decine di kilometri e che quindi coinvolgono grandi volumi di terreno o di roccia utilizzabili nel processo di estrazione di energia geotermica. Esse possono essere realizzate con tre diversi metodi costruttivi, a seconda dei quali esistono diversi modi con cui le tubazioni geotermiche possono essere integrate nel supporto delle gallerie. La prima tecnologia di scavo è il cosiddetto "Cut & Cover method", rappresentato nella Figura 2.13, il quale si basa sullo scavo a cielo aperto in cui vengono inserite delle paratie laterali in calcestruzzo armato con immediato getto di una piattaforma superiore, mentre lo scavo e l'armatura della galleria vera e propria vengono eseguiti in un secondo momento, dopo che la platea stradale è stata ripristinata.



Figura 2.13 - Cut and Cover.

La seconda tecnologia di scavo consiste nello scavo a piena sezione con TBM realizzato mediante una testa rotante, visibile nella Figura 2.14, su cui sono montati dei dischi taglianti. In questo caso il sistema di supporto è costituito da conci in calcestruzzo prefabbricati. Tali conci possono essere termicamente attivati inserendo, in stabilimento, le tubazioni geotermiche disposte a meandro all'interno dei conci e fissandole all'armatura.



Figura 2.14 - Rock TBM.

La terza tecnologia di scavo è il cosiddetto "New Austrian Tunneling Method" (NATM); tale metodo prende in considerazione la capacità dell'ammasso roccioso di autosostenersi attraverso il controllo del processo di ridistribuzione della forza nell'anello che circonda lo scavo e la scelta delle opere di sostegno. Per fare ciò si suddivide lo scavo in più fasi, come mostrato nella Figura 2.15.



Figura 2.15 - New Australian Tunneling Method.

Le tubazioni geotermiche, in questo caso, possono essere fissate ad un geotessuto posto tra il rivestimento di prima fase e quello definitivo. L'energia geotermica estratta in questo modo non deriva solo dall'inerzia termica del terreno ma anche dal calore generato dal traffico che caratterizza la galleria; da ciò si evince come l'attivazione termica possa apportare un ulteriore beneficio in termini di raffreddamento interno della galleria stessa.

2.6 Gallerie Energetiche

La maggior parte delle gallerie più recenti sono realizzate utilizzando uno scavo a sezione piena con TBM. Questa tecnologia permette lo scavo in ammassi rocciosi e terreni di non elevate caratteristiche meccaniche, comportando rischi minimi di danneggiamento per le strutture in superficie; di conseguenza, essa si configura come una tecnica particolarmente vantaggiosa per la realizzazione di scavi all'interno di città. Il supporto di queste gallerie solitamente è costituito da conci prefabbricati in calcestruzzo armato collegati trasversalmente a formare anelli di 1-2 m di larghezza.

In particolare, la tecnologia più diffusa attualmente è quella del *anello universale*, sistema che consente di dimensionare un numero ridotto di tipologie di conci per coprire l'intero percorso del tunnel, assecondando rettilinei, curve e pendenze semplicemente ruotando la collocazione dei vari conci all'interno dell'anello stesso (Figura 2.16).



Figura 2.16 - Anello universale.

I conci energetici sono conci prefabbricati in calcestruzzo armato realizzati in stabilimento seguendo la stessa procedura di quelli tradizionali. L'unica differenza
consiste nell'introduzione, prima del getto, di un sistema di tubi per lo scambio termico fissati alla gabbia di armatura. Il fluido che scorre nei tubi è detto fluido termovettore. Quest'ultimo costituisce il mezzo per l'estrazione del calore dal terreno e attraversa la galleria per tutta la sua estensione. Esistono infatti due categorie di tubazioni; il condotto principale che corre in direzione longitudinale all'asse del tunnel e le serpentine, che percorrono la circonferenza dei singoli anelli che compongono il rivestimento; (Figura 2.17).



Figura 2.17 - Rappresentazione schematica di un rivestimento di una galleria costituito da conci equipaggiati con tubi scambiatori di calore (Barla et al, 2016).

La fase successiva, necessaria nel caso in cui si voglia sfruttare l'energia geotermica per il riscaldamento o raffreddamento degli edifici, consiste nell'accoppiamento con una pompa di calore. È anche possibile utilizzare il calore così ricavato per ottenere un riscaldamento diretto delle superfici di traffico (ad esempio marciapiedi e piattaforme ferroviarie), per mantenerle libere da neve e ghiaccio.

La variazione stagionale tra riscaldamento e raffreddamento è un aspetto chiave poiché il sottosuolo, in certi casi, può agire come un serbatoio di energia, capace di immagazzinare calore in eccesso durante la stagione estiva da utilizzare per il riscaldamento durante la stagione invernale. Gli aspetti principali da considerare nel progetto di una galleria energetica sono legati al fluido termovettore ed alla disposizione delle serpentine; si vuole che la temperatura del fluido in entrata non sia troppo differente rispetto alla temperatura del terreno indisturbato, questo perché si andrebbe ad intaccare in maniera significativa l'equilibrio termico del suolo oltre che l'efficienza della pompa di calore (perché l'efficienza diminuisce con l'aumentare della differenza di temperatura). Al tempo stesso, differenze di temperatura troppo basse implicherebbero un impianto geotermico di dimensioni eccessive per soddisfare la domanda, per cui in seguito ad alcuni studi sono state ricavate le temperature che portano ad un'ottimizzazione della soluzione (Barla et al., 2016):

> $|Two-Tg|=6\div11^{\circ}$ C in regime di riscaldamento $|Two-Tg|=11\div17^{\circ}$ C in regime di raffreddamento

|*Two-Twi*|=3÷5°C

in cui:

- Two: temperatura del fluido in uscita;
- Twi: temperatura del fluido in entrata;
- Tg: temperatura del terreno indisturbato.

2.6.1 Tipologie di conci energetici

Le tubazioni, solitamente in polietilene reticolato (Pe-Xa), sono caratterizzate da un diametro di circa 20 mm e sono inserite all'interno dei conci con una disposizione a meandro per massimizzare l'efficienza dello scambio termico. La prima tipologia di concio energetico è stato sviluppato dalla REHAU S.p.A. e prevede una disposizione delle tubazioni a meandro con sviluppo prevalente nella direzione dell'asse della galleria. L'estremità delle tubazioni inserite in ciascun concio è collegata trasversalmente alla tubazione del concio adiacente tramite delle tasche realizzate in stabilimento. I conci energetici REHAU (Figura 2.18) sono stati testati con successo in Austria, all'interno di un tunnel della ferrovia ad alta velocità, dimostrando la fattibilità e l'efficacia del sistema.



Figura 2.18 - Concio REHAU (Franzius & Pralle, 2011).

Recentemente, è stata sviluppata una nuova tipologia di concio energetico, nell'ambito del progetto ENERTUN, per il quale è stata depositata domanda di brevetto italiana dal Politecnico di Torino. Grazie ad una disposizione innovativa delle tubazioni (Figura 2.19), tale concio permette di ridurre le perdite di carico e aumentare l'efficienza di scambio termico.



Figura 2.19 - Concio ENERTUN (Barla & Di Donna, 2016).

Lo stesso concio può essere utilizzato per raffreddare l'ambiente interno delle gallerie. Il concio è di semplice fabbricazione e manutenzione, economico, affidabile e adattabile secondo specifiche necessità. Con la sua attivazione, il concio ENERTUN consente:

• il riscaldamento invernale ed il condizionamento estivo degli edifici mediante un sistema energetico sostenibile e rinnovabile;

• la diminuzione delle perdite di carico dell'impianto complessivo;

 una maggiore efficienza del sistema di scambio termico per le applicazioni in cui la direzione del flusso d'acqua interstiziale nel terreno è perpendicolare all'asse della galleria;

 la limitazione del surriscaldamento interno della galleria dovuto al traffico di esercizio e la riduzione della necessità di ventilazione forzata, grazie all'estrazione del calore dall'interno della galleria e al controllo della sua temperatura;

 la compensazione dei danni ambientali prodotti dalla realizzazione di opere in sotterraneo, grazie all'accoppiamento della costruzione delle infrastrutture necessarie con un sistema di fornitura di energia rinnovabile (Barla & Di Donna, 2016).

Esistono tre diverse configurazioni del concio ENERTUN in base al posizionamento della rete di tubi. Essa può essere posizionata in prossimità dell'estradosso (Ground), dell'intradosso (Air) oppure può comprendere due reti di tubi, una posizionata in prossimità dell'estradosso e la seconda in prossimità dell'intradosso (Ground & Air). Nel primo caso, il rivestimento consente lo scambio termico con il terreno, nel secondo caso con l'ambiente interno della galleria mentre nel terzo caso lo scambio termico può avvenire sia con il terreno sia con l'ambiente interno della galleria. L'introduzione di un sistema di scambio termico all'interno dei conci di rivestimento deve in ogni caso soddisfare alcuni requisiti:

- l'integrità strutturale del rivestimento non deve essere compromessa;
- l'impermeabilità del rivestimento deve essere mantenuta;

• il processo di inserimento del sistema di scambio termico deve essere integrato nel ciclo di produzione;

• il collegamento tra tubazioni di conci adiacenti non deve interferire con l'avanzamento della TBM e deve garantire i requisiti di durabilità.

2.6.2 Parametri significativi per il progetto di un energy tunnel

Quando si parla dell'utilizzo di strutture sotterranee per l'estrazione di energia geotermica è necessario evidenziare che alcune tipologie di terreni o rocce hanno proprietà migliori di altre. Al fine di generare 1 kW di calore in presenza di terreno saturo è necessaria una struttura sotterranea in calcestruzzo con un'area di scambio termico pari a circa 20 m²; in presenza di una sabbia asciutta, invece, è necessario un'area di scambio termico pari a circa 50 m² (Brandl, 2006). Da ciò si evince come la saturazione del mezzo giochi un ruolo significativo nel fenomeno di trasferimento di energia. In ogni caso, per definire le condizioni ottimali di falda e di permeabilità del terreno, bisogna stabilire l'utilizzo finale dell'energia. Infatti, nel caso in cui si voglia adoperare l'energia per il solo riscaldamento o raffreddamento, le condizioni ideali sono rappresentate da un mezzo a elevata permeabilità e con falda con elevato gradiente idraulico. Per impostare, invece, un sistema capace di svolgere sia attività di riscaldamento, in inverno, che di raffreddamento, in estate, le condizioni ottimali sono raggiunte in presenza di un mezzo a ridotta permeabilità ed in presenza di falda con ridotto gradiente idraulico; in questo caso il terreno ha la funzione di accumulare il calore durante la stagione estiva per cederlo durante la stagione invernale.

Il processo di trasferimento di calore attraverso il suolo è molto complesso in quanto si compone di diversi fenomeni quali la conduzione ma anche la convezione, la vaporizzazione, la condensazione, lo scambio ionico, il congelamento e lo scongelamento. La maggior parte del trasferimento di calore avviene per conduzione e in secondo luogo per convenzione. La radiazione solitamente agisce con effetti trascurabili. Infine, il congelamento e lo scongelamento possono contribuire trasferendo una quantità di calore significativa, ma questo ciclo può causare danni alle strutture e perciò deve essere evitato.

Altri parametri geotecnici che possono influenzare il trasferimento di calore sono la densità del mezzo e il coefficiente di porosità. In aggiunta a quelli già citati anche le proprietà termiche del mezzo e della falda sotterranea influenzano il processo di trasferimento geotermico. In particolare, la conduttività termica λ e la capacità termica *c* risultano i parametri termici più significativi. Essi sono definiti attraverso

29

indagini preliminari sulla base del test di risposta termica (TST), durante il quale i suddetti parametri sono determinati in situ o mediante analisi di laboratorio. La conduttività termica λ [W/m°K] è il rapporto, in condizioni stazionarie, fra il flusso di calore (cioè la quantità di calore trasferita nell'unità di tempo attraverso l'unità di superficie) e il gradiente di temperatura che provoca il passaggio del calore. La capacità termica *c* [J/kg°K] è la quantità di energia necessaria per incrementare di 1°K la temperatura di 1 kg di materiale in condizioni di pressione costante. I suddetti parametri, insieme alla diffusività termica *a* [m²/s] e alla densità del mezzo ρ [kg/m³] costituiscono i termini dell'equazione fondamentale che descrive le proprietà termiche del mezzo e della falda:

• $\lambda = a \cdot c \cdot \rho$

Il trasferimento geotermico è influenzato anche dalle proprietà idrogeologiche, in particolare dalla profondità, dalla variazione stagionale del livello della falda sotterranea, dalla direzione e dalla velocità del flusso. Inoltre anche le proprietà mineralogiche e chimiche del mezzo risultano importati.

Tutti i parametri sopra menzionati sono relativi esclusivamente alle proprietà del terreno, della roccia e della falda; tuttavia è importante considerare anche le proprietà significative degli elementi sotterranei che partecipano attivamente al processo di trasferimento geotermico, come il rivestimento in calcestruzzo armato della galleria nel caso in esame. La conduttività termica del calcestruzzo ($\lambda = 1,6 W/m^{\circ}K$) assicura un trasferimento termico più efficiente di quello relativo ad una malta bentonitica per pozzi geotermici ($\lambda = 0,7 W/m^{\circ}K$ a 10 °C) (Kovačević et al., 2012).

CAPITOLO 3

DESCRIZIONE DEL SOTTOSUOLO DI TORINO E DELLA LINEA 1 DELLA METROPOLITANA

3.1 Premessa

L'obiettivo di questa tesi è quello di studiare le interazioni che occorrono tra l'attivazione termica della galleria ed il funzionamento della metropolitana di Torino, concentrandosi in particolare sul tratto di prolungamento in direzione Sud della Linea 1. Per questo motivo, in questo capitolo si descrivono le caratteristiche del sottosuolo torinese e dell'infrastruttura metropolitana. A partire dalla conformazione geologica, si osservano i principali aspetti che caratterizzano il terreno per ricavare poi i parametri geotecnici che ne rappresentino il comportamento. Si riporta anche una panoramica sull'assetto idrogeologico, necessaria ai fini della caratterizzazione dei parametri termici ed idraulici dell'acquifero. Nella seconda sezione si descrivono le caratteristiche del sistema di trasporto del capoluogo piemontese, prendendo in considerazione la tratta già operativa della Linea 1 ed il suo prolungamento, attualmente in fase di realizzazione. Si riportano inoltre gli aspetti relativi alla realizzazione dello scavo, ai tracciati e ai dati sul funzionamento della metropolitana.

3.2 Caratteristiche geologiche e geotecniche di Torino

La città di Torino si estende per circa 130 km² in un'area prevalentemente pianeggiante delimitata a nord dal fiume Stura di Lanzo, ad est dal fiume Po ed a sud dal torrente Sangone; la rimanente parte della città fa invece parte di un'area collinare che si estende ad est del fiume Po. Nella pianura ad ovest del Po le quote del piano campagna oscillano tra 220 e 270 metri sopra il livello del mare ed il terreno che costituisce il sottosuolo dell'area urbana di Torino è prevalentemente di tipo alluvionale.

E' possibile identificare tre principali tipologie di terreno che costituiscono la stratigrafia del sottosuolo torinese:

- uno strato più superficiale di depositi fluvio-glaciali costituito da ghiaia, ciottoli e sabbia in una matrice sabbioso-limosa, di spessore variabile tra 25 e 50 m (da Nord verso Sud), caratterizzato da un grado di cementazione variabile;
- una successione di argilla e limo alternata a lenti di ghiaia (anche nota come formazione del Villafranchiano);
- una successione terrigena costituita da depositi di sabbia argillosa e fossilifera (Bottino, G., Civita, M.-1986).

