POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Civile

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

Studio della potenzialità geotermica della linea 1 della metropolitana di Bogotá



Relatori

Prof. Marco Barla Ing. Matteo Baralis

Candidato

Juan Camilo Suarez Toscano

Ottobre 2019

Sommario

Nella attualità la continua crescita della popolazione comporta anche l'incremento della densità nelle grandi città, a cui viene anche associato l'aumento nella demanda energetica da supplire, dovuto ai servizi basici delle persone, tradotto questo in costi, più combustibili fossili da bruciare, dighe idroelettriche da costruire, ed in generale più risorsi ambientali da spendere. Tra queste necessità, ci sono quelle che associate al riscaldamento o raffreddamento degli edifici nei mesi invernali e stivi rispettivamente, dove ultimamente si rivolge la attenzione all'utilizzo di strutture speciali che siano in grado di approfittare lo scambio termico che può accadere nel sottosuolo, rendendo in questa maniera le fondazioni o addirittura i sistemi di trasporto sotterraneo una fonte importante di energia per climatizzazione.

Dall'idea precedente nascono le geostrutture termoattive, termino dove si possono compilare tanto le fondazioni degli edifici (pali, plinti) come le gallerie, queste ultime hanno l'avvantaggio di coinvolgere grandi volumi di terreno per lo scambio di calore. Tale procedimento ha bisogno di introdurre un sistema di tubi dentro il rivestimento in calcestruzzo prefabbricato. Questo documento, ha l'obbiettivo principale di studiare la potenzialità geotermica (attivazione dei conci) del tunnel della linea metropolitana 1 della città di *Bogotá, Colombia*.

Per analizzare la situazione, prima si stabiliscono un numero di sezioni trasversali rappresentative del tramo preso in considerazione, il qual ha una lunghezza di 4.1 km, poi si considerano le diverse condizioni idrogeologiche e geologiche specifiche del sito, considerando sempre diversi fonti di informazione fornite da istituzioni del governo. Tenendo conto l'informazione suddetta, si studia il problema tramite l'analisi agli elementi finiti, attraverso simulazione numerica mediante il software FEFLOW (Finite Element subsurface FLOW system).

I risultati mostrano che l'attivazione termica del tunnel potrebbe scambiare fino a 1833 kW annualmente per riscaldamento. In questa maniera, i risultati costituiscono una base per la valutazione preliminare del potenziale di sfruttamento dell'energia geotermica superficiale per la progettazione di ulteriori ampliamenti della linea della metropolitana di Bogotá.

Indice

Capitolo	I Introduzione	10
1.1.	Generalità	10
1.2.	Descrizione del problema	11
1.3.	Obiettivi della tesi	12
1.4.	Struttura generale della tesi	12
Capitolo	II La geotermia e le geostrutture energetiche	15
2.1.	Introduzione alla geotermia	15
2.2.	Le geostrutture energetiche	19
2.3.	Concetti termodinamici	23
2.4.	Gallerie Urbane	24
2.5.	Gallerie Energetiche ed ENERTUN	25
Capitolo	o III La linea 1 della metropolitana di Bogotá	35
3.1.	Metropolitana di Bogotá	36
3.2.	Area di studio	38
3.3.	Area Urbana	39
3.4.	Geomorfologia, geología e idrogeologia	40
3.5.	Definizione delle unità geotecniche e geotermiche	44
3.6.	Determinazione dei parametri idro-termici	52
3.7.	Determinazione della temperatura	54
3.8.	Determinazione del gradiente idraulico	57
Capitolo	IV Simulazione numerica della attivazione termica della galleria	62
4.1.	Descrizione generale del software FEFLOW	63
4.2.	Interfaccia e comandi FEFLOW	66
4.3.	Modellazione in FEFLOW	67
4.4.	Realizzazione dei modelli della metropolitana di Bogotá	72
CAPITO	DLO V Studio della attivazione termina della galleria	83
5.1.	Simulazione del sistema	84
CAPITO	DLO VI Conclusioni	93
Riferime	enti bibliografici	97
Allegati		
Allega	ato 1 Sondaggi geotecnici	
Allega	ato 2 Mappa idrogeologico	
Allega	ato 3 Profili di temperatura	104

Indice tabelle

Tabella 1. Classificazione delle risorse geotermiche in base alla temperatura (°C). R	if: (a)
Muffler and Cataldi (1978); (b) Hochstein (1990); (c) Benderitter and Cormy (1990); (d)
Nicholson; (e) Axellson and Gunnlaugsson (2000) (Dicksinon & Fanelli, 2004)	18
Tabella 2 Confronto scambio di calore tra due segmenti di concio energetico. (Barla	& Di
Donna, 2018)	30
Tabella 3 Informazione e caratteristiche delle unità geotermiche	51
Tabella 4. Conducibilità idraulica orizzontale per diversi tipi di suoli (Domenico & Sch	wartz,
1990)	52
Tabella 5. Coefficiente di immagazzinamento per diversi tipi di materiali (Domeni	ico &
Schwartz, 1990)	52
Tabella 6 Proprietà termiche per diversi materiali (Di Donna, 2014; Gao, Zhang, Liu,	Li, &
Yang, 2008; Pahud, 2002; Rees, Adjali, Zhou, Davies, & Thomas, n.d.)	53
Tabella 7. Parametri idrotermici e idro-dispersivi dell'acquifero	53
Tabella 8. Proprietà del calcestruzzo	54
Tabella 9. Proprietà delle tubazioni	54
Tabella 10. Temperatura media mensile a Bogotá (IDEAM)	54
Tabella 11. Temperatura media massima mensile di Bogotá (IDEAM)	55
Tabella 12 Temperatura minima media mensile di Bogotá (IDEAM)	56
Tabella 13 Calore scambiato per ogni sezione	88
Tabella 14 Potenza scambiata lungo il percorso della metropolitana di Bogota	90

Indice figure

Figura 1 Diagramma dell'utilizzazione dei fluidi geotermici (Lindal, 1973)	18
Figura 2 Classificazione della energia geotermica secondo la profondità operativa	19
Figura 3. Tubi di assorbimento inseriti in un palo a destra ed in un diaframma a sinistra.	20
Figura 4 Esempio di un sistema a pali per riscaldamento o raffreddamento di un ec	dificio
(Brandl, 2006).	21
Figura 5 Schema del sistema di stazione di energia geotermica in pali (Brandl, 2006)	22
Figura 6 Variazione normale della temperatura con la profondità (Abril Castilblanco, 2	2017).
Figura 7 Esempio di una TBM in città. (ixtract, 2014)	25
Figura 8 Schema concettuale di una galleria energetica con lo scopo di climatizzazione	edile.
(Barla & Di Donna, 2018)	26
Figura 9 Sinistra, dettagli delle installazioni dei tubi assorbenti in situ, caso Stu	uttgart
Fasanenhof, a destra tubi inseriti nel pavimento. (Pralle & Franzius, 2017)	
Figura 10 Dettagli dei anelli prefabbricati, caso Jenbach Tunnel (Pralle & Franzius, 2017	7)28
Figura 11 Schema rappresentativo della galleria con i circuiti energetici (Barla & Di Γ)onna.
2015)	28
Figura 12 Concio ENERTUN	29
Figura 13 Differenti configurazioni dei conci energetici ground-air ground at	nd air
rispettivamente (Barla & Di Donna, 2018).	31
Figura 14 Ubicazione della Colombia e di Bogotá al mondo (Google Mans. 2018)	35
Figura 15 Schema della sezione trasversale della galleria per la metropolitana di Bogotá (AMR
2010)	36
Figura 16 Tracciamento della linea 1 della metropolitana di Bogotá, stazioni definite (AMR
2010)	37
Figura 17 Area selezionata per l'analisi (AMB 2010)	38
Figura 18 A sinistra Chiesa di Nostra Signora di Lourdes, a destra Chiesa La Porciu	mcula
(Google Farth)	39
Figura 19 Centro commerciale Avenida Chile (Google Farth)	40
Figure 20 Avenida 13 con calle 28 una delle principali strade nel centro centro città (C	inn 10
Mans 2018)	40
Figura 21 Manna delle unità geologiche della zona d'interesse (INGEOMINAS 1997)	40 41
Figure 22 Mappa di consertura dei suoli della zona d'interesse (INGEOMINAS, 1997)	42
Figura 23 Sezione trasversale della zona presa in considerazione (Guerrero Alarcon 201	<i></i> 72 <i>A</i>) <i>AA</i>
Figura 24 Localizzazione dei sondaggi dentro l'area di analisi (Guerrero Alarcon, 2014)	т). тт 45
Figure 25 Localizzazione della sazioni di analisi	 Лб
Figure 26. Sections 1 (18 ± 400)	40
Figure 27 Sectore 2 (18+800).	/+/ /7
Figure 28 Sections 2 (10+000).	/ 1
Figure 20. Sectors $4 (20\pm 100)$	4ð 40
Figure 29. Sectore 4 (20 ± 100).	48
Figure 30. Sectore 5 (20 ± 800).	49
Figura 51. Sezione 6 $(21+/00)$	49

Figura 32 Sezioni delle Unità Geotermiche ad analizzare.	51
Figura 33. Andamento della temperatura media mensile di Bogotá	55
Figura 34. Andamento della temperatura media massima di Bogotá	56
Figura 35. Andamento della temperatura media minima di Bogotá	57
Figura 36. Sezione idrogeologiche trasversali della città di Bogotà (Alcaldia Mayor de Bog	gota,
2010)	58
Figura 37. Sezioni Trasversali della mappa idrogeologica. (Alcaldia Mayor de Bogota, 20	010)
	59
Figura 38 Perforazioni d'interesse e i loro dati	60
Figura 39 Esempio del dominio nel metodo FEM.	64
Figura 40. Schermata standard di FEFLOW	66
Figura 41. Creazione di un nuovo progetto	68
Figura 42. Schermata da Problem Settings	69
Figura 43. 3D layer configuration.	70
Figura 44. Panello Data	70
Figura 45. Condizioni al contorno	71
Figura 46. Caratterizzazione Discrete Features	71
Figura 47. Problem settings della modellazione.	73
Figura 48 Importazione files .dxf in FEFLOW	73
Figura 49. Dominio del Supermesh	74
Figura 50. Circonferenze come poligoni	75
Figura 51. Mesh generata tramite Triangle.	75
Figura 52 Selezione ed eliminazione degli elementi del mesh	76
Figura 53. (a) configurazione Ground e (b) Air. Caratteristiche e dettagli	76
Figura 54. 3D configurazione	77
Figura 55. Modello 3D	78
Figura 56 Punti di ingresso ed uscita del fluido termovettore	78
Figura 57 Tubazione dei conci energetici in FEFLOW	79
Figura 58 Punti di osservazione	79
Figura 59. Selezione degli elementi per la definizione dell'anello di calcestruzzo	80
Figura 60. Selezione degli elementi per la caratterizzazione dei vari strati	80
Figura 64 Temperatura di input del fluido termovettore a funzionamento continuo	84
Figura 65 Geometria e dimensione della sezione 1	84
Figura 66 Geometria e dimensione della sezione 2	85
Figura 67 Geometria e dimensione della sezione 3	85
Figura 68. Temperatura inlet ed outlet sezione 1	86
Figura 69 Temperatura inlet ed outlet sezione 2.	87
Figura 70. Temperatura inlet ed outlet sezione 3	87
Figura 71 Rappresentazione delle lunghezze aferenti per sezione	88
Figura 72 Grafico di disegno preliminare per estrazione di calore in W/m ² (Di Donna & Ba	arla,
2016)	90

Capitolo I Introduzione

1.1. Generalità

I cambiamenti climatici sono oggi un tema d'interesse a livello mondiale. Le nuove linee di pensiero ci inducono sempre a preservare le nostre risorsi naturali, soprattutto quanto riguarda alla riduzione delle emissioni di diossido di carbono. Essere in grado di sviluppare fonti energetiche a basso impatto ambientale è diventato un argomento di studio. La nuova tecnologia di geostrutture energetiche è un esempio di questo, al livello di essere stata implementata con successo in diversi paesi come Austria o Germania (Brandl, 2006). Purtroppo, ci sono stati studiati pochi casi in quanto riguarda alle gallerie come mezzi da applicazione di questa tecnologia, ciò è presumibilmente dovuto alla incertezza associata alle condizioni specifiche della zona che influiscono fortemente l'efficacia di questi sistemi (Barla & Di Donna, 2015).

Le gallerie energetiche sono particolarmente interessanti nelle città in crescita, in cui c'è un incremento tanto degli investimenti infrastrutturali quanto della popolazione. Insomma dato che le fonti di energia rinnovabile come il vento, le maree ed il solare sono caratterizzate dalla loro natura decentralizzata, cioè si devono produrre in zone specifiche, che non necessariamente coincidono con i posti dove si terrà il loro utilizzo, mentre il maggior bisogno energetico si trova nei centri urbani, addirittura si stima che il 35-40% dell'energia prodotta venga consumata da ambienti costruiti (Auer, 2010). In questa maniera, l'energia geotermica offre uno dei modi migliori per somministrare energia sostenibile localizzata direttamente nei ambienti urbani, in cui il terreno immediatamente sottostante di una città può essere utilizzato come deposito di energia di basso livello serbatoio (Pralle & Franzius, 2017).

In aspetti più tecnici, il funzionamento di questa tecnica consiste nell'attivazione termica del rivestimento principalmente in due modi: per i rivestimenti gettati in opera mediante tubi in polietilene reticolato ad alta densità fissati al geotessuto posto tra il rivestimento di prima fase e quello definitivo (Tinti et al., 2017), oppure nell'installazione dei tubi di assorbimento dentro le geostrutture , in cui c'è un fluido circolante che permette estrarre o iniettare calore da o verso il suolo tramite una pompa speciale (Pralle & Franzius, 2017). Le gallerie energetiche, inoltre alle fondazioni degli edifici, hanno il vantaggio di coinvolgere un volume di terreno ed una superficie di contatto della struttura più ampia per lo scambio di calore, incrementando così la efficienza della tecnologia, si può soddisfare meglio le esigenze di riscaldamento e raffreddamento degli edifici limitrofi.

1.2. Descrizione del problema

Bogotá, Capitale della Repubblica di Colombia localizzata a latitudine Nord 4 ° 35'56 " e longitudine ovest di Greenwich 74 ° 04'51 ", sull'estensione nord-ovest delle Ande, in vasta savana ad un'altitudine media di 2650 m.s.l.m., dove secondo l'ultimo censimento del DANE (Dipartimento amministrativo nazionale di statistica di Colombia) realizzato nel 2005 vivono circa 6,8 milioni di persone, con una proiezione di approssimativamente 9 milioni di abitanti per l'anno 2020 (Triana & Chaparro, 2018). In questa megacittà si realizzano 6,4 milioni di viaggi al giorno nei mezzi pubblici (Bogotá Cómovamos, 2016), che sono pressoché servizi offerti tramite autobus ed Transmilenio (sistema tipo BTR -Bus Rapid Transit), a cui si devono aggiungere altri 6,5 milioni di viaggi fatti attraverso l'utilizzo di altri mezzi, questa alta quantità di spostamenti, sommata ad una pianificazione poco chiara del territorio, è causa del fatto che Bogotá sia oggi una delle città col più alto tasso di traffico al mondo (Gómez, 2015).

Per tutto ciò suddetto, in alternativa al trasporto di massa e per completare alcune delle decisioni già implementate, la prefettura di Bogotá cerca di risolvere il problema del trasporto pubblico definendo quale sarà la prima linea della metropolitana, che per la seconda metà del 2013, era nella fase di progettazione di base (Gómez, 2015).

Ulteriormente lo sviluppo urbano di Bogotá è abbastanza grande, per l'anno 2017 il governo ha approvato un totale di 3.6 milioni di metri quadri di costrizioni (DANE, 2018) ; sommando

questo al progetto della metropolitana, è fattibile pensare, come l'applicazione sostenibile in termini ambientali tramite l'utilizzo di geosturrute per lo scambio termico sarebbe viabile (Havel, 2004).

1.3. Obiettivi della tesi

Studiare il possibile impatto su scala urbana delle gallerie energetiche a Bogotá, tramite la determinazione della quantità di energia calorica che si può scambiare nel percorso della metropolitana 1 in termini Megawatt-ora (MWh), questo seguendo la procedura stabilita da Barla & Di Donna (2018). Il potenziale geotermico è calcolato da modelli numerici a seconda dei parametri idrotermici determinati per un tramo di 4.1 km definito come area di studio, considerando anche le caratteristiche geologiche proprie della città. Per questo scopo si usa il software FEFLOW (Finite Element subsurface FLOW system).