Nella Figura 3.1 viene riportato un esempio di sezione geologica trasversale al fiume Po ed ubicata poco a Sud del fiume Dora Riparia; in tale sezione è possibile osservare le principali tipologie di terreno che caratterizzano il sottosuolo nell'area urbana di Torino.



Figura 3.1 - Sezione geologica trasversale. Legenda: 1)Depositi alluvionali attuale; 2) Depositi alluvionali recenti; 3) Depositi alluvionali antichi; 4) Formazione di Villafranchiano; 5)Deposito di Piacenziano; 6) Marna e arenaria del Miocene (Bottino, G., Civita, M.-1986).

Lo strato più superficiale interessa maggiormente le infrastrutture sotterranee ed il suo variabile grado di cementazione rende molto eterogenee le proprietà geotecniche del terreno stesso. La cementazione è causata principalmente da complessi processi chimici di deposizione calcarea dovuti a variazioni di pH tra acque fredde e dure provenienti dalle Alpi ed acque più calde, oltre che da fenomeni legati all'infiltrazione di acqua piovana che dissolve carbonati di calcio e magnesio negli strati più superficiali che vengono attraversati, per poi rilasciarli a profondità maggiore in seguito alla variazione di temperatura. L'aspetto della porzione cementata risulta evidente nella Figura 3.2, e la sua formazione si riscontra principalmente in strati orizzontali di spessore variabile.



Figura 3.2 - Formazione degli strati cementati (Barla M. & Barla G., 2012).

Nel corso degli ultimi vent'anni sono state effettuate svariate indagini mirate alla caratterizzazione geotecnica del sottosuolo di Torino, specialmente per quanto riguarda lo strato di depositi fluvio-glaciali che si spinge fino ai primi 50 metri di profondità e che interessa maggiormente le infrastrutture che sono state realizzate di recente, come ad esempio la Linea 1 della metropolitana. Con particolare attenzione a quest'opera, sono stati condotti studi più approfonditi che hanno permesso di classificare il terreno in categorie dalle proprietà omogenee, dette "Unità Geotecniche" (GU), che differiscono tra loro principalmente per il diverso grado di cementazione; sono state condotte sia indagini in situ che in laboratorio e da sondaggi a carotaggio continuo sono state evidenziate tre principali tipologie di materiale cementato:

- clasti con evidenza di componente fine cementata (materiale debolmente cementato);
- clasti caratterizzati da patina carbonatica (materiale mediamente cementato);
- conglomerato di roccia (materiale fortemente cementato).

Ciò che determina l'appartenenza ad un'unità geotecnica piuttosto che ad un'altra non è però soltanto la tipologia di materiale cementato, ma anche la percentuale di porzione di terreno cementata rispetto alla componente sciolta. In particolare, sono stati presi in considerazione due parametri per la classificazione del sottosuolo torinese:

- $C\%=\Sigma(Lc)\geq 40cm/L\cdot 100$
- $Es=F/A+2\cdot\pi\cdot N\cdot T/(u\cdot A)$

in cui:

- C% = grado di cementazione;
- $\Sigma(Lc) \ge 40cm$ = somma delle lunghezze di terreno materiale cementato maggiori di 40 cm;
- L = lunghezza di perforazione (pari a 2 m);
- E_s = energia specifica (energia richiesta per perforare un'unità di volume di terreno);
- F = forza assiale applicata durante la perforazione;
- A = area della sezione perforata;
- N = numero di giri al secondo;
- T = momento torcente della testa rotante;
- u = velocità di avanzamento della perforazione.

Sono quindi state identificate quattro unità geotecniche, caratterizzate dai valori di grado di cementazione ed energia specifica (Figura 3.3).



Figura 3.3 - Profilo verticale del sottosuolo di Torino basato su test di perforazione e carotaggi prelevati durante la costruzione della linea ! della metropolitana (Barla M.-Barla G., 2012).

3.3 Assetto idrogeologico

Per quanto riguarda l'aspetto idrologico, la falda acquifera che interessa l'area torinese si incontra tra i 15 ed i 25 metri dal piano campagna. L'acquifero è confinato inferiormente da uno strato di argilla spesso 30 metri, e raggiunge altezze comprese tra i 15 ed i 30 metri, ed il flusso di falda è diretto da Ovest verso Est, muovendosi verso il fiume Po.

A partire dai dati appartenenti alla rete piezometrica di Torino, si è cercato di capire quale fosse il livello di falda ed il suo moto nell'area di interesse (Figura 3.4).



Figura 3.4 - Rete piezometrica della città di Torino.

Pertanto, per l'area di studio, si è proceduto con la determinazione del livello di falda lungo il tracciato della galleria, che è stato determinato con misure piezometriche e con previsioni a lungo termine. La superficie libera della falda è posta a 12 m dal piano campagna e lo spessore dell'acquifero è di circa 22-23 m con una velocità media di 1,5 m/giorno nella direzione del fiume Po. L'acqua dell'acquifero ha una temperatura media durante l'anno di 14°C (Barla et al.,2016).

3.4 La Linea 1 della metropolitana

La metropolitana di Torino rappresenta un importante sistema di trasporto per il capoluogo piemontese e, a livello infrastrutturale, è destinato a crescere sempre di più, sia per importanza che per estensione, in quanto ben soddisfa le richieste del trasporto intermodale, data la possibilità di interscambio con le autolinee urbane e suburbane oltre che con le linee ferroviarie. Il prolungamento della Linea 1 della metropolitana rappresenta un'occasione di studio e di sfruttamento dell'infrastruttura come geostruttura energetica. Per questo motivo è necessario capire a fondo tutti gli

aspetti che un'opera tale comprende, dalle capacità vere e proprie di generare energia, alle interferenze che comporterebbe lo sfruttamento geotermico in fase di realizzazione e di esercizio.

Prendendo in esame la tratta del prolungamento della Linea 1, si è deciso di analizzare, attraverso un codice di calcolo, le possibili conseguenze che si avrebbero in caso di integrazione di un sistema di produzione di energia geotermica.

3.4.1 Caratteristiche dell'infrastruttura

La Linea 1 della metropolitana di Torino è una linea metropolitana leggera automatica su gomma, costruita secondo il sistema messo a punto dalla società francese Matra, in seguito acquistata dalla Siemens e integrata nella società Siemens Transportation System. La linea conta sulla disponibilità di 52 convogli modello VAL 208 ("Rendiconto GTT", 2008/2009).

La lunghezza totale del convoglio è di 52 metri, le stazioni sono distanti in media 550 metri e hanno una lunghezza di circa 60 metri; fanno eccezione quelle di scambio di Porta Nuova, Porta Susa e XVIII Dicembre che hanno dimensioni maggiori. Tutte queste strutture sono state disegnate dallo studio Bernhard Kohn & Associés.

Il sistema VAL (Veicolo Automatico Leggero) utilizzato per la metropolitana di Torino è il primo al mondo in configurazione a 4 vetture per 52 metri di lunghezza e con una capacità di 440 posti, un po' più alta dello standard previsto per la metropolitana leggera; è costituito da veicoli senza conducente (larghezza = 2,08 m) in grado di garantire un forte miglioramento della sicurezza rispetto ai sistemi tradizionali, un'altissima affidabilità, un'elevata capacità di trasporto (oltre 15.000 passeggeri per ora e per direzione) ed una notevole frequenza treni.

Le vetture (Figura 3.5) presentano tre punti di ingresso e di uscita, caratteristica che consente di svolgere rapidamente le operazioni di salita e discesa dei passeggeri; il tempo stimato di fermata del treno in stazione è di 15 secondi. Un ulteriore punto di forza della Linea 1 riguarda senz'altro la frequenza di passaggi dei treni, che varia da un minimo di 2 minuti, nelle ore di punta, ad un massimo di 7 nelle ore meno frequentate.

37



Figura 3.5 - Convoglio VAL 208 della GTT.

Il convoglio è dotato di ruote di gomma che scorrono su guide d'acciaio: questo consente una maggiore aderenza e sicurezza in caso di frenate di emergenza, oltre a permettere al treno di superare maggiori pendenze rispetto alle normali metropolitane con ruote in ferro (pendenza massima 7%). Le accelerazioni e le decelerazioni sono controllate e costanti in modo anche da diminuire contraccolpi che i passeggeri possono avvertire: l'accelerazione e decelerazione di servizio è pertanto contenuta automaticamente in ± 1,3 m/sec². L'uso di pneumatici permette inoltre una notevole riduzione delle vibrazioni e un conseguente aumento di comfort per tutti i passeggeri (www.comune.torino.it/torinoinstrada/metro/).

La galleria può essere considerata una galleria fredda in quanto la ventilazione è garantita da una serie di pozzi che immettono l'aria esterna all'interno e i convogli viaggiano su gomma. Infatti sia la trazione motrice che l'azione frenante sono distribuite su tutte le ruote dei convogli, determinando una produzione di calore molto bassa.

3.4.2 Il tracciato

La linea 1 (Figura 3.6) attualmente si estende per una lunghezza di 13,2 km ed ha 21 stazioni in esercizio, con un tempo totale di percorrenza di circa 23 minuti (fonte GTT).



Figura 3.6 - Fermate operative della Linea 1.

Il capolinea nella parte ovest della Linea 1 è rappresentato dalla stazione "Fermi", e da qui il tracciato si snoda seguendo il lungo rettilineo di corso Francia, passando poi per piazza XVIII Dicembre, corso Vittorio Emanuele II e via Nizza, per terminare la sua corsa nell'altro capolinea, con la stazione di "Lingotto". Le due stazioni più importanti per il collegamento con altri sistemi superficiali e sotterranei sono "Porta Susa" e "Porta Nuova", che offrono la possibilità di accedere alle stazioni ferroviarie di Torino in modo diretto. Un nuovo prolungamento sud, lungo 1,9 km e composto da 2 stazioni, è in costruzione e collegherà la stazione Lingotto a piazza Bengasi (tratto oggetto della tesi); sarà previsto anche un prolungamento ovest dalla stazione Fermi verso Rivoli in direzione Rosta, con l'introduzione di 10 nuove stazioni (Figura 3.7).



Figura 3.7 - Tracciato Linea 1 e futuri sviluppi.

La prima tratta, *Fermi – Porta Nuova* (Figura 3.8), si estende per circa 9,4 km; il profilo longitudinale della galleria segue una pendenza più o meno costante nel tratto al di sotto di corso Francia, mantenendosi parallelo alla superficie.



Figura 3.8 - Tratta Fermi-Porta Nuova.

Le fasi di scavo in ambito urbano hanno reso obbligatori interventi di consolidamento. In particolare sono state realizzate iniezioni cementizie che hanno permesso di scavare al di sotto di edifici e opere storiche, senza causare significativi danni agli stessi. Lo scavo della galleria è stato eseguito con l'uso di TBM (Tunnel Boring Machine, Figura 3.9), mentre le stazioni sono state scavate con metodo "Cut & Cover".



Figura 3.9 - TBM utilizzata per lo scavo della Linea 1.

Mediamente lo scavo è avvenuto ad una profondità tra 15 e 20 metri ed in alcuni tratti, in condizioni di sottofalda. Questo è stato possibile grazie all'uso di una TBM EPB (Tunnel Boring Machine Earth Pressure Balance) che sfrutta il terreno scavato per applicare pressione sul fronte di scavo a garantirne la stabilità. Le principali dimensioni della macchina usata sono un diametro di 7,8 m ed una lunghezza di 80 m. Il rivestimento è costituito da 7 conci prefabbricati per ogni anello, profondo 1,4 m. L'avanzamento è avvenuto completando circa 7 anelli al giorno e quindi con una velocità di avanzamento media di circa 10 m/giorno.

Il tracciato della seconda tratta della Linea 1, *Porta Nuova-Lingotto*, segue quasi interamente Via Nizza, che rappresenta una delle vie più trafficate della città. Il tracciato è composto da una curva piuttosto stretta, con un raggio di curvatura di circa 60 m, e da un rettilineo che completa questo lotto, lungo circa 3,6 km. L'area soprastante è caratterizzata dalla presenza di opere civili che normalmente rappresentano delle criticità in termini di spostamenti ammissibili, perciò il percorso di scavo è stato opportunamente adattato, arrivando a raggiungere delle pendenze longitudinali significative (6%). Il primo (Lotto 1) dalla stazione Porta Nuova (esclusa)

alla stazione Marconi (esclusa), appaltato all'ATI Lauro Spa e a CO.GE.FA. Spa, comprende circa 600 m di galleria completamente fuori falda, di cui 200 m in artificiale realizzati in Cut & Cover (in verde nella Figura 3.10), e 400 m con metodo convenzionale, previo consolidamento del terreno (Finotto, 2010).



Figura 3.10 - Tratta Porta Nuova - Lingotto (Lotto 1).

Il secondo lotto (Lotto 2), dalla stazione Marconi alla stazione Lingotto, appaltato all'ATI Tecnimont Spa e a Ghella Spa, comprende circa 3 km di galleria naturale parzialmente o completamente sotto falda, realizzata con scavo meccanizzato per mezzo di una TBM-EPB, così come fatto nella prima tratta. Tutte le stazioni comprese nel Lotto 2 sono state scavate con metodo Cut & Cover tra paratie eseguite con idrofrese (Finotto, 2010).

In questo secondo lotto, il terreno da scavare risulta essere costituito in prevalenza da ghiaie con ciottoli (talora blocchi), sabbie medio-grossolane e livelli lentiformi limoso-argillosi, rendendo lo scavo con TBM-EPB più complesso, poiché viene solitamente usata per terreni principalmente sciolti. Questo ostacolo è stato superato compiendo un adeguato condizionamento del terreno stesso e studiando opportunamente la conformazione geometrica della testa fresante e la relativa disposizione degli utensili di scavo, nonché il controllo dei parametri di scavo.

3.5 Prolungamento Sud

Al momento sono in corso i lavori che mirano ad estendere il tracciato della Linea 1 dalla stazione "Lingotto" in direzione sud fino a raggiungere la stazione "Bengasi". La tratta **Lingotto-Piazza Bengasi**, comprende 2 stazioni, "Italia 61" e "Bengasi", 2 pozzi ventilazione di intertratta (PB1 e PB2) e il pozzo terminale di fine tratta (PBT). Il progetto comprende inoltre la realizzazione di un elemento che consentirà un futuro collegamento verso la stazione ferroviaria di Lingotto.

Il tracciato prevede il posizionamento della stazione "Italia 61" al di sotto di Via Nizza e "Bengasi" al di sotto della omonima piazza. Lo scavo della galleria supererà la stazione "Bengasi" per consentire l'inversione del convoglio ed aumentare l'efficienza del servizio rispetto alla situazione attuale in stazione "Lingotto", che sfrutta una sola banchina. La lunghezza del tratto in questione consente oltre all'inversione anche il parcheggio di 4 treni, pronti ad entrare in linea ad inizio servizio o a seconda delle variazioni dei flussi di utenti.

La parte terminale della linea è stata progettata per consentire in futuro un'eventuale prolungamento della metropolitana verso i comuni di Nichelino e Moncalieri.

Il progetto della stazione "tipo" è stato elaborato sulla base della Carta dell'Architettura e recepisce le linee guida assunte ed adottate per la tratta in esercizio con criteri semplici e rivolti all'utenza e continuità con le stazioni già in essere (17 stazioni tipologiche delle 21 della tratta): percorsi brevi, massima visibilità e completa percezione dei volumi interni (dal piano atrio si può vedere la banchina e viceversa) (www.infrato.it).

La stazione "tipo" ha pianta rettangolare, un'unica linea di controllo, una lunghezza di 60 m e una larghezza di 19 m. Un tunnel vetrato attraversa da un capo all'altro il volume della stazione e separa i binari dalla banchina garantendo sicurezza e confort psicologico ai passeggeri.

La TBM usata per questi lavori è denominata Masha ed è lunga 100 metri. La testa fresante ha un diametro di 7,70 metri con i colori della Città di Torino (il giallo e il blu, Figura 3.11) ed effettuerà uno scavo di lunghezza totale di 1880 m.



Figura 3.11 - TBM Masha.

3.5.1 Stato di avanzamento

Lo stato di avanzamento dei lavori è in continuo aggiornamento e al momento il documento disponibile più recente è il "Tavolo di cantiere, 30 Maggio 2017".

La stazione intermedia di Italia '61 è posizionata su Via Nizza, come evidenziato nella Figura 3.12, in prossimità delle vie Valenza e Caramagna, di fronte al palazzo della nuova sede della Regione Piemonte.



Figura 3.12 - Stazione Italia '61.

E' stato ultimato lo scavo alla quota del solettone di fondo della stazione ed è in corso il lavoro di impermeabilizzazione del fondo della prima parte della stazione e la posa dell'armatura per il getto del solettone. Parallelamente proseguono i lavori sugli accessi (entrambi realizzati) e sulle ventilazioni.

La stazione **Bengasi** è situata in corrispondenza dell'omonima piazza, sede di un importante mercato (Figura 3.13). La stazione al rustico è stata ultimata per quel che concerne la realizzazione di paratie e solettoni. L'area in superficie e il volume interno della stazione sono attualmente adibiti a cantiere base per lo scavo della galleria di linea con la Tunnel Boring Machine «Masha».



Figura 3.13 - Stazione Bengasi.

La TBM, dopo aver concluso i primi 210 metri di galleria, è stata trasportata dal Pozzo Terminale a piazza Bengasi. Lì, lo scudo e la testa fresante sono stati calati ed assemblati, mentre i carri di supporto alla TBM sono stati tirati indietro con un treno lavori dalla galleria, girati in direzione Lingotto ed assemblati alla testa della talpa. In aggiunta a ciò è stato montato un anello di tenuta necessario per questa prima fase di spinta. Attualmente, sono in corso i test di funzionamento della TBM previste in avvio dello scavo del tunnel da piazza Bengasi al Lingotto.

Mentre si ultima l'assemblaggio della TBM, proseguono i lavori nella stazione Bengasi, con particolare riferimento agli accessi della stazione, ossia alle zone non interessate dallo scavo meccanizzato. Sono stati ultimati i consolidamenti sul tratto di collegamento dal pozzo di ventilazione P22 alla galleria. E' attualmente in corso lo scavo del pozzo e la realizzazione delle strutture dei locali tecnici. Terminata la

<u>Capitolo 3</u>

realizzazione dello scavo dei locali tecnici e del pozzo di ventilazione fino alla profondità della galleria attualmente in fase di costruzione, si sta procedendo con il rivestimento del pozzo P23. Ultimato lo spostamento della testa della TBM, si sono anche concluse le operazioni di spostamento dei carri di supporto della talpa in piazza Bengasi. Nella prima fase di scavo della galleria verso Italia '61, l'area del pozzo verrà utilizzata come area di movimentazione dei materiali da e verso il fronte di scavo (Figura 3.14).



Figura 3.14 - Pozzo terminale.

CAPITOLO 4 REALIZZAZIONE DEL MODELLO NUMERICO AGLI ELEMENTI FINITI

4.1 Premessa

In questo capitolo si espongono gli aspetti generali del codice di calcolo agli elementi finiti FEFLOW, utilizzato per l'esecuzione delle analisi numeriche. Si introducono le caratteristiche principali del software, gli ambiti di utilizzo e le diverse modalità che si possono adottare in funzione del tipo di analisi che si vuole effettuare, facendo riferimento anche all'interfaccia del programma e ai comandi più importanti del programma stesso.

Focalizzando l'attenzione sul tratto Sud della Linea 1, ed in particolare sul secondo lotto di cui si è parlato nel Paragrafo 3.4, si procede con la realizzazione del modello, definendo il tipo di analisi da svolgere (trasporto di calore) e costruendone, inizialmente, la geometria. Una volta definite le condizioni iniziali, le condizioni al contorno e assegnate le proprietà dei diversi materiali sarà possibile procedere con le simulazioni. La definizione delle condizioni al contorno avviene dopo una serie di analisi parametriche atte a trovare i valori che meglio riproducano la trasmissione di calore all'interno della galleria; per questo è risultato necessario valutare l'influenza della condizione di temperatura e di velocità del flusso d'aria. I conci che costituiscono il rivestimento in calcestruzzo della galleria sono stati dotati di apposite serpentine, cioè scambiatori di calore all'interno dei quali scorre un fluido termovettore con temperatura di ingresso definita, riprendendo il progetto ENERTUN visto nel capitolo 2.

4.2 Aspetti generali del codice di calcolo

FEFLOW (Finite Element subsurface FLOW system) è il codice numerico utilizzato per le simulazioni effettuate in questo lavoro di tesi. In particolare, FEFLOW consente di

studiare i processi di flusso e trasporto in mezzi porosi, in condizioni sature ed insature. Il software è dotato di avanzate capacità di simulare le dinamiche di flusso sotterraneo in situazioni complesse, considerando sia il trasporto di massa, sia quello di calore. È un software tramite il quale è possibile analizzare problemi legati al flusso di falda ed alle interazioni con le opere sotterranee in condizioni complesse e si rende, pertanto, particolarmente indicato per affrontare aspetti termoidraulici nei problemi di ingegneria geotecnica. Consente inoltre di tenere in considerazione l'aspetto termico legato ai fenomeni di scambio di calore. Con FEFLOW si possono imporre condizioni al contorno dinamiche sia per il flusso che per il trasporto di contaminanti, facendo variare le condizioni al contorno al medesimo nodo/elemento in funzione dell'andamento della simulazione. Questa funzionalità risulta particolarmente utile per la simulazione di opere in gallerie o lavori in cava.

Ulteriori campi applicativi in cui risulta essere particolarmente performante sono lo studio dell'idrodinamica dei pozzi, anche quando questi sono sottoposti ad elevate condizioni di stress, l'intrusione del cuneo salino e il trasporto di inquinanti con densità variabile (rilevante in particolare nella simulazione di trasporto della fase miscibile degli idrocarburi).

L'avanzata interfaccia grafica consente, inoltre, di facilitare l'utilizzo del codice attraverso una serie di funzionalità di dialogo con i sistemi CAD e GIS e la visualizzazione tempo-variante dei risultati bi e tri-dimensionali.

Con riferimento all'analisi di tipo termico, il codice di calcolo permette uno studio della risorsa geotermica proponendo anche strumenti specifici per l'analisi di impianti a ciclo aperto e a ciclo chiuso. E' presente, ad esempio, un comando in grado di definire rapidamente il comportamento di una sonda geotermica verticale, che è possibile posizionare all'interno del modello unitamente alle proprietà termiche ed idrauliche del fluido termovettore. Inoltre, per applicazioni meno convenzionali come le geostrutture energetiche, è possibile inserire le serpentine all'interno delle quali scorre il fluido come "elementi discreti" (Discrete Features), cioè elementi monodimensionali ad elevata conducibilità idraulica che rappresentano delle fratture o delle condotte all'interno del modello.

4.3 Cenni sul metodo degli elementi finiti

FEFLOW è un codice di calcolo che utilizza il metodo degli elementi finiti (FEM) per risolvere un problema reale, schematizzandolo e restituendo una soluzione approssimata ad un problema governato da equazioni differenziali. In numerosi problemi fisici e ingegneristici, infatti, risulta sufficiente ottenere soluzioni numeriche approssimate, piuttosto che soluzioni analitiche esatte di difficile valutazione per via della natura intrinseca dell'analisi che è influenzata da un ineliminabile grado di incertezza.

L'uso del FEM si afferma come uno dei migliori strumenti per l'indagine dei sistemi complessi; le equazioni differenziali vengono lasciate inalterate (relativamente a ciascun elemento finito), mentre il dominio è visto come l'unione di tanti sottodomini di forma elementare. In un problema al continuo, la variabile di campo (come la pressione, lo spostamento, la temperatura o la velocità) è funzione di ciascun generico punto del dominio di definizione, di conseguenza il problema presenterebbe un numero infinito di incognite; la procedura di discretizzazione agli elementi finiti lo riduce ad un problema con un numero finito di incognite, suddividendo il dominio in elementi finiti ed esprimendo il campo incognito in termini di funzioni approssimanti, dette funzioni di forma, definite all'interno di ogni elemento. Nella rappresentazione agli elementi finiti di un problema, i valori nodali della variabile di campo rappresentano le nuove incognite e, successivamente, è possibile ricavare la soluzione, approssimata nei punti interni all'elemento ed esatta ai nodi, per mezzo della funzione di forma.

La risoluzione di un problema per mezzo del metodo agli elementi finiti necessita lo sviluppo di alcuni passaggi da seguire per la costruzione del modello. Le fasi principali sono relative alla costruzione della geometria del modello, discretizzazione degli elementi che compongono la galleria, assegnazione delle proprietà dei materiali, assegnazione delle condizioni iniziali ed al contorno, definizione delle variabili da analizzare e tipo di analisi da effettuare.

Inizialmente, bisogna passare dal modello reale al modello discretizzato tramite la generazione della "mesh", ossia quella maglia geometrica costituita dai vari elementi finiti; la mesh può essere 1D, 2D o 3D in base al modello che si vuole realizzare e rappresenta il primo importante passo da compiere, poiché i risultati sono direttamente legati alla dimensione degli elementi discretizzati (minore è la dimensione, maggiore sarà la precisione del modello). È importante trovare anche il giusto equilibrio perché elementi troppo piccoli porterebbero ad un inutile sovraccarico di calcoli che comporterebbe tempi di analisi troppo lunghi. Una volta generata la mesh, il calcolatore deve sapere come approssimare la variabile principale lungo l'elemento, quindi va impostata una legge di variazione della variabile che generalmente è di tipo polinomiale, ma potrebbe anche essere trigonometrica o esponenziale; tendenzialmente, più elevato è il grado del polinomio con cui si approssima la variabile, tanto migliore risulta l'approssimazione stessa, di contro aumenta il numero di input necessari e quindi aumenta la complessità nel costruire il modello. Successivamente, vanno combinate le equazioni che governano il singolo elemento con quelle che governano l'insieme dei vari elementi; così facendo si ricava un unico grande sistema di equazioni, tra le cui incognite vi sono i valori della variabile principale in ogni nodo. Assegnando poi le condizioni al contorno, è possibile ridurre il numero di incognite del problema e ricavare quindi le soluzioni ai nodi.

4.4 Equazioni che governano il problema termo-idraulico

Le equazioni che vengono adoperate per risolvere il problema termo-idraulico sono:

- equazione di conservazione della massa;
- legge di Darcy;
- equazione di conservazione dell'energia.

Per il principio di conservazione della massa, assumendo la densità del fluido costante e la fase solida incompressibile, si avrà:

$$-\nabla \cdot (v_i) = \frac{\partial \varepsilon v}{\partial t}$$

in cui:

- ∇·: divergenza;
- $\frac{\partial}{\partial t}$: derivata nel tempo;
- t: tempo;
- v_i: velocità del fluido;
- ε_v : deformazione volumetrica.

A questa equazione si aggiunge l'espressione data dalla legge di Darcy:

 $v_i = -K_i \nabla h$

in cui:

- ∇: gradiente;
- K_i: conducibilità idraulica (o coefficiente di permeabilità) del mezzo poroso;
- h: carico idraulico totale.

Combinando le due equazioni si può scrivere:

$$\nabla \cdot (K_i \nabla h) = \frac{\partial \varepsilon v}{\partial t}$$

Per quanto riguarda la conservazione dell'energia, i contributi di calore che compaiono all'interno del bilancio energetico sono:

- calore scambiato per conduzione;
- calore scambiato per convezione;
- calore scambiato per irraggiamento.

Il fenomeno di conduzione avviene tramite il semplice contatto tra due corpi a temperatura differente ed è legato alla conducibilità termica del mezzo; ciò che permette lo scambio di calore è quindi dovuto alla differenza di energia cinetica a livello molecolare.

Il calore scambiato per convezione, invece, è legato alla presenza di un fluido in movimento, come può essere ad esempio il movimento della falda acquifera all'interno del terreno; si considera valida l'ipotesi di mezzo saturo. Visto il campo di applicazione, l'ultimo termine può essere generalmente trascurato, mentre i primi due possono essere scritti rispettivamente come segue:

$$q_{cond} = \lambda \nabla T$$

 $q_{conv} = c_w \rho_w v_i \Delta T$

in cui:

 λ: conducibilità termica del materiale [W/(m·K)], che rappresenta il rapporto, in condizioni stazionarie, fra il flusso di calore (cioè la quantità di calore trasferita nell'unità di tempo attraverso l'unità di superficie) e il gradiente di temperatura che provoca il passaggio del calore;

 c_w: calore specifico del fluido [J/(kg·K)], che rappresenta la quantità di energia necessaria per incrementare di 1 K la temperatura di 1 kg di materiale in condizioni di pressione costante;

- ρ_w: densità del fluido;
- ΔT: differenza di temperatura tra i due corpi.

Per il principio di conservazione dell'energia, l'equazione finale che tiene conto dei fenomeni di conduzione, di convezione e del termine legato all'accumulo di calore (regime transitorio), può scriversi come:

$$\nabla \cdot (\lambda \nabla T) + c_w \rho_w v_i \nabla T - c \rho \frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

in cui:

• cp: capacità termica del terreno, comprendente i termini della fase solida ($c_s \rho_s$) e della fase liquida ($c_w \rho_w$) secondo l'espressione:

$$c\rho = nc_w\rho_w + (1-n)c_s\rho_s$$

• λ : conducibilità termica del terreno, comprendente i termini della fase solida (λ_s) e della fase liquida (λ_w), definita come:

$$\lambda = n\lambda_w + (1-n)\lambda_s$$

• n: porosità del terreno.

4.5 Modellazione tramite Feflow

4.5.1 Interfaccia grafica

L'interfaccia grafica del codice FEFLOW è dotata di un elevato numero di comandi, che permettono di costruire un modello geometrico complesso ed eterogeneo, di assegnare diverse proprietà dei materiali, numerose condizioni iniziali e al contorno. Altro aspetto molto importante è la possibilità di estrapolare una grossa mole di risultati, guardando, punto per punto e istante per istante, l'avanzamento della simulazione; il tutto è sempre visionabile tramite le finestre di visualizzazione che permettono un'ispezione accurata del modello che si sta costruendo.

Nella finestra di dialogo (Figura 4.1) si trovano i principali comandi utili per poter importare file di tipo grafico (come ad esempio geometrie di punti generate su software CAD o mappe), selezionare o deselezionare elementi o parti del modello, tracciare segmenti o punti, visualizzare i valori di determinate proprietà del modello, gestire le impostazioni di calcolo e le simulazioni stesse, oltre che muoversi tra le varie finestre grafiche di FEFLOW.



Figura 4.1 - Interfaccia grafica.

Nei pannelli laterali trovano posto alcuni menù che permettono invece, sulla sinistra, la selezione delle diverse unità spaziali che costituiscono il modello (nei modelli 3D ad esempio vi saranno più livelli, che saranno attivabili singolarmente proprio dal pannello laterale) e, sulla destra, la visualizzazione o l'impostazione dei valori dei parametri termici e idraulici di ogni parte costituente il modello. Infine, nella parte centrale trova posto la finestra di visualizzazione, nella quale si può realmente visualizzare la geometria del modello, la mesh ed i valori di qualsiasi parametro termico/idraulico selezionato per mezzo di una adeguata scala cromatica. Si possono scegliere principalmente tre diverse finestre di visualizzazione: una è dedicata alla sola geometria del modello non discretizzato (quindi contiene solo punti, segmenti e figure geometriche), un'altra presenta la mesh in 2D ed infine una terza finestra permette di muoversi lungo il solido 3D, potendolo orientare in qualunque direzione nello spazio.