1.4. Struttura generale della tesi

La tesi è divisa in 6 capitoli, il presente (1) è un'introduzione generale sui diversi temi sviluppati nella tesi e una presentazione di ciò che è stato fatto ai fini degli obiettivi.

Il Capitolo 2 è un capitolo bibliografico dove la definizione di concetti necessari all'intendimento sono state fatte.

Il Capitolo 3 riguarda come sono state definite le diverse sezioni d'analisi, cioè la loro creazione, spiegando anche da dove è stata presa l'informazione necessaria per lo sviluppo dello studio, in termini della stratigrafia del suolo, le proprietà dei materiali, le caratteristiche idrogeologiche della zona in questione.

Il Capitolo 4 presenta la simulazione numerica della galleria con i parametri ricavati dalla fase di investigazione, utilizzando il software FEFLOW.

Il Capitolo 5 riguarda ai risultati della modellazione numerica tramite FEFLOW, dove si presentano anche le analisi degli stessi.

Il Capitolo 6 sono le conclusioni sull'elaborato.

Finalmente si presentano le referenze bibliografiche, poi gli allegati con i banchi di dati consultati.

Capitolo I Introduzione

Capitolo II La geotermia e le geostrutture energetiche

2.1. Introduzione alla geotermia

Il Consiglio Europeo per l'Energia Geotermica (EGEC, acronimo in inglese) definisce l'energia geotermica come quella conservata in forma di calore al di sotto della superficie terrestre. Questa ha un potenziale praticamente inesauribile, addirittura comparabile a quello del sole, questo calore proviene dalla formazione originale del pianeta, dal decadimento radioattivo di minerali e dall'energia solare assorbita in superficie. Può essere utilizzata, oltre alla produzione di energia elettrica, per il teleriscaldamento, il riscaldamento e il raffreddamento degli edifici e tanti altri come la dissalazione, la coltivazione di piante in serra, l'essiccazione di colture, lo scioglimento della neve e diversi processi industriali. Nell'antichità è stato utilizzato per il bagno fin dai tempi del Paleolitico e per il riscaldamento degli ambienti sin dall'antichità romana.

Il fatto che la geotermia sia classificata come fonte di energia rinnovabile è attribuibile agli accordi internazionali e alla sua origine. Alcune stime dicono che circa il 50-70% dell'energia geotermica proviene dall'energia immagazzinata durante il periodo di formazione della Terra e circa il 30-50% restante dal decadimento naturale degli isotopi radioattivi, quindi quest'ultima quota è un prodotto di rinnovamento naturale (Auer, 2010).

Dal punto di vista delle risorse economiche, la geotermia è più simile a fonti di energia come il solare, l'idroelettrico, le maree e l'energia eolica. Dal punto di vista delle risorse naturali, il suo principale vantaggio è che sia possibile mantenere il potenziale energetico della risorsa su una base sostenibile. In questo senso, l'energia geotermica è migliore dai combustibili fossili, che hanno una caratteristica comune di esaurimento, c'è sempre la possibilità di svuotare le riserve

di petrolio, gas naturale e carbone. Il secondo grande vantaggio, oltre alla sua disponibilità virtualmente infinita, è che praticamente è carbon neutral. Purtroppo, ci sono ancora doveri ambientali legati alla produzione della tecnologia, dei materiali utilizzati e dei pozzi. Tuttavia, l'uso di energia geotermica non produce praticamente emissioni di CO₂ inquinanti ad oggi, pertanto, la sostituzione dei combustibili fossili con energia geotermica è uno strumento efficace per rallentare il processo di riscaldamento globale.

L'uso più intenso del potenziale geotermico nazionale consentirà di ridurre il grado di dipendenza dalle importazioni di energia. Le importazioni di energia, in particolare del gas naturale, si sono dimostrate molto meno attendibili negli ultimi anni rispetto a quanto promesso dai paesi fornitori. Oltre al minore grado di dipendenza fisica, l'energia geotermica consentirà anche un maggiore grado di serenità di fronte alla volatilità.

Ciononostante, l'energia geotermica ha anche diversi vantaggi rispetto ad altre fonti di energia rinnovabili, ad esempio, nel segmento dell'elettricità è più adatto a coprire i requisiti del carico di base rispetto all'energia eolica tradizionale o al fotovoltaico dipendente dal sole. Le persone che si oppongono alle centrali eoliche, alle centrali elettriche a bio-combustibile o ai sistemi fotovoltaici non hanno praticamente alcun motivo di offendersi con l'energia geotermica, in quanto è più o meno "invisibile", inudibile e inodoro. Come svantaggio c'è che questa è dipende da fattori di localizzazione, ma negli ultimi anni questo è stato notevolmente migliorato, e le ragioni non sono solo l'aumento strutturale del costo dei combustibili fossili concorrenti, ma anche i progressi tecnologici e le modifiche al quadro legislativo (Auer, 2010).

Il potenziale geotermico come fonte di energia è sottostimato. In passato, l'energia geotermica veniva utilizzata solo quando emergeva naturalmente sotto forma di sorgente termale. Non è stato un segreto dal momento che le prime miniere sono state scavate che la temperatura della Terra aumenta in modo evidente durante la discesa. Da poco che gli sviluppi tecnologici sono diventati abbastanza sofisticati per consentire il loro uso commerciale in molte parti del mondo che non presentano prerequisiti geologici semplici. Questi avanzi includono la moderna tecnologia di perforazione e gli sistemi di pompaggio e distribuzione più potenti, anche le soluzioni architettoniche ed ingegnerili contemporanee. Perforare il più lontano possibile nella crosta non è semplice, per cui approfittarsi delle fonti più potenti è ancora difficile. Ma di sfruttare le fonti vicine alla superficie, anche se hanno un potenziale minore, è molto più

fattibile. Da altra parte, il pianeta Terra ha un potenziale enorme come fonte di energia, dato che, il 99% di esso è più caldo di 1.000 gradi Celsius, mentre che del rimanente circa il 99% è ancora sopra i 100 ° C. Il flusso totale di calore dall'interno della Terra è incredibile, poiché irradia l'equivalente di circa due volte e mezza i bisogni energetici globali nell'atmosfera inutilizzati ogni giorno.

L'esito positivo della generazione di energia elettrica da calore geotermico è stato raggiunto all'inizio dello scorso secolo a Larderello, Italia. Da questo momento, la produzione di energia geotermica è aumentata costantemente, ma ancora solo una piccola parte del suo potenziale viene esplorata e utilizzata in Europa, persino sapendo che a differenza d'altre sorgenti rinnovabili dipendenti dal clima (eolica, mare, sole), la geotermia è disponibile sempre. Inoltre, i più recenti sviluppi tecnologici, rendono ora possibile produrla non solamente in aree con considerevoli riserve geotermiche. Per questi motivi, l'elettricità geotermica può essere la chiave per stabilizzare la rete e ridurre i costi complessivi dei futuri sistemi elettrici (Barla & Di Donna, 2015).

Nella classifica delle risorse geotermiche, non esiste ancora una terminologia standard adottata in campo internazionale, solamente si segue alcune delle definizioni e classificazioni più usate nel settore. Quando si parla genericamente di risorse geotermiche, di solito ci si riferisce a quelle 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 che potrebbe essere estratta entro un periodo di tempo definito (meno di 100 anni). Questa categoria comprende anche 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 da esplorazione geologica, geochimica e geofisica.

Il criterio più comune 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 proporzionale alla temperatura, è usata per esprimere il contenuto termico (energia) dei fluidi, e permette avere un'idea globale del loro "valore". Le risorse sono divise in risorse a bassa, media ed alta entalpia (o temperatura), secondo diversi criteri. La Tabella 1 riporta le classificazioni proposte da alcuni esperti (Dicksinon & Fanelli, 2004).

Tabella 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) (Dicksinon & Fanelli, 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	>220	>150	>190

Quando si parla di fluidi geotermici, si riferisce normalmente alla loro temperatura, o un intervallo di temperatura. I fluidi con temperatura inferiore a 20°C sono poco usati. Il diagramma di Lindal (vedere Figura 1), mette in evidenza due aspetti a considerare nell'utilizzazione delle risorse geotermiche: (a) diversi progetti dov'è possibile estendere lo sfruttamento delle risorse e (b) la temperatura dei fluidi con cui si potrebbe fare, la stessa che costituisce il principale fattore limitante per la possibile utilizzazione.



Figura 1 Diagramma dell'utilizzazione dei fluidi geotermici (Lindal, 1973).

I sistemi geotermici sono comunemente classificati, a seconda della profondità operativa, come applicazioni profonde o superficiali (vedere Figura 2). I sistemi geotermici superficiali (<400

m), trattano con bassa entalpia (quantità d'energia che un sistema intercambi col suo intorno) di conseguenza devono essere accoppiati con una pompa di calore, formando quelli che sono noti come sistemi di pompe di calore geotermiche. In tali applicazioni, il ruolo del terreno è "scambiatore di calore e supporto di memorizzazione", piuttosto che "fonte di calore" (Di Donna, 2014).



Figura 2 Classificazione della energia geotermica secondo la profondità operativa.

2.2. Le geostrutture energetiche

Le geostrutture energetiche sono una forma di sfruttamento dell'energia geotermica a bassa profondità. Le geostrutture sono elementi costruttivi delle diverse strutture che sono in contatto diretto con il terreno essendo in grado di trasmettere calore. Si possono considerare come geostrutture energetiche, ad esempio, i cosiddetti pali energetici, le solette di fondazione e i diaframmi. Queste sfruttano il terreno sottostante agli edifici. Il loro vantaggio principale, riguardo ai classici scambiatori geotermici, risiede nei minori costi di realizzazione dell'impianto, dal momento che vengono utilizzate opere già previste per scopi strutturali. Inoltre, si sfruttano le buone proprietà termiche del calcestruzzo quando vengono inseriti gli scambiatori dentro questo materiale, il cui è caratterizzato da una conducibilità termica maggiore di quella del terreno.

I pali di fondazione sono delle strutture che vengono normalmente utilizzate quando le fondazioni superficiali non sono in grado di fornire un risultato ottimo in quanto a sicurezza strutturale, a causa delle caratteristiche del problema geotecnico. I pali vengono equipaggiati dei tubi sottili, installati come anelli in forma di U (vedere figura 3). I tubi servono come scambiatori di calore e lavorano da assorbitori inseriti sottoterra. Il trasferimento di calore dal terreno confinante al fluido termovettore (o in senso contrario) capita attraverso dei tubi, l'acqua freatica ed il suolo circondante. Per tutta la lunghezza del palo, è d'importanza che i tubi siano distanziati omogeneamente tra di loro lungo la circonferenza per eludere interferenze.



Figura 3. Tubi di assorbimento inseriti in un palo a destra ed in un diaframma a sinistra.

I sistemi geotermici possono essere azionati tramite una pompa di calore, nel caso del riscaldamento degli edifici, oppure utilizzati per il riscaldamento o il raffreddamento diretto, dato che i sistemi di raffreddamento spesso non richiedono una pompa di calore intanto che operano come sistemi di raffreddamento diretto.

Un altro avvantaggio di cui si può approfittare questa tecnologia, consiste nel cambio di stagione tra estate ed invero purché presenta una particolarità d'interesse, il terreno può fungere da serbatoio di energia, conservando calore eccessivo dall'estate per essere utilizzato per riscaldamento durante l'inverno (Brandl, 2006).

Un sistema termoattivo consiste nel circuito primario sotto terra e nel circuito secondario nell'edificio. In Figura 4 si può vedere un esempio di come son collegati i pali col sistema riferito ad un edificio ed entrambi circuiti.



Figura 4 Esempio di un sistema a pali per riscaldamento o raffreddamento di un edificio (Brandl, 2006).

Il circuito primario contiene i tubi in elementi di calcestruzzo a contatto con la terra (pali, diaframmi pareti, colonne, solette) attraversi cui viene pompato un fluido termovettore che scambia energia dalla costruzione al terreno. Questo fluido viene definito come un mezzo termovettore che facilita lo scambio termico, questo può essere acqua, acqua con antigelo (glicole) o una soluzione salina (Brandl, 2006). Successivamente, le tubazioni all'interno degli elementi strutturali sono collegate individualmente ad un collettore, nelle fondazioni di energia, il collegamento viene normalmente fatto sotto la soletta di base.

Dall'altra parte, il circuito secondario si riferisce alla rete di riscaldamento o di raffreddamento che si inserisci dentro gli edifici e può essere incorporata nei pavimenti o pareti della struttura, anche si può aggiungere nei ponti, strutture stradali, piattaforme, ecc. La interazione tra il circuito primario e quello secondario avviene generalmente tramite una pompa di calore che aumenta il livello di temperatura, simile ad un frigorifero a ciclo invertito, dove si approfitta il principio che il liquido assorbe calore quando si evapora oppure lo libera quando si condensa, come si può vedere nella Figura 5.



Figura 5 Schema del sistema di stazione di energia geotermica in pali (Brandl, 2006).

Le geostrutture termoattive non sono altro che sistemi che riescono ad associare il ruolo strutturale con quello dello scambiatore di calore a terra, così la profondità operativa dipenderà dalla posizione e dimensione della struttura coinvolta. Inoltre, questa tecnologia richiede solo una temperatura sottosuolo che sia costante durante l'anno, e nonostante le fluttuazioni stagionali, questo è normalmente soddisfatto, ad esempio nell'Europa continentale la temperatura del suolo a profondità superiori a 5-15 m varia tipicamente tra 10 e 15 °C, ma rimane costante per tutto l'anno dopo questa profondità per circa 50 m, invece per le zone che si trovano nel tropico, come Colombia, questa temperatura è attorno ai 20-25 °C per le stesse profondità, ma si deve dire che può variare a seconda della quota in cui si trova la zona d'interesse (Abril Castilblanco, 2017), vedere Figura 6.



Figura 6 Variazione normale della temperatura con la profondità (Abril Castilblanco, 2017).

2.3. Concetti termodinamici

Il funzionamento di una geostruttura energetica si basa sui concetti di termodinamica. È governato dagli scambi di calore tra le diverse parti coinvolte. La forza trainante è la differenza di temperatura tra il terreno, il fluido circolante e l'edificio. Nell'uso primario delle geostrutture energetiche, ovvero il riscaldamento durante l'inverno (fluido più freddo rispetto al terreno), il calore viene trasmesso dal terreno, attraverso il materiale strutturale (Figura 4), al fluido circolante che lo porta alla pompa. Nella modalità di conservazione, il calore passa dalla pompa di calore al fluido di ricircolo e viene quindi trasmesso al terreno. Nei materiali porosi, come il suolo e il calcestruzzo, il calore viene trasmesso principalmente attraverso la conduzione, la convezione e il calore latente di evaporazione (Di Donna, 2014).

Secondo la legge di Fourier, il flusso di potenza termica [W / m2] generato dalla conduzione, $q_{cond, i}$, è:

$$q_{cond,i} = -\lambda^{th} \nabla T$$

Dove λ^{th} e la conduttività termica del mezzo, T la temperatura e ∇ il gradiente. Questa formula corrisponde alla trasferenza di calore tra le diverse molecole. Invece, considerando un mezzo saturo, il flusso di potenza generato per convezione:

$$q_{cond,i} = C_{pw} p_w v_{w,i} (T - T_0)$$

Dove C_{pw} e p_w sono la capacita e la densità specifica dell'acqua rispettivamente, $v_{w,i}$ la velocita relativa dell'acqua rispetto allo scheletro solido. Questa corrisponde al calore trasportato per il fluido, cioè e solo significativa in presenza di un flusso acqua, quindi viene presa in considerazione quando si parla di terreni sabbiosi o ghiaiosi, invece nel caso delle argille può essere trascurabile. Allora il parametro che controlla questo e la conduttività idraulica *k*, definita tramite la legge di Darcy come:

$$v_{w,i} = -\frac{k}{p_w g} \nabla (p_w + p_w gz)$$

Dove p_w e la pressione interstiziale dell'acqua, g la gravita e z la coordinata verticale. Se si riesce ad avere equilibrio, cioè che non abbia cambio di temperatura in nessun punto, e inoltre, solo si considera la conduzione, il bilancio energetico su volume V e superficie S:

$$\int_{S} -\lambda^{th} \nabla T \cdot n_{i} dS = \int_{V} div (-\lambda^{th} \nabla T) dV = 0 \qquad \Longrightarrow \qquad div (\lambda^{th} \nabla T) = \nabla^{2} T = 0$$

Dove è stato applicato il teorema di Gauss, n_i è il vettore normale alla superficie esterna, div l'operatore di divergenza e ∇^2 l'operatore di Laplace. Ciò significa che la quantità di calore che entra nel volume di riferimento deve essere uguale alla quantità di calore che esce. Tuttavia, anche se è comune per le condizioni di stato stazionario del progetto, la grande capacità termica dei suoli ritarda gli effetti delle variazioni esterne di temperatura, richiedendo un'analisi transitorio, in modo che il bilancio energetico diventi:

$$\int_{S} -\lambda^{th} \nabla T \cdot n_{i} dS + \int_{V} \rho \hat{c} \frac{\partial T}{\partial t} dV = 0 \quad \Longrightarrow \quad \lambda^{th} \nabla^{2} T = \rho \hat{c} \frac{\partial T}{\partial t} \quad \Longrightarrow \quad \nabla^{2} T = a^{th} \frac{\partial T}{\partial t}$$

Dov'è t e il tempo e ρ è la densità, \hat{c} la capacità termica specifica e ma la diffusività termica del materiale. Il nuovo termine di questa equazione rappresenta la quantità di energia immagazzinata nel materiale. La soluzione dell'equazione fornisce la temperatura in qualsiasi momento in qualsiasi punto del dominio considerato. Richiede metodi numerici o importanti semplificazioni per poter essere risolto.