4.5.2 Costruzione del modello numerico

Per costruire un modello tramite FEFLOW, va inizialmente creato un nuovo progetto. Il software permette sia di creare manualmente la geometria che di importare una geometria già creata, ad esempio tramite CAD (formato .dxf). Per creare il dominio bisogna definire un'area chiusa, e questo lo si può fare tramite l'ausilio del comando "Add Polygons" che permette di creare una figura chiusa all'interno della quale verrà generata la mesh. Gli elementi che vengono creati (punti, linee e poligoni) fanno parte della cosiddetta "Supermesh", che rappresenta lo spazio contenente le informazioni geometriche necessarie all'algoritmo di generazione della mesh.

Da "Problem Settings" è possibile definire il tipo di analisi da effettuare, impostando la tipologia di scambio, che potrà essere di massa o di calore, le condizioni di mezzo totalmente saturo o parzialmente saturo e le condizioni di flusso in regime costante o transitorio. Sempre da "Problem Settings" si possono impostare i parametri di simulazione, cioè la durata della simulazione, il tempo di inizio e tutti i valori di tolleranza e numero massimo di iterazioni che servono ai fini del calcolo numerico (Figura 4.2).

54

Simulate flow via			
	 Standard (saturated) groundwater-flow equation Unconfined conditions [controlled via the 'Free-Surface' settings] 		
\bigtriangledown	\bigcirc Richards' equation (unsaturated or variably saturated media)		
Include transport of			
	 Mass (dissolved constituents) Heat (thermal energy) 		
State			
	Fluid flow: Transport:	Steady ©	Transient ©

Figura 4.2 - Finestra Problem Setting.

Dopo aver creato il dominio e definito le impostazioni del problema si può quindi generare la mesh tramite il comando "Mesh Generator"; gli algoritmi per la generazione (Figura 4.3) sono quattro:

• "Advancing Front" è un semplice algoritmo di generazione mesh che non supporta linee o punti come riferimenti; se presenti nella supermesh, questi elementi geometrici vengono ignorati nel processo di generazione. L'aspetto positivo di questo algoritmo risiede nella velocità di generazione e nell'abilità di produrre elementi di forma molto regolare;

 "Gridbuilder" è un algoritmo di triangolazione flessibile che supporta poligoni, linee e punti, così come la possibilità di creare raffittimenti della mesh in corrispondenza di particolari elementi.

• "Triangle" è un codice di triangolazione sviluppato negli Stati Uniti che presenta particolari vantaggi: è estremamente veloce, supporta combinazioni complesse di poligoni, linee e punti nella Supermesh e permette di definire alcune preferenze e limiti nella generazione degli elementi (come il range relativo agli angoli interni per poter creare elementi il più regolari possibile, o il raffittimento della mesh solo in particolari elementi selezionati);

• "Transport Mapping" è l'ultima tipologia di algoritmo supportata da FEFLOW e permette la realizzazione di una mesh fatta da elementi quadrilateri; questa modalità richiede l'attivazione di un'opzione specifica dal menù "Mesh", perché necessita di poligoni che abbiano esattamente quattro lati.



Figura 4.3 - Tipologie di mesh.

Un altro parametro di generazione della mesh che è possibile impostare è il numero totale di elementi, che può essere variato in base alla dimensione degli elementi che si vuole ottenere; tanto più elevato sarà il numero, tanto più fitta sarà la mesh.

Dopo aver generato la mesh nella vista in 2D, sarà possibile creare il modello tridimensionale tramite il menù "Edit" – "3D Layer Configuration" (Figura 4.4); definendo il numero di strati in cui dividere il modello 3D, lo spessore di ognuno di questi e la quota del piano superiore, verrà generato il modello tridimensionale che comparirà in una nuova finestra della schermata di visualizzazione.



Figura 4.4 - Menù per la creazione degli strati del modello 3D.

A questo punto si dovranno assegnare agli elementi del modello le proprietà dei relativi materiali; dalla finestra di dialogo si dovrà selezionare "Select Element" dall'elenco che si apre cliccando sul comando "Selection" e si andranno a selezionare, sulla faccia superiore del modello, tutti gli elementi a cui si dovrà assegnare una determinata proprietà. Nel caso in cui tutti gli elementi rappresentino lo stesso materiale, e quindi siano caratterizzati dalle stesse proprietà, sarà possibile utilizzare il comando "Select All". Una volta selezionati gli elementi di interesse, la selezione dovrà poi essere estesa anche agli altri layer del modello e ciò avviene attraverso il comando "Copy to Slice/Layer". Dopo aver selezionato tale comando si aprirà quindi una finestra in cui si andranno a specificare in quali layer si vuole estendere la selezione degli elementi. Una volta definita la selezione può essere salvata con il comando "Store selection", permettendo di velocizzare notevolmente le operazioni di assegnazione di proprietà e condizioni al contorno degli elementi/nodi. Infatti, dal pannello "Data" è possibile assegnare i valori iniziali alle variabili (come temperatura, pressione, ecc.), le condizioni al contorno e le seguenti proprietà termiche ed idrauliche dei materiali (Figura 4.5).



Figura 4.5 - Proprietà dei materiali.

E' sufficiente fare un doppio click su ogni singola voce e digitarne il valore numerico con l'adeguata unità di misura.

Le condizioni al contorno che si possono definire possono essere legate sia al flusso di un fluido ("Fluid flow") che al trasporto di calore ("Heat transport"), come si può notare nella Figura 4.6.



Figura 4.6 - Condizioni al contorno.

Si può, ad esempio, imporre un'altezza idraulica ("Hydraulic-head BC") ai nodi facenti parte dei bordi laterali del modello, che di conseguenza andrebbe a generare un flusso idrico nel terreno; si può anche assegnare un determinato flusso di fluido ("Fluid-flux BC") in un nodo, come nel caso del punto di ingresso di una tubazione, ed assegnarvi sempre tramite le condizioni al contorno una specifica temperatura, o una serie temporale di temperatura ("Temperature BC"); la possibilità di inserire una serie temporale ad una determinata condizione al contorno, infatti, rappresenta uno strumento molto utile soprattutto quando si vogliono effettuare simulazioni che si sviluppano in un arco di tempo abbastanza ampio e nel quale molti dati di input subiscono una variazione.

Sempre dalla finestra "Data", è possibile creare "Discrete Features", cioè elementi di dimensione di ordine inferiore alla dimensione del modello (1D in modelli bidimensionali, 1D/2D in modelli tridimensionali) che possono essere utili, ad esempio, per rappresentare la presenza di una frattura o di una condotta all'interno del modello; è possibile scegliere fra tre diverse formulazioni: Darcy, Hagen-Poiseuille o Manning-Strickler. Questo comando si rivela utile per modellare le serpentine facenti parte dell'impianto geotermico (quindi nella loro configurazione 1D), in quanto è possibile definire parametri termici ed idraulici associati a questo tipo di elemento, come ad esempio la sezione trasversale, il raggio idraulico, la capacità termica volumetrica del fluido, la conducibilità termica del fluido e la dispersività longitudinale (Figura 4.7).



Figura 4.7 - Proprietà delle Discrete Features.

Infine, nel caso in cui si vogliano ispezionare e verificare i parametri inseriti all'interno del modello, è possibile usare il comando "Inspect Nodal/Element Values", posto in alto a sinistra nella finestra di dialogo; mantenendo selezionata dal pannello "Data" la proprietà o la variabile da visualizzare, passando sopra i vari nodi del modello è possibile leggerne il valore. Questo può risultare utile, ad esempio, per verificare che sia tutto impostato correttamente prima di iniziare la simulazione.

4.5.3 Simulazioni ed interpretazione dei risultati

Dopo aver creato il modello, si passa quindi alla fase di analisi numerica che permetterà di estrapolare i risultati di output. Dalla finestra di dialogo, tramite il comando "Start Simulation", si fa partire la simulazione della durata precedentemente impostata da "Problem Settings", e con il comando "Record Properties" si possono decidere gli istanti temporali di cui si vogliono salvare tutti i risultati completi (in formato *.dac); alternativamente si può salvare il risultato della simulazione in un file di tipo ridotto (formato *.dar), in cui la variazione dei risultati di output nel tempo viene salvata solo per gli "Observational Points". Questi ultimi vengono assegnati a determinati nodi in cui si vogliono conoscere i valori di alcune variabili, e per quei punti, tramite la voce "Charts", è possibile plottare il valore dei dati di output in funzione del tempo.

Un'altra tipologia di visualizzazione del risultato consiste nel tracciare delle linee a partire dalle quali vengono riportati i valori delle variabili selezionate (una per volta) in funzione della progressiva del segmento tracciato, sempre in forma di grafico. E' inoltre possibile esportare i valori numerici per poterli organizzare, ad esempio, in un foglio Excel.
4.6 La realizzazione del modello numerico

4.6.1 Geometria del modello

Il modello tridimensionale che si è costruito prende in esame cinque anelli in calcestruzzo profondi 1,4 m ciascuno, per un totale di 7 m. La scelta di analizzare una serie di anelli e non uno soltanto, dipende dal fatto di voler simulare il sistema di ventilazione forzata presente in galleria; in questo modo è possibile fissare sul primo layer la temperatura interna dell'aria della galleria e imporre un flusso d'aria che trasporti il calore all'interno del tunnel; così facendo si ottiene un ambiente in cui si è ricreata la condizione reale presente nella galleria della metropolitana e successivamente, dopo l'attivazione energetica dell'impianto geotermico, verificare se vi sono variazioni sensibili della temperatura. In particolar modo si vuole verificare che non si creino dei gradienti di temperatura che superino un certo limite e che l'attivazione non sia fonte di disagio per gli utenti del trasporto pubblico.

Come sezione rappresentativa si è scelta una sezione trasversale alla galleria ed in particolare la porzione di linea di interesse è posta nella parte Sud-Est della città.

Per la geometria del modello si è considerata una larghezza di 120 m ed una profondità di 77,85 m, fino ad arrivare al substrato argilloso; le dimensioni così adottate servono a garantire che i fenomeni che si analizzano nell'intorno della galleria non influenzino i contorni del modello, che devono rimanere indisturbati; la galleria è posizionata nel centro del modello, in direzione orizzontale, ed il suo baricentro è stato posizionato ad una profondità di 21,5 m dalla superficie.

Per prima cosa è stato creato un nuovo progetto e sono state impostate le caratteristiche dell'analisi da "Problem Settings", specificando il tempo di simulazione, la direzione della gravità secondo l'asse y negativo ed includendo il trasporto di calore (Figura 4.8).

Problem Summary Problem Class	Display preferences	Calendar Dat	e/Time			
Simulation-Time Control Numerical Parameters		Reference time:	2017-09-04 17:42:21.895 💌			
Anisotropy Settings	Initial simulation time: 0 [d]				
Other Settings	Constant time steps					
Solver Type	Varying time steps					
Map Settings Editor Settings	Automatic time-step c	ontrol				
,	Initial time-step length:	1e-06 [d]				
	Final simulation time:	3650 [d]				
	Predictor-corrector scheme					
	 First-order accurate Second-order accurate 	te (FE/BE) arate (AB/TR)				
	Growth factor between Ourrestricted	n subsequent time steps (>1)				
	Time-step size					
	Our Unrestricted	🔘 Maximum:				
	Fully implicit vs. semi-implicit					
	Number of fully implicit ti to semi-implicit <i>Crank-Nic</i>	me steps before switching				

Figura 4.8 - Problem Settings.

Per creare il modello si è fatto uso del software di modellazione AutoCad, attraverso il quale sono state disegnate quattro circonferenze concentriche e quattro punti esterni che rappresentano gli spigoli del dominio del modello; le circonferenze sono state suddivise in 60 punti (Figura 4.9), in modo tale che, al momento della generazione della mesh, si potessero avere dei segmenti di dimensione sufficientemente piccola da approssimare abbastanza bene il profilo circolare dell'anello in calcestruzzo e delle serpentine inserite all'interno; le circonferenze rappresentano, nell'ordine, dall'interno dello scavo: intradosso della galleria, serpentine in configuazione "Air", serpentine in configurazione "Ground" ed estradosso della galleria. Il diametro interno della galleria è di 6,8 m e lo spessore dei conci di 30 cm; le serpentine sono state posizionate nella configurazione "Ground" e "Air" dei conci ENERTUN (Paragrafo 2.6), rispettivamente ad una distanza dall'estradosso del rivestimento (Ground) dall'intradosso (Air) pari a 10 cm.



Figura 4.9 - Geometria dei punti generata su AutoCad.

Una volta importata su FEFLOW la geometria delle circonferenze in formato .dxf, è stato possibile unire i punti reciprocamente per definire il dominio del modello 2D. Nella Figura 4.10 si riporta la geometria bidimensionale creata su FEFLOW.



Figura 4.10 - Dominio 2D e particolare rivestimento.

La superficie dell'aria interna non è stata considerata come una sezione vuota ma è stata realizzata considerandola come elemento vero e proprio che verrà discretizzato e a cui verranno assegnati le relative proprietà termiche ed idrauliche dell'aria.

E' stata poi effettuata la discretizzazione tramite il comando "Mesh Generator", impostando una mesh di tipo "Triangle". Per realizzare il modello tridimensionale sono stati creati 14 diversi layer per ogni anello, a cui corrispondono 15 "Slice", ognuno dello spessore di 0,1 m, raggiungendo quindi il numero totale di 70 layers e 71 "Slice"; il numero di "Slice" in cui dividere il modello è stato deciso in base alla spaziatura delle serpentine lungo l'asse longitudinale della galleria, in modo da poter rispettare quello che è il reale progetto della disposizione degli scambiatori di calore nei conci energetici ENERTUN (Figura 4.11 e 4.12).



Figura 4.11 - Conci ENERTUN in configurazione "Ground".





Figura 4.12 - Conci ENERTUN in configurazione "Air".

In particolare, si sono disposte le serpentine su 5 livelli per ogni anello, con una spaziatura di 30 cm tra un livello e l'altro ed un margine di 10 cm dalla fine dell'anello di rivestimento in calcestruzzo.

La creazione del modello 3D si effettua a partire da quello bidimensionale, estendendone il dominio nella terza dimensione tramite il comando "3D Layer Configuration" e rispettando le condizioni geometriche descritte in precedenza.

Nella Figura 4.13 si riporta la finestra di impostazione della configurazione tridimensionale del modello, in cui è possibile notare come ogni livello sia distanziato da quello adiacente di 0,1 m.



Figura 4.13 - Configurazione del modello 3D.

Il modello che si ottiene è quindi il risultato dell'estensione della sezione trasversale in direzione *z* (Figura 4.14). Questa vista consente di comprendere la reale geometria del modello, che può essere ruotato nello spazio per verificarne la coerenza, comando molto utile per il controllo della realizzazione delle serpentine.



Figura 4.14 - Vista 3D.

Infine, sono state disposte le serpentine all'interno dei conci in calcestruzzo, schematizzandole come "Discrete Features". L'operazione si è svolta in due fasi: inizialmente sono stati selezionati tutti gli elementi longitudinali (nel piano della sezione bidimensionale) di tutti i layer corrispondenti alla posizione delle tubazioni; in un secondo momento sono stati selezionati tutti i gli elementi trasversali (diretti nell'asse della galleria) che rappresentato le porzioni di tubo che collegano le serpentine tra i vari livelli. Questa operazione richiede quindi di individuare manualmente la posizione delle tubazioni nello spazio, all'interno dei conci, e di garantirne la continuità geometrica per ogni anello, fondamentale per simulare il passaggio del fluido termovettore al loro interno. Gli anelli, che lavorano in parallelo, sono costituiti ciascuno da sei conci, che invece lavorano in serie. Per questo motivo per ogni anello, sul primo layer, sono stati inseriti un punto di ingresso ed uno di uscita del fluido, connessi alla condotta principale (non modellata) che trasporta il fluido termovettore dalla galleria alla pompa di calore e viceversa; la zona di connessione con la condotta è stata posizionata in un punto a metà tra l'arco rovescio ed il piedritto di sinistra del tunnel.

Dopo aver selezionato tutti gli spigoli degli elementi della mesh che vanno a formare il circuito delle serpentine, sono state create le "Discrete Features" (Figura 4.15) dal pannello "Data", all'interno del quale compaiono poi tutte le proprietà da associare agli elementi generati.



Figura 4.15 - Discrete Features che riproducono le serpentine del circuito idraulico.

Per poter monitorare la temperatura in alcuni punti particolari al variare del tempo, sono stati posizionati nel modello dei punti di osservazione ("Observational Points") lungo allineamento orizzontale, per l'intradosso del rivestimento (A), per un punto posto a metà del raggio interno del tunnel (B) ed uno passante per il baricentro (C), posizionati nelle sezioni di mezzeria di ogni anello (Figura 4.16); altri due "Observational Points" sono stati inseriti nei nodi di ingresso e di uscita del fluido termovettore.



Figura 4.16 - Posizionamento degli Observational Points.

.6.2 Proprietà dei materiali

Un'altra fase molto importante durante la costruzione del modello consiste nell'assegnare dei parametri termici ed idraulici agli elementi della mesh. A tal fine si è

fatto riferimento a vari studi svolti precedentemente in merito alle unità geologicogeotecniche che caratterizzano la stratigrafia di progetto oltre che a studi sull'attivazione geotermica della Linea 1 della metropolitana di Torino. Sono inoltre definite le proprietà del calcestruzzo, delle tubazioni e dell'aria interna.

I parametri idraulici, idro-dispersivi e termici dell'acquifero sono il risultato di prove di pompaggio, con monitoraggio della temperatura, eseguite per tre mesi consecutivi (Barla et al. 2013). Si riassumono nella Tabella 4.1 tutti i parametri inerenti al terreno.

Proprietà	Simbolo	Unità di misura	Terreno	
Conducibilità idraulica orizzontale	Kxx=Kzz	[m/s]	4,15·10 ⁻³	
Conducibilità idraulica verticale	Куу	[m/s]	2,075·10 ⁻⁴	
Coefficiente di immagazzinamento	S	[m ⁻¹]	10 ⁻⁴	
Porosità	N	-	0,25	
Capacità termica del fluido	$ ho_w c_w$	[MJ/(m ³ ·K)]	4,2	
Capacità termica del solido	ρ _s c _s	[MJ/(m ³ ·K)]	2	
Conducibilità termica del fluido	λ_w	[W/(m·K)]	0,65	
Conducibilità termica del solido	λ_s	[W/(m·K)]	2,8	
Dispersività longitudinale	α_L	[m]	3,1	
Dispersività trasversale	α_{T}	[m]	0,3	

Tabella 4.1 - Parametri termici ed idraulici del terreno (Barla et al., 2013).

Per quanto riguarda il calcestruzzo utilizzato per il rivestimento della galleria, i parametri da definire sono riassunti nella Tabella 4.2.

Proprietà	Simbolo	Unità di misura	CLS
Conducibilità idraulica orizzontale	Kxx=Kzz	[m/s]	10 ⁻¹⁶
Conducibilità idraulica verticale	Куу	[m/s]	10 ⁻¹⁶
Coefficiente di immagazzinamento	S	[m ⁻¹]	10 ⁻⁴
Porosità	Ν	-	0
Capacità termica del fluido	$ ho_w c_w$	[MJ/(m ³ ·K)]	-
Capacità termica del solido	ρ _s c _s	[MJ/(m ³ ·K)]	2,19
Conducibilità termica del fluido	λ_w	[W/(m·K)]	-
Conducibilità termica del solido	λ_s	[W/(m·K)]	2,3
Dispersività longitudinale	α_L	[m]	-
Dispersività trasversale	α	[m]	-

Tabella 4.2 - Proprietà del calcestruzzo	١.
--	----

Proprietà	Simbolo	Unità di misura	Aria interna
Conducibilità idraulica orizzontale	Kxx=Kzz	[m/s]	10 ⁻²
Conducibilità idraulica verticale	Куу	[m/s]	10 ⁻²
Coefficiente di immagazzinamento	S	[m ⁻¹]	10 ⁻⁴
Porosità	Ν	-	1
Capacità termica del fluido	$ ho_w c_w$	[MJ/(m ³ ·K)]	10 ⁻³
Capacità termica del solido	ρ _s c _s	[MJ/(m ³ ·K)]	-
Conducibilità termica del fluido	λ _w	[W/(m·K)]	0,53
Conducibilità termica del solido	λ_s	[W/(m·K)]	-
Dispersività longitudinale	α_{L}	[m]	5
Dispersività trasversale	α	[m]	0,5

Nella Tabella 4.3 si riportano i parametri termici e idraulici che definiscono le proprietà dell'aria interna.

Tabella 4.3 - Parametri dell'aria interna.

Nella Figura 4.17 sono evidenziati con colori diversi gli elementi che costituiscono i materiali dalle differenti proprietà; in giallo si notano gli elementi costituenti lo strato di terreno, in rosso lo strato d'aria interna ed in viola il rivestimento in calcestruzzo della galleria.



Figura 4.17 - Dettaglio dei diversi materiali considerati nel modello.

Per quanto riguarda le serpentine, come già detto, queste sono state modellate tramite "Discrete Features" e dal menù "Data" è possibile definirne le proprietà idrauliche e termiche; ricordando che i tubi utilizzati per le serpentine hanno diametro esterno di 25 mm e spessore di 2,3 mm, si riportano nella Tabella 4.4 le proprietà considerate per le tubazioni.

Proprietà	Simbolo	Unità di misura	Tubazioni
Area	А	[mm ²]	326,85
Raggio idraulico	r _{hyd}	[m]	0,0051
Coefficiente di immagazzinamento	S	[m ⁻¹]	10 ⁻⁴
Capacità termica del fluido	$ ho_w c_w$	[MJ/(m ³ ·K)]	4,2
Conducibilità termica del fluido	λ _w	[W/(m·K)]	0,65

Tabella 4.4 - Proprietà delle tubazioni.

4.6.3 Condizioni iniziali e condizioni al contorno

Le condizioni iniziali imposte sono ottenute dai dati sulle temperature visti nel Capitolo 3, che mostrano come al di sotto dei primi 15 metri di profondità, la temperatura non sia influenzata dalle variazioni stagionali ma si mantenga costante, con un valore di 14 °C. Per questo motivo l'unica condizione da imporre a tutti i nodi del modello è una temperatura di 14°C. Essendo questa una condizione iniziale, non impedirà alla temperatura stessa di variare durante la simulazione ma ci si aspetta comunque che, alla fine di essa, sui contorni del dominio rimanga invariata.

L'impostazione delle condizioni al contorno risulta più complessa e di non immediata applicazione. Per quanto riguarda le condizioni note sono state così definite:

 temperatura costante pari a 14°C nel bordo inferiore del modello (Temperature BC);

 temperatura al piano campagna variabile a seconda della variazione stagionale della temperatura a Torino (Temperature BC);

• temperatura di ingresso del fluido termovettore variabile a seconda della serie temporale (Temperature BC);

- velocità di ingresso e di uscita dai due estremi liberi delle tubazioni pari a 0,4 m/s;
- carico idraulico assegnato ai nodi del bordo destro e del bordo sinistro del modello (Hydraulic-head BC).

Una prima verifica sulla correttezza delle condizioni assegnate può essere fatta osservando il livello di falda (Figura 4.18), la velocità di flusso dell'acquifero (Figura 4.19), che deve attestarsi attorno a valori dell'ordine di 1,4-1,5 m/s (Barla & Di Donna, 2015).







Figura 4.19 - Velocità di flusso dell'acquifero.

Per le informazioni sulla temperatura esterna, applicata sul bordo superiore del modello, si è fatto riferimento ai dati forniti dall'ARPA Piemonte (Figura 4.20).

🛓 ARPA Piemonte - Banca dati meteor	rologica										-		×
RIYOLI LA PEROSA ROCHEMOLLES / LAGO ROSONE ROSONE SALBERTRAND SAN BERTRAND SAN SICARIO SAN SICARIO SAN SICARIO SANTERNE ADANNA Pro SANTERNE ADANNA SAUZE CESANA SAUZE SAUZE CESANA SAUZE CESANA SAUZE SAUZE	ngrafica stazion o stazione lice stazione ota sito (metri) nune vincia cino railta' io pubblicazion	rafica stazione tazi											
Parametro	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giuano	Lualio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dice	mbre
Precipitazione dalle 9 alle 9 (mm)	24.8	41.0	218.6	45.8	15.8	278.4	152.8	22.2	149.4	15.4	230.6		1.4
Giorni niovosi nioggia dalle 9 alle 9	3	5	11	5	3	16	11	4	4	2	6		1 88
Precipitazione dalle 0 alle 0 (mm)	25.6	48.0	210.8	45.8	35.2	259.0	152.8	22.2	149.4	15.4	230.6		1.4
Giorni niovosi nioggia dalle 0 alle 0	4	5	11	5	4	15	9	,-	4	1	7		1
Temperatura media (°C)	2.3	5.5	9.1	16.2	19.5	20.9	22.1	24.4	20.9	13.0	7.5		4.1
Temperatura media dei massimi (°C)	6.6	11.7	14.8	23.7	26.9	27.0	28.1	31.5	28.8	20.4	13.2		10.9
Temperatura media dei minimi (°C)	-0.5	1.2	4.3	9.4	12.2	15.7	16.1	17.9	15.1	7.6	4.2		-0.2
Temperatura massima (°C)	12,3	18,4	22,8	31,8	33,5	34,6	32,0	35,8	32,9	30,3	17,3		15,3
Temperatura minima (°C)	-5,3	-2,2	-2,2	6,0	8,2	10,4	12,0	12,3	9,1	2,9	0,1		-4,5
Umidita' media (%)	89	84	77	62	64	79	71	67	76	76	91		72
Umidita' massima (%)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		100
Umidita' minima (%)	31	28	20	13	16	26	22	15	22	12	41		15
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													-
			[2011 🔻 📭	8	X							

Figura 4.20- Banca dati meteorologica ARPA Piemonte.

La fase successiva consiste nel definire le condizioni al contorno relative alla temperatura interna e alla velocità di flusso dell'aria che attraversa la galleria.

4.7 Definizione della condizione al contorno della temperatura interna

In prima analisi si analizza la condizione di temperatura. Il software Feflow consente di imporre due tipi di condizioni di temperatura: la "Heat Transfer BC" e la "Temperature BC".

La "Heat Transfer BC" applica una predefinita temperatura di riferimento combinata ad un parametro di conduttanza termica (Heat Transfer Rate [W/(m²·K)]) e calcola, istante per istante, la quantità di calore da sottrarre o apportare al modello nella zona interessata dai nodi a cui è assegnata la particolare condizione al contorno.

La "Temperature BC" applica una prefissata temperatura ai nodi del modello a cui è assegnata. Ciò può comportare un afflusso di energia nel modello, quando i nodi vicini hanno una temperatura inferiore, o un deflusso dal modello, quando c'è un gradiente di temperatura dai nodi vicini verso la condizione al contorno. Le condizioni al contorno della temperatura sono applicate nei casi in cui la temperatura nelle acque sotterranee è nota in anticipo.

A questo punto si testano le due condizioni per verificare quale si presti meglio a ricreare le condizioni di temperatura interna, fornita dalle misurazioni effettuate in galleria. Le verifiche vengono fatte in corrispondenza del baricentro della sezione di mezzeria di ciascun anello. Per valutare quale delle due condizioni sia la più appropriata si confronteranno i risultati ottenuti tra i 5 anelli e si verifica che l'andamento ottenuto non subisca delle anomalie nel tempo.

4.7.1 Condizione di primo tentativo - Heat transfer BC

Per verificare se questa funzione possa essere usata per rappresentare le condizioni presenti in galleria, si applica l'andamento di temperatura annuale monitorato a tutti i nodi della sezione dell'aria interna nel primo layer attraverso il comando "Time Series" (Figura 4.21).

Come accennato precedentemente, insieme alla "Heat transfer BC", è stato assegnato anche un valore di "Heat Transfer Rate", definito prendendo come riferimento le analisi sperimentali effettuate su diverse tipologie di geostrutture, considerando i risultati ottenuti per le gallerie ferroviarie e stazioni metropolitane studiate; si è assunto un valore di 15 W/(m²·K) (Di Donna et al., 2016).



Figura 4.21 - Condizione di "Heat-transfer BC" applicata sul primo layer del modello numerico.

L'altra condizione che influenza la trasmissione di calore nel tunnel è il "Fluid-flux BC", che determina la velocità a cui si sposta l'aria all'interno della galleria, creata dal sistema di ventilazione forzata, unico sistema di regolazione termica per l'infrastruttura torinese. Poiché in questa fase si vuole valutare solo l'influenza della temperatura sul modello si impone inizialmente un valore di velocità flusso di 5m/s, valore sicuramente superiore a quello reale.

La simulazione è stata effettuata con una durata di 4 anni di cui si riportano i risultati ottenuti durante il primo anno in Figura 4.22. Per mantenere la corrispondenza con la legge sinusoidale della temperatura misurata, l'origine dell'ascissa è fissato in corrispondenza del primo giorno del mese di maggio, e questa corrispondenza viene mantenuta per tutti gli andamenti impostati nei successivi calcoli.



Figura 4.22 - Confronto tra temperatura interna misurata e simulata, con condizione "Heat-transfer BC" e velocità di flusso di 5 m/s (t=1 anno).

L'analisi sul primo anno mostra come questo modello non sia adatto a riprodurre le condizioni di temperatura, in quanto, sebbene ne riproduca la forma, è ben lontano dal raggiungerne i valori massimi. Si può notare, inoltre, come il risultato ottenuto non cambi all'aumentare della distanza dal punto di applicazione della temperatura, ovvero, come l'andamento di temperatura ricavato sia uguale in tutti gli anelli.

Per assicurarsi che tale risultato non sia influenzato dalla velocità del flusso, un'ulteriore analisi è stata fatta, imponendo una velocità nulla (Figura 4.23).



Figura 4.23 - Confronto tra temperatura interna misurata e simulata, con condizione "Heat-transfer BC" e velocità di flusso nulla (t=1 anno).

Il risultato di questa simulazione mostra che, nonostante le temperature risultanti siano maggiori di quelle ottenute in presenza di un flusso d'aria, esse non raggiungano mai i valori imposti sul primo strato. Oltretutto, è proprio l'assenza di flusso d'aria che non consente il trasporto del calore agli altri anelli, che mostrano valori sempre più bassi a mano a mano che ci si allontana dal layer in cui è stata applicata la temperatura.

4.7.2 Condizione di secondo tentativo - Temperature BC

Attraverso il comando "Time Series", si è applicato l'andamento di temperatura interna annuale misurato a tutti i nodi interni alla galleria (Figura 4.24).



Figura 4.24 - Condizione di "Temperature BC" applicata sul primo layer del modello numerico.

L'analisi simula come la temperatura dell'aria interna varia dopo 4 anni. I risultati ottenuti il primo anno hanno mostrato come l'andamento di temperatura interna è stato ben riprodotto dal modello (Figura 4.25).



Figura 4.25 - Confronto tra temperatura interna misurata e simulata, con condizione "Temperature BC" e velocità di flusso di 5 m/s (t=1 anno).