2.4. Gallerie Urbane

L'origine dei tunnel è sconosciuta, gli archeologi credono che i primi tunnel siano stati costruiti dai babilonesi sotto il fiume Eufrate, tra l'anno 2180 e il 2016 a.C. attuale Iraq, usando la tecnica di scavo conosciuta oggi come Cut-and-Cover, altro esempio fa riferimento alla scoperta che gli egiziani hanno costruito tunnel cinquemila anni fa, per l'accesso alle tombe (Lombardi, 2007). Tutto ciò serve a dare un'idea che gli spazi sotterranei sono parte della vita dell'uomo dal principio della sua storia.

Per quanto riguarda le gallerie in ambiente urbano datano dal inizio del 1800, in questa epoca si usavano soltanto due metodologie, lo scavo di gallerie con supporti in legno, o l'avanzamento dello scavo a cappotto con muratura (Guerrero Alarcon, 2014). Nel corso del XIX secolo sono state introdotte altre tecnologie, come l'uso delle fasi pressurizzate e l'industrializzazione del processo di scavo, dando origine alle moderne TBM (Tunnel Boring Machine, vedere Figura 7) conosciute oggi.

Le conoscenze attualmente associate ai tunnel (approcci analitici), sono state sviluppate molto recentemente e trovano uso per lo studio delle gallerie poco profonde (quelle più comuni negli ambienti urbani), queste hanno consentito la comprensione dell'influenza del tunneling su un ammasso roccioso. Ora bene, la maturazione delle metodologie è stata ottenuta a causa dei progressi negli strumenti computazionali, permettendo trovare delle soluzioni numeriche a problemi complessi come scavo, controllo e record di turno (Lombardi, 2007).



Figura 7 Esempio di una TBM in città. (ixtract, 2014)

2.5. Gallerie Energetiche ed ENERTUN

Esistono alcuni casi di studio sul recupero di energia geotermica attraverso gallerie. Diversi esempi di questi sistemi sono già stati installati nei tunnel rivestiti con calcestruzzo spruzzato in Austria (Brandl, 2006). Attualmente numerose gallerie sono costruite tramite TBM, tecnica che permette lo scavo di gallerie in terreni deboli con minimo rischio di danni alle strutture superficiali, rivelandosi d'interesse per i casi delle metropolitane in ambienti urbani.

A differenza del calcestruzzo spruzzato, il rivestimento delle gallerie di solito consiste in segmenti o conci di cemento prefabbricati in forma d'anelli (vedere Figura 8) permettendo l'integrazione di un sistema scambiatore di calore in maniera ottimizzata, dato che si fa direttamente in fabbrica, avendo sempre cura di rispettare i requisiti in quanto l'integrità strutturale del rivestimento e che il collegamento di tubi tra adiacenti segmenti non interferisca con l'avanzamento della TBM (Pralle & Franzius, 2017).



Figura 8 Schema concettuale di una galleria energetica con lo scopo di climatizzazione edile. (Barla & Di Donna, 2018)

Nel caso dei tunnel energetici, il calore scambiato al livello della galleria può essere trasferito in superficie posizionando tubi nei sistemi di ventilazione, attraverso i portali, oppure nelle stazioni della metropolitana, permettendo così che la lunghezza dei tubi sia ottimizzata al fine di ridurre le perdite di calore e consentire che il sistema sia utilizzato per la distribuzione del calore a grande scala, sfruttando le numerose connessioni alla superficie esistente nelle gallerie della metropolitana (Barla & Di Donna, 2018). Questo tipo di tunnel si possono classificare in due tipi, a seconda dei fattori climatici, sia freddi o caldi.

 Gallerie fredde: Si caratterizzano per avere una temperatura dell'aria moderatamente bassa (circa 15 °C) per tutto l'anno, anche la frequenza dei treni che passano è moderato per non fare aumentare significativamente la temperatura nel tunnel. Normalmente sono di gran diametro interno (10-12m). In generale la temperatura di questi non ha un effetto importante sul terreno circondante. Dentro questa classifica possono entrare anche i tunnel stradali.

Gallerie calde: di solito mostrano all'interni alte temperature (d'estate circa 30°C). Qua si possono trovare i tunnel urbani (ferrovie sotterranee) che hanno un diametro interno tipico di 7 m. Hanno numerose stazioni e una frequenza dei treni elevata, con l'obbiettivo di apportare calore dovuto alla frenata e all'avviamento.

Esistono due metodologie per la realizzazione di gallerie energetiche:

 Metodi convenzionali come quello New Austrian Tunneling, dove i tubi assorbitori si uniscono ai geo sintetici non tessuti, collocato questo tra il rivestimento primario ed il secondario (vedere Figura 9). Questa è stata la prima tecnologia da implementare in tunnel energetici e rende l'installazione in situ facilmente realizzabile (Adam & Markiewicz, 2009).



Figura 9 Sinistra, dettagli delle installazioni dei tubi assorbenti in situ, caso Stuttgart Fasanenhof, a destra tubi inseriti nel pavimento. (Pralle & Franzius, 2017)

 Metodi meccanizzati: installazione tramite TBM del rivestimento prefabbricato, ottimizzando il processo per lo scambio di calore includendo circuiti idraulici nel calcestruzzo, vedere Figura 10. Il circuito di ogni segmento è collegato a quelli adiacenti mediante connessioni idraulici per formare circuiti ad anello nel rivestimento.



Figura 10 Dettagli dei anelli prefabbricati, caso Jenbach Tunnel (Pralle & Franzius, 2017)

Ogni circuito composto da due o più anelli viene quindi collegato al condotto principale che dirige il trasportatore di calore fluido verso pompa di calore e viceversa (vedere Figura 11). I tubi utilizzati a questo scopo sono fabbricati in polietilene reticolato e hanno tre strati: lo strato interno con polietilene ad alta densità, lo strato intermedio in materiale polimerico e lo strato esterno che è formato da una barriera in etilene vinile alcool, che evita la permeabilità all'ossigeno, in questa maniera, i tubi sono in grado di sopportare alte pressioni e temperature, resistere alla corrosione e garantire una lunga durata. Dall'altra parte, il termo-fluido è glicole propilenico miscelato con acqua, che può funzionare fino ad una temperatura di -20°C (Barla & Di Donna, 2018).



Figura 11 Schema rappresentativo della galleria con i circuiti energetici (Barla & Di Donna, 2015).

La variazione stagionale tra riscaldamento e raffreddamento è un aspetto decisivo poiché il sottosuolo, 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. Nel

progetto di una galleria energetica è fondamentale tenere conto gli aspetti legati al fluido termovettore ed alla disposizione dei tubi; dovuto che si vuole che la temperatura del fluido in entrata non sia troppo differente rispetto alla temperatura del terreno indisturbato, perché si inciderebbe in maniera significativa l'equilibrio termico del suolo oltre che l'efficienza della pompa di calore. L'efficienza diminuisce con l'aumentare della differenza di temperatura. Non si vogliono neanche differenze troppo basse, perché implicherebbero un impianto geotermico di dimensioni sovrabbondanti per soddisfare la richiesta.

I primi segmenti di questo tipo sono stati utilizzati in una sezione di 54 metri del Tunnel di Jenbach in Austria (Barla & Di Donna, 2015), questi sono prodotti e sviluppati da Rehau AG+Co Ed. Società Zublin AG (Zentrale Technik). Fornendo in questa maniera energia geotermica ad un edificio del consiglio locale dal 2012 ad oggi. Lo stesso sistema è stato testato attivando quattro anelli di una nuova linea ad alta velocità in un tunnel ferroviario della Germania, questo è stato fatto solo per una prova sul campo tra maggio e settembre 2009, ed è stata utilizzata una pompa di calore temporanea ed un sistema di monitoraggio. In questa maniera si può vedere come ad oggi non ci sono sviluppati casi concreti sull'utilizzo di questa tecnica.



Figura 12. Concio ENERTUN.

Più recentemente, al Politecnico di Torino è stato sviluppato un nuovo segmento energetico chiamato ENERTUN (Figura 12). Esso ha il chiaro avvantaggio di un posizionamento innovativo dei tubi, dato che sono orientati in maniera che la loro direzione principale sia

perpendicolare all'asse del tunnel, facendo possibile ridurre le perdite di carico e aumentare l'efficienza, specialmente quando il flusso di acque sotterranee è perpendicolare a l'asse del tunnel, questo si può osservare nei dati della Tabella 2. La diminuzione in termini di perdite di carico è tra il 20% e il 30% per ciascun anello del tunnel rispetto a segmenti precedentemente descritti. Inoltre, mantenendo le stesse proprietà del materiale, la geometria e le condizioni del terreno, l'aumento dello scambio termico è dell'ordine del 5% al 10% (Barla & Di Donna, 2018)

Tabella 2 Confronto scambio di calore tra due segmenti di concio energetico. (Barla & Di Donna, 2018)

Direzione principale dei tubi rispetto all'asse della galleria	Q[W]	q [W/m ²]	q [W/m]
Parallelo	1670.8	52.8	1193.4
Perpendicolare (Enertun)	1773.5	56.0	1266.8

Lo stesso concio può essere anche utilizzato per raffreddare internamente le gallerie. Inoltre, è di semplice fabbricazione, richiede poca manutenzione, è economico, affidabile e adattabile secondo la necessità. Con la sua attivazione, il concio ENERTUN consente:

- Riscaldamento invernale ed il condizionamento estivo degli edifici mediante un sistema energetico sostenibile e rinnovabile;
- Diminuzione delle perdite di carico dell'impianto complessivo;
- 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;
- 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;
- 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).

In base al posizionamento della rete di tubi si consentono tre diverse configurazioni del concio ENERTUN. Quando viene posizionata in prossimità dell'estradosso viene chiamata come *Ground*, invece dell'intradosso *Air*, oppure può comprendere due reti di tubi posizionati tanto all'estradosso ed all'intradosso detto *Ground & Air* (vedere Figura 13). 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.



Figura 13. Differenti configurazioni dei conci energetici, ground-air, ground and air rispettivamente (Barla & Di Donna, 2018).

L'introduzione di un sistema di scambio termico all'interno dei conci di rivestimento deve in ogni caso soddisfare alcuni requisiti:

- o Integrità strutturale del rivestimento non deve essere compromessa;
- o Impermeabilità del rivestimento deve essere mantenuta;
- Processo di inserimento del sistema di scambio termico deve essere integrato nel ciclo di produzione;
- Collegamento tra tubazioni di conci adiacenti non deve interferire con l'avanzamento della TBM e deve garantire i requisiti di durabilità.

Per l'estrazione di energia geotermica si deve evidenziare che alcune tipologie di terreni o rocce hanno proprietà più adatte che altre, soprattutto in quanto riguarda alla saturazione del mezzo dato che questa giochi un ruolo significativo nel fenomeno di trasferimento di energia, ad esempio, se si volessi generare 1 kW di calore in presenza di terreno saturo sarebbe necessaria una struttura sotterranea in calcestruzzo con un'area di scambio termico pari a circa 20 m², invece in presenza di una sabbia asciutta un'area di scambio termico pari a circa 50 m² (Brandl, 2006). Le condizioni ideali di falda e di permeabilità del terreno, dipendono dell'utilizzo finale dell'energia. Nel caso che si richieda l'energia per il solo riscaldamento o raffreddamento, le condizioni ideali sono rappresentate da un mezzo ad elevata permeabilità e con falda ad elevato gradiente idraulico, invece un sistema capace di svolgere entrambi, le attività di riscaldamento in inverno e di raffreddamento in estate, le condizioni ottimali sono 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 trasferimento di calore attraverso il suolo è un processo tanto complesso perché si compone di diversi fenomeni come la conduzione, la convezione, la vaporizzazione, la condensazione, lo scambio ionico, il congelamento e lo scongelamento. La maggior parte del trasferimento di calore capita per conduzione e in secondo luogo per convenzione. La radiazione agisce con effetti trascurabili. Invece il congelamento e lo scongelamento trasferiscono una quantità di calore significativa, ma questo ciclo causa danni alle strutture delle gallerie e perciò deve essere evitato.

Altri parametri che possono influenzare il trasferimento di calore sono la densità del mezzo e il coefficiente di porosità. Ma anche le proprietà termiche del mezzo e della falda sotterranea condizionano il processo di trasferimento di calore. In particolare, i parametri termici più significativi sono la conduttività termica λ e la capacità termica c. Essi possono essere definiti attraverso indagini preliminari sulla base del test di risposta termica (TST), durante il quale i parametri sono determinati in situ o mediante analisi di laboratorio. La conduttività termica λ [W/mK] definita come il rapporto, in condizioni stazionarie, fra il flusso di calore, o 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/kgK] è la quantità di energia richiesta per incrementare di 1 K la temperatura di 1 kg di materiale in condizioni di

pressione costante. In aggiunta della diffusività termica $a \, [m^2/s]$ e densità del mezzo $\rho \, [kg/m^3]$ conformano l'equazione fondamentale che descrive le proprietà termiche del mezzo e della falda:

$$\lambda = \mathbf{a} \cdot \mathbf{c} \cdot \boldsymbol{\rho}$$

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. È importante considerare anche le proprietà significative degli elementi sotterranei che partecipano 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, Bačić, & Arapov, 2012).

L'attivazione termica del rivestimento segmentale implica due ulteriori sforzi per i progettisti di tunnel. Prima, la quantità di calore sfruttabile dovrebbe essere misurata; secondo dovrebbero esserci effetti meccanici sull'elemento strutturale valutato per garantire un'influenza limitata a lungo termine comportamento della struttura (cioè la sua integrità). Questo richiede Analisi accoppiate termo-idrauliche (TH) e termo-meccaniche (TM). A completamente l'analisi accoppiata termo-idro-meccanica (THM) potrebbe essere adottato per studiare sia i problemi di efficienza che quelli di integrità; tuttavia, THM viene solitamente trascurato a causa del generale aumento della complessità e tempo di calcolo non è controbilanciato da un notevole miglioramento dei risultati per questo tipo di applicazione (Barla & Di Donna, 2015). Le analisi di TH sono eseguite utilizzando il software agli elementi finiti FEFLOW. Il problema del TH è governato dalla massa conservazione, equazioni di conservazione dell'energia e Darcy legge della velocità, scritta nel sistema di coordinate di Eulerian per un mezzo saturo di un solido e un liquido (acqua) fase.

Capitolo III La linea 1 della metropolitana di Bogotá

Bogotá, Capitale della Repubblica di Colombia localizzata a Latitudine Nord 4 ° 35'56 " e Longitudine ovest di Greenwich 74 ° 04'51 ", come si fa vedere nella Figura 14, sull'estensione nord-ovest delle Ande, nella vasta savana Cundi-Boyacese un'altitudine media di 2650 m.s.l.m., dove secondo l'ultimo censimento del DANE (Dipartimento amministrativo nazionale di statistica di Colombia) realizzato nel 2005 vivono circa 6,8 milioni di persone, ma con una proiezione di approssimativamente 9 milioni di abitanti per l'anno 2020 (Triana & Chaparro, 2018).