Si nota come le curve siano pressoché sovrapposte, con l'unica differenza nel punto d'inizio, che dipende dal fatto che la temperatura iniziale imposta nel modello è di 14 °C, mentre quella misurata è di 20 °C. Un'altra differenza tra le due curve dipende dal fatto che la curva delle temperature interne è composta da misurazioni giornaliere, mentre il passo della curva risultante è più grande e variabile, e dipende dal software, in cui si può impostare solo il passo iniziale. Si conferma, inoltre, come non si nota alcuna differenza tra i risultati ottenuti nelle sezioni di mezzeria dei 5 anelli.

Verificata la corrispondenza nel primo anno, si verifica se l'andamento subisce delle derive nei successivi anni e se si riproduce in tutta l'estensione del modello, e quindi nel baricentro della sezione di mezzeria dei cinque anelli (punto C) (Figura 4.26).

76



Figura 4.26 - Andamento della temperatura interna simulata nel punto C dei 5 anelli in 4 anni, con condizione "Temperature BC" e velocità di flusso di 5 m/s.

In questo caso si evidenzia sia una buona riproduzione degli andamenti durante tutta la durata della simulazione, che una perfetta sovrapposizione tra gli andamenti ottenuti lungo tutta la profondità del modello.

La conclusione di queste simulazioni è quindi che la condizione di "Temperature BC" ben si presti per la realizzazione del modello numerico.

4.8 Studio dell'influenza della velocità del flusso

La fase successiva consiste nel valutare l'influenza della velocità del flusso, poiché il valore di 5 m/s non è rappresentativo delle condizioni reali. La scelta di un valore così alto è giustificata dalla volontà di escludere inizialmente la sua influenza sulla verifica della validità delle condizioni analizzate. Il flusso d'aria che si genera in galleria dipende da due fattori principali: la circolazione dei convogli ed il sistema di ventilazione forzata.

L'effetto dovuto alla movimentazione delle vetture in metropolitana è certamente inferiore rispetto a quello che si avrebbe in gallerie ferroviarie, per diversi motivi: la velocità è inferiore, circa 35 km/h; il tunnel è un sistema aperto, a diretto contatto con l'aria esterna, quindi l'effetto si smorza piuttosto rapidamente; i tratti di percorrenza in continuo sono della lunghezza media di circa 600 metri, il che non

consente il generarsi di un flusso costante; per tutti questi motivi si è deciso di trascurarne gli effetti.

Per quanto riguarda la ventilazione forzata, nel documento "La sicurezza in metropolitana", rilasciato dal Comune di Torino, si rende noto che il sistema garantisce 5 ricambi d'aria ogni ora attraverso i ventilatori presenti nelle varie stazioni. I ventilatori in questione sono 24, di due tipi diversi, installati su tutto il tratto del prolungamento ed hanno una potenza massima che varia da 42,6 a 127 kW, dalla quale si ottengono rispettivamente una portata massima da 30 a 80 m³/s (fonte "Ventilatori Fläkt Woods in gallerie metropolitane e ferroviarie", aggiornamento Dicembre 2010). Con questi dati è possibile ricavare i flussi generati da tali apparecchi (Tabella 4.5).

r[m]	A[m ²]	q ₁ [m ³ /s]	q₂[m³/s]	v ₁ [m ³ /s]	v ₂ [m ³ /s]
3,4	36,32	30	80	0,8	2,2

Tabella 4.5 - Caratteristiche ventilatori.

I valori di velocità così ottenuti sono quelli che i ventilatori produrrebbero a pieno regime, ovvero in caso di attivazione per situazioni emergenziali (quali dispersione fumi e gas causati da incidenti o incendi) e saranno certamente inferiori se riferiti al normale uso quotidiano del ricircolo d'aria.

Vengono perciò presi in esame valori cautelativi di 0,1 m/s e 0,5 m/s per effettuare alcune simulazioni e valutare gli effetti che ne derivano. La validità del modello verrà valutata in funzione della diffusione dell'andamento della temperatura imposta su tutto il modello.

4.8.1 "Fluid-flux BC" = 0,1 m/s

Il modello utilizzato, è il medesimo visto nell'ipotesi precedente, con la sola differenza del valore relativo al "Fluid-flux BC". La verifica viene quindi effettuata considerando un punto nel baricentro (Punto C), uno vicino alla parete interna del rivestimento (Punto A) ed uno a metà tra questi due punti (Punto B), tutti posti nella sezione di mezzeria di ogni anello, come descritto nel capitolo 5 (Figura 4.27, 4.28 e 4.29).



Figura 4.27 - Andamento della temperatura nel punto A con velocità pari a 0,1 m/s.



Figura 4.28 - Andamento della temperatura nel punto B con velocità del flusso d'aria pari a 0,1 m/s.



Figura 4.29 - Andamento della temperatura nel punto C con velocità del flusso d'aria pari a 0,1 m/s.

In tutte le sezioni analizzate si ottiene una differenza di temperatura sensibile tra i vari anelli, per cui il valore di 0,1 m/s di velocità del flusso d'aria non risulta sufficiente a garantire il trasporto di calore. Tale differenza è ancora più evidente nel punto A, dove l'influenza della temperatura del terreno è più marcata, e raggiunge i 3°C.

4.8.2 "Temperature BC" = 0,5 m/s

L'analisi è stata ripetuta imponendo un valore di "Fluid-flux BC" di 0,5 m/s e confrontando il comportamento della temperatura negli stessi punti visti per l'ipotesi precedente (Figura 4.30, 4.31 e 4.32).



Figura 4.30 - Andamento della temperatura nel punto A con velocità del flusso d'aria pari a 0,5 m/s.



Figura 4.31 - Andamento della temperatura nel punto B con velocità del flusso d'aria pari a 0,5 m/s.



Figura 4.32 - Andamento della temperatura nel punto C con velocità del flusso d'aria pari a 0,5 m/s.

L'analisi mostra una buona corrispondenza della temperatura sezione per sezione. Nello specifico tutte le temperature massime che sono state ottenute a seguito della simulazione sono riassunte nella Tabella 4.6.

			Α				В				С	
	60 g	395 g	760 g	1125 g	60 g	395 g	760 g	1125 g	60 g	395 g	760 g	1125 g
Anello 1	27,35	27,34	27,34	27,34	27,47	27,47	27,47	27,47	27,48	27,48	27,48	27,48
Anello 2	27,10	27,09	27,09	27,09	27,39	27,39	27,39	27,39	27,44	27,44	27,44	27,44
Anello 3	26,94	26,93	26,93	26,92	27,31	27,31	27,31	27,31	27,40	27,39	27,39	27,39
Anello 4	26,82	26,81	26,81	26,81	27,25	27,24	27,24	27,24	27,35	27,35	27,35	27,35
Anello 5	26,76	26,75	26,75	26,74	27,21	27,20	27,20	27,20	27,33	27,33	27,33	27,32

Tabella 4.6 -Temperature massime nei cinque anelli.

Il risultato mostra una differenza minima sia tra i vari anelli che tra le sezioni prese in considerazione. Nella sezione più critica, ovvero quella più vicina al terreno, si ha una differenza massima minore di 1°C, che diventa minore di 0,15 °C nel baricentro della galleria.

In conclusione, le condizioni al contorno, descritte all'inizio di questo paragrafo, vengono integrate applicando agli elementi che compongono l'aria interna del tunnel, la condizione di "Temperature BC" secondo l'andamento annuale monitorato (Figura

4.33) e la condizione di "Fluid-flux BC" con un valore di -0,5 m/s (flusso entrante) nel primo layer e, negli stessi elementi dell'ultimo layer, la condizione di "Fluid-flux BC" con un valore di +0,5 m/s (flusso uscente).



Figura 4.33 - Temperatura dell'aria interna della galleria monitorata.

Dopo le simulazioni effettuate, è possibile definire il modello numerico in tutte le caratteristiche necessarie per svolgere le analisi che servono a studiare l'influenza dell'attivazione termica della galleria. Il modello così composto risulta essere rappresentativo delle condizioni reali e si dimostra stabile anche durante le simulazioni di lunga durata. Inoltre, un altro aspetto che valida i parametri scelti in modo significativo, riguarda la ripetitività dei risultati nello spazio, oltre che nel tempo, ovvero, lungo l'intero tratto di 7 metri modellato con il software. Per questi motivi, quindi, è possibile utilizzarlo per verificare come si evolve la situazione dopo l'attivazione dell'impianto geotermico, esaminando diverse configurazioni di conci energetici e di funzionamento dell'impianto stesso.

CAPITOLO 5

STUDIO DELL'INFLUENZA DELL'ATTIVAZIONE TERMICA DELLA GALLERIA SULLA TEMPERATURA DELL'ARIA INTERNA

5.1 Premessa

Definiti tutti i parametri richiesti per la costruzione del modello, è possibile analizzare l'effetto che l'attivazione dell'impianto geotermico ha nei confronti della temperatura dell'aria interna della galleria. Lo scopo è quello di valutare quali siano le conseguenze che possono ricadere sugli utenti ed in particolar modo, si vuole verificare che la temperatura interna non subisca un eccessivo cambiamento dovuto alla circolazione del fluido termovettore all'interno delle tubazioni annegate nel rivestimento di calcestruzzo.

Le analisi svolte simulano la variazione delle temperature che si avrebbero in 10 anni, di cui i primi quattro sono in condizioni di impianto spento ed i successivi 6 di impianto funzionante; tale scelta è volta ad assicurare che le temperatura interna, in un primo momento, assuma una distribuzione uniforme e coerente con le osservazioni fatte nel capitolo 4. Le simulazioni prendono in considerazione le configurazioni "Ground", "Air" e "Ground & Air" dei conci ENERTUN, descritti nel capitolo 2. Infine vengono valutati gli effetti in caso di funzionamento ciclico continuo e stagionale.

Un'ultima analisi riguarda la possibilità di installare l'impianto geotermico in città caratterizzate da diverse condizioni climatiche, quindi si ripetono le analisi considerando due condizioni di temperatura interna diverse. Nel primo viene imposta una temperatura interna maggiore rispetto a quella registrata nella città di Torino. Nel secondo caso si impone una temperatura interna minore.

Il modello è realizzato usando le condizioni iniziali e al contorno validate nel capitolo 4, alle quali vanno aggiunte quelle relative all'accensione del sistema geotermico. Per simulare la circolazione del fluido all'interno delle serpentine bisogna imporre una condizione di temperatura ed una di flusso nei punti di ingresso ed uscita del fluido stesso (Figura 5.10); nei punti di entrata si applica la condizione di "Temperature BC" (Figura 6.1) ed una di "Fluid-flux BC" di -0,4 m/s (flusso entrante); nei punti di uscita si applica solo la condizione di "Fluid-flux BC" di 0,4 m/s (flusso uscente). Per assicurare il corretto funzionamento dell'impianto termico è necessario calibrare l'andamento di temperatura del fluido da immettere nel sistema. Tenendo conto delle relazioni mostrate nel capitolo 2, che servono ad ottimizzare l'efficienza dell'impianto, sono state definite una temperatura di input in regime di raffreddamento, nei mesi estivi, di 26,5 °C, ed in regime di riscaldamento, nei mesi invernali, di 4°C (Figura 5.1). Si ricorda che l'origine dell'ascissa è fissata in corrispondenza dell'inizio del mese di maggio.



Figura 5.1 - Temperatura di Input del fluido termovettore (funzionamento continuo).

Gli anelli lavorano in parallelo, collegati da un condotta principale, ognuno di esso è infatti dotato di un proprio circuito; le condizioni sopra menzionate andranno assegnate a tutti gli anelli, quindi saranno ripetute per 5 punti di ingresso e 5 di uscita, che si trovano nei livelli 1, 15, 29, 43 e 57. Durante l'assegnazione delle condizioni al contorno si è notato il sorgere di un conflitto nel modello; nel layer numero 1 si formano due elementini triangolari appartenenti allo strato di calcestruzzo, composti dai nodi di input, output ed intradosso del rivestimento; poiché a tutti questi nodi è assegnata una condizione di flusso, essa viene per definizione estesa anche all'interno

dell'influenza dell'attivazione termica della galleria sulla temperatura dell'aria interna

degli elementi, producendo un flusso che attraversa il calcestruzzo e ricreando, quindi, una situazione non coerente con il la realtà fisica del problema. Questo conflitto si ha solo nel primo livello, unico layer in cui sia ai nodi dell'intradosso della galleria che a quelli delle aperture delle tubazioni, sono assegnate le sopramenzionate condizioni. Per superarlo è stato sufficiente simulare l'attivazione degli anelli 2, 3, 4 e 5, lasciando il primo spento. Osservando i risultati ottenuti nelle simulazioni fin qui svolte si nota come tra i vari anelli il gradiente di temperatura sia trascurabile e perciò si ritiene che non ci siano delle conseguenze sensibili sui risultati. La verifica viene quindi effettuata nelle sezioni di mezzeria di tutti e 5 gli anelli, considerando un punto nel baricentro (Punto C), uno vicino alla parete interna del rivestimento (Punto A) ed uno a metà tra questi due punti (Punto B).

5.2 Simulazione del funzionamento continuo

5.2.1 Configurazione "Ground"

Si riportano gli andamenti di temperatura dell'aria interna, in cui si osservano i cambiamenti che subentrano dopo l'attivazione dell'impianto geotermico nei punti di osservazione A, B e C (Figura 5.2). In questa fase si prende in considerazione quello che avviene nella sezione di mezzeria del terzo anello.



Figura 5.2 - Andamento delle temperature interne misurate e di ingresso del fluido nell'anello n°3 in configurazione "Ground" L'attivazione dell'impianto coincide con l'immissione del fluido termovettore. Dal grafico si evince come l'andamento non subisca delle grandi variazioni. Per osservare più nel dettaglio gli effetti dell'attivazione si riportano i grafici relativi ai picchi di temperatura massima (Figura 5.3) e minima (Figura 5.4) che si hanno prima e dopo l'attivazione del sistema.



Figura 5.3 - Andamento delle temperature massime in configurazione "Ground".

In tutti e tre i punti di osservazione si vede un aumento delle temperature successivo all'attivazione dell'impianto geotermico. Il punto A è quello che presenta il gradiente maggiore. Questo dipende sia dal fatto che il punto A ha una temperatura iniziale più bassa, sia dal fatto che è più vicino, rispetto ai punti B e C, alle tubazioni nelle quali scorre il fluido, che quindi ne influenza maggiormente la temperatura. dell'influenza dell'attivazione termica della galleria sulla temperatura dell'aria interna



Figura 5.4 - Andamento delle temperature minime in configurazione "Ground".

Anche nella Figura 5.4 si nota un dislivello di temperatura maggiore nel punto di osservazione A. La differenza più evidente rispetto al grafico delle temperature massime è che, ad impianto spento, tutti i punti presentano la medesima temperatura iniziale. Questo dipende dal fatto che la temperatura minima dell'aria interna misurata è prossima alla temperatura del terreno, quindi ogni sezione raggiunge una temperatura uniforme di 14 °C circa.

Nella Tabella 5.1 si riportano i massimi gradienti ottenuti nei diversi punti, prendendo in considerazione tutti gli anelli.

	Estate	Inverno
ΔT _A [°C]	0,54	-0,45
ΔT _B [°C]	0,20	-0,17
ΔT _c [°C]	0,11	-0,09

Tabella 5.1 - Gradienti massimi di temperatura (Ground).

Si osserva infine che la differenza della temperatura dell'aria interna, nel peggiore dei casi analizzati, rimane minima e si può quindi confermare che, in caso d'installazione dei conci ENERTUN in configurazione "Ground", non si verificherebbero disagi per gli utenti della metropolitana.

5.2.2 Configurazione "Air"

Per i conci in configurazione "Air", si riportano i grafici ottenuti dalle simulazioni svolte, considerando i punti A, B e C della sezione di mezzeria del terzo anello (Figura 5.5).



Figura 5.5 - Andamento delle temperature interne misurate e di ingresso del fluido nell'anello n°3 in configurazione "Air".
Osservando l'andamento delle temperature nel punto A, si nota un lieve aumento successivo all'attivazione termica. Nelle Figure 5.6 e 5.7 si riportano, rispettivamente, i valori di temperatura massima e minima ottenuti durante i dieci anni analizzati.



Figura 5.6 - Andamento delle temperature massime in configurazione "Air".

dell'influenza dell'attivazione termica della galleria sulla temperatura dell'aria interna



Figura 5.7 - Andamento delle temperature minime in configurazione "Air".

Dal punto di vista del comportamento del modello, si ottiene lo stesso risultato visto per i conci "Ground", con la differenza che, essendo le tubazioni più vicine all'intradosso, i gradienti risultano essere leggermente superiori, specialmente per il punto di osservazione A. Nella Tabella 5.2 si riportano i massimi gradienti ottenuti nei diversi punti.

	Estate	Inverno
ΔT _A [°C]	0,86	-0,71
ΔT _B [°C]	0,32	-0,27
ΔT _C [°C]	0,18	-0,15

Tabella 5.2 - Gradienti massimi di temperatura (Air).

Anche per i conci ENERTUN in configurazione "Air", non si riscontrano variazioni tali da creare disagi per gli utenti, in termini di incrementi o decrementi di temperatura.

5.2.3 Configurazione "Ground & Air"

In ultima analisi si osserva cosa accade in caso di installazione di conci ENERTUN in configurazione "Ground & Air" per i punti A, B e C nella sezione di mezzeria del terzo anello della galleria (Figura 5.8).



Figura 5.8 - Andamento delle temperature interne misurate e di ingresso del fluido nell'anello n°3 in configurazione "Ground & Air".

Da una prima osservazione si nota come, dopo l'attivazione termica dell'impianto, la temperatura simulata subisce delle variazioni. Nelle Figure 5.9 e 5.10 si riportano i valori di temperatura massima e minima ottenuti durante i dieci anni analizzati.



Figura 5.9 - Andamento delle temperature massime in configurazione "Ground & Air".

dell'influenza dell'attivazione termica della galleria sulla temperatura dell'aria interna



Figura 5.10 - Andamento delle temperature minime in configurazione "Ground & Air".

Come visto per le configurazioni precedenti, gli andamenti della temperatura non cambiano. In questo caso, però, scorrendo il fluido in due serpentine contemporaneamente, l'effetto è maggiore (Tabella 5.3).

	Estate	Inverno
ΔT _A [°C]	1,02	-0,83
ΔT _B [°C]	0,38	-0,31
ΔT c[°C]	0,22	-0,18

Tabella 5.3 - Gradienti massimi di temperatura(Ground & Air).

I risultati confermano quanto visto finora e assicurano che, sebbene la configurazione "Ground & Air" sia quella in cui l'impianto geotermico ha l'impatto maggiore, l'effetto sulle temperature interne della galleria della metropolitana rimane trascurabile.

5.3 Simulazione del funzionamento stagionale

Il funzionamento stagionale consiste nell'attivare l'impianto solo in alcuni periodi dell'anno e viene analizzato il caso di funzionamento nel periodo estivo ed in quello invernale. Sebbene le temperature di input usate non varino rispetto a quelle del funzionamento continuo negli stessi periodi, i risultati che si ottengono potranno variare perché cambia l'accumulo di temperatura che si genera all'interno del terreno, che ricordiamo svolgere la funzione di serbatoio nel sistema geotermico. Dal punto di vista delle variazioni della temperatura interna, si vuole verificare che tale comportamento non abbia un impatto significativo rispetto a quanto osservato nel caso precedente.

Anche in queste analisi verranno osservati i comportamenti nelle tre configurazioni dei conci, simulando il comportamento della temperatura nelle diverse configurazioni durante un ciclo decennale, considerando prima il funzionamento esclusivo nei mesi estivi ed in seguito i funzionamento nei mesi invernali.

5.4 Attivazione del sistema nei mesi estivi

Per simulare l'attivazione dell'impianto con funzione di raffreddamento, nel periodo estivo, bisogna introdurre un nuovo andamento di temperatura di ingresso (Figura 5.11), in cui si immette il fluido all'interno delle tubazioni alla temperatura di 26,5 °C, dall' 1 maggio all'1 ottobre.





5.4.1 Configurazione "Ground

I risultati ottenuti nella sezione di mezzeria del terzo anello, confrontati con la temperatura di input, sono riportati nella Figura 5.12.

dell'influenza dell'attivazione termica della galleria sulla temperatura dell'aria interna



Figura 5.12 - Andamento delle temperature interne misurate e di ingresso del fluido nell'anello n°3 in configurazione "Ground" (Ciclo estivo).

Dall'osservazione della Figura 5.12, in cui si sovrappongono le temperature misurate con la temperatura del fluido di mandata, si nota un andamento stabile, che non subisce significative variazioni nei mesi di attivazione dell'impianto. Questo fenomeno dipende dal fatto che l'attivazione dell'impianto si verifica in corrispondenza del picco di temperatura interna. Dopo il picco infatti l'andamento di temperatura imposto tende a diminuire e la temperatura del fluido che scorre nelle serpentine non ha una sufficiente influenza per opporsi all'inerzia del sistema. Pertanto si può affermare che le temperature interne dipendono da diversi fattori e che il sistema, in caso di funzionamento stagionale estivo, non viene influenzato significativamente dell'attivazione dell'impianto geotermico.

Si riportano i dati relativi ai picchi di massimo e minimo nella medesima sezione, ottenuti nei punti di osservazione A, B e C (Figure 5.13 e 5.14).



Figura 5.13 - Andamento delle temperature massime in configurazione "Ground" - Ciclo estivo.

In questo caso il gradiente più alto che si ottiene analizzando le temperature massime che si registrano ad impianto spento ed acceso, è di 0,15 °C.



Figura 5.14 - Andamento delle temperature minime in configurazione "Ground" (Ciclo estivo).

Dall'osservazione della Figura 5.14 risulta evidente come i valori delle temperature minime non subiscono alcuna variazione a seguito dell'attivazione dell'impianto.

5.4.2 Configurazione "Air

In questo caso si analizza il comportamento stagionale estivo in configurazione "Air" e si riportano gli andamenti ottenuti (Figura 5.15, 5.16 e 5.17).


Figura 5.15 - Andamento delle temperature interne misurate e di ingresso del fluido nell'anello n°3 in configurazione "Air" (Ciclo estivo).

Come si è visto nel caso di configurazione "Ground", si nota un andamento stabile, che non subisce significative variazioni nei mesi di attivazione dell'impianto.



Figura 5.16 - Andamento delle temperature massime in configurazione "Air" (Ciclo estivo).



Figura 5.17 - Andamento delle temperature minime in configurazione "Air" (Ciclo estivo).

Il gradiente massimo che si ottiene sulle temperature massime è di circa 0,1 °C ed è quasi nullo nelle temperature minime.

5.4.3 Configurazione "Ground & Air"

In questo paragrafo si riportano i valori relativi alla configurazione "Ground & Air" (Figura 5.18, 5.19 e 5.20).



Figura 5.18 - Andamento delle temperature interne misurate e di ingresso del fluido nell'anello n°3 in configurazione "Ground & Air" (Ciclo estivo).

Anche la configurazione "Ground & Air", che è quella che ha mostrato la maggiore capacità di influenzare il sistema, non mostra variazioni di temperatura significative dopo l'accensione dell'impianto.



Figura 5.19 - Andamento delle temperature massime in configurazione "Ground & Air" (Ciclo estivo).



Figura 5.20 - Andamento delle temperature minime in configurazione "Ground & Air" (Ciclo estivo).

I dati mostrano lo stesso risultato ottenuto nei precedenti due casi e si conferma che il funzionamento stagionale dell'impianto, acceso solo nei mesi estivi, non influenza in modo significativo le condizioni di temperature interne della galleria.

5.5 Attivazione del sistema nei mesi invernali

Similmente a quanto fatto per il caso di funzionamento stagionale estivo, per simulare il funzionamento nei soli mesi invernali, si è introdotto un nuovo andamento di temperatura di ingresso del fluido (Figura 5.21), considerando l'attivazione solo nel periodo tra l'1 dicembre e l'1 marzo. La temperatura di mandata del fluido è di 4°C.



Figura 5.21 - Temperatura di Input del fluido termovettore (funzionamento stagionale invernale).

Anche per la modalità di funzionamento invernale bisogna garantire che non si verifichi un fenomeno di accumulo che quindi causerebbe un abbassamento delle temperature media registrate all'interno della galleria nel tempo e che, ad ogni ciclo stagionale si diminuirebbero ulteriormente.

5.5.1 Configurazione "Ground

Nel paragrafo che segue si osservano le temperature derivanti dal funzionamento ciclico invernale. I risultati ottenuti nella sezione di mezzeria del terzo anello nella configurazione "Ground", confrontati con la temperatura di input, sono riportati nella Figura 5.22.



Figura 5.22 - Andamento delle temperature interne misurate e di ingresso del fluido nell'anello n°3 in configurazione "Ground" (Ciclo invernale).

Si osserva una lieve tendenza delle temperature minime a diminuire in concomitanza con l'attivazione dell'impianto e nelle Figure 5.23 e 5.24 si può osservare nel dettaglio di quanto queste varino.



Figura 5.23 - Andamento delle temperature massime in configurazione "Ground" (Ciclo invernale).

Osservando la Figura 5.23 si nota come i valori di picco della temperatura simulata per i punti A, B e C, rimane costante anche dopo l'attivazione dell'impianto geotermico.



Figura 5.24 - Andamento delle temperature minime in configurazione "Ground" (Ciclo invernale).

A differenza dei valori di temperatura massima, quella minima viene influenzata in dall'attivazione termica dell'impianto in funzionamento ciclico invernale. Si registra un gradiente massimo di circa 0.45 °C, nel punto A della galleria e si conferma come non vi sia un problema legato all'accumulo di calore.

5.5.2 Configurazione "Air"

Il caso analizzato in questa parte riguarda la configurazione "Air" (Figure 5.25).



Figura 5.25 - Andamento delle temperature interne misurate e di ingresso del fluido nell'anello n°3 in configurazione "Air" (Ciclo invernale).

Dall'osservazione della Figura 5.25 si nota un andamento stabile, che non subisce significative variazioni nei mesi di attivazione dell'impianto. Si riportano i dati relativi ai picchi di massimo e minimo nella sezione di mezzeria del terzo anello nelle Figure 5.26 e 5.27.



Figura 5.26 - Andamento delle temperature massime in configurazione "Air" (Ciclo invernale).

L'unica differenza apprezzabile riguarda la differenza che si nota tra i tre punti di osservazione, dovuta ad una diversa posizione e distanza dal terreno, che comunque rimane costante anche a seguito dell'immissione di fluido freddo nelle serpentine, concomitante con l'attivazione dell'impianto.



Figura 5.27 - Andamento delle temperature minime in configurazione "Air" (Ciclo invernale).

I dati confermano tutto quello osservato finora, ovvero una diminuzione della temperatura minima, più evidente nel punto vicino al rivestimento di calcestruzzo e superiore rispetto al caso "Ground"; in questa configurazione il gradiente massimo raggiunge circa 0,7 °C.

5.5.3 Configurazione "Ground & Air"

L'ultimo caso relativo al funzionamento ciclico invernale riguarda la configurazione "Ground & Air", i cui risultati sono riportati nelle Figure 5.28, 5.29 e 5.30.



Figura 5.28 - Andamento delle temperature interne misurate e di ingresso del fluido nell'anello n°3 in configurazione "Ground & Air" (Ciclo invernale).



Figura 5.29 - Andamento delle temperature massime in configurazione "Ground & Air" (Ciclo invernale).



Figura 5.30 - Andamento delle temperature minime in configurazione "Ground & Air" (Ciclo invernale).

I risultati ottenuti confermano quanto mostrato finora, ovvero che il caso "Ground & Air" è quello che più influisce sulle temperature. Qui si ottengono gradienti relativi alle temperature minime di circa 0,8°C. Il dato più interessante che si può ricavare dalle analisi sulle attivazioni stagionali è senza dubbio quello relativo all'assenza di accumulo di temperatura, a seguito dell'alternarsi dei cicli on/off del sistema. Se si osservano infatti i grafici che raffigurano i picchi raggiunti nei tre punti, in tutte le combinazioni, si vede in modo inequivocabile la tendenza dei punti di mantenersi sugli stessi valori e di non seguire andamenti crescenti o decrescenti con il susseguirsi dei cicli. Perciò, il calore che si sprigiona a seguito dell'accensione dell'impianto non si conserva all'interno del sistema, ma viene disperso velocemente.

Possiamo concludere questa fase di analisi affermando che il funzionamento stagionale incide sulla temperatura interna solo nell'ipotesi di attivazione invernale, in cui tra impianto spento e acceso si registra un delta massimo di 0,8 °C. Questo è dovuto al fatto che la temperatura minima di input è di 4°C e nello stesso periodo la temperatura interna è di circa 14°C, quindi esercita una influenza maggiore rispetto ai mesi estivi, in cui la temperatura interna resta sempre più alta di quella del fluido in ingresso. Inoltre, si osserva come il gradiente ottenuto in funzionamento ciclico invernale sia, al più, uguale a quello del caso di funzionamento continuo, che si conferma essere quello che esercita più influenza; influenza che non inficia la funzionalità e la fruibilità del servizio di trasporto.

5.6 Studio dell'influenza dell'attivazione termica della galleria in diverse condizioni ambientali

Per completezza di analisi, si vuole simulare l'effetto che l'attivazione termica di un impianto geotermico possa avere in condizioni climatiche diverse da quelle presenti nella città di Torino. Per fare questo si mantiene lo stesso modello numerico e si varia solo la temperatura interna della galleria in condizioni indisturbate. Per questo motivo, si è ipotizzato di usare lo stesso andamento della temperatura interna registrata nella galleria di Torino traslandolo di ±5°C (Figura 5.31). Questa soluzione, semplificativa, ha l'obiettivo di studiare l'effetto dell'attivazione termica sulla temperatura dell'aria interna in città con climi più e meno rigidi. Il gradiente di 5°C è stato ritenuto sufficientemente ampio per analizzare i risultati che si avrebbero in città poste ad una latitudine inferiore, ad esempio Palermo, e ad una latitudine superiore, ad esempio Stoccolma. In questo caso, quindi, la differenza tra temperatura di input e temperatura interna aumenta, sia per le temperature massime che per quelle minime, permettendo quindi di analizzare come questa differenza possa influenzare i risultati. Poiché il caso "Ground & Air" è quello che sinora ha mostrato sempre la maggiore influenza, le analisi in questa fase verranno effettuate considerando solo quest'ultima configurazione di conci.



Figura 5.31 - Andamento delle temperature interne imposte.

5.6.1 Temperatura interna incrementata (+5°C)

Le modalità di funzionamento sono le medesime viste nella prima parte di questo capitolo, quindi si considerano 4 anni ad impianto spento e 6 anni ad impianto attivo. L'intero andamento ottenuto nei punti A, B e C appartenenti alla sezione di mezzeria del terzo anello è mostrato nella Figura 5.32.



Figura 5.32 - Andamento delle temperature interne misurate e di ingresso del fluido nell'anello n°3 in configurazione "Ground & Air" (+5°C).

Già dalla Figura 5.32 si può notare come il punto di osservazione A mostri una, seppur minima, variazione dopo l'accensione dell'impianto geotermico. Come per le precedenti simulazioni si riportano i risultati dei massimi e dei minimi livelli di temperatura (Figure 5.33 e 5.34).