Figura 14 Ubicazione della Colombia e di Bogotá al mondo (Google Maps, 2018)

Ulteriormente lo sviluppo urbano di Bogotá è abbastanza grande, dato che per l'anno 2017 il governo ha approvato un totale di 3.6 milioni di metri quadri di costrizioni (DANE, 2018);

sommando questo al progetto della metropolitana è fattibile pensare, come una applicazione sostenibile in termini ambientali, l'utilizzo di geostutture per lo scambio termico (Havel, 2004).

3.1. Metropolitana di Bogotá

Per l'anno 2010, quando sono stati fatti gli studi preliminari di fattibilità della linea 1 della metropolitana di Bogotá, questi prevedevano una lunghezza di 24 chilometri per la prima linea, di cui 15 km in sotterraneo e gli atri in superficie, il progetto prevede inoltre trenta stazioni, in cui si dovrebbero mobilitare circa 600.000 passeggeri al giorno (Gómez, 2015). Il comune di Bogotá ha già definito il tracciato e la posizione delle stazioni, che sono presentate in Figura 16.

Per la fase costruttiva si è ipotizzato di adottare una metodologia di scavo di tipo meccanizzato (tramite TBM) a tunnel singolo, che presenta un diametro di 10 m per le due direzioni di flusso del treno. La geometria che si adotta è schematizzata nella Figura 15. La profondità di questo, varia secondo la sezione analizzata ma in media si trova circa ai 20 m misurati dalla calotta fino superficie.



Figura 15 Schema della sezione trasversale della galleria per la metropolitana di Bogotá (AMB, 2010).


Figura 16 Tracciamento della linea 1 della metropolitana di Bogotá, stazioni definite (AMB, 2010).

3.2. Area di studio

Per la definizione dell'area di analisi, si prendono in considerazione i due segmenti dell'intero progetto che sono stati pianificati come gallerie sotterranee, di conseguenza, è stata selezionata un'area di interesse considerando le seguenti condizioni: buona densità e qualità della informazione. tenendo conto questo, è stato scelto il tratto che si fa vedere in Figura 17.

Con questa area definita, si procede alla delimitazione regionale per l'acquisto di informazioni per la successiva digitalizzazione dell'informazione geotecnica e limiti del modello. Di conseguenza, sono stati presi sondaggi geotecnici dal Fondo di Prevenzione ed Attenzione delle Emergenze di Bogotá (FOPAE) e dal Servizio Geologico Colombiano (SGC). Questi sono stati rivisti in base alla loro posizione e in base al suo contenuto, cancellando i sondaggi con informazioni scarsa.



Figura 17 Area selezionata per l'analisi. (AMB, 2010)

3.3. Area Urbana

Il progetto della metropolitana a Bogotà, nella regione di studio (da discutere in prima linea) passa attraverso il centro storico e commerciale della città di Bogotà. Gli edifici nella suddetta regione sono di diverse tipologie: costruzioni di valore storico e patrimoniale, centri commerciali, centri di negozi e luoghi di convergenza urbana, con uso commerciale e, in minore proporzione, residenziale di piccole e medie dimensioni.

La zona studiata presenta chiese di importanza per la società bogotana come quella di Nostra Signora di Lourdes e La Porciúncula rispettivamente nella Figura 18.



Figura 18. A sinistra Chiesa di Nostra Signora di Lourdes, a destra Chiesa La Porciuncula (Google Earth).

Allo stesso modo centri commerciali come Avenida Chile, mostrato nella Figura 19 costituisce un edificio di grande importanza per il suo valore e per il fatto che è un centro di aggregazione di persone. È comune nell'ambiente urbano nella regione di studio mescolare tutti i tipi di questi tipi di edifici creando ambienti come mostrato nella Figura 19 e 20, è tipico oltre al traffico elevato di pedoni e veicoli.



Figura 19. Centro commerciale Avenida Chile (Google Earth)



Figura 20 Avenida 13 con calle 28, una delle principali strade nel centro centro città (Google Maps, 2018).

3.4. Geomorfologia, geología e idrogeologia

Dal punto di vista geomorfologico, la regione dove si trova la citta di Bogotá è divisa in due grande aree: la prima è sostanzialmente piatta, ed è dove si concentra la maggior parte della popolazione; la seconda è la zona montagnosa, che è usata anche per scopo residenziale (in maniera più ridotta), per la miniera dedicata allo scavo a cielo aperto ed anche per riserva naturale, questa zona è situata nell'est della città.

Su l'idrografia della città si può dire che, la regione pianeggiante è bagnata dal fiume Bogotá (bacino più importante della zona) che corre in direzione NE-SW con i suoi affluenti i fiumi Tunjueito, Fucha e Juan Jaramillo. Invece, la regione montuosa è drenata dal fiume Tunjuelito, di portata minore a quello di Bogotá, e trascorre nella direzione E-W come i canali di drenaggio che dopo entrano nella regione piatta, cercando il fiume Bogotá.

Geologicamente parlando, la città si trova al di sopra di un deposito sedimentario che fa parte della savana di Bogotá, è circondata da colline che sono formate da rocce di diverse tipologie, come l'arenaria, argillite o conglomerati. nella Figura 21 si presentano le unità geologiche associate all'area di influenza (e dintorni) del tunnel collegato alla metropolitana di Bogotá.



Figura 21 Mappa delle unità geologiche della zona d'interesse (INGEOMINAS, 1997).

Negli affioramenti rocciosi appaiono rocce sedimentarie di origine marina e continentale, all'interno dal più vecchio al più giovane, sono i seguenti: Chipaque (Ksch), Arenaria dura Guadalupa (arenaria dura, Ksgd), Guadalupa Planaers (Ksgp), Guadalupa Labor-Tierna (Ksdlt), Guaduas (KTg), Cacho (Tpc) e Bogotá (Tbb).

I depositi in pendenza (Qdp) sono un prodotto della fratturazione, degli agenti atmosferici e dell'erosione di rocce pre-esistenti, che sono state trasportate per gravità e depositate nelle

pendenze medie e inferiori. I suoi migliori affioramenti appaiono alla base della catena montuosa est, sud-est e sud-ovest. Ci sono, all'interno dell'area, due tipi di depositi in pendenza, colluvie, dove una matrice sottile predomina sulla materia spessa, e talus, dove il di spessore. Il complesso di coni o fan (Qcc) raggruppa la gamma del fiume Tunjuelo, la gamma di terra, e i coni ai piedi della Sierra orientale di Bogotà, come quelli di San Cristóbal e Claret, tra gli altri.



Figura 22 Mappa di copertura dei suoli della zona d'interesse. (INGEOMINAS, 1997)

La composizione, la consistenza, lo spessore e l'età sono variabili e diversi per ogni deposito, in base alle loro fonti, alla distanza e al tipo di trasporto. In generale, le unità sono composte da banchi di roccie all'interno di una matrice sabbiosa-argillosa nelle regioni apicali e nella distale ci sono prevalentemente materiali sabbiosi e limo-argillosi.

I depositi fluivo-lacustri (alta terrazza, Qta), chiamato anche formazione di Sabana, sono composte da argille soffici e plastiche con lenti sabbia e intercalazioni di sabbia cenere vulcanica. In alcuni settori, diversi livelli di torba con un massimo di 1 m di spessore. Questa unità costituisce il deposito più importante della savana, essendo la sua origine principalmente

lacustre. I depositi fluivo-lacustri (Bassa terrazza, Qtb), denominati anche Formation Chía, corrispondono ai depositi originati dai fiumi Bogotá, Tujuelo, Juan Jaramillo e Fucha. Presenta forme piatte e leggermente ondulate di rilievo, che circa 5 m sopra le pianure alluvionali. La sua composizione, è principalmente, limo agillosa e l'ambiente di deposizione è considerato principalmente alluvionale.

La pianura alluvionale (Qlla) e la precedente formazione Chía Formation, è composta dai depositi più giovani dei fiumi Bogotá, Tunjuelo e alcuni dei suoi affluenti, e consiste di argille e limi, con uno spessore medio di 5 m. Sono materiali di un ambiente alluvionale e, localmente, lacustre. Nella mappa di copertura di Figura 22, si può osservare che all'interno dell'area di studio ci sono cinque unità di copertura: Lago A, Alluvionale, B Colline, Pendio e Depositi di base B. Segue una breve descrizione (FOPAE, 2010).

Il Lacustre A presenta una forma piatta in rilievo e i materiali che compongono questa unità sono argille o limi che sono molto morbidi e quindi molto comprimibili, con uno spessore di 20 a 500 m (FOPAE, 2010). L'alluvionale presenta una forma piatta in rilievo, costituita da materiali spessi o medi, principalmente, sabbie, che si presentano dallo stato libero a quello denso.

Il Cerro B è composto da argillite mite suscettibile agli agenti atmosferici e all'inclinazione da moderato ad alto I depositi in pendenza sono composti da massi e / o sabbie compatte con contenuto di argilla. La base di pendenza B è costituita da materiali colluviali e alluvionali associati ai fan della base del pendio, composto da massi e / o sabbie compatte con contenuto di argille.

La regione, associata al primo stadio della prima linea della metropolitana, si trova nella banda di transizione tra i materiali superficiali associati alla base del pendio e i sedimenti descritti in precedenza. La Figura 23 presenta uno schema del profilo associato a questa regione, dove la zona di transizione corrisponde alle regioni contrassegnate come IV e IIIB, in cui è prevista maggiore variabilità verticale rispetto all'orizzontale. In queste regioni è comune da trovare intercalazioni di materiali la cui granulometria varia da argilla a sabbia o ghiaia, prodotto di diversi tipi di processi di trasporto e di deposizione, sopra descritti, dove alcuni hanno più energia di altri.



Figura 23 Sezione trasversale della zona presa in considerazione (Guerrero Alarcon, 2014).

3.5. Definizione delle unità geotecniche e geotermiche

Per la definizione del modello geometrico si è riferito alle informazioni presenti nel sito web del Servizio Geologico Colombiano SGC, conosciuto più diffusamente tramite la sua vecchia denominazione Istituto Colombiano di Geologia e Mine, INGEOMINAS. Le data base riporta i sondaggi che permetterebbero la rappresentazione dell'intera città, ma sono stati presi in considerazione soltanto quelli che presenti nella zona d'interesse, come si può osservare in Figura 24, eppure tenendo conto l'informazione scritta sulla geologia attesa, si è iniziato l'analisi, per definire delle zone omogenee, in base a questo si son presi proprio i sondaggi che meglio discredessero la stratigrafia (Allegato 1).

Per la creazione di ogni unità geotecnica si è cercato tra tutti i sondaggini presenti, quelli che forniscano informazione simile tra loro, in termini di tipi di suoli, secondo *l'Unified Soil Classification System USCS*, e gli spessori dei materiali, creando così virtualmente delle zone omogenee, finalmente per la definizione del profilo stesso, semplicemente si prende in considerazione il sondaggio che si trova più vicino al tracciato della metropolitana.



Figura 24 Localizzazione dei sondaggi dentro l'area di analisi (Guerrero Alarcon, 2014).

Nella mappa precedente si vede la quantità di sondaggi presenti nella zona di studio, e nella Figura 25, invece, si osserva la localizzazione delle sezioni omogenee che si creano per l'analisi geotecnico del progetto.



Figura 25. Localizzazione delle sezioni di analisi.

Ricordando che la sezione trasversale del tunnel sono 10 metri, e che la falda e stata definina ad una cota di 2550 m.slm per tuta la citta, si è potuto definire i profili di disegno o unita geotecniche, che si presentano dalla Figura 26 alla Figura 31 .



Figura 26. Sezione 1 (18+400).



Figura 27. Sezione 2 (18+800).



Figura 28. Sezione 3 (19+200)



Figura 29. Sezione 4 (20+100).



Figura 30. Sezione 5 (20+800).



Figura 31. Sezione 6 (21+700).

Per semplificare il problema e la futura modellazione, si deve analizzare se in realta conviene fare lo studio delle 6 unita geotecniche definite, per cui prima si preassume se il comportamento in termini termici potrebbe assomigliarsi tra le sezioni create, per questo si va a vedere e confrontare le unita geotecniche in quanto a posizione della falda e tipi di suoli che costituiscono la statigrafia, facendo enfasi soprattutto in quel materiale che circonda lo scavo della galleria.

In questa maniera si ha:

- Il profilo stratigrafico della sezione 2 ha come quota 2585m.slm mentre la falda si trova a 2550 m.slm, quindi è al di sotto dello scavo della galleria, per cui, come si ha detto prima, in assenza d'acqua, il flusso di calore dentro del terreno e per tanto lo scambio dello stesso, sarebbe minimo, per cui si ha deciso di trascurare questa sezione.
- Il profilo della sezione 3 presenta un problema simile a quello della sezione 2, perche la falda si trova prorpio al bordo della parte inferiore della galleria, ragione per la quale non si prende in considerazione questa neanche.
- Le sezione 4 e 6 presentano la galleria circondata di argilla e la falda posizionata relativamente allo stesso modo rispetto allo scavo del tunnel, per cui non si analisa la sezione 6.
- Rimangono le sezione 1,4 e 5 nel analisi.

A continuazione si presentano nella Figura 32 le unità geotermiche che si utilizzerano nell'analisi della città di Bogota.



Figura 32 Sezioni delle Unità Geotermiche ad analizzare.

Da questo se simplifica l'analisi a 3 profili di disegno corrispondenti alle unità geotermiche, nella Tabella 3 si mette in evidenza informazione corrispondente ad ogni sezione scelte, dove si puo osservare il nome del sondaggio caratteristico e una descrizione degli spessori e dei materiali che formano ogni profilo stratigrafico.

	Sezione 1			Sezione 4		Sezione 5				
Accisa	18+40	00	Accisa	20+1	00	Accisa	20+800			
Sondaggio	IG86		Sondaggio	IGC45		Sondaggio	IGC84			
Quota [m.s.l.m.]	2570.6		Quota [m.s.l.m.]	2575.8		Quota [m.s.l.m.]	2569.	9		
C Tunnel [m.s.l.m.]	2544.3		C Tunnel [m.s.l.m.]	2548	.0	C Tunnel [m.s.l.m.]	el 2543.5			
Spessore [m]	Profondità [m]	USCS	Spessore [m]	Profondità [m]	USCS	Spessore [m]	Profondità [m]	USCS		
4,8	4,8	MH	19	19	MH	7,1	7,1	CL		
9,5	14,3	ML	12,6	31,6	СН	10,3	17,4	ML		
7,6	21,9	СН				10,5	27,9	CH		

Tabella 3 Informazione e caratteristiche delle unità geotermiche.

3.6. Determinazione dei parametri idro-termici.

Una fase molto importante per la costruzione del modello consiste nell'assegnare dei parametri termici ed idraulici al software. A tal fine si è fatto riferimento a diverse risorse di informazione, per cui si è cercata dentro della base di dati di INGEOMINAS, ma inoltre si è fatto anche revisione bibliografica in letteratura referente.

Di seguito si elencano diverse tabelle prese dalla letteratura con valori o range di valori per le variabili a considerare.

Materiale	K (m/s)
Ghiaia	3×10-4 to 3×10-2
Sabbia grossolana	9×10-7 to 6×10-3
Sabbia media	9×10-7 to 5×10-4
Sabbia fina	2×10-7 to 2×10-4
Limo	1×10-9 to 2×10-5
Argilla	1×10-11 to 4.7×10-9

Tabella 4. Conducibilità idraulica orizzontale per diversi tipi di suoli (Domenico & Schwartz, 1990).

Tabella 5. Coefficiente di immagazzinamento per diversi tipi di materiali (Domenico & Schwartz, 1990).

Materiale	Ss (ft ⁻¹)
Argilla Plastica	7.8×10-4 to 6.2×10-3
Argilla rigida	3.9×10-4 to 7.8×10-4
Argilla media	2.8×10-4 to 3.9×10-4
Sabbia sciolta	1.5×10-4 to 3.1×10-4
Sabbia densa	3.9×10-5 to 6.2×10-5
Ghiaia sabbiosa densa	1.5×10-5 to 3.1×10-5
Roccia fissurata	1×10-6 to 2.1×10-5
Roccia	< 1×10-6

Materiale	Conduttività idraulica k	Conduttivit	tà termica λ mK]	Calore volumetrico specifico ρ ĉ [MJ/m ³ K]				
	[m/s]	secco	saturato	secco	saturato			
argilla	10-8-10-10	0.2-0.3	1.1 – 1.6	0.3 - 0.6	2.1 - 3.2			
limo	10 ⁻⁵ -10 ⁻⁸	0.2-0.3 1.2 - 2.5		0.6 - 1.0	2.1 - 2.4			
Materiale	Conduttività idraulica k	Conduttivit	à termica λ	Calore volumetrico specifico $ ho$ \hat{c}				
sabbia	10-3-10-4	0.3-0.4	1.7 - 3.2	1.0 - 1.3	2.2 - 2.4			
ghiaia	10-1-10-3	0.3-0.4 1.8 - 3.3		1.2 - 1.6	2.2 - 2.4			
calcestruzzo	10 ⁻⁹ -10 ⁻¹²	0.9 -	- 2.0	1.8 - 2.0				
acciaio		14 -	- 60	3.12				
acqua		0.	57	4.186				
aria		0.0)25	0.0012				

Tabella 6 Proprietà termiche per diversi materiali (Di Donna, 2014; Gao, Zhang, Liu, Li, & Yang, 2008; Pahud, 2002; Rees, Adjali, Zhou, Davies, & Thomas, n.d.)

Tenendo conto delle informazioni sopra elencate si procede a compilare i dati necessari per la modellazione del problema, in Tabella 7 si possono vedere tutti i dati dei parametri idrotermici dell'acquifero secondo il tipo di suolo presente.

Generale	Tipo di suolo			
Proprietà		Unità	Argilla	Limo
Conducibilità	K	m/s	10-7	10-4
Coefficiente immagazzinamento	Sy	m ⁻¹	10 ⁻³	10-3
Porosità	n	-	0.33	0.38
Conducibilità termica acqua	λ_{f}	W/m/V	0.65	0.65
Conducibilità termica solido	$\lambda_{\rm s}$	W/III/K	1.4	2.0
Capacità termica acqua	$p_w c_w$	$MI/m^3/W$	4.2	4.2
Capacità termica solido	p _s c _s	WIJ/III*/K	2.7	2.4
Dispersività Trasversale	α_t	m	0.31	0.31
Dispersività Longitudinale	αı	m	3.1	3.1

Tabella 7. Parametri idrotermici e idro-dispersivi dell'acquifero.

Si ha bisogno anche di definire le proprietà del calcestruzzo e delle tubazioni, queste sono già determinati, all'essere prefabbricato, il concio della galleria viene con delle proprietà già prestabilite, nella Tabella 8 e 9 si elencano i parametri referenti.

Tabella 8. Proprietà del calcestruzzo.											
Generale	Materiale										
Proprietà		Unità	Concio della galleria								
Conducibilità	Κ	m/s	10-16								
Coefficiente immagazzinamento	$\mathbf{S}_{\mathbf{y}}$	m^{-1}	10-4								
Porosità	n	-	0								
Conducibilità termica solido	$\lambda_{\rm s}$	W/m/K	2.3								
Capacità termica solido	$p_s c_s$	MJ/m ³ /K	2.19								
Dispersività Trasversale	α_t	m	0.5								
Dispersività Longitudinale	α_l	m	5								

Generale	Materiale										
Proprietà		Unità	Circuito dei tubi								
Diametro esterno	dext	mm	25								
Spessore della parete	t	mm	2.3								
Velocità del fluido termico	V_h	m/s	0.7								
Coefficiente immagazzinamento	Sy	m ⁻¹	10-4								
Conducibilità termica solido	$\lambda_{\rm s}$	W/m/K	0.65								
Capacità termica solido	p _s c _s	MJ/m ³ /K	4.2								
Dispersività Longitudinale	α_{l}	m	5								

Taballa 0 Proprietà delle tubazioni

3.7. Determinazione della temperatura.

Per stabilire la temperatura con cui si lavorerebbe, si son presi dati dell'Istituto di Idrologia, Meteorologia e Studi Ambientali, IDEAM acronimo in spagnolo, entità del governo Colombiano che ha come funzione produrre tutta l'informazione scientifica nell'ambito ambientale, nelle Tabelle successive ci sono dati della temperatura media mensile di Bogotá fatti in base a informazione di circa 30 anni di registro.

		TEMPERATURA MEDIA (°C)											
Nome	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Annuale
Apto El Dorado	14,1	14,5	14,7	14,9	14,9	14,7	14,3	14,4	14,3	14,3	14,4	14,2	14,5
C.Univ.Agrop-Udca	14,6	14,7	14,8	14,8	14,9	14,8	14,6	14,6	14,5	14,6	14,6	14,7	14,7
Eldorado Didactica	14,4	14,9	15,0	15,3	15,3	15,2	14,7	14,7	14,7	14,6	14,7	14,5	14,8
Esc Col Ingenieria	14,6	15,3	15,2	15,3	15,2	14,8	14,3	14,4	14,6	14,9	15,0	14,6	14,8
Jardin Botanico	15,8	15,9	15,9	16,0	16,1	16,0	15,7	15,8	15,8	15,7	15,8	15,8	15,8
Univ Nacional	15,4	15,6	15,8	16,0	16,1	15,8	15,2	15,3	15,4	15,6	15,7	15,7	15,6
Vegas Las Hda	13,9	14,3	14,5	14,7	14,8	14,6	14,3	14,3	14,3	14,5	14,4	14,2	14,4

Tabella 10. Temperatura media mensile a Bogotá (IDEAM).



Dalla Tabella 10 si ricava l'andamento della temperatura media mensile (vedere Figura 33).

Figura 33. Andamento della temperatura media mensile di Bogotá

Si stabilisce come temperatura media secondo l'andamento presentato come:

Tmed :	= 15°C

Tubena TT. Temperatara media massima mensire di Dogota (iDE/iti)	Tabella 11. Temperatura	media massima	mensile di	Bogotá	(IDEAM).
--	-------------------------	---------------	------------	--------	----------

			Т	EMI	PER	A T U	R A	MÁ	XIM	A M	EDI	A (°C	C)	
Nome	Eno	Fab	Mor	Ahr	Mov	Jun	Int	Ago	Son	Oct	Nov	Dia	Media	Max
	Luc	reb	Ivial	AUI	Iviay	Juli	Jui	Ago	Sep	000	INOV	Die	Annue	Annue
Apto El Dorado	19,9	20,0	19,8	19,5	19,3	18,8	18,4	18,7	19,1	19,2	19,3	19,7	19,3	20,0
C.Univ.Agrop-Udca	20,2	20,4	20,1	19,5	19,3	18,9	18,7	18,9	19,1	19,3	19,4	19,9	19,5	20,4
Eldorado Didactica	20,0	20,2	20,1	19,9	19,6	18,8	18,3	18,8	19,3	19,3	19,4	19,9	19,5	20,2
Esc Col Ingenieria	20,9	20,9	20,6	20,1	19,7	18,9	18,5	18,7	19,4	19,8	20,0	20,4	19,8	20,9
Jardin Botanico	21,0	21,0	20,7	20,4	20,4	20,1	19,9	20,0	20,3	20,3	20,3	20,7	20,4	21,0
Univ Nacional	19,9	20,1	19,9	19,6	19,3	18,8	18,0	18,2	19,2	19,5	19,6	19,7	19,3	20,1
Vegas Las Hda	20,0	20,2	20,0	19,8	19,7	19,4	19,1	19,2	19,6	19,7	19,5	19,9	19,7	20,2

Dalla Tabella 11 si ricava l'andamento della temperatura media mensile (vedere Figura 34).



Figura 34. Andamento della temperatura media massima di Bogotá

Si stabilisce come temperatura massima media secondo l'andamento presentato come:

	Tmed	=	19°C
--	------	---	------

			T	E M F	P E R 4	A T U	R A	ΜI	NIN	A I	MED) I A ((°C)	
Nome	Eno	Eab	Mor	Abr	Mou	Ium	1.1	Ago	San	Oat	Nov	Dia	Media	Min.
	Ene	гео	Iviai	AUI	way	Juli	Jui	Ago	Sep	001	INOV	Die	Anual	Anual
Apto El Dorado	4,5	5,6	6,4	7,6	7,6	7,1	6,6	6,4	5,9	6,6	6,7	5,4	6,4	4,5
C.Univ.Agrop-Udca	4,3	4,9	5,5	6,5	6,7	6,3	6,0	5,7	5,3	5,7	5,9	5,2	5,7	4,3
Eldorado Didactica	3,8	5,4	5,6	7,0	7,2	6,6	6,1	5,8	5,3	5,8	6,0	4,7	5,8	3,8
Esc Col Ingenieria	5,0	6,0	6,6	7,6	7,8	7,2	6,8	6,6	6,1	6,7	6,8	5,6	6,6	5,0
Jardin Botanico	6,0	6,4	7,2	8,0	8,1	7,6	7,0	7,2	6,7	7,1	7,2	6,5	7,1	6,0
Univ Nacional	6,3	7,2	8,1	8,8	8,8	8,6	7,9	7,7	7,3	7,3	7,4	7,2	7,7	6,3
Vegas Las Hda	4,6	5,7	6,6	7,5	7,8	7,3	6,7	6,5	5,8	6,5	6,7	5,7	6,4	4,6

Tabella 12 Temperatura minima media mensile di Bogotá (IDEAM).

Dalla Tabella 12 si ricava l'andamento della temperatura minima media mensile (Figura 35).



Figura 35. Andamento della temperatura media minima di Bogotá.

Si stabilisce come temperatura minima media secondo l'andamento presentato come:

Tmed =
$$6,5^{\circ}C$$

Tenendo conto l'informazione fornita nel capitolo 2 sulla efficacia del sistema, si decide di non modellare la condizione di RAFFREDAMENTO, dato che la temperatura massima media mensile di Bogotá (19°C) non differisce in maniera significativa di quella temperatura media mensile (15°C).

3.8. Determinazione del gradiente idraulico.

Nella determinazione del gradiente idraulico, si definiscono prima la direzione di flusso dell'acquifero sotterraneo, e poi i valori di velocità di flusso e di altezza piezometrica da inserire nel software.

La informazione che si impiega nella definizione di sti parametri è stata ricavata direttamente dal sito web della prefettura di Bogotá, dove si prende in considerazione la mappa idrogeologica

della intera città (Vedere Allegato 2). In questa si può analizzare sia la direzione di flusso delle acque sotterranee, sia la portata dell'acquifero. A continuazione si presenta la cartina delle diverse sezioni trasversali che sono presente nella mappa Idrogeologica della città, vedere Figura 36.



Figura 36. Sezione idrogeologiche trasversali della città di Bogotà (Alcaldia Mayor de Bogota, 2010)

Nella mappa suddetta si può anche osservare in rosso il tratto principale della metropolitana linea 1, dove si apprezza che ci sono tre sezioni trasversali che incrociano l'asse principale della linea metropolitana 1 di Bogotà (presente in Figura 37). in questi si evidenza come il flusso dell'acqua e in direzione OVEST-EST, facendo capire che questo è perpendicolare all'asse della galleria di disegno.



Figura 37. Sezioni Trasversali della mappa idrogeologica. (Alcaldia Mayor de Bogota, 2010)

Nel caso della determinazione della velocità di flusso del acquifero si prendono in considerazione le perforazioni più vicini al tracciamento della linea metropolina (vedere Figura 38), queste hanno informazione della portata sotterranea.



Figura 38 Perforazioni d'interesse e i loro dati.

Di questa maniera si prende il valore medio di Q=2.9 L/s.

Ora bene tenendo conto delle caratteristiche geometriche del modello, cioè le dimensioni, si può trovare un valore stimato della velocita seguendo la procedura a continuazione.

$$Q = V \cdot A$$

Q Portata [m³/s] *V* Velocità [m/s] *A* Area della sezione trasversale al flusso [m²]

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{5.49}{100x1.4} \times \frac{0.001}{1} = 2.1x10^{-5} \frac{m}{s}$$

Per ricavare il gradiente idraulico e in conseguenza altezza di falda differenziale, si fa la seguente la seguente procedura.

$$V = k . i$$

V Velocità in [m/s]

K conducibilità idraulica, in questo caso si prende un valore standard per la sabbia, materiale di presenza maggiore nell'acquifero [m/s]

i gradiente idraulico [*adim*]

$$i = \frac{V}{K} = \frac{2.1x10^{-5}}{2x10^{-3}} = 0.01$$

60

Capitolo IV

Simulazione numerica della attivazione termica della galleria

Questo capitolo ha come obiettivo realizzare la simulazione numerica del caso di studio. In questa maniera, si espongono gli aspetti generali del codice di calcolo agli elementi finiti FEFLOW, utilizzato per la modellazione numerica dei casi in questione. Inoltre, si introducono le caratteristiche principali del software, facendo riferimento all'interfaccia del programma e ai comandi dello stesso.

Poi si focalizza l'attenzione sul tratto della Linea 1 della metropolitana di Bogotá, ed in particolare sul tratto in sotterraneo già definito, si procede con la realizzazione del modello, definendo il tipo di analisi da svolgere, che im questo caso corrisponderebbe a quello di trasporto di calore, e costruendone, inizialmente, la geometria in base alle unità geometriche definite nel capitolo 3. Una volta prestabilite 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. I conci che costituiscono il rivestimento in calcestruzzo della galleria sono stati dotati di tubi serpentine, cioè scambiatori di calore all'interno dei quali scorre un fluido termovettore con temperatura di ingresso.

4.1. Descrizione generale del software FEFLOW

FEFLOW o Finite Element subsurface FLOW system è un software che consente di studiare i diversi processi di flusso e trasporto in mezzi porosi, in condizioni sature ed insature, questo è in grado di simulare dinamiche di flusso sotterraneo complesse, considerando il trasporto di massa oppure quello di calore. Tramite questo è possibile analizzare problemi legati al flusso di falda ed alle interazioni con le opere sotterranee in condizioni complesse, pertanto, specialmente indicato per affrontare aspetti termoidraulici nei problemi di ingegneria geotecnica. Permette anche di tenere in considerazione l'aspetto termico legato ai fenomeni di scambio di calore. FEFLOW richiede di imporre condizioni al contorno dinamiche sia per il flusso che per il trasporto di contaminanti, funzionalità che risulta particolarmente utile per la simulazione di opere in gallerie o lavori di scavo. Il software permette di studiare altri campi applicativi come sono lo studio dell'idrodinamica dei pozzi, l'intrusione del cuneo salino e il trasporto di inquinanti con densità variabile, funzionalità rilevante soprattutto nella simulazione di trasporto della fase miscibile degli idrocarburi.

L'interfaccia grafica consente di facilitare l'utilizzo del codice attraverso una serie di funzionalità di interazione con i sistemi di informazione CAD e GIS, permettendo maggiore comodità e certezza del lavoro, pure è possibile la visualizzazione tempo-variante dei risultati mono, bi o tri-dimensionali.

In termini delle analisi termici, FEFLOW permette lo studio della risorsa geotermica, dove addirittura include strumenti specifici e predeterminati per l'analisi di impianti a ciclo aperto e a ciclo chiuso. Ad esempio, è presente un comando chiamato *Borehole exchargers*, il quale consente di definire rapidamente il comportamento di una sonda geotermica, da cui si deve inserire le loro proprietà geometriche e unitamente alle proprietà termiche ed idrauliche del fluido termovettore, è possibile posizionarla all'interno del modello. Per applicazioni più specifiche, come il caso delle geostrutture energetiche tipo ENERTUN, è possibile inserire le serpentine o tubi all'interno del modello, dentro i quali scorre il fluido, queste vengono definite come "elementi discreti" o Discrete Features, i cui sono elementi monodimensionali ad elevata conducibilità idraulica che rappresentano delle fratture o delle condotte all'interno del modello.

FEFLOW 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.

Il Metodo degli Elementi Finiti, ovvero FEM (Finite Element Method), è una tecnica dell'Analisi Numerica disposta a raggiungere soluzioni approssimate per una pluralità di problemi, non solo di Ingegneria, ma anche di Fisica, Astronomia. Originariamente È stato sviluppato per studiare il campo tensionale nelle strutture aeronautiche, poi esteso ed applicato all'immenso campo della Meccanica dei mezzi continui. Per la sua varietà di impiego e duttilità quale strumento di analisi, è stato sviluppato ed è attualmente utilizzato nelle istituzioni di educazione superiore, ricerca e nell'Industria. In numerosi problemi fisici e soprattutto in quelli ingegneristici risulta sufficiente ottenere soluzioni numeriche approssimate, piuttosto che soluzioni analitiche esatte di difficile utilizzo pratico.