Figura 5.33 - Andamento delle temperature minime in configurazione "Ground & Air" (+5°C).



Figura 5.34 - Andamento delle temperature massime in configurazione "Ground & Air" (+5°C).

Nella Tabella 5.4 vengono elencate le massime differenze di temperature tra impianto spento e acceso.

	Estate	Inverno
ΔT _A °C]	1,01	-0,83
ΔT _B [°C]	0,38	-0,31
ΔT _c [°C]	0,22	-0,18

Tabella 5.4 - Gradienti massimi di temperatura (Ground & Air) (+5°C).

I gradienti che si generano sono paragonabili a quelli ottenuti nelle analisi svolte per la città di Torino. Inoltre bisogna considerare la grande inerzia che presenta il sistema nel suo complesso, che ricordiamo comprendere il terreno in cui la galleria è scavata. E' infatti proprio la temperatura fissata di 14°C del terreno che mantiene l'equilibro durante tutta la simulazione.

5.6.2 Temperatura interna incrementata (-5°C)

Ipotizziamo ora di trovarci in una situazione in cui la temperatura interna è più bassa rispetto a quella misurata nella metropolitana di Torino. I risultati sono riportati nelle Figure 5.35, 5.36 e 5.37.



Figura 5.35 - Andamento delle temperature interne misurate e di ingresso del fluido nell'anello n°3 in configurazione "Ground & Air" (-5°C).

La Figura 5.35 mostra un piccolo cambiamento di temperature dopo l'attivazione termica, che si mantiene poi costante durante tutta la simulazione.



Figura 5.36 - Andamento delle temperature minime in configurazione "Ground & Air" (-5°C).



Figura 5.37 - Andamento delle temperature massime in configurazione "Ground & Air" (-5°C).

Nella Tabella 5.5 si espongono i massimi valori dei gradienti risultati dall'analisi svolta.

	Estate	Inverno
ΔT _A [°C]	1,02	-0,83
ΔT _B [°C]	0,38	-0,31
ΔT _c [°C]	0,22	-0,18

Tabella 5.5 - Gradienti massimi di temperatura (Ground & Air) (-5°C).

Anche in questo caso si può notare come le temperature tra impianto attivo e disattivo varino di quantità molto simili a quelle fin qui mostrate dai precedenti casi. Questo quindi evidenzia che, anche se si incrementa il dislivello tra la temperatura interna e quella di input, l'attivazione dell'impianto termico genera un effetto limitato.

I motivi che possono essere attribuiti a questo comportamento risiedono principalmente nel fatto che le temperature di input che vengono imposte hanno un andamento che ricalca quello della temperatura interna ed in particolar modo mantiene i valori di picco massimi e minimi per un periodo limitato. Inoltre bisogna considerare la grande inerzia che presenta il sistema nel suo complesso, che ricordiamo comprendere il terreno in cui la galleria è scavata. E' infatti proprio la temperatura fissata di 14°C del terreno che mantiene l'equilibro durante tutta la simulazione, spingendo l'intero sistema a convergere verso i 14°C non appena si superano i periodi in cui il fluido raggiunge i suoi valori estremi, di 4 e 26,5°C. Un'ulteriore riflessione andrebbe quindi fatta sulla temperatura del terreno da impostare per assicurare una maggiore congruenza con l'analisi svolta. Nella simulazione svolta per la città posta a latitudine inferiore, a cui è stata imposta una temperatura interna ridotta di 5°C, che potrebbe rappresentare le condizioni climatiche della città di Stoccolma, bisogna affinare il modello considerando anche una temperatura del terreno inferiore. La stessa procedura va eseguita per le analisi che simulano l'andamento ipotizzato per la città di Palermo, aumentando, in questo caso, la temperatura del terreno.

5.7 Confronto tra i risultati ottenuti

Nella Figura 5.38 si riportano gli andamenti di temperatura nell'anello numero 3, in configurazione "Ground & Air", ottenuti dalle analisi svolte considerando la modalità di funzionamento continuo estivo e invernale.



Figura 5.38 - Andamento delle temperature in funzionamento continuo, invernale ed estivo, nel punto A in configurazione "Ground & Air".

Osservando la Figura 5.38 si può affermare che prima dell'attivazione termica della galleria, in tutti i casi analizzati, la temperatura dell'aria interna è uguale. Dopo l'accensione dell'impianto, in caso di funzionamento estivo non si notano variazioni. I casi di funzionamento continuo ed invernale invece riportano un cambiamento ed i risultati sono paragonabili tra loro.

Considerando che non si registrano significative variazioni in termini di temperature massime, si riportano di seguito i risultati e dei minimi valori di temperatura (Figura 5.39) ottenuti per le tre modalità di funzionamento.



Figura 5.39 - Andamento delle temperature minime in funzionamento continuo, invernale ed estivo, nel punto A in configurazione "Ground & Air"

I risultati confermano come le temperature minime iniziali siano corrispondenti in tutti e tre i casi analizzati. A seguito dell'attivazione, per la modalità di funzionamento estivo non si registrano variazioni. Le modalità di funzionamento continuo ed invernale mostrano gradienti di temperatura paragonabili tra loro. Il dato più importante è quello relativo alla totale assenza di accumulo di calore in caso di funzionamento stagionale.

Un ultimo confronto viene effettuato tra casi in cui sono stati ipotizzati tre diversi andamenti di temperatura interna, per determinare l'effetto dell'attivazione dell'impianto in città con diverse condizioni climatiche. Sebbene la sola temperatura interna dell'aria non sia sufficiente a determinare tutte le condizioni che si avrebbero a diverse latitudini, questo confronto può rappresentare, in maniera semplificativa, gli effetti dell'attivazione di una galleria energetica in tre città sottoposte a climi differenti tra loro, passando da un clima più rigido, paragonabile a quello che si avrebbe a Stoccolma, ad uno più mite, paragonabile a quello di Palermo.



Figura 5.40 - Andamento delle temperature massime al variare delle condizioni climatiche, nel punto A in configurazione "Ground & Air".

Le tre condizioni climatiche simulate hanno una netta influenza sui risultati di temperatura in termini assoluti, ma non causano una sensibile variazione dei gradienti di temperatura che si hanno dopo l'attivazione della galleria (Tabella 5.6).

	Estate-∆T _A [°C]	Inverno-ΔT _A [°C]
Torino (-5°C)	1,02	-0,83
Torino	1,02	-0,83
Torino (+5°C)	1,01	-0,83

Tabella 5.6 - Gradienti massimi di temperatura al variare delle condizioni climatiche, nel punto A in configurazione "Ground & Air".

Analizzando quindi i risultati più significativi risulta che l'effetto dell'attivazione dell'impianto non porta a variazioni di temperatura dell'aria interna, tali da diminuire il confort degli utenti e che quindi non presenta delle criticità per quanto riguarda gli aspetti funzionali legati al confort dei passeggeri della metropolitana.

CAPITOLO 6 CONCLUSIONI

Il lavoro di tesi ha avuto come obiettivo l'analisi relativa alle influenze sulla temperatura dell'aria interna, derivanti dall'attivazione geotermica del prolungamento della Linea 1 della metropolitana di Torino.

Inizialmente, si è esposta una panoramica sui concetti di base della geotermia e sulle possibilità di sfruttamento di questa forma di energia. In particolare, si è posta l'attenzione sulle potenzialità delle gallerie superficiali in ambito urbano. La tecnologia presa in esame riguarda i conci ENERTUN, sviluppata dal Politecnico di Torino. Le principali innovazioni di tale sistema consistono nel massimizzare lo scambio di calore con il terreno attraverso l'ottimizzazione del percorso delle serpentine e la possibilità di variarne la posizione all'interno del rivestimento, per ottenere combinazioni diverse adatte a situazioni diverse.

Per le analisi si è fatto uso del codice di calcolo FEFLOW, di cui si sono riportate le caratteristiche generali ed il modello specifico usato per le simulazioni nel presente lavoro.

Il modello è stato realizzato ricostruendo le caratteristiche del sottosuolo di Torino e dell'infrastruttura di trasporto del capoluogo piemontese, facendo riferimento a precedenti studi effettuati sulle caratteristiche geologiche e geotecniche e ai dati forniti dall'ARPA Piemonte e dall'azienda GTT. Per la geometria del modello si è considerata una larghezza di 120 m ed una profondità di 77,85 m; la galleria è posizionata nel centro del modello, in direzione orizzontale ed il suo baricentro è stato posizionato ad una profondità di 21,5 m dalla superficie. Essendo il modello tridimensionale, si è considerato un tratto di galleria composto da 5 anelli, della profondità totale di 7 metri. Dopo una serie di analisi parametriche, che hanno consentito di ricreare le condizioni di temperatura interna misurate nella galleria e di flusso d'aria, si sono svolte una serie di simulazioni comprendenti diverse combinazioni di temperatura e configurazioni dei conci ENERTUN, volte ad esplorare le possibili conseguenze riscontrabili a seguito dell'attivazione termica della galleria energetica.

Le combinazioni analizzate hanno riguardato il funzionamento continuo dell'impianto, il funzionamento ciclico nei soli mesi estivi e nei soli mesi invernali e due andamenti di temperatura interna variati di ±5°C.

Ognuno dei casi appena elencati ha mostrato che la massima influenza si esercita sempre nel punto di osservazione posto vicino all'intradosso della galleria e nella configurazione dei conci ENERTUN "Ground & Air", ovvero la condizione in cui il fluido scorre contemporaneamente in due tubazioni parallele all'interno del calcestruzzo.

Nel caso di funzionamento continuo dell'impianto, si ottiene un incremento massimo di circa 1°C in estate ed una riduzione di circa 0,8°C in inverno, valori che si riducono notevolmente nei punti più lontani dall'intradosso. Altro importante risultato che si ottiene riguarda la tendenza del sistema a mantenere le stesse temperature, sia tra i vari anelli osservati che in tutti e 6 gli anni che simulano l'attivazione termica.

La simulazione di funzionamento stagionale ha, invece, come obiettivo quello di studiare l'effetto che può avere, nel sistema geotermico, l'immissione di solo fluido caldo o solo fluido freddo. È perciò importante analizzare se, a seguito dell'attivazione dell'impianto, il calore immesso o sottratto viene accumulato nel sistema. Per fare ciò si pone l'attenzione sull'andamento dei massimi valori registrati di anno in anno. Le simulazioni svolte mostrano che i picchi di temperatura si mantengono sempre costanti, sia nei cicli estivi che invernali, confermando quindi un'assenza di accumulo di calore. Altro dato che si può ottenere da questa analisi è che, nei mesi estivi non si registrano aumenti significativi di temperatura a seguito dell'attivazione termica, mente nei cicli invernali viene replicato in maniera il comportamento ottenuto negli stessi periodi del caso di funzionamento continuo.

Gli ultimi due casi analizzati hanno lo scopo, infine, di esplorare le possibili conseguenze che si avrebbero in caso di diversa temperatura interna. Per simulare quindi la realizzazione di un impianto in città site a diverse latitudini, con condizioni climatiche diverse, si è ipotizzato un andamento di temperatura interna traslato di ±5°C. Sia nell'ipotesi di temperatura maggiore che minore, i risultati sono molto vicini tra loro e molto simili a quelli ottenuti nella prima analisi svolta. Essi mostrano un gradiente massimo di circa 1°C nei mesi più caldi e di -0,8°C in quelli più freddi. Si può quindi affermare che modificando la differenza tra temperatura interna e temperatura del fluido immesso, l'aria interna non subisce significative variazioni.

Questo evidenzia come il sistema abbia una forte tendenza a mantenersi in equilibrio e che l'influenza dovuta all'attivazione termica della galleria ha un potenziale circoscritto sia in termini di gradiente di temperatura che di diffusione di calore all'interno dello spazio interno alla galleria. Confrontando infatti i valori ottenuti nelle vicinanze delle serpentine con quelli ottenuti nel baricentro della galleria, il gradiente estivo si riduce a 0,2°C e quello invernale a -0,18°C.

A seguito delle simulazioni effettuate è quindi possibile affermare che gli aspetti funzionali della metropolitana di Torino presi in considerazione non vengono inficiati dall'attivazione termica della galleria, non mostrando interazioni tali da creare un eventuale disagio in termini di temperatura interna per gli utenti del sistema di trasporto, sia nel breve che nel lungo termine. Ciò si conferma anche al variare della modalità di funzionamento, annuale o stagionale, e nelle ipotesi di installare un impianto anche in siti soggetti a condizioni climatiche diverse.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Adam, D. & Markiewicz, R., "Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers", *Geotechnique*, NO.3, PP.229-236, 2009
- Barla, G.; Antolini, F.; Barla, M.; Bonini, M.; Debernardi, D.; Perino, A. (2013). Consultancy contract (n. rep. 52 del 15.12.2011) "Analisi e Verifica delle Condizioni di Esercizio in Sicurezza del Palazzo Uffici Provinciali di Corso Inghilterra 7 tenuto conto del Centro Direzionale di Intesa Sanpaolo". *Technical report on pumping tests*. Politecnico di Torino.
- Barla, M.; Barla, G.: "Torino subsoil characterization by combining site investigations and numerical modelling", *Geomechanik und Tunnelbau 3* (Vol. 5), pp. 214-231, 2012.
- Barla M., Di Donna A., "Gallerie energetiche in ambito urbano", *Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica*, 2015.
- Barla, M.; Di Donna, A.; Perino, A.: "Application of energy tunnels to an urban environment", *Geothermics*, vol. 61, pp. 104-113, 2016.
- Barla M., Di Donna A, "Conci energetici per il rivestimento delle gallerie", Strade & Autostrade, 2016.
- Bottino, G., Civita, M.: Engineering geological features and mapping of subsurface in the metropolitan area of Turin, North Italy. *5th International IAEG Congress*, pp. 1741–1753. Buenos Aires, 1986.

- Brandl H., "Energy foundations and other thermo-active ground structures", *Géotechnique*, 229-236, 2006.
- Cassinis, R., "Enciclopedia della scienza- La Terra", Il Bilancio Termico, pp.449-450, 2005.
- Cassinis, R., "Enciclopedia della scienza- La Terra", Convenzione e campo magnetico nel nucleo, pp.467-468, 2005.
- Di Donna, A; Cecinato, F; Loveridge, F; Barla, M: "Energy performance of diaphragm walls used as heat exchangers", PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS *Geotechnical Engineering*, 2016 Issue GE0, pp. 1–14, 2016
- Dickson M. H., Fanelli M., "Che cos'è l'energia geotermica", *Istituto di Geoscienze e Georisorse*, CNR, Pisa, Italy, http://www.geothermal-energy.org, 2004.
- Finotto, A.: "La Linea 1 della Metropolitana Automatica di Torino", *PROGETTI*, Novembre/Dicembre 2010.
- Franzius, J., N., Pralle, N., "Turning segmental tunnels into sources of renewable energy" - PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS – Civil Engineering, pp. 35-40, 2011.

Hochstein, M.P., "Classification and assessment of geothermal resources." (1990).

- Kovačević M. S., Bačić M., Arapov I., "Possibilities of underground enineering for the use of shallow geothermal energy", University of Zagreb, 2012
- Lancellotta, R.; Criteri di dimensionamento e verifica dei diaframmi, in *Geotecnica*, 3ª edizione, Bologna, Zanichelli, p. 375, luglio 2004

- Lindal B., "Industrial and other applications of the geothermal energy", *Geothermal energy*, UNESCO, Paris, pp. 135-148, 1973.
- Mauri L., "Analisi termo-meccaniche di diaframmi energeticamente attivi", *Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica*, 2015.
- Muffler P., Cataldi R., "Methods for regional assessment of geothermal resourses", *Geothermics*, pp. 53-89, 1978.