Il FEM nasce negli Anni '60, ma successivamente allo sviluppo degli strumenti informatici, ha una evoluzione ed uno sviluppo esponenziali, producendo notevole interesse per il vasto numero di campi in cui è possibile applicare i suoi principi. L'uso del FEM si afferma come uno degli strumenti migliori per l'indagine quei sistemi complessi, per i cui le sperimentazioni in laboratorio comporterebbero spese eccessive, difficoltà logistiche e difficoltà legate alla misurazione fisica delle varie grandezze. La generalità del metodo, inizialmente sviluppato dagli ingegneri e successivamente dimostrata anche dai matematici, ha permesso moltissimi studi ed applicazioni, aprendo la strada a nuovi filoni di ricerca che attualmente affrontano problematiche di notevole interesse di natura teorica e pratica (Bacchetto, n.d.).

In FEM il dominio è l'unione di tanti sottodomini di forma elementare, vedere Figura 39.



Figura 39 Esempio del dominio nel metodo FEM.

L'uso del FEM come si è detto prima è un potente strumento per la risoluzione di problemi ingegneristici, teoricamente parlando, le equazioni differenziali sono lasciate immutate mentre il dominio è discretizzato, cioè visto come il collegamento di sottodomini di forma elementare. In un problema al continuo, la variabile di campo, come sono la velocità, lo spostamento, la pressione o la temperatura, è funzione di ciascun generico punto del dominio di definizione, di conseguenza il problema presenterebbe un numero infinito di incognite; il processo 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, mediante interpolazione, ed esatta ai nodi, per mezzo della funzione di forma (Bacchetto, n.d.).

La modellazione del problema in FEFLOW, mediante il metodo FEM, richiede lo sviluppo di vari passaggi per la costruzione del modello. Detto ciò, diventa essenziale la corretta 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.

Prima di tutto si deve creare il modello in base alla geometria del problema, poi e necessario discretizzare questo tramite la creazione della "mesh", cioè la maglia geometrica costituita dai vari elementi finiti come visto nella Figura 39; la mesh può essere generato in diversi dimensioni, e la precisione dei risultati verrà migliorata in quanto più ottimizzata siano gli elementi di questa, ma sarà anche più impegnativo ed è richiesto più tempo, portando ad un inutile sovraccarico di calcoli, per cui si deve trovare l'equilibrio. Una volta generata la mesh, si deve approssimare la variabile principale lungo l'elemento, quindi si impostata una legge di cambiamento della variabile che generalmente è di tipo polinomiale; più elevato il grado del polinomio con cui si approssima la variabile, aumenta la precisione dei risultati ma anche la complessità di impostazione del modello. Dopo, vanno combinate le equazioni del singolo elemento con quelle che dell'insieme dei vari elementi; così si ricava un unico sistema di equazioni, tra le cui incognite ci 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 le soluzioni ai nodi.

4.2. Interfaccia e comandi FEFLOW

L'interfaccia grafica del codice FEFLOW è composta di un gran numero di comandi, che permettono di costruire gran varietà di modelli geometrici di diversa complessità, di dare diverse proprietà a seconda dei materiali che interessano, molteplici condizioni iniziali ed al contorno. Altro aspetto a considerare è la possibilità di estrapolare un ampio volume di risultati, guardando l'avanzamento della simulazione; il tutto è sempre visionabile tramite le finestre di visualizzazione che permettono un'ispezione del modello che si sta costruendo da diversi angoli e perspettive. Nella Figura 40 si fa vedere come inizialmente si presenta il software, anche se riesce ad apprezzare i principali comandi, questi hanno diverse utilità per configurare il modello.

rockstation2 (130.192.29.33) - service mode	- 🗆 X
a 🗑 🕸 🛱 🖬 🙃 🙆 🗐 🔜 🖬 🗛 🖪	0 130.192.29.33
A FEFLOW 72 @ ROCKSTATION2 - [Perfil 11" - Supermesh] - [Perfil 12" - Sice]]	0 2 2
File Edit View Mesh Simulation Scripting Tools Window Help	6
	* * < · · · · · · · · · · · · · · · · ·
2	🗖 🛦 🕸 🗇 🍐 🔯 🖸 - 🛃 d
Selectors 8 ×	Meshing 8 ×
Element Selections Current Element Selection	Triangle 💌 😤 👥 👾 🗶 🖻 🔮 🌰
tunel concreto	From Supermesh Elements
A Charles Colorian	Supermesh Group1 Line1 Line2
4 Join-	From Element Selection
Current Join-Edge Selection	View Components Meshing
Slice-Face Selections	Period Budget 8 ×
Join-Face Selections	Domain of Interest (DOI)
Isige selections Convert Edge Selection	Domain • 💥
Face Selections Current Discrete Feature Sel.,	Active [m1] E
Pr Sel Deor En	Distributed Sirk(-)/Source(+)
Maps & X	Storage Capture(-)/Release(+)
	Tubalance
Suptement Suptement Suptement Cefault Default Default AutoCAD DDF Files Cefault	Budget Period
Default	~ w v [0]
Determined and the second seco	Subdomain Boundary Period Budget 8 ×

Figura 40. Schermata standard di FEFLOW.

Nei pannelli laterali si trovano alcuni menù che permettono:

- Selections: finestra a sinistra in alto, questo permette, come il suo nome lo dice, la selezione delle diverse unità spaziali che costituiscono il modello, ben sia elementi del mesh, nodi, bordi, fasce degli elementi (nel caso di analisi 3D) eppure i discreti features.
- Maps, data: sempre sulla sinistra ma in basso, questa finestra permette di visualizzare i diversi dati che sono stati importati dai software di disegno tipo CAD o GIS, eppure di ingressare nei dati referente alle impostazioni del modello in termini di proprietà di materiali, condizioni al contorno ecc.
- Meshing: a destra in alto, si trova la finestra che permette generare la mesh sulla geometria inserita e lavorata prima, più in avanti si spiega meglio come funziona questa.
- Visualizzazione: localizzata nella parte centrale, qua si può visualizzare la geometria del modello, la mesh ed i valori di qualsiasi parametro selezionato per tramite una scala cromatica. Inoltre, si possono scegliere principalmente tra le tre diverse finestre di visualizzazione: una è dedicata alla geometria del modello non discretizzato (contiene solo punti, segmenti e figure geometriche), la seconda presenta la mesh in 2D ed una terza finestra permette di muoversi lungo il 3D.

4.3. Modellazione in FEFLOW

Per costruire un modello tramite FEFLOW, prima si deve creare un nuovo progetto. Il software permette di creare manualmente la geometria oppure di importarne una già creata, ad esempio tramite CAD in formato .dxf, vedere Figura 41. Nella prima opzione, bisogna definire un'area chiusa tramite il comando "Add Polygons" che permette di creare una figura dove si genererà la mesh. Gli elementi che vengono creati (punti, linee e poligoni) fanno parte della "Supermesh", che rappresenta lo spazio contenente le informazioni geometriche necessarie alla fine di generare mesh.

a Mew FEINI Model		8
Model Target Type Target type selec	tion	
Select the target type	of the new FEM model:	
2D or lat	vered 3D mesh	
🔘 Fully un:	structured 3D mesh	
Prace Enterb In		
Press Finish to	create a new FEM model with the current	settings.

🚯 New FEM Model
2D Model and 3D Layered Model Import type selection
Select the one of the following options:
🔘 Manual domain setup
Define 2D supermesh extent by origin and extents in X and Y directions.
Output Supermesh import from maps
Import maps and convert points, lines, and polygons to 2D supermesh items.
FEM mesh import from maps
Import non-overlapping maps of triangles and quads to create mesh elements from map polygons.
< Back Next > Finish Cancel

Figura 41. Creazione di un nuovo progetto.

Dopo il dominio si può generare la mesh tramite il comando Mesh Generato nella finestra a destra in alto, qua ci sono quattro scelte diverse:

- Advancing Front: è un semplice algoritmo di generazione mesh che non supporta linee o punti come riferimenti. Invece innalza la velocità di generazione e la produzione di elementi di forma molto regolare;
- Gridbuilder: è un algoritmo di triangolazione flessibile che supporta poligoni, linee e punti, così come la possibilità di creare raffittamenti del mesh in corrispondenza di particolari elementi.

- Triangle: è un codice di triangolazione svolto negli Stati Uniti di America che presenta particolari diversi vantaggi come che sia molto veloce, il supporto di combinazioni di poligoni, linee o punti nella Supermesh eppure permette di definire alcune preferenze e limiti nella generazione degli elementi come, ad esempio, il range relativo agli angoli interni che consente creare elementi più regolari, o il raffittimento del mesh solo in particolari elementi selezionati.
- Transport Mapping: permette la realizzazione di un mesh fatta da elementi quadrilateri; questa modalità richiede l'attivazione di un'opzione specifica dal menù Mesh.

È anche necessario definire il tipo di analisi che si richiede, questo si fa nella opzione di *Problem Settings*, impostando la tipologia di scambio, che potrà essere di massa o calore, le condizioni di mezzo totalmente saturo o parzialmente saturo e le condizioni di flusso in regime costante o transitorio, vedere Figura 42. Qua si possono impostare anche 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 42. Schermata da Problem Settings

Se si richiede il modello tridimensionale, questo può essere creato da uno bidimensionale, tramite il menu "Edit" – "3D Layer Configuration" (vedere Figura 43) poi si deve di definire il numero di strati a dividere il modello 3D, lo spessore di questi e la quota del piano superiore.



Figura 43. 3D layer configuration.

Dopo sarà necessario assegnare agli elementi del modello le proprietà dei relativi materiali; dalla finestra di dialogo si dovrà selezionare "Select Element", clic sul comando "Selection" per selezionare gli elementi a cui si dovrà assegnare una determinata proprietà. Si deve sempre estendere la selezione agli altri layer del modello e attraverso il comando "Copy to Slice/Layer". Dal pannello "Data", vedere Figura 44, si assegnano i valori alle variabili come temperatura, pressione, le condizioni al contorno e le proprietà termiche ed idrauliche dei materiali.



Figura 44. Panello Data

Le condizioni al contorno da definire sono legate sia al flusso di un fluido "Fluid flow" che al trasporto di calore "Heat transport", vedere Figura 45.



Figura 45. Condizioni al contorno.

Dalla finestra "Data" è possibile creare "Discrete Features". Si deve scegliere fra tre diverse formulazioni: Darcy, Hagen-Poiseuille o Manning-Strickler. Questo comando serve per modellare le tubazioni dell'impianto geotermico, in quanto è possibile definire parametri termici ed idraulici associati a questo elemento, come il raggio idraulico, la capacità termica volumetrica del fluido, la conducibilità termica del fluido e la dispersività longitudinale, anche altre caratteristiche come la sezione trasversale (Figura 46).



Figura 46. Caratterizzazione Discrete Features.

Per ispezionare e verificare i parametri inseriti all'interno del modello, è possibile usare il comando "Inspect Nodal/Element Values", in alto a sinistra nella finestra di dialogo; mantenendo selezionata dal pannello "Data" la proprietà o la variabile da visualizzare, si deve passare sopra i vari nodi del modello e cosi è possibile leggere il valore.

Dopo la creazione modello, si passa alla fase di analisi numerica che permetterà di estrapolare i risultati. Tramite il comando "Start Simulation", si fa partire la simulazione della durata impostata, con il comando "Record Properties" si possono decidere gli istanti temporali di cui si vogliono i risultati ; anche si può salvare il risultato della simulazione in un file di tipo ridotto, in cui la variazione dei risultati di output nel tempo viene salvata solo per gli "Observational Points", cioè determinati nodi di cui si vogliono conoscere i valori di alcune variabili, e per quei punti, tramite "Charts", è possibile plottare il valore dei dati di output contro il tempo.

4.4. Realizzazione dei modelli della metropolitana di Bogotá

I modelli tridimensionali che si sono costruiti prendono in esame un anello in calcestruzzo profondo di 1,4 m. La scelta di analizzare un solo anello invece da una serie di questi, dipende in sostanza, dalla direzione del flusso di falda rispetto all'asse della galleria; in questo modo come si è detto prima, questa è perpendicolare. Questa condizione permette di considerare l'interno della galleria un ambiente addiabatico. In termodinamica si definisce come un sistema chiuso che non può scambiare calore con l'ambiente esterno, in questa maniera si aspetterebbero gli stessi risultati facendo la modellazione anche con più conci energetici.

Il dominio dei modelli considera una larghezza di 140 m ed una profondità di 100 m per tutti; le dimensioni adottate servono a garantire che i fenomeni che si analizzano nell'intorno della galleria non siano influenzati dai 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 20 metri dalla superficie per tutti i modelli considerati.

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 (vedere Figura 47).
Capitolo IV Simulazione numerica della attivazione termica della galleria

Problem Summary Problem Class Simulation-Time Control Numerical Parameters	Display preferences Simulation Time	Calendar D Reference time	ate/Time :: 2017-09-04 17:42:21.895 *	0			
Anisotropy Settings Transport Settings	Initial simulation time: 0 [d]					
Other Settings	Constant time steps						
Field-Line Computation	Varying time steps						
Map Settings	Automatic time-step control						
Editor Settings	Initial time-step length:	1e-06 [d]					
	Final simulation time:	3650 [d]					
	Predictor-corrector scheme						
	 First-order accuration Second-order accuration 	te (FE/BE) irate (AB/TR)					
	Growth factor between	n subsequent time steps (>1)					
	Our Unrestricted	🔘 Maximum:					
	Time-step size						
	Our Content of Cont	🔘 Maximum:					
	Fully implicit vs. semi-impl	idt					
	Number of fully implicit ti to semi-implicit <i>Crank-Nic</i>	me steps before switching					

Figura 47. Problem settings della modellazione.

Per semplificare e dare anche più precisione nella creazione del modello si è fatto uso del software AutoCAD, attraverso il quale sono state disegnate diversi componenti della Supermesh, che poi sono state importati direttamente a FEFLOW come si fa vedere nella Figura 48.

Convert	Title	Туре	Path
V	externa tunelpoligo	<multiple> <multiple></multiple></multiple>	C:\Users\Juan Camilo\Desktop\tesis juan\perfi. C:\Users\Juan Camilo\Desktop\tunelpoligono
		< Back	Next > Finish Cancel

Figura 48 Importazione files .dxf in FEFLOW.

A continuazione si menzionano gli elementi che sono stati importati:

- Rettangolo esterno che rappresenta il dominio del modello, vedere Figura 49;
- Quattro circonferenze concentriche (Figura 50): queste sono state formate da un poligono di 30 lati, con l'obbiettivo di farla assomigliarsi il più possibile ad un cerchio, questo perché FEFLOW non riconosce cerchi perfetti al momento della generazione della mesh e quindi così si potessero avere dei segmenti di dimensione abbastanza piccola da approssimare sufficientemente bene il profilo circolare dell'anello in calcestruzzo e delle tubazioni inserite all'interno. Le 4 circonferenze sono state fatte per poter rappresentare le diverse configurazioni che ENERTUN può ammettere, cioè, serpentine in configurazione "Air" oppure in configurazione "Ground". Il diametro interno della galleria è di 10 m e lo spessore dei conci di 30 cm; alla fine le serpentine sono posizionate nella configurazione "Ground" dei conci ENERTUN ad una distanza dall'estradosso del rivestimento pari a 10 cm.



Figura 49. Dominio del Supermesh.

Capitolo IV Simulazione numerica della attivazione termica della galleria



Figura 50. Circonferenze come poligoni.

Dopo fare rigorosamente la Supermesh, si può procedere a creare la mesh mediante il comando Triangle, ottenendo il risultato che si vede nella Figura 51.



Figura 51. Mesh generata tramite Triangle.

La superficie dell'aria interna della galleria è stata considerata come una sezione vuota. Per fare questo, FEFLOW permette di cancellare elementi del mesh, su cui non verrà fatto nessun'analisi, per questo scopo, si devono selezionare proprio quelli che sono all'interno della prima circonferenza o l'intradosso della galleria (vedere Figura 52).

Capitolo IV Simulazione numerica della attivazione termica della galleria



Figura 52 Selezione ed eliminazione degli elementi del mesh.

È stata poi effettuata la discretizzazione tramite il comando "Mesh Generator", impostando una mesh di tipo "Triangle". Per realizzare il modello tridimensionale sono stati creati 6 diversi layer, a cui corrispondono 7 "Slice". Lo spessore è di 0.1 m per quelli 2 layer più esterne, mentre di 0.3 m per i 4 layer interni, che rappresenterebbero il copriferro e la separazione delle tubazioni rispettivamente. Cercando la riproduzione reale del della disposizione degli scambiatori di calore nei conci energetici ENERTUN (vedere Figura 53).



(a) ENERTUN GROUND

Figura 53. (a) configurazione Ground e (b) Air. Caratteristiche e dettagli.

C'è da risaltare che, le serpentine sono state disposte 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.

Il modello 3D si effettua a partire da quello bidimensionale, estendendo il dominio nella terza dimensione con il comando "3D Layer Configuration" e rispettando le condizioni geometriche descritte in precedenza. Nella Figura 54, si riporta la finestra di impostazione della configurazione tridimensionale del modello.



Figura 54. 3D configurazione.

Quindi il modello ottenuto è il risultato dell'estensione della sezione trasversale, nel plano x-y, in direzione z (vedere Figura 55). Questa vista consente di comprendere la reale geometria del modello, che può essere ruotato nello spazio in caso di necessità.



Figura 55. Modello 3D

Poi sono state inserite le tubazioni all'interno del concio di calcestruzzo, come "Discrete Features". Questa azione richiede di individuare manualmente la posizione delle tubazioni nello spazio, all'interno dei conci, e di garantirne la continuità geometrica per ogni anello, importante per simulare il passaggio del fluido termovettore. Sono anche stati inseriti un punto di ingresso ed uno di uscita per il fluido, nella slide 2 e 6 rispettivamente (vedere Figura 56), questi sono connessi alla condotta principale che trasporta il fluido termovettore dalla galleria alla pompa di calore e viceversa, da ricordare che questi elementi non sono stati modellati.



Figura 56 Punti di ingresso ed uscita del fluido termovettore.

Dopo aver selezionato tutti gli spigoli degli elementi del mesh che vanno a formare il circuito delle serpentine, sono state create le "Discrete Features" dal pannello "Data" (vedere Figura 57), all'interno del quale compaiono poi tutte le proprietà da associare agli elementi generati.



Figura 57 Tubazione dei conci energetici in FEFLOW

Per il monitoraggio della temperatura in alcuni punti di interesse al variare del tempo, sono stati collocati nel modello dei punti di osservazione "Observational Points", dove entra il fluido (1), e dove esce (2), come si vede in Figura 58.



Figura 58 Punti di osservazione

Subito dopo viene la fase del modello che consiste nell'assegnare i parametri termici ed idraulici agli elementi della mesh, questi sono riportati nel capitolo 3. Per questa procedura si devono selezionare tutti gli elementi della mesh che abbiano lo stesso valore del parametro e poi scrivere il valore numerico di questo. In questo modo si creano i diversi strati presenti in ogni modello, e anche gli anelli di calcestruzzo (vedere figure 59 e 60).



Figura 59. Selezione degli elementi per la definizione dell'anello di calcestruzzo.



Figura 60. Selezione degli elementi per la caratterizzazione dei vari strati.

Ora è necessario inserire le condizioni iniziali "Process Variables" e le condizioni al contorno "Boundary Conditions" del modello, i valori da imporre sono ottenute dai dati sulle temperature visti nel Capitolo 3, che mostrano come al di sotto dei primi 15 metri di profondità, la temperatura si mantiene costante, con un valore di 15 °C. Per questo motivo l'unica condizione iniziale da imporre a tutti i nodi del modello è una temperatura di 15°C. Essendo questa una condizione iniziale, non impedirà alla temperatura stessa di variare durante la simulazione. L'impostazione delle condizioni al contorno è stata definita come al seguito:

- o temperatura costante pari a 15°C nel bordo inferiore del modello (Temperature BC);
- o temperatura al piano campagna pari a 6.5 °C (Temperature BC);
- o temperatura di ingresso del fluido termovettore 6.5°C (Temperature BC);
- velocità di ingresso e di uscita dai due estremi liberi delle tubazioni pari a 0,7 m/s (Fluid Flux BC);
- carico idraulico assegnato ai nodi del bordo destro e del bordo sinistro del modello (Hydraulic-head BC).

Per la definizione del carico idraulico si parte dal valore del gradiente idraulico ricavato in capitulo 3. Alla fine, la altezza di falda differenziale:

$$i = \frac{\Delta H}{L}$$

Dove L corrisponde alla larghezza del modello stabilita come 140 m, per cui:

$$\Delta H = L . i = 140 x 0.01 = 1.4 m$$

Di questa maniera la differenza di carico idraulico da inserire in ogni caso e di 1.4 metri rispetto alla falda originalmente stabilita.

Una maniera per corroborare che le condizioni siano state introdotte in maniera corretta, è vedere dove si trova la falda dopo l'inserimento delle condizioni al contorno tipo Hydraulic Head BC, se questa si ha ad un'altezza che non sia quella specificata nei profili di disegno si deve controllare che sia stata inserita in maniera coerente al sistema di riferimento stabilito.

CAPITOLO V Studio della attivazione termina della galleria

Definiti tutti i parametri richiesti per la realizzazione dei modelli, è possibile analizzare l'effetto che l'attivazione dell'impianto geotermico ha nei confronti dello scambio termico che si ha nel rivestimento galleria. Tramite la valutazione della differenza di temperatura che avrebbe il fluido termovettore, nel punto di ingresso ed in quello di uscita del singolo concio, dovuto alla sua circolazione all'interno delle tubazioni presenti nel rivestimento di calcestruzzo.

Le analisi svolte simulano la variazione delle temperature che si avrebbero in 1 anno di funzionamento. Le simulazioni prendono in considerazione la configurazione "Ground" "dei conci ENERTUN, descritta nel capitolo 2.

Il modello è realizzato usando le condizioni iniziali e al contorno indicate nel capitolo 4, alle quali vanno aggiunte quelle relative all'accensione del sistema geotermico. Quanto riguarda alla simulazione della 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, vedere Figura 61; nei punti di entrata si applica la condizione di "Temperature BC" ed una di "Fluid-flux BC" di -0,7 m/s (flusso entrante); nei punti di uscita si applica solo la condizione di "Fluid-flux BC" di 0,7 m/s (flusso uscente). Tenendo conto delle relazioni mostrate nel capitolo 2, che servono ad ottimizzare l'efficienza dell'impianto, sono state definite una temperatura di input 6,5 °C, in regime di riscaldamento, si ricorda che il sistema solo funzionerà per riscaldare, dovute alle condizioni climatiche della città di Bogotá.



Figura 61 Temperatura di input del fluido termovettore a funzionamento continuo.

5.1. Simulazione del sistema.

Dopo aver scritto tutte le condizioni di temperatura, flusso, dei materiali e dell'acquifero, e possibile modellare il funzionamento del sistema per vedere come si comporta, prima si fa vedere un riassunto delle condizioni imposte ad ogni modello e della geometria di ogni sezione d'interesse nelle figure Figura 62, 63 e 64.



Figura 62 Geometria e dimensione della sezione 1.



Figura 63 Geometria e dimensione della sezione 4.



Figura 64 Geometria e dimensione della sezione 5.

L'attivazione termica del rivestimento dei tunnel induce variazioni di temperatura all'interno del dominio. Queste modifiche sono state analizzate con attenzione per studiare l'impatto termico sull'ambiente circostante e il tasso di cambio del calore. In particolare, il calore (Qi) scambiato in un determinato momento viene calcolato dalla temperatura inlet dei tubi (Twi) e dalla temperatura di uscita (Twf) entro la seguente equazione:

$$Q = m c_w |Twi - Twf|$$

m rappresenta la tassa di flusso di massa dentro dei tubi [kg/s] *c*_w Calore specifico del fluido termovettore [J/K/kg]
il tasso di flusso di massa si può rappresentare come:

$$m = p_w v_w A_p$$

 p_w densità del fluido termovettore [kg/m³]

 v_w velocità del fluido termovettore [m/s]

 A_p area della sezione trasversale dei tubi $[m^2]$

Diventando l'equazione:

$$Q = p_w v_w A_p c_w |Twi - Twf|$$

Si ricorda che i parametri del fluido termovettore sono uguali a quelli dell'acqua.

Ora bene, la temperatura di ingresso e di uscita si ricava dopo la modellazione del software FEFLOW, dove vengono fuori i risultati presenti nelle Figura 65, 66 e 67.



Figura 65. Temperatura inlet ed outlet sezione 1

 $Twi = 6.5 \ ^{\circ}C$ $Twf = 7.0 \ ^{\circ}C$



Figura 66 Temperatura inlet ed outlet sezione 4.

 $Twi = 6.5 \ ^{\circ}C$ $Twi = 6.7 \ ^{\circ}C$



Figura 67. Temperatura inlet ed outlet sezione 5.

```
Twi = 6.5 \ ^{\circ}CTwi = 7.5 \ ^{\circ}C
```

La differenza di temperatura calcolata dopo 365 giorni di funzionamento è compresa tra 0.2 e 1.1°C che corrispondono a un calore scambiabile di 0.5, 0.2 e 1.1 kW per le sezioni 1, 4 e 5 rispettivamente, come si può vedere in Tabella 13.

Sezione	T _{wi} -T _{wf} [K]	Potenza totale scambiata Q [kW]	Potenza scambiata al metro quadro Q [W/m2]	Potenza scambiata al metro lineare di galleria Q [W/m]
1	0.5	0.5	16.0	342.0
4	0.2	0.2	6.4	136.8
5	1.1	1.1	35.1	752.5

TT 1 11	10	C 1				
Tabella	13	Calore	scambiato	per	ogni	sezione.

Tenendo conto della lunghezza afferente ad ogni sezione, si disegna lo schema presente in Figura 68, in cui si può vedere la quantità di potenza scambiata per ogni sezione e la sua distanza di competenza.



Figura 68 Rappresentazione delle lunghezze afferenti per sezione.

Sulla base di questi valori, l'attivazione termica della linea 1 della metropolitana di Bogotá si rivela favorevole nelle sezioni 1 e 5, invece poco favorevole nella sezione 4. Analizzando ognuna si percepisce che la quantità di calore scambiato ha una dipendenza forte del terreno circondante della galleria, questo spiega il perché delle differenze di potenziale Q calcolato. Per la sezione 1 i suoli che accerchiano i conci ENERTUN sono limi ed argille, invece per la sezione 5 è solo limo. Per entrambi casi si vede una efficienza accettabile del sistema, dovuta principalmente alla permeabilità del materiale attorno allo scavo, che permette un flusso idraulico significativo. Inoltre il flusso è perpendicolare all'asse della galleria, per cui acconsente una ricarica termica continua del terreno, migliorando significativamente l'estrazione di calore.

Contrariamente, la sezione 4 presenta lo scavo della galleria circondato di argille a bassa permeabilità, difficoltando il flusso delle acquee sotterranee e pertanto diminuendo lo scambio di calore. Questo viene rappresentato di una riduzione pari al 66% ed al 85% nella potenza totale scambiata Q, rispetto alle sezioni 1 e 5 rispettivamente.

I tassi di cambio di calore calcolato sopra elencati sono stati diversi da quelli forniti da grafici di progettazione preliminari per le gallerie di energia (vedere Figura 69), dove secondo le condizioni iniziali di Bogotá, si potrebbero scambiare teoricamente circa di 60 W/m² invece da 35 W/m² risultato della modellazione (valore massimo presente in sezione 5). Tuttavia dovrebbe essere osservato che questi valori di riferimento sono stati ottenuti per circuiti di tubi e tempi operativi diversi. Inoltre, seguono delle analisi fatti in diversi casi europei, per cui non si considera affidabile una completa estrapolazione di questi nel contesto latinoamericano, dove addirittura si dovrebbe tenere conto che Colombia si trova molto vicino all'Ecuador.



Figura 69 Grafico di disegno preliminare per estrazione di calore in W/m² (Di Donna & Barla, 2016).

Per ogni sezione si definisce una lunghezza afferente, che si capisce come il tratto di galleria in cui è valida l'unita geotermica definita, consentendo di calcolare il fabbisogno termico sfruttabile lungo il percorso analizzato della linea 1 della metropolitana di Bogotá, di estensione totale pari a 4.1 km (vedere Tabella 14).

Sezione	Lunghezza afferente [m]	Potenza totale scambiata Q [kW]
1	1250	427.6
2	1200	164.2
3	1650	1241.6
	Σ	1833.4

Tabella 14 Potenza scambiata lungo il percorso della metropolitana di Bogotá.

Il fabbisogno termico totale che si riesce a coprire è pari a 1833 kW lungo i 4.1 km analizzati. Ipotizzando un funzionamento dell'impianto per 2920 ore annue in riscaldamento è stata determinata l'energia termica che il sistema sarebbe in grado di fornire ad una o più utenze. La stimazione delle ore di funzionamento si fa tenendo conto che l'uso dell'area studiata è innanzitutto commerciale e di uffici, inoltre l'orario lavorativo dei centri commerciali in Colombia comprende normalmente le ore compresse tra le 8:00 alle 23:00, pertanto si considerano 8 ore di funzionamento al giorno, 4 al mattino e 4 alla sera. Le ore vicine al mezzo giorno sono le più calde della giornata, per ciò non si prendono per l'analisi. Come risultato si ottiene un totale di 5352 MWh.

Secondo il Centro di Investigazione economica e sociale (FEDESARROLLO), in media i grandi centri commerciali della capitale colombiana richiedono circa di 140 000 kWh/mese di cui il 18% della energia viene utilizzata per la climatizzazione di essi (Martinez et al., 2013). Il consumo annue totale attorno 300 MWh. Una quantità di 17 centri commerciarli potrebbero essere riforniti di riscaldamento.

In termini di costi, il Dipartimento Nazionale di Pianificazione di Colombia (DNP), stima il costo medio della energia degli stabilimenti commerciali di Bogotá pari a 450 \$/ kWh (peso colombiano COP), che significherebbe un totale di 2.408.400.000 COP risparmiati in energia ogni anno, equivalente a circa 640.000 EUR (tassa rappresentativa per il giorno 1/09/2019).

CAPITOLO VI Conclusioni

Il lavoro di tesi ha avuto come obiettivo l'analisi dell'attivazione geotermica della Linea 1 della metropolitana di Bogotá e la stimazione del potenziale geotermico scambiabile da essa.

Al primo momento, si è presentata uno sguardo generale sui concetti di base della geotermia e sulle possibilità di sfruttamento di questa forma di energia. La tecnologia utilizzata sono i conci ENERTUN, sviluppati dal Politecnico di Torino. Le innovazioni più importanti di tale sistema consistono nel massimizzare lo scambio di calore con il terreno attraverso l'ottimizzazione del percorso delle tubazioni e la possibilità di variarne la posizione all'interno del rivestimento, per ottenere combinazioni diverse adatte alle situazioni particolari.

Per le analisi si è fatto uso del codice di calcolo FEFLOW. I modelli sono stati realizzati ricostruendo le caratteristiche del sottosuolo di Bogotá, facendo riferimento a precedenti studi effettuati sulle caratteristiche geologiche e geotecniche e ai dati forniti dal SGC, IDEAM e dalla Prefettura di Bogotá. Per la geometria del modello si è considerata una larghezza di 140 m ed una profondità di 100 m; il baricentro della galleria è posizionato a circa 25 m dal piano campagna. Essendo il modello tridimensionale, si è considerato un tratto di galleria composto da 1 anelli, della profondità totale di 1.4 metri. La direzione di flusso dell'acquifero e perpendicolare all'asse della galleria, permettendo di considerare l'interno di questa adiabatica.

Dopo il pertinente analisi dei parametri, si è potuto ricreare le condizioni di temperatura interna misurate nella galleria. Si sono svolte una serie di simulazioni che comprendono le 3 sezioni create con la configurazione "Ground" dei conci ENERTUN, a seguito si procede all'attivazione termica della galleria energetica. Le sezioni analizzate hanno riguardato il funzionamento continuo dell'impianto durante 365 giorni.

Nel caso di funzionamento continuo dell'impianto, si ottiene un aumento nella temperatura di uscita del fluido massimo di circa 1.1°C per la sezione 3 ed uno minimo di 0.5 °C per la sezione 2.

Il modello numerico sviluppato si è rivelato efficace nel quantificare il calore che può essere scambiato con il sottosuolo. Grazie alle condizioni favorevoli del flusso idraulico a Bogotá, il sistema ENERTUN può scambiare tra 16, 6.4 e 35.1 W/m² di rivestimento, rispettivamente per le sezioni 1, 2 e 3, consentendo di coprire un fabbisogno termico di 1833 kW in riscaldamento lungo i 4.1 km di percorso analizzato. La variazione della temperatura della falda nell'intorno della galleria è discreta, con cambiamenti minori di 5°C a 5 m di distanza dal contorno della galleria. Con l'impianto funzionando 8 ore al giorno si riescono a scambiare un totale di 5352 MWh, che consentirebbero di fornire energeticamente le necessità di climatizzazione per 17 centri commerciali a Bogotà, rappresentando un risparmio in termini economici di circa 600.000 euro.

La lunghezza dei tunnel analizzati è relativamente breve rispetto allo sviluppo pianificato di Bogotá rete metropolitana e l'analisi non ha tenuto conto dell'attivazione termica delle stazioni. In particolare, l'attivazione termica può essere estremamente conveniente in quanto che il rivestimento dei tunnel possono essere facilmente attivati termicamente a bassi costi aggiuntivi.

Considerando la natura locale della sorgente di calore, le gallerie energetiche possono essere efficacemente adottate per il teleriscaldamento di aree urbane densamente popolate. Di conseguenza, i tunnel termo-attivi sono una promettente tecnologia per le energie rinnovabili che può aiutare nella riduzione delle emissioni dei gas serra, soprattutto in città come Bogotá che hanno uno sviluppo significativo. Come la rete metropolitana di Bogotá è ancora in espansione, i risultati presentati sono promettenti. Anche se questo studio semplificato rappresenta una valutazione preliminare delle prestazioni del sistema, i valori ottenuti sono incoraggianti.

Finalmente sono previsti ulteriori lavori per valutare l'influenza termoidraulica delle gallerie che era lo scopo dello studio attuale. Perfezionamento della stratigrafia, dei profili di temperatura di ingresso e dei parametri idraulici e termici dell'acquifero devono essere considerati in futuro. Prove su scala reale sulle sezioni del tunnel ad attivazione termica fornirebbero inoltre una prova precisa della fattibilità dell'uso del tunnel di energia a Bogotá.

Riferimenti bibliografici

- Abril Castilblanco, M. Á. (2017). *Estudio sobre la generación de energía geotérmica para aprovechamento en el sector de la construcción y las cimentaciones*. Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia.
- Adam, D., & Markiewicz, R. (2009). Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers. *Geotechnique*, *59*, 229–236.

Alcaldia Mayor de Bogota. (2010). Mapa hidrogeológico de la ciudad de Bogota.

- AMB. (2010). Diseño conceptual de la red de transporte masivo metro y diseño operacional, dimensionamiento legal y financiero de la primera línea del metro en el marco del sistema integrado de transporte publico-SITP- para la ciudad de Bogota. Bogotá, Colombia.
- Auer, J. (2010). Geothermal energy Construction industry a beneficiary of climate change and energy scarcity. *Energy and Climate Change. Deutsche Bank Research*, 7(6), 48–51. https://doi.org/10.1016/S1471-0846(06)70660-6
- Bacchetto, A. (n.d.). Introduzione Al Metodo Degli Elementi Finiti E Alla Modellazione FEM.
- Barla, M., & Di Donna, A. (2015). Gallerie energetiche in ambiente urbano. Iarg.
- Barla, M., & Di Donna, A. (2018). Energy tunnels : concept and design aspects. *Underground Space*. https://doi.org/10.1016/j.undsp.2018.03.003
- Bogotá Cómovamos. (2016). Informe de Calidad de vida de Bogotá. Bogotá, Colombia.
- Brandl, H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Geotechnique 56*, (2), 81–122.
- DANE. (2018). Boletín técnico Licencias de Construcción ELIC. Bogotá, Colombia.
- Di Donna, A. (2014). Constructive recommendations for optimized and reliable heat exchanger pile systems. Suisse.
- Di Donna, A., & Barla, M. (2016). The role of ground conditions and properties on the efficiency of energy tunnels. *Environmental Geotechnics*, *3*.
- Dicksinon, M., & Fanelli, H. (2004). *Che cos'è l'energia geotermica*. Pisa, Italia: Istituto di Geoscienze e Georisorse.

- Domenico, P. ., & Schwartz, F. . (1990). *Physical and Chemical Hydrogeology*. New York City: John Wiley & Sons.
- Gao, J., Zhang, X., Liu, J., Li, K. S., & Yang, J. (2008). Thermal performance and ground temperature of vertical pile-foundation heat exchangers: A case study. *Applied Thermal Engineering*, (28(17– 18), 2295–2304).
- Gómez, E. S. (2015). El proyecto del metro de Bogotá. Bogot.
- Google Maps. (2018). Google Maps. US Dept of State Geographer.
- Guerrero Alarcon, J. E. (2014). Gestão dos riscos geomecânicos devidos à escavação de túneis urbanos: aplicação ao metrô de Bogotá. Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- Havel, F. (2004). Creep in soft soils. (34), 210.
- INGEOMINAS. (1997). Microzonificacion sismica de santa fe de Bogota. Bogotá, Colombia.
- ixtract. (2014). Drilling through the city.
- Kovačević, M. S., Bačić, M., & Arapov, I. (2012). Possibilities of underground engineering for the use of shallow geothermal energy. *Građevinar*, *64*(2012), 1019–1028.
- Lindal, B. (1973). Industrial and other applications of the geothermal energy. *Geothermal Energy*, 135–145. París,Francia: UNESCO.
- Lombardi, G. (2007). Evoluzione della costruzione di opere sotterranee (p. 32). p. 32. Milano, Italia.
- Martinez, A., Afanador, E., Zapata, J. G., Nunez, J., Ramirez, R., Yepes, T., & Garzon, J. C. (2013). *Análisis de la situación energética de Bogotá y Cundinamarca*. Bogotá.
- Pahud, D. (2002). Geothermal energy and heat storage: SUPSI-DCT-LEEE. *Laboratorio Di Energia, Ecologia Ad Economia*.
- Pralle, N., & Franzius, J. N. (2017). Turning segmental tunnels into sources of renewable energy. Institution of Civil Engineers ICE, (September). https://doi.org/10.1680/cien.2011.164.1.35
- Rees, S., Adjali, M., Zhou, Z., Davies, M., & Thomas, H. R. (n.d.). Ground heat transfer effects on the thermal performance of earth-contact structures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *4*.
- Tinti, F., Boldini, D., Ferrari, M., Lanconelli, M., Kasmaee, S., Bruno, R., ... Zurlo, R. (2017). Tunnelling and Underground Space Technology. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 70, 182–203.
- Triana, E., & Chaparro, N. A. (2018). Análisis demográfico y proyecciones poblacionales de Bogotá. Bogotá, Colombia.

Allegati

Allegato 1 Sondaggi geotecnici

Sondaggio	Coordinata Est	Coordinate Ovest	Elevazione s.mlm	Profondita totale m	Profondita media m	USCS	Osservazioni
IG39	101711,5	106041,1	2571,93	36	2.125	CL	
IG39	101711,5	106041,1	2571,93	36	2.95	CL	
IG39	101711,5	106041,1	2571,93	36	3.95	SM	
IG39	101711,5	106041,1	2571,93	36	4.95	GM	
IG39	101711,5	106041,1	2571,93	36	6.2	CL	
IG39	101711,5	106041,1	2571,93	36	7.225	CL	
IG39	101711,5	106041,1	2571,93	36	8.225	CL	
IG39	101711,5	106041,1	2571,93	36	9.7	MH	
IG39	101711,5	106041,1	2571,93	36	11.2	ML	
IG39	101711,5	106041,1	2571,93	36	12.725	СН	
IG39	101711,5	106041,1	2571,93	36	15.7	ML	
IG39	101711,5	106041,1	2571,93	36	17.2	SM	
IG39	101711,5	106041,1	2571,93	36	18.7	SM	
IG39	101711,5	106041,1	2571,93	36	20.2	SM	
IG39	101711,5	106041,1	2571,93	36	23.225	СН	
IG39	101711,5	106041,1	2571,93	36	24.725	СН	
IG39	101711,5	106041,1	2571,93	36	26.225	СН	
IG39	101711,5	106041,1	2571,93	36	29.15	ML	
IG39	101711,5	106041,1	2571,93	36	30.65	CL	
IG39	101711,5	106041,1	2571,93	36	32.225	CL	
IG39	101711,5	106041,1	2571,93	36	33.7	CL	
IG39	101711,5	106041,1	2571,93	36	35.2	CL	
IG44	101327,6	104138,4	2575,84	25.5	2.035	CL	
IG44	101327,6	104138,4	2575,84	25.5	2.6	CL	
IG44	101327,6	104138,4	2575,84	25.5	3.12	CL	
IG44	101327,6	104138,4	2575,84	25.5	3.27	CL	
IG44	101327,6	104138,4	2575,84	25.5	3.35	CL	
IG44	101327,6	104138,4	2575,84	25.5	3.45	CL	
IG44	101327,6	104138,4	2575,84	25.5	3.75	CL	
IG44	101327,6	104138,4	2575,84	25.5	4.205	СН	
IG44	101327,6	104138,4	2575,84	25.5	4.43	СН	
IG44	101327,6	104138,4	2575,84	25.5	5.02	CL	

IG44	101327,6	104138,4	2575,84	25.5	5.785	СН	
IG44	101327,6	104138,4	2575,84	25.5	6.55	СН	
IG44	101327,6	104138,4	2575,84	25.5	6.95	СН	
IG44	101327,6	104138,4	2575,84	25.5	7.2	СН	
IG44	101327,6	104138,4	2575,84	25.5	8.12	MH	
IG44	101327,6	104138,4	2575,84	25.5	8.785	MH	
IG44	101327,6	104138,4	2575,84	25.5	9.155	MH	
IG44	101327,6	104138,4	2575,84	25.5	9.835	MH	
IG44	101327,6	104138,4	2575,84	25.5	10.155	MH	
IG45	101188,1	103852,8	2574,4	26.5	2.15	CL	
IG45	101188,1	103852,8	2574,4	26.5	3.25	CL	
IG45	101188,1	103852,8	2574,4	26.5	4.35	MH	
IG45	101188,1	103852,8	2574,4	26.5	4.8	MH	
IG45	101188,1	103852,8	2574,4	26.5	5.5	MH	
IG45	101188,1	103852,8	2574,4	26.5	6.45	MH	
IG45	101188,1	103852,8	2574,4	26.5	7.7	CL	
IG45	101188,1	103852,8	2574,4	26.5	8.75	SP	
IG45	101188,1	103852,8	2574,4	26.5	9.75	СН	
IG45	101188,1	103852,8	2574,4	26.5	11	СН	
IG45	101188,1	103852,8	2574,4	26.5	12.25	CL	
IG45	101188,1	103852,8	2574,4	26.5	14	СН	
IG45	101188,1	103852,8	2574,4	26.5	15.9	СН	
IG45	101188,1	103852,8	2574,4	26.5	17.4	GP	
IG45	101188,1	103852,8	2574,4	26.5	18.25	СН	
IG45	101188,1	103852,8	2574,4	26.5	19	СН	
IG45	101188,1	103852,8	2574,4	26.5	20.75	СН	
IG45	101188,1	103852,8	2574,4	26.5	22.25	СН	
IG45	101188,1	103852,8	2574,4	26.5	23.75	СН	
IG45	101188,1	103852,8	2574,4	26.5	25.5	CL	
IG47	101106,5	103046,4	2585	25	1.8	MH	
IG47	101106,5	103046,4	2585	25	2.6	MH	
IG47	101106,5	103046,4	2585	25	3.95	SP	
IG47	101106,5	103046,4	2585	25	5.3	GP	
IG47	101106,5	103046,4	2585	25	6.8	CL	
IG47	101106,5	103046,4	2585	25	8	CL	
IG47	101106,5	103046,4	2585	25	9.2	SP	
IG47	101106,5	103046,4	2585	25	1.85	GP	
IG47	101106,5	103046,4	2585	25	12.25	GP	
IG47	101106,5	103046,4	2585	25	15.75	GP	
IG47	101106,5	103046,4	2585	25	17.95	ML	
IG47	101106,5	103046,4	2585	25	19.95	CL	
IG47	101106,5	103046,4	2585	25	21.8	SP	
IG47	101106,5	103046,4	2585	25	23.1	ML	
IG47	101106,5	103046,4	2585	25	24.3	GP	
IG84	101427,6	105635,8	2569,08	40.8	2.2	SM	
IG84	101427,6	105635,8	2569,08	40.8	3.3	SM	

IG84	101427,6	105635,8	2569,08	40.8	3.5	ML	
IG84	101427,6	105635,8	2569,08	40.8	3.7	ML	
IG84	101427,6	105635,8	2569,08	40.8	4	ML	
IG84	101427,6	105635,8	2569,08	40.8	4.3	ML	
IG84	101427,6	105635,8	2569,08	40.8	4.8	ML	
IG84	101427,6	105635,8	2569,08	40.8	6	ML	
IG84	101427,6	105635,8	2569,08	40.8	6.9	ML	
IG84	101427,6	105635,8	2569,08	40.8	7.1	ML	
IG84	101427,6	105635,8	2569,08	40.8	7.3	ML	
IG84	101427,6	105635,8	2569,08	40.8	7.6	ML	
IG84	101427,6	105635,8	2569,08	40.8	7.97	ML	
IG84	101427,6	105635,8	2569,08	40.8	8.22	ML	
IG84	101427,6	105635,8	2569,08	40.8	8.55	ML	
IG84	101427,6	105635,8	2569,08	40.8	9.8	MH	
IG84	101427,6	105635,8	2569,08	40.8	11.15	MH	
IG84	101427,6	105635,8	2569,08	40.8	11.55	MH	
IG84	101427,6	105635,8	2569,08	40.8	11.9	MH	
IG84	101427,6	105635,8	2569,08	40.8	12.07	MH	
IG84	101427,6	105635,8	2569,08	40.8	12.22	MH	
IG84	101427,6	105635,8	2569,08	40.8	12.55	MH	
IG84	101427,6	105635,8	2569,08	40.8	15.3	CL	
IG84	101427,6	105635,8	2569,08	40.8	16.1	CL	
IG84	101427,6	105635,8	2569,08	40.8	17.1	CH	
IG84	101427,6	105635,8	2569,08	40.8	17.3	CH	
IG84	101427,6	105635,8	2569,08	40.8	17.95	CH	
IG84	101427,6	105635,8	2569,08	40.8	18.805	ML	
IG84	101427,6	105635,8	2569,08	40.8	19.045	ML	
IG84	101427,6	105635,8	2569,08	40.8	20	ML	
IG86	101282,6	105057,1	2564	24	0.75	MH	
IG86	101282,6	105057,1	2564	24	2	MH	
IG86	101282,6	105057,1	2564	24	2.55	MH	
IG86	101282,6	105057,1	2564	24	2.65	MH	
IG86	101282,6	105057,1	2564	24	2.95	MH	
IG86	101282,6	105057,1	2564	24	4.6	ML	Presenza di sabbia
IG86	101282,6	105057,1	2564	24	6.1	ML	
IG86	101282,6	105057,1	2564	24	6.3	ML	
IG86	101282,6	105057,1	2564	24	6.5	ML	
IG86	101282,6	105057,1	2564	24	7.3	ML	
IG86	101282,6	105057,1	2564	24	8.45	MH	
IG86	101282,6	105057,1	2564	24	9.25	MH	
IG86	101282,6	105057,1	2564	24	9.8	MH	
IG86	101282,6	105057,1	2564	24	9.9	MH	
IG86	101282,6	105057,1	2564	24	10.8	MH	
IG86	101282,6	105057,1	2564	24	11.6	MH	
IG86	101282,6	105057,1	2564	24	11.9	MH	
IG86	101282,6	105057,1	2564	24	12.32	MH	

Allegati

IG86	101282,6	105057,1	2564	24	13.25	MH	
IG86	101282,6	105057,1	2564	24	14.3	CH	Presenza di sabbia
IG86	101282,6	105057,1	2564	24	14.8	CH	
IG86	101282,6	105057,1	2564	24	15.3	CH	
IG86	101282,6	105057,1	2564	24	15.5	CH	
IG86	101282,6	105057,1	2564	24	16.6	MH	
IG86	101282,6	105057,1	2564	24	17.8	MH	
IG86	101282,6	105057,1	2564	24	18	MH	
IG86	101282,6	105057,1	2564	24	18.2	MH	

Allegati



Allegato 3 Profili di temperatura.

SEZIONE 1



SEZIONE 4



SEZIONE 5